

Utvärdering av programvara för optimering av komponent framställd genom additiv tillverkning

Filip Bäckström

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen

Utbildningsprogrammet för maskin- och produktionsteknik

Vasa 2024

EXAMENSARBETE

Författare: Filip Bäckström
Utbildning och ort: Maskin- och produktionsteknik, Vasa
Inriktning: Maskinkonstruktion
Handledare: Kenneth Ehrström, Yrkeshögskolan Novia
Andreas Gammelgård, Mirka Ab

Titel: Utvärdering av programvara för optimering av komponent framställd genom additiv tillverkning

Datum: 3.5.2024 Sidantal: 40 Bilagor: 8

Abstrakt

Detta examensarbete har gjorts på uppdrag av Bonded Abrasives-avdelningen på Mirka Ab under vintern och våren 2024. Inom företagets produktutveckling pågår kontinuerlig förbättring av bland annat tillverkningsprocesser, inklusive användning av additiva tillverkningsmetoder.

Syftet med arbetet var att utvärdera en programvara för optimering av komponenter framställd genom additiv tillverkning, med särskilt fokus på en programvara kallad nTopology. Genom utvärderingen skulle även kunskaperna inom programvarans funktioner breddas för att kunna tillämpas i kommande projekt.

Genom effektivisering av den additiva tillverkningsprocessen, exempelvis genom att minska materialåtgång och tillverkningstid, kan produktionskostnaderna minskas och effektiviteten ökas.

Målet med arbetet var att genomföra viktoptimering av rektangulära provbitar med tre olika gitterstrukturer. Modelleringen och optimeringen av provbitarna utfördes i Siemens NX och nTopology. Förutom optimeringen genomfördes även en finit elementanalys, specifikt en statisk analys på 29 strukturer. Syftet med analysen var att observera provbitarnas deformation under en given belastning, för att avgöra vilka tre strukturer som skulle undersökas närmare. Samtidigt genomfördes böjprov på provbitarna för att undersöka de mekaniska egenskaperna och hur de påverkades av optimeringen.

De viktoptimerade provbitarna och referensproven tillverkades genom additiv tillverkning, med en av de mest använda metoderna inom området. På vilket sätt de tillverkades bestämdes genom parametrar i ett skikttningsprogram kallat INTAMSUITE NEO.

Resultaten visar delvis förutsägbara trender. Minskad densitet leder till minskad materialåtgång, men tillverkningstiden ökar, speciellt för komplexa geometrier. Den faktiska materialåtgången visar sig vara mindre än den teoretiska, som angavs av skikttningsprogrammet. Det kan även noteras att den uppmätta deformationen är större än den som förutsågs i simuleringen. Elasticitetsmodulen minskar när densiteten minskar, och samma observationer görs för spänning-töjningskurvorna.

Arbetets syfte ansågs hade uppnåtts, då utvärderingen visade att viktoptimeringar och simuleringar kan genomföras i programvaran. Målet att minska tillverkningskostnaderna uppfylldes delvis, och resultaten möjliggjorde jämförelse av de mekaniska egenskaperna hos de viktoptimerade provbitarna.

Språk: svenska

Nyckelord: utvärdering, viktoptimering, additiv tillverkning, böjprov

BACHELOR'S THESIS

Author: Filip Bäckström
Degree Programme: Mechanical and Production Engineering, Vaasa
Specialization: Machine Construction
Supervisor(s): Kenneth Ehrström, Novia University of Applied Sciences
Andreas Gammelgård, Mirka Ltd

Title: Evaluation of Software for the Optimization of Components Produced by Additive Manufacturing

Date: 3.5.2024 Number of pages: 40 Appendices: 8

Abstract

This thesis is made on behalf of the Bonded Abrasives department in Mirka Ltd, during the winter and spring of 2024. Within the company's product development, there is continuous improvement of, for instance, manufacturing processes, including the use of additive manufacturing methods.

The purpose of the work was to evaluate a software for the optimization of components produced by additive manufacturing, with a particular focus on a software called nTopology. Through the evaluation, the knowledge of the software's functions would also be broadened in order to be applied in future projects.

By streamlining the additive manufacturing process, for example, by reducing material consumption and manufacturing time, production costs can be reduced, and efficiency increased.

The goal of the work was to carry out weight optimization of rectangular test pieces with three different lattice structures. The modeling and optimization of the test pieces was performed in Siemens NX and nTopology. In addition to the optimization, a finite element analysis was also carried out, specifically a static analysis of 29 structures. The purpose of the analysis was to observe the deformation of the test pieces under a given load, in order to determine which three structures should be investigated more closely. At the same time, bending tests were carried out on the test pieces to investigate the mechanical properties and how they were affected by the optimization.

The weight-optimized test pieces and reference samples were manufactured by additive manufacturing, one of the most widely used methods in the field. How they were manufactured was determined by parameters in a slicing program called INTAMSUITE NEO.

The results show partially predictable trends. Reduced density leads to reduced material consumption, but the manufacturing time increases, especially for complex geometries. The actual material consumption turns out to be less than the theoretical one, which was indicated by the slicing program. It can also be noted that the measured deformation is greater than that predicted in the simulation. The modulus of elasticity decreases as the density decreases, and the same observations are made for the stress-strain curves.

The purpose of the work was considered to have been achieved, as the evaluation showed that weight optimizations and simulations can be carried out in the software. The goal of reducing manufacturing costs was partially achieved, and the results allowed a comparison of the mechanical properties of the weight-optimized test pieces.

Language: Swedish

Key words: evaluation, lightweighting, additive manufacturing, bending test

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund.....	1
1.2	Syfte	1
1.3	Mål	1
1.4	Avgränsning	2
1.5	Företagsbeskrivning	2
1.6	Disposition.....	3
2	Teori	3
2.1	Additiv tillverkning.....	3
2.1.1	Introduktion och terminologi.....	3
2.1.2	Fördelar och nackdelar	4
2.1.3	Teknikens framtid	4
2.1.4	Tillverkningstid och kostnad	5
2.1.5	Fyllnadsgrad	5
2.1.6	Grupper av material.....	6
2.1.7	Att tänka på.....	8
2.2	Additiva tillverkningstekniker	9
2.2.1	Materialekstrudering.....	9
2.2.2	Fused Deposition Modeling, FDM.....	9
2.2.3	Printparametrar	10
2.2.4	Mekaniska egenskaper.....	11
2.3	nTopology.....	12
2.3.1	Introduktion och funktioner	12
2.3.2	Viktoptimering.....	12
2.4	Finita elementmetoden.....	13
2.4.1	Introduktion	13
2.4.2	FEA i praktiken.....	13
2.4.3	Typer av FEA.....	14
2.5	Böjprov.....	14
2.5.1	Spänning.....	15
2.5.2	Töjning.....	15
2.5.3	Böjmodul.....	16
3	Metod	17
3.1	Introduktion.....	17
3.2	Planering.....	17

3.3	Utrustning	17
3.3.1	Mjukvara	18
3.3.2	Hårdvara.....	18
3.4	Modellering.....	19
3.4.1	Yttre modell.....	20
3.4.2	Inre modell	20
3.5	Viktoptimering	20
3.5.1	Design av gitterstruktur	20
3.5.2	Villkor och kontroll av viktminskning	21
3.6	Finit elementanalys	22
3.6.1	Definiering av nät	22
3.6.2	Definiering av material.....	22
3.6.3	Definiering av kraft och förskjutningsbegränsningar.....	22
3.6.4	Statisk analys.....	23
3.6.5	Analysens resultat	23
3.7	Skikttningsprocess.....	25
3.7.1	Orientering av provbitar	25
3.7.2	Generering av g-kod	25
3.8	3D-printning.....	26
3.8.1	Undersökning av reproducerbarhet.....	26
3.8.2	Tillverkning av provbitar	26
3.8.3	Analys av provbitar.....	27
3.9	Böjprov.....	28
4	Resultat.....	29
4.1	Simulerad och faktisk deformation	29
4.2	Tillverkningstid, materialåtgång och faktisk optimering	30
4.3	Provbitarnas elasticitetsmodul.....	32
4.4	Spänning-töjningskurvor	34
4.5	Resultatdiskussion	35
5	Diskussion	35
5.1	Sammanfattning	35
5.2	Förbättringar	36
5.3	Förslag till vidare forskning	37
5.4	Slutord.....	37
6	Källförteckning.....	38

Figurförteckning

Figur 1.1. Mirkas logo. (Mirka, 2024b).	2
Figur 2.1. En översikt över när det är mest optimalt att använda additiv tillverkning med avseende på kostnad och noggrannhet jämfört med produktens komplexitet. (Godec m.fl., 2022, s. 5).	5
Figur 2.2. Grid fyllnadsmönster med olika grad av fyllnadsgrad. (Galvez m.fl., 2023, s. 2).	6
Figur 2.3. Klassifikation av material inom additiv tillverkning. (Redwood m.fl., 2020, s. 22).	6
Figur 2.4. Exempel på filament, nylonpulver och harts. (Redwood m.fl., 2020, s. 23).	7
Figur 2.5. Behovet av stödstruktur med avseende på överhäng. (Redwood m.fl., 2020, s. 32).	8
Figur 2.6. Översikt över de vanligaste additiva tillverkningsprocesserna och teknologierna. (Redwood m.fl., 2020, s. 19).	9
Figur 2.7. Olika orientering av provbit. Från vänster: ZYX-, XZY- och XYZ-riktning. (Zohdi & Yang, 2021, s. 19).	11
Figur 2.8. Jämförelse mellan trepunkts- och fyrapunktsböjprov.	15
Figur 3.1. Intamsys 3D-skrivare Funmat HT. (INTAMSYS, 2024a).	18
Figur 3.2. Universaltestmaskin av märket Shimadzu i serien AGX-V, med verktyg avsedd för dragprov monterade. (Shimadzu, 2024).	19
Figur 3.3. Yttre och inre modell med ett tvärsnitt i z-riktning.	19
Figur 3.4. Två olika celltyper med en tjocklek på 1 millimeter: Simple Cubic Foam och TPMS Diamond.	21
Figur 3.5. Viktoptimering på 40 % kontrollerad utgående från viktoptimerad och originell provbit.	21
Figur 3.6. Definierat nät applicerat på en provbit.	22
Figur 3.7. Definiering av materialet ABS.	22
Figur 3.8. Applicerad kraft och förskjutningsbegränsningar på en provbit.	23
Figur 3.9. Översikt över den utförda statistiska analysen.	23
Figur 3.10. Exempel på utförd statistisk analys av referensprovet, där området i mitten är det mest påverkade.	23
Figur 3.11. De strukturer som undersöktes, här med en viktminskning på 40 %.	24
Figur 3.12. Provbitarna tillverkades i XYZ-riktning för att maximera de mekaniska egenskaperna.	25

Figur 3.13. Undersökning av reproducerbarheten hos provbitarna genom jämförelse av applicerad kraft mot deformation.	26
Figur 3.14. Exempel på utfört trepunktsböjprov.....	28
Figur 3.15. Tvärsnitt av varje provbit efter utfört böjprov.	29
Figur 4.1. Jämförelse av elasticitetsmodulen mellan provbitar med olika strukturer och varierande grad av viktninskning. Från vänster: GS5, GS23, GS26.....	32
Figur 4.2. Spänning-töjningskurva för referensprov och viktoptimerade provbitar med en viktninskning på 40 %.....	34

Tabellförteckning

Tabell 2.1. Fysisk-mekaniska egenskaper hos ABS.	7
Tabell 2.2. Relation mellan skiktjocklek och munstyckets diameter.....	11
Tabell 2.3. Verktyg till förfogande för viktoptimering i nTopology.	13
Tabell 2.4. Tre huvudtyper av problem som finit elementanalys kan användas till.	14
Tabell 3.1. Referensprovet och provbitarnas uppmätta medeltalsvärden.	27
Tabell 3.2. Använda parametrar vid utförande av böjprov.	28
Tabell 4.1. Simulerad och faktisk deformation vid en belastning på 300 N.	29
Tabell 4.2. Tillverkningstiden i storleksordning för varje provbit.	30
Tabell 4.3. Faktisk materialåtgång i storleksordning och faktisk grad av viktoptimering för varje provbit.....	31
Tabell 4.4. Elasticitetsmodulen för de viktoptimerade provbitarna i jämförelse med referensprovet.	33

Bilageförteckning

Bilaga 1. Översikt över teknologier inom ramen för additiva tillverkningsprocessen materialextrudering.

Bilaga 2. Översikt över de vanligaste printparametrarna inom FDM-teknologin.

Bilaga 3. Fyra typer av gitterstruktur som används för olika ändamål i nTopology.

Bilaga 4. Resultat från den statistiska analysen vid de mest påverkade områdena på provbitarna.

Bilaga 5. Använda printparametrar för alla provbitar.

Bilaga 6. Provbitarnas teoretiska tillverkningstid och materialåtgång samt faktisk materialåtgång.

Bilaga 7. Spänning-töjningskurvor för referensprov och viktoptimerade provbitar vid en viktminskning på 30, 20 och 10 %.

Bilaga 8. Kraft-deformationskurvor vid en viktminskning på 40, 30, 20 och 10 %.

1 Inledning

I detta kapitel redogörs introduktionen till examensarbete. Introduktionen innehåller bakgrunden till arbetet, dess syfte och mål samt avgränsningar. En kortfattad disposition avslutar kapitlet.

Denna uppgift kom till liv under mitt sommararbete vid Bonded Abrasives-avdelningen på Mirka. Diskussioner uppstod kring användningen av programvaran nTopology, som jag hade tillgång till genom min pågående utbildning. Arbetet relaterar till mina studier genom att jag under min utbildning har behandlat ämnen som 3D-modellering, additiv tillverkning, olika typer av simuleringar, materialteknik och undersökning av mekaniska egenskaper.

1.1 Bakgrund

Arbetet genomfördes på uppdrag av Mirka Ab under vintern och våren 2024. Inom företagets produktutveckling pågår kontinuerlig förbättring av bland annat tillverkningsprocesser, inklusive användning av additiva tillverkningsmetoder. Genom att effektivisera den additiva tillverkningsprocessen, exempelvis genom att minska materialåtgång och tillverkningstid, kan produktionskostnaderna minskas och effektiviteten ökas.

1.2 Syfte

Syftet med detta arbete var att utvärdera en programvara för att optimera en komponent framställd genom additiv tillverkning, med särskilt fokus på en programvara kallad nTopology. Genom denna utvärdering skulle även kunskaperna inom programvarans funktioner breddas för att kunna tillämpas i kommande projekt.

1.3 Mål

Målet med arbetet var att viktoptimera rektangulära provbitar för att minska tillverkningskostnaderna genom att minska materialåtgången och tillverkningstiden. Samtidigt undersöktes de mekaniska egenskaperna hos provbitarna sinsemellan och med referensprov för att se hur de påverkades av optimeringen. Dessa egenskaper analyserades genom böjprov.

1.4 Avgränsning

För att tydligt definiera omfattningen av arbetet beslöts att skapa tre olika designers med gitterstrukturer, där två exemplar av varje design skulle tillverkas. Både provbitarna och exemplaren av referensprovet producerades genom additiv tillverkning, med identiska inställningar och i ABS-material.

1.5 Företagsbeskrivning

Mirka Ab grundades 1943 i Helsingfors, men produktionen kunde inte börja förrän efter kriget 1946, på grund av tekniska problem. Efter nästan 20 år flyttade företaget och dess produktion till Jeppo i Österbotten, där det fortfarande är beläget. År 1966 köptes Mirka upp av Keppo Ab, och 1973 genomfördes en fusion mellan företagen. (Mirka, 2024b).

Mirka är specialiserat på flexibla slipmaterial och har blivit kända genom patent för att vara det första företaget inom slipmaterialtillverkning som möjliggjorde dammfri ytbehandling. Utöver detta tillverkar företaget avancerade slip- och polermaskiner som kontinuerligt utvecklas. Mirka expanderar globalt och har nu 18 dotterbolag runt om i världen. Trots att över 97 % av produkterna säljs på export, fortsätter företaget att ha produktionsanläggningarna i Finland. Huvudkontoret och den största delen av produktionen är beläget i Jeppo, där även forsknings- och utvecklingsavdelningarna verkar. En del av produktionen är också belägen i Oravais, Jakobstad och Karis. (Mirka, 2024b). För närvarande är Mirka den största av de fyra affärsgrupperna inom den familjeägda koncernen KWH (KWH Group, 2024).

År 2017 etablerades Bonded Abrasives-avdelningen hos Mirka genom sammanslagningen med den italienska tillverkaren Cafro. Målet var att komplettera den befintliga produktportföljen och nå nya marknader. Mirka Cafro specialiserar sig på tillverkning av högkvalitativa precisionsartiklar och superslipmedel. För närvarande ligger huvuddelen av produktutvecklingen i Jeppo, medan produktionsanläggningen finns i Fino Mornasco i Italien, med cirka 80 anställda. (Mirka, 2024a).



Figur 1.1. Mirkas logo. (Mirka, 2024b).

1.6 Disposition

I detta kapitel presenteras arbetets innehåll kortfattat. I det första kapitlet får läsaren en introduktion till arbetet, där syftet och målet med arbetet presenteras. Dessutom beskrivs arbetets avgränsningar och en kortfattad företagsbeskrivning av Mirka, samt dispositionen av arbetet.

I det andra kapitlet återfinns den teoretiska bakgrund som utgör grunden för att uppnå syftet och målen med arbetet. Här behandlas ämnen såsom additiv tillverkning, viktoptimering i nTopology, finita elementmetoden och böjprov.

I det tredje kapitlet beskrivs de metoder och tillvägagångssätt som användes för att uppnå de mål som eftersträvades.

I kapitel 4 presenteras resultaten av utvärderingen, främst i form av tabeller och diagram. Dessutom innehåller kapitlet en diskussion av resultaten.

I det femte kapitlet presenteras en allmän diskussion om arbetet. En sammanfattning av arbetet ges, förbättringar som kunde ha genomförts diskuteras, förslag till framtida forskning förs fram, och avslutningsvis ges ett avslutande ord.

I kapitel 6 redovisas de källor som har använts i arbetet enligt APA-stilen.

2 Teori

I detta kapitel presenteras den teoretiska grund som har använts för att genomföra arbetet.

2.1 Additiv tillverkning

I detta kapitel förklaras grunderna inom additiv tillverkning, medan kapitel 2.2 går djupare in på ämnet.

2.1.1 Introduktion och terminologi

Additiv tillverkning, även kallad 3D-printning, är en tillverkningsmetod där en tredimensionell komponent skapas genom att bygga upp den skikt för skikt utifrån en digital CAD-modell. Denna teknik har utvecklats sedan andra halvan av 1980-talet för att

möta de växande kraven på marknaden. Under denna utvecklingsprocess har användningen av olika tillverkningsprocesser genomgått flera faser, vilket har lett till förändringar i terminologin. (Sahu, 2019, s. 3; Redwood, Schöffner, & Garret, 2020, s. 9; Godec, Gonzales-Gutierrez, Nordin, Pei, & Ureña Alcázar, 2022, s. 1). Från och med 2015 har terminologin standardiserats (Redwood m.fl., 2020, s. 20).

Additiv tillverkning anses vara mest lämplig för små och i vissa fall medelstora produktionsvolymerna, vilket beror på den specifika teknologin som används. Tillverkningsmetoden används huvudsakligen för snabb prototyp-tillverkning, men anses ha begränsad förmåga till reproducerbarhet, vilket innebär att tillverkade komponenter kan ha variationer på grund av olika faktorer såsom kylning och skevning under härdningsprocessen. (Redwood m.fl., 2020, s. 9). Få additivt tillverkade komponenter kan användas genast efter tillverkning utan någon typ av efterbehandling (Jalava, Orkas, Korpi, & Strakh, 2023, s. 2470).

2.1.2 Fördelar och nackdelar

En av de mest betydande fördelarna med tekniken är dess förmåga att tillverka komplexa geometrier som inte kan åstadkommas med konventionella tillverkningsmetoder. Till skillnad från konventionella tillverkningsmetoder krävs det inte externa verktyg eller fixturer för tillverkningen. I stället behövs endast en CAD-modell, en 3D-skrivare och tillhörande kringutrustning, vilket bidrar till minskade investeringskostnader. (Redwood m.fl., 2020, s. 7; Godec m.fl., 2022, s. 1; JuggerBot 3D, 2024b).

En av de främsta nackdelarna med additiv tillverkning är svårigheten att producera komponenter med samma material- och mekaniska egenskaper som de som tillverkas med konventionella metoder (Redwood m.fl., 2020, s. 9). Ytterligare en nackdel är den begränsade förmågan till reproducerbarhet, vilket diskuterades i kapitel 2.1.1.

2.1.3 Teknikens framtid

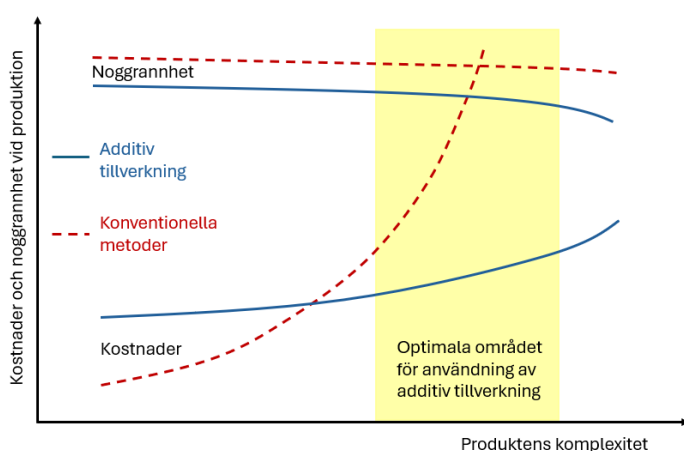
Effektiviseringen och förbättringen av produktionsprocesser, tillsammans med den ökande betydelsen av hållbarhet och miljövänliga lösningar, har lett till krav på minskade kostnader och kortare ledtider för utvecklings- och produktionscykler. Additiv tillverkning möjliggör just detta, samtidigt som den ger möjlighet till snabbare respons på marknadens

efterfrågan. Förutom dessa krav, finns också tidigare faktorer att beakta, såsom ständiga förbättringar av produktkvalitet och minimering av materialsvinn. (Godec m.fl., 2022, s. 1; JuggerBot 3D, 2024a). Det är tack vare dessa faktorer som tekniken implementeras inom allt fler områden, och därmed ser framtiden för tekniken ljus ut.

2.1.4 Tillverkningstid och kostnad

Tillverkningstiden för prototyper och andra komponenter varierar beroende på deras storlek och de inställningar som används, så tiden kan sträcka sig från några minuter till flera dygn. Trots denna variation betraktas tillverkningstiden som snabb i jämförelse med konventionella tillverkningsmetoder. (Redwood m.fl., 2020, s. 9; Godec m.fl., 2022, s. 1-2). Beskrivningen av de nämnda inställningarna återfinns i kapitel 2.2.3.

I figur 2.1 presenterar Godec m.fl. (2022, s. 5) en översikt över när det är mest optimalt att använda additiv tillverkning med avseende på kostnad och noggrannhet i jämförelse med produktens komplexitet. Slutkostnaden för en komponent påverkas naturligtvis också av den specifika teknologin och det material som används.

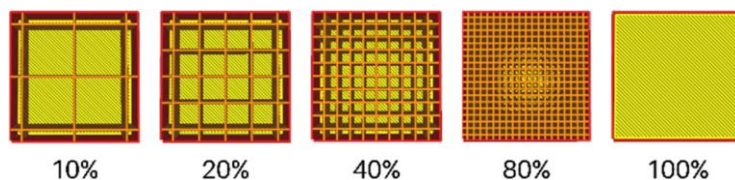


Figur 2.1. En översikt över när det är mest optimalt att använda additiv tillverkning med avseende på kostnad och noggrannhet jämfört med produktens komplexitet. (Godec m.fl., 2022, s. 5).

2.1.5 Fyllnadsgrad

Fyllnadsgraden är ett mått på hur tätt en komponent konstrueras och kan beskrivas som använt material i förhållande till omgivande volym, vilket kan ses i figur 2.2. När det kommer till komponenter som tillverkas med filamentbaserad teknologi är de oftast konstruerade med låg densitet för att minska tillverkningstiden och mängden material som krävs. Fyllnadsgraden, som mäts i procent, kan justeras efter behov beroende på

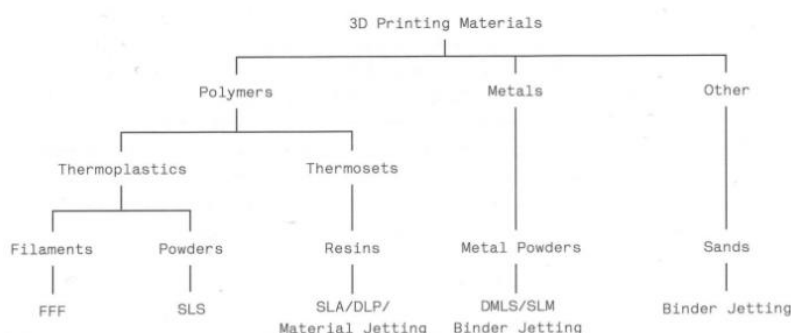
komponentens användningsområde. För att uppnå hög styrka väljs vanligtvis en hög fyllnadsgrad, runt 80 %, medan det för prototyper kan minskas till så lågt som 10 %. Dessutom påverkar också strukturens geometri komponentens prestanda. (Redwood m.fl., 2020, s. 32; Galvez, Oliviar, Tolentino, Danao & Abuan, 2023, s. 2-3).



Figur 2.2. Grid fyllnadsmönster med olika grad av fyllnadsgrad. (Galvez m.fl., 2023, s. 2).

2.1.6 Grupper av material

Även materialen som används inom additiv tillverkning kan kategoriseras, som tydliggörs i figur 2.3. De brukar vanligtvis delas in i två huvudkategorier: metaller och polymerer. Det finns dock även andra material som kan användas inom additiv tillverkning. (Redwood m.fl., 2020, s. 21-22).



Figur 2.3. Klassifikation av material inom additiv tillverkning. (Redwood m.fl., 2020, s. 22).

Enligt Redwood m.fl. (2020, s. 21) förekommer polymerer i olika former och används inom en mängd olika applikationer, främst tack vare deras mångsidiga egenskaper. Ett exempel på en polymer är plast, som kan indelas i två huvudkategorier: hårdplaster och termoplaster (Bruder, 2012, s. 6).

Termoplaster behåller sina egenskaper även när de smälts och stelnar flera gånger. Detta gör dem användbara både inom additiv tillverkning och konventionell formsprutning, där de i båda processerna upphettas och smälts till en homogen massa. (Bruder, 2011, s. 7; Redwood m.fl., 2020, s. 21-22). En tumregel för termoplaster är att ju bättre tekniska

egenskaper de har, desto svårare är de att använda inom additiv tillverkning eftersom högre temperaturer krävs för att smälta plasten (Redwood m.fl., 2020, s. 35).

Som figur 2.4 visar, delas polymererna inom additiv tillverkning vanligtvis in i tre former: filament, pulver och harts. Filament är enligt Redwood m.fl. (2020, s. 27) en tråd av en solid termoplast.



Figur 2.4. Exempel på filament, nylonpulver och harts. (Redwood m.fl., 2020, s. 23).

ABS är en amorf sampolymer (Bruder, 2012, s. 15) som har fördelen att den kan kombinera styrka, seghet och styvhet samtidigt som den är stabil under belastning. Detta gör att ABS används i en mängd olika applikationer (de Prada, Bossio, & Bruno, 2023, s. 2100). Ytterligare en fördel är dess förmåga att återvinnas. En nackdel med ABS är risken för spänningsprickbildning, men detta kan åtgärdas genom att blanda den med vissa konstruktionsplaster för att förbättra dess egenskaper. (Bruder, 2012, s. 15-16). I tabell 2.1 redogörs de fysisk-mekaniska egenskaperna hos ABS (Rui m.fl., 2016; Valtanen, 2022, s. 1050–1051).

Tabell 2.1. Fysisk-mekaniska egenskaper hos ABS.

Densitet [10 ³ kg/m ³]	Elasticitets- modul [N/mm ²]	Brottgräns [N/mm ²]	Böjhållfasthet [N/mm ²]	Krypstyrka [mm]	Böjspänning [N/mm ²]	Brott- förlängning [%]	Poissons konstant
1,01...1,1	1400...2600	24...60	41...69	0,71...1,58	6,8...13,7	15...30	0,37

(Rui m.fl., 2016; Valtanen, 2022, s. 1050–1051).

2.1.7 Att tänka på

Vid användning av filamentbaserad teknologi finns en del utmaningar. En av dessa är skevning, som kan uppstå när en komponent kyls ojämnt, vilket resulterar i interna spänningar. Skevningen kan förebyggas genom att använda en uppvärmd printbädd och säkerställa god vidhäftning, vilket även är avgörande för en lyckad tillverkning. (Redwood m.fl., 2020, s. 29).

I vissa situationer, särskilt vid tillverkning av komplex geometri med överhäng som är mindre än 45° , krävs det att stödstrukturer används för att möjliggöra lyckad tillverkning, som visas i figur 2.5. Detta är nödvändigt eftersom ett nytt skikt inte kan börja appliceras i luften utan stöd underifrån. Stödstrukturerna skapas samtidigt som komponenten och tar form av ett gitterliknande mönster med låg volym, vilket sedan tas bort under efterbehandlingen. Det är också viktigt att notera att ytans kvalitet kan försämrats när överhängen är mindre än 45° . Därför rekommenderas det alltid att hålla sig över denna gräns för att uppnå god ytjämnhet. (Redwood m.fl., 2020, s. 31-32; Jalava m.fl., 2023, s. 2470).

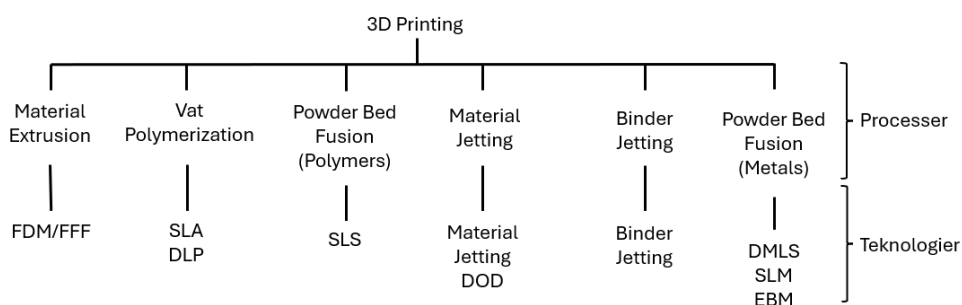


Figur 2.5. Behovet av stödstruktur med avseende på överhäng. (Redwood m.fl., 2020, s. 32).

Förutom de fördelaktiga aspekterna finns det också nackdelar med stödstrukturer. De tenderar att skada de ytor på komponenten som de är i kontakt med, vilket resulterar i en sämre ytjämnhet. För att uppnå en jämn yta krävs det ofta en efterbehandling av komponenten, åtminstone för de områden som har varit i kontakt med stödstrukturen. Detta är viktigt att tänka på vid orienteringen av komponenten, eftersom mängden stödstruktur kan minimeras beroende på hur komponenten placeras. (Redwood m.fl., 2020, s. 32). I konstruktionsskedet och vissa konstruktionsprogram, som till exempel nTopology, kan en villkorsbaserad orientering användas för att minimera behovet av stödstrukturer så mycket som möjligt.

2.2 Additiva tillverkningstekniker

Inom additiv tillverkning används flera olika processer och teknologier för olika material och applikationer (Redwood m.fl., 2020), vilka presenteras i figur 2.6. I detta arbete behandlas endast en typ av tillverkningsprocess, nämligen materialextrudering. Inom ramen för materialextrudering finns enligt Manufacturing Guide (2024) fyra teknologier, vilka presenteras i bilaga 1.



Figur 2.6. Översikt över de vanligaste additiva tillverkningsprocesserna och teknologierna. (Redwood m.fl., 2020, s. 19).

2.2.1 Materialextrudering

Materialextrudering innebär att en solid termoplast, såsom filament eller granulat, matas genom ett upphettat munstycke där den smälts och appliceras på en printbädd. När den smälta plasten applicerats och format det önskade skiktet, kyls den ned och stelnar, vilket möjliggör applicering av följande skikt enligt inställd skiktjocklek. (Redwood m.fl., 2020, s. 27-28).

2.2.2 Fused Deposition Modeling, FDM

FDM-teknologin, även känd som filamentmetoden, betraktas som den vanligaste bland alla additiva tillverkningsteknologier. Även om teknologin kan hänvisas till både som FDM och Fused Filament Fabrication, FFF, finns det ingen faktisk skillnad mellan dem, förutom att termen FDM påstås vara varumärkesskyddad av Stratasys. (Redwood m.fl., 2020, s. 28).

Tekniken används av både privatpersoner och industriföretag, främst för produktutveckling och prototypframställning (JuggerBot 3D, 2024b), och är särskilt lämplig för tillverkning av mindre partier. Även om det finns större munstycken tillgängliga på marknaden, är munstyckena och materialflödes hastigheten vanligtvis små, vilket är en betydande faktor som hindrar produktion av större partier. Denna begränsning bidrar till att

tillverkningstiden blir lång och risken för tidsförlust vid eventuella fel är hög. (Jalava m.fl., 2023, s. 2470). Trots dessa utmaningar möjliggör små munstycken och tunna skiktjocklekar hög upplösning, vilket är fördelaktigt för komponenter med tunna väggar och när en god ytjämnhet eftersträvas (JuggerBot 3D, 2024b).

Filamentet som används inom denna teknologi tillverkas vanligtvis av termoplastiska pellets genom extrudering. Efter extruderingen matas filamentet upp på spolar som sedan installeras i 3D-skrivaren. Standarddiametern på filamentet är 1,75 mm och 2,85 mm. (Crea3D, 2024; JuggerBot 3D, 2024b). Filament betraktas som det mest kostnadseffektiva materialet för additiv tillverkning, där material såsom PLA och ABS vanligtvis kostar mellan 20 och 40 euro per kilo (Crea3D, 2024).

Under tillverkningsprocessen av komponenter matas filamentet från spolen genom ett rörligt extruderingshuvud med hjälp av ett extruderingshjul. När den inställda temperaturen för munstycket har uppnåtts och filamentet smälts, matas det ut på printbädden. Riktningen som extruderingshjulet snurrar kan ändras, vilket gör det möjligt att justera filamentets matning under tillverkningsprocessen för att förhindra plasten att läcka ut på oönskade ställen. (JuggerBot 3D, 2024b).

FDM-teknologins fördelar inkluderar dess tillgänglighet, användarvänlighet och möjligheter för komplex formgivning. Nackdelarna med teknologin är utmaningar gällande skevning och vidhäftning. (JuggerBot 3D, 2024a).

2.2.3 Printparametrar

Inom FDM-teknologin är printparametrarna avgörande för kvaliteten på den tillverkade komponenten. De viktigaste parametrarna inkluderar skiktjocklek, diameter på munstycket och filamentet, samt utskriftshastigheter och temperaturer. Justering av dessa parametrar påverkar både utseendet och de mekaniska egenskaperna hos den tillverkade komponenten. (Redwood m.fl., 2020, s. 29). En detaljerad beskrivning av samtliga parametrar inom FDM-teknologin finns tillgänglig i bilaga 2.

Det finns en relation mellan skiktjockleken och munstyckets diameter eftersom de påverkar dimensionen på den extruderade plasten, så kallade linjebredden. En generell

tumregel är att skikttjockleken bör vara minst 25 % och som mest 80 % av munstyckets diameter. (O'Neill, 2023). Denna relation beskrivs i tabell 2.2.

Tabell 2.2. Relation mellan skikttjocklek och munstyckets diameter.

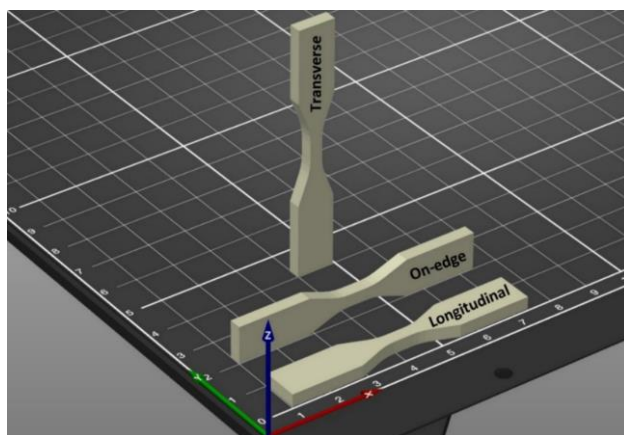
Diameter munstycke [mm]	Min. skikttjocklek [mm]	Standard skikttjocklek [mm]	Max. skikttjocklek [mm]
0,25	0,06	0,13	0,20
0,40	0,10	0,20	0,32
0,60	0,15	0,30	0,48
0,80	0,20	0,40	0,64

(O'Neill, 2023).

2.2.4 Mekaniska egenskaper

För att uppnå optimala komponenter med önskade mekaniska egenskaper, hävdar många forskare att orienteringen av komponenten har den största inverkan inom FDM-teknologin (Redwood m.fl., 2020, s. 167; Zohdi & Yang, 2021, s. 18). Det finns i huvudsak tre olika orienteringar: XYZ-, XZY- och ZYX-riktning, som presenteras i figur 2.7. Axlarna X, Y och Z beskriver riktningen på printbädden, så orienteringen namnges därför enligt dessa axlar i olika ordning, beroende på hur komponenten orienteras. (Zohdi & Yang, 2021, s. 18).

De flesta forskare anser att den bästa orienteringen är längs den riktning där den mekaniska belastningen appliceras och att de sämsta egenskaperna är förknippade med komponenter tillverkade i ZYX-riktning, vilket är den stående orienteringen (Zohdi & Yang, 2021, s. 18). Förutom orienteringen har flera studier visat att faktorer som munstyckets temperatur, skikttjocklek, fyllnadsmönster och densitet, alla påverkar de mekaniska egenskaperna (dePrada m.fl., 2023, s. 2100).



Figur 2.7. Olika orientering av provbit. Från vänster: ZYX-, XZY- och XYZ-riktning. (Zohdi & Yang, 2021, s. 19).

2.3 nTopology

I detta kapitel förklaras syftet med programvaran och dess användningsområden, samt hur viktoptimering kan genomföras.

2.3.1 Introduktion och funktioner

Denna programvara är främst skapad för additiv tillverkning och används för att lösa avancerade tekniska utmaningar. Den omfattar ett stort urval av unika funktioner för modellering, formgivning och optimering inom produktutveckling. Med hjälp av denna programvara kan komplex geometri skapas, vilket annars skulle vara svårt eller omöjligt att åstadkomma med konventionell CAD-modellering. (nTop, 2024c).

Med hjälp av denna programvara kan robusta geometrier skapas och beskrivas som matematiska ekvationer, vilket möjliggör snabb justering och iteration av mönster. Optimeringar görs huvudsakligen för att maximera prestanda och kan baseras på analytiska data, simuleringar eller andra tester. För återkommande designuppgifter kan processer automatiskt återanvändas, vilket sparar tid och effektiviserar arbetsflödet. (nTop, 2024c).

2.3.2 Viktoptimering

Inom additiv tillverkning anses nTopology vara det mest avancerade och lämpligaste verktyget på marknaden för viktoptimering. Användare av programvaran har en betydande konkurrensfördel då den förbättrar både användbarheten och utseendet på komponenter samtidigt som materialkostnaderna minskar. Viktoptimering tillämpas inom olika branscher och bidrar till att minska tillverkningskostnaderna samtidigt som prestandan ökar. (nTop, 2024b).

Tabell 2.3 ger en översikt över de verktyg som kan användas för viktoptimering i nTopology. För gitterstrukturerna finns fyra specificerade typer som används för olika ändamål (nTop, 2024d), och dessa presenteras i bilaga 3.

Tabell 2.3. Verktyg till förfogande för viktoptimering i nTopology.

Verktyg	Beskrivning
Gitterstruktur (eng. lattice structure)	På några sekunder kan komplex gitterstruktur genereras med mjuka övergångar och varierande tjocklek.
Topologioptimering (eng. topology optimization)	Genom automatiserad topologioptimering kan materialkostnader och tid för formgivning minskas avsevärt.
Variable shelling	Genom användning av data från simuleringar kan vikten på ett objekt minskas med hjälp av varierande skal, där tjockleken styrs av den data som samlats in.
Conformal ribbing	Används för att anpassa sig till komplexa ytor, vilket gör det möjligt att ha tunnare väggar utan att kompromissa med den strukturella integriteten.

(nTop, 2024b).

2.4 Finita elementmetoden

I detta kapitel förklaras vad finita elementmetoden innebär och hur den i praktiken kan användas.

2.4.1 Introduktion

Finita elementmetoden, FEM, används för att analysera olika fysikaliska fenomen genom finita elementanalys, FEA, (Spatial Team, 2020). Metoden tillämpas för att analysera aspekter såsom strukturell integritet, vätskeflöde, värmeöverföring, spänning, töjning och deformation (Moratal, 2010, s. 1; Spatial Team, 2024a; 3M, 2024). Genom att definiera geometri, belastningsförhållanden och material kan system optimeras för att uppnå önskad prestanda (3M, 2024).

2.4.2 FEA i praktiken

Finit elementanalys är en vanlig teknik som används av ingenjörer och konstruktörer för att simulera påfrestningar på en komponent. Detta beror på att de som formger produkter och strukturer ofta har ansvaret för att säkerställa deras hållbarhet och säkerhet. I stället för att genomföra fysiska tester och tillverka prototyper för varje test, vilket kan vara

resurskrävande och kostsamt, anses det vara mer lämpligt att utföra simuleringar med en datormodell. (Spatial Team, 2019; 3M, 2024).

Om det i datorsimuleringen behöver göras justeringar av komponenten kan det ofta lösas genom att ändra några numeriska parametrar, vilket tar några sekunder att genomföra. Efter simuleringen kan systemets beteende visualiseras och områden för eventuell förbättring kan identifieras. När komponenten anses vara tillförlitlig kan den slutliga prototypen tillverkas eller produkterna lanseras på marknaden. Dock finns det ingen absolut garanti att en komponent kan motstå de påfrestningar som antytts i simuleringen, därför tillämpas säkerhetsfaktorer. (Spatial Team, 2019, 2020; 3M, 2024).

2.4.3 Typer av FEA

Finit elementanalys kan användas för att lösa tre huvudtyper av problem: statiska, dynamiska och modala (Spatial Team, 2020). En beskrivning av dessa problemtyper presenteras i tabell 2.4.

Tabell 2.4. Tre huvudtyper av problem som finit elementanalys kan användas till.

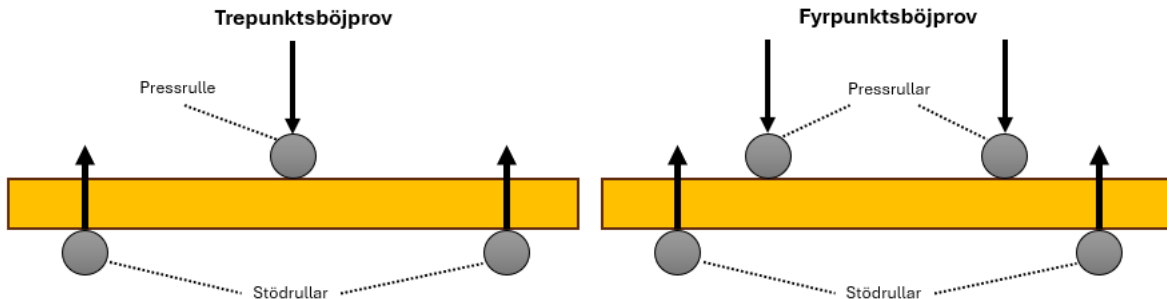
Problem	Beskrivning
Statisk	En strukturanalys när man undersöker hela eller delar av en komponent när en specifik belastning appliceras. Genom simuleringen kan man identifiera vilka områden som utsätts för högst kraft och därmed också vilka områden som behöver vara starkast.
Dynamisk	Används när krafterna som verkar på systemet förändras över tid. Ett exempel på detta är värmeflödet genom en komponent.
Modal	Används för att analysera effekterna av vibrationer på ett system.

(Spatial Team, 2020).

2.5 Böjprov

Ett böjprov utförs för att mäta kraften som krävs för att böja ett rektangulärt eller cirkulärt prov. Provbiten placeras på två stödben och belastningen appliceras med en specificerad hastighet på utvalda punkter enligt en förutbestämd metod, såsom beskrivet i figur 2.8.

Vid utförande av böjprov kan man välja mellan trepunkts- och fyrpunktsböjning, där trepunktsböjning anses vara det bästa alternativet för homogena material såsom plast. Med trepunktsböjning mäts den maximala böjspänningen där kraften appliceras, vilket är i mitten av provet. (Dorciak, Vasko, Bárnik, & Majko, 2020; Novotny, 2023).



Figur 2.8. Jämförelse mellan trepunkts- och fyrpunktsböjprov.

2.5.1 Spänning

Spänningen är den kraft per ytenhet som appliceras på ett material. När kraften appliceras på provbiten, upplever provets övre yta kompression medan provets bottenyta utsätts för en dragspänning, symboliserad som σ . Den största dragspänningen uppstår på den undre provytan precis under belastningspunkten.

Spänningen vid brott i ett trepunktsböjprov kallas för böjhållfasthet, och för ett rektangulärt tvärsnitt beräknas böjhållfastheten enligt följande ekvation:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (1)$$

där σ är spänningen, F är applicerad kraft, L är längden mellan stödpunkterna, b är provets bredd och d är provets tjocklek. (Callister Jr & Rethwisch, 2015, s. 470; Three-point flexural test, 2023). Det är viktigt att notera att denna böjhållfasthet gäller för solida rektangulära tvärsnitt och inte för rektangulära provbitar med gitterstruktur.

2.5.2 Töjning

Töjningen ε mäter deformationen eller förändringen av ett materials form och kan kategoriseras i olika typer såsom dragtöjning och trycktöjning, beroende på vilken typ av spänning som appliceras på materialet (Callister Jr m.fl., 2015). Lastens och deformationens

egenskaper beror på provets storlek. För att ge ett exempel krävs dubbelt så stor belastning för att producera samma töjning om provets tvärsnittsarea fördubblas. Töjningen är enhetslös, men ofta anges den i procentform, där töjningsvärdet multipliceras med 100. (Callister Jr m.fl., 2015, s. 212).

Vid beräkning av töjning för trepunktsböjprov används följande ekvation:

$$\varepsilon = \frac{6Dd}{L^2} \quad (2)$$

där ε är töjningen, D är den maximala böjningen vid provets mitt, d är provets tjocklek och L är längden mellan stödpunkterna (ResearchGate, 2023; Three-point flexural test, 2023).

2.5.3 Böjmodul

Böjmodulen E är ett mått på ett materials förmåga att böjas. Den indikerar materialets styvhet och dess motståndskraft mot böjning när en kraft appliceras vinkelrätt mot provbiten, vilket kallas trepunktsböjprov. Styvheten är en av de viktigaste egenskaperna hos fasta material. (Omnexus, 2024). Ju större modul, desto mindre elastisk töjning uppstår vid applicering av en given spänning (Callister Jr m.fl., 2015, s. 214-215).

Böjmodulen beräknas enligt ekvationen:

$$E = \frac{L^3 F}{4bh^3 d} \quad (3)$$

där E är böjmodulen, L är provbitens längd, F är den kraft som appliceras på provbiten, b är provets bredd, h är provets tjocklek och d är böjningen (Omnexus, 2024).

3 Metod

I detta kapitel beskrivs de metoder och tillvägagångssätt som användes för att uppnå de mål som eftersträvades.

3.1 Introduktion

Inför examensarbetet övervägdes behoven hos produktutvecklingsavdelningen på Mirka. Efter att olika förslag diskuterats, beslöts det under ett kick-off möte med handledare från både Mirka och Yrkeshögskolan Novia vilket av förslagen som var mest relevant att genomföra.

3.2 Planering

Före arbetets påbörjan diskuterades det noggrant hur arbetets syfte och mål kunde uppfyllas. Eftersom syftet var att utvärdera en programvara, fanns det en del flexibilitet i tillvägagångssättet. För att uppnå målen, bestämdes det att provbitar med gitterstruktur omgivna av ett skal skulle designas, som skulle användas för utvärderingen.

Redan i ett tidigt skede kunde det fastslås att det fanns ett betydande antal tillgängliga gitterstrukturer. För att kunna rensa bort bland dem och bestämma vilka tre designer som skulle undersökas närmare, bestämdes det att en statisk analys skulle genomföras på varje tillgänglig gitterstruktur. Syftet med analysen var att fastställa vilka strukturer som uppvisade minst och mest deformation under en konstant applicerad belastning, eftersom deformationen enligt Andreas Gammelgård (Diskussionsmöte 21.2.2024) är kritisk i många applikationer.

3.3 Utrustning

I detta kapitel beskrivs den utrustning som användes för att genomföra arbetet. Utrustningen omfattade både mjuk- och hårdvara.

3.3.1 Mjukvara

Modelleringen utfördes med hjälp av Siemens NX, en programvara avsedd för CAD-modellering. Siemens NX används för olika ändamål såsom design, simulering och tillverkning (Siemens, 2024).

Viktoptimeringen utfördes i programvaran nTopology, eftersom syftet med arbetet var att utvärdera just den programvaran. Några online-kurser från kurskatalogen (nTopLearn, 2024) genomfördes för att ta reda på programmets funktioner och för att få idéer kring hur viktoptimering kunde genomföras.

Skikttningsprocessen utfördes med hjälp av programvaran INTAMSUITE NEO, som är speciellt utformad för den 3D-skrivare som användes i arbetet (INTAMSYS, 2024b). Ett skikttningsprogram är en programvara som används inom additiv tillverkning för att behandla en 3D-modell och generera en g-kod (Locker & Frey, 2024), som beskrivs mer detaljerat i kapitel 3.7.2.

3.3.2 Hårdvara

Den 3D-skrivare som användes i arbetet var Funmat HT av tillverkaren Intamsys, som visas i figur 3.1. Denna skrivare har en byggvolym på 260x260x260 millimeter och anses vara högpresterande som tillåter en skikttjocklek på 50 mikrometer. Den möjliggör tillverkning med material som PEEK och andra högpresterande material, men den är också lämplig för vanliga plaster. (INTAMSYS, 2024a).



Figur 3.1. Intamsys 3D-skrivare Funmat HT. (INTAMSYS, 2024a).

För att genomföra böjprov användes en 10 kN universaltestmaskin av märket Shimadzu, från serien AGX-V, som visas i figur 3.2. Denna maskin är en precisionstestmaskin som används för att utvärdera styrka och mekaniska egenskaper hos plaster och stål genom att

applicera en konstant belastning på materialet och undersöka förändringarna som sker. Denna metod används främst inom områden som kvalitetskontroll, forskning och utveckling. (Shimadzu, 2024).



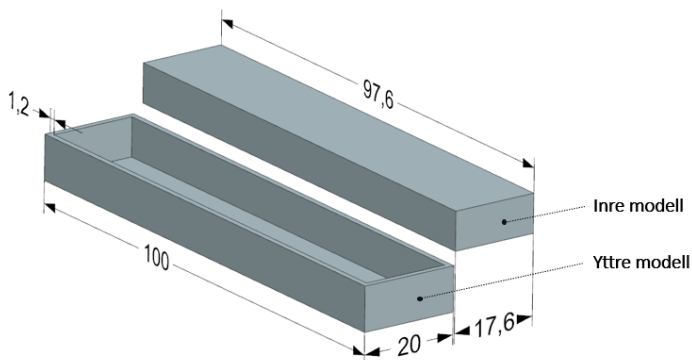
Figur 3.2. Universaltestmaskin av märket Shimadzu i serien AGX-V, med verktyg avsedd för dragprov monterade. (Shimadzu, 2024).

3.4 Modellering

Efter att planeringen hade slutförts, inleddes CAD-modelleringen av provbiten, som visas i figur 3.3. Modelleringen utfördes i två delar: en för ett yttre skal och en för en inre modell, som senare skulle viktoptimeras.

Anledningen till att två separata modeller skapades var för att det ansågs mest lämpligt att designa strukturen av den inre modellen, och sedan sammansätta den modellen med skalet till en komplett provbit.

Referensprovet tillverkades helt solitt med dimensionerna 100x20x12 millimeter, utan några strukturer.



Figur 3.3. Yttre och inre modell med ett tvärsnitt i z-riktning.

3.4.1 Yttre modell

De yttre dimensionerna för skalet modellerades till 100x20x12 millimeter och eftersträvades att hållas plant. Detta gjordes av två skäl: för att hålla samman gitterstrukturen och för att möjliggöra böjprov, eftersom en komponents bredd och tjocklek matas in i universaltestmaskinen.

Skalet designades med en tjocklek på 1,2 millimeter. Detta beslut grundades på att munstycket som användes i 3D-skrivaren hade en bredd på 0,4 millimeter och det ansågs passande att ha väggarna uppbyggda av tre strängar.

3.4.2 Inre modell

Den solida modellen till höger i figur 3.3 representerar den inre modellen, som senare designades till gitterstruktur. Dimensionerna för denna modell gjordes 1,2 millimeter mindre i varje riktning än skalet, vilket innebar att dess dimensioner var 97,6x17,6x9,6 millimeter.

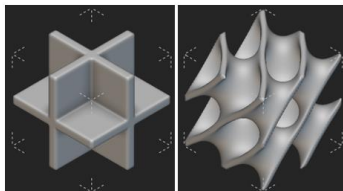
3.5 Viktoptimering

Efter att modelleringen var klar importerades de båda CAD-filerna till nTopology, där viktoptimeringsprocessen utfördes.

3.5.1 Design av gitterstruktur

Som det noterades i tabell 2.3, fanns det fyra alternativ för viktoptimering i nTopology, varav två var potentiella alternativ i detta arbete. Topologioptimering avfärdades eftersom det i kapitel 3.4.1 fastställdes att det yttre skalet på provbiten skulle behållas intakt. Därför ansågs gitterstruktur vara det lämpligaste alternativet.

Det första steget i design av struktur var att välja vilken typ av enhetscell som skulle användas. Därefter erhöles färdiga definierade celltyper som strukturen kunde byggas upp av. Alla tillgängliga enhetsceller valdes, vilket resulterade i totalt 29 olika celltyper. Ett exempel på två av dessa celltyper visas i figur 3.4.

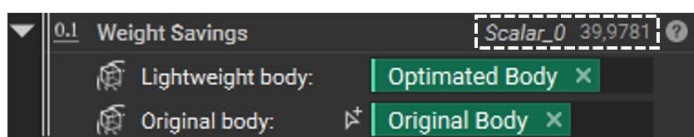


Figur 3.4. Två olika celltyper med en tjocklek på 1 millimeter: Simple Cubic Foam och TPMS Diamond.

3.5.2 Villkor och kontroll av viktminskning

Hur strukturerna byggdes upp begränsades till viss del. Cellstorleken för alla strukturer bestämdes till 4x4x4 millimeter för att göra strukturerna så jämförbara som möjligt. Det enda som justerades var strukturens tjocklek för att uppnå önskad viktminskning.

För att kontrollera viktminskningen jämfördes de viktoptimerade provbitarna med referensprovet enligt figur 3.5. Det är viktigt att notera att den uppnådda viktminskningen inte exakt motsvarar 40 % eftersom tjockleken på strukturen justerades iterativt för att nå önskad viktminskning. Noggrannheten ansågs ändå vara tillräcklig.



Figur 3.5. Viktoptimering på 40 % kontrollerad utgående från viktoptimerad och originell provbit.

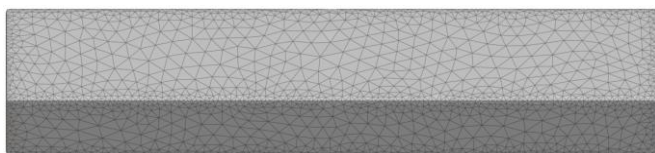
Eftersom endast tre strukturer skulle undersökas, krävdes en utvärdering för att välja bland de 29 strukturerna som var tillgängliga. En statisk analys genomfördes på samtliga viktoptimerade provbitar. Baserat på resultaten av denna analys, med särskilt avseende på deformationen, kunde det bestämmas vilka strukturer som skulle undersökas närmare.

3.6 Finit elementanalys

Den finita elementanalysen genomfördes också i nTopology eftersom syftet med arbetet var att utvärdera den programvaran.

3.6.1 Definiering av nät

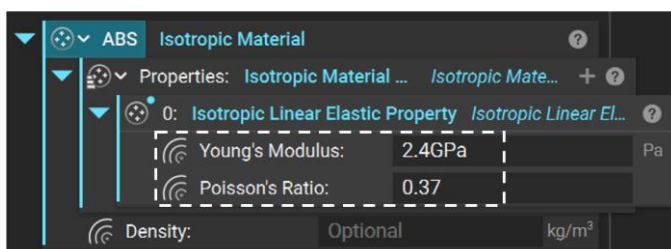
Första steget i denna process var att skapa ett nät, på engelska mesh, för de viktoptimerade provbitarna. Nätet konstruerades med små triangulära element, med en längd på två millimeter. Ju mindre och tätare nätet är definierat, desto mer exakta blir resultaten, men det ökar också simuleringstiderna. (Spatial Team, 2024b). Med hänsyn till storleken på provbitarna ansågs en längd på två millimeter vara lämplig.



Figur 3.6. Definierat nät applicerat på en provbit.

3.6.2 Definiering av material

Materialet för de viktoptimerade provbitarna definierades enligt figur 3.7. I detta specifika fall var materialet ABS och dess egenskaper definierades med avseende på Poissons konstant och elasticitetsmodulen. Dessa egenskaper bestämdes enligt Rui m.fl. (2016) och Valtanen (2022) till 0,37 respektive 2,4 GPa.



Figur 3.7. Definiering av materialet ABS.

3.6.3 Definiering av kraft och förskjutningsbegränsningar

Innan analysen kunde genomföras var det nödvändigt att definiera kraft och förskjutningsbegränsningar. Det beslöts att samtliga provbitar skulle analyseras med en kraft på 300 N applicerad mitt på provbiten, vilket motsvarar trepunktsböjning. Beslutet att använda en kraft på endast 300 N berodde på att det garanterade att kraften i verkligheten

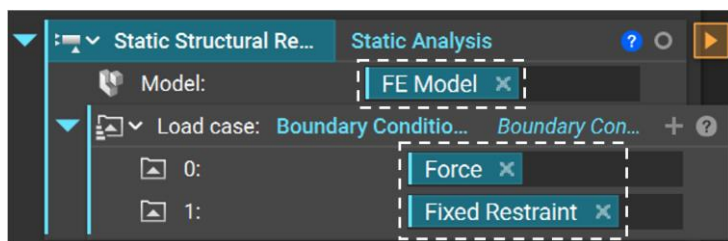
skulle ligga inom det linjära området på en spännings-töjningskurva. Förskjutningsbegränsningarna applicerades vid de verkliga positionerna av stödbenen.



Figur 3.8. Applicerad kraft och förskjutningsbegränsningar på en provbit.

3.6.4 Statisk analys

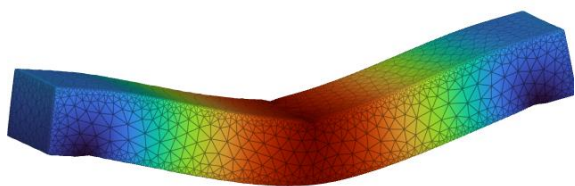
Utgående från informationen i tabell 2.4 var det en statisk analys som skulle genomföras för detta ändamål. Detta berodde på att storleken på deformationen som uppstod vid en given belastning var av intresse. Analysen genomfördes med hjälp av en finit elementmodell som konstruerades baserat på det definierade nätet och materialet. Som det visas i figur 3.9, genomfördes simuleringen enligt den finita elementmodellen, den specificerade kraften och förskjutningsbegränsningarna.



Figur 3.9. Översikt över den utförda statiska analysen.

3.6.5 Analysens resultat

De erhållna resultaten inkluderade deformation, spänning, töjning och reaktionskrafter. Dessa resultat genererades i programvaran och överfördes sedan som rådata till Microsoft Excel. I första tabellen i bilaga 4 presenteras de värden som observerades vid det mest påverkade området, vilket var i mitten av provbiten. I samma tabell redovisas även strukturens tjocklek som användes för att uppnå en viktminskning på 40 %.



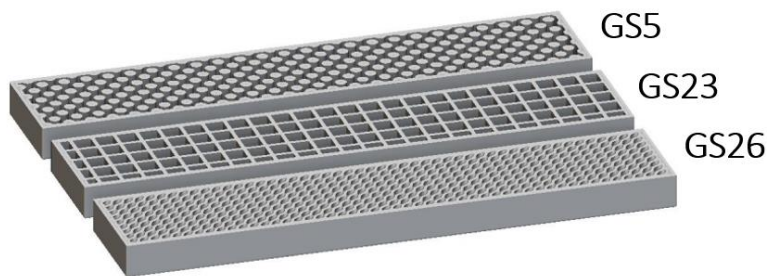
Figur 3.10. Exempel på utförd statisk analys av referensprovet, där området i mitten är det mest påverkade.

Eftersom ett munstycke med en bredd på 0,4 millimeter skulle användas vid tillverkningen, så exkluderades omedelbart fem strukturer eftersom deras tjocklek var mindre än 0,4 mm, vilket skulle varit omöjligt att tillverka. Dessa fem strukturer är markerade med röd färg i bilaga 4. I den andra tabellen i samma bilaga presenteras endast resultaten för deformationen, i storleksordning, eftersom den var av största intresse.

Det beslöts att undersöka de strukturer som hade mest och minst deformation, samt den mitt emellan, för att få en fullständig bild av hur strukturerna påverkade deformationen.

Därför genomfördes undersökningar av följande strukturer:

- Columns
- Simple Cubic Foam
- Diamond



Figur 3.11. De strukturer som undersöktes, här med en viktninskning på 40 %.

Från och med nu kommer strukturerna att benämnas enligt deras nummer i bilaga 4, vilket är:

- GS5
- GS23
- GS26

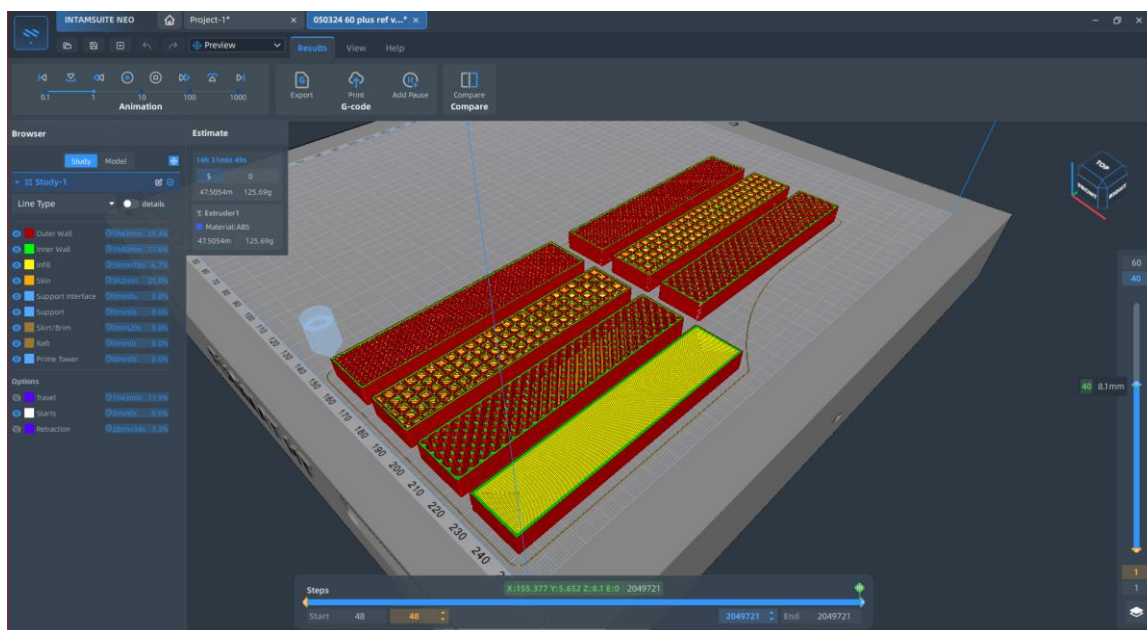
När varje struktur med en viktninskning på 40, 30, 20 och 10 % hade designats, applicerades ett nytt nät på dem. Detta gjordes för att göra det möjligt att exportera dem till en STL-fil, vilket är det vanligaste filformatet för additiv tillverkning (All3DP, 2023). Efter att ett nytt nät hade applicerats, kunde graden av viktninskning avvika ungefär 3 % från den önskade. STL-filerna importerades sedan till skikttningsprogrammet INTAMSUITE NEO där printparametrarna bestämdes.

3.7 Skikttningsprocess

I skikttningsprogrammet bestämdes parametrarna för tillverkningen av komponenterna med hjälp av rekommendationer för ABS-material och den specifika 3D-skrivaren som användes. De specifika printparametrarna som användes kan ses i bilaga 5.

3.7.1 Orientering av provbitar

Som det nämndes i kapitel 2.2.4 påverkar orienteringen av komponenten två saker: de mekaniska egenskaperna och mängden stödstruktur. För dessa provstavar var användning av stödstruktur inte nödvändigt tack vare det släta ytterskalet, och enligt skikttningsprogrammets simulering (figur 3.12) behövdes heller inte stödstruktur för de designade gitterstrukturerna. Provbitarna tillverkades i XYZ-riktning, som visas i figur 3.12, för att maximera de mekaniska egenskaperna och göra dem så starka som möjligt.



Figur 3.12. Provbitarna tillverkades i XYZ-riktning för att maximera de mekaniska egenskaperna.

3.7.2 Generering av g-kod

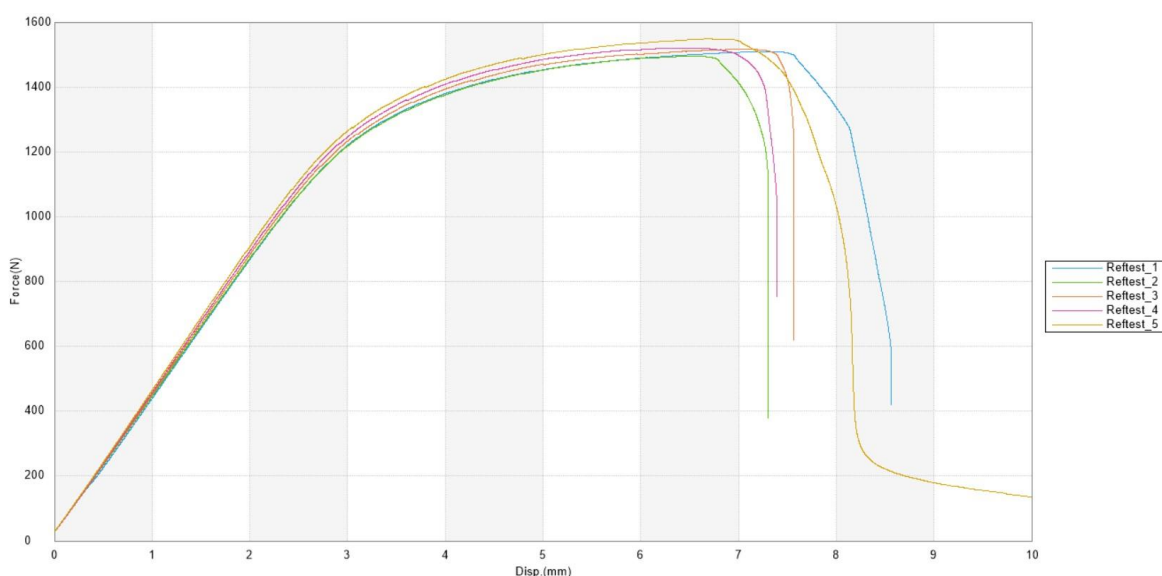
När provbitarna hade skiktats, skapades en g-kod. En g-kod är ett numeriskt programmeringsspråk som används för Computer Aided Manufacturing, CAM, för att styra automatiserad hårdvara, inklusive 3D-skrivare (Redwood m.fl., 2020, s. 10). Skrivaren använde g-koden för att tillverka komponenterna enligt de specificerade parametrarna.

3.8 3D-printning

Innan tillverkningen av de optimerade provbitarna påbörjades, genomfördes ytterligare en undersökning för att kontrollera tillverkningsmetodens reproducerbarhet.

3.8.1 Undersökning av reproducerbarhet

För att säkerställa att provbitarna inte skulle ge avvikande resultat på grund av den dåliga förmågan till reproducerbarhet, genomfördes ytterligare en undersökning. Fem exemplar av referensprovet tillverkades och testades sedan genom böjprov. Som figur 3.13 visar, var den största skillnaden i kraften vid en så stor deformation som 2 millimeter endast 3 %, vilket bedömdes som tillräckligt noggrant.



Figur 3.13. Undersökning av reproducerbarheten hos provbitarna genom jämförelse av applicerad kraft mot deformation.

3.8.2 Tillverkning av provbitar

Tillverkningen av provbitarna genomfördes i fyra omgångar där en grad av viktnedgång tillverkades i vardera omgången. Varje omgång omfattade två exemplar av varje optimerad provbit, tillsammans med ett exemplar av referensprovet. Detta gjordes för att säkerställa att inga komplikationer hade uppstått med 3D-skrivaren, eftersom tillverkningen sträckte sig över en period på två veckor.

3.8.3 Analys av provbitar

När varje omgång var klar undersöktes provbitarna visuellt. Dimensionerna och vikten mättes och antecknades enligt tabell 3.1, eftersom dessa uppgifter behövdes både för att utföra böjproven och för att hantera resultaten. Inga efterbehandlingar utfördes på provbitarna.

I tabell 3.1 noterades att de uppmätta mätvärdena visade vissa skillnader jämfört med de modellerade. Den största skillnaden observerades för GS26 med en viktninskning på 10 %, där vikten var nästan lika hög som för referensprovet. Detta berodde på att det krävdes mycket hög datorkraft för att applicera ett tillräckligt fint nät på denna provbit om en viktninskning på 10 % skulle uppfyllas. Detta uppnåddes inte fullständigt, utan en viktninskning på cirka 1 % erhöles (figur 3.15). Resultaten för denna specifika provbit markeras därför med rött i fortsättningen för att indikera att den inte är giltig.

Tabell 3.1. Referensprovet och provbitarnas uppmätta medeltalsvärden.

Uppmätta värden					
Viktninskning	ID	<i>l</i> [mm]	<i>b</i> [mm]	<i>t</i> [mm]	<i>m</i> [g]
40 %	Ref 1	99,91	19,92	11,92	22,69
	GS5	99,88	19,76	11,86	12,94
	GS23	99,91	19,98	11,86	14,24
	GS26	99,81	19,82	11,61	14,62
30 %	Ref 4	99,85	19,87	11,84	22,86
	GS5	99,73	19,81	11,72	15,77
	GS23	99,75	19,95	11,77	16,34
	GS26	99,78	19,82	11,70	16,36
20 %	Ref 2	99,88	19,87	11,95	22,81
	GS5	99,95	19,92	11,91	18,91
	GS23	99,84	19,96	11,87	18,55
	GS26	99,77	19,86	11,80	18,65
10 %	Ref 3	99,82	19,86	11,89	22,88
	GS5	99,83	19,90	11,86	20,20
	GS23	99,85	19,95	11,80	20,88
	GS26	99,76	19,85	11,73	22,51

3.9 Böjprov

Böjprov utfördes på alla provbitar, inklusive alla exemplar av referensprovet. Metoden för böjprov är standardiserad och kräver normalt tunna provbitar. I detta arbete gjordes provbitarna tjockare för att ge utrymme för gitterstrukturerna. Därför användes företagets rekommenderade parametrar för tjocka provbitar, enligt tabell 3.2.

Tabell 3.2. Använda parametrar vid utförande av böjprov.

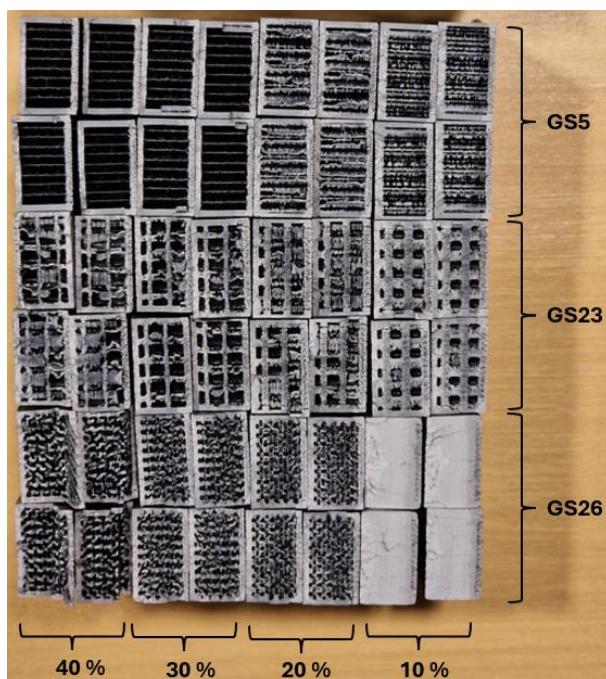
Typ av test	Form	Presshastighet	Diameter pressrulle	Diameter stödrulle	Avstånd mellan stödrullar
3-punkts	Rektangulär	5 mm/min	10 mm	30 mm	115,44 mm

I figur 3.14 visas ett exempel på ett utfört trepunktsböjprov.



Figur 3.14. Exempel på utfört trepunktsböjprov.

Resultaten från böjproven exporterades som rådata till Microsoft Excel. Denna data användes sedan för att skapa de grafer och tabeller som presenteras i kapitel 4. Figur 3.15 visar tvärsnitten av de viktoptimerade provbitarna efter att böjproven hade utförts.



Figur 3.15. Tvärsnitt av varje provbit efter utfört böjprov.

4 Resultat

I detta kapitel presenteras resultaten som har samlats in. Eftersom två exemplar av varje provbit tillverkades, används ett medeltal av resultaten för att minimera data, vilket också kunde observeras i tabell 3.1.

4.1 Simulerad och faktisk deformation

För att utvärdera överensstämmelsen mellan simuleringen och verkligheten jämförs den simulerade och faktiska deformationen som uppstod vid en belastning på 300 N. Dessa resultat presenteras i tabell 4.1.

Tabell 4.1. Simulerad och faktisk deformation vid en belastning på 300 N.

ID	Simulerad deformation [mm]	Faktisk deformation [mm]
Referens	0,27	0,65
GS5	0,68	1,32
GS23	0,48	1,10
GS26	0,43	1,20

Det observeras i tabell 4.1 att den faktiska deformationen är större än den simulerade. Det finns flera potentiella orsaker till detta fenomen. Det kan bero på att den faktiska tjockleken på provbitarna är mindre än de modellerade 12 millimeter, vilket framgår av tabell 3.1. En

annan möjlig faktor är att den faktiska elasticitetsmodulen kan vara något avvikande från den som användes i simuleringen, som var 2400 MPa. En ny simulering utfördes därför i efterhand på referensprovet med den verkliga elasticitetsmodulen på 2000 MPa, vilket gav en deformation på 0,35 mm. Som det framkom i figur 3.7 har materialet definierats som isotropiskt. Eftersom komponenten har framställts genom additiv tillverkning, kan det mycket väl hända att materialet ska definieras som anisotropiskt, vilket betyder att materialet kan ha olika egenskaper beroende på mättriktningen. Detta tros vara anledningen till de avvikande resultaten.

I tabell 4.1 kan det även noteras att i simuleringen hade GS26 minst deformation, men i verkligheten är det GS23 som har minst deformation, om man bortser från referensprovet. Detta beror på att GS23 har en mer koncentrerad struktur, som kunde observeras i figur 3.15. I simuleringen var strukturen för GS26 antagligen mer koncentrerad än den som faktiskt kunde uppnås vid tillverkningen, på grund av för låg resolution.

4.2 Tillverkningstid, materialåtgång och faktisk optimering

Tillverkningstiden, materialåtgången och den faktiska graden av viktoptimering jämförs också genom tabeller. Tabell 4.2 visar tillverkningstiden i storleksordning, medan tabell 4.3 presenterar den faktiska materialåtgången i samma ordning, samt den faktiska graden av viktoptimering. Mer detaljerade resultat finns i bilaga 6.

Tabell 4.2. Tillverkningstiden i storleksordning för varje provbit.

ID & viktminskningsgrad	Tillverkningstid [min]
Referens	105
GS26 10 %	105
GS5 40 %	117
GS23 40 %	122
GS5 30 %	133
GS23 30 %	137
GS26 40 %	144
GS23 10 %	157
GS5 20 %	168
GS23 20 %	147
GS26 30 %	172
GS5 10 %	179
GS26 20 %	184

Normalt sett minskar tillverkningstiden och materialåtgången med minskad densitet, vilket diskuterades i kapitel 2.1.5. Tabell 4.2 och 4.3 visar att detta stämmer för materialåtgången, men inte för tillverkningstiden när det gäller komplexa geometrier. Som det illustrerades i figur 2.1, ökar tillverkningskostnaden med ökad komplexitet, vilket då kan härledas till en ökad tillverkningstid.

Orsaken till att referensprovet har den lägsta tillverkningstiden fastän den är helt solid beror troligtvis på att den genererade g-koden som styr 3D-skrivaren är komplex på grund av gitterstrukturen. Som beskrivet i kapitel 2.3.2, innebär en viktoptimering i nTopology en minskning av materialkostnaderna. Detta kan tolkas som att optimeringen inte nödvändigtvis bidrar till en minskning av tillverkningstiden.

Tabell 4.3. Faktisk materialåtgång i storleksordning och faktisk grad av viktoptimering för varje provbit.

ID & viktminskingsgrad	Faktisk materialåtgång [g]	Faktisk viktoptimering
GS5 40 %	12,94	43 %
GS23 40 %	14,24	38 %
GS26 40 %	14,62	36 %
GS5 30 %	15,77	31 %
GS23 30 %	16,34	28 %
GS26 30 %	16,36	28 %
GS23 20 %	18,55	19 %
GS26 20 %	18,65	18 %
GS5 20 %	18,91	17 %
GS5 10 %	20,20	11 %
GS23 10 %	20,88	8 %
GS26 10 %	22,51	1 %
Referens	22,81	0 %

Den faktiska viktoptimeringen avviker också något från de simulerade värdena, vilket redovisas i tabell 4.3. Detta orsakas av det som nämndes i kapitel 3.6.5, nämligen att en avvikande viktoptimering på cirka 3 % erhöles vid applicering av ett nytt nät.

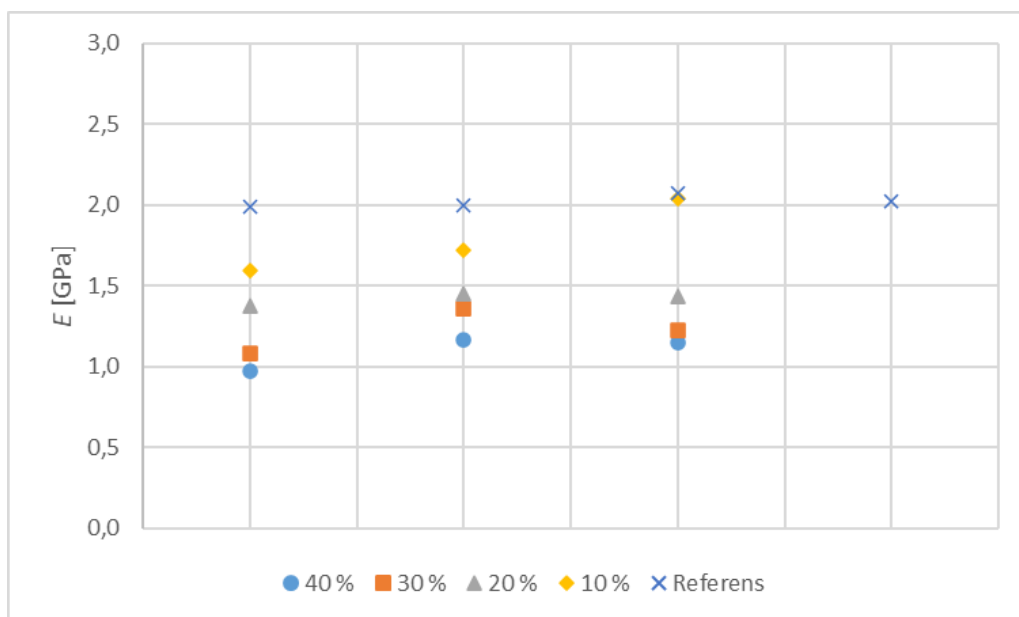
Det är värt att notera att optimeringen är mindre för både GS23 och GS26 i samtliga fall, och detta beror på tillverkningsmetoden. I kapitel 3.3.2 diskuterades att den 3D-skrivare som användes möjliggjorde en skiktjocklek på 50 mikrometer, och om ett mindre munstycke och tunnare skiktjocklek hade använts, skulle dessa värden ha överensstämmt bättre eftersom resolutionen varit högre.

Som det framkommer i bilaga 6, finns det en viss skillnad mellan den teoretiska och faktiska materialåtgången, där den faktiska åtgången är ungefär 14 – 16 % mindre än den

teoretiska. Orsaken till detta är med högst sannolikhet att de viktoptimerade provbitarna inte kunde tillverkas med tillräcklig hög resolution, vilket gjorde att den faktiska materialåtgången blivit mindre än den teoretiska.

4.3 Provbitarnas elasticitetsmodul

I figur 4.1 visas en jämförelse av elasticitetsmodulen mellan provbitarna med olika strukturer och varierande grad av viktminskning. Från vänster: GS5, GS23 och GS26. Elasticitetsmodulen beräknas i universaltestmaskinen enligt ekvation 3.



Figur 4.1. Jämförelse av elasticitetsmodulen mellan provbitar med olika strukturer och varierande grad av viktminskning. Från vänster: GS5, GS23, GS26.

I figur 4.1 kan det observeras att elasticitetsmodulen minskar med lägre densitet, vilket är förväntat. Strukturen GS26 med en viktminskning på 10 % är inte giltig eftersom den provbiten motsvarade en viktminskning på endast 1 %.

Det är värt att notera att GS5 med en viktminskning på 30 och 40 % har en elasticitetsmodul på cirka 1 GPa. Enligt figur 3.15 var det bara skalet runt gitterstrukturen som tog upp den applicerade belastningen för dessa två provbitar, vilket betyder att skalet bidrar till en stor del av den totala elasticitetsmodulen för övriga provbitar.

Som det framkom i tabell 4.1, har GS23 den minsta faktiska deformationen. Detta kan ytterligare påvisas i figur 4.1 eftersom GS23 har högre elasticitetsmodul än de övriga.

Förutom figur 4.1 ger tabell 4.4 en översikt över elasticitetsmodulen för varje optimerad provbit i jämförelse med referensproven, uttryckt i procent. En önskan är att vid en viktninskning på 40 % bibehålla en elasticitetsmodul på minst 60 % av referensprovets värde. Detta skulle indikera att elasticitetsmodulen proportionellt minskar med vikten.

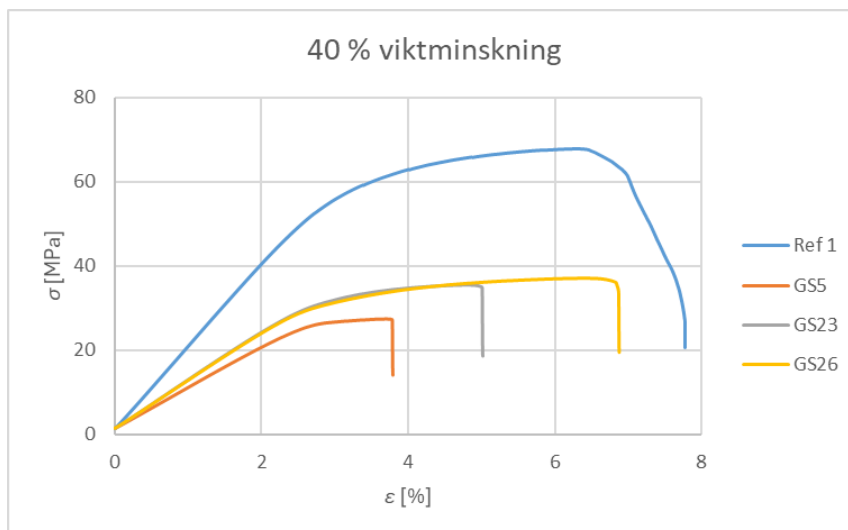
Tabell 4.4. Elasticitetsmodulen för de viktoptimerade provbitarna i jämförelse med referensprovet.

Viktninskning	ID	E [GPa]	Elasticitetsmodul i jämförelse med referensprov
0 %	Referens	2,02	
40 %	GS5	0,98	49 %
	GS23	1,17	58 %
	GS26	1,16	57 %
30 %	GS5	1,09	54 %
	GS23	1,36	67 %
	GS26	1,23	61 %
20 %	GS5	1,39	69 %
	GS23	1,46	72 %
	GS26	1,45	72 %
10 %	GS5	1,60	79 %
	GS23	1,75	86 %
	GS26	2,07	102 %

I tabellen kan det noteras att ingen struktur nådde den elasticitetsmodul som skulle motsvara viktninskningen. Strukturen GS23, med en viktninskning på 40 %, är den som kom närmast, men den saknar fortfarande två procent för att nå 60 % av referensprovets elasticitetsmodul. Detta är förväntat eftersom elasticitetsmodulen minskar när provbiten blir mjukare.

4.4 Spänning-töjningskurvor

Figur 4.2 presenterar en spänning-töjningskurva för både referensprovet och de viktoptimerade provbitarna vid en viktninskning på 40 %. För de andra graderna av viktninskning var kurvorna formade på samma sätt, och därför visas de endast i bilaga 7.



Figur 4.2. Spänning-töjningskurva för referensprov och viktoptimerade provbitar med en viktninskning på 40 %.

Som det kan noteras i figuren är GS5 den svagaste av de tre strukturerna, vilket överensstämmer med den observerade deformationen i tabell 4.1 och elasticitetsmodulen i figur 4.1. Dessutom visar GS23 tendens till högre spänning i jämförelse med GS26, vilket också återspeglas i deformationen enligt tabell 4.1. Orsaken till detta kan kopplas till den mer koncentrerade strukturen, vilket framkom i figur 3.15. Generellt sett verkar kurvorna trovärdiga eftersom spänningen avtar innan provbitarna till slut brister.

Spänningen och töjningen i figur 4.2 och bilaga 7 är beräknad i universaltestmaskinen enligt ekvation 1 och 2. Spänningen beräknas alltså med hänsyn till provbitens tvärsnitt. Fyllnadsgraden har en betydande inverkan på både den strukturella integriteten och de mekaniska egenskaperna hos materialet. Detta kan resultera i variationer i spänningen som uppstår under testningen. På grund av dessa faktorer är resultaten i spänning-töjningskurvorna inte helt pålitliga eftersom provbitarna innehåller gitterstruktur. Man kan fråga sig om gitterstrukturen över huvud taget bidrar till böjmotstånd, vilket den nog gör. Som det framkom i figur 3.15 tog endast skalet upp belastningen för GS5 vid en

viktminskning på 30 och 40 %. Utgående från övriga resultat kan slutsatsen dras att gitterstrukturen nog bidrar till böjmotstånd.

Kraft-deformationskurvor lämnas bort i resultatdelen men finns tillgängliga i bilaga 8, eftersom formen för dem är samma som spänning-töjningskurvorna.

4.5 Resultatdiskussion

Först och främst är det viktigt att påpeka att de presenterade resultaten inte bara gäller för gitterstrukturen i sig, utan också för det yttre skalet runtomkring. Det är viktigt att förstå att både strukturen och skalet bidrar till de erhållna resultaten, exempelvis de mekaniska egenskaperna. Eftersom samtliga provbitar har ett skal och innehåller olika gitterstrukturer, anses resultaten vara jämförbara, eftersom undersökningen till stor del handlar om att jämföra strukturegenskaperna i sig, och inte direkta värden för mekaniska egenskaper.

För att få en korrekt spänning i spänning-töjningsdiagrammen skulle en ny spänning kunna beräknas för det aktuella böjmotståndet för de provstavar som inte är solida. De resultat som presenteras anses ändå vara tillräckliga eftersom de ger en indikation på hur spänningen avtar med strukturer och lägre densitet.

5 Diskussion

I detta kapitel sammanfattas hur arbetet har uppfyllt det syfte och mål som definierades. Dessutom diskuteras eventuella förbättringar som hade kunnat göras samt förslag på vidare forskning inom ämnet.

5.1 Sammanfattning

Arbetets syfte och mål anses ha uppnåtts, då utvärderingen visade att viktoptimeringar och simuleringar kan genomföras i programvaran. Målet att minska tillverkningskostnaderna uppfylldes delvis, och resultaten möjliggjorde jämförelse av de mekaniska egenskaperna hos de viktoptimerade provbitarna.

Resultaten visade en minskning av materialåtgången, vilket i sin tur ledde till lägre materialkostnader och därmed sänkta tillverkningskostnader. Inledningsvis antogs det att tillverkningstiden också skulle minska i takt med den minskade volymen, men det visade

sig vara ett felaktigt antagande. Tvärtom ökar tillverkningstiden vid lägre densitet för komplexa geometrier. I och med att additiv tillverkning i många fall används inom produktutveckling, är tillverkningstiden inte den mest kritiska faktorn. I stället är största vikt att minska materialåtgången och särskilt undvika materialsvinnet.

Inom finit elementanalys, särskilt när det gäller statisk analys, betraktas programvaran som effektiv i jämförelse med traditionella CAD-modelleringsprogram. Den här programvaran bryter ned varje steg i separata block, vilket möjliggör smidiga simuleringar och optimeringar. Detta beror på att parametrar kan justeras och processen automatiskt omvärderas utan större svårigheter.

I detta arbete fanns en provbit som betraktades som ogiltig, nämligen den med beteckningen GS26 och med en viktminskning på 10 %. Teoretiskt sett skulle det vara möjligt att optimera vikten med 10 % för denna provbit genom att exempelvis justera parametrarna för cellens storlek. Dock valdes det att behålla samma cellstorlek för varje provbit för att säkerställa jämförbara resultat.

Genom detta arbete har jag dels fått ökad kunskap om viktoptimering i en avancerad programvara, dels om additiv tillverkning med plaster och dess mekaniska egenskaper i relation till varierande strukturer och fyllnadsgrader. Förhoppningsvis kan resultaten från detta arbete vara till nytta för företaget och bidra till att stödja kommande projekt och tillämpningar.

Programvaran anses också vara fördelaktig i viktoptimeringssyfte tack vare dess tillgänglighet av olika typer av celltyper. Eftersom celltyperna är många och kan justeras på många sätt finns det en stor variation av möjliga konfigurationer. Detta ger användaren många fler möjligheter jämfört med ett vanligt skikttningsprogram, där det finns ett begränsat antal fyllnadsmönster och där endast fyllnadsgraden kan justeras.

5.2 Förbättringar

Om jag skulle göra om detta arbete skulle jag i stället för att skapa de två modellerna i figur 3.3, endast skapa en modell. Eftersom jag hade begränsad erfarenhet av programvaran valde jag att skapa två modeller för att experimentera med olika inställningar. Det hade dock varit fullt möjligt att skapa en modell, applicerat den designade

gitterstrukturen på modellen och behålla ett skal runtomkring den. Å andra sidan var det inte särskilt tidskrävande att skapa två modeller.

5.3 Förslag till vidare forskning

För att ytterligare forska inom detta område kan man undersöka hur justering av cellstorleken påverkar de mekaniska egenskaperna. Man skulle kunna sträva efter att behålla samma grad av viktminskning, men i stället justera cellstorleken i alla tre dimensioner: bredd, längd och höjd. Det vore intressant att se hur varje dimension individuellt påverkar de mekaniska egenskaperna samt hur de agerar tillsammans.

En annan intressant sak att utforska skulle vara att konstruera en struktur helt och hållet med anpassade celltyper. I nTopology kan man skapa sina egna celler i stället för att använda de färdiga definierade celltyperna. Detta skulle ge mer flexibilitet än att bara använda de celltyper som redan finns tillgängliga.

Något som också skulle vara intressant är användning av Field-driven Design, som finns tillgängligt i den utvärderade programvaran. Den funktionen anses vara ett bättre sätt att generera och kontrollera komplex geometri för tillverkning och avancerad produktutveckling. (nTop, 2024a).

De resultat som erhållits kan också jämföras med provbitar tillverkade med färdiga definierade strukturer som finns tillgängliga i konventionella skikttningsprogram. Om intresse kring verkliga tillverkningskostnader finns, kan exakta kostnadsberäkningar göras för de tillverkade provbitarna.

5.4 Slutord

Avslutningsvis vill jag tacka Mirka för att jag fått möjligheten att utforska detta intressanta ämne. Ett stort tack riktas även till mina handledare Andreas Gammelgård och Kenneth Ehrström, för deras ytterst värdefulla vägledning under arbetets gång. Jag vill också tacka andra kollegor som på ett eller annat sätt stått till förfogande.

6 Källförteckning

- 3M. (2024). *Finit elementanalys (FEA), Metod (FEM) och modellering*. Hämtat från https://www.3msverige.se/3M/sv_SE/bonding-and-assembly-ndc/training-education/finite-element-analysis/ den 24 mars 2024
- All3DP. (2023). *What Is an STL File? - The STL Format Simply Explained*. Hämtat från <https://all3dp.com/1/stl-file-format-3d-printing/> den 21 januari 2024
- Bruder, U. (2012). *Värt att veta om plast*. Karlskrona, Sverige: Bruder Consulting AB.
- Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2015). *Materials Science and Engineering* (9:e uppl.). Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Crea3D. (2024). *Materials*. Hämtat från <https://www.crea3d.com/en/189-intamsys> den 13 februari 2024
- de Prada, R. E., Bossio, G. R., & Bruno, M. M. (2023). Effect of FDM printing patterns on mechanical properties of ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 29(10), 2098-2108. doi:10.1108/RPJ-04-2023-0130
- Dorciak, F., Vasko, M., Bárnik, F., & Majko, J. (2020). Comparison of experimental flexural test with FE analysis for specimen with different size and shape of internal structure created by 3D printing's. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 776(1), 12078. doi:10.1088/1757-899X/776/1/012078
- Galvez, G. M., Oliviar, K. A., Tolentino, F. R., Danao, L. A., & Abuan, B. E. (2023). Finite Element Analysis of Different Infill Patterns for 3D Printed Tidal Turbine Blade. *Sustainability*, XV(1), 713. doi:<https://doi.org/10.3390/su15010713>
- Godec, D., Gonzales-Gutierrez, J., Nordin, A., Pei, E., & Ureña Alcázar, J. (2022). *A Guide to Additive Manufacturing*. Cham: Springer Nature. doi:10.1007/978-3-031-05863-9
- INTAMSYS. (2024a). *FUNMAT HT*. Hämtat från <https://www.intamsys.com/funmat-ht-3d-printer/> den 9 april 2024
- INTAMSYS. (2024b). *INTAMSUITE NEO: 3D PRINTING SLICING SOFTWARE*. Hämtat från <https://www.intamsys.com/intamsuiteneo/> den 1 februari 2024
- Jalava, K., Orkas, J., Korpi, J., & Strakh, A. (2023). Potential and Challenges of Fused Granular Fabrication in Patternmaking. *International Journal of Metalcasting*, XVII(4), 2469-2476. doi:<https://doi.org/10.1007/s40962-023-00989-9>
- JuggerBot 3D. (2024a). *Fused Filament Fabrication (FFF) vs Fused Granulate Fabrication (FGF)*. Hämtat från <https://juggerbot3d.com/fff-vs-fgf/> den 15 januari 2024
- JuggerBot 3D. (2024b). *What is Fused Filament Fabrication?* Hämtat från <https://juggerbot3d.com/fused-filament-fabrication/> den 15 januari 2024
- KWH Group. (2024). *KWH-koncernen*. Hämtat från <https://www.kwhgroup.com/sv/kwh-koncernen/> den 8 januari 2024
- Locker, A., & Frey, S. (2024). *Top 10: Best 3D Printer Slicer Software in 2024*. Hämtat från <https://all3dp.com/1/best-3d-slicer-software-3d-printer/> den 28 januari 2024

- Manufacturing Guide. (2024). *Material extruding, MEX*. Hämtat från <https://www.manufacturingguide.com/sv/material-extruding-mex> den 3 februari 2024
- Mirka. (2024a). *Mirka Cafro: Superabrasive products for your precision grinding needs*. Hämtat från <https://www.mirka.com/en/products/top-brands/mirka-cafro/> den 12 april 2024
- Mirka. (2024b). *Om Mirka*. Hämtat från <https://www.mirka.com/sv/fi/top/About-us/> den 8 januari 2024
- Moratal, D. (2010). *Finite Element Analysis*. Rijeka: IntechOpen. doi:10.5772/281
- Novotny, L. (2023). *Differences Between Three Point and Four Point Bending Tests*. Hämtat från <https://www.testresources.net/blog/what-are-the-differences-between-3-point-and-4-point-bending-test> den 25 mars 2024
- nTop. (2024a). *Field-driven Design*. Hämtat från <https://www.ntop.com/field-driven-design/> den 12 april 2024
- nTop. (2024b). *Lightweighting*. Hämtat från <https://www.ntop.com/applications/lightweighting/> den 3 februari 2024
- nTop. (2024c). *nTop: Engineering design software for the world's most innovative products*. Hämtat från <https://www.ntop.com/software/products/> den 19 januari 2024
- nTop. (2024d). *Types of lattice structures*. Hämtat från <https://www.ntop.com/software/capabilities/lattice-structures/> den 26 januari 2024
- nTopLearn. (2024). *Course Catalog*. Hämtat från <https://learn.ntop.com/page/courses> den 10 april 2024
- Omnexus. (2024). *Stiffness: What is the formula of flexural modulus?* Hämtat från <https://omnexus.specialchem.com/polymer-property/stiffness> den 11 april 2024
- O'Neill, B. (2023). *Nozzle Diameter and Layer Height Explained*. Hämtat från <https://www.wevolver.com/article/nozzle-diameter-and-layer-height-explained> den 16 januari 2024
- Redwood, B., Schöffner, F., & Garret, B. (2020). *The 3D Printing Handbook*. Amsterdam: 3D Hubs B.V.
- ResearchGate. (2023). *How do I get a stress-strain curve from a 3-point bending load-deflection curve given that it is nonlinear or behaves elasto-plastically?* Hämtat från https://www.researchgate.net/post/How_do_I_get_a_stress-strain_curve_from_a_3-point_bending_load-deflection_curve_given_that_it_is_nonlinear_or_behaves_elasto-plastically den 9 april 2024
- Rui, Z., Yang, X., Shiyi, L., Ping, H., Wenbin, H., Qingyuan, H., & Chunlai, S. (2016). Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material. *Composites Part B*:

Engineering, XCIX, 506-513.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.009>

Sahu, D. R. (2019). *Functional Materials*. London: IntechOpen.

doi:10.5772/intechopen.76823

Shimadzu. (2024). *Precision Universal Testing Machines: AGX-V series*. Hämtat från

https://www.shimadzu.com/research_and_development/design_strategy/works/agx-v.html den 19 februari 2024

Siemens. (2024). *NX CAD and CAM software*. Hämtat från

<https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/> den 3 mars 2024

Spatial Team. (2019). *What is FEA (Finite Element Analysis) in CAD?* Hämtat från

https://blog.spatial.com/what-is-fea?_gl=1*191pzh7*_gcl_au*MjQxOTQxNjM2LjE3MDk5MDMwNDI.&_ga=2.167392638.1193813580.1709903723-1785063556.1709903723 den 9 februari 2024

Spatial Team. (2020). *An Introduction to Finite Element Modeling*. Hämtat från

https://blog.spatial.com/finite-element-modeling?_gl=1*1uetekv*_gcl_au*MTAyNTc5NTQ0Ny4xNzEwMDU4Mzc5&_ga=2.28698296.524403416.1710058725-849407117.1710058725 den 9 februari 2024

Spatial Team. (2024a). *Finite Element Method*. Hämtat från

<https://www.spatial.com/resources/glossary/finite-element-method> den 9 februari 2024

Spatial Team. (2024b). *What is Mesh Generation*. Hämtat från

<https://www.spatial.com/resources/glossary/what-is-meshing> den 9 februari 2024

Three-point flexural test. (den 14 november 2023). *Wikipedia*. Hämtat från

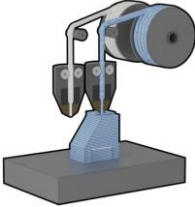
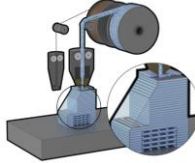
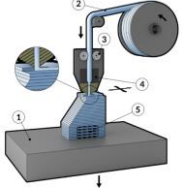
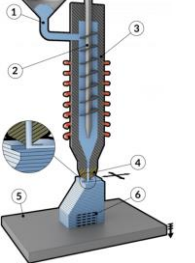
https://en.wikipedia.org/wiki/Three-point_flexural_test den 11 april 2024

Valtanen, E. (2022). *Tekniikan taulukkokirja* (23 uppl.). Mikkeli: Genesis-Kirjat Oy.

Zohdi, N., & Yang, R. C. (2021). Material Anisotropy in Additively Manufactured Polymers and Polymer Composites: A Review. *Polymers*, *XIII*(19), 3368.

doi:<https://doi.org/10.3390/polym13193368>

Bilaga 1. Översikt över teknologier inom ramen för additiva tillverkningsprocessen materialextrudering.

Figur	Teknologi	Beskrivning
	Bound Powder Extrusion (BPE)	Komponenten byggs upp av smält vax blandat med metallpulver. Efter utskrift sintras föremålet till slutlig detalj.
	Continuous Fiber Fabrication (CFF)	Komponenten byggs upp av smält fibertråd och polymer.
	Fused Deposition Modeling (FDM) Fused Filament Fabrication (FFF)	Komponenten byggs upp av smält filament som extruderas genom ett upphettat munstycke.
	Fused Granular Fabrication (FGF)	Komponenten byggs upp av smält plastgranulat som extruderas genom ett upphettat munstycke.

(Manufacturing Guide, 2024).

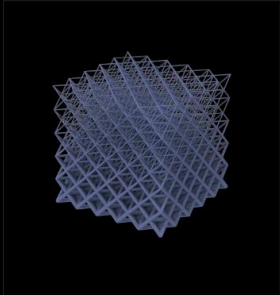
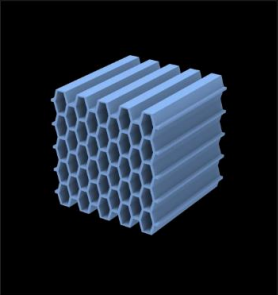
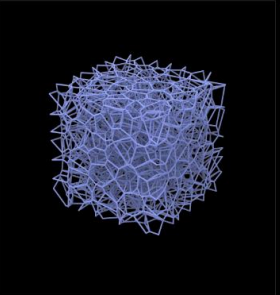
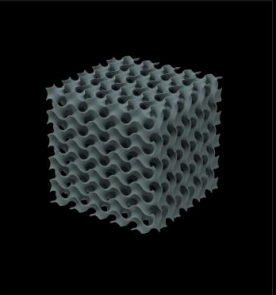
Tabellen är sammanställd baserat på egen erfarenhet med programvaran INTAMSUITE NEO.

Bilaga 2. Översikt över de vanligaste printparametrarna inom FDM-teknologin.

Printparameter	Beskrivning
Skikttjocklek	Tjockleken för varje enskilt skikt. Ökad tjocklek resulterar i sämre resolution men snabbare utskriftstid. Första lagret görs oftast 0,1 mm tjockare än resterande lager.
Linjebredd	Baseras långt på munstyckets diameter och skikttjockleken. Är linjebredden samma dimension som munstyckets diameter, erhålls de starkaste utskrifterna. Den kan ställas in mellan 60-200 % av munstyckets diameter men det mest optimala är 100-120 %, men det är ovanligt. Hellre byts munstycket ut till en annan dimension om förutsättningarna tillåter. (O'Neill, 2023).
Flöde	Definition på hur stort materialflöde som ska användas och anges i procentform, oftast 100 %.
Hastighet <ul style="list-style-type: none"> • Utskrift • Förflyttning • Nedkylning 	Förflyttningshastigheten är oftast högre än utskriftshastigheten. Skilda hastigheter kan även ställas in för väggar och stödstruktur. Högre utskriftshastighet reducerar utskriftstiden men försämrar kvaliteten. Nedkylning kan tillåtas eller förbjudas och anges i procentform. Nedkylningen erhålls genom inbyggd fläkt och förbättrar utskriftskvaliteten.
Temperatur <ul style="list-style-type: none"> • Utskrift • Printbädd • Kammare 	Utskriftstemperaturen berättar vid vilken temperatur materialet pressas genom munstycket. Uppvärmad printbädd förbättrar vidhäftningen och förhindrar skevning (Redwood m.fl., 2020, s. 29). Kammaren kräver uppvärmning endast för vissa material. Uppvärmad printbädd och kammare är tillgängliga endast för vissa 3D-skrivare.
Utfyllnad <ul style="list-style-type: none"> • Densitet • Mönster 	Både mönster och densitet ställs in för hur en komponent ska uppbyggas. Densiteten anges i procent. Högre densitet ger starkare detalj men ökar utskriftstid och materialåtgång. För topp- och bottenstikt kan andra mönster och densitet samt antal skikt väljas. Antal och tjocklek på så kallade skal kan anges separat.
Stödstruktur	Automatisk stödstruktur kan tillåtas och förbjudas. Stödstrukturer behövs vanligtvis för överhäng <45° eller bryggor över 10 mm (Redwood m.fl., 2020, s. 174). Vid vilken vinkel på överhäng som strukturer adderas kan justeras enligt eget tycke. Strukturer tas bort efter klar utskrift. Även för stödstrukturer kan mönster och fyllnadsgrad bestämmas.
Indragning <ul style="list-style-type: none"> • Hastighet 	För filamentbaserad teknologi tillåts filamentet dras tillbaka vid exempelvis förflyttning över ytor där föremålet inte är beläget. Detta förhindrar lösa trådar att sippra ut på komponent och omgivning. Hastigheten för indragningen kan bestämmas.
Vidhäftning <ul style="list-style-type: none"> • Skirt • Brim • Raft 	Det finns olika alternativ för att erhålla bättre vidhäftning till printbädden. Skild hastighet och andra villkor bestäms.
Svetspunktslinje	Bestämmer var utskriften ska börja för varje enskilt skikt. Ifall det lämnas odefinierat börjar varje skikt på ett och samma ställe.

(INTAMSYS, 2024b).

Bilaga 3. Fyra typer av gitterstruktur som används för olika ändamål i nTopology.

			
Beam For lightweight structures with excellent strength-to-weight ratio.	Honeycombs For structures with high compression strength and directional stiffness.	Stochastic For porous foam-like structures that approximate isotropy at larger sizes.	TPMS For structures with large surface area, high stiffness, and excellent manufacturability.

(nTop, 2024d).

Bilaga 4. Resultat från den statistiska analysen vid de mest påverkade områdena på provbitarna.

Struktur	Viktningsning [%]	Strukturens tjocklek [mm]	Deformation [mm]	Töjning	Spänning [Pa]	Spänning [Mpa]	Reaktionskrafter [N]
Referens	0,00		0,27	-0,0000094	17218800	17,22	26,41
1. Simple cubic	40,06	1,970	0,51	-0,0000123	28951700	28,95	55,99
2. Body centered cubic	39,98	1,305	0,56	-0,0000201	42361600	42,36	58,60
3. Face centered cubic	40,06	1,183	0,54	-0,0000168	33826500	33,83	56,31
4. Column	40,02	2,945	0,63	-0,0000214	37983400	37,98	62,25
5. Columns	39,98	2,070	0,68	-0,0000155	30626100	30,63	64,20
6. Diamond	40,05	1,326	0,54	-0,0000190	34210400	34,21	63,63
7. Fluorite	40,05	0,942	0,51	-0,0000148	42473500	42,47	53,61
8. Octet	40,01	0,858	0,52	-0,0000142	27333200	27,33	56,38
9. Truncated cube	40,06	1,732	0,52	-0,0000124	36353100	36,35	54,91
10. Truncated octahedron	40,01	1,005	0,53	-0,0000151	25648400	25,65	51,67
11. Kelvin cell	40,04	1,258	0,52	-0,0000175	31825800	31,83	55,21
12. IsoTruss	39,98	0,972	0,51	-0,0000163	55105200	55,11	52,94
13. Re-entrant	40,03	1,068	0,59	-0,0000210	36319000	36,32	50,51
14. Weaire-Phelan	39,98	0,785	0,49	-0,0000149	35685400	35,69	53,45
15. Triangular honeycomb	40,03	0,398	0,46	-0,0000129	26247400	26,25	61,05
16. Triangular honeycomb rotated	39,99	0,392	0,49	-0,0000094	33348800	33,35	56,01
17. Hexagonal honeycomb	40,05	0,660	0,44	-0,0000113	33981800	33,98	60,15
18. Re-entrant honeycomb	40,00	0,512	0,44	-0,0000098	24485000	24,49	63,34
19. Square honeycomb rotated	40,04	0,666	0,52	-0,0000133	33504700	33,50	55,73
20. Square honeycomb	40,03	0,935	0,46	-0,0000102	29435900	29,44	60,25
21. Face centered cubic foam	40,02	0,291	0,41	-0,0000113	26847100	26,85	62,08
22. Body centered cubic foam	40,05	0,233	0,37	-0,0000108	36227700	36,23	55,60
23. Simple cubic foam	39,97	0,727	0,48	-0,0000152	22326000	22,33	60,79
24. TPMS Gyroid	40,03	0,695	0,46	-0,0000015	26407900	26,41	54,23
25. TPMS Schwarz	40,07	0,385	0,46	-0,0000094	72086300	72,09	52,13
26. TPMS Diamond	40,02	0,582	0,43	-0,0000036	55778400	55,78	52,45
27. TPMS Lidinoid	39,99	0,373	0,57	-0,0000028	32891900	32,89	51,84
28. TPMS Split P	39,96	0,508	0,67	0,0000000	73029200	73,03	53,05
29. TPMS Neovius	40,01	0,121	0,45	-0,0000071	35147200	35,15	50,30

De rödmarkerade exkluderades omedelbart eftersom strukturens tjocklek var mindre än 0,4 millimeter, vilket var storleken för det 3D-skrivarens munstycke.

Struktur	Deformation [mm]
Referens	0,27
22. Body centered cubic foam	0,37
21. Face centered cubic foam	0,41
26. TPMS Diamond	0,43
17. Hexagonal honeycomb	0,44
18. Re-entrant honeycomb	0,44
29. TPMS Neovius	0,45
24. TPMS Gyroid	0,46
25. TPMS Schwarz	0,46
20. Square honeycomb	0,46
15. Triangular honeycomb	0,46
23. Simple cubic foam	0,48
14. Weaire-Phelan	0,49
16. Triangular honeycomb rotated	0,49
7. Fluorite	0,51
12. IsoTruss	0,51
1. Simple cubic	0,51
11. Kelvin cell	0,52
8. Octet	0,52
9. Truncated cube	0,52
19. Square honeycomb rotated	0,52
10. Truncated octahedron	0,53
3. Face centered cubic	0,54
6. Diamond	0,54
2. Body centered cubic	0,56
27. TPMS Lidinoid	0,57
13. Re-entrant	0,59
4. Column	0,63
28. TPMS Split P	0,67
5. Columns	0,68

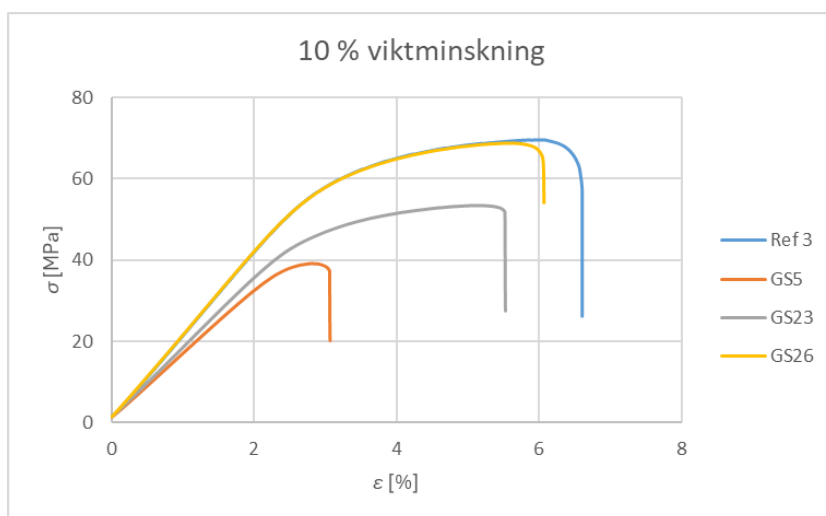
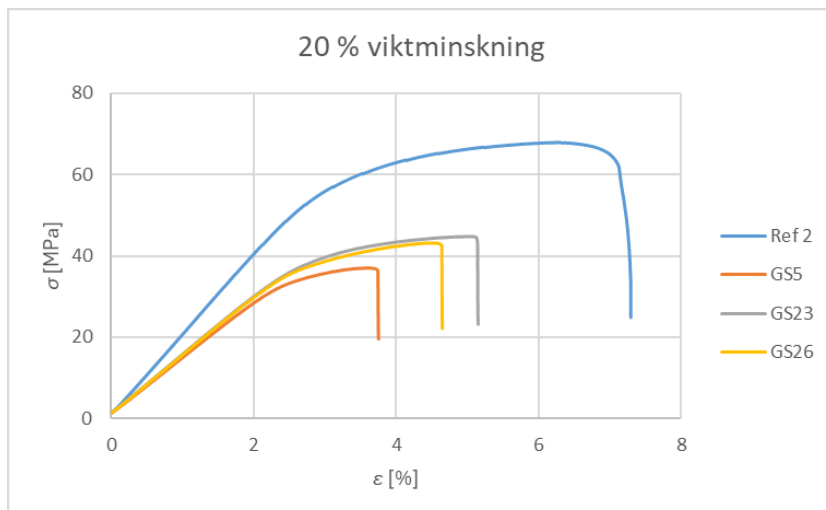
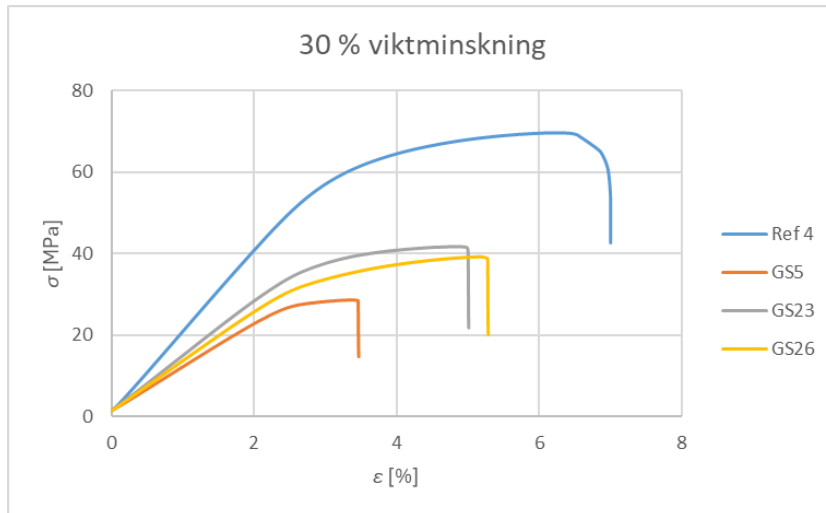
Bilaga 5. Använda printparametrar för alla provbitar.

Printparametrar	Värden
Kvalitet	
Skiktjocklek [första]	0,2 mm [0,3 mm]
Linjebredd	0,4 mm (100 %)
Flöde	100 %
Diameter på munstycke	0,4 mm
Diameter på filament	1,75 mm
Topp/botten	
Topplager	1,2 mm
Bottenlager	1,2 mm
Mönster	linjer
Väggar	
Väggjocklek	1,2 mm
Temperatur	
för utskrift	260 °C
för printbädd	90 °C
för kammare	40 °C
Hastighet	
för utskrift	60 mm/s
för förflyttning	100 mm/s
för väggar	30 mm/s
för topp/botten	30 mm/s
för första skikt	30 mm/s
Utfyllnad	
Mönster	koncentrisk
Densitet	100 %
Stödstruktur	nej
Övrigt	
Indragning av filament	ja
Nedkylning	50 %
Adhesionstyp [linjebredd] [hastighet]	skirt [0,4 mm] [30 mm/s]

Bilaga 6. Provbitarnas teoretiska tillverkningstid och materialåtgång samt faktisk materialåtgång.

Viktminskning	ID	Tillverknigstid	Tillverkningstid [min]	Teoretisk materialåtgång [m]	Teoretisk materialåtgång [g]	Faktisk materialåtgång [g]
40 %	GS5	1h 57min 3s	117	5,79	15,31	12,94
	GS23	2h 2min 16s	122	6,46	16,82	14,24
	GS26	2h 24min 17s	144	6,57	17,38	14,62
30 %	GS5	2h 12min 59s	133	6,99	18,50	15,77
	GS23	2h 16min 55s	137	7,23	19,12	16,34
	GS26	2h 51min 53s	172	7,35	19,45	16,36
20 %	GS5	2h 48min 6s	168	8,45	22,35	18,91
	GS23	2h 26min 50s	147	8,23	21,79	18,55
	GS26	3h 3min 36s	184	8,34	22,06	18,65
10 %	GS5	2h 58min 53s	179	8,96	23,71	20,20
	GS23	2h 37min 28s	157	9,22	24,40	20,88
	GS26	1h 44min 31s	105	9,99	26,44	22,51
0 %	Ref 1	1h 45min 18s	105	10,11	26,74	22,69
	Ref 2	1h 45min 18s	105	10,11	26,74	22,81
	Ref 3	1h 45min 18s	105	10,11	26,74	22,88
	Ref 4	1h 45min 18s	105	10,11	26,74	22,86

Bilaga 7. Spänning-töjningskurvor för referensprov och viktoptimerade provbitar vid en viktninskning på 30, 20 och 10 %.



I diagrammet antyds att GS26 skulle ha lika hög spänning som referensprovet, vilket inte stämmer. Detta beror på att den betraktades som ogiltig på grund av endast en viktninskning på cirka 1 %.

Bilaga 8. Kraft-deformationskurvor vid en viktninskning på 40, 30, 20 och 10 %.

