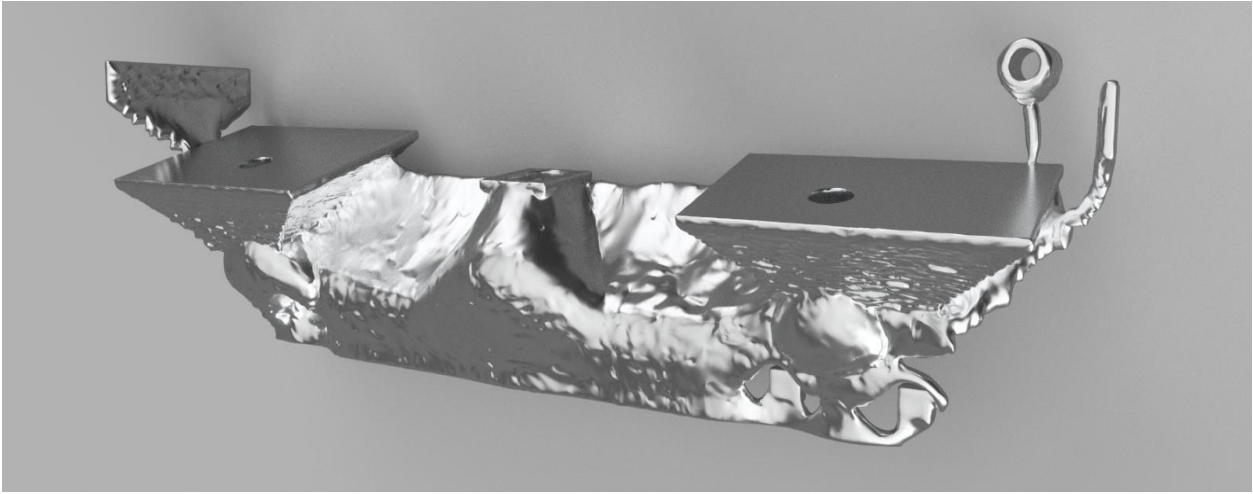




CHALMERS



Generativ design med additiv tillverkning

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Maskinteknik

JOEL FRANSSON
ADAM STEMBERGER

INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2020
www.chalmers.se

EXAMENSARBETE IMSX20

Generativ design med additiv tillverkning

En studie för användning av generativ design och additiv tillverkning vid optimering av produkter

JOEL FRANSSON
ADAM STEMBERGER

INDUSTRI OCH MATERIALVETENSKAP
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2020

Generativ design med additiv tillverkning

En studie för användning av generativ design och additiv tillverkning vid optimering av produkter

JOEL FRANSSON
ADAM STEMBERGER

© Joel Fransson & Adam Stemberger

Handledare: Pär Wikberg, Yovinn AB
Handledare: Lars Nyborg, Industri- och materialvetenskap
Examinator: Lars Nyborg, Industri- och materialvetenskap

Examensarbete IMSX20
Institutionen för industri- och materialvetenskap
Chalmers University of Technology
SE-412 96 Gothenburg
Telephone +46 31 772 1000

Förord

Arbetet har genomförts hos Yovinn med hjälp av Volvo Cars. Vi vill därför tacka Yovinn för möjligheten att genomföra arbetet hos dem. Vi vill även tacka Pär Wikberg som är handledare på Yovinn som hjälpt till med att hitta projekt och rådgivning. Vår examinator Lars Nyborg vid Institutionen för industri- och materialvetenskap som givit oss feedback. Till sist ska konstruktörer på Volvo Cars Robin Hjort, Krister Amundsson och Ola Öhrnberg ha ett stort tack för konsultation om projektet.

Abstract

In this thesis study, which is examined at Chalmers University of Technology and performed in co-operation with Yovinn, it is evaluated how generative design and additive manufacturing function as tools to optimize a product's strength and weight. In addition, it was also investigated how the workflow, costs and manufacturing-processes differs compared to traditional design methods. The reference object for this study is supplied by Volvo Cars through the Industrial design consulting firm Yovinn and is called Detalj X in the report.

During the work, a clear framework has been set up to highlight the pros and cons with generative design as a novel design process. Two concepts were also created through the generative design software, where one of the concepts was optimized to be manufactured in a plastic PA 12, and is called Detalj P, and the other in aluminum and is called Detalj Y.

The result was two new part designs that had a significantly lower weight than Detalj X, but still had the same mechanical performance according to the framework and requirements. However, this resulted in a cost increase if manufacturing Detalj P and Detalj Y with additive manufacturing compared to the conventional manufacturing technology currently used for Detalj X. Furthermore, a load case study was also conducted with the generative design software Autodesk Fusion 360. The purpose of this load case study was to understand if the concepts that were generated would change depending on where the load cases were defined.

The results obtained, clearly illustrates that generative design and additive manufacturing are efficient tools for optimizing complex parts as weight is reduced while mechanical performance can be retained. The generated parts were so complex that that additive manufacturing was the only option. Furthermore, the load case-studies showed that the results of the generated parts will not differ hugely depending on where they are defined if they are in the same direction and magnitude. This makes generative design a user friendly and efficient tool to create parts for manufacturing.

Sammanfattning

Detta examensarbete vid Chalmers tekniska högskola har genomförts i samarbete med Yovinn. Arbetet har utvärderat om generativ design och additiv tillverkning fungerar som verktyg för att optimera en produkts vikt och styrka. Utöver detta undersöktes det också hur arbetsgång, kostnader och tillverkningsprocesser skiljer sig åt från traditionella metoder. Referens produkten i fråga är tillhandahållen av Volvo Cars genom konsultbolaget Yovinn och kallas för Detalj X i rapporten.

Under arbetets gång har en tydlig ram lagts upp för att belysa fördelarna respektive nackdelarna med generativ design som process. Det skapades också två koncept med en generativ designprogramvara där ett av koncepten är optimerad för att tillverkas i plasten PA 12, kallad Detalj P och det andra avser aluminium, kallad Detalj Y.

Resultatet var två detaljer som hade en lägre vikt än referensen Detalj X, men uppvisade fortfarande samma mekaniska prestanda enligt angivna ramar och produktkrav. Detta medförde dock en kostnadsökning vid tillverkning för Detalj P och Detalj Y med additiv tillverkning kontra de traditionella tillverkningsmetoderna som används för Detalj X. Fortsättningsvis gjordes även två lastfallsstudier med den generativa designprogramvaran Autodesk Fusion 360. Syftet med denna studie var att förstå om de koncept som programmet föreslog skulle förändras beroende på var lastfallen definierades.

Betydelsen av de framtagna resultaten belyser tydligt att generativ design och additiv tillverkning är ett effektivt verktyg för att optimera detaljer då vikten kunde sänkas samtidigt som mekaniska prestanda kunde bibehållas. De genererade digitala detaljerna var också så pass komplexa att en konventionell tillverkningsmetod aldrig hade kunnat användas, vilket innebar att additiv tillverkning var det enda alternativet. Lastfallsstudierna pekade på att resultatet av de genererade detaljerna inte kommer att skilja sig åt avsevärt om användaren applicerar krafter på detaljen med samma magnitud från samma vinklar. Detta innebär alltså att generativ design är ett användarvänligt och effektivt verktyg för att realisera detaljer.

Innehåll

1	Inledning	2
1.1	Bakgrund	2
1.2	Syfte	2
1.3	Avgränsningar	2
1.4	Precisering av frågeställning	3
2	Teoretisk referensram	4
2.1	Definition av generativ design	4
2.2	Topologioptimering	5
2.3	Additiva tillverkningskedjan	6
2.4	Den generativa designprocessen	8
2.5	Arbetsflöde för generativ design kontra konventionella designmetoder	10
2.6	Relevanta additiva tillverkningsmetoder	12
2.6.1	Powder bed fusion	12
2.6.2	Binder jetting	12
2.6.3	Tillverkningsprocessernas för- och nackdelar	13
2.7	Design för additiv tillverkning	13
2.7.1	Generella designregler för additiv tillverkning	13
2.7.2	Design av polymerdetaljer för powder bed fusion	15
2.7.3	Design av metalldetaljer för powder bed fusion	15
2.7.4	Binder jetting - design	16
2.8	Detalj X	17
3	Metod	19
3.1	FEM-analys	19
3.2	Generativ designstudie	20
3.3	Olika lastfall	21
4	Resultat	22
4.1	Resultat av FEM - analys	22
4.2	Generativ design - simulering	23
4.2.1	Försök 1	23
4.2.2	Försök 2	25
4.3	Jämförelse av olika lastfall	27
5	Analys och Diskussion	27
5.1	Förändringar i kravstruktur efter försök 1	27
5.2	Förändringar för svetspunkter efter försök 1	28
5.3	Analys av försök 2	29
5.4	Urval	29
5.5	Kostnad	31
5.6	Mjukvara	31
5.7	Tillverkningsmetod för Detalj Y och Detalj P	31
5.8	Tidsaspekt för generativ design kontra traditionell design	32
5.9	Analys av lastfallsjämförelse	32

6	Slutsatser	34
7	Fortsatt arbete	36
7.1	Motgångar i projektet	36
8	Referenser	38

Ordlista

Följande är akronymer som används inom fältet av additiv tillverkning, 3D-skrivning och generativ design

CAD - Computer Aided Design

CNC - Computer Numerical Control

Detalj - En ursprunglig produkt innan den genererats av en programvara.

FEM - Finita-elementmetoden

MJF - Multi Jet Fusion

Printbarhet - Hur väl en design kan skrivas ut med additiv tillverkning.

Sintra - En process där fasta partiklar sammanfogas vid höga temperaturer.

STL - Standard Triangle Language

Variant - En detalj som genererats av en programvara.

Amorfa polymerer - polymerer som inte uppvisar några kristallina strukturer i röntgen- eller elektronspridningsförsök. De bildar en bred grupp av material, inklusive glasartade, spröda och duktila polymerer [1].

1 Inledning

Denna rapport behandlar tillvägagångssätt och utveckling av en detalj genom generativ design och additiv tillverkning. Detta avsnitt kommer att innehålla bakgrund, syfte, avgränsningar och precisering av frågeställning. Arbetet genomförs på konsultbolaget Yovinn och utvecklingsdetaljen tillhandahålls av Volvo Cars.

1.1 Bakgrund

I ett industrilandskap där tillverkningstekniker ständigt utvecklas och efterfrågan på komplexa, hållbara och anpassade lösningar ökar, är generativ design tillsammans med additiv tillverkning ett kraftfullt verktyg för att lyckas med framtidens design och konstruktionsutmaningar.

Yovinn är ett företag som vill utveckla sin kunskapsbredd inom generativ design för att kunna erbjuda dess fördelar till deras nuvarande och framtida kunder. Den långsiktliga visionen för Yovinn är att generativ design är ett steg mot en helt automatiserad framtagning och tillverkning av en produkt. Därför vill Yovinn ha ett arbete som tydligt klarlägger den framtida generativa designprocessen för framtida användning av verktyget.

1.2 Syfte

Syftet med denna studie är att undersöka hur det är möjligt att skapa en detalj för additiv tillverkning med hjälp av generativ design. Målet är att skapa en arbetsmetodik och visa med riktlinjer hur den här metoden kan användas, vilka fel som kan uppstå och vad som ska göras för att undvika dessa.

Genom att ta fram en produkt i ett mjukvaruprogram med CAD och med hjälp av generativ design går det på ett tydligt sätt visa hur metoden fungerar, vilka steg som behöver göras och hur väl denna detalj går att tillverka med additiva tillverkningsmetoder. Den framtagna detaljen kommer sedan att tillverkas så att en tydlig relation mellan den framtagna detaljen och ritningen framgår.

1.3 Avgränsningar

- Fokus på additiv tillverkning för metaller i första hand.
- Endast undersökning av pulverbäddstekniker.
- Utmattning av material tas inte i hänsyn till.

1.4 Precisering av frågeställning

- Hur kan generativ design appliceras idag för att få fram en produkt i CAD med design för additiv tillverkning?
- Vilka additiva tillverkningsmetoder fungerar bäst för den detalj som skapats i CAD med hjälp av generativ design. Hur lång är tillverkningsprocessen och efterbearbetningsprocessen?
- Finns det några besparingar i tid när generativ design appliceras kontra traditionella designmetoder?
- Blir designen signifikant annorlunda om lastfallen definieras olika vid givna kriterier?
- Korrelerar pris-antagandet som programvaran gör för en detalj med verkligheten då en detalj tillverkas? Vad är skillnaden jämfört med traditionell tillverkning?
- Vad är det för skillnad mellan generativ design och topologioptimering? Bli resultatet för de olika metoderna annorlunda?
- Är det lönsamt ur ekonomiskt perspektiv och tidsperspektiv att göra detaljen med hjälp av generativ design och additiv tillverkning istället för en konventionell tillverkningssteknik? Om inte, varför då och vad skulle kunna göra den lönsam?

2 Teoretisk referensram

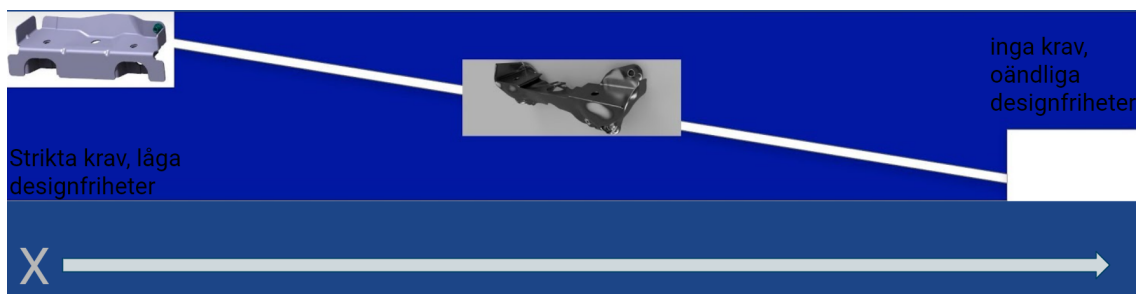
I detta kapitel kommer den teori som är lämplig att förstå för arbetets utförande och framtagning av resultat att presenteras. Definitionen av generativ design och dess process kommer att introduceras. Fortsättningsvis kommer de olika additiva tillverkningsmetoderna som är relevanta för detta projekt att förklaras och även hur tillverkningskedjan för additiv tillverkning går till. De olika tillverkningsmetodernas fördelar och nackdelar kommer vidare att redogöras för. Även en jämförelse mellan de traditionella och generativa designmetoderna genomförs. Designregler är en viktig del vid formgivning av detaljer som ska tillverkas med additiv tillverkning. Även en förklaring på vad topologioptimering är och hur det skiljer sig från generativ design kommer att framföras. Metoden FEM-analys förklaras och introduceras för Detalj X, som utgör referensobjektet för studien.

2.1 Definition av generativ design

Krish [2] definierar generativ design som en algoritmdriven designprocess som används för att få fram ett antal optimala alternativ från en initial design. Istället för att få fram en lösning, är det möjligt genom generativ design skapa olika lösningar som alla uppfyller de designkrav som är satta på en specifik detalj.

Fortsättningsvis så säger Khan [3] att även de mest erfarna formgivarnas intuition kan begränsas då ett enastående stort designutrymme används manuellt. När generativ design används skapas designutrymmet från vart den tänkta detaljen ska sitta. Olika datorsimulationer görs sedan och de resulterar i ett antal optimerade lösningar.

Generativ design kan ses som en linje där X-riktningen är faktorn på designfrihet vilket syns tydligt i Figur 1. Längst till vänster finns ingen eller mycket begränsade designmöjligheter. Där är det strikta krav och produkten ska bara tillverkas. Däremot i den andra änden, finns inga krav och oändliga designfriheter. Generativ design fungerar då det finns viss designfrihet till oändlig designfrihet, programmet skapar detaljer inom de dimensioner som tillåts av de uppsatta kraven. Dessa kan vara det tillgängliga utrymmet, kostnad, tillverkningsmetod, hållfasthet eller en kombination av de tidigare nämnda.



Figur 1: Definition av generativ design.

Khan [3] fortsätter att förklara att effektiviseringen i generativ design är enorm då det är möjligt för programmet att skapa oändligt många olika designer för en detalj.

Syftet med generativ design är att skapa detaljer som hade haft begränsningar vid traditionell formgivning. Det bidrar till komplicerade beräkningar och former vilket inte hade varit möjligt annars. Komplicerade former kan vara svårt att tillverka, därför samverkar generativ design och additiv tillverkning då detta gör det möjligt att realisera komplicerade produkter.

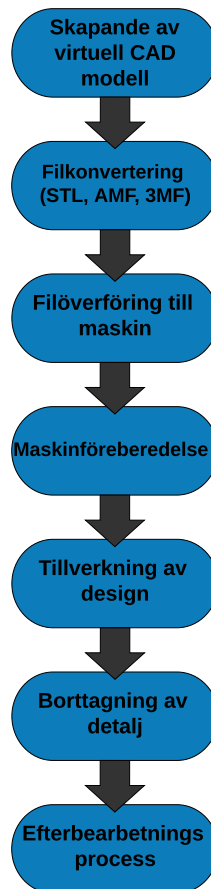
2.2 Topologioptimering

En vanlig missuppfattning är att topologioptimering och generativ design är samma designprocess.

Skillnaden mellan de olika metoderna är många. Till skillnad från generativ design skapas endast ett alternativ vid topologioptimering. Topologioptimering är en bra metod för att minska materialåtgång eller vikt på detaljen. På samma sätt som vid generativ design ställs krav på detaljen. Dessa krav är bland annat storlek på varianten, samt vilka krafter den ska klara av. Därefter beräknas programmet, efter algoritmer den mest effektiva designen, förklarar Autodesk [4]. Blankenship menar att topologioptimering inte tar hänsyn till utseende eller tillverkningsmetoder vilket bland annat påverkar kostnader [5].

Blankenship [5] fortsätter förklara att en detalj som är topologioptimerad alltid kräver redigering av design innan tillverkning då den inte är realiserbar. Idag finns även flera alternativ så att mjukvaran för generativdesign optimerar vikt och material utan att ta hänsyn till någon tillverkningsmetod. Detta innebär att en programvara som innehåller generativ design alltså klarar av att utföra en topologioptimering.

2.3 Additiva tillverkningskedjan



Figur 2: Additiva tillverkningsprocessen.

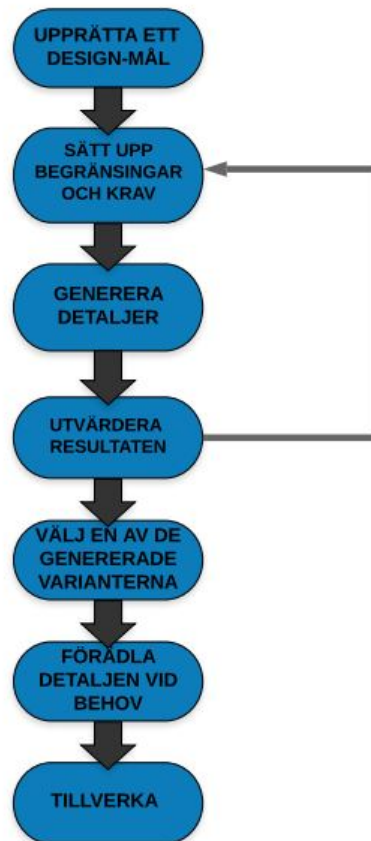
Det finns flera steg som måste genomföras för att en CAD modell ska bli en färdig 3D-printad produkt. Garret et al. [6] beskriver en process med sju delsteg, dessa delsteg illustreras i Figur 2.

1. Det första av dessa steg är att skapa en virtuell modell i ett CAD-program. Det är denna modell som sedan kommer bli den färdiga detaljen. Det är även viktigt att ta hänsyn till eventuella designregler som gäller för den specifika additiva tillverkningsprocessen som används samt det tänkta materialet. Dessa designregler beskrivs i avsnittet 2.5.
2. När modellen är färdig är nästa steg att omvandla CAD-modellen till en fil som 3D-skrivaren kan läsa. Motte et al. [6] menar att det vanligaste filformatet är STL, detta formatet konverterar CAD-modellen till en ytmodell bestående av sammansatta trianglar. Motte fortsätter att förklara att en modell som innehåller fler trianglar, kommer få en högre upplösning, vilket betyder att 3D-skrivaren kan skriva ut med större precision.
3. Nästa steg i den additiva tillverkningsprocessen är att överföra STL-filen till 3D-skrivaren. Mjukvaran i maskinen delar sedan upp produkten i STL-filen

till tunna lager. Vissa mjukvaror tillåter även möjlighet att ändra skrivarparametrar som skrivarupplösning, lagertjocklek, material, mönster och hastighet.

4. Steg nummer fyra innehåller den fysiska maskinförberedelsen. Detta innebär att exempelvis fylla en pulverbäddsmaskin med pulver, samt kontrollera att maskinen inte har något tydligt slitage eller behöver service.
5. Härnäst tillverkas detaljen i 3D-skrivaren. Beroende på vilken skrivare som används fungerar det på olika sätt, detta förklaras senare i rapporten. Tumregeln är dock att det tar längre tid att tillverka en detalj med additiv tillverkning kontra traditionell tillverkning beroende på detaljens komplexitet.
6. Vid det sjätte steget kommer borttagningen av detaljen från arbetsbordet. Även här sker det på olika sätt beroende på vilken tillverkningsprocess som använts.
7. Det sista steget är efterbearbetningsprocessen. Här kan det behöva göras en mängd olika processer, eller ingen alls. Är detaljen designad för additiv tillverkning är det möjligt att minimera detta steg då det kan kosta tid och pengar. Det kan röra sig om att svarva, slipa eller borra detaljen för att få det önskade slutresultatet. Oftast innebär detta steg att ta bort stödmaterial från detaljen.

2.4 Den generativa designprocessen



Figur 3: Den generativa designprocessen.

Den generativa designprocessen är inte likadan som för koventionella designmetoder. Arbetssättet kan delas in sju steg som kan ses i Figur 3.

1. Det första steget i den generativa designprocessen är att upprätta ett designmål. Detta innebär att upptäcka om det finns ett behov för en detalj som ännu inte existerar och då skapa denna, eller att ta en existerande detalj och optimera denna.
2. Under det andra steget sätts begränsningar och krav upp i den valda programvaran. Det görs genom att tala om för programmet inom vilka områden det ska skapa och bevara material samt var krafterna på kroppen verkar. Utöver detta bestäms även vilka material som ska vara med i studien, vilka tillverkningsmetoder som ska användas samt dess begränsningar. För att åstadkomma det i praktiken används funktioner som vi väljer att kalla *bevara geometri* samt *geometrihinder*.

Funktionen *bevara geometri* används för att definiera i programmet att den valda geometrin måste behållas. Det är sedan från dessa geometrier som variantgenereringen utgår från. Denna funktion används typiskt för att bevara skruvhål, bultar, ytor samt punkter där krafter verkar.

Geometrihinder är en funktion som används på ytor och kroppar vilket innebär att programvaran hindras från att tillsätta material på och igenom den valda ytan eller kroppen. Denna funktion används för att berätta var kringliggande komponenter ligger i förhållande till detaljen som ska skapas och därmed hindrar varianten från att skapa material där annat material redan existerar i verkligheten.

3. Efter alla förberedelser som görs i föregående steg är programmet redo att börja generera varianter av detaljen. Detta steg sköts av programvaran och beroende på de krav och begränsningar som har ställts upp, tar det olika lång tid att slutföra genereringen.
4. När programvaran har genererat så många varianter den anser vara tillräckligt utifrån de krav som uppsattes i steg 2 så kan användaren granska dessa varianter. Under detta steg får användaren information om varianternas materialåtgång, fördelaktig orientering för additiv tillverkning, ungefärlig tillverkningskostnad, volym, massa, säkerhetsfaktor och den högsta tillåtna spänningen enligt Von Mises varianten klarar.

Det är också under granskningen som det blir tydligt för användaren om varianternas slutresultat är som tänkt, eller om användaren behöver gå tillbaka till steg 2 för att justera krav och begränsningar.

5. Om användaren är nöjd med de olika varianterna så kan urvalet utföras. Detta urval görs genom att vikta de olika varianternas egenskaper emot varandra.
6. Vid arbete med generativ design kan den valda varianten behöva redigeras eller förädlas för att passa det tänkta utförandet. Då görs det i steg 6 i den generativa designprocessen. Ser användaren att olika ytor eller kroppar innehåller oanvändbara eller inte estetiskt tilltalande geometrier kan dessa redigeras bort innan nedladdning sker.
7. Efter nedladdning av varianten importeras denna till ett beredningsprogram för additiv tillverkning för att upprätta stödstrukturer och skriva ut detaljen.

2.5 Arbetsflöde för generativ design kontra konventionella designmetoder

Arbetsmetoden för generativ design skiljer sig en del mot konventionella design, vilket syns i Figur 4 nedan. Då skapandet av detaljen inte kräver aktivt arbete vid designen blir metodiken annorlunda och kommer beskrivas i nedanstående kapitel. Den konventionella designmetoden baseras på kursen *PPU195/TME270 Produktutvecklingsprojekt* och är gjord av Mats Alemyr, som är Tekniklektor på avdelningen för Produktutveckling, Institutionen för industri- och materialvetenskap.

1. I det första steget sker uppdragsbeskrivningen. Det är i detta steget som uppdragsbeställaren ger ramar för hur projektet ska genomföras, och vad som önskas av det slutgiltiga målet. Under detta steg skiljer sig inte de två designframtagningssmetoderna åt.
2. Under den traditionella designframtagningen upprättas krav i en kravspecifikation för att sedan viktas och avgränsas.

För den generativa designprocessen sätts krav upp enligt tidigare instruktioner, se kapitel 2.5.

3. Det tredje steget för den konventionella designframtagningen är idégenerering. Under detta steg samlas projektdeltagarna och utför metoder som 6-3-5 metoden, Osbournes Idésporrar samt Morfologisk matris. Detta görs för att skapa olika konceptlösningar för problemet.

Projektdeltagarna för den generativa designframtagningen upprättar kravstrukturer i den valda programvaran, samt tillsätter funktioner såsom *geometrihinder* och *bevara geometri* tills strukturen får ett önskat resultat.

4. Eliminering är det fjärde steget för den konventionella designframtagningen. Detta steg innebär som namnet säger, att eliminera de lösningar som inte löser de uppsatta kraven från steg 2. Dessa elimineringar kan göras genom att använda sig av eliminerings- och Pughmatriser.

För den generativa designframtagningen genereras nu detaljer. Eftersom inte detta kräver aktivt arbete av gruppmedlemmarna så har detta steg illustrerats med en grön färg i Figur 4.

5. När elimineringen är utförd har projektgruppen för den konventionella designframtagningen en konceptlösning kvar. Denna konceptlösning är designen som kommer att väljas, och nästa steg är att välja material samt hitta en passande tillverkningsmetod.

För projektgruppen som jobbar med den generativa designframtagningen innehåller istället det femte steget en utvärdering av resultaten för genereringen av detaljer. Här utvärderas genererade detaljer som en konventionell designframtagning, där eliminerings- och Pughmatriser kan användas. En jämförelsefunktion i programvaran kan även användas för att välja en optimal detalj mot de uppsatta kraven.

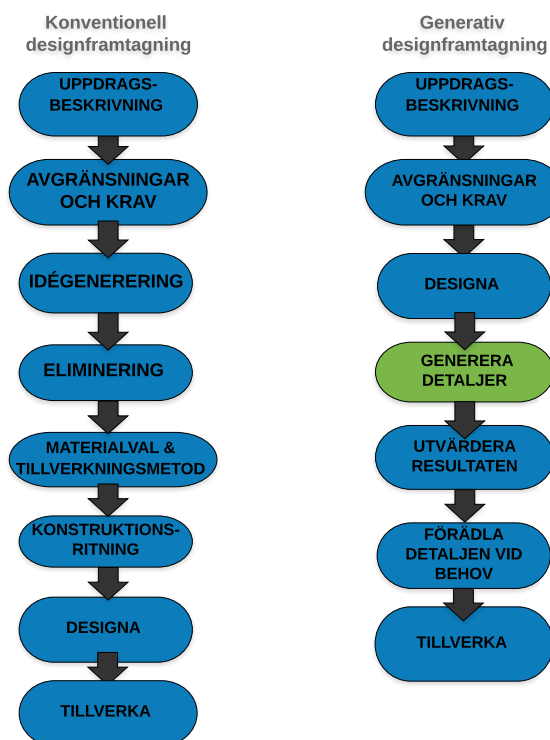
6. Vid det sjätte steget för den konventionella designframtagningen skapas en ritning av detaljen, som nu har ett valt material och tillverkningsmetod. Denna ritning kommer att vara underlag till nästkommande steg.

Den generativa designframtagningens processen har nu valt en detalj och kan därför laddas hem. Det är i detta steget som projektgruppen får studera detaljen så att inga uppenbara felaktiga lösningar har skapats av programvaran. Om detta är fallet, får projektgruppen redigera detaljen i en CAD-programvara för att uppnå önskat resultat.

7. Vid konventionell framtagning är projektgruppen redo att designa sin detalj i ett CAD-program. Detta görs genom att utgå från ritningen som skapades i föregående steg.

Den generativa designframtagningens processen har nu nått sitt slutmål. I det sjunde steget så är produkten redo att tillverkas. Detta görs genom att importera den editerade filen till en 3D-skrivare för att sedan tillverkas.

8. Den konventionella designframtagningens processen är nu redo att tillverka sin produkt. Det görs genom de metoder som bestämdes i projektgruppen i det femte steget.



Figur 4: Designframtagning, jämförelse.

2.6 Relevanta additiva tillverkningsmetoder

Det finns flera olika additiva tillverkningsmetoder idag. Dessa brukar typsikt sett delas in i följande sju grupper: Vat photopolymerization, Powder bed fusion, Material extrusion, Material jetting, Binder jetting, Directed energy deposition och Sheet lamination.

Av dessa metoder kommer det bara diskuteras för två i efterföljande kapitel. Dessa två är Powder bed fusion och Binder jetting. Anledningen till detta är den avgränsning som gjordes i kapitel 1.3, som säger att fokuset ska ligga på additiv tillverkning för metaller i första hand, men en prototyp ska också kunna tillverkas i plast. Både Powder bed fusion och Binder jetting kan användas för tillverkning av metall-och plast detaljer med hög komplexitet, vilket talar för användningen av båda dessa tillverkningsmetoder.

2.6.1 Powder bed fusion

Powder bed fusion är en process som kan tillverka detaljer i metall, polymer och keram. Processen använder sig av en laser eller elektronstråle för att selektivt smälta samman ett lager pulver. Efter detta flyttas byggplattan ner och ett nytt lager pulver adderas sedan på byggplattan med ett bestrykarblad för att sedan smältas samman.

Användningsområdena för tillverkningsprocessen idag är främst inom medicinsk teknik, flyg och energi, men även inom fordonsindustrin då den lämpar sig för tillverkning av starka funktionella detaljer.

2.6.2 Binder jetting

Både Motte et al. [6] och Nordin et al.[7] förklarar att binder jetting selektivt droppar ett bindemedel över en pulverbädd. Detta bindemedel utgörs av droppar som är ungefär 80 mikrometer i storlek, binder samman pulverpartiklarna så att man får ett lager. Bindemedlet kan även innehålla en färg så att hela detaljen blir färglagd direkt vid tillverkning, vilket tillämpas för polymerer. Därefter flyttas byggplattformen ner ett steg och processen börjar om med ett nytt lager. När detaljen är färdigställd så låter man detaljen ligga kvar i pulverbädden för att härda. När härdningen är färdigställd tas den färdiga detaljen ut från pulverbädden och det obundna pulvret tas bort från detaljen genom användning av komprimerad luft.

Motte et al. [6] fortsätter och belyser att denna process fungerar även för tillverkning av metall detaljer, men då används metallpulver och ett anpassat bindemedel istället och kräver en efterföljande avdrivning av bindemedlet och sintring för att ge erforderlig täthet och mekaniska egenskaper. Detta betyder också att binder jetting för polymerer innebär signifikant lägre hållfasthet.

Användningsområdena för processen idag är främst inom prototypframtagning då binder jetting gör det möjligt att framta stora och färgade detaljer. Det används också för att skapa stora sandgjutningsformor samt för utskrift av metall detaljer för låg kostnad.

Binder jetting kan delas in i direkta och indirekta tekniker. Direkta tekniker innebär

att en detalj till form skapas direkt i processen. Alltså detaljen som man avser att designa har blivit skapad av den additiva tillverkningsmetoden.

Vid indirekt teknik menas att den avsedda detaljen som man vill tillverka skapas efter användning av en annan tillverkningsteknik. Med hjälp av den additiva tillverkningsprocessen möjliggörs exempelvis tillverkning av en sandform för att användas vid gjutning av slutprodukten.

2.6.3 Tillverkningsprocessernas för- och nackdelar

Fördelar med Powder bed fusion är många. Det är möjligt att skapa en detalj av konventionella polymerer, amorfa polymerer, kompositer, metaller samt metallegeringar. Fortsättningsvis kräver inte heller polymerdetaljer några stödstrukturer vid tillverkning i pulverbädd, vilket kommer att spara tid och pengar då man minimerar efterbearbetningsprocessen. Till sist är även tekniken kapabel till att tillverka avancerade och komplexa geometrier som kylkanaler, vilket gör den perfekt för komplettera generativ design då de genererade detaljerna ofta har en hög grad komplexitet.

Nackdelen med processen är att den har en ganska dålig precision vid tillverkning, samt att ytfiniteten inte blir lika bra som vid exempelvis Binder jetting. Utöver detta så behövs alltid stödstrukturer vid tillverkning av metall, vilket medför en lång och dyr efterbearbetningsprocess.

Binder jetting är en intressant metod för framtiden då processen kan framta detaljer för en låg kostnad. Detta beror delvis på den låga energiförbrukningen och den snabba hastigheten som maskinen kan operera med under tillverkningen av detaljer. Detta medför att denna tillverkningsmetoden har en högre grad av produktivitet än pulverbäddstekniker.

Dock är metoden inte ännu riktigt redo för att appliceras inom exempelvis flyg och bilindustrin då den inte innebär full täthet för metalldetaljer som vid powder bed fusion, men kan kostnadsmässigt medge större seriestorlekar.

2.7 Design för additiv tillverkning

Eftersom de olika additiva tillverkningsmetoderna skiljer sig åt, betyder det att olika krav beroende på metod måste upprättas för att tillverkningen ska bli som önskad. I detta avsnitt kommer grundläggande designregler samt relevanta regler för varje tillverkningsprocess att redogöras.

2.7.1 Generella designregler för additiv tillverkning

Enligt Motte et al. [7] finns det sju designregler för additiv tillverkning.

1. Den första regeln säger att design beror på vilket material och tillverkningsmetod som väljs för detaljen. Detta är relevant då varje tillverkningsmetod och material har sina egna begränsningar för hålstorlek, godstjocklek, temperatur och för vilken orientering detaljen skrivs ut i.

De olika tillverkningsmetodernas specifika regler för arbetet kommer att diskuteras nedan.

2. 3D-printing idag är inte utvecklat för massproduktion. Motte et al. förklarar att det vid vissa fall inte är ekonomiskt försvarbart att tillverka detaljen i en 3D-skrivare. Vid flera fall fungerar traditionella tillverkningsmetoder såsom CNC-maskiner utmärkt. Traditionella tillverkningsmetoder kan vara ett billigare och snabbare alternativ till additiv tillverkning. Motte et al. menar att ju mer komplex detaljen är, desto mer värt är det att använda sig av additiv tillverkning [7].
3. En fördel med additiv tillverkning är att det inte kostar något extra att göra detaljen mer estetiskt tilltalade. Motte et al. menar att det sällan kostar mer i material eller tid att skapa en detalj med komplexa former för additiv tillverkning. Former som inte skulle vara möjliga för traditionella tillverkningsmetoder [7].
4. En regel som gäller all tillverkning av produkter är att alltid sträva efter att uppnå runda hörn, då kanter alltid upplever högst spänningar. För additiv tillverkning är det enkelt och billigt att runda hörn på insidan av en detalj, något som kan vara problematiskt vid traditionell tillverkning.
5. Slutlig kvalitet för en detalj som tillverkas med additiv tillverkning har stor relation till detaljorienteringen i maskinen eftersom det är orienteringen som bestämmer anisotropin. Detta innebär att materialet har olika fysikaliska egenskaper i olika riktningar. Motte et al. [7] jämför detta med egenskaper hos trä där stycket är starkt när kraft appliceras vinkelrätt mot träfibrer och svagt när de appliceras horisontellt. Tillverkningen gör att det vertikala Z planet blir det utsatta planet och är därför känsligare.
6. Eftersom detaljen tillverkas lager för lager blir ytan finast om den längsta delen är i horisontell riktning. Det minskar även tillverkningstiden då färre lager bidrar till snabbare tillverkningstid. Men däremot är inte alltid den längsta delen som ska vara i horisontell nivå. Det ska även tas hänsyn till hål, kanter eller om det krävs stödmaterial, vilket varierar från detalj till detalj.

För att minska kostnader och tillverkningstider är det viktigt att minska material åtgången som även minskar vikten på detaljen. Därför bör detaljen inte innehålla några onödiga funktioner speciellt inte om materialet är dyrt [6].

7. Den sjunde regeln förklarar att all design ska sträva efter att minimera stödmaterial. Detta kan göras till stora delar genom att tillämpa regeln om detaljorientering.

Eftersom stödmaterial har en direkt koppling till detaljens slutgiltiga kvalitet, men också till hur omfattande efterbearbetningsprocessen blir, är det viktigt att vikta dessa två faktorer mot varandra så att detaljen som tillverkas blir som tänkt, men inte så att man ödslar tid på att ta bort för mycket stödmaterial då detta kommer öka tillverkningskostnaderna.

2.7.2 Design av polymerdetaljer för powder bed fusion

De flesta kvalitetsproblem som uppkommer vid polymertillverkning med powder bed fusion är skjuvning eller förvrängning av stora, platta ytor. Detaljer med tjocka kompakta områden som hålls ihop av tunna ytor har hög sannolikhet att få sådana förvrängningar [6] [7].

Detaljorienteringen i pulverbädden kan också ha stor påverkan på om detaljen blir förvrängd. Tillverkas en förhållandevis lång och tunn detalj som har horisontell orientering i pulverbädden innebär det att det blir ett stort avstånd mellan var lasern börjar smälta och var den slutar. Detta skapar en temperaturskillnad i pulvret som kan leda till förvrängning vid kylprocessen då allt byggt material inte kyls med samma hastighet. Detta innebär att det är viktigt att orientera detaljen så att värme avleds på lämpligt sätt.

Detta är extra viktigt när önskad detalj innehåller hål. Detaljer som är tillverkade med orienteringen i den vertikala axeln kommer att ha en bra cirkulär form eftersom hela tvärsnittet tillverkas lager för lager. Detta innebär att alla områden av den cirkulära formen svalnar i samma takt.

Hål som tillverkas i horisontell riktning kommer däremot att ha en ojämn svalningstid och det blir stor chans att hålet blir ovalt samt att det bildas ett trappliknande utseende på hålets yttre väggar [6]. Därför rekommenderas det att hål som kräver stor precision vid tillverkning istället bearbetas genom borrar.

Garret et al. fortsätter berätta att även storleken på detaljen som skall tillverkas har en betydelse på slutesultatet om inte orienteringen tas till hänsyn [6]. För konstruktören är det viktigt att veta de maximala byggdimensionerna för pulverbädden för att konstatera att detaljen passar byggparametrarna samt att den faktiskt går att orientera i önskad riktning vid tillverkningen.

2.7.3 Design av metalldetaljer för powder bed fusion

Additiv tillverkning av metall med Powder bed fusion metall använder sig av stödmaterial på tre olika sätt. Garret et al. betonar att stödmaterialen erbjuder en plattform för nästa lager att bygga på genom att stödmaterialen printas först, sedan används materialet för att printa de solida sektionerna som detaljen kommer att bestå av [6].

Fortsättningsvis så förankrar stödmaterialen detaljen på byggplattan, därmed ökar styvheten för detaljen och tunnare delar av detaljen har större chans att behålla sin tänkta form. Det är kritiskt för att få ett lyckat slutresultat då de höga temperaturgradienterna som uppstår vid metalltillverkning kan leda till spänningar och därmed deformation av detaljen.

Motte et al. nämner också att stödmaterialen vid metalltillverkning fungerar som en utmärkt värmeavledare och används för att få detaljen att kylas i en jämn takt, vilket även gynnar slutresultatet då risken för deformation minskar [7].

Stödstruktur för metalldetaljer skrivs typiskt ut i ett gallermönster. Det görs för att spara materialkostnad samt minimera byggtiden. Garret et al. hävdar att en detalj

med delar som har en överhängsvinkel på mindre än 45 grader ska stödmaterial används för bästa materialutseende samt att förhindra kollaps av detaljen [6]. De fortsätter och berättar att metalldetaljer generellt får bättre slutresultat då mycket stödmaterial används. Däremot blir tillverknings tiden samt kostanden för tillverkningen högre.

Andra skillnader vid jämförelse av polymerbaserad 3D-printing förekommer. Ett exempel är att stora ihåliga ytor inte lämpar sig speciellt bra för metallprintning med Powder bed fusion. Det beror på att dessa tillverkningsmetoder förlitar sig, som tidigare nämnt, mycket på möjligheten av att kunna implementera stödmaterial. Ihåliga ytor är väldigt svårt att tillverka utan att använda stödmaterial. Problemet är att efter en lyckad printning är det nästan omöjligt att få ut stödmaterial ur ett tänkt ihåligt utrymme. En viktig tumregel att ha med sig i designprocessen är att skapa ett ihåligt utrymme som klarar av att hålla formen utan stödmaterial.

2.7.4 Binder jetting - design

Bindemedlet i Binder Jetting är viktigt att ta hänsyn till då de olika medlen fungerar på olika sätt. Garret et al. (2018) [6] menar att det i dagsläget finns fyra olika bindemedel. Den första av dessa kallas för Furan binder. Detta bindemedel behöver inte värme för att härda, vilket betyder att utskriften av detaljen kan användas för sandgjutning omedelbart utan några förändringar i gjutningsprocessen.

Garret et al. (2018) [6] pratar även om 'Phenolic Binder'. Detta bindemedel är bäst lämpad för sandgjutning vid väldigt höga temperaturer. Den höga värmen medför också att tunna väggar eller rör är möjliga att tillverka. Vid användning av detta bindemedel används mikrovågsteknik.

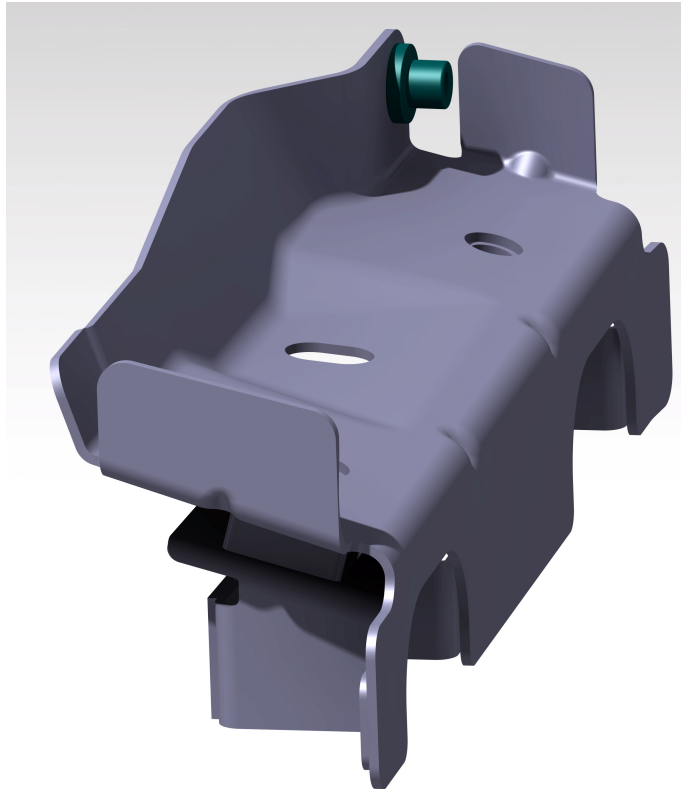
'Silicate binder' är nästa bindningsmedel. Fördelar med detta bindningsmedel är att det är miljövänligt, vilket resulterar i låga gasutsläpp vid gjutningsprocessen. Även här härdas detaljen och bindningsmedel med hjälp av mikrovågor och är bäst lämpad för tillverkningen av sandformar.

Det sista bindningsmedlet som Garret et al. (2018) [6] berättar om heter 'Aqueous-Based Binder'. Detta vattenbaserade bindningsmedel binder lager av metallpulver samman. Används för att uppnå en enkel uppbränning för produktion av metalldetaljer.

När en detalj som tillverkas genom Binder Jetting har blivit färdigställd är de väldigt ömtåliga eftersom de endast består av sand eller pulver som är bundet samman genom bindemedel. Detta ömtåliga stadiet kallar Garret et al. (2018) [6] för 'det gröna stadiet'. Även om Binder jetting erbjuder en stor designfrihet, ska detaljen kunna hanteras när den befinner sig i det 'gröna stadiet'. Det kommer krävas efterbearbetning och behövs vara starkt nog för att klara av den processen. Det brukar oftast vara att ta bort obundet pulver genom borstar eller tryckluft.

Om delar av en detalj är för ömtålig går det att lägga till extra stödstrukturer vid tillverkningen för att eliminera detta.

2.8 Detalj X



Figur 5: Detalj X.

Referensdetaljen, som valdes för studien kallas för Detalj X och illustreras i Figur 5. Den är tillhandahållen av Volvo Cars genom Yovinn. Det är på denna detalj som generativ design appliceras, syfte är att optimera detaljens form, vikt och styrka. Detaljen är idag konstruerad i kolstål men kommer troligen att designas för konstruktion i ett annat material efter den generativa designprocessen då kolstål idag är på utvecklingsstadiet som additivt tillverkningsmaterial.

Vid konsultation med konstruktörerna från Volvo Cars angående Detalj X framkom att denna har designbegränsningar på grund av utrymmesskäl där den monteras. Alltså är den inte optimerad för att klara maximala lastfall eller för att vara så lätt så möjligt. Emellertid uppfyller detaljen de krav som ställs vid påfrestningar och krock.

Detta medförde i sin tur vissa begränsningar på hur mycket Detalj X kan omredesignas. En av de viktigaste begränsningarna var att de generativa varianterna som skapades behövde ha identiska yttermått som Detalj X ovan. Detta gäller eftersom varianten annars riskerar att inte passa i den tänkta positionen vid montering.

Den andra begränsningen var punkterna där Detalj X sammansätts med omkringliggande detaljer, exempelvis svetspunkter och hål. Dessa måste vara på samma position efter en omredesign då en förändring av dessa fästpunkter kan medföra en omredesign av inte bara Detalj X, utan även angränsande detaljer.

Konstruktörerna från Volvo Cars berättade att Detalj X idag väger 917 gram, det är en lågvolymsprodukt och kostar cirka 200 kronor att tillverka. Ett starkt önskemål är att de genererade detaljerna som baseras på Detalj X inte ska väga eller kosta mer.

Fortsättningsvis gav Volvo Cars inte ut information om lastfallen för Detalj X. Av denna anledning gjordes antaganden genom att utsätta Detalj X för en FEM-analys. På så sätt kunde nivån på krafterna som påverkar Detalj X säkerställas.

3 Metod

Det första som gjordes var en förstudie om generativ design. I förstudien ingick det att skaffa en förståelse för hur generativ design fungerar i praktiken, få en förståelse för vilka programvaror som används till generativ design samt skaffa en djupare förståelse för en programvara så att en komplett detalj kan konstrueras med specifika lastfallskrav och materialkrav.

Förstudien innehöll en undersökning av olika additiva tillverkningsmetoder. Undersökningen låg till grund för beslutet om vilken tillverkningsmetod som skulle ge det optimala resultatet för detaljen. En undersökning av designregler för additiv tillverkning genomfördes också då detta var centralt för att kunna tillverka detaljen utan uppenbara misstag.

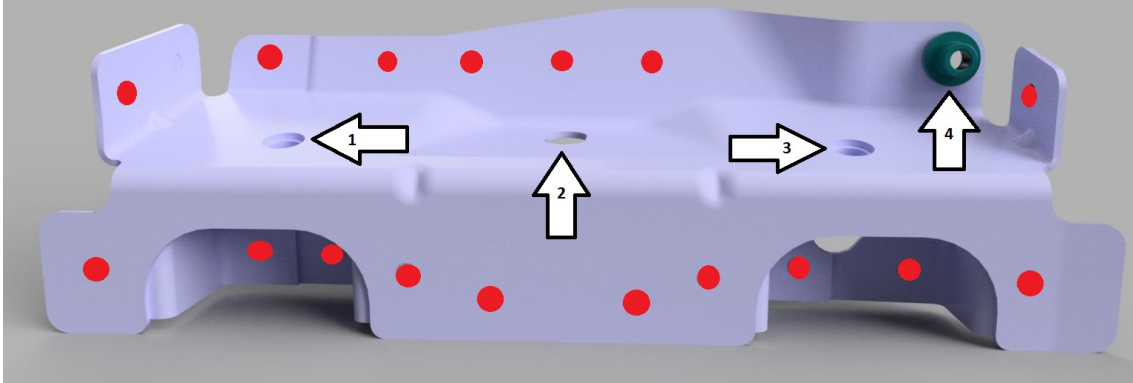
3.1 FEM-analys

Efter undersökningarna gjordes en FEM-analys som krävdes för att se vilka laster som Detalj X klarar av att hantera. Som tidigare förklarats i kapitel 2.1 så gavs inte lastfallen och krafterna ut vilket krävdes för en generativ designstudie.

Den nya designen som framkommer genom den generativa processen måste minst ha samma säkerhetsfaktor som Detalj X, därför används FEM-analys. Detta görs för att förstå hur mycket last Detalj X klarar av i olika riktningar. FEM-analysen gjordes med programvaran Fusion 360.

Genom att ställa upp krafter och krav beräknas sedan då med FEM, mekaniska prestanda för Detalj X. På detta sätt går det att beräkna hur stora krafter Detalj X klarar av och vilka krafter det ska dimensioneras för med i generativ design Autodesk [8] Vid konsultation med konstruktörerna på Volvo Cars om Detalj X, antogs att kritiska påkänningar borde finnas för de två skruvhålen, som benämns som '1' och '3' i Figur 6 på ovansidan av Detalj X. Med största sannolikhet sitter det skruvar som förankrar Detalj X i en annan detalj och därför påverkas skruvhålen av krafter. Dessa krafter sattes till 1000 N för respektive hål.

Fortsättningsvis kontrollerades för varje svetspunkt genom FEM-programvaran att även dessa kommer att påverkas av olika krafter efter montering. Svetspunkterna för framsidan av Detalj X är markerade med röd färg i Figur 6. Även skruven kommer att påverkas av krafter och kommer också vara delaktig i simuleringen som en fixerad punkt. Skruven benämns som '4' i Figur 6. Materialet som användes i FEM-analysen är kolstål och därför används typiska materialegenskaper för relevant kolstål i beräkningarna.



Figur 6: Detalj X med annoteringar.

3.2 Generativ designstudie

Efter FEM-analysen var det möjligt att göra en generativ designstudie då omfattningen av krafterna var kända. De krafter som påverkar Detalj X kommer även att påverka de nya detaljerna. Som nämndes i kapitel 2.1 bör skruvhål och fästpunkter vara identiska för de nya genererade detaljerna. Samma kraft, 1000 N påverkar även de både skruvhålen. Utöver detta har Detalj X ett begränsad designvolym på grund av omgivande komponenter, därför är flera områden otillgängliga för nya detaljerna från den generativa designen.

De tillverkningsmetoder som används är additiv tillverkning, samt en obegränsad metod. Detta innebär att programvaran inte tar hänsyn till någon befintlig tillverkningsmetod vid sina beräkningar utan utgår från helt fri designmöjlighet. Konstruktorerna på Volvo Cars förklarade även att gjutning var en intressant tillverkningsprocess för Detalj X, så detta inkluderades i studien.

Materialen som användes är applicerbara vid additiv tillverkning och är aluminium av typ AlSi10Mg, magnesium, rostfritt stål av typ AISI 304, titan 6Al-4V och plasten PA12 HP MJF, det vill säga nylonplast från HP, polyamid, där MJF står för multijet fusion. Detalj X är idag gjord av kolstål och kommer därför också användas i studien trots att materialet inte kommersiellt utvecklade för additiv tillverkning. De olika materialen har olika elasticitetsmoduler och densiteter, dessa listas nedan:

- E-modulen för kolstål är 200 GPa och materialet har densiteten 7850 kg/m^3
- E-modulen för aluminium AlSi10Mg är 71 GPa och materialet har densiteten 2670 kg/m^3
- E-modulen för PA12 HP MJF har 1.8 GPa och materialet har densiteten 1010 kg/m^3
- E-modulen för Titan 6Al-4V har 113.8 GPa och materialet har densiteten 4430 kg/m^3
- E-modulen för rostfritt stål AISI 304 har 195 GPa och materialet har densiteten 8000 kg/m^3
- E-modulen för magnesium har 44 GPa och materialet har densiteten 1740 kg/m^3

Naturligtvis tar generativ design hänsyn till de olika materialegenskaperna och designar utefter dessa, därav kommer de genererade detaljerna ha olika vikt och egenskaper.

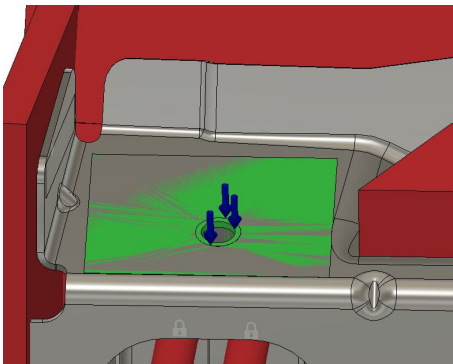
Eftersom generativ design är en relativt ny metod som inte är fullt utvecklad finns det inte möjlighet att välja alla metoder som det gör med traditionell tillverkning. Däremot försöker programmet att generera detaljer utefter generella designregler för additiv tillverkning som nämnts i kapitel 2.7.1. Metoden försöker anpassa detaljer för att få så bra printbarhet som möjligt.

När studien var färdig bedömdes de olika detaljvarianterna genom att jämföras med varandra utifrån uppsatta krav. I slutet av arbetet framställdes den valda detaljvarianten genom den valda additiva tillverkningsmetoden.

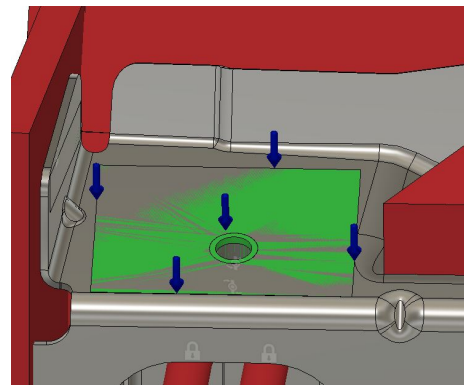
3.3 Olika lastfall

En jämförelse av två olika lastfall gjordes för Detalj X för att få förståelse om placeringen av laster förändrade utfallet för de olika genererade varianterna i programvaran. Dessa två lastfall, benämndes som lastfall 1 och lastfall 2 och kan ses i Figur 6 och 7.

För lastfall 1 applicerades kraften 1000 N vid kanten av hålen på de två plattorna. För lastfall 2 applicerades istället kraften 1000N på hela ytan av de två plattorna.



Figur 7: Lastfall 1.

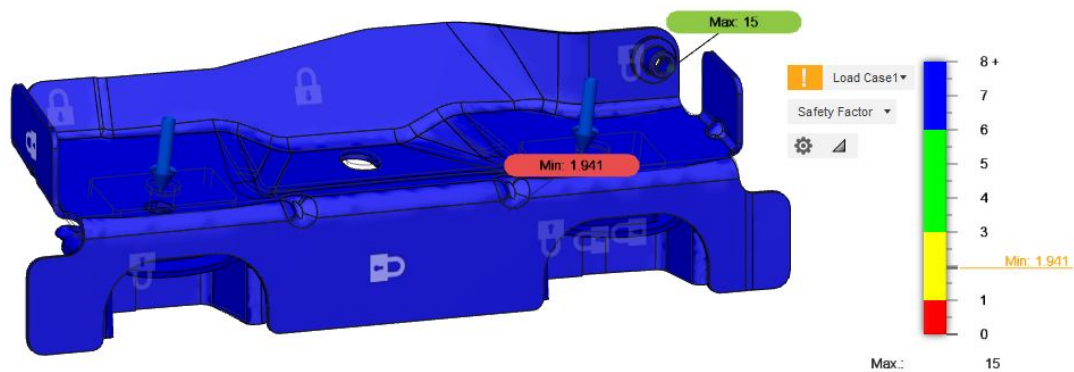


Figur 8: Lastfall 2.

4 Resultat

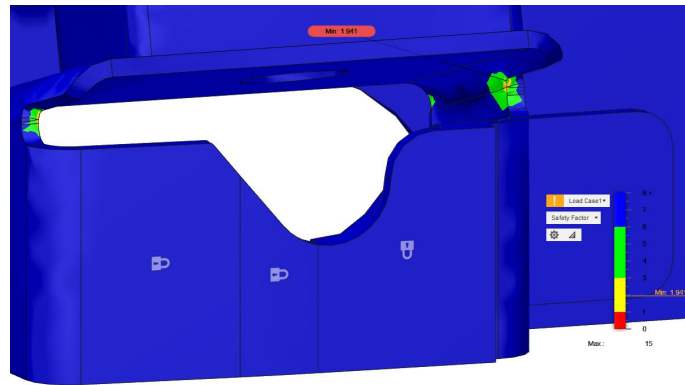
Detta kapitel redogör för arbetsresultatet. Avsnittet är uppdelat i följande delresultat: resultatet från FEM-analysen, kraven på den nya detaljen, resultat från generativ design och en jämförelse mellan olika lastfall.

4.1 Resultat av FEM - analys

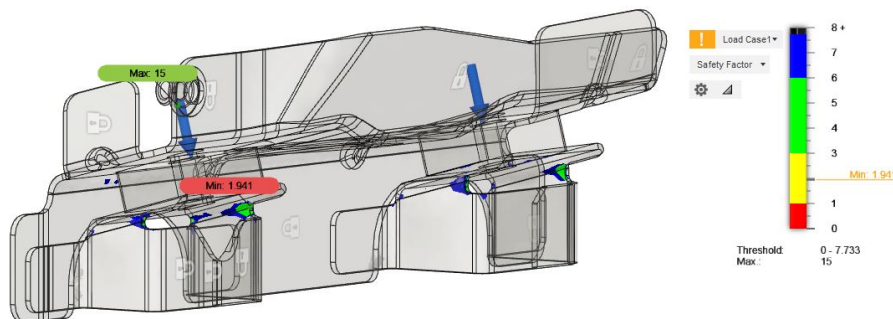


Figur 9: Detalj X, Z-riktning.

FEM-analysen visar att detaljen har bra hållfasthet. Detalj X har förhållandevis låga spänningar och krav på en minsta säkerhetsfaktor på 1.941 vid en kraft på 1000 N. Som Figur 9 visar, ligger säkerhetsfaktorn på minst 6, förutom vid de punkter som illustreras nedan i Figur 10 och 11.



Figur 10: Detalj X, säkerhetsfaktor.



Figur 11: Detalj X, krafter.

Enligt Dahlberg (2001) är spänningarna som högst vid små radieförändringar [9] och det är därför i dessa områden på Detalj X som spänningarna är som högst, se Figur 10. Det är dessa krafter som kommer att begränsa den generativa designprocessen.

4.2 Generativ design - simulering

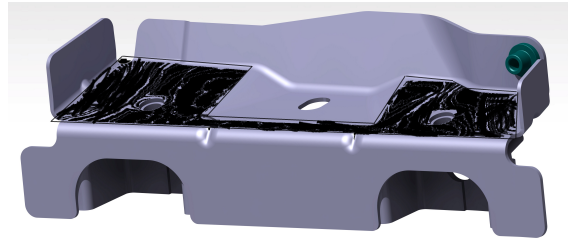
I detta avsnittet kommer resultatet av de olika generativa designsimuleringarna att redovisas. Det gjordes två generativa designförsök vilket redovisas nedan i underrubrikerna, Försök 1 och Försök 2.

4.2.1 Försök 1

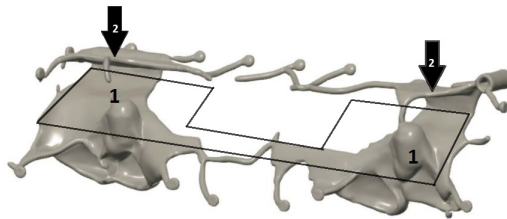
Efter att den första generativa designsimuleringen gjordes, genererades fyrtiofem olika varianter av den nya detaljen. Dessa varianter har alla olika former och material. Vid analys av de olika varianterna framkom det att de ursprungliga kraven inte var fullständiga för att åstadkomma det önskade slutresultatet.

Slutresultatet blev tydligare vid en jämförelse som gjordes mellan Detalj X, som kan ses i Figur 12, och en variant, Detalj 40, som visuellt hade samma geometri vid skruvhålen som resterande varianter i simuleringen, se annotering 1 i Figur 13. Detaljerna utgår från samma vy för att underlätta jämförelsen.

I denna vy är det tydligt att det som valdes att kallas för *plattan*, som är markerat med svart färg i Figur 12 har obstruerande material ovanför sig. Detta material kan ses i Figur 13 markerat med '2'. Utöver det kunde man också observera att stora delar av *plattan* hade tagits bort. Plattan är markerad med '1' i Figur 13. Det innebär att den angränsande komponenten som ska vila på *plattan*, kommer att hamna i felaktig position. Den kommer även inte ha tillräckligt med material att vila på, vilket kommer medföra att den första generativa designprocessen inte kunde anses som lyckad då alla av de 45 varianterna av Detalj X hade liknande designmisstag.



Figur 12: Detalj X, plattan.

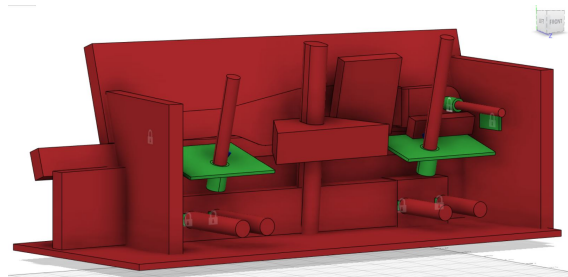


Figur 13: Detalj 40, plattan.

4.2.2 Försök 2

Till försök 2 hade kravstrukturen ändrats utefter de analyser som gjordes efter Försök 1, dessa analyser återfinns i 5.1. Det tillsattes fler *geometrihinder* ovanför plattorna för att hindra programvaran att skapa material på dessa platser. Det tillsattes även *geometrihinder* runt om hela Detalj X för att motverka att det skapas material där det finns andra komponenter.

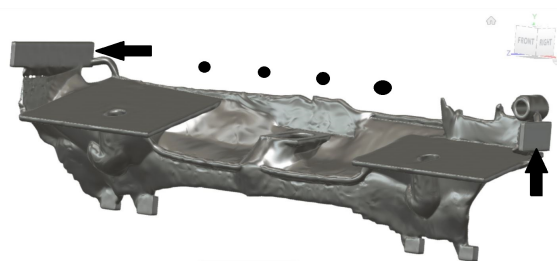
De gröna detaljerna i Figur 14 illustrerar material som ska bevaras och för att uppnå uppsatta krav ökades plattornas storlek. Även flera svetspunkter har avlägsnats och är illustrerade i Figur 15. Detta gjordes för att svetspunkterna från försök 1 bedömdes för små och skulle således öka risken för felaktig sammansättning av produkten med andra komponenter.



Figur 14: Kravstruktur, försök 2.

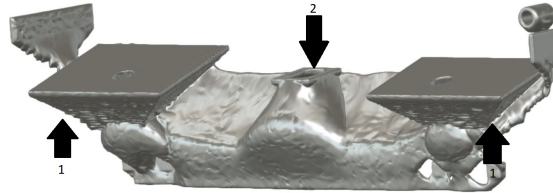
Resultaten skiljer sig markant från försök 1, vilket tyder på att förändringarna som gjorts har fungerat som tänkt. Mjukvaran genererade 24 olika varianter som indelas i 4 grupper. Dessa 4 grupper baseras på vilken orientering som varianten är tänkt att tillverkas i, vilket material varianten har samt vilken tillverkningsmetod som ska användas.

I Figur 15 syns det tydligt att *plattan* har en form som gör det möjligt att montera omgivande komponenter utan hinder, vilket var målet med den andra simuleringen. Mittenhållet är besparat då detta är ett referenshål för montering i fabrik. Svetspunkterna som är markerade med svarta punkter i Figur 15 har tagits bort då dessa inte var avgörande för hållfastheten. De markerade pilarna visar att sidofästpunkterna har mer material för att möjliggöra en enkel svetsning.



Figur 15: Variant 2, kolstål.

Programvaran har designat varianterna med tillverkningsorientering i tanke. Ett exempel på detta är Figur 16 där plattorna börjar med en trappstegsliknande form eftersom den ska tillverkas i positiv Y-riktning. Detta har beteckningen 1 i Figur 16. Mittenhålet, nummer 2 i Figur 16 är utformat för att minska stödmaterial eftersom *geometrihinder* stöttar sig själv då det inte finns något överhäng över 45 grader. Dessa observationer gäller för alla genererade varianter, även de som är anpassade för andra tillverkningsorienteringar och material.



Figur 16: Variant 7, aluminium.

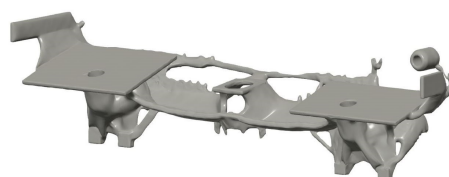
4.3 Jämförelse av olika lastfall

Resultatet av de två lastfallsstudierna gav flera olika varianter. Programvaran valde att göra lika många varianter för lastfall 1 som lastfall 2. Variant 24, som togs fram i plasten PA12 HP MJF, hade en säkerhetsfaktor på 2 och dimensionerades för en tillverkningsorientering i Z-positiv för båda lastfallen, som kan ses nedan.

De stora skillnaderna syns på vikterna. Variant 24 lastfall 1 hade en vikt på 0.12 Kg, Variant 24 lastfall 2 hade en vikt på 0.073 Kg. Detta är en viktminskning på nästan 40 procent. Det är även mer material i lastfall 1 vilket syns i Figur 17 än vad det är i lastfall 2 som visas i Figur 18.



Figur 17: Plast 24, lastfall 1.



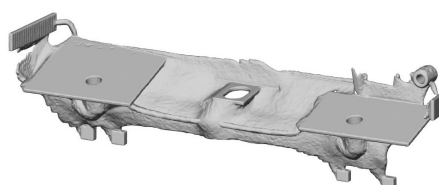
Figur 18: Plast 24, lastfall 2.

För att få ytterligare en referens gjordes en till jämförelse. Denna jämförelse gjordes på variant 2 för de båda genererade lastfallen. Programvaran gav då slutsatsen att tillverka denna specifika variant i kolstål med en orientering X-positiv. Figur 19 visar varianten för lastfall 1 medan figur 20 visar varianten för lastfall 2.

Säkerhetsfaktorn för lastfall 1 var 3.39 och vikten var 0.531 Kg. För lastfall 2 var säkerhetsfaktorn istället 2.45 och vikten var 0.499 Kg.



Figur 19: Kolstål 2, lastfall 1.



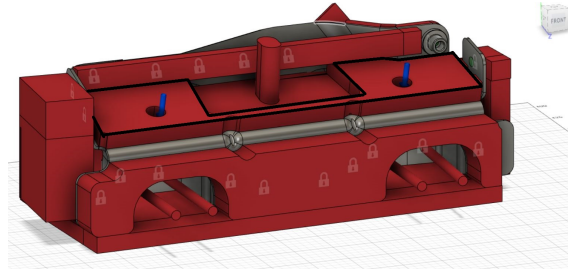
Figur 20: Kolstål 2, lastfall 2.

5 Analys och Diskussion

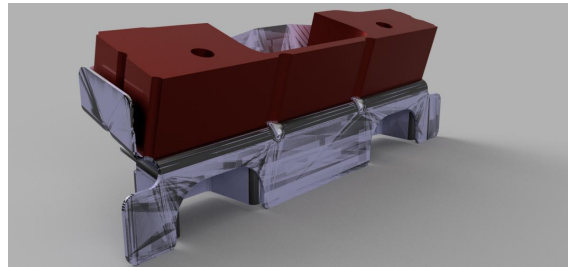
5.1 Förändringar i kravstruktur efter försök 1

De ursprungliga kraven som sattes på Detalj X i Fusion 360 kan ses i Figur 21 nedan. Dessa krav är de röda kropparna som omger Detalj X. Den röda kroppen som sattes på plattan bedömdes i försök 1 som tillräcklig för att programvaran skulle medge att denna yta skulle vara fri från modifiering. Efter resultaten av försök 1 framkom det tydligt att *geometrihindret* inte hade en tillräcklig höjd för att hindra material att tillverkas ovanför eller runt om *plattan*.

Vid förberedelse för försök 2 höjdes *geometrihindret* över den högsta punkten av Detalj X så att slutresultatet blev som den ursprungliga *plattan*. Denna modifiering av kravstrukturen kan ses i Figur 22.



Figur 21: Kravstruktur, plattan.

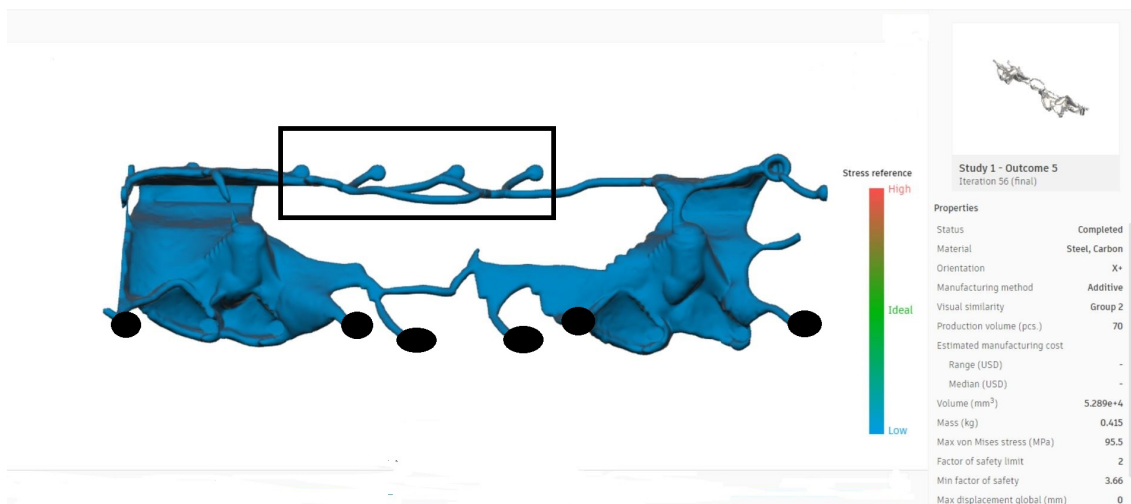


Figur 22: Kravstruktur för plattan, försök 2.

5.2 Förändringar för svetspunkter efter försök 1

Fortsättningsvis gjordes analyser på de 45 olika variationernas styrka relativt Detalj X. Där syntes att vissa av svetspunkterna som användes för Detalj X inte var nödvändiga att ha kvar för detaljerna som genererades.

Detta val gjordes då säkerhetsfaktorn till majoriteten av de genererade detaljerna var högre än minimumkravet som sattes. Detta kan ses i Figur 23 där den genererade varianten, som valdes att kallas för Detalj 5, har en säkerhetsfaktor på 3,66 fast den dimensionerades för en säkerhetsfaktor på 2. Flera svetspunkter togs bort, dessa syns i Figur 23 det bedömdes att de inte hade en viktig funktion för styrkan hos Detalj 5. Denna bedömning gjordes eftersom material bara existerar innanför den markerade rutan i Figur 23 då den angivna kravstrukturen tvingar programvaran att tillsätta material på denna position.



Figur 23: Borttagna svetspunkter.

5.3 Analys av försök 2

Resultaten överensstämmer med de korrigerade krav som sattes upp efter försök 1. Alla varianter har även en säkerhetsfaktor på minst 2 vilket motsvarar styrkan från Detalj X.

5.4 Urval

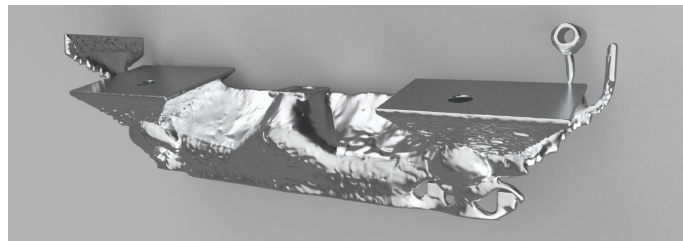
Efter att programmet generat 24 olika varianter där de tekniska kraven är uppfyllda, skulle det bestämmas vilken av varianterna som utvecklingen skulle fortsätta med. Programmet gjorde 4 stycken visuellt liknande detaljer i sex olika material. De visuellt liknande detaljerna har liknande utseende på grund av den orientering de ska skrivas ut i. Utöver detta så har de visuellt samma varianterna liknande printbarhet, däremot kan de skilja sig åt en del i hållfasthet och egenskaper. Varianterna i urvalet delades upp i de materialkategorier som användes. aluminium AISi10Mg, magnesium, stainless steel AISI 304, kolstål, titan6Al-4V och polymeren PA12 HP MJF.

Alla varianter som genererades uppfyllde hållfasthetskraven med en säkerhetsfaktor på 2. Däremot tror inte Volvo Cars att plast fungerar då modellen ej är dimensionerad för utmattning. Däremot är plast väsentligt mycket billigare än metall därför kan en jämförelse vara av intresse och sparas som en prototyp.

Det näst billigaste materialet var varianterna av aluminium och en av dess fyra detaljer valdes för att gå vidare med. Nästa önskemål är printbarheten, hur väl anpassade varianterna är för utskrift. I programmet valdes egenskaper för 3D-utskriften, dessa var att överhängsvinkeln inte får vara mer än 45 grader samt att minsta tjocklek på detaljen ska vara 3 millimeter. Dessa funktioner gäller nödvändigtvis inte över hela detaljen men programmet försöker skapa detaljerna efter dessa önskemål. Det krävdes en visuell genomgång och konsultation med handledaren på Yovinn, Pär Wikberg.

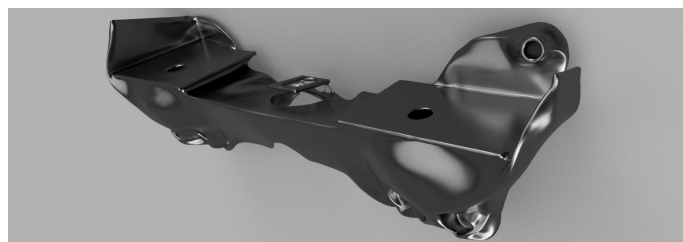
De fyra alternativen var de olika riktningarna X,Y och Z samt en obegränsad metod utan skrivarriktning. Då den obegränsade metoden inte var anpassad för någon riktning krävs mycket stödmaterial för att kunna skriva ut den i aluminium och därför anses den ej som ett alternativ. X-riktningen är ett problem då den skrivs ut på höjden. Det beror på att material måste tas bort efter varje lager, samt kylning mellan varje lager måste göras. Uteblir kylning kan detta bidra till en sämre passform då värmen smälter underliggande lager. Skrivs den ut i X-riktning blir tiden för utskriften betydligt längre och då blir detaljen dyrare.

Stödmaterial och efterbearbetningen bidrar tydligt till kostnaden. Därför eftersträvas att minska stödstrukturer så mycket som möjligt. Den av Z-riktning och Y-riktning som har minst stödmaterial bedömdes efter konsultation med Pär Wikberg att vara Y-riktningen. Detaljen kommer därför att kallas Detalj Y i fortsättningen och anses vara den detalj som har bäst printbarhet. Den är redan introducerad i Figur 16 men kan synas tydligare nedan i Figur 24.



Figur 24: Detalj Y.

Som nämntes i stycket ovan kommer även en plastdetalj att sparas. Plastdetaljerna har mer frihet än metalldetaljerna då de inte kräver stödmaterial vid tillverkning. Den obegränsade metodversionen kommer därför att väljas. Den anses vara bra då spänningar är låga på många delar av detaljen och det är möjligt att redigera bort material i programmet. Minskat material bidrar till minskad kostnad. Plastdetaljen kommer att kallas för Detalj P i fortsättningen och är endast en prototyp för jämförelse i arbetet, den kan ses i Figur 25.



Figur 25: Detalj P.

Urvalsprocessen i arbetet bör inte se likadan ut för alla generativa studier. Eftersom programmet skapade detaljer som var visuellt likadana fast i olika material underlätade detta urvalsprocessen avsevärt. Däremot borde inte material och design kunna väljas enskilt då kolstål som har en elasticitetsmodul på 200 GPa inte borde ha liknande design som aluminium på 71 GPa. Detta var dock fallet eftersom kraven som

sattes gällande platsbegränsning var höga och programmet tog till hänsyn designregler för additiv tillverkning för att skapa god printbarhet. Därmed blev detaljerna visuellt lika efter den riktning detaljerna ska skrivas ut i.

5.5 Kostnad

Efter urvalet laddades de båda modellerna ner för redigering och möjlig tillverkning. För Detalj P var det möjligt att få ett pris för tillverkningen genom webbplatsen Materialise. Den påstår att det kostar 980 kr att skriva ut Detalj P med plasten PA 12 och metoden MJF [10].

Det var inte möjligt att få ett pris för Detalj Y i aluminium via samma webbplats, vilket berodde på att denna variant är både för detaljerad och för komplicerad för ett enkelt automationsprogram att hantera. Däremot gällde enligt Fusion 360 prisuppskattning på mellan 3800-6900 kr att för tillverkning av detaljen med powder bed fusion. All valutaomvandling gjordes 26 maj 2020, 1 Euro var då lika med 10,59 kronor och 1 dollar var lika med 9,64 kronor. Det framberäknade kostnader är betydligt högre än de 200 kronor som Volvo Cars idag har i tillverkningskostnad för Detalj X.

Emellertid är de båda detaljerna lättare, nominellt 199 gram för Detalj P respektive 253 gram för Detalj Y, medan Detalj X väger 917 gram. Det ska även nämnas att Volvo Cars troligen beställer flera stycken av Detalj X, medan Detalj Y avser enstyckstillverkning och vid större serie kan därmed Detalj Y eventuellt bli mer konkurrenskraftig.

5.6 Mjukvara

Ett till sätt att få ner priset är att avlägsna material där det ej är nödvändigt genom mjukvaran. Programmet kan generera detaljer som inte är optimala för uppgiften, men det är möjligt att editera dessa efter de har generats. Fusion 360 är dock inte utvecklat för att editera alla modeller då Detalj P och Detalj Y är för komplicerade för att programmet ska ges möjlighet till detta. Eftersom det inte är möjligt att få ett sådant slutresultat, är en slutsats att generativ design med additiv tillverkning ännu inte är optimerat för att ersätta den traditionella tillverkningen. Däremot underlättar angreppssättet till stor del vid konceptframtagningen, där det går att automatgenerera flera koncept. Det ska påpekas att endast studie på Autodesk Fusion 360 gjorts och andra mjukvaror kan vara bättre optimerade.

5.7 Tillverkningsmetod för Detalj Y och Detalj P

Eftersom Detalj Y ska tillverkas i aluminium AlSi10Mg krävs det en additiv tillverkningsprocess som klarar detta. Tillverkningsmetoderna som är anpassad för uppgiften är : Powder bed fusion. Den metod väljs då den kan skriva ut detaljer i metall med hög precision, styrka och komplex geometri. [6].

Binder Jetting är vid skrivande stund inte tillräckligt utvecklad för att hantera aluminiumlegeringar. då den kräver sintring av pulvret till hög täthet vilket inte är

löst för aluminium. För framtiden är dock Binder jetting en instressant metod då det troligen inte behövs några stödstrukturer vid tillverkning samt att kostnaderna är lägre än för Powder bed fusion.

Detalj P kan tillverkas i plasten PA12 och då är det enda tillverkningsalternativet är Powder bed fusion för detta materialet. Som tidigare nämnt är Powder bed fusion en effektiv metod för att tillverka polymererdetaljer i till exempel nylon då denna tillverkningsprocess skapar detaljer med hög funktionell styrka och klarar av att hantera komplexa geometrier [6].

5.8 Tidsaspekt för generativ design kontra traditionell design

De tidsbesparingar som följer från den generativa designprocessen kontra en traditionell designmetod är de färre stegen i processen och att fler färdiga CAD-ritningar skapas. Konceptgenerering som nämnades i kapitel 2.6 behövs inte göras eftersom generativ design genererar flera olika färdiga koncept som användaren kan välja mellan.

Det som tar tid för den generativa designmetoden är att kraven och avgränsningarna måste vara definierade till ett lastfall för att enkelt kunna sätta upp krafter, *geometrihinder* och *bevara geometri* i programmet. Dessa lastfall och avgränsningar är inte nödvändiga för att konceptgenerera med en traditionell designmetod. Att skapa dessa lastfall och avgränsningar i programmet anses ta lika lång tid som att designa detaljen traditionellt med CAD. Det som däremot inte behövs är en konstruktionsritning, utan denna sätts upp innan programmet genererar detaljer i form av *geometrihinder* och *bevara geometri*.

Vid samtidig analys av material och tillverkningsmetod har generativ design en stor fördel eftersom det är möjligt att välja flera alternativ samtidigt. Tillskillnad från att eliminera koncept är det då enkelt att utvärdera och jämföra detaljerna då krafter och lastfall kan sättas med data där det är mest spänningar och man kan tillföra kostnadsuppskattningar. Det kan finnas behov att förädla detaljen efteråt, men den tiden är mycket liten i förhållande till vad det tar att ställa upp lastfall och avgränsningar.

5.9 Analys av lastfallsjämförelse

Skillnaden mellan de olika lastfallen i generativ design beror på vilken variant som jämförs. I den första jämförelsen med variant 24 väger detaljen från lastfall 2 nästan 40 procent mindre och har även mindre material trots att båda hade en säkerhetsfaktor på 2. Detta kan bero på att variant 24 från lastfall 1, som väger mest måste hantera en kraft på en mindre yta än lastfall 2, där kraften är utspridd över hela *plattan*. Detta bidrog till mer material för lastfall 1 så att spänningarna inte skulle bli för stora.

Vid en visuell analys av Variant 2 för de båda lastfallen är skillnaderna små. Det finns ingen tydlig skillnad mellan varken funktioner eller tjocklek. Vikten och säkerhetsfaktorn är däremot mindre för lastfall 2 jämfört med lastfall 1, 499 gram med 2.45 i säkerhetsfaktor, respektive 531 gram med 3.39 i säkerhetsfaktor. Denna skillnad är

skälig då mindre material bidrar till högre spänningar och lägre säkerhetsfaktor.

En ändring av lastfall bidrar till att varianterna förändras. Emellertid skapas flera lika varianter och exakt lika många varianter per lastfall. Detta kan ses som positivt ifall lastfallen är otydliga för då lär somliga resultat liknar varandra ändå.

6 Slutsatser

Följande frågeställningar har besvarats.

- Hur kan generativ design appliceras idag för att få fram en produkt i CAD med design för additiv tillverkning?
- Vilka additiva tillverkningsmetoder fungerar bäst för den detalj som skapats i CAD med hjälp av generativ design. Hur lång är tillverkningsprocessen och efterbearbetningsprocessen?
- Finns det några besparingar i tid när generativ design appliceras kontra traditionella designmetoder?
- Blir designen signifikant annorlunda om lastfallen definieras olika vid givna kriterier?
- Korrelerar pris-antagandet som programvaran gör för en detalj med verkligheten då en detalj tillverkas? Vad är skillnaden jämfört med traditionell tillverkning?
- Vad är det för skillnad mellan generativ design och topologioptimering? Blir resultatet för de olika metoderna annorlunda?
- Är det lönsamt ur ekonomiskt perspektiv och tidsperspektiv att göra detaljen med hjälp av generativ design och additiv tillverkning istället för en konventionell tillverkningsteknik? Om inte, varför då och vad skulle kunna göra den lönsam?

Genom att modellera krav i ett program som har generativ design, skapas därefter detaljer i CAD, denna metod återfinns i kapitel 2.6. En vald detalj kopplas sedan med en additiv tillverkningsmetod som anses mest lämplig för produkten, några av metoderna nämns i kapitel 2.7. Därefter tillverkas produkten med vald teknik enligt kapitel 2.4.

Den tillverkningsmetod som är väl anpassad för Detalj Y i metall är Powder bed fusion. Den passar väl för aluminium och är redan tillräckligt utvecklad för framtagning av starka metalldetaljer. Även för Detalj P i plast är Powder bed fusion den optimala tillverkningsprocessen då denna tillverkningsmetod är den enda tekniken som är specifikt utformat för att tillverka detaljer i plasten PA 12.

Eftersom det är färre steg sparas tid för designframtagningen. Åtskilliga steg är även mindre tidskrävande och ett av stegen i designprocessen är automatiserat och kräver därför inte aktivt arbete. Detta medför att den generativa designmetoden är betydligt snabbare och även mindre krävande än traditionella designmetoder.

Eftersom kraven ändras vid olika lastfall ändras även designen, däremot blir designen lika på flera av varianterna. Alltså dras slutsatsen att även om lastfallen ändras, kommer flera av varianterna att likna de som genererades vid det föregående lastfallet.

Programvaran kunde ge en kostnadsuppskattning för Detalj Y. Denna uppskattning

var mellan 3800 och 6900 kr. Filen skickades även till en webbtjänst från Materialise. Materialise genomför kostnadsuppskattningar för CAD filer. Denna webbtjänst angav att Detalj Y i metall var för komplicerad och därför kunde inte någon kostnadsuppskattning göras för Detalj Y. För Detalj P i plast var det istället Autodesk Fusion 360 som inte kunde ge en kostnadsuppskattning, även i detta fall skickades filen till Materialise och en kostnadsuppskattning kunde göras med resultatet 980 kr. Då ingen av detaljerna skrevs ut under den pågående COVID-19 krisen har det alltså inte skett en undersökning om hur väl kostnadsuppskattningarna korrelerar med verkligheten.

Generativ design tar hänsyn till flera material och tillverkningsmetoder. Den kan även ta hänsyn till designytor om dessa är av behov. Topologioptimering är endast till för att optimera material och vikt. Då metoderna har olika utgångspunkter, kommer resultaten att differentiera.

De beräkningar som framtagits har visat att det inte är lönsamt att tillverka produkterna i additiv tillverkning, ifall det är möjligt att framställa dem med konventionell tillverkning. Tidsaspekten varierar då det går fortare att designa en produkt, men mer tidskrävande vid tillverkningen. Är produktionsvolymen låg och detaljen komplex kan det vara fördelaktigt att tillverka med additiv tillverkning från en kostnad och tidsaspekt då det är vid låga volymer additiv tillverkning fungerar bäst.

7 Fortsatt arbete

- En viktig del att fortsätta arbetet med är att tillverka Detalj Y och/eller Detalj P. Det skulle vara väsentligt då korrelationen för priset i programvaran och verkligheten hade kunnat fastställas. Utöver detta så är bara tidsaspekten för tillverkningen av de framtagna detaljerna bara en uppskattning, alltså hade det även här varit viktigt att tillverka de generade detaljerna för att kunna fastställa att generativ design är en lämplig arbetsmetod kontra traditionella arbetsmetoder.
- Eftersom det endast gjordes studie i Autodesk Fusion 360 blev dess begränsningar avgörande för arbetet. Andra mjukvaror kan ha möjlighet till fler funktioner som är relevanta för ett bättre slutgiltigt resultat.
- Skillnaden mellan den ursprungliga Detalj X och den nya Detalj Y kunde varit större. Det finns många likheter mellan dessa vilket medförde problem eftersom Detalj X är anpassad för kolstål. Det innebär att Detalj Y är grundad i Detalj X. Ett fortsatt arbete hade varit att arbeta med ett lastfall där ingen ursprunglig del finns utan endast en uppdragsbeskrivning. Detta hade haft fördelen att kunna utvärdera den fulla potentialen för generativ design.

7.1 Motgångar i projektet

Vissa frågeställningar var inte möjliga att besvara då begränsad tid och möjligheten till komplett kunskapsstöd inte fanns tillgänglig under den rådande COVID-19 pandemin. De frågeställningar som ändrats var nämnda tillverkning av Detalj Y men även en jämförelse av mjukvaror. Programvarorna kostar pengar och det krävs en del ytterligare grundkunskaper som inte var rimligt att inhämta under tidsperioden för examensarbetet.

8 Referenser

Referenser

- [1] Goerg H. Michler. *Electron Microscopy of Polymers*. Springer Publishing, 2008. ISBN: 978-3-540-36350-7.
- [2] S. Krish. "A practical generative design method." I: *Computer-Aided Design* 43.1 (2011), s. 88–100.
- [3] M. J. Khan S. Awan. "A generative design technique for exploring shape variations.." I: *Advanced Engineering informatics* 38.1 (2018), s. 712–724.
- [4] Autodesk. *Topology optimization*. URL: <https://www.autodesk.com/solutions/topology-optimization>. (accessed: 31.03.2020).
- [5] Coors-Blankenship. J. Myth Dispelled: *Topology Optimization Is Not True Generative Design*. URL: <https://www.ptc.com/en/product-lifecycle-report/myth-dispelled-topology-optimization-is-not-true-generative-design>. (accessed: 31.03.2020).
- [6] Brian Garret, Ben Redwood, Filemon Schöffer. *The 3D Printing Handbook*. 3D HUBS, 2018. ISBN: 978-90-827485-0-5.
- [7] Damien Motte, Olaf Diegel, Axel Nordin. *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*. Springer Publishing, 2019. ISBN: 978-981-13-8280-2.
- [8] Autodesk. *Fusion 360 generative design*. URL: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/features#generative-design>. (accessed:27.03.2020).
- [9] Tore Dahlberg. *Teknisk hållfasthetslära*. Studentlitteratur AB, 2001. ISBN: 978-91-440192-0-8.
- [10] Materialise. *Materialise*. URL: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/rush-3d-printing-service>. (accessed: 26.05.2020).

**INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH
MATERIALVETENSKAP
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige 2020
www.chalmers.se



CHALMERS