



Produktutveckling och tillverkning av
gjutgoodsprodukt i demonstrationssyfte

Sebastian Proper

Produktutveckling och tillverkning av gjutgodsprodukt i demonstrationssyfte

Sebastian Proper

Med bidrag av: Clara Linder

Abstract

Product development and manufacturing of a cast iron component

The purpose of the assignment has been to evaluate additive manufacturing as a manufacturing technology to support the railway companies in Sweden with spare parts. The component “Rörkoppling för bryggutliggare” was chosen as the demonstrator due to fulfilling criteria such as manufacturability, redesignability and business case for additive manufacturing. The requirements of the part were developed and used to set up the manufacturing process. The part was then topology optimized and manually reconstructed with different integrated lattices structures. These designs together with the original component were then additively manufactured using laser powder bed fusion (L-PBF). The resulting components shows that additive manufacturing can be used to supply the Swedish railway with spare parts.

Key words: Additiv tillverkning, 3D-printning, Trafikverket, gjutgods, topologioptimering

RISE IVF AB

Mölnadal 2022

Innehåll

Abstract.....	2
Innehåll.....	3
Förord.....	5
Sammanfattning	6
1 Bakgrund	7
1.1 Om projektet Framtidens Järnväg.....	7
1.2 Syfte och mål med forskningsuppdraget	7
1.3 Nuläge	7
2 Additiv tillverkning	8
2.1 Tekniker och material.....	9
2.1.1 Material extrusion, MEX – Materialextrudering	10
2.1.2 Material jetting, MJT – Materialstrålning	10
2.1.3 Binder jetting, BJT – Bindemedelstrålning	10
2.1.4 Sheet lamination, SHL – Arklamining.....	11
2.1.5 VAT Photopolymerization, VPP – Fotopolymerisation, Stereolitografi ...	11
2.1.6 Powder Bed Fusion, PBF – Pulverbäddssmältning	11
2.1.7 Directed Energy Deposition, DED – Direkt energideponering.....	11
2.1.8 Metodernas mogenhetsgrad.....	11
2.2 I dag och i morgon	13
2.3 ”Processen från behov/idé till produkt”	15
3 Val av komponent	16
4 Kravanalys	17
4.1 Linjära toleranser	17
4.2 Mekaniska hållfasthet och motstånd mot utmattning	17
4.3 Komponentdesign.....	19
4.4 Korrosionsmotstånd	19
4.5 Övriga krav.....	19
5 Produktoptimering för additiv tillverkning	20
5.1 Materialval	20
5.1.1 Mekaniska egenskaper 316L och val av lagertjocklek	20
5.2 Konstruktion.....	21
5.2.1 Framställning av CAD-underlag.....	21
5.2.2 Topologioptimering	22
5.2.3 Manuell omkonstruktion.....	24
6 Tillverkningsutveckling.....	26
6.1 Konfiguration av tillverkningssteg	26

6.1.1	Supportborttagning	26
6.1.2	Linjära toleranser	26
6.1.3	Gångor	26
6.1.4	Mekaniska egenskaper	26
6.1.5	Utmattningsgräns.....	26
6.1.6	Korrosionsbeständighet	27
6.1.7	Färdigställd processkedja.....	27
6.2	Tillverkningsberedning för additiv tillverkning	27
7	Tillverkningsgenomförande	29
7.1	Test och kvalitetssäkring	31
8	Diskussion	32
8.1	Framtida arbete	32
8.2	Korrosion	32
9	Appendix.....	35
9.1	Appendix 1 Ritningsunderlag för Rörskoppling för bryggutläggare.....	35
9.2	Appendix 2 Kravanalys	36
10	Referenser	37

Förord

Vilka möjligheter respektive hinder finns det med design för additiv tillverkning av till exempel reservdelar för olika applikationer inom järnvägsindustrin. Kan detta göras med bibehållen eller ökad säkerhetsnivå och kvalitet?

Denna frågeställning ledde till att ett samarbetsprojekt startades 2021 mellan Framtidens Järnväg och RISE IVF i Mölndal. Under genomförandet av samarbetsprojektet blev det tydligt att ett forskningsuppdrag skulle vara behövligt på grund av omfattning, inriktning och intresse från branschen.

Beställare är Nordic Infracenters projekt ”Framtidens Järnväg” och har genomförts som ett forskningsuppdrag mellan RISE IVF och Trafikverket.

Hos RISE IVF är arbetet genomfört av Sebastian Proper och Tomas Vannucci, där den senare har slutat och arbetet har avslutats av Sebastian Proper. Sargon Jidah, som också slutat, har bidragit med konstruktion och topologioptimering. Clara Linder har bidragit med en korrosionsanalys.

Sammanfattning

Projektet "Framtidens Järnväg" har ett mål att stärka samverkan mellan akademi och näringsliv inom teknisk utveckling, innovation och tillämpad forskning. I uppdraget har möjligheter och hinder med att använda additiv tillverkning för att försörja järnvägens företag med reservdelar undersökts. Komponenten "Rörkoppling för bryggutliggare" valdes för att utvärdera tekniken. Komponenten har i dag utgått ur sortimentet men kan tänkas behöva tillverkas i små serier vilket lämpar komponenten för additiv tillverkning. Utrymmet för omkonstruktion av komponenten gör också att krafterna i additiv tillverkning kan demonstreras på ett bra sätt.

En kravanalys av komponenten genomfördes och utifrån detta gjordes materialval och en processkedja för tillverkning av komponenten bestämdes. En topologioptimering av komponenten genomfördes utifrån förutbestämda lastfall för att skapa en version av komponenten med reducerad vikt. Två manuella omkonstruktioner av komponenten gjordes också med olika typer av fackverksstruktur för att visa på möjligheterna med additiv tillverkning.

Komponenterna tillverkades med en additiv tillverkningsteknik kallad pulverbäddssmältning med laser (L-PBF). Med denna teknik byggs komponenten upp lager för lager i en pulverbädd där en laser smälter det givna lagret efter en 3D-modell som delats upp i lager genom en mjukvara. De tillverkade komponenterna genomgick sedan efterbehandling i form av supportborttagning, gängtappning, polering och blästring. De resulterande komponenterna blev lyckade och visade på att additiv tillverkning kan användas för reservdelar till järnvägen.

1 Bakgrund

1.1 Om projektet Framtidens Järnväg

Nässjö Näringsliv AB beviljades 2019 ett projekt under namnet "Framtidens Järnväg" som bedrivs under varumärket Nordic Infracenter. Medfinansiärer till projektet är Region Jönköpings Län, Tillväxtverket, Nässjö kommun och ca 25 företag.

Projektet skulle bedrivas under perioden 2019-05-01 till och med 2022-08-31, med de sista fyra månaderna som avslutsperiod.

Projektets övergripande mål är att stärka samverkan mellan akademi och näringsliv inom områdena teknisk utveckling, innovation och tillämpad forskning. Detta i syfte att utveckla konkurrenskraften och tillväxten hos järnvägsrelaterade företag.

MED FINANSIERING FRÅN



Figur 1 Medfinansiärerna till projektet "Framtidens Järnväg"

1.2 Syfte och mål med forskningsuppdraget

Syftet med uppdraget är att undersöka möjligheter och hinder med att använda additiv tillverkning för att försörja järnvägens företag med reservdelar.

Målet med uppdraget är att, via faktaunderlag och analyser i slutrapporten, klargöra situationen och ge förutsättningar till efterföljande projekt, aktiviteter, utbildningsinsatser med mera.

1.3 Nuläge

Trafikverket kravställer i dag en stor del av de komponenter och tekniska system som används för att bygga nytt och underhålla befintlig infrastruktur. Trafikverket har ingen egen tillverkning av material utan handlar upp materialet ifrån leverantörer på varierande långa produktavtal som konkurrensutsätts med jämna mellanrum. Ansvaret för försörjningen av materialet till samtliga investeringsprojekt och baskontrakt har Trafikverket Logistik. Innovativa idéer och nya tekniker, som additiv tillverkning, skulle kunna effektivisera processen och logistikkedjan.

2 Additiv tillverkning

Dagens gängse benämningar 3D-printning och additiv tillverkning (egentligen är adderande tillverkning en mer korrekt översättning av engelskans "additive manufacturing - AM") har föregåtts av beteckningar som Rapid prototyping, Rapid manufacturing, Layered manufacturing, Direct digital manufacturing och Freeform fabrication. Den officiella definitionen av "additive manufacturing – AM" enligt ISO/ASTM 52900:2021 [1] är "process of joining materials to make parts from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing and formative manufacturing technologies".

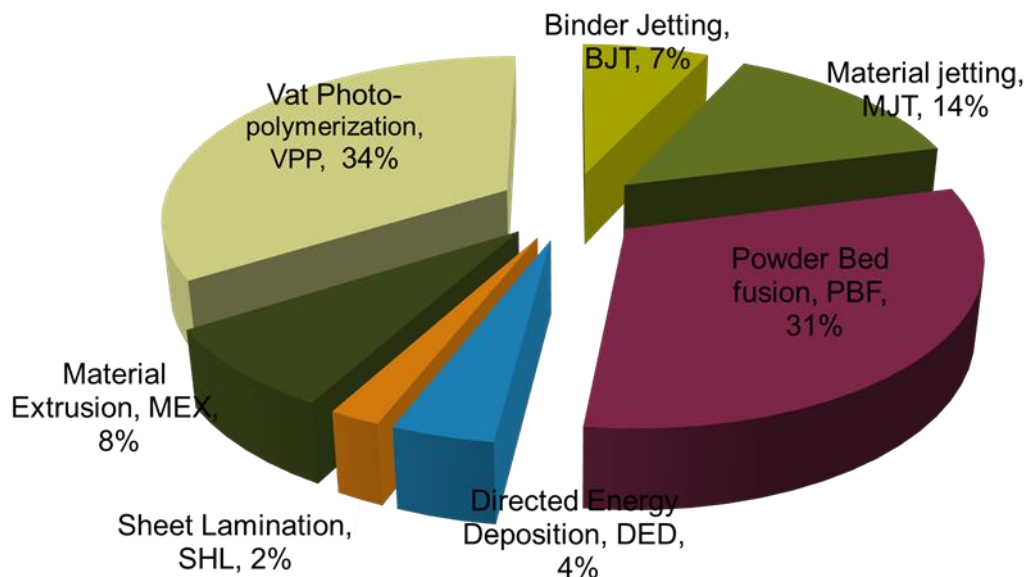
För att ge perspektiv på utvecklingen sedan Batelle Memorial Institute byggde solida modeller med hjälp av fotopolymerer 1960, Chuck Hulls ursprungliga patent på stereolitografi, SLA från 1984 och 3D Systems första kommersiella SLA utrustning 1987 kan följande data över värdet av varor och tjänster relaterade till additiv tillverkning tjäna:

- Det tog 20 år att nå ett värde av 1 miljard US dollar
- Det tog ytterligare 5 år att nå ett värde av 2 miljarder US dollar
- Mellan 2010 - 2018 var värdet 8,5 miljarder US dollar, dvs ca knappt 1 miljard US dollar per år
- Mellan 2011 – 2020 var värdet 11 miljarder US dollar, dvs något mer än 1 miljard US dollar per år
- Covid-19 pandemin har bromsat in marknaden under 2020 och 2021 och kommer troligen att även påverka 2022
- Prognoser efter 2021 visar fortsatt uppgång men till lägre nivåer, och inledningsvis även i lägre takt, jämfört med prognoser framtagna före pandemin
- Värdet av produktion med additiv tillverkning svarade år 2020 för ca 0,1 % av värdet av all produktion globalt sett.

Additiv tillverkning ingår som en del i den industriella utvecklingen kopplad till digitalisering. Den kan anses som en helt ny formningsmetod där komponenten byggs upp lager för lager. Metoden är tillämpbar på flera kategorier av material, som till exempel plaster, metaller, keramer inklusive glas, sand, betong, textilier och biologisk vävnad. Det finns flera drivkrafter, som kan vara olika för olika branscher, för att börja använda additiv tillverkning. Några vanligen framtagna drivkrafter är i) möjlighet till flexibel och kundanpassad produktion, ii) förkortad ledtid från idé till produkt, iii) viktbesparing genom optimering och möjlighet att tillverka "near-net shape" samt iv) möjlighet till decentraliserad tillverkning för att minska transportbehovet. Drivkrafterna har en direkt inverkan på metodens hållbarhet och möjlighet att bidra till reducerade CO₂-utsläpp. Det finns beräkningar som visar att additiv tillverkning möjliggör en besparing av CO₂-utsläpp med upp till 525,5 miljoner ton år 2025. Hållbarhetstänkande är viktigt inom industrin generellt i dag och här kan användning av additiv tillverkning hjälpa till. Generellt kan additiv tillverkning sägas bidra till 7:e, 8:e, 9:e och 12:e hållbarhetsmålen i Agenda 2030 (d.v.s Hållbar energi för alla, Anständiga arbetsvillkor och ekonomisk tillväxt, Hållbar industri, innovationer och infrastruktur samt Hållbar konsumtion och produktion).

2.1 Tekniker och material

Tillgängliga metoder bygger på antingen en enstegs- eller en flerstegsprocess. I en enstegsprocess formas en komponent direkt från ett utgångsmaterial, som pulver eller tråd. I en flerstegsprocess krävs ett eller flera efterföljande processteg för att få den slutliga komponenten. Exempel på processteg kan vara infiltration av ett material i en porös struktur eller sintring (bränning) för att få en solid kropp. Flera av metoderna kräver även ett eller flera efterbehandlingssteg, som värmebehandling för avspänning, slipning/polering för att få önskad ytfinhet, håltagning, härdning, post-HIP för ytterligare densifiering, m.m. ISO/ASTM 52900:2021 [1] definierar sju tekniker för additiv tillverkning, vilka kortfattat beskrivs nedan. Inom en teknik kan det finnas en eller flera varianter. Exempel på sammanställning av tekniker och varianter återfinns bland annat hos Ampower GmbH [2] som har sammanställt ”Technology overview of metal AM” respektive ”Metal and Polymer AM Technology Landscape”. Figur 2 visar en översiktlig fördelning utifrån respektive tekniks storlek.



Figur 2 Översiktlig fördelning av teknikernas storlek

Översikt över vilka typer av material som kan användas för de olika teknikerna kan ses i Figur 3.

		Category						
Material		Powder bed fusion	Directed energy deposition	Material extrusion	Material jetting	Binder jetting	VAT photo-polymerization	Sheet lamination
	Thermoset polymers				X		X	
	Thermoplastic polymers	X		X	X	X		X
	Composites	X		X	X	X	X	
	Metals	X	X	X	X	X		X
	Graded/hybrid materials		X					X
	Ceramics	X		X	X	X	X	
	Investment casting patterns	X			X	X	X	
	Sand mold/cores	X		X		X		
	Paper/wood		X					X

Figur 3 Sammanställning av material och tillverkningstekniker

2.1.1 Material extrusion, MEX – Materialextrudering

Material extrusion anses som den mest använda metoden och kan utnyttja filament alternativt granulat. Den första utrustningen lanserades av Stratasys 1991 under namnet Fused Deposition Modelling, FDM. Det finns ett stort antal råmaterial att tillgå och utrustningar som använder granulat kan med fördel användas för att snabbt tillverka stora detaljer. Extruderingstekniken används även för materialgrupper som betong för att bygga hus och tillverkning av komponenter baserade på kerambaserade massor.

2.1.2 Material jetting, MJT – Materialstrålning

Principen för material jetting bygger på att droppar av flytande termoplast för komponenten, respektive vax för supporten, deponeras selektivt för att bygga upp komponenten. Utveckling av tekniken sker genom att blanda in metalliska nanopartiklar i termoplasten och på detta sätt kunna bygga ett stort antal små komponenter samtidigt på en byggplatta. Exempel på varianter som klassas in under Material Jetting är Polyjet Printing, PP, Ink Jet Printing, IJP, Multi Jet Printing, MJP, och Object Poly Jet Printer, OPJ.

2.1.3 Binder jetting, BJT – Bindemedelstrålning

Binder jetting är utvecklad på MIT under namnet 3DP. Den är användbar för plaster, metaller, keramer och sand och bygger på principen att ett flytande bindemedel, ett bläck, appliceras på en pulveryta på de positioner som bygger upp komponenten. Pulvermaterial som inte ska bygga upp komponenten påverkas i princip inte och kan återanvändas. När bygget är klart avlägsnas överskottspulver och de printade komponenterna hårdas och när så krävs sintras till tätt material. Exempel på användning som inte kräver sintring är tillverkning av sandformar för metallgjutning. Tillverkning sker i normal atmosfär och i rumstemperatur. I många fall behövs inte

stödstrukturer. Genom möjlighet att stacka komponenter ovanför varandra kan ett större antal komponenter tillverkas i ett och samma bygge. Exempel på varianter som klassas in under Binder jetting är 3D Sand Printing, 3DSP, och Color Jet Printing, CJP.

2.1.4 Sheet lamination, SHL – Ark laminering

Sheet lamination fungerar för ark och folier av papper, plast och metall. Den är begränsad att bygga relativt enkla geometrier. Lagren binds samman genom att värma de partier som ska bygga upp komponenten. Exempel på varianter som klassas in under Sheet Lamination är Laminated Object Manufacturing, LOM, Selective Deposition Lamination, SDL, och Ultrasonic Consolidation, UC.

2.1.5 VAT Photopolymerization, VPP – Fotopolymerisation, Stereolitografi

Tekniken är att en flytande fotopolymer i en VAT – suspension – selektivt härdas med ljusaktiverad polymerisering. 3D Systems lanserade den första kommersiella utrustningen 1988 och använder laser eller ljus för härdning. Den kan ge komponenter med fin ytstruktur. Flerstegsmetod för keramer och metaller då ett fint pulver finns i VAT och att den printade ”grönkroppen” behöver torkas och sintras för att få en tät kropp.

2.1.6 Powder Bed Fusion, PBF – Pulverbäddssmältning

Powder Bed Fusion är en vanlig använd metod för metaller. Principen är liknande som för Binder jetting men i stället för ett bindemedel smälts metallpartiklarna samman av laser, L-PBF, eller elektronstråle, E-PBF. Förutom typ av värmekälla så skiljer sig de två metoderna åt vad gäller antalet tillgängliga material, det använda pulvrets partikelstorlek, komponentens ytstruktur och metodernas produktionshastighet. Tekniken medger tillverkning av detaljer med komplicerad geometri, inre kanaler och ger komponenter med hög mekanisk hållfasthet. Exempel på varianter som klassas in under Powder Bed Fusion med laser är Multijet Fusion, MJF, och Selective Laser Sintering, SLS, båda för polymerer och Direct Metal Laser Sintering, DMLS, och Selective Laser Melting, SLM, båda för metaller.

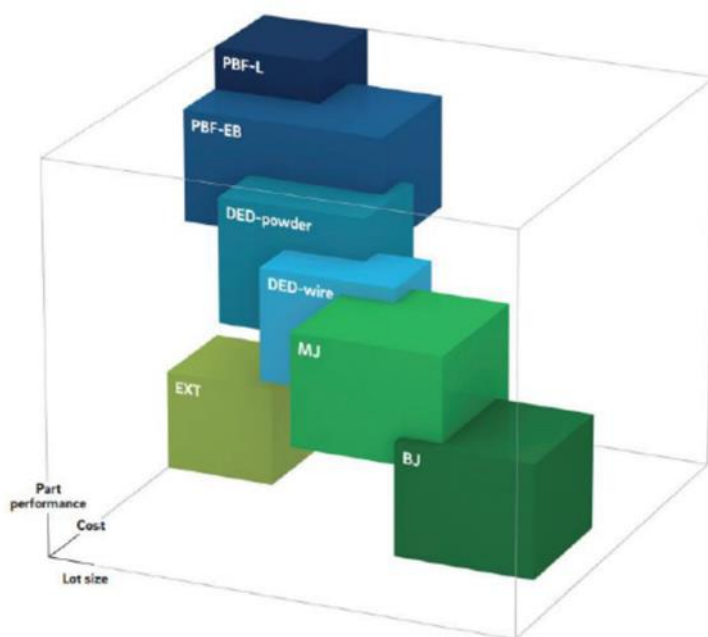
2.1.7 Directed Energy Deposition, DED – Direkt energideponering

Directed Energy Deposition fungerar för metaller och som råvara används antingen pulver eller tråd. Som värmekälla används laser, elektronstråle eller plasma för att smälta samman pålagt material. Tekniken kan användas för att bygga på detaljer på befintliga komponenter som tillverkats med annan metod. Exempel på varianter som klassas in under Directed Energy Deposition är Laser Metal Deposition, LMD, Laser Engineered Net Shape, LENS, och Laser Cladding.

2.1.8 Metodernas mogenhetsgrad

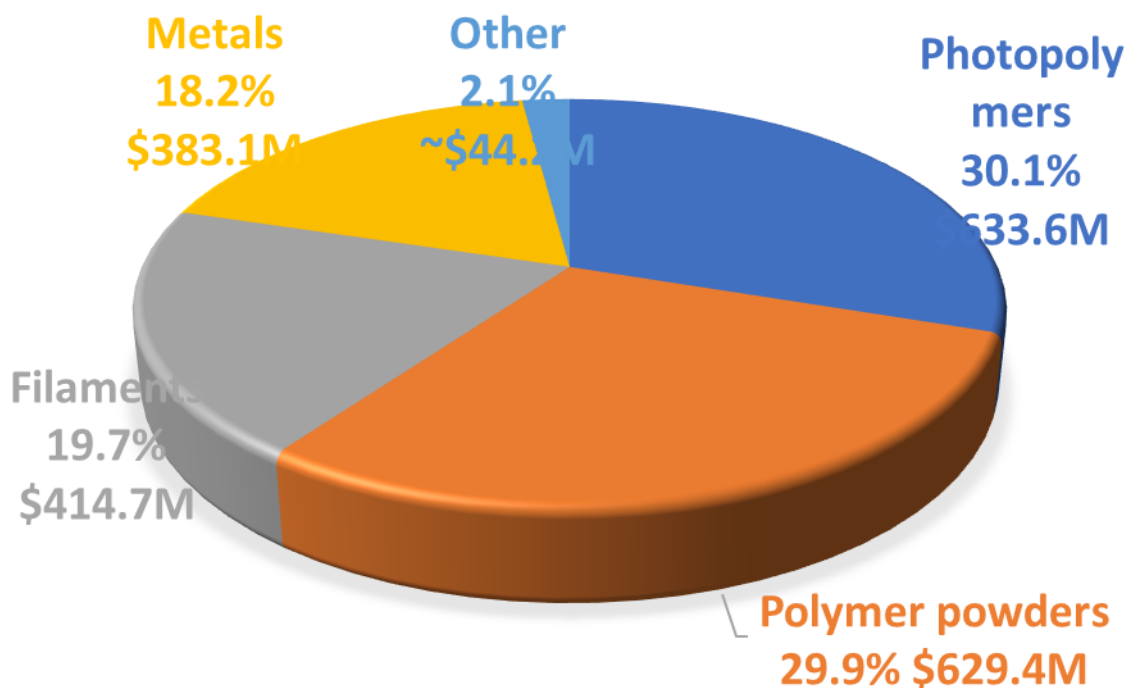
AM Power GmbH har publicerat en kartläggning över några metoders mogenhetsgrad och deras kapacitet för fullskalig industriell användning. Kriterier har bland annat varit

kapacitet för fullskalig tillverkning, maskinkoncept och tillförlitlighet samt on-line processkontroll under tillverkning. Mogenhetsgraden har viktats från 1. Forskningsmetod till 5. Storskalig industriell produktion är etablerad. Sammanställningen visar att Powder Bed Fusion, både med laser och elektronstråle samt Directed Energy Deposition är, eller näst intill är, etablerade för industriell storskalig produktion. En annan studie som visar en klassning av metoder avsedda för metaller utifrån deras kvalitet på tillverkade komponenter, kostnad för tillverkning samt möjlig seriestorlek ger att Powder Bed Fusion - PBF ger produkter med bra prestanda men till hög kostnad medan Binder Jetting - BJT ger produkter med lite lägre prestanda men billigare att tillverka och att metoden medger möjlighet att tillverka många komponenter samtidigt, se Figur 4 [3].



Figur 4 Schematisk rangordning av några tekniker utifrån prestanda, tillverkningskostnad och möjlig seriestorlek

Figur 5 visar översiktligt fördelning och värde av råvaror för additiv tillverkning år 2020. Totala värdet är 2 105 miljarder US dollar. Man ska komma ihåg att additiv tillverkning av metalliska råvaror har funnits ca halva tiden jämfört med polymera material. En sammanställning som togs fram inom projektet FuRAM (Vinnova 2020-0438) visar att antalet tillgängliga legeringar för PBF teknikerna ökat kraftigt från 2017 (ca 20) till 2021 (storleksordningen 50) som saluförs av maskinleverantörerna och/eller direkt från pulvertillverkarna. Alla legeringarna är inte specifikt framtagna för additiv tillverkning men antalet sådana ökar. Även för Binder jetting tekniken lanseras fler och fler specifikt framtagna material.



Figur 5 Fördelning av värde av använda råmaterial. Källa: Wohlers Report 2021

2.2 I dag och i morgon

Vad är möjligt att tillverka - finns det några gränser? I Wohlers rapport från 2014 visas en illustration av ett isberg där den lilla delen ovanför vattenytan speglade dagsläget. Framtida områden som man såg det vid den tidpunkten låg under vattenytan. I dag kan man se att flera av dessa är verklighet eller på god väg att bli, t ex dentala och medicinska implantat, individanpassade proteser, metallkomponenter i flygplan, mat, betongprintade hus, smycken, leksaker och skrivare som placeras i rymden. I ett reklamblad från en större internationell tillverkare av avancerade keramer skriver man – Where to find advanced ceramics – wherever peak performance is key – och illustrerar med exempel från olika industribranscher, hemmiljö, kontor, medicin, fritid och energialstring/-lagring. Egentligen kan man få samma svar för additiv tillverkning och utöka detta med ytterligare applikationer där mer ”mjuka” material används.

Marknaden förväntar sig att maskinleverantörerna ska erbjuda skrivare med högre produktivitet, robusthet, ökad byggvolym och högre grad av automation till lägre inköpskostnad men med bibehållna eller bättre materialegenskaper. Pulvertillverkarna förväntas bredda sitt sortiment med fler material specifikt framtagna och anpassade för additiv tillverkning och detta till ett lägre pris.

Stark drivkraft för att välja en viss tillverkningsmetod är en väl uppbyggd försörjningskedja och en låg tillverkningskostnad. Att enbart byta ut befintlig produktionsmetod mot additiv tillverkning utan att ta del av metodens fördelar, som möjlighet till viktbesparing genom topologioptimering, kommer att visa att det blir en dyrare tillverkningskostnad. Man måste väga in och utvärdera andra aspekter, som möjlighet att öka detaljens värde och ökad möjlighet till individanpassning. Om de framtagna marknadsprognoserna ska bli verklighet krävs att allt fler företag utvärderar

tekniken till fullo och kan se fördelar att använda den i sin produktion för att få en lägre total kostnad.

I artikeln "Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D-printing for 2030" [4] listas 17 påståenden på vad författarna menar att additiv tillverkning befinner sig år 2030 inom områdena i) produktion, försörjningskedja och lokalisering, ii) affärsmodeller och konkurrens, iii) konsument och marknadstrender samt iv) IPR-frågor och policys. Varje påstående klassas sedan in i ett diagram efter uppskattad sannolikhet att det inträffar, och om det inträffar, den uppskattade inverkan det har för området. Ett område som hamnar högt i både hög sannolikhet och stor inverkan är att den traditionella IPR-hanteringen inte kommer att fungera utan att man kommer att se andra lösningar och mycket mera open source-lösningar.

I sammanställningen "100 Radical Innovation Breakthroughs for the future" [5] publicerad 2019 av EU återfinns bland annat 3D-printning av mat, glas och stora komponenter. För området stora komponenter anses att dagens mognadsgrad är 3 på en 5-gradig skala, att sannolikheten att 3D-printning av stora komponenter blir en verklighet 2038 skattas relativt hög (nivå 4 av 5) och att Europa då har en framskjuten position (nivå 3 av 5).

Additive Manufacturer Green Trade Association (AMGTA) [6] har beställt det första forskningsprojektet som rör en livscykelanalys (LCA) av en komponent som tillverkats med additiv tillverkning. Den ska jämföras med en motsvarande komponent som är traditionellt tillverkad. Den valda komponenten är ett fäste för en low pressure turbine (LPT) till en jetmotor. Planen är att publicera resultaten under våren 2022 och tillkännage dessa vid RAPID + TCT-mässan i maj 2022.

Ett område som av nyhetsflödet att döma kan bli mer och mer framträdande är återvinning av material och möjlighet att använda återvunnet material och restprodukter som råvara för additiv tillverkning. Att återanvända pulver från till exempel Powder bed fusion och Binder jetting printning som ligger skilt från de byggda komponenterna görs kontinuerligt. Det som syns i nyhetsflödet är vidare än detta. För att ge några exempel:

- Vetekli från pastaproduktion blir filament

Hur kan avfall från pastatillverkning återvinnas och med hjälp av 3D-printning bli en helt ny produkt? En produkt som sedan kan användas för att marknadsföra pasta i butikerna. Det polska startup-företaget Greenfill3D vill med ett nytt filament av vetekli sluta produktionscirkeln. [7]

- 3D-printar skor av gamla kläder

För första gången har återvunnen textil använts som råvara för att 3D-printa skor, närmare bestämt ett par sandaler. Bakom projektet står företaget The Sole Factory som på sikt hoppas kunna printa individanpassade skor i kommersiell skala. [7]

- The Industry satsar på återvunna material

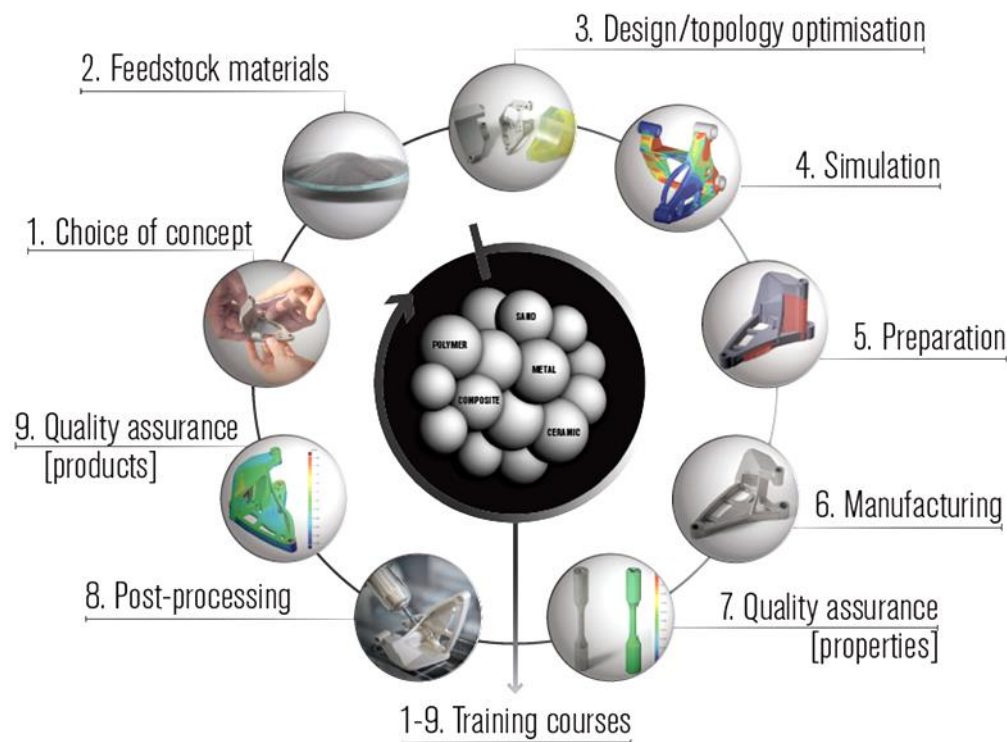
3D-skrivartillverkaren The Industry (Värnamo), tidigare BLB Industries, beställer återvunnet material av greentech-bolaget EcoRub. En order som är värd 1,5 miljoner kronor. EcoRub producerar pellets av återvunnet plast- och gummi material. Material

lämpar sig för såväl 3D-printning som formsprutning, strängsprutning och kalandrering. Ett material som har både gummits elasticitet och styvheten hos hårda plaster. Materialet ska levereras löpande under 2022 och är en viktig del av The Industrys ambition att jobba med återvunna material.

- Vår satsning på utveckling av avancerade 3D-printingmaterial tillsammans med branschens ledande aktörer ligger bakom denna order. Vår förmåga att kunna producera och leverera ett återvunnet material som är bättre än många av konkurrenternas jungfruliga material, är precis vad en kund som the Industry söker säger Isac Andersson, vd för EcoRub. [8]

2.3 ”Processen från behov/idé till produkt”

Illustrationen nedan, som togs fram inom ett Swerea 3D3 projekt för ett par år sedan, visar schematiskt de olika delstegen som ingår i kedjan från idé till färdig komponent inklusive nödvändig efterbehandling och kvalitetssäkring. Modellen är applicerbar på vilket råmaterial som helst men antalet delsteg och omfattningen av dessa kan variera.



Figur 6 Processkedjan för additiv tillverkning

3 Val av komponent

I ett förstudieuppdrag besöktes Trafikverkets centrallager i Nässjö. Där granskades flertalet komponenter utifrån komplexitet, tillverkningsbarhet och ekonomisk vinning av att använda additiv tillverkning. Man ville också hitta en komponent som går att tillverka med additiv tillverkning för att kunna visa på potentialen med tillverkningstekniken. Till slut föll valet på komponenten Rörkoppling för bryggutläggare (artnr 04 18 062). Denna har tillräcklig komplexitet för att kunna visa kraften med additiv tillverkning men är också tillräckligt simpel för att inte innebära för stora problem i tillverkningsprocessen. Komponenten har också utrymme för omkonstruktion vilket är bra utifrån demonstrationssyfte av additiv tillverkning. Utöver detta så är det en komponent som utgått ur sortimentet och där små serier av tillverkning kan tänkas vara intressant, vilket visar på en underliggande affärsmöjlighet. Ritningsunderlaget för komponenten kan ses i Appendix 1.

4 Kravanalys

Komponentens kravställning kommer från de reglerande dokument som berör komponenten samt komponentägarens anvisningar. En komplett kartläggning av reglerande faktorer återfinns i Appendix 2. Kartläggningen visar på en blandning av behov, kvalitetsanvisningar, rutiner och direkta krav.

Flertalet kravställningar är kopplade till det ursprungliga valet av material och tillverkningsmetod, och eftersom tillverkningsmetoden kommer ändras till additiv tillverkning är det lämpligt att bryta ner kravställningarna till de underliggande behoven för att skapa en bättre förståelse för kravställningen. En behovslista framställdes med kartläggningen som underlag kombinerat med dialog med komponentägaren. Till behoven kopplas lämplig metrik som verkar för att uppfylla respektive behov. Se kopplad behovslista och metrik i Figur 7.

Metrik	Behov	Komponenten håller fast rör och vejer	Komponent passar i installation	Komponent ska inte skadas vid kontaktedningsredfall	Det får inte uppstå mikrosprickor av utmattningsmatning som är svår att upptäcka	Hartering & installation ska kunna ske under dåliga ljusförhållanden	Komponent ska klara en livstid på 50år i nordiskt klimat
Linjära toleranser			x				
Mekanisk hållfasthet				x			
Uthållighet mot utmattningsmatning					x		x
Komponentdesign		x				x	
Korrosionsresistans							x

Figur 7. Behovslista kopplad till uppfyllande metrik

Metriken behandlas kategoriskt för att fastställa vilka värden respektive metrik ska ha.

4.1 Linjära toleranser

Från ritningsunderlag och hänvisad gjutningsstandard ISO 8062-3:2007 [9] finns följande relevanta linjära toleranser beroende på måttsatta dimensioner:

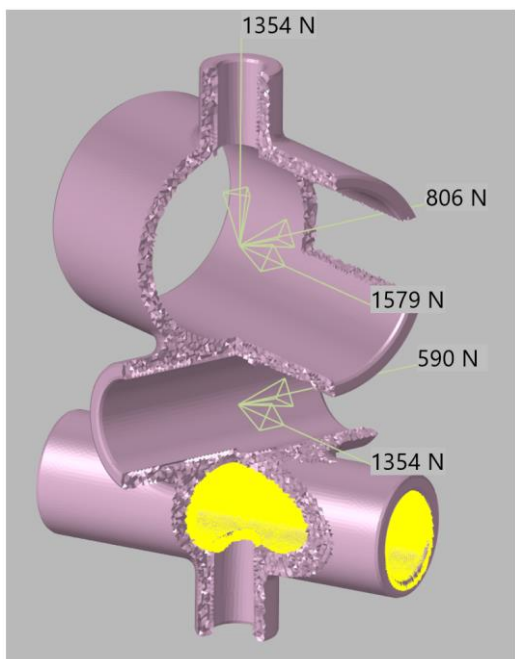
- 16-25mm +/-0,85mm
- 25-40mm +/-0,9mm
- 40-63mm +/-1mm
- 63-100mm +/-1,1mm

Inga geometriska toleranser är applicerbara på denna komponent.

4.2 Mekaniska hållfasthet och motstånd mot utmattningsmatning

Utifrån dialog med komponentägare blev det överenskommet att det finns två lastfall som är relevanta för hållfasthet och utmattningsmatning.

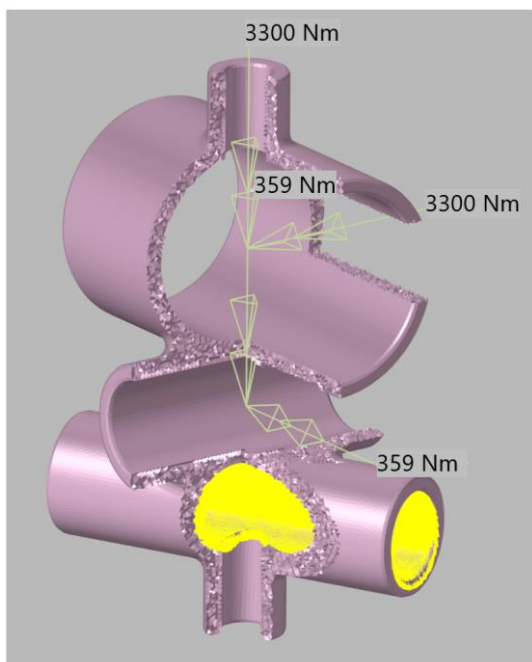
Det första lastfallet (lastfall A) är de krafter som verkar på komponenten i sin installation under normaldrift, se Figur 8. Dessa krafter är den maximala kraften som uppstår i respektive randvillkor och kommer cykliskt fluktuera till lägre krafter i och med vinddrag, passerande tåg och liknande omständigheter. Detta lastfall blir då det dimensionerande villkoret för utmattning där det uppskattas att cyklerna under livslängden kommer vara ett oändligt antal. Detta innebär att spänningarna från lastfall A måste begränsas till under utmattningsgränsen för det valda materialet.



Figur 8. Lastfall A, krafter som verkar på komponenten i sitt normaltillstånd. Gult = Fast inspänt

Det andra lastfallet (lastfall B) är ett incidentscenario när kontaktledningen rasar av yttre åverkan (fallande träd eller dylikt). Ett antagande är att komponenten då blir en fästpunkt för de två rör som sitter i komponenten och kommer böjas till dess att de går av.

Momentkrafterna för böjning till brott för rören i respektive infästning räknas ut från data om rören och redogörs i Figur 9. Krafterna i lastfall A antas vara oförändrade och adderas till lastfall B.



Figur 9. Lastfall B, beräknade momentkrafter vid incidentscenario. Krafterna från lastfall A adderas. Gult = fast inspänt

4.3 Komponentdesign

De funktionella ytorna på komponenten bevaras och ingen förändring sker på de mekaniska funktionerna som i detta fall enbart är skruvförband för infästning.

4.4 Korrosionsmotstånd

Från de tekniska bestämmelserna (BVS 543.36321) definieras en varmförzinkning enligt SS-EN ISO 1461 [10] med en skiktjocklek av 115 μm .

4.5 Övriga krav

Kompletterande till de funktionsrelaterade kraven finns flertalet andra krav som kopplar till kvalitet och process. Dessa är märkningskrav, kontrollkrav, hantering och likande som benämns i den kravbestämmande dokumentationen. Dessa behandlas inte vidare i denna rapport.

5 Produktoptimering för additiv tillverkning

5.1 Materialval

För tillverkning med additiv tillverkning L-PBF finns flertalet legeringsmaterial tillgängliga. Avgörande för valet av material är de materialrelevanta kraven samt att de finns tillgängliga i RISE IVF's tillverkningslabb. Kvarvarande material jämförs på en översiktlig nivå med det ursprungliga materialet som är stränggjutet segjärn (GJS-500-7), se Tabell 1.

Tabell 1 Analys av egenskaper hos materialkandidaterna

Materialkandidater →	AlSi10Mg	316L(1.4404)	H13(1.2344)
Krav i jämförelse med GJS-500-7↓			
Utmattningsgräns	↓	→	→
Mekaniska egenskaper	↓	→	↑
Korrosionsmotstånd	↑	↑	→

Aluminiumlegering (AlSi10Mg) är för undermålig i mekaniska egenskaperna för att vara ett rimligt alternativ och är därav uteslutet. Verktygsstålet (H13) är överlägsen i de flesta mekaniska egenskaper men väldigt känsligt för korrosiva miljöer och kommer därav behöva snarlik värmeförzinkning som originalmaterialet. Det rostfria stålet (316L) är snarlikt originallegeringen i materialegenskaper men har fördelen att det är beständigt mot korrosion.

I dialog med uppdragsgivare beslutas att vinsten av att minimera antalet processteg överstiger vinsten med förhöjda materialegenskaperna, därav är det valda materialet 316L. Dock saknas fullt underlag för att avgöra om 316L har tillräckligt motstånd mot korrosion och därav tillkommer det flertalet risker, detta behandlas vidare under stycket Diskussion.

5.1.1 Mekaniska egenskaper 316L och val av lagertjocklek

För det valda materialet 316L kan de mekaniska egenskaperna variera beroende på val av parametrar i L-PBF processen samt efterbearbetningssteg. Den parameter i L-PBF processen som har störst inverkan på resultatet är val av lagertjocklek. Valet står mellan 30 µm lagertjocklek, som överlag ger bättre mekaniska egenskaper och finare ytor, eller 50 µm som kan ge aningen sämre egenskaper men reducerar tillverkningstiden och därav ökar produktiviteten.

Från maskinleverantörens materialdokumentation hämtas följande värden för de två lagertjocklekarna i sin svagaste riktning då den svagaste riktningen blir dimensionerande, se Tabell 2.

Tabell 2. Mekaniska egenskaper för olika lagertjocklekar för 316L

Egenskap	30 μm lagertjocklek	50 μm lagertjocklek
Brottgräns R_m [MPa]	618	640
Sträckgräns $R_{p0,2}$ [MPa]	541	529

Utmattningsegenskaper påverkas även i hög grad av lagertjocklek. I studien från Sepehr et al. [11] påvisas att ett högcykelsutmattningsprov med en amplitud på 112.5 MPa för 30 μm lagertjocklek aldrig uppnår utmattning. Därav är ett rimligt antagande att utmattningsgränsen är större än 112.5 MPa för 30 μm lagertjocklek. Motsvarande test för 50 μm lagertjocklek går till utmattning och därav kan utmattningsgränsen antas vara mindre än 112.5 MPa för 50 μm lagertjocklek.

Den aningen ökade tillverkningstiden har ingen signifikant inverkan på enstyckes-tillverkning och därför väljs 30 μm lagertjocklek för de förbättrade egenskaperna.

Efterbearbetning har även den en stor inverkan på utmattning. I studien från Wood et al. [12] visas till exempel en signifikant förbättring av utmattningsegenskaper efter maskinbearbetning och kul-blästring, men en aning försämrade egenskaper efter värmebehandling.

5.2 Konstruktion

Konstruktionen av komponenten är uppdelad i flera förslag för att visa på de olika möjligheterna med tillverkningstekniken additiv tillverkning.

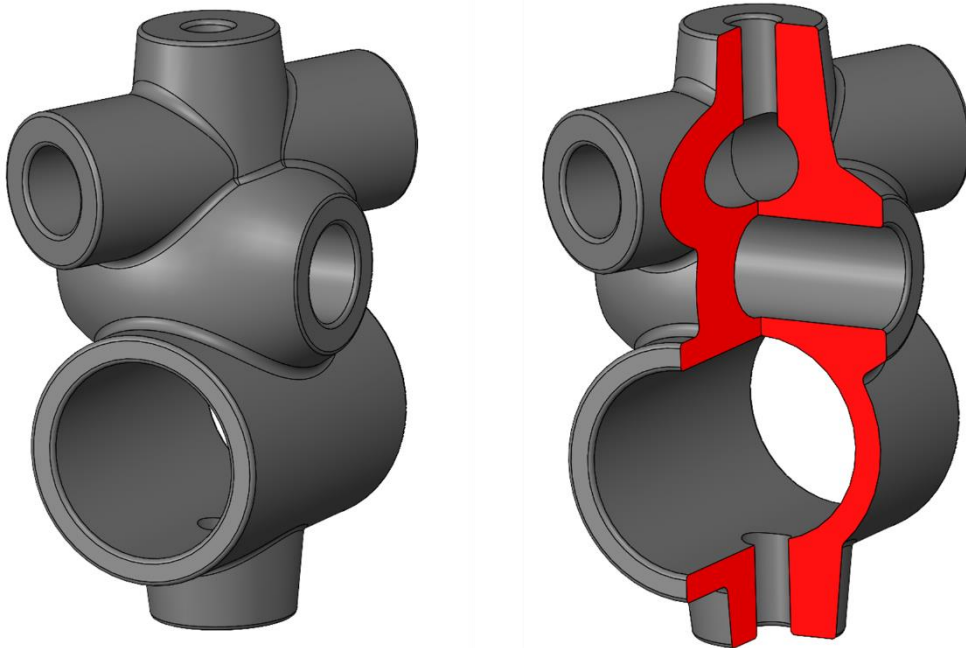
Det första förslaget är originalutförandet utan förändringar för att ge en direkt jämförelse med originalkomponenten. Denna behöver dock digitaliseras (3D-CAD) då det enbart finns 2D-ritningar som ursprungligt underlag.

Det andra förslaget är en beräkningsdriven omkonstruktion som nyttjar informationen från kravanalysen tillsammans med materialdata för att skapa en optimerad topologi på komponenten.

Det tredje förslaget är flera manuellt omkonstruerade modeller som ger olika fördelar.

5.2.1 Framställning av CAD-underlag

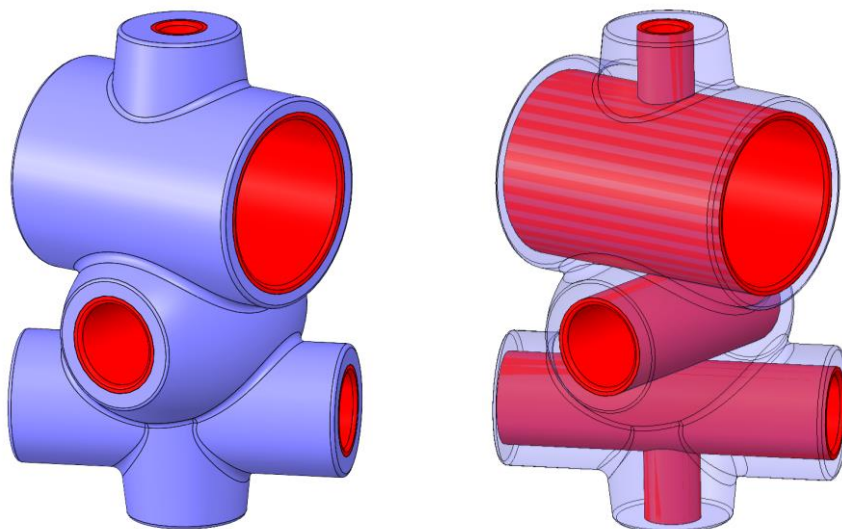
Med det ursprungliga ritningsunderlaget som grund, se Appendix 1, framställdes en 3D-geometri, se Figur 10. Detta är nödvändigt för tillverkning med additiv tillverkning när denna använder 3D-data som indata samt att det ligger som grund för de resterande omkonstruktionerna.



Figur 10 3D-modell av Rörskoppling för bryggutliggare

5.2.2 Topologioptimering

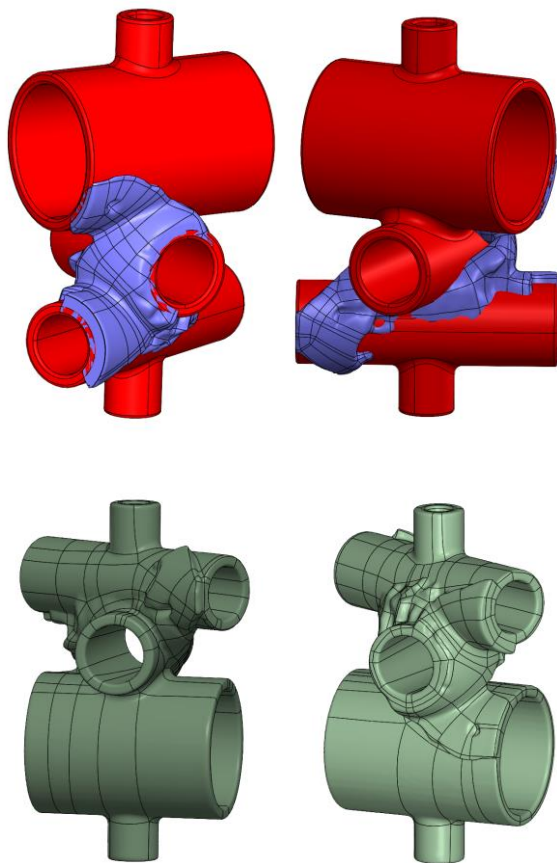
Topologioptimering innebär en beräkningsdriven optimering av objektets utformning (topologi) för att på bästa sätt bära ett definierat randvillkor i kombination med en materialreducering. Som villkor för optimeringen definieras vilken massa som ska omfördelas samt vad som ska bevaras. För att bevara de funktionella ytorna av komponenten behålls de inre cylindriska loppen med 4 mm godstjocklek samt hålen för gängning. Resterande volym frigörs för optimering, se Figur 11.



Figur 11 Komponenten förberedd för optimering; röd: volym att bevara, blå: volym att optimera

Utöver frigjord volym består randvillkoret av ett tillverkningsbivillkor för att främja tillverkningsbarhet i L-PBF-processen samt lastfallet som är den dimensionerande faktorn vilket hämtas från kravanalysen (lastfall B).

Resultatet från optimeringen ger en kraftigt reducerad volym på den frigjorda volymen, se Figur 12. En konsekvens från tillverkningsbivillkoret blir att materialet ansamlas främst på en sida för att undvika så kallat "överhäng" i tillverkningsförloppet. Överhäng är ytor i tillverkningsprocessen som utsätts för ofördelaktiga vinklar med avseende på byggriktningen i processen. Dessa brukar bli av sämre kvalitet och vill helst undvikas.

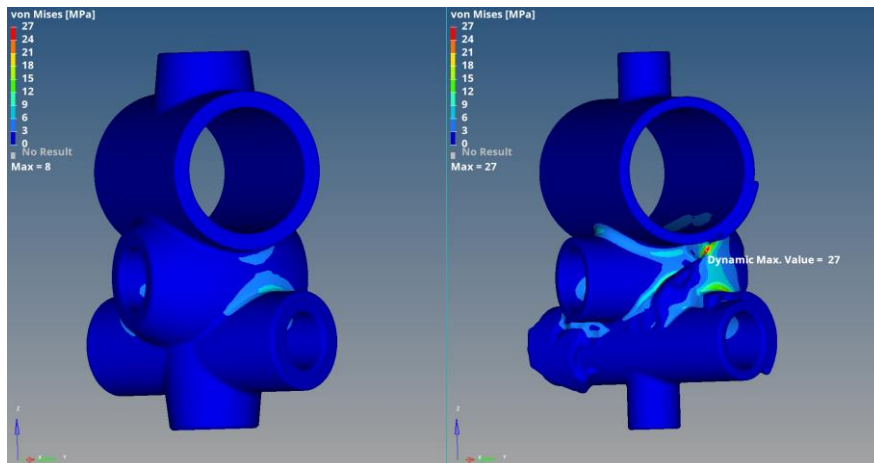


Figur 12 Den resulterande designen efter topologioptimering. Röd: bevarade volymen, blå: den optimerade volymen

5.2.2.1 Strukturell validering

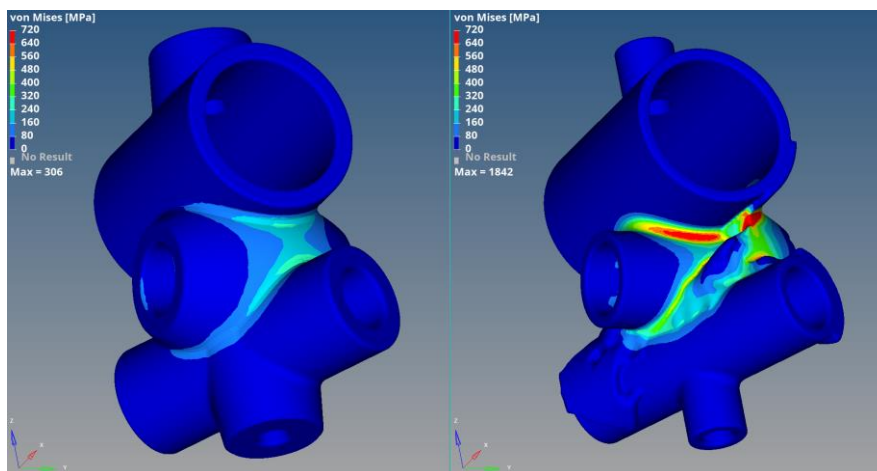
Den optimerade geometrin, samt originalet för referens, valideras mot de två lastfall som definieras i kravanalysen.

Det utmattningskritiska lastfall A visar på låga spänningar med ett maxvärde på 27 MPa för den optimerade geometrin, vilket är långt ifrån den kritiska utmattningsgränsen för materialet, se Figur 13.



Figur 13 De resulterade spänningarna med lastfall A. Till vänster för originalgeometrin, till höger för den topologi-optimerade designen

Incidentscenariot lastfall B ger däremot väldigt höga värden för den optimerade geometrin med ett maxvärde på 1 842 MPa, se Figur 14. Detta överstiger med marginal både sträck- och brottgräns för det valda materialet. Spänningarna är dock tydligt koncentrerade till en skarp kant vilket kan ge förhöjda spänningar i beräkningen men som inte nödvändigtvis är representativa för verkligheten. Originalgeometrin ligger däremot med god marginal under sträckgränsen för lastfall B.



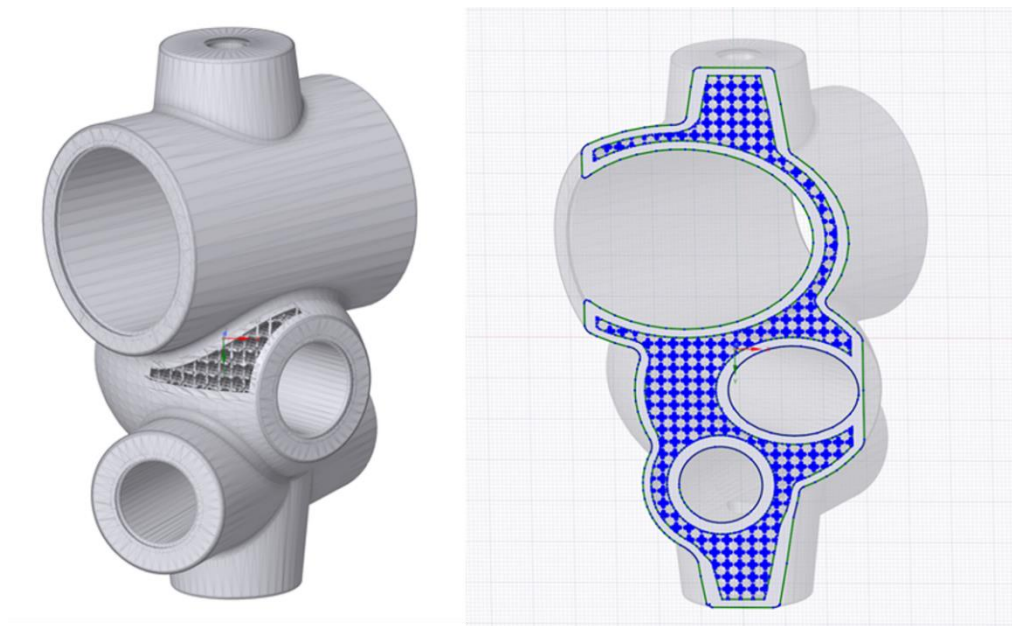
Figur 14 De resulterande spänningarna med lastfall B. Till vänster för originalgeometrin, till höger för topologi-optimerade designen

5.2.3 Manuell omkonstruktion

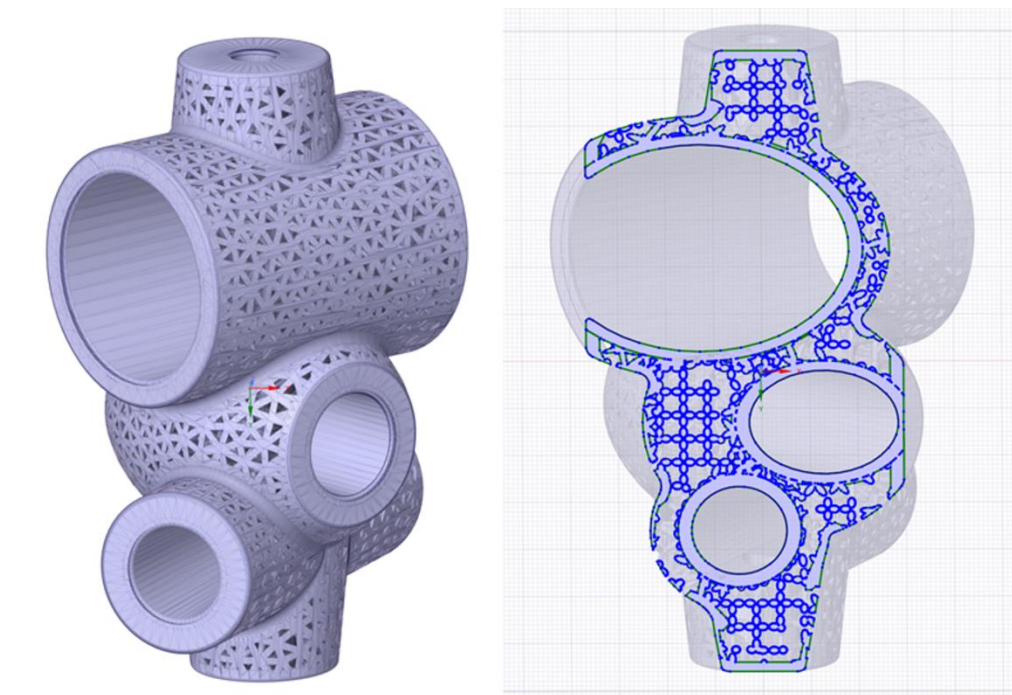
För de manuellt omkonstruerade komponenterna används lattice-struktur (fackverk) för att fylla ut volymen. Den yttre geometrin kan bevaras för att inte påverka funktionalitet samtidigt som insidan reduceras vilket ger viktmissiga fördelar. Avvägningen blir en förlust i mekanisk hållfasthet men kan precisionregleras med valet av struktur och storlek av fackverksstruktur.

Två olika fackverksstrukturer valdes för att implementeras i originalgeometrin. Ett första fackverk där hela volymen förutom ytor ersattes mot en fackverksstruktur, en intern fackverksstruktur. Det villkor som användes vid genereringen av fackverksstrukturen var att behålla en godstjocklek på 2 mm. Då den interna

fackverksstrukturen inte syns utifrån så plockades en del av den yttre ytan bort i demonstrationssyfte, se Figur 15. En andra fackverksstruktur där ytan också ersattes av en lattice-struktur (extern fackverksstruktur) användes också. Denna fackverksstruktur följer ursprungsytan men bygger också på in i komponenten och ersätter både ytor och volym i komponenten. Denna fackverksstruktur applicerades på alla ytor som inte har någon funktion och genererades på ett sätt så att de funktionella ytorna behöll en tjocklek på 2 mm, se Figur 16.



Figur 15 Den interna fackverksstrukturen, till vänster yttre geometrin och till höger en genomskärning



Figur 16 Den externa fackverksstrukturen, till vänster yttre geometrin och till höger en genomskärning

6 Tillverkningsutveckling

6.1 Konfiguration av tillverkningssteg

Från metriken i behovsanalysen kan det avgöras vad som är möjligt att uppnå genom tillverkning med L-PBF och vad som behöver åtgärdas med ytterligare processteg.

6.1.1 Supportborttagning

När geometrin inte är fullt optimerad för L-PBF behövs supportstruktur för att stötta i tillverkningsprocessen. Då blir borttagning av supportstruktur ett direkt efterföljande processteg till L-PBF. Detta kan genomföras manuellt eller med semiautomatiserade processer som fräsning (mekaniskt) eller Hirtisering (elektrokemiskt).

De semiautomatiska processerna kräver viss utveckling/produktanpassning och är ett bra val vid serietillverkning men eftersom detta är komponenter för demonstrationssyfte är det lämpligt att göra manuell borttagning av support. Detta kombineras med att komponenterna kapas av från byggplattan med trådgnistning för att underlätta arbetet.

6.1.2 Linjära toleranser

Toleranserna i kravspecifikationen är inom den förväntade precisionen för den tilltänkta L-PBF maskinen, enligt dess Site Acceptance Test (SAT). Inget ytterligare processteg för att uppnå linjära toleranser behöver läggas till.

6.1.3 Gängor

Gängor tillverkade med L-PBF har generellt dålig eller ingen funktionalitet. Avverkningsmån läggs på komponenten och gängtappning adderas som ett processteg.

6.1.4 Mekaniska egenskaper

De mekaniska egenskaperna i termer av hårdhet, sträckgräns och brottgräns för L-PBF tillverkat 316L kan påverkas till låg grad av värmebehandling. Eftersom det inte finns en tydlig fördel med en sådan egenskapsförändring adderas inget värmebehandlingssteg.

6.1.5 Utmattningsgräns

Komponenten dimensioneras för en livslängd på 50 år och under denna period antas "normalbelastnings"-spänningen cykliskt relaxerat och återgått ett oändligt antal gånger. För detta krävs att spänningen inte överstiger materialets utmattningsgräns för att garantera livslängden.

6.1.6 Korrosionsbeständighet

Enligt kravanalysen utförs en varmförzinkning på originalkomponenten. Enligt materialvalet av 316L som är korrosionsbeständigt kommer inte de tillverkade komponenterna undergå någon efterföljande ytbehandling. En djupare analys av korrosionsbeständigheten hos 316L kan istället läsas under sektionen Diskussion.

6.1.7 Färdigställd processkedja

Utifrån ovanstående slutsatser har en processkedja färdigställts, vilken kan ses i Figur 17. I denna processkedja ingår tillverkning, borttagning från byggplatta, supportborttagning, gängtappning och ett avslutande ytfinish steg.

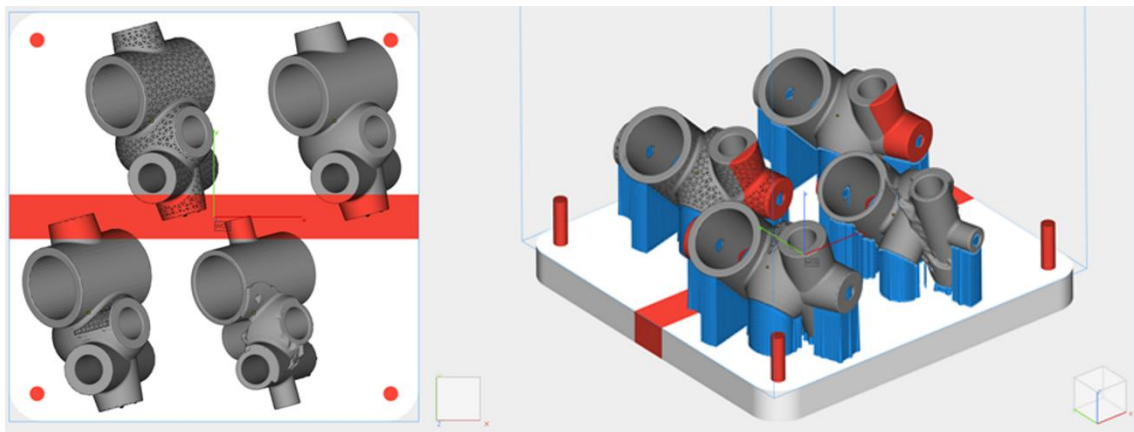


Figur 17 Processkedja för tillverkning av komponenterna

6.2 Tillverkningsberedning för additiv tillverkning

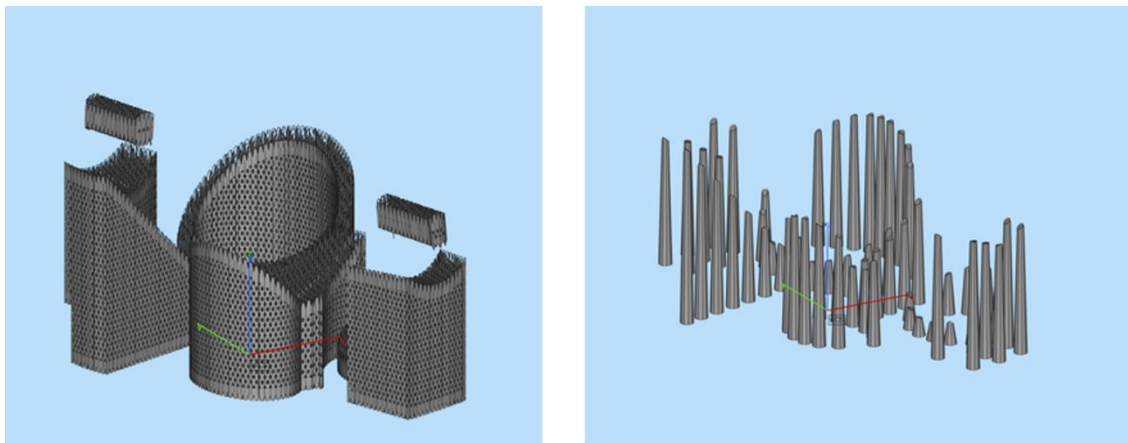
Första steget i tillverkningsberedning för additiv tillverkning är att bestämma orientering av komponenten. Det vanligaste tillverkningsbivillkoret för additiv tillverkning är så kallade "överhäng". Detta är ytor som har en vinkel med mer än 45° vinkel från tillverkningsriktningen. Om en yta har en vinkel som överstiger detta finns risken att värmebortledningen från det smälta området inte är bra nog och tillverkningen fallerar. I dessa fall får man anlägga så kallad supportstruktur som hjälper till att leda bort värmen men också strukturellt hålla fast komponenten.

Utifrån ursprungsgeometrin bestämdes en optimal byggorientering för att minimera användandet av supportstruktur på de tre invändiga cylindriska ytorna. Den valda orienteringen och placeringen av komponenterna kan ses i Figur 18.



Figur 18 Orientering och placering av komponenterna på byggplattan

Med den valda tillverkningsorienteringen behövde supportstruktur anläggas. Supportstrukturen för en komponent kan ses i Figur 19. Den vänstra bilden visar supportstrukturen och den högra visar extra förankringspunkter för att säkerställa god stabilitet under tillverkningen.

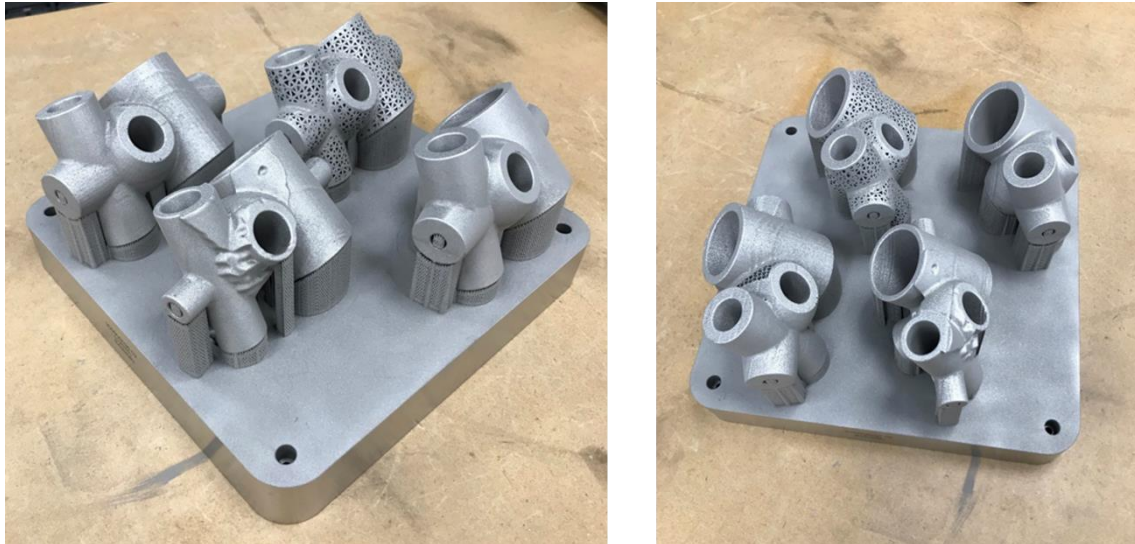


Figur 19 Supportstrukturen som användes för komponenterna

Efter detta associeras tillverkningsparametrar och en byggfil genereras genom att dela upp de valda komponenterna i lager om 30 μm tjocklek.

7 Tillverkningsgenomförande

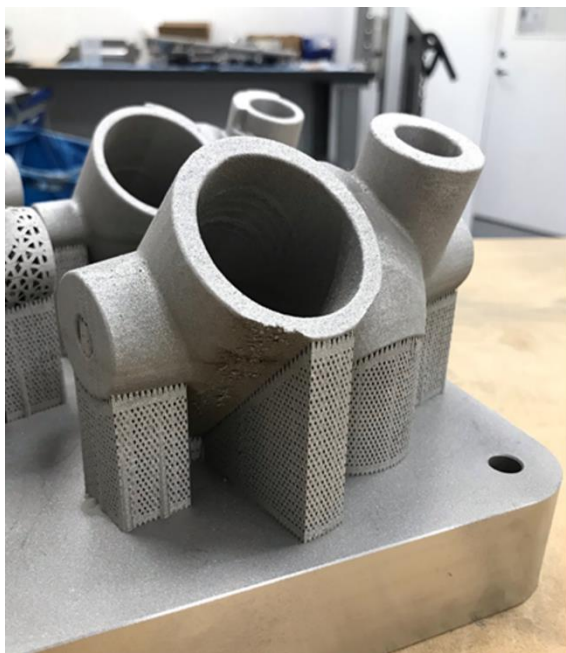
Komponenterna tillverkades i en L-PBF-maskin (SLM280) från SLM Solutions. Materialet som användes var 316L och under tillverkningen användes argon som inert gas och en syrenivå under 1000 ppm hölls under hela processen för att minimera kontaminering. Det resulterande bygget kan ses i Figur 20.



Figur 20 Det resulterande bygget av de fyra komponenterna

Från bilderna i Figur 21 går det att se att det uppstått ”streck” i vissa komponenter. Detta kommer från att vissa ytor inte har haft tillräckligt med supportstruktur, vilket har resulterat i att den smälta metallen stuckit upp ur pulverbädden och i sin tur skadat gummibladet som fördelar ut pulvret. I och med detta så kommer resten av komponenten bli påverkad av denna skada och man får ett ”streck”. Detta är rent kosmetiskt och påverkar inte de strukturella egenskaperna på något sätt.

De cylindriska inloppen på vardera sida för infästning gängades sedan med gängtapp och en dremel användes för att polera upp ytorna där supportstrukturen suttit och ett sista blästringssteg utfördes för att ge en förbättrad ytfinish.



Figur 21 Defekter i komponenterna som uppstod under tillverkningen

Efter tillverkning togs komponenterna bort från byggplattan med hjälp av trådnistning, vilket kan ses i Figur 22. Vertyg som hammare, mejsel och tång användes för att ta bort supportstrukturen från komponenterna. Supportstrukturen efter borttagning kan ses i Figur 23.



Figur 22 Komponenterna efter trådnistning



Figur 23 All supportstruktur samlad och vägd efter borttagning

7.1 Test och kvalitetssäkring

Ingen testning eller kvalitetssäkring utförs inom ramen för uppdraget. En visuell inspektion visar att komponenterna har uppnått ett fullgott resultat med några visuella defekter från tillverkningsutförandet i form av streck från det skadade gummibladet. De slutgiltiga komponenterna ses i Figur 24.



Figur 24 De slutgiltiga komponenterna efter hela tillverkningskedjan a) original b) topologioptimerad c) internt fackverk och d) externt fackverk

8 Diskussion

8.1 Framtida arbete

Utan att begränsa sig till utfallet från denna komponent, indikerar rapporten att det finns stora framtida möjligheter och förutsättningar för att kunna optimera ett antal av de tusentals olika detaljer som används inom järnvägens infrastruktur.

Detta skulle, som nämns i rapporten, kunna bidra till en utveckling inom flera områden inom de globala hållbarhetsmålen.

Minskad materialåtgång, mindre bundet lagerkapital, minskad miljöpåverkan av transporter, mindre tillverkningsserier, minskning av inaktuella detaljer, minskat behov av lagerhållning samt omkonstruktioner och förändrade designer skulle kunna innebära en mer robust och miljövänligare försörjning av detaljer inom infrastrukturen.

Ett framtida arbete bör därför innehålla en studie av effekterna i hela tillverknings- och logistikkedjan. Detta för att få en rättvis bild av vilka möjligheter och hinder det finns för att uppnå hela den inneboende effekten av en utvecklad tillverkningskedja där additiv tillverkning är en del av lösningen.

Hos RISE finns möjligheterna att bedriva forskning kring additiv tillverkning och hela dess processkedja. Områden som design och simulering, materialkaraktisering, tillverkning och efterbehandlingar, testning och kvalitetssäkring, och digitalisering är några av områden RISE arbetar kring. Utöver detta finns möjligheter att arbeta med tvärfunktionella frågor som additiv tillverkning kopplad till korrosion eller artificiell intelligens för att nämna några områden. Det finns också tillgång till flertalet olika additiva tillverkningstekniker som Powder Bed Fusion, Binder Jetting och Direct Energy Deposition för att nämna några.

8.2 Korrosion

Rostfritt stål 316L har god korrosionshårdighet i många miljöer, men det finns vissa utmaningar som kan påverka korrosionsmotståndet. Dessa utmaningar är till exempel miljön som komponenten kommer att utsättas för. Det kan finnas en risk för bimetallkorrosion av för de andra materialen som 316L komponenten är i kontakt med och även ökad korrosion på grund av läckström. Dessutom finns det väldigt lite kunskap kring hur additivt tillverkade komponenter beter sig i dessa miljöer. I nästkommande stycken är dessa fyra aspekter beskrivna mer i detalj.

Atmosfärisk korrosion innebär korrosion som sker i utomhus- samt inomhusmiljö. Fukthalt, salt och gasföroreningar i atmosfären kan påverka korrosiviteten av miljön. Det finns i dagsläget kartläggning av korrosiviteten i olika områden i världen, men denna information ersätter inte fältprovning. I Sverige varierar korrosionen avsevärt främst på grund av olika saltbelastning, dels i kustnära områden, dels i vägmiljö som saltas på vintern (järnvägsövergångar).

Det finns en risk för bimetallkorrosion då varmförzinkat stål har elektrisk kontakt med 316L-komponenten, där den förzinkade ytan kan få en ökad korrosion på grund av

elektrokemisk potentialskillnad mellan ytorna. Vi har studerat 316L i kontakt med zink i olika miljöer och i mild miljö klarade sig båda ytorna utan större korrosionsproblem men i mer aggressiv miljö var korrosionen betydligt större. Salt och hög fukthalt kan ge högre risk för bimetallkorrosion, vilket innebär att man vill undvika bimetallkopplingar vid områden där vatten blir stående under längre tid.

Eftersom komponenten inte är isolerad från strömledningen finns det en risk för att en del av växelströmmen kommer att läcka ut om det finns en sammanhängande fuktfilm mellan komponenten och kontaktledningen vilket skulle kunna ge upphov till läckströmskorrosion som i sin tur avsevärt minskar komponentens livslängd. Vissa material är kända för att vara känsliga för växelströmsläckström som till exempel aluminium och rostfritt stål. Påverkan av läckström på korrosionen av den additivt tillverkade komponenten bör därför undersökas.

Då den additiva tillverkningsprocessen ger materialegenskaper som kan skilja sig från konventionellt tillverkade material kan även korrosionsegenskaperna skilja. Materialegenskaper som mikrostruktur, korn- och porstorlek är viktiga parametrar som inverkar på korrosionsegenskaperna. Även ytorna som exponeras mot atmosfären eller andra material är av intresse att studera.

Vi har identifierat potentiella risker för konstruktionen som har listats ovan. I nuläget är det svårt att bedöma om detta kommer att ske för AM-komponenten, därför rekommenderas korrosionsprovning och fältexponering.

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,800 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

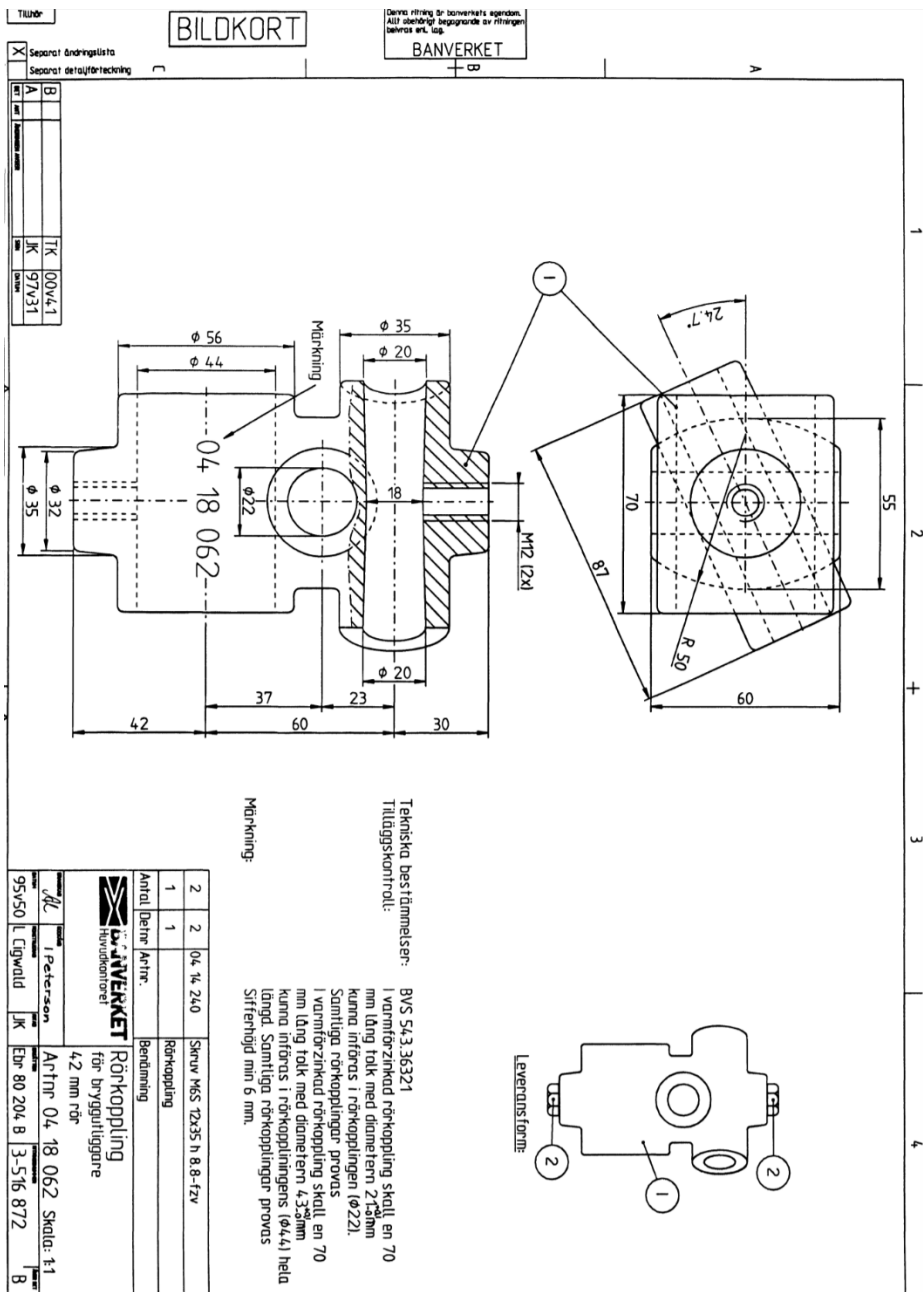
I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 800 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.



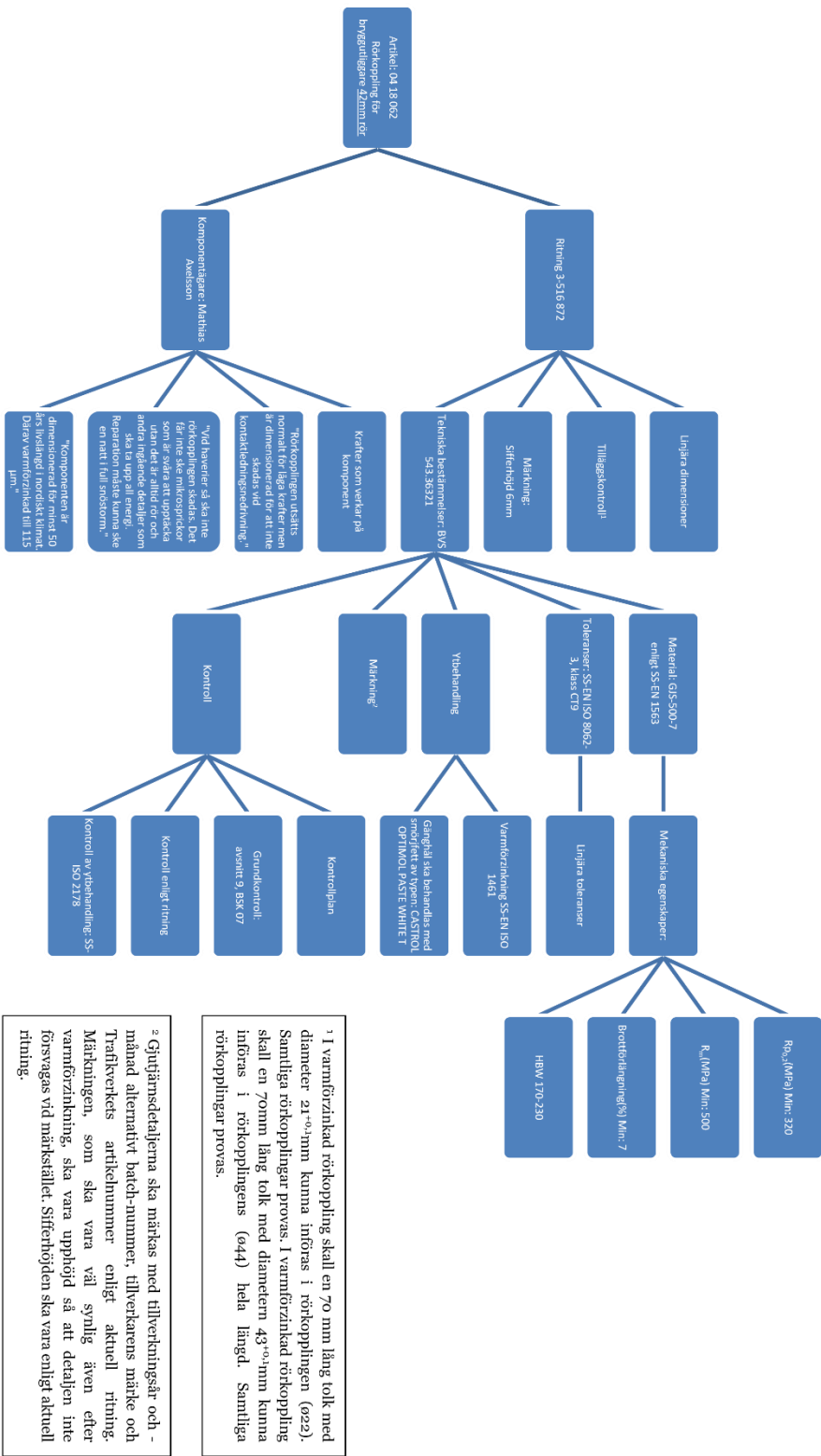
RISE IVF AB
Box 104, 431 22 MÖLNDAL
Telefon: 010-516 50 00
E-post: info@ri.se, Internet: www.ri.se

9 Appendix

9.1 Appendix 1 Ritningsunderlag för Rörkoppling för bryggutliggare



9.2 Appendix 2 Kravanalys



10 Referenser

- [1] *ISO/ASTM 52900:2021 "Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and vocabulary"*.
- [2] <https://am-power.de>.
- [3] *Langefeld, B. et al: "AM on the brink of industrialization", 2018. Available: www.rolandberger.com/en/insights/publications.*
- [4] *Jiang, R., Kleer, R, & Piller, F.T., Technological Forecasts & Social Change, 117 (2017), 84-97.*
- [5] https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/research_and_innovation/knowledge_publications_tools_and_data/documents/ec_rtd_radical-innovation-breakthrough_052019.pdf.
- [6] *AMGTA - Additive Manufacturer Green Trade Association bildades i november 2019 av ett antal företag inom industrin, bland andra ExOne, Stratasys och Sintavia och har hösten 2021 ett 30- tal medlemmar..*
- [7] *Nyhetsbrevet 3dp.se, 2022-02-10.*
- [8] *Nyhetsbrevet 3dp.se, 2021-12-23.*
- [9] *ISO 8062-3:2007 "Geometrisk produktspecifikation (GPS) - Dimensionstoleranser och geometriska toleranser för formstycken - Del 3: Generella toleranser och bearbetningstillägg för gjutgods"*.
- [10] *ISO 1461:2009 "Organiska ytbeläggningar - Beläggningar bildade genom varmförzinkning på järn- och stålföremål - Specifikationer och provningsmetoder"*.
- [11] *Hatami, S. et al. Fatigue Strength of 316 L Stainless Steel Manufactured by Selective Laser Melting. J. of Materi Eng and Perform 29, 3183–3194 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04859-x>.*
- [12] *Wood, P. et al. Influences of Horizontal and Vertical Build Orientations and Post-Fabrication Processes on the Fatigue Behavior of Stainless Steel 316L Produced by Selective Laser Melting. Materials. 2019; 12(24):4. <https://doi.org/10.3390/ma12244203>.*