

Lectoraat Kunststoftechnologie

Verkenning van 3D metaalprint technologie

Selective Laser Melting

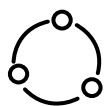
Additive manufacturing



Colofon

Titel:	3D-Metaalprinten
Publicatienummer:	LKT-AM-106203-1901
Datum:	03-2019
Auteurs:	Ruud van Abbema Tommie Stobbe Geert Heideman
Subsidieverstrekker:	GreenPAC
Met medewerking van:	Machinefabriek Geurtsen Ardagh Metal Packaging Deventer Van Veen Metal Products Landré Technicampus ROC Aventus

Onderzoekslijnen:



1 Circulaire economie



2 Industrial Additive Manufacturing (3D printen)



3 Hybride ontwerp



4 Duurzaam produceren

Dit is een uitgave van Christelijke Hogeschool Windesheim. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Deze publicatie wordt uitgebracht door het Lectoraat Kunststoftechnologie, een praktijkgerichte onderzoeksgroep op Hogeschool Windesheim die zijn basis heeft in Engineering & Design. Zoals passend bij lectoraten in combinatie met de gebruikte subsidieregeling, is het onderzoek uitgewerkt tot een TRL niveau van maximaal 7: demonstratie systeemprototype in operationele omgeving. Het werk is zo opgeschreven dat het na-werkbaar is, maar bedrijfsspecifieke data is soms weggelaten.





Voorwoord

Dit rapport geeft de inhoudelijke eindrapportage van de uitgevoerde werkzaamheden binnen het Green PAC project “Verkenning van de 3D metaalprint technologie”. Green PAC is een initiatief van Hogeschool NHL/Stenden en Hogeschool Windesheim. Binnen Green PAC wordt toegepast onderzoek gedaan, kennis ontwikkeld en worden (versnelde) innovaties gerealiseerd door een unieke samenwerking tussen hogescholen, universiteiten en bedrijven in de kunststofindustrie.

Door gebruik te maken van de verschillende faciliteiten die Green PAC biedt, wordt het bedrijfsleven in staat gesteld om tegen gunstige voorwaarden innovatieve projecten te ontwikkelen en uit te voeren. Daarnaast richt Green PAC zich op het onderwijs in Noordoost-Nederland om de innovatiekracht rond Kunststoftechnologie te versterken. Een van de onderzoeksthema's binnen Green PAC is 3D printing en alle daar bijhorende aspecten.

Met de omschrijving Verkenning van de metaalprint technologie wordt nagestreefd om de mogelijkheden van deze nieuwe manier van produceren onder de aandacht te brengen. Door de techniek op een slimme manier in te zetten kunnen ze voor bepaalde toepassingen voordelen opleveren in de maakindustrie.

Het huidige onderzoek is uitgevoerd onder leiding van de onderzoekers van het Lectoraat Kunststoftechnologie (LKT) van de hogeschool Windesheim. Hierbij waren ook studenten en het bedrijfsbureau van de technische studies betrokken. De deelnemende bedrijven in het project waren de Technicampus, Ardagh Metal Packaging Deventer, Machinefabriek Geurtsen, Van Veen Metal Products, Landré en ROC Aventus.

De resultaten van het project zullen worden gedissemineerd door middel van presentaties en publicaties. De projectdeelnemers zien terug op een leerzaam, inspirerend en succesvol project.

Namens het LKT willen wij alle betrokken partijen hartelijk bedanken voor de prettige samenwerking. Daarnaast willen wij de betrokken studenten bedanken voor hun inzet: Jelle Auée, Olmo Asmussen, Bas Baader, Bjorn Nijenhuis, Frendo Hartgers, Erik de Vries en Emiel Esselink. Ten slotte willen wij onze collega's van het LKT bedanken voor het meedenken, de nodige sturing en support tijdens het project.

Wij wensen u veel leesplezier toe.

Namens het projectteam,

Ruud van Abbema, Tommie Stobbe en Geert Heideman



Inhoudsopgave

1 – Inleiding	4
2 - Selective Laser Melting	7
2.1 - Digitaal ontwerp.....	9
2.2 - Printproces.....	10
2.3 - Nabewerking	11
3 - Supportstructuren.....	12
3.1 - Het genereren van supports voor SLM met Materialise Magics®	12
3.2 - Het genereren van tree support met Adobe Meshmixer	16
3.3 - Geïntegreerde supports.....	17
4 - Materiaaleigenschappen	18
4.1 - Materiaalidentificatie.....	18
4.2 - Trekproeven	18
4.3 - Kerfslagproeven	20
4.4 – Conclusie.....	20
5 - Het verbeteren van de oppervlaktekwaliteit	21
5.1 - Oorzaken van oppervlakteruwheid	21
5.2 - Bepalen van de oppervlaktekwaliteit.....	22
5.3 - Het effect van verschillende nabewerkingen	24
5.4 - Conclusie	26
6 - Ontwerprichtlijnen.....	27
6.1 - Algemene ontwerprichtlijnen.....	27
6.2 - De invloed van het ontwerp op support	28
6.3 - Oriëntatie.....	29
7 – Topologie-optimalisatie.....	31
7.1 - Verschillende algoritmen voor topologie-optimalisatie	32
7.2 – Verschillen in software	35
7.3 – Conclusie.....	38
8 - Case Studies.....	39
8.1 - Matrijnsinsert met Conformal Cooling – MOBA b.v.....	40
8.2 – Inlaatspruitstukken Classic Mini Cooper – Wolfs Engineering	44
8.3 – Pompwaaier - Sitech Services b.v.	45
8.4 – Gepersonaliseerde mondstukken - PP Mouth Pieces.....	46
8.5 – Warmtewisselaar - Pienter in Ontwerpen	47
8.6 – Verstelbare propellerschoep - Prop Engineering	47
8.7 – Hijsgereedschap – IJssel Technologie.....	48
8.8 – Magnetisch slot - Assa Abloy Apeldoorn	48
8.9 – Kniescharnier onderbeenprothese Ambroise.....	49
8.10 – Uitlaatsierstuk - Vencer Nijverdal	49
8.11 – Frame en scharnier	50
8.12 – Mixer - Geurtsen Machinefabriek, Deventer	50
Bronvermelding.....	51

1 – Inleiding

Nederland raakt steeds verder achterop als het gaat om de toepassing en integratie van Additive Manufacturing (AM) technieken. De twee vooroplopende sectoren wat betreft het gebruik van AM zijn automotive en aviation en deze bedrijven zijn slechts beperkt aanwezig in Nederland. Omdat het disruptieve en dure technieken zijn, ontbreekt het de MKB-ers aan slagkracht om hier zelfstandig stappen in te zetten.

Het gaat namelijk niet alleen om *een* techniek, maar Additive Manufacturing is een optelsom van ontwikkelingen en vaardigheden: het begint bij het ontwerp, daarop volgt het tekenen en topologisch optimaliseren. Daarnaast gaat het om het gebruik en de selectie van de techniek en het materiaal, het productieproces en vervolgens moet het product nog nabewerkt worden. Door deze stappen te doorlopen wordt er een eindproduct verkregen waarvan nog onbekend is hoe de eigenschappen in de gebruiksfase zich ontwikkelen. Bij veel ondernemers leeft de perceptie dat de kwaliteit van de producten minder is dan met conventionele technieken en het produceren van onderdelen lang duurt. Voor veel bedrijven is het niet alleen een onoverkomelijke berg van onbekende factoren, maar ook zijn de investeringen hoog. Daardoor ontstaat vaak twijfel of investeren wel verstandig is en welke techniek dan gekozen moet worden, gezien de razendsnelle ontwikkelingen in technieken en materialen.

Er is op dit moment slechts een heel kleine groep experts binnen Nederland die deze volledige keten aan vaardigheden beheerst. In enkele high-tech sectoren is het gelukt om AM inmiddels goed te integreren. Het kennisgat van de meeste MKB-ers met de frontrunners wordt echter steeds groter. Ook is de instroom van werknemers met kennis van AM nog uitermate beperkt. Om dit gat te dichten is het noodzakelijk om door middel van praktijkgericht onderzoek kennis te genereren voor zowel onderwijsontwikkeling als de maakindustrie.

Ontwikkelingen op het gebied van metaal AM gaan razend snel. Een variant van AM voor metalen onderdelen, die over het algemeen tot zeer waardevolle en kansrijke producten leidt, is *Selective Laser Melting* (SLM). In de high-tech sectoren worden onderstaande voordelen van deze AM techniek reeds effectief benut:

- Het versnellen van ontwikkelprocessen
- Maakbaarheid van complexe geometrieën
- Gewichtsreductie
- Verkorten van doorlooptijden
- Verminderen van assemblagekosten
- Verkleinen van voorraden
- Functieverbetering

Op initiatief van de *Technicampus* in Deventer, is met behulp van subsidie van de provincie Overijssel een ConceptLaser M1 aangeschaft. Het *Lectoraat Kunststoftechnologie* (LKT), is deelnemer van een consortium genaamd *Shared Facility for Metal Printing* (3D-SFMP) en heeft samen met een aantal partnerbedrijven toegang tot deze faciliteit. Het LKT is al jaren actief op het brede kennisgebied van AM en heeft binnen dit consortium verkennend onderzoek gedaan naar mogelijkheden en onmogelijkheden van de 3D-metaalprinttechnologie, specifiek voor het MKB.



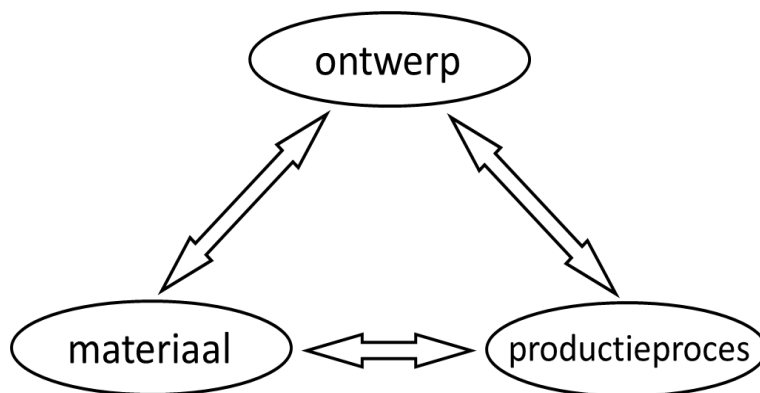
De 3D-SFMP groep bestaat naast het LKT uit:

- Technicampus; biedt verschillende beroepsopleidingen aan in de stedendriehoek Deventer, Zutphen en Apeldoorn.
- Ardagh; producent van blikken verpakkingen, wereldwijd actief
- Machinefabriek Geurtsen; machinefabriek met meer dan 100 werknemers, internationaal actief.
- Van Veen Metal Products; een toeleverancier gespecialiseerd in plaatwerk, metalen constructies en verspanen.
- ROC Aventus; verzorgt (middelbare) beroepsopleidingen voor jongeren en volwassenen in de stedendriehoek Apeldoorn - Deventer- Zutphen.
- Landré; machineleverancier en vertegenwoordiger van ConceptLaser

1.1 - Projectdoelstellingen

Om de eerste stappen te zetten op het gebied van AM hebben bedrijven de behoefte aan onafhankelijke partijen, die helpen om de kennis vanuit neutraal oogpunt op te bouwen en de mogelijkheden te verkennen.

Zoals in Figuur 1 weergegeven, zijn er bij de totstandkoming van producten en dus ook bij het 3D printen van metalen, drie onlosmakelijk met elkaar verbonden aspecten te onderscheiden. Deze aspecten zijn het ontwerp, het materiaal en het productieproces. Wanneer één van deze aspecten of de onderlinge samenhang veronachtzaamd wordt, resulteert dit in een kwalitatief minderwaardig en/of (te) duur product.



Figuur 1 – Het ontwerp, materiaal en productieproces zijn onlosmakelijk met elkaar verbonden

De genoemde aspecten met de onderlinge samenhang zijn als 3 pijlers van dit project gedefinieerd. Hieruit volgen als doelstellingen van het project:

- Het productieproces leren kennen en beheersen.
- De materiaalkundige aspecten van de producten analyseren.
- De kenmerken van het productieproces vertalen naar ontwerpregels.

De samenhang tussen deze doelstellingen is gewaarborgd door concrete producten op basis van de ontwerpregels te ontwerpen, te realiseren en te analyseren, om het bedrijfsleven realistische voorbeelden van de mogelijkheden van 3D-metaal printen te presenteren. Bij het realiseren van concrete producten hebben de deelnemende bedrijven een belangrijke rol gespeeld door te analyseren welke producten eventueel met behulp van SLM te realiseren zijn.

In dit verkennend onderzoek is als eerste in hoofdstuk 2 een beschrijving van het productieproces opgenomen. Bij het 3D-metaalprinten wordt om verschillende redenen gebruik gemaakt van supportstructuren, het gebruik ervan wordt toegelicht in hoofdstuk 3. Voor het ontwerpen van producten is het essentieel om de materiaaleigenschappen te kennen. De meest relevante materiaaleigenschappen worden in hoofdstuk 4 uiteengezet. Voor sommige toepassingen is het gewenst of noodzakelijk de oppervlaktekwaliteit van SLM geprinte producten te verbeteren. In hoofdstuk 5 worden de mogelijkheden daarvoor beschreven. Niet ieder ontwerp is geschikt voor productie middels SLM. De richtlijnen waaraan een goed te printen ontwerp moet voldoen, worden beschreven in hoofdstuk 6. Het metaalpoeder waarmee geprint wordt is relatief kostbaar, zeker in vergelijking tot de conventionele materialen. Daarnaast geldt de regel dat hoe meer metaalpoeder er gebruikt wordt in een print, hoe langer het proces duurt. Het minimaliseren van het materiaalgebruik is daardoor een relevant aandachtspunt in het ontwerp. Dit is mogelijk door producten topologisch te optimaliseren. Dit proces wordt toegelicht in hoofdstuk 7. Tenslotte worden in hoofdstuk 8 verschillende casussen beschreven die uitgevoerd zijn tijdens het project. Omdat een aantal van deze cases bedrijfsspecifieke data bevatten is sommige informatie hierin weggelaten.



2 - Selective Laser Melting

In tegenstelling tot wat men zou verwachten en wensen, is SLM vandaag de dag nog geen “druk op de knop” proces. Het maken van een onderdeel middels Selective Laser Melting bestaat uit een aantal verschillende stappen. Dit hoofdstuk beschrijft niet alleen de werking van het bouwproces, maar ook welke handelingen nodig zijn voor wat betreft de voorbereiding, het uitpakken van een build job en klein onderhoud aan de machine.

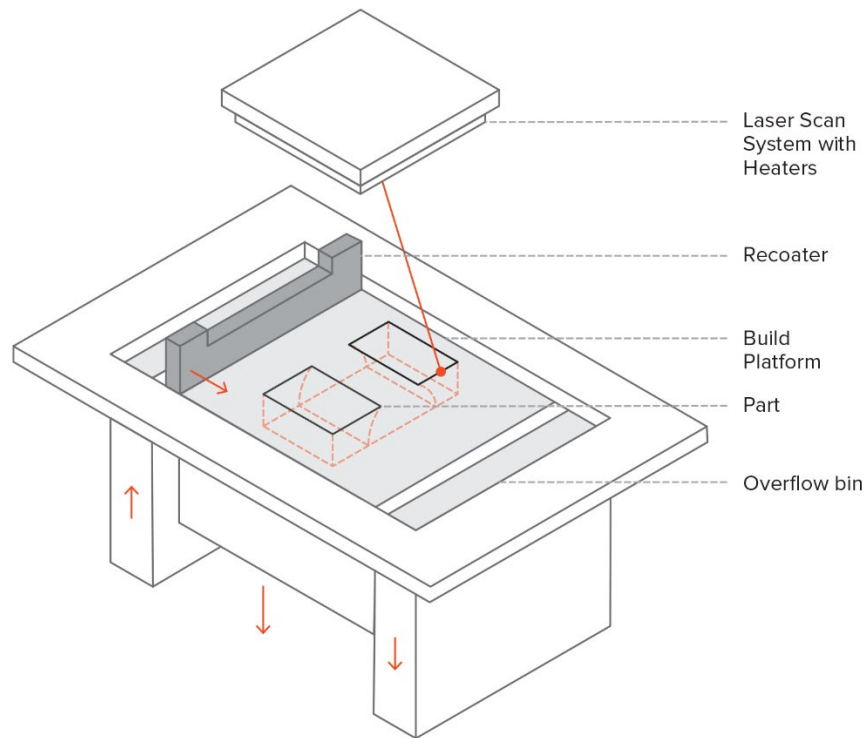
De opstelling van de machine bij de Technicampus, zoals gebruikt binnen dit onderzoeksproject, is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 – De ConceptLaser M1 bij de Technicampus

Zoals voor nagenoeg ieder 3D-printproces geldt, worden producten binnen het SLM-proces laagsgewijs opgebouwd. De grondstof voor het proces (in dit geval RVS 316L) wordt aangeleverd in poedervorm en bestaat volledig uit het gekozen metaal. Er wordt bij de SLM techniek dus geen gebruik gemaakt van additionele bindmiddelen of andere toevoegingen.

De belangrijkste componenten van de machine worden schematisch weergegeven in Figuur 3. SLM is in principe een lasproces, waarbij de onderdelen worden vast gesmolten aan het bouwplatform. Voor iedere laag in het proces beweegt het bouwplatform één 'laagdikte' naar beneden, waarna de *recoater* of *wiper* een laag poeder aanbrengt. De laag poeder wordt, waar nodig, aan elkaar gesmolten door een laserstraal die gepositioneerd wordt met behulp van een spiegelpakket, de zogeheten *scanner*. Dit proces herhaalt zich voor iedere laag, zodat 3-dimensionale producten kunnen worden opgebouwd.



Figuur 3 – Schematisch overzicht van het Selective Laser Melting proces. Afbeelding: 3DHubs

Naast het bouwproces zelf, bestaat het maken van onderdelen met SLM uit meerdere stappen die leiden tot een bruikbaar eindproduct (Figuur 4).



Figuur 4 - De verschillende processtappen van idee tot product

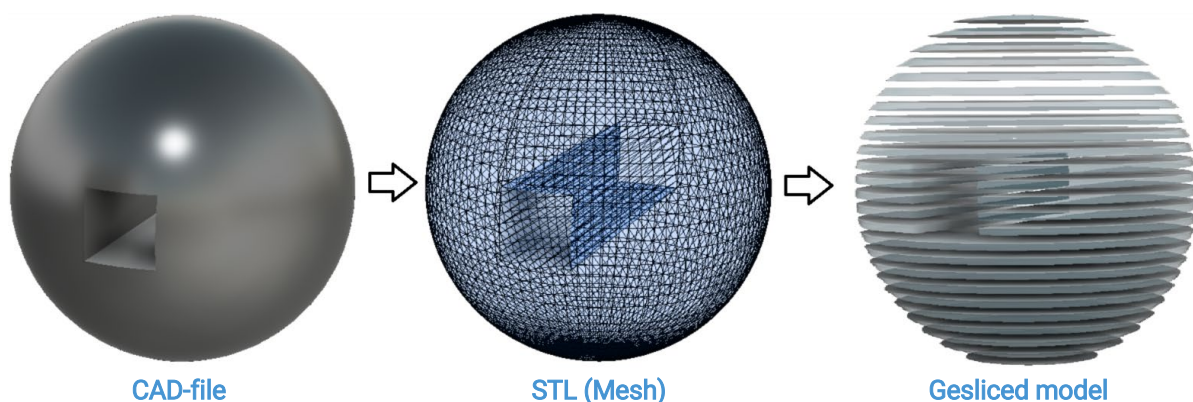
2.1 - Digitaal ontwerp

Zoals met iedere vorm van Additive Manufacturing (AM) is een digitaal model het uitgangspunt van de productietechniek. Het ontwerp kan met iedere CAD-software gemaakt worden, zolang de gebruikte software in staat is om het model te exporteren als STL-bestand.

Het STL-formaat is een 'mesh' bestand, wat wil zeggen dat het parametrische CAD-model wordt omgezet in een puntenwolk. Praktisch gezien houdt dit in dat bij het exporteren naar STL informatie verloren gaat [1]. Het is dan ook van belang om te controleren of de resolutie van het STL-bestand voldoende is. De resolutie van de mesh kan in de meeste CAD-software worden ingesteld. Indien de kwaliteit van de mesh lager is, gaat meer detail verloren en de structuur (driehoeken) van de mesh zal zichtbaar worden in het onderdeel dat geprint wordt. Een hoge kwaliteit mesh is niet schadelijk voor het eindproduct, maar kan resulteren in grotere bestanden waarvoor meer rekenkracht nodig is om deze te openen en bewerken. De meest efficiënte resolutie voor de mesh is per product is verschillend, afhankelijk van het formaat en de complexiteit van het product. Veelal is het voldoende om, in bijvoorbeeld SolidWorks, een deviatie van 0,03mm en een maximale hoekverdraaiing van 5° in te stellen, maar de gebruiker dient altijd zelf een inschatting te maken of dit noodzakelijk en/of voldoende is.

Daarnaast is het van groot belang dat het STL bestand geen fouten bevat. Mogelijke fouten kunnen bijvoorbeeld zijn dat de mesh niet geheel gesloten is (gaten), dat het model niet uit één geheel bestaat, of dat onduidelijk is wat de binnen-of buitenkant van het product is.

Indien het STL-bestand vrij is van fouten kan de printjob worden voorbereid in Materialise Magics. Met dit software pakket worden de 3D-modellen gepositioneerd in het bouwvolume van de printer, worden *supportstructuren* (Hoofdstuk 3) gegenereerd en vindt het zogeheten 'slicen' plaats. Tijdens het slicen wordt het 3D-model opgedeeld in lagen en wordt voor ieder van deze lagen bepaald welk 'pad' de laser zal gaan afleggen [2].



Figuur 5 – De verschillende bestandstypen benodigd voor AM

2.2 - Printproces

Om het printproces te kunnen starten dient eerst de machine gereed gemaakt te worden voor gebruik. Alvorens een printjob met een ConceptLaser M1 te starten, wordt de machine en alle randapparatuur (stikstofgenerator, recirculatiefilter, laser) ingeschakeld. Vervolgens plaatst men een geprepareerd bouwplatform in de machine, wordt gecontroleerd of de recoater volledig intact is, deze kan beschadigd raken tijdens het bouwproces, en wordt de materiaalvoorraad gecontroleerd en zonodig aangevuld.

Hierna kan de bouwkamer worden afgesloten en wordt de aanwezige zuurstof verdreven door de toevoer van stikstof (of een ander inert gas). Dit neemt, in het geval van de ConceptLaser M1, enige tijd (+/- 20 minuten) in beslag. Ondertussen kunnen de bestanden die zijn voorbereid met Materialise Magics in de machine worden ingeladen en dient de eerste laag poeder via handmatige bediening te worden aangebracht. Als het zuurstofniveau is gedaald tot $\leq 1\%$ wordt de eerste laag van de printjob tweemaal belicht (gesmolten) met de laser om een goede hechting met het bouwplatform te garanderen. Hierna kan de rest van het bouwproces worden uitgevoerd.

Nadat de printjob is voltooid kan deze uitgepakt worden. Hiertoe dient al het poeder dat niet gesmolten is uit de bouwkamer te worden verwijderd, zodat de bouwplaat met onderdelen uit de machine kan worden genomen. Nadat het verwijderde poeder is gezeefd kan het opnieuw worden gebruikt voor de volgende print.



Figuur 6 - Het uitpakken van een printjob. Door het losse poeder weg te vegen worden de geprinte onderdelen zichtbaar.

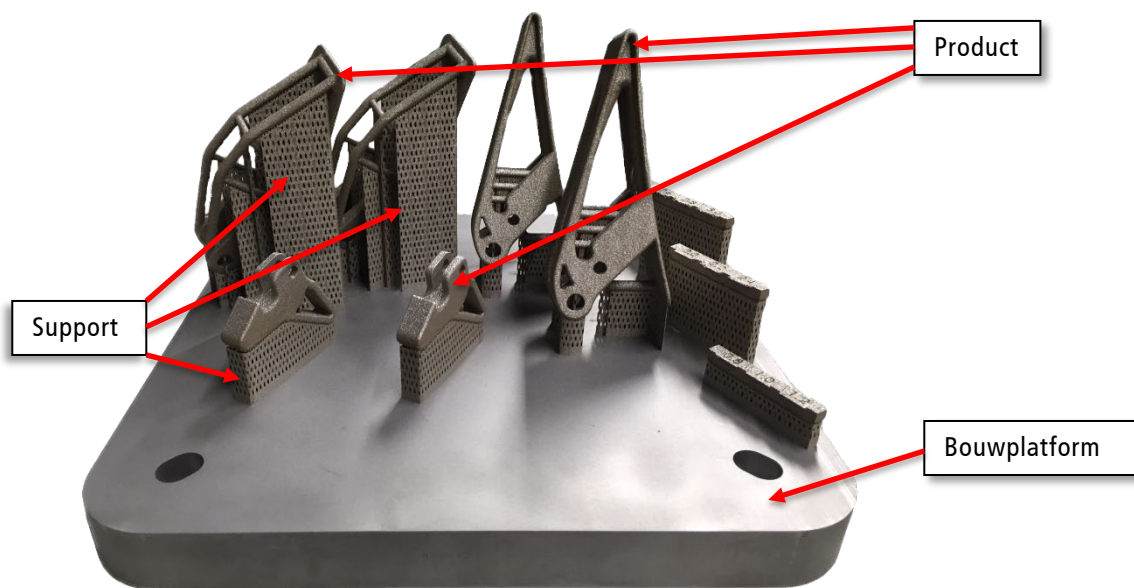
2.3 - Nabewerking

Het vervaardigen van producten met SLM gaat in alle gevallen gepaard met enige vorm van nabewerking [3]. Nog voor dat de onderdelen van het bouwplatform worden verwijderd is het raadzaam om een warmtebehandeling uit te voeren [4, 5]. De voornaamste reden voor het toepassen van een warmtebehandeling is het minimaliseren van de krimpspanningen (spanningsarm gloeien) die tijdens het proces zijn ontstaan. Een warmtebehandeling resulteert daarom in een betere maatvastheid en een sterker onderdeel.

Na het uitvoeren van de warmtebehandeling worden de onderdelen van het bouwplatform verwijderd. In de meeste gevallen gebeurt dit met een lintzaag of draadvonkmachine. De bouwplaat kan hierna worden gevlakt en gezandstraald, zodat deze weer gereed is voor een volgende printjob.

Vervolgens worden de onderdelen ontdaan van hun (restanten van) supportstructuren. De ideale methode hiervoor is afhankelijk van de geometrie van het onderdeel. In sommige gevallen kunnen deze met een punttang worden verwijderd, in andere gevallen is zwaardere apparatuur (bijv. een freesbank) noodzakelijk.

Vervolgens kunnen de onderdelen verder worden nabewerkt, afhankelijk van de wensen en eisen waaraan deze moeten voldoen. Denk hierbij aan factoren als maattolerantie en oppervlakteruwheid (Hoofdstuk 5).



Figuur 7 - Bouwplatform met daarop verschillende onderdelen. In het geval van de Conceptlaser M1 heeft het bouwplatform een afmeting van 250 x 250 mm

3 - Supportstructuren

De meeste 3D-printtechnieken maken gebruik van supportstructuren, die dienen ter ondersteuning en stabilisatie van het product dat geprint wordt. Dit ondersteuningsmateriaal wordt van het onderdeel verwijderd wanneer de printjob is voltooid. Bij SLM is het gebruik van support voor ieder product noodzakelijk (Figuur 7). Hoewel productwanden zonder support geprint kunnen worden indien ze ten opzichte van het horizontale vlak een hoek van meer dan 45 graden hebben, dient een onderdeel **altijd** ergens ondersteund te worden. De hoeveelheid en locatie van de supportstructuren zijn sterk afhankelijk van de *oriëntatie* van het onderdeel in het bouwvolume.

Supportmateriaal wordt in de meeste gevallen (automatisch) gegenereerd door de software die gebruikt wordt voor het voorbereiden van de printjobs, maar men kan ook kiezen om deze (deels) te integreren in het productontwerp.

Supportmateriaal dient bij SLM meerdere functies [6]:

Positionering van het product

Wanneer het metaalpoeder gesmolten wordt, heeft dit de neiging om bolvormige druppels te vormen ("balling"). Door gebruik te maken van supports wordt dit effect sterk verminderd. Daarnaast voorkomen de supports dat het product tijdens het printproces de nauwkeurige positionering in het bouwvolume verliest door de toename van de materiaaldichtheid (het product heeft een grotere dichtheid dan het poeder) of verschuift door bewegen van de wiper/recoater wanneer een nieuwe poederlaag wordt aangebracht.

Vormvastheid van het product

Door de laagsgewijze opbouw en grote temperatuurverschillen tijdens het proces ontstaan (krimp)spanningen in de producten. Door adequaat gebruik van supports wordt op mechanische wijze voorkomen dat deze spanningen leiden tot deformatie van het product.

Het afvoeren van warmte

Een derde belangrijke functie van supports is het afvoeren van de warmte die in de onderdelen wordt ingebracht door het lasersmelten. Indien de warmte niet kan wegvloeien uit de onderdelen, kan dit leiden tot een te hoge temperatuur. Dit kan vervolgens resulteren in porositeit van het onderdeel, doordat het metaal niet alleen wordt gesmolten, maar zelfs (deels) verdampt. Ook zal de mate van oxidatie aan het oppervlak van de onderdelen toenemen indien de proceswarmte niet voldoende kan worden afgevoerd.

3.1 - Het genereren van supports voor SLM met Materialise Magics®

In de meeste gevallen kunnen de benodigde supportstructuren gegenereerd worden door de support module binnen Materialise Magics®. Deze software biedt tal van mogelijkheden om de supportstructuren aan te passen en te optimaliseren. De software kan analyseren welke vlakken van het te printen onderdeel ondersteund dienen te worden. De instellingen voor supports kunnen per vlak naar eigen inzicht worden aangepast. Tabel 1 biedt een overzicht van de verschillende supportstructuren binnen Magics en welke parameters per categorie kunnen worden gewijzigd.



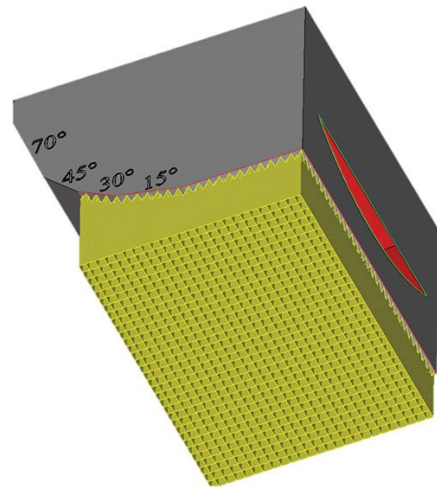
Tabel 1 - Verschillende soorten support in Materialise Magics®

Parameters	Block	Line	Point	Web	Contour	Gusset
Hatching	✓			✓		
Hatching Teeth	✓					
Teeth Synchronization	✓					
Fragmentation	✓				✓	
Hatch Removal	✓					
Borders	✓					
Border Teeth	✓					
Perforations	✓	✓			✓	
Unperforated Borders	✓					
Gusset Border	✓					
Cross Line Length		✓				
Cross Line Interval		✓				
Sunken Cross Lines		✓				
Teeth		✓	✓	✓	✓	✓
Cross Line Teeth		✓				
Reinforced		✓	✓			
Contact Length			✓			
Sunken Ribs			✓			
Number of Ribs			✓			
Web				✓		
Contour					✓	
Gusset						✓
Interval						✓

Block Support

De belangrijkste en meest bruikbare supportstructuur is de zogeheten *block support* (Figuur 8). Dit type support bestaat uit een rasterpatroon dat verdeeld wordt over het gehele vlak dat ondersteund dient te worden. Block support kan, mits de juiste parameters worden gekozen, de proceswarmte goed naar de bouwplaat geleiden vanwege de relatief hoge materiaaldichtheid. Daarnaast is block support relatief sterk, waardoor de aanwezige krimpspanningen in het printproces goed kunnen worden opgevangen.

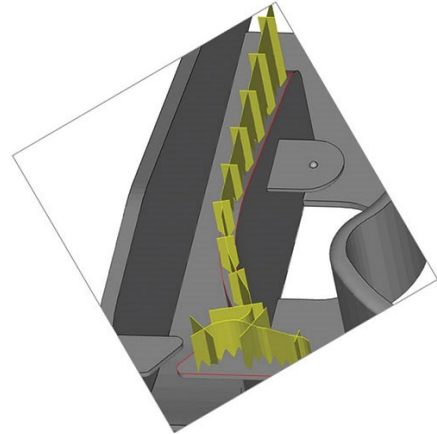
Vanwege de structuur van block supports is het ongesmolten poeder niet altijd even eenvoudig te verwijderen. Instellingen als *fragmentation* (het intervalsgewijs onderbreken van het ruitjespatroon) en *perforations* (het aanbrengen van openingen in de buitenste support contour) kunnen hierbij helpen, maar zelden slaagt men erin om al het poeder te verwijderen. Bovendien resulteert het aanbrengen van openingen in de supportstructuur voor een vermindering van de mechanische sterkte en de thermische geleiding.



Figuur 8 - Block Support
(<http://www.materialise.com>)

Line Support

Een *line support* (Figuur 9) is goed bruikbaar voor het ondersteunen van dunne, verticale wanden. Dit type support wordt opgebouwd door een enkele verticale wand, met dwarsschotten die dienen ter versteviging. De breedte en afstand tussen deze dwarsschotten zijn instelbaar. Vanwege de dwarsschotten biedt line support voor zeer dunne wanden (<0,5 mm) een verbetering in stabiliteit ten opzichte van block support. Line supports zijn relatief fragiel en zijn daardoor minder geschikt voor grotere onderdelen en worden in de praktijk zelden toegepast. Het verwijderen van overtollig poeder en het verwijderen van de support is relatief eenvoudig.



Figuur 9 - Line Support
(<http://www.materialise.com>)

Point Support

Zoals de naam al doet vermoeden, is *point support* (Figuur 10) goed bruikbaar voor het ondersteunen van een enkel punt van het te printen onderdeel. Zoals ook voor line supports het geval is, is een dergelijke structuur relatief fragiel. Dit type support is dan ook alleen geschikt voor onderdelen met een gering volume en wordt in de praktijk zelden toegepast.

Indien een onderdeel met een groter volume (gedeeltelijk) wordt opgebouwd vanuit één punt is het vaak beter om gebruik te maken van een cilindervormige, massieve ondersteuning. Dit zorgt voor een betere warmte-afvoer tijdens het bouwproces en een grotere mate van stabiliteit van het onderdeel in het poederbed. Een massieve ondersteuning kan zowel in Magics als in de gebruikte CAD-software worden aangemaakt.

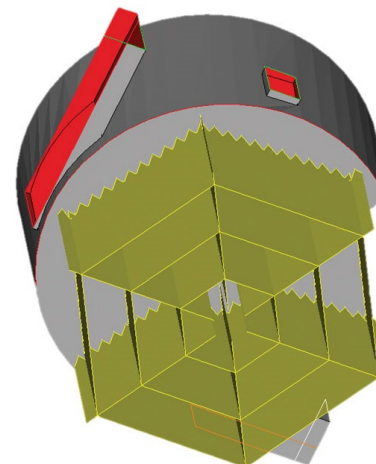


Figuur 10 - Point Support
(<http://www.materialise.com>)

Web Support

Web support (Figuur 11) kan gebruikt worden voor het ondersteunen van cirkelvormige oppervlakken. Dit type support wordt opgebouwd op dezelfde manier als een spinnenweb, met een aantal schotten die elkaar in het midden van het oppervlak kruisen en welke onderling aan elkaar zijn verbonden met één of meerdere tussenschotten. De hoeveelheid (tussen)schotten kan naar wens worden ingesteld.

Een nadeel van gebruik van deze supportstructuren voor cirkelvormige oppervlakken is dat deze een veelhoek vormt. Hierdoor zal niet de gehele cirkel (met name aan de randen) ondersteund worden. Daarnaast is de dichtheid van deze supports in het midden van het oppervlak het grootst, terwijl de krimpspanningen het grootst zullen zijn aan de randen van het object. Om deze redenen kan vaak beter worden gekozen voor block support of *contour support*.



Figuur 11 - Web Support
(<http://www.materialise.com>)

Contour Support

Contour support (Figuur 12) wordt gegenereerd aan de hand van de buitenste contour van het vlak dat ondersteund dient te worden. De dichtheid van dit type support kan worden ingesteld door de afstand tussen de verschillende wanden te vergroten of te verkleinen.

Het voordeel van dit type support is dat deze relatief gemakkelijk van het onderdeel te verwijderen is. Een nadeel is dat het ongesmolten poeder wordt opgesloten binnen de supportstructuur. Bij het vergemakkelijken van het verwijderen van poeder door het toepassen van *perforations* zal dit type support sterk verzwakt worden. Daarnaast zal het toepassen van perforations er ook voor zorgen dat de warmteafvoer wordt verminderd.

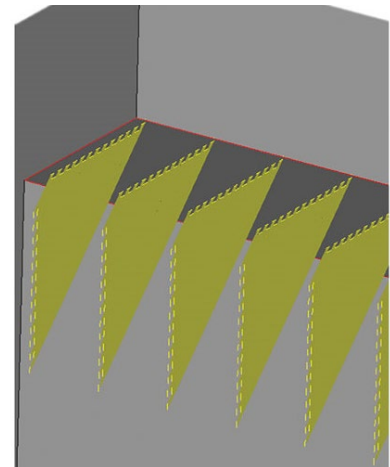


Figuur 12 - Contour Support
(<http://www.materialise.com>)

Gusset Support

Het toepassen van *gusset support* (Figuur 13) kan een manier zijn om materiaal te besparen bij overhangende productdelen. Dit type support wordt niet, zoals alle eerder beschreven supportstructuren, gegenereerd vanaf het bouwplatform, maar vanaf het onderdeel zelf. Dit type support kan worden opgebouwd vanaf een (nagenoeg) verticale wand van het onderdeel en breidt zich onder een bepaalde hoek (max. 45 graden) uit tot de gewenste breedte bereikt is. De afstand tussen de ondersteunende schotten kan naar wens worden ingesteld.

Dit type support kan worden gebruikt voor kleine overhangen, maar is vanwege de beperkte mechanische sterkte minder geschikt voor het ondersteunen van overhangende delen met een groot volume.



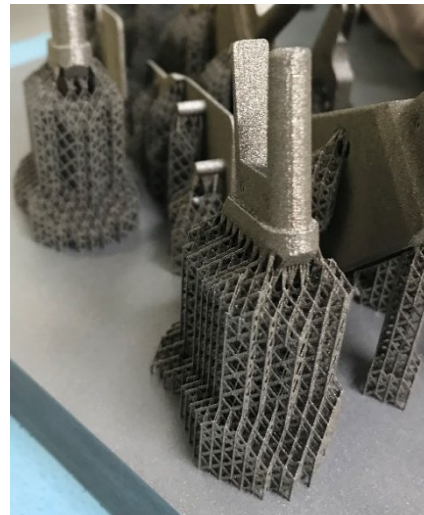
Figuur 13 - Gusset Support
(<http://www.materialise.com>)

Magics e-stage support

Een relatief nieuw type support binnen Magics is *e-stage support* (Figuur 14). Aanvankelijk is deze supportstructuur ontwikkeld voor SLA/DLP technieken, maar is nu ook geoptimaliseerd voor SLM en is aan te schaffen als aparte software-module.

Een groot voordeel van dit type support is dat de gebruiker enkel nog de onderdelen in de juiste oriëntatie hoeft te plaatsen. Daarna kan het ondersteuningsmateriaal volledig automatisch gegenereerd worden. Hierdoor zijn grote tijdsbesparingen te behalen in de voorbereiding van een printjob, met name als de hoeveelheid en complexiteit van de onderdelen groot is.

Daarnaast biedt dit type support voldoende stevigheid en warmtegeleiding voor het succesvol afronden van de print. Het verwijderen van overtollig poeder is eenvoudig, evenals het verwijderen van de supports zelf.

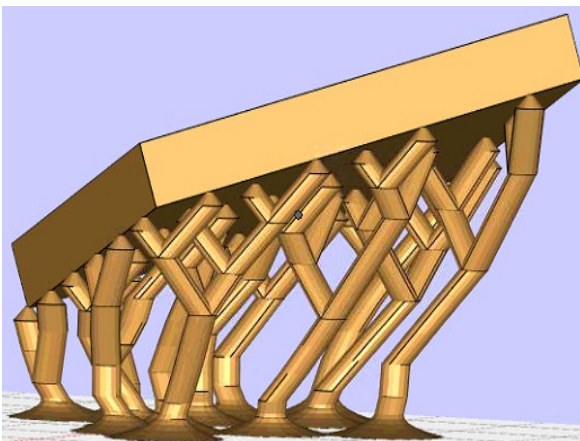


Figuur 14 - E-stage support

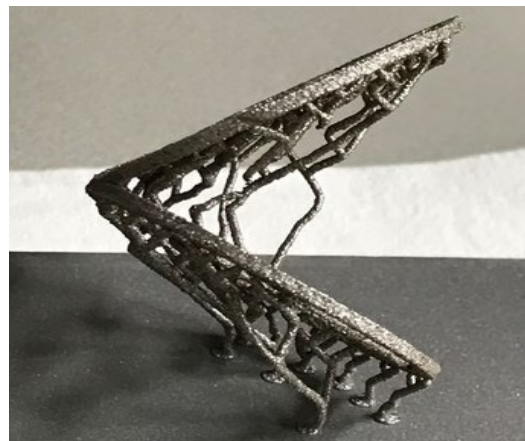
3.2 - Het genereren van tree support met Adobe Meshmixer

Evenals e-stage supports is ook *tree support* aanvankelijk ontwikkeld voor gebruik met DLP/SLA technieken. Door de vele instelmogelijkheden die Meshmixer biedt, is dit type support ook beschikbaar gemaakt voor SLM.

In Figuur 15 is een voorbeeld van tree support weergegeven. Een tree support bestaat uit meerdere "takken" die het product ondersteunen. Een tree support is goed te gebruiken bij producten die zo georiënteerd zijn dat er zo min mogelijk support nodig is. De treesupport ondersteunt alleen wat echt nodig is en kan vrijwel overal ondersteunen, zonder te veel volume te gebruiken. Een tree support is gemakkelijk te verwijderen.



Figuur 15: Voorbeelden tree support

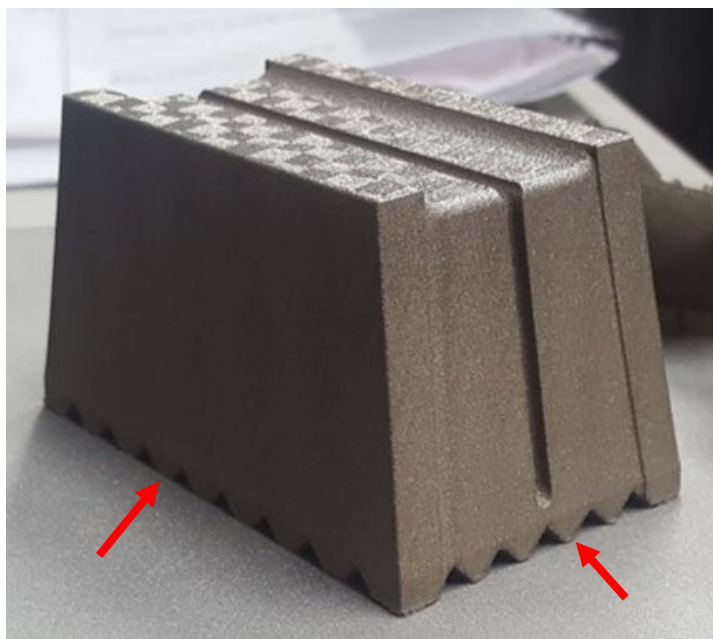


3.3 - Geïntegreerde supports

Het type supports en de bijbehorende parameters zijn volledig afhankelijk van het product. Voor onderdelen met een relatief grote materiaaldichtheid (massieve delen) is het vaak raadzaam om de supports te integreren in het ontwerp (Figuur 16). Dit biedt tevens de mogelijkheid om de supportstructuur zelf te ontwerpen en daarmee de vrijheid om de supportstructuur zo sterk te maken als nodig is. Door het onderdeel direct te verbinden met het bouwplatform wordt ook de warmteafvoer sterk verbeterd, wat resulteert in lagere krimpspanningen in het onderdeel.

Ook voor geïntegreerde supports geldt dat het minimaliseren van materiaalverbruik van belang is om de kosten van het print- en nabewerkingsproces te drukken. Vaak gebeurt het ontwerpen van geïntegreerde supportstructuren op basis van ervaring van de gebruiker. Moderne simulatie-software (bijvoorbeeld de Ansys Additive Suite) kan worden ingezet om het bouwproces te simuleren, zodat kan worden beoordeeld of de supports voldoende warmte kunnen afvoeren en of ze voldoende mechanische sterkte hebben om de krimpspanningen op te vangen.

Omdat geïntegreerde supports in de meeste gevallen massief zijn, dient nog wel rekening gehouden te worden met het feit dat deze minder eenvoudig te verwijderen zijn van het bouwplatform. Daarnaast is ook het verwijderen van overtollig poeder een aspect om rekening mee te houden.



Figuur 16 - Voorbeeld van geïntegreerde supports bij het fabriceren van een inzetstuk voor een spuitgietmatrijs. De massieve "tanden" zorgen voor een goede warmteafvoer en een sterke verbinding met het bouwplatform, terwijl het overtollige poeder nog steeds kan worden verwijderd uit de inwendige holtes.

4 - Materiaaleigenschappen

Bij het ontwerpen van technische producten is het uiteraard van belang om de materiaaleigenschappen zo goed mogelijk te kennen. Eigenschappen zoals de specifieke treksterkte, stijfheid en slagvastheid van een materiaal zijn cruciaal voor het ontwerpen van lichtgewicht producten die mechanisch belast zullen worden. De eigenschappen worden tevens beïnvloed door de printoriëntatie en de warmtebehandeling.

Om te controleren of de gebruikte machine, materiaal en warmtebehandelingen voldoen aan de specificaties van de leverancier zijn een aantal materiaalproeven uitgevoerd. Met behulp van de ConceptLaser M1 zijn een aantal proefstukken geprint en geanalyseerd door Element Materials Technology. De resultaten zijn vergeleken met de eisen die gesteld worden aan RVS 316L (X2CrNiMo17-12-2, werkstofnummer 1.4404) volgens EN10088-4.

4.1 - Materiaalidentificatie

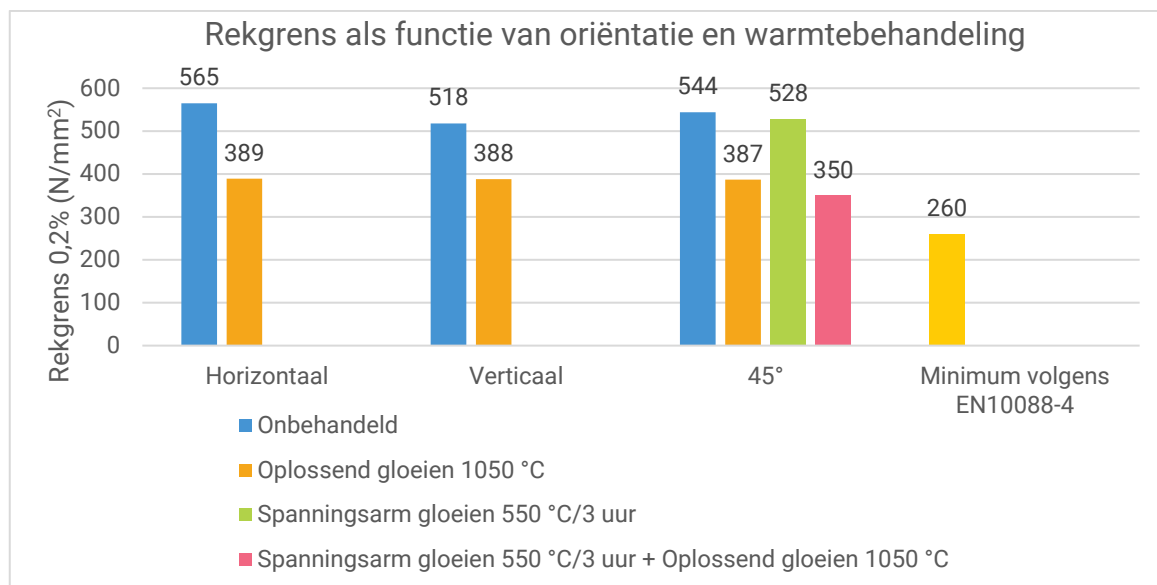
De globale samenstelling van het materiaal (ConceptLaser CL20_ES) is kwantitatief bepaald middels een röntgenfluorescentie onderzoek (Niton analyser XLt 898). Hoewel de hoeveelheid nikkel iets boven de gestelde waarde uitkomt (Tabel 2 - De samenstelling van ConceptLaser CL20_ES), is het materiaal positief geïdentificeerd als roestvast staal van het type 316/316L (X2CrNiMo17-12-2).

Tabel 2 - De samenstelling van ConceptLaser CL20_ES

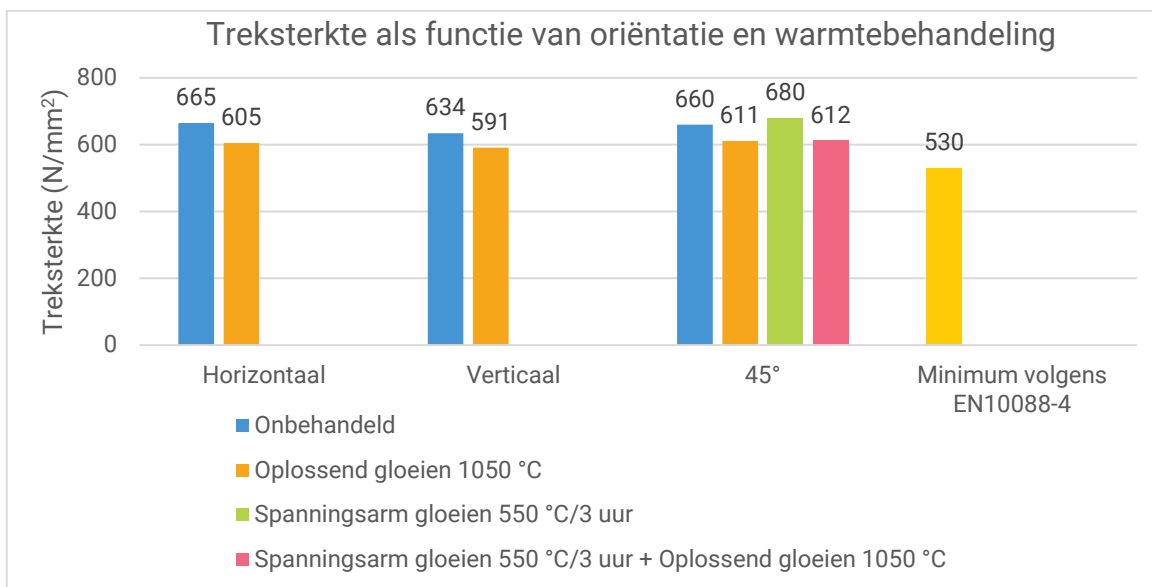
	Cr	Ni	Mo	Mn	Fe
Gemeten waarde, n=16 (%)	17,7	13,2	2,45	1,0	65,2
Eisen volgens EN10088-4 (%)	16,5-18,5	10,0-13,0	2,0-2,5	≤ 2	Basis

4.2 - Trekproeven

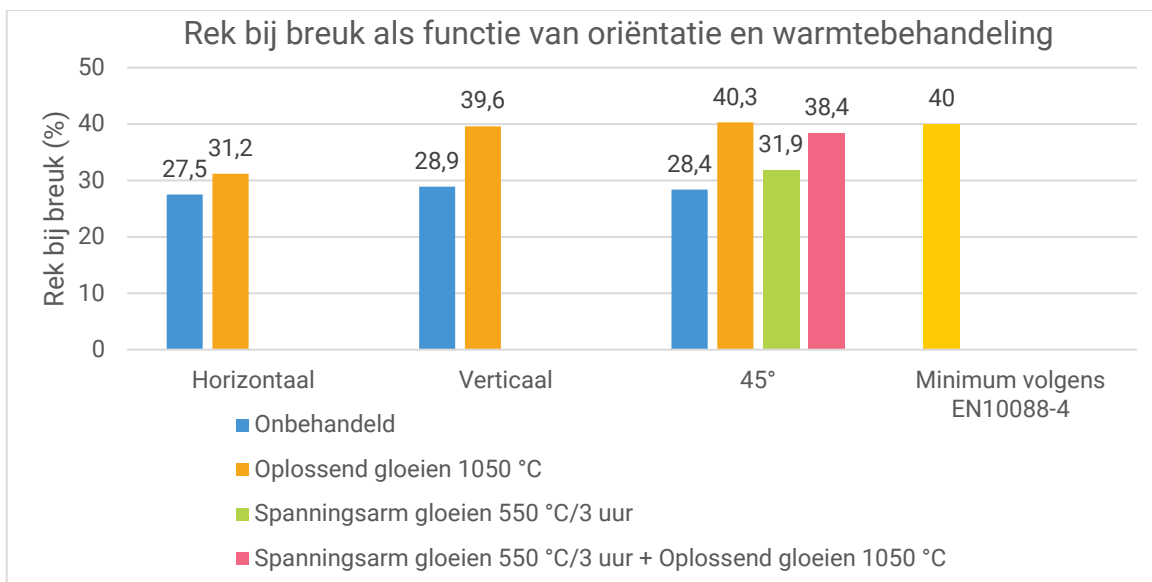
De trekproeven zijn uitgevoerd volgens EN10088-4 met samples met een afmeting van Ø10 x 50mm. Hierbij is gelet op de rekgrens (Figuur 17), de maximale treksterkte (Figuur 18) en de rek bij breuk (Figuur 19).



Figuur 17 – Rekgrens (0,2 %) als functie van oriëntatie en warmtebehandeling



Figuur 18 - Treksterkte als functie van oriëntatie en warmtebehandeling



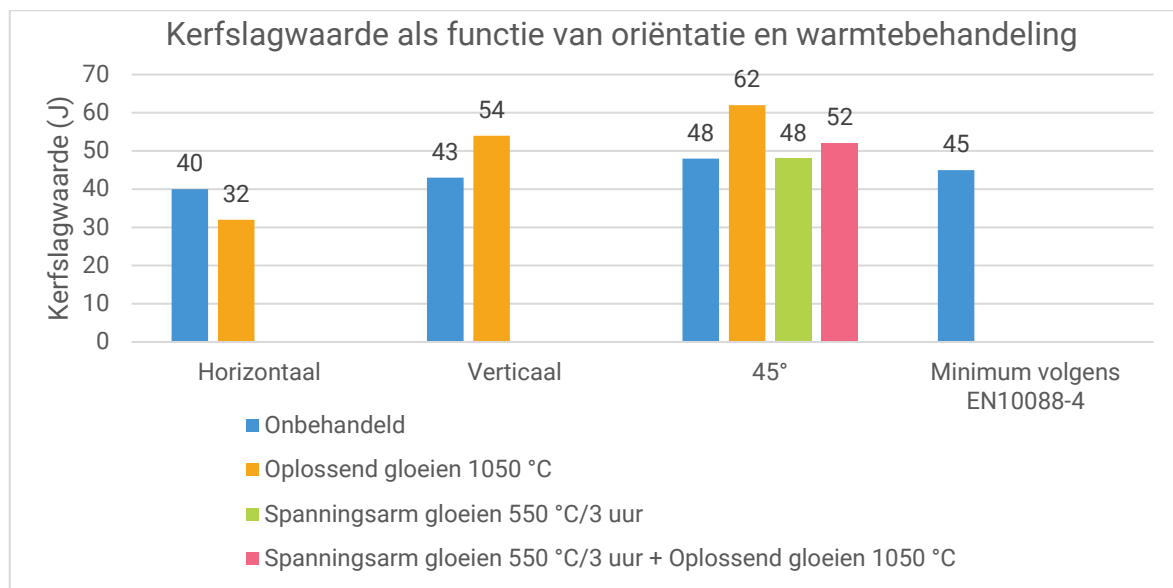
Figuur 19 - Rek bij breuk als functie van oriëntatie en warmtebehandeling

Op de vereisten voor rek bij breuk na voldoet het materiaal aan de voorwaarden die gesteld worden aan het materiaal RVS 316L met werkstofnummer 1.4404. Opvallend is de hoge rekgrens (indicatie voor de trekstijfheid van het materiaal) in onbehandelde toestand. Gecombineerd met de lage rek bij breuk lijkt het geprinte materiaal sterk op gegoten metaal, zoals bijvoorbeeld lasmetaal.

Om te voldoen aan de voorwaarden die gesteld worden aan RVS 316L, is geprobeerd de rek bij breuk te verhogen door middel van oplossend gloeien bij 1050 °C. Deze warmtebehandeling resulteert in een grotere rek bij breuk, maar doet afbreuk aan de treksterkte en rekgrens. De warmtebehandeling die door ConceptLaser wordt voorgeschreven (spanningsarm gloeien bij 550 °C) had niet voldoende effect om de vereiste rek bij breuk van tenminste 40% te realiseren. De rek bij breuk bij de horizontaal geprinte proefstukken blijft, na oplossend gloeien bij 1050 °C wel iets achter op de proefstukken die verticaal en onder een hoek van 45° zijn geprint.

4.3 - Kerfslagproeven

De kerfslagproeven zijn uitgevoerd door de geprinte staven (12 x 12 x 60mm) na te frezen tot een goed gedefinieerde afmeting van 10 x 7,5 x 55mm, vervolgens is hier een ISO V-kerf in aangebracht. De resultaten van de kerfslagproeven worden weergegeven in Figuur 20. De samples geprint onder een hoek van 45° voldoen allen aan de gestelde norm van ≥ 45 J, evenals een verticaal geprint proefstuk na oplossend gloeien bij 1050 °C. De horizontaal geprinte proefstukken voldoen in geen geval aan de gestelde norm voor de kerfslagsterkte. Dit betekent natuurlijk niet dat het materiaal onbruikbaar is, maar de ontwerper dient hier wel rekening mee te houden.



Figuur 20 - Resultaten kerfslagproeven

4.4 – Conclusie

Het gebruikte RVS 316L lijkt qua materiaaleigenschappen op gegoten RVS 316L. In vergelijking met conventioneel geproduceerde samples van RVS 316L is de treksterkte significant hoger en de slagvastheid significant lager [7].

Het is raadzaam om een warmtebehandeling uit te voeren. Na spanningsarm gloeien bij 550 °C heeft het materiaal de grootste treksterkte. Wanneer een grotere taaiheid van het materiaal van belang is kan gekozen worden voor oplossend gloeien bij 1050 °C. Daarnaast dienen ontwerpers rekening te houden met een lichte mate van anisotropie.

5 - Het verbeteren van de oppervlaktekwaliteit

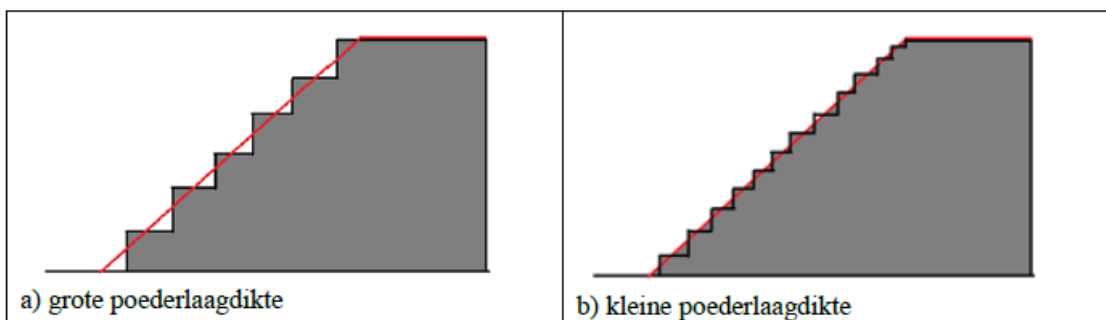
In tegenstelling tot wat men gewend is van conventionele productietechnieken voor metalen onderdelen, is het oppervlak van SLM-onderdelen enigszins ruw. Ruwheden van $R_a > 15 \mu\text{m}$ zijn niet ongewoon. Hoewel dit voor veel toepassingen weliswaar niet problematisch is maar vooral ongebruikelijk, vereisen sommige toepassingen een lagere oppervlakteruwheid. Voor het reduceren van de oppervlakte-ruwheid zijn verschillende nabehandelingen mogelijk. Een goed begrip van de oorzaken van de oppervlakteruwheid is van belang om de hoeveelheid nabewerkingsstappen zo veel mogelijk te beperken.

5.1 - Oorzaken van oppervlakteruwheid

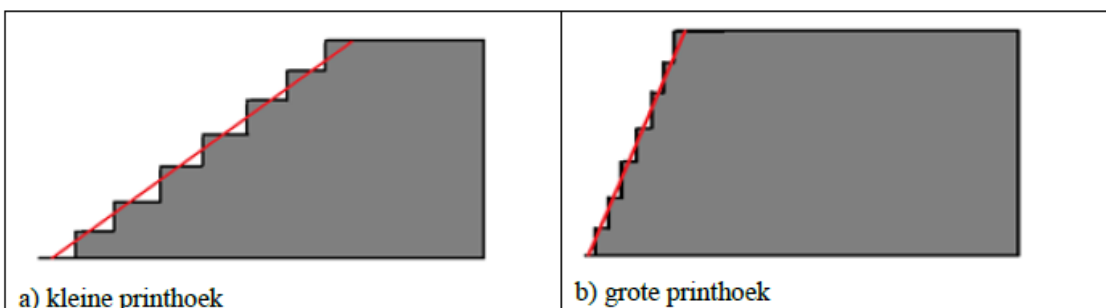
De ruwheid van SLM-producten heeft verschillende oorzaken die inherent zijn aan het proces [8]. Deels wordt de ruwheid veroorzaakt door de laagsgewijze opbouw van de producten, anderzijds door de vorm (poeder) en de thermische eigenschappen van het metaal.

Staircase-effect (upskin)

Doordat het product in lagen wordt opgebouwd, zal op schuine oppervlakken aan de bovenzijde van een product een getrapt oppervlak ontstaan. Dit is beter bekend als het staircase-effect [9]. Wanneer wordt geprint met een kleinere laagdikte zal het staircase-effect theoretisch gezien minder prominent aanwezig zijn. (Figuur 21). Daarnaast zal het staircase effect duidelijker aanwezig zijn op vlakken die een kleine hoek hebben ten opzichte van het bouwplatform (Figuur 22).



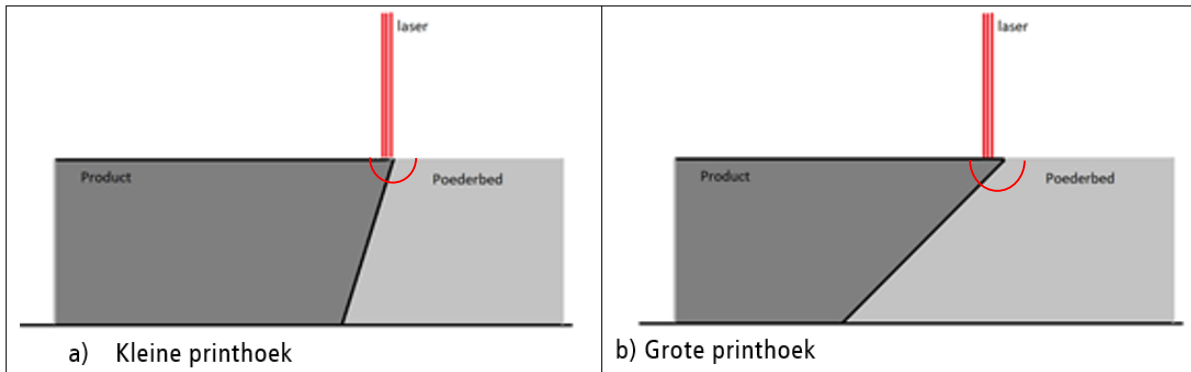
Figuur 21 Invloed poederlaagdikte op staircase-effect



Figuur 22 Invloed printhoek op staircase-effect

Overhellende delen

Een van de oorzaken van oppervlakteruwheid is de uitstraling van warmte naar het poederbed, waardoor aanhechting van overtollige poederdeeltjes plaatsvindt [10]. Dit effect is met name zichtbaar op overhangende vlakken met een hoek van $45-90^\circ$ ten opzichte van het bouwplatform. Dit effect wordt sterker naarmate de hoek tussen het product en het bouwplatform kleiner wordt (Figuur 23).



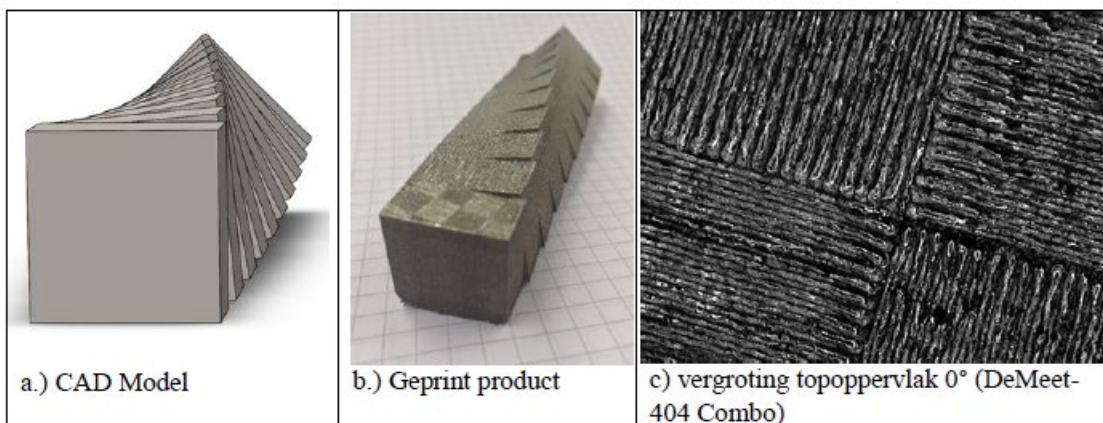
Figuur 23 - Invloed printhoek bij overhang

Downskin

Bij hoeken tussen 0-45° kan *balling* optreden tijdens het printproces. Balling houdt in dat het metaalpoeder niet in een gladde laag smelt, maar bolvormige druppels vormt door de hoge oppervlakte-energie van het gesmolten metaal [8, 11, 12]. Balling ontstaat op delen van het product die zich in het bouwproces aan de onderzijde van het product bevinden, de zogeheten *downskin*. Het balling-effect wordt versterkt naarmate de hoek tussen de downskin en het bouwplatform kleiner wordt. Het gebruik van supports helpt het balling effect te beperken, maar de downskin van het product zal een grote ruwheid hebben. De “bolletjes” kunnen namelijk een diameter hebben van 0,5mm [12].

5.2 - Bepalen van de oppervlaktekwaliteit

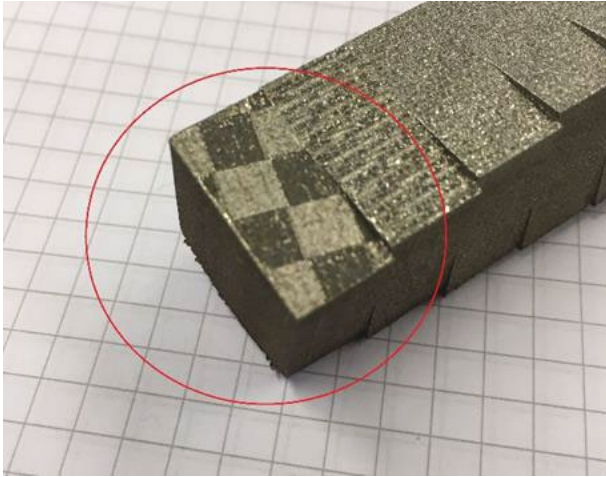
Om te toetsen of het in dit onderzoek gebruikte productieproces representatief is, zijn de oppervlakteruwheden van de producten bepaald. Middels een testobject (Figuur 24) is in kaart gebracht welke oppervlakteruwheid behaald wordt bij verschillende hoeken. Het product is geprint in RVS 316L (Conceptlaser CL20_ES) bij laagdikten van 45µm en 30µm. De oppervlakteruwheden van de verschillende vlakken zijn bepaald volgens ISO-4287 met een Taylor-Hobson Surftronic 3.



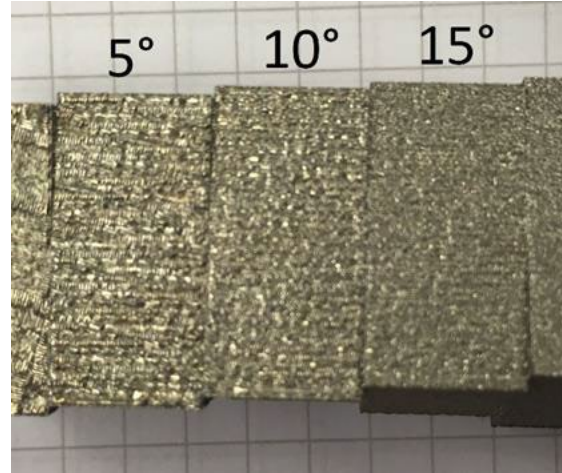
Figuur 24 – Testobject voor het bepalen van de oppervlakteruwheden bij verschillende printhoeken

Upskin

Bij een volledig horizontale print (0°) zijn vierkante vlakjes met een afmeting van 5x5mm aanwezig, de zogeheten *islands* (Figuur 25). Om de krimpspanningen die -als gevolg van de laagsgewijze warmte-inbreng- ontstaan tijdens het printproces te minimaliseren, wordt de dwarsdoorsnede van het product in vlakken verdeeld. Deze vlakjes worden in willekeurige volgorde belicht. Het staircase effect is duidelijk zichtbaar bij hoeken van 5°, 10° en 15° (Figuur 26).

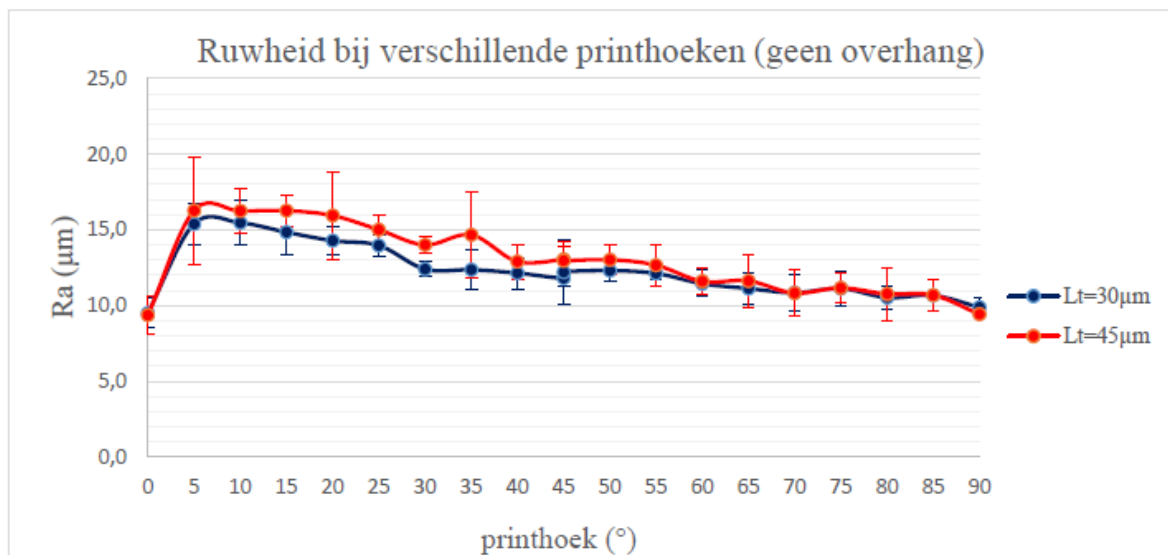


Figuur 25 – Gevlakte oppervlaktestructuur bij een hoek van 0° als gevolg van “islands”



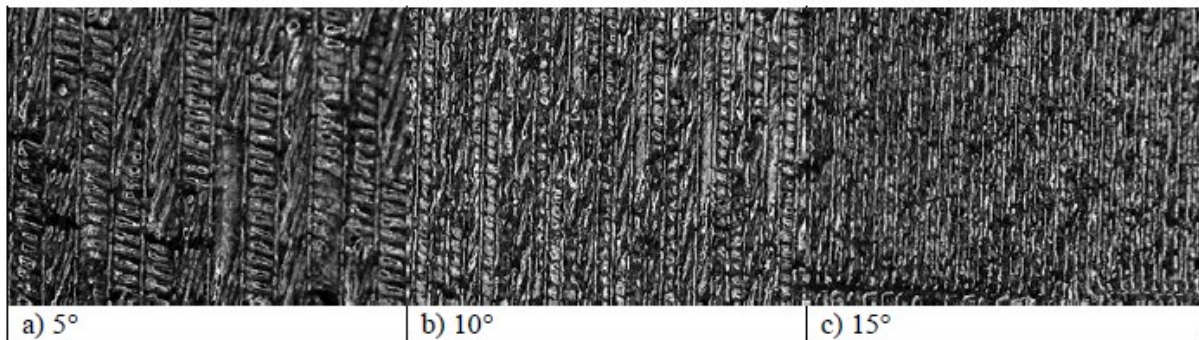
Figuur 26 – Het staircase-effect is duidelijk zichtbaar bij hoeken van 5°, 10° en 15°

Met behulp van het testproduct is de oppervlakteruwheid (R_a) bij verschillende hoeken bepaald. De ruwheid is in de richting van het staircase-effect gemeten (Figuur 27). Hieruit blijkt dat de ruwheid het laagst is bij printhoeken van 0° (horizontaal) en 90° (verticaal). De gemiddeld behaalde ruwheid van het oppervlak van geprinte producten ligt tussen $R_a \approx 8\text{-}16 \mu\text{m}$. Dit is overeenkomstig met gevonden literatuur [8]. Deze oppervlakteruwheid is sterk afhankelijk van de printhoek van het geprinte oppervlak. Bij horizontale en verticale oppervlakken worden de laagste ruwheden behaald. Bij een printhoek van 5° zonder overhang ontstaat het meest ruwe oppervlak. Deze ruwheid neemt geleidelijk af naarmate de printhoek stijgt. Bij overhang neemt de ruwheid toe (tot $R_a \approx 25 \mu\text{m}$) naarmate de overhang groter wordt.



Figuur 27 - Oppervlakteruwheden van de upskin bij verschillende printhoeken en laagdiktes Lt

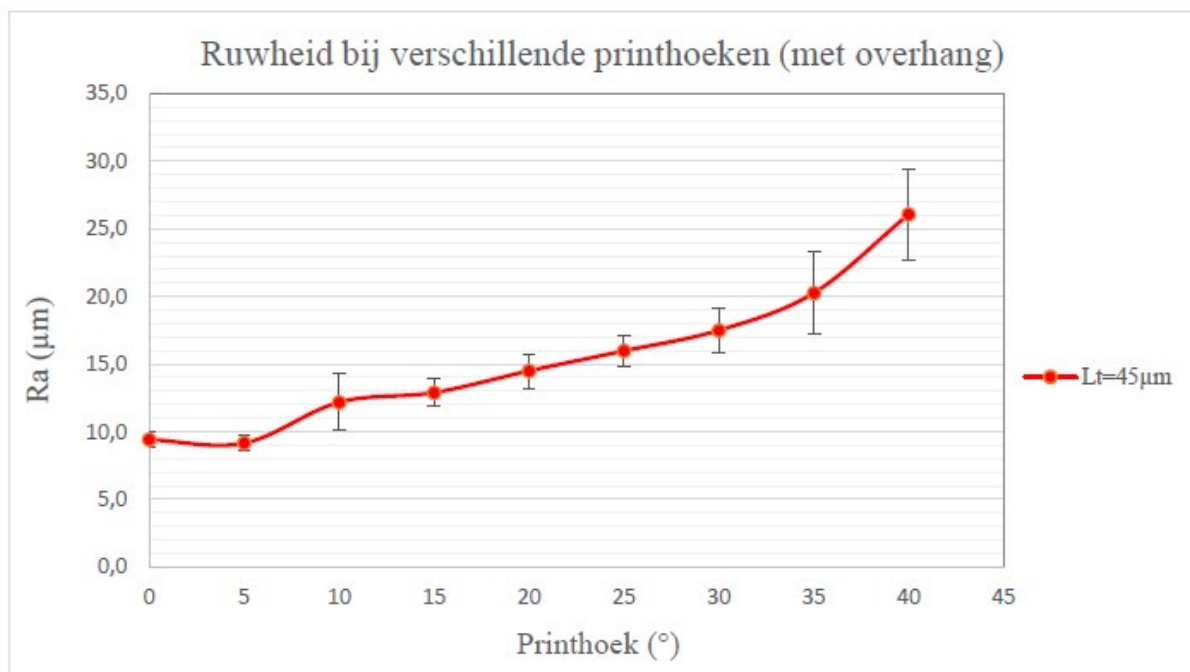
Bij een hoek van 5° is ook het staircase effect het grootst. De ruwheid neemt geleidelijk af naarmate de hoek van de upskin groter wordt. Deze afname in ruwheid is ook zichtbaar (Figuur 28) met behulp van optische meetapparatuur (Schut DeMeet 404 Combo).



Figuur 28 – Uitvergroting van de upskin bij verschillende printhoeken (DeMeet-404 Combo, oppervlak=4x6mm)

Overhellende delen

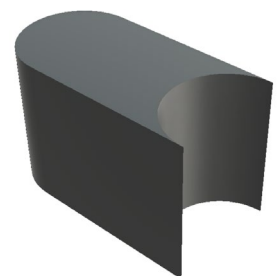
Uit ruwheidsmetingen aan de overhellende wanden blijkt dat de ruwheid stijgt naarmate de hoek ten opzichte van het verticale vlak (z-as) groter wordt (Figuur 29). De (nagenoeg) verticale wanden (0-5°) hebben gemiddeld ruwheden (Ra) van $9 \pm 1 \mu\text{m}$. De ruwheden bij een hoek van 40° kunnen oplopen van $26 \pm 3 \mu\text{m}$.



Figuur 29 - Ruwheid van overhellende vlakken – poederlaagdikte $L_t = 45 \mu\text{m}$

5.3 - Het effect van verschillende nabewerkingen

Om het effect van verschillende oppervlaktebehandelingen (en combinaties daarvan) te bepalen is een tweede testobject (Figuur 30) ontworpen, waaraan verscheidene metingen kunnen worden verricht. Het object is zes keer (product A-F) geprint met een laagdikte van $45 \mu\text{m}$ onder een hoek van 5°.



Figuur 30 - Testobject voor oppervlaktebehandelingen

5.3.1 - Bewerkingen

Er is een matrix met bewerkingen en combinaties van bewerkingen opgesteld. In deze matrix (Tabel 3) zijn de bewerkingen en de volgorde van de bewerkingen weergegeven.

Tabel 3 - Volgorde van uitgevoerde oppervlaktebehandelingen en -metingen voor producten A-F

Product	Actie					
	1	2	3	4	5	6
A(45µm)	Stralen	Ruwheidsmeting 1	Elektrolytisch polijsten	Ruwheidsmeting 2		
B(45µm)	Glijlijpen	Ruwheidsmeting 1	Elektrolytisch polijsten	Ruwheidsmeting 2		
C(45µm)	Stralen	Glijlijpen	Ruwheidsmeting 1	Elektrolytisch polijsten	Ruwheidsmeting 2	
D(45µm)	Stralen	Kogel polijsten	Ruwheidsmeting 1	Elektrolytisch polijsten	Ruwheidsmeting 2	
E(45µm)	Stralen	Glijlijpen	Kogel polijsten	Ruwheidsmeting 1	Elektrolytisch polijsten	Ruwheidsmeting 2
F(45µm)	Helft frezen Natstralen	Ruwheidsmeting 1	Elektrolytisch polijsten (excl. genatstraald zijvlak)	Ruwheidsmeting 2		

Alle producten zijn na de eerste ruwheidsmeting doormidden gezaagd. De helft van het product is vervolgens elektrolytisch gepolijst.

5.3.2 - Resultaten

In Tabel 4 zijn de resultaten van de verschillende bewerkingen weergegeven.

Tabel 4 - Resultaat van de verschillende oppervlaktebehandelingen. De ruwheden zijn uitgedrukt in µm.

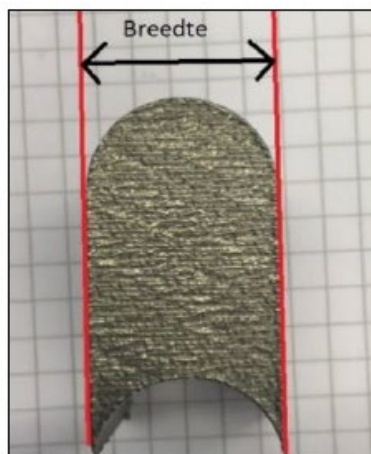
Bewerking	Top-vlak	Zij-vlak	Binnen-zijde	Holle zijde	Bolle zijde
Onbewerkt	13,9	7,85	9,0	9,2	10,3
Onbewerkt + Elektrolytisch Polijsten	13,2	7,6	8,8	-	-
A: Stralen	12,4	4,5	5,0	5,0	4,0
A: Stralen + Elektrolytisch Polijsten	12,8	3,8	4,3	-	-
B: Glijlijpen	5,6	0,9	6,6	1,6	1,0
B: Glijlijpen + Elektrolytisch Polijsten	5,5	0,8	6,3	-	-
C: Stralen + Glijlijpen	3,8	0,8	6,1	1,6	0,7
C: Stralen + Glijlijpen + Elektrolytisch Polijsten	3,3	0,6	6,0	-	-
D: Stralen + Kogelpolijsten	10,8	4,3	5,9	2,4	3,6
D: Stralen + Kogelpolijsten + Elektrolytisch Polijsten	10,5	3,9	5,6	-	-
E: Stralen + Glijlijpen + Kogelpolijsten	2,7	0,5	5,5	1,1	0,6
E: Stralen + Glijlijpen + Kogelpolijsten + Elektrolytisch Polijsten	2,5	0,5	5,3	-	-
F: Freesdeel	3,6	1,4	onbewerkt	onbewerkt	onbewerkt
F: Natstralen	onbewerkt	6,1	onbewerkt	onbewerkt	onbewerkt
F: Freesdeel + Elektrolytisch Polijsten	3,1	1,3	onbewerkt	onbewerkt	onbewerkt

Uit de ruwheidsmetingen blijkt dat glijlijpen tot de grootste afname in ruwheid leidt. In de holle binnenzijde is de oppervlakteruwheid hoger dan het zijvlak van het product. Dit wordt veroorzaakt doordat het slijpmedium in de holle ruimte niet goed langs het product kan schuren. Dit wordt ook aangetoond door het verschil in ruwheid aan de holle en bolle zijde van het product. Doordat het slijpmedium sneller langs de bolle zijde stroomt dan langs de holle zijde neemt de ruwheid aan de bolle zijde sterker af.

Met (nat-)stralen kan in zeer korte tijd een gladder oppervlak worden behaald. De behaalde ruwheden van nat straalprocessen kunnen in dit geval niet met elkaar vergeleken worden doordat de bewerkingstijd van de verschillende processen niet gelijk is.

Elektrolytisch polijsten leidt alle gevallen tot een lichter en glanzend oppervlak. Bij bijna alle bewerkingen leidt elektrolytisch polijsten tot een afname in ruwheid van enkele micrometers.

De verschillende bewerkingen zorgen voor materiaalafname van het product. Deze geometrische afwijking is gemeten met optische meetapparatuur (DeMeet-404 Combo). Figuur 31 bevat de afmetingen van het product na bewerking.



Product	breedte (mm)
<i>CAD model</i>	20,00
<i>Geprint</i>	19,96
<i>Stralen</i>	19,84
<i>Glijslipen</i>	19,75
<i>Stralen + glijslipen</i>	19,74
<i>Stralen + kogelpolijsten</i>	19,84
<i>Stralen + glijslipen + kogelpolijsten</i>	19,72

Figuur 31 - Geometrische afwijking (breedte product)

5.4 - Conclusie

De oppervlaktekwaliteit kan het beste worden verbeterd door middel van glijslipen, eventueel in combinatie met stralen. Voor onderdelen die een hoge nauwkeurigheid vereisen heeft frezen de voorkeur, eventueel in combinatie met elektrolytisch polijsten. Voor toepassingen in de voedselindustrie kan oppervlaktekwaliteit het beste worden verbeterd door de combinatie stralen, glijslipen, kogelpolijsten en elektrolytisch polijsten omdat dit leidt tot een voldoende glad oppervlak met minimale putvorming. Bij deze bewerkingen moet rekening gehouden worden met een verlies in nauwkeurigheid. Indien de nauwkeurigheid van bepaalde productdelen van groot belang is, kan het best gekozen worden voor een combinatie met frezen of een andere verspanende bewerking (bijv. draaien, vonken). Om op deze cruciale delen de juiste geometrie en oppervlaktekwaliteit te bereiken is het raadzaam om een 'toegift' van ten minste 0,5 mm in het ontwerp toe te voegen. Deze toegift kan vervolgens met een verspanende bewerking worden weggenomen om het gewenste resultaat te bereiken. Hiermee kunnen de voordelen van SLM worden benut, terwijl de nauwkeurigheid van conventionele bewerkingen behaald kan worden. Om de hoeveelheid conventionele bewerkingen zo veel mogelijk te beperken, moet bij de inzet van AM moet goed gekeken worden waar de oppervlakteruwheid daadwerkelijk van belang is. Meestal kunnen de producten hun functie vervullen met een onbewerkt (ruw) oppervlak en is een glanzend oppervlak (zoals men gewend is van conventionele bewerkingsmethoden) niet nodig.

6 - Ontwerprichtlijnen

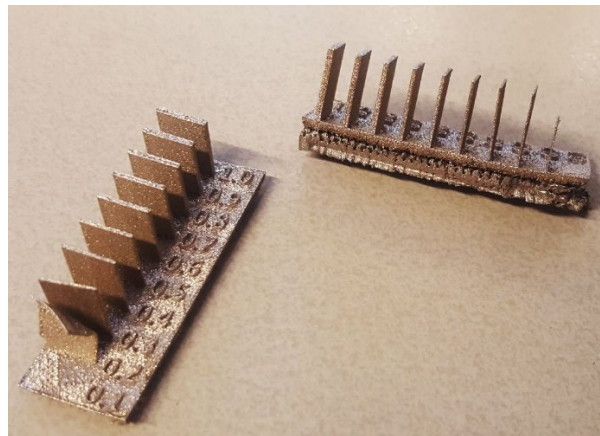
Bij het gebruik van SLM techniek dient, wellicht nog meer dan bij conventionele productietechnieken, rekening te worden gehouden met de (on)mogelijkheden in het fabricageproces. Hierbij kan gedacht worden aan zaken als maatnauwkeurigheid en wanddikten, maar ook aan het gebruik van supports en de oriëntatie van het onderdeel. Niet iedere ontwerpregel wordt in dit hoofdstuk aangestipt, veel ontwerprichtlijnen zijn vrij beschikbaar via 3D Hubs, Materialise en websites van verscheidene fabrikanten en service providers.

6.1 - Algemene ontwerprichtlijnen

SLM brengt een aantal voorwaarden met zich mee waaraan een ontwerp dient te voldoen. De meeste van deze ontwerpregels komen voort uit de aard van het proces (de laagsgewijze opbouw vanuit een poeder) en de nauwkeurigheid hiervan (bijvoorbeeld: de diameter van de laserstraal, de grootte van poederdeeltjes, de uitstraling van proceswarmte).

Wanddikte

De diameter van de *laser spot* op het poederbed is +/- 0,14mm. Delen van het product die smaller zijn zullen door de *slicer* genegeerd worden en worden niet geprint. In feite is de diameter van de *laser spot* dan ook de minimale wanddikte die geprint kan worden, maar delen van een product met een dergelijke dikte zullen erg fragiel zijn. Hierdoor is de kans groot dat het onderdeel breekt tijdens het uitpakken van de printjob of tijdens de nabewerking van het onderdeel. Om er zeker van te zijn dat een wand goed geprint wordt is een **minimale wanddikte van 0,5 millimeter** aanbevolen.



Figuur 32 - Wanddikten van 0,1mm tot 1,0mm. 0,2mm is de dunste wand die geprint wordt, maar deze is erg fragiel.

Ook kunnen dunne wanden, als de hoogte toeneemt, instabiel worden tijdens het printproces. Dit kan tot gevolg hebben dat de opeenvolgende lagen die geprint worden niet (volledig) aan elkaar verbonden worden, wat leidt tot een lagere maatnauwkeurigheid en lagere mechanische belastbaarheid van het product. Om onnauwkeurigheden te voorkomen en de stevigheid van dunne wanden te vergroten is het raadzaam om verstevigende ribben aan te brengen in het ontwerp.

De techniek kent in principe **geen maximale wanddikte** die de ontwerpvrijheid beperkt. Houd er wel rekening mee dat de interne spanningen in het product aanzienlijk zullen toenemen indien wordt gekozen voor dikke, massieve wanden met een groot oppervlak. In sommige gevallen kan dit leiden tot kromtrekken of scheuren/barsten in het onderdeel. Ook kostentechnisch gezien is het aan te raden om dergelijke delen waar mogelijk (deels) op conventionele wijze te produceren.

Holle producten

In sommige gevallen moet een product een bepaalde vorm hebben, terwijl de mechanische sterkte van ondergeschikt belang is. Om kosten te besparen (materiaal, printtijd) is het in zulke gevallen mogelijk om het ontwerp hol te maken. Hierbij dienen natuurlijk wel de richtlijnen voor het gebruik van support en oriëntatie in acht te worden genomen.

Om het ongesmolten poeder binnen de wanden van het product te kunnen verwijderen, dienen één of meerdere gaten (5mm of groter) in het ontwerp te worden aangebracht. Het aanbrengen van grotere en/of meerdere gaten zal het verwijderen van het poeder verder vergemakkelijken.

Omdat het dankzij deze randvoorwaarden vaak niet haalbaar is om de gewenste vorm van het product te behouden, wordt het uithollen van producten bij SLM in de praktijk slechts zelden toegepast.

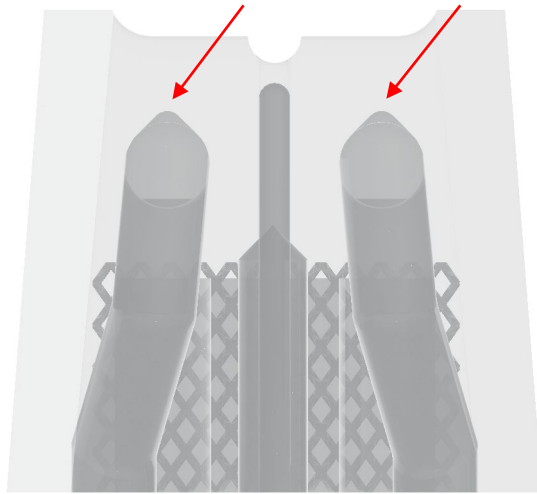
6.2 - De invloed van het ontwerp op support

Hoewel supports onmisbaar zijn voor het proces, heeft het ook grote voordelen om de hoeveelheid supports aan een onderdeel zo veel mogelijk te beperken. Het verwijderen van het supportmateriaal kan namelijk een tijdrovende en dus kostbare stap zijn in het proces. Bovendien laat supportmateriaal "littekens" achter op het product, welke resulteren in een hogere oppervlakteruwheid en een minder fraai uiterlijk. Uiteraard kan dit in de meeste gevallen worden verholpen met conventionele bewerkingstechnieken, maar ook hier geldt dat dit de nodige kosten met zich meebrengt. Een andere eigenschap van supports is dat ze het verwijderen van overtollig metaalpoeder (wat niet wordt gesmolten, maar wel in de procesruimte wordt gedeponeerd) bemoeilijken.

Randen

Het kan voorkomen dat producten een horizontaal uitstekende rand hebben. Met het oog op oriëntatie zal dit echter niet vaak het geval zijn. Mocht het toch voorkomen dat een product een horizontaal uitstekende rand heeft, dan kunnen **overhangende randen tot 0,5mm zonder support** geprint worden, zonder dat het risico op falen van de print groter wordt. De oppervlaktekwaliteit van het niet-ondersteunde vlak zal wel aanzienlijk lager zijn dan wanneer support wordt toegepast. Pas bij een rand van 0,2mm of kleiner is een vermindering in oppervlaktekwaliteit niet meer merkbaar. Een alternatief voor het gebruik van support is het, waar mogelijk, toepassen van een schuine afkanting in het ontwerp toe te passen, waardoor een minimale hoek van 45 graden ten opzichte van de bouwplaat wordt behouden.





Figuur 33 - Druppelvorm toegepast in een koelkanaal ter verbetering van de oppervlaktekwaliteit

Gaten

Gaten in het horizontale vlak kleiner dan 8mm kunnen zonder support geprint worden. Wel is nabewerking vaak nodig, omdat de bovenkant van verticaal geprinte gaten de neiging hebben om in te zakken. Indien deze nabewerkings-stap niet wenselijk of niet mogelijk is vanwege de complexe geometrie, kan ervoor gekozen worden om de gaten druppelvormig te maken (Figuur 33).

Het is dus van belang dat het gebruik van supports geminimaliseerd wordt (de drie functies van de support altijd in acht nemende) en dat het verwijderen van de supports op eenvoudige wijze kan worden uitgevoerd. ***Het is dus noodzakelijk om hier tijdens het ontwerpproces al rekening mee te houden!***

6.3 - Oriëntatie

Naast het gebruik van supports is ook het kiezen van de juiste oriëntatie van het onderdeel ten opzichte van het bouwplatform essentieel voor het succesvol en efficiënt produceren van hoogwaardige onderdelen. Bij het oriënteren van het onderdeel zal men rekening moeten houden met een aantal factoren:

De opbouw van interne spanningen

Tijdens het slicen wordt het 3D-model opgedeeld in dunne 'plakjes', waaruit het te printen onderdeel wordt opgebouwd. Hierbij geldt: hoe kleiner het oppervlak van zo'n 'plakje' of 'slice', hoe kleiner de opbouw van interne spanningen zal zijn. Zo is het bij langwerpige, massieve wanden raadzaam om deze onder een hoek van 10 graden (of meer) ten opzichte van het horizontale vlak in de machine te positioneren.

Het afvoeren van warmte

Gelijk aan de wijze waarop het supportmateriaal voldoende in staat moet zijn om de warmte af te voeren, dient de proceswarmte ook door het onderdeel zelf te worden afgevoerd richting de supports. Onderdelen worden daarom bij voorkeur zodanig gepositioneerd dat de delen met de grootste materiaaldichtheid (de dikkere, massieve delen) zich zo dicht mogelijk bij de supports en/of het bouwplatform bevinden.

Supportmateriaal en het verwijderen daarvan

De oriëntatie van een onderdeel bepaalt in grote mate de hoeveelheid support die nodig is om het onderdeel te ondersteunen. Indien de oriëntatie zodanig gekozen wordt dat er slechts een minimale hoeveelheid supportmateriaal nodig is, dan moet meegewogen worden dat alle proceswarmte door een (zeer) kleine hoeveelheid supportmateriaal moet

worden afgevoerd. Het is in zo'n geval raadzaam om te kiezen voor een massieve supportstructuur die is opgenomen in het ontwerp.

De oriëntatie van een onderdeel bepaalt niet alleen de hoeveelheid support, maar ook waar op het onderdeel de supports aangehecht zullen zijn. Dit is relevant voor het gereedschap dat gebruikt zal worden voor de nabewerking voor het verwijderen van de supports.

Stabiliteit van het onderdeel tijdens het proces

Indien slanke, langwerpige onderdelen geprint worden is het belangrijk om deze tijdens het printproces geometrisch stabiel te houden. Indien dit niet het geval is kan het onderdeel als gevolg van de optredende interne spanningen deformeren tijdens het bouwproces. In sommige gevallen is het dan ook raadzaam om de oriëntatie zo te kiezen dat het onderdeel op meerdere plaatsen ondersteund wordt door supportstructuren. Een bijkomend voordeel van een dergelijke oriëntatie is vaak dat de warmte via meerdere wegen, en dus effectiever, kan worden afgevoerd. In sommige gevallen is het praktischer om langwerpige delen fysiek te verbinden aan andere onderdelen, die in het zelfde bouwproces geproduceerd worden, om ze geometrisch stabiel te houden. Met name als het gaat om seriematige productie van eenzelfde onderdeel is dit een methode die effectief kan worden toegepast.

Printtijd

Het gebruik (afschrijving) van de machine bepaalt voor een groot deel de kosten van een onderdeel dat gemaakt wordt middels SLM. Eén van de sub-processen die een aanzienlijk deel van de totale printtijd in beslag neemt is het neerleggen van de poederlagen. Indien de machine een aanzienlijk aantal poederlagen moet deponeren voor slechts één onderdeel, zullen de kosten van het gehele bouwproces hierdoor aanzienlijk toenemen. Indien het bouwvolume niet ten volle wordt benut is het kostentechnisch gezien vaak beter om onderdelen zodanig te oriënteren dat het aantal lagen dat geprint wordt zo veel mogelijk te beperken.

Oppervlakteruwheid

De oriëntatie van een onderdeel op het bouwplatform kan van grote invloed zijn op de oppervlaktekwaliteit. Overhangende vlakken ("downskin") waar supports geplaatst zijn hebben een hogere ruwheid, maar ook overhangende vlakken zonder support zijn ruwer dan verticaal geprinte wanden. Aan de bovenzijde van een product ("upskin") kan ook een grotere ruwheid ontstaan door het zogeheten "staircase effect", dat wordt veroorzaakt door de laagsgewijze opbouw van het product. Dit effect is het sterkst wanneer het product een kleine hoek maakt ten opzichte van het horizontale vlak.

De oriëntatie van een onderdeel dat gemaakt wordt in het SLM-proces heeft dus invloed op verschillende aspecten. Hierbij moet vaak een compromis worden gekozen tussen de aspecten die hierboven genoemd worden. Ook hiervoor geldt dus dat ***al tijdens het ontwerpen van een onderdeel moet worden nagedacht over de oriëntatie waarin het onderdeel geprint zal worden.***

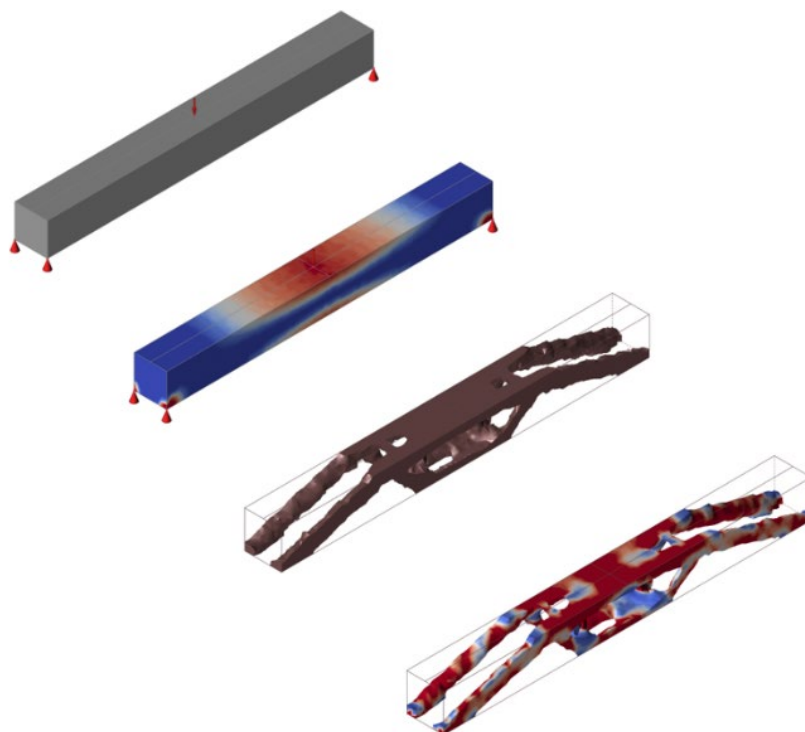


7 – Topologie-optimalisatie

Een van de mogelijkheden die 3D printen biedt en cruciaal is voor het succesvol inzetten van de technologie, is topologie-optimalisatie (TO). Het doel van TO is de prestatie van het te ontwerpen systeem te maximaliseren, gegeven een aantal (mechanische en/of andersoortige) belastingen en restricties [13]. TO wordt dan ook vooral gebruikt in toepassingen waar gewichtsbesparing van groot belang is, bijvoorbeeld in de lucht- en ruimtevaartindustrie, motorsport of robotisering.

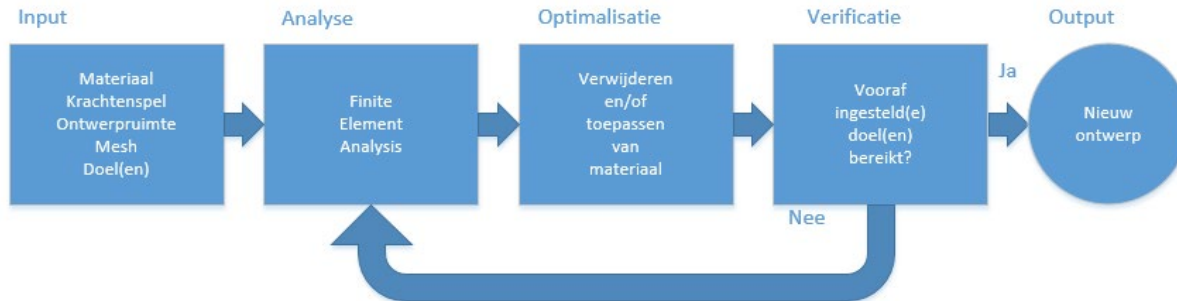
TO is een wiskundige methode die de materiaalverdeling binnen een vooraf bepaalde *design space* (ontwerpruimte) optimaliseert aan de hand van (door de ontwerper opgelegde) doelstelling(en). Deze doelstellingen zijn bijvoorbeeld: maximale stijfheid, massareductie van ...%, hoogste veiligheidsfactor of de grootste gewichtsbesparing. Topologie optimalisatie wordt meestal uitgevoerd met behulp van simulatie-software en/of CAD-programma's. Voorheen was TO software vaak een ("third party") add-on van softwarepakketten, tegenwoordig is het in de meeste grote CAD pakketten geïntegreerd.

De mogelijkheden van TO staan hieronder geïllustreerd aan de hand van een eenvoudig voorbeeld. In Figuur 34 is een topologie-optimalisatie weergegeven van een balk die op vier punten is opgelegd en waar op de bovenkant, in het midden een kracht is aangebracht. Vervolgens is in verschillende iteraties materiaal weggehaald zodat met minimaal materiaalgebruik aan de sterkte en stijfheidseis moet worden voldaan. Dit hoofdstuk gaat specifiek over topologieoptimalisatie en de achterliggende theorie ervan.



Figuur 34 - Topologie-optimalisatie minimaliseert het gebruik van materiaal en zorgt voor een goede verdeling van spanningen

Door op een ontwerpruimte randvoorwaarden aan te brengen, kan de software met behulp van algoritmen een optimaal ontwerp vinden. De software zal meerdere iteraties en simulaties uitvoeren om tot het uiteindelijke ontwerp te komen, welke aan de gestelde randvoorwaarden voldoet (Figuur 35).

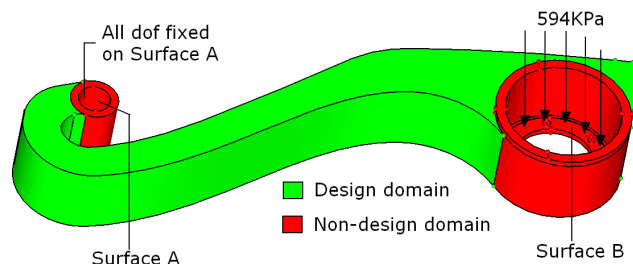


Figuur 35 - Flowchart voor topologie-optimalisatie

Afhankelijk van de opgelegde randvoorwaarden is de resulterende geometrie meestal sterk organisch van vorm. In een handmatig proces wordt het geoptimaliseerde ontwerp vaak nog bijgeschaafd om het ontwerp geschikt te maken voor 3D printen of voor andere productiemethoden. Door de vormvrijheid die 3D printen biedt, kan het geoptimaliseerde object nog sterk organisch van vorm blijven. Met de doorontwikkeling van software voor TO kan dit handmatige proces in de toekomst wellicht overbodig worden en kunnen objecten vrijwel meteen na het optimaliseren worden geprint.

7.1 - Verschillende algoritmen voor topologie-optimalisatie

Er zijn verschillende algoritmen ontwikkeld voor het TO-proces. In deze paragraaf worden de belangrijkste algoritmen besproken. Aan de hand van een praktijkvoorbeeld [14, 15] worden de verschillen tussen de verscheidene algoritmes inzichtelijk gemaakt. De randvoorwaarden die gesteld zijn in dit voorbeeld zijn weergegeven in Figuur 36. In de komende subparagrafen worden algoritmen beschreven die in de verschillende softwarepakketten worden toegepast. Als gebruiker dient men zich te realiseren dat de uitkomst van de TO bepaald wordt door het gebruikte algoritme.



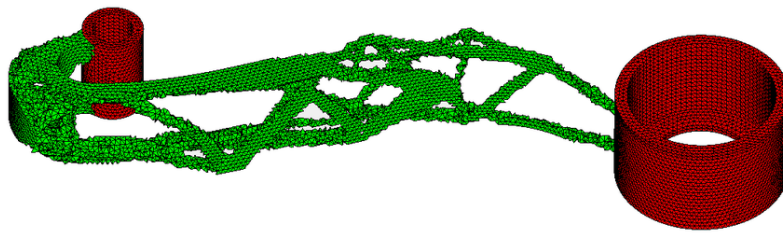
Figuur 36 - Gestelde randvoorwaarden voor topologie-optimalisatie. Op oppervlak a zijn alle Degrees of Freedom (DOF's) gefixeerd. Er geldt een kracht van 594KPa op de flens van oppervlakte b. [15]

7.1.1 – Density-based algoritme

Het bekendste density based algoritme is Solid Isotropic Microstructure with Penalization (SIMP) [15]. SIMP is het meest bestudeerde en gebruikte algoritme in de huidige commercieel beschikbare software. Het is wiskundig welomschreven en is sinds de uitvinding in de jaren tachtig constant doorontwikkeld en verbeterd. De werkwijze van het algoritme baseert zich op de dichtheid van het materiaal.

De vastgestelde ontwerpruimte van het product is opgedeeld in losse elementen; een *mesh*. Het algoritme zoekt naar de optimale verdeling van de materiaaldichtheid waarbij de uiteindelijke spanningsenergie geminimaliseerd is voor een vooraf ingesteld doelvolumen. Een nadeel van het SIMP-algoritme is dat het vaak materiaal genereert dat eigenlijk niet nodig is. Dit ontstaat door het genereren van materiaal in gebieden waarin de spanningsenergie weliswaar laag is, maar niet zodanig laag dat er in dat gebied geen materiaal nodig is voor het waarborgen van de gestelde eisen.

In Figuur 37 is een resultaat van een topologie-optimalisatie volgens het SIMP-algoritme weergegeven. Door het bepalen van de benodigde materiaal dichtheid kan een redelijk 'glad' product verkregen worden.



Figuur 37 - Resultaat van topologie-optimalisatie volgens het SIMP algoritme [15]

7.1.2. - Hard-kill algoritme

De methodes uit de *hard-kill* familie zijn vergelijkbaar aan de SIMP-methode als het om de vastgestelde ontwerpruimte gaat. Waar de methode in verschilt is dat elk element in de ontwerpruimte een dichtheid heeft van 0 of 1 (zogeneten Hard-kill methode). Hierbij is 0 een 'gat' en 1 het materiaal.

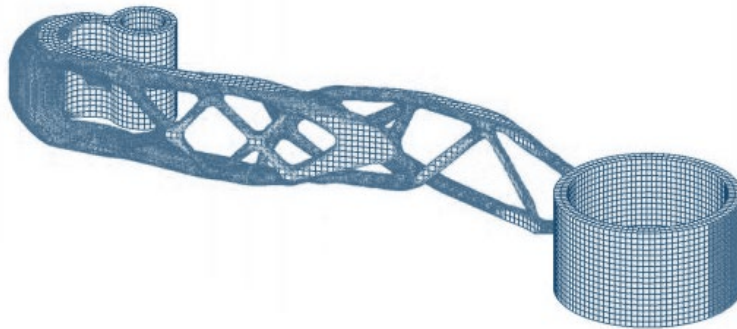
Een bekend hard-kill algoritme is *Bi-directional Evolutionary Shape Optimization* (BESO) [15]. De beginsituatie is een ontwerpruimte vol materiaal waarbij het algoritme mesh-elementen elimineert waar deze niet nodig zijn en plekken aanvult met elementen waar deze juist wel benodigd zijn. Hierdoor worden eventuele spanningsconcentraties voorkomen. Een nadeel van het BESO-algoritme is dat het afhankelijk van de meshgrootte een verkeerde indruk kan geven van het geoptimaliseerde object. In Figuur 38 is het object te zien dat middels het BESO-algoritme is geoptimaliseerd. Wat opvalt is de ruwe structuur van het object, veroorzaakt door de hard-kill achtergrond van het algoritme.



Figuur 38 - Resultaat van topologie-optimalisatie volgens het BESO algoritme [14]

7.1.3 - Boundary variation algoritme

De *boundary variation* algoritmen gaan anders te werk dan SIMP en BESO. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de Level-set [16] methode en de Phase-field [17] methode. Beide methoden produceren geoptimaliseerde objecten welke een zeer gladde afwerking hebben en daardoor geen nabehandelingen door middel van extra algoritmen, filterstappen of handmatig herontwerp behoeven.



Figuur 39 - Resultaat van topologie-optimalisatie volgens het level-set algoritme [14]

In Figuur 39 is een object te zien welke middels een level-set algoritme is geoptimaliseerd. Wat opmerkelijk is, is dat het een heel glad en nagenoeg perfecte oppervlaktekwaliteit heeft. Het algoritme volgt de exacte lijnen van de interne spanningen en is niet afhankelijk van de mesh om hier een vorm uit te genereren.

7.1.4. – Truss Topology Optimization algoritme

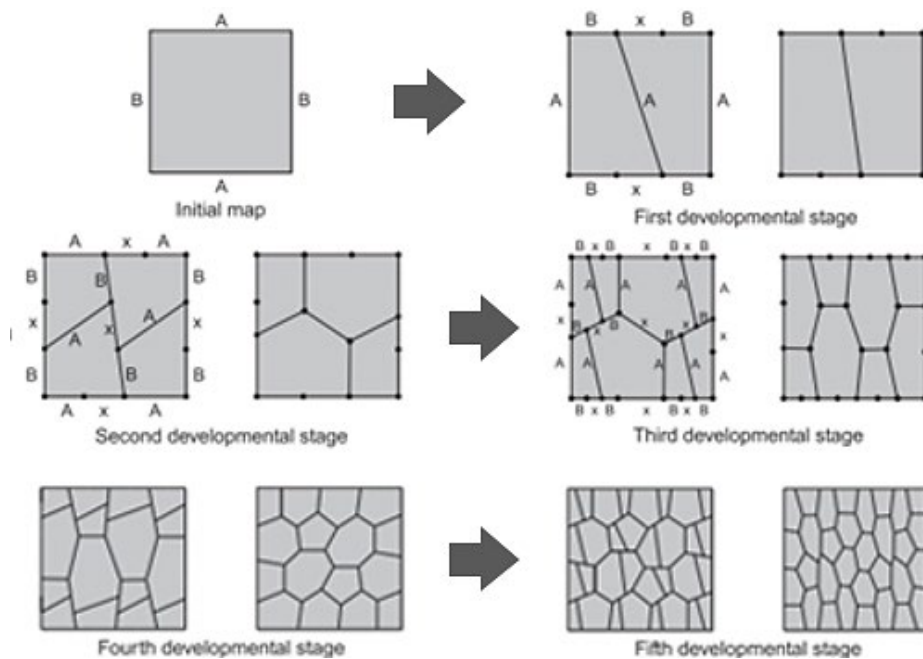
Truss topology optimization (TTO) vult de ontwerpruimte met een groot aantal knooppunten waartussen het algoritme cilindrische druk- en trekstaven kan plaatsen [18]. Door vastgelegde knooppunten zal het algoritme de meest ideale positie van deze staafelementen bepalen. Wanneer de druk- en trekstaven geplaatst zijn zal het algoritme de dikte van deze druk en trekstaven gaan optimaliseren, afhankelijk van de lokale belastingen. Vervolgens wordt de locatie van de knooppunten verder geoptimaliseerd, zodat de spanningen optimaal worden verdeeld over de verschillende elementen. In Figuur 40 wordt een voorbeeld van TTO weergegeven. Het verschil tussen het oorspronkelijke ontwerp en het nieuwe ontwerp is duidelijk te zien. Door gebruik te maken van dit type optimalisatie kunnen de grootste gewichtsbesparingen worden behaald.



Figuur 40 – Origineel ontwerp (links) en het Resultaat van topologie-optimalisatie volgens het TTO-algoritme (rechts)
(Bron: <http://www.metal-am.com>)

7.1.5. - Biologically inspired method

Dit type algoritme is gebaseerd op het natuurlijke proces van celdeling, bijvoorbeeld de nerven in een blad of de vleugels van een insect [19]. Zoals in figuur te zien is begint het algoritme met een bepaalde ontwerpruimte, waarbinnen het algoritme celdeling zal gaan toepassen. Het eerste wat bij elke stap gebeurt is de celdeling zelf, het tweede is het configureren van de optimale positie van de celdeling. Op deze manier werkt het algoritme door totdat het door de ontwerper gestelde doel bereikt is.



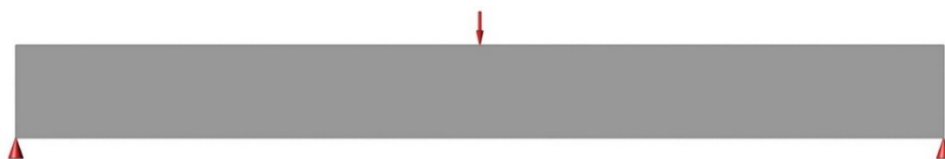
Figuur 41: Werkwijze biologically inspired algoritme [19]

7.2 – Verschillen in software

Om een indruk te krijgen van de middelen die vrij beschikbaar zijn (academische licentie of proeflicentie), is een drietal softwarepakketten vergeleken:

- SolidThinking Inspire 2017 Student Edition (Altair Engineering)
- Inventor 2017 Student Edition (Autodesk)
- TruForm for SolidWorks Xpress v3.0 (GRM Consulting)

Voor deze vergelijking is uitgegaan van een balkvormig onderdeel van RVS 316 met een afmeting van 10 x 10 x 100 mm. De uiteinden hebben een scharnierende oplegging en in het midden is een kracht van 150N aangebracht (Figuur 42). De doelstelling van de optimalisatie is een massareductie van 60%. De meshgrootte is ingesteld op 1mm en het gehele object geldt als *design space*.



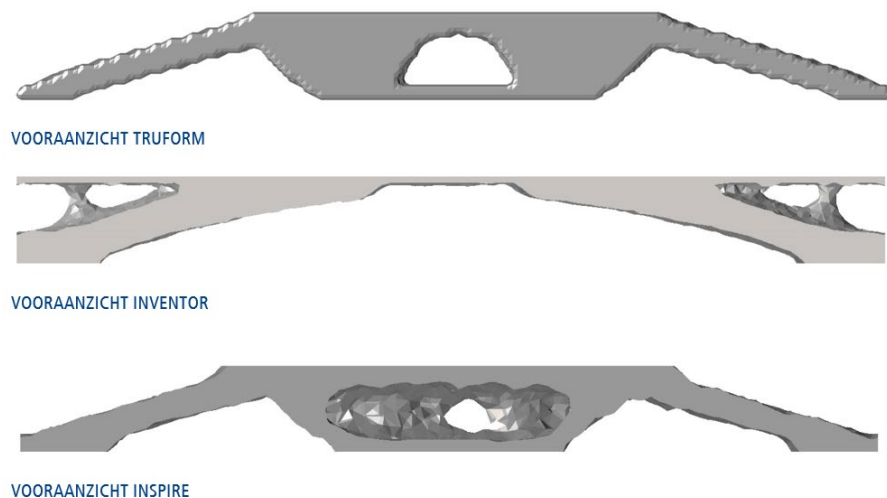
Figuur 42 - Het krachtspel: de uiteinden hebben een scharnierende oplegging en in het midden wordt een kracht van 150N aangebracht



Figuur 43 - Isometrisch aanzicht van de geoptimaliseerde modellen

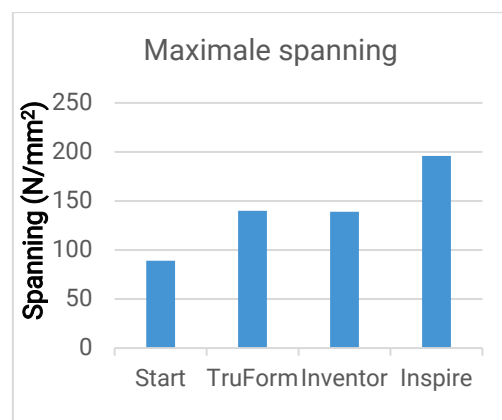
De uitkomsten van de verschillende optimalisatieprocessen zijn in een aantal aspecten verschillend (Figuur 43 en Figuur 44). De resultaten die behaald zijn met Truform en Inspire lijken in grote lijnen het meest op elkaar. Inventor komt tot een compleet afwijkend resultaat, wat een duidelijke aanwijzing is dat deze software gebruik maakt van een ander algoritme.

Truform levert het meest verfijnde model (mesh) op dat tevens de grootste mate van symmetrie bevat. TruForm nam daarbij met 14 minuten de meeste tijd in beslag voor de optimalisatie. Inspire was met 1 minuut het snelst, gevolgd door Inventor met 8 minuten.

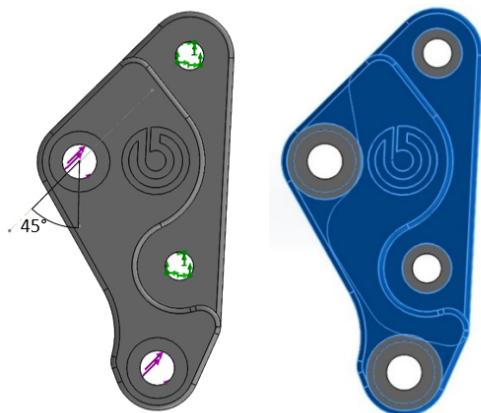


Figuur 44 - Vooraanzicht van de geoptimaliseerde modellen

Door de geoptimaliseerde modellen opnieuw te toetsen middels een FEM-analyse kan geconcludeerd worden dat het resultaat van Inspire de grootste maximale spanning bevat (Figuur 45). Vermoedelijk is dit grotendeels te wijten aan de grove structuur van de mesh. De scherpe hoeken die hierdoor ontstaan zorgen voor spanningsconcentraties. Deze spanningsconcentraties blijven desalniettemin onder de opgegeven vloeigrens van 205 N/mm². Het model dat gegenereerd is door Inventor vertoont met 0,065mm de grootste doorbuiging, waar de resultaten van TruForm en Inspire respectievelijk 0,016mm en 0,015mm doorbuigen.



Figuur 45 - Maximale spanning in het onderdeel na topologie-optimalisatie



Figuur 46 - Remklauwadapter met het krachterspel (links) en de design space (blauw, rechts)

Als tweede voorbeeld is TO in een concreet praktijkvoorbeeld toegepast, namelijk voor een remklauw-adapter voor een motorfiets (Figuur 46).

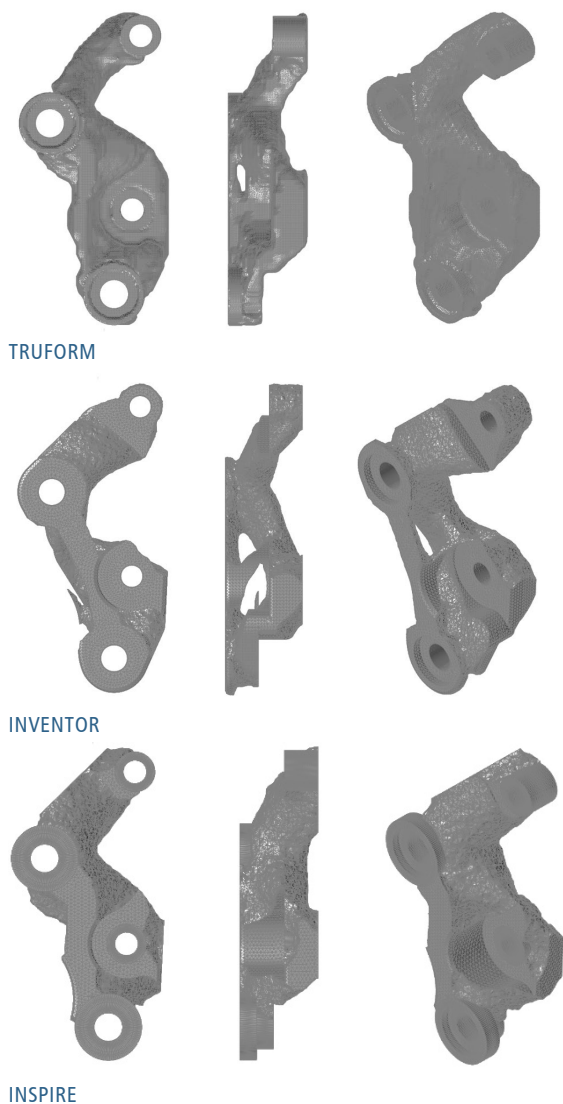
Voor deze vergelijking zijn de twee rechter gaten gefixeerd en wordt op de andere twee boutverbindingen een kracht uitgeoefend die het remmen simuleert. Rondom de vier boutverbindingen is een ruimte aangegeven die behouden moet worden tijdens de optimalisatie. De doelstelling van 60% massareductie en meshgrootte van 1mm gelden ook voor dit object.

De remklauwadaptors van Inventor en TruForm bevatten een of meerdere holtes in het midden van het object (te zien in het zijaanzicht, Figuur 47). Opvallend is opnieuw de gladde afwerking van het model dat door TruForm gegenereerd is, de overige twee hebben een vrij ruwe afwerking met daarin scherpe hoeken.

Het resultaat dat gegenereerd is met Inventor valt op door het feit dat deze een uitstekend deel heeft, dat verder geen functie heeft. Dit is kenmerkend voor het SIMP-algoritme, dergelijke uitstulpingen kunnen in een volgende iteratie van het ontwerp worden verwijderd.

Qua spanningsverdeling leveren TruForm en Inventor een vergelijkbaar resultaat (respectievelijk 140 MPa en 139 MPa). Inspire vertoont de grootste spanningsconcentraties met een maximum van 196 MPa. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door scherpe hoeken in de mesh.

Daarnaast neemt Inventor in dit geval met 25 minuten de meeste tijd in beslag voor de optimalisatie, gevolgd door TruForm met 18 minuten. Inspire is wederom het snelst met een rekentijd van 10 minuten.



Figuur 47 - Geoptimaliseerde remklauw als resultaat van TruForm, Inventor en Inspire

7.3 – Conclusie

Met behulp van topologie-optimalisatie kunnen de mogelijkheden van SLM (en andere 3D-printtechnieken) optimaal benut worden, doordat het leidt tot producten met optimale prestaties met geminimaliseerd materiaalverbruik. Door deze optimalisatietechnieken goed in te zetten wordt de vormvrijheid van SLM benut tegen een zo laag mogelijke kostprijs per onderdeel.

Software voor topologie-optimalisatie is steeds beter verkrijgbaar en is duidelijk nog volop in ontwikkeling. Desalniettemin kunnen verscheidene softwarepakketten al nuttig worden ingezet voor het optimaliseren van productontwerpen. Na het numeriek optimaliseren van een ontwerp is in de meeste gevallen nog een handmatige iteratie nodig om te zorgen dat de oppervlakken vloeiend zijn en geen risico vormen voor spanningsconcentraties, scheurvorming, ophoping van vuil en andere gevolgen die een onregelmatig oppervlak met zich mee kan brengen.



8 - Case Studies

Naast de experimenten en testprints voor het opdoen van de eerste basiskennis, is veel van de beschreven kennis in voorgaande hoofdstukken opgedaan aan de hand van praktijkcases. In samenwerking met de projectpartners zijn specifieke producten geselecteerd om de verschillende aspecten doelgericht te onderzoeken. Dit hoofdstuk biedt een overzicht van de meest relevante cases. In Tabel 5 is een overzicht opgenomen van de cases en hun leerresultaten.

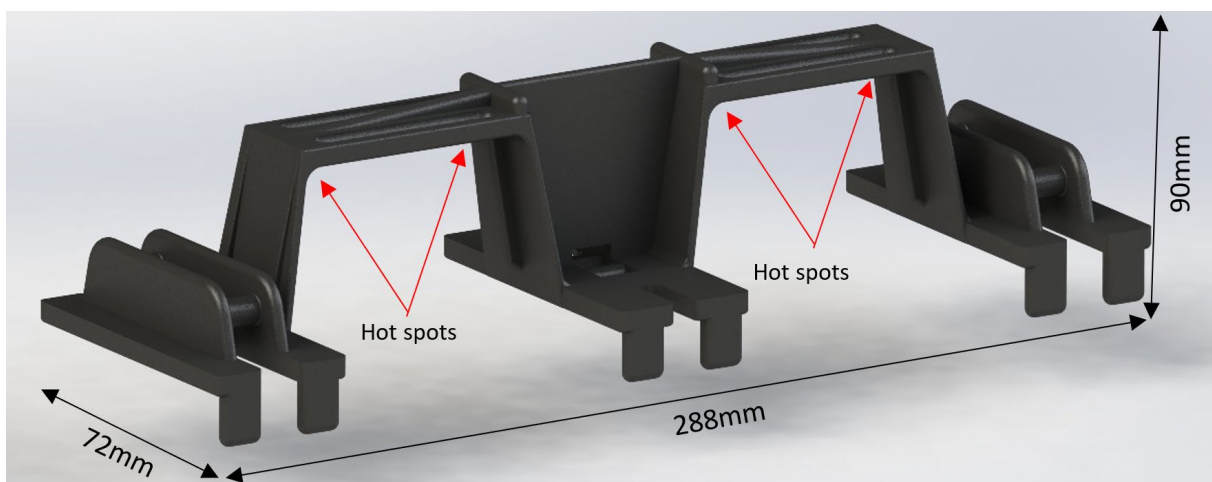
Tabel 5 - Overzicht case studies

Case	Categorie/voordeel	Leerresultaat
Matrijsinsert met Conformal Cooling	Gereedschapmakerij, vormvrijheid	SLM kan goed worden ingezet voor het produceren van spuitgietmatrijzen of delen daarvan. Intensieve nabewerking is noodzakelijk, maar Conformal Cooling biedt grote voordelen in het gebruik van geoptimaliseerde matrijskoeling.
Inlaatspruitstukken Mini Cooper	Reserve-onderdelen, kleine productieseries	SLM kan een goede oplossing zijn wanneer originele reserve-onderdelen slecht verkrijgbaar zijn.
Pompwaaier	Reserve-onderdelen, kleine productieseries	SLM kan een goed alternatief zijn voor het gietproces, waarbij men gebonden is aan het maken van een mal en dus inherent aan grotere productie-series en –voorraden
Gepersonaliseerde mondstukken voor blaasinstrumenten	Hoogwaardig maatwerk	Het toepassen van SLM leidt tot hoogwaardige mondstukken, maar de kosten van het printen en nabewerking zijn in dit geval te hoog bevonden voor de doelgroep.
Warmtewisselaar	Voordeel door vormvrijheid	SLM is in staat om dunwandige producten te produceren, met de kanttekening dat delen waar verschillende wanden bij elkaar komen eerder de neiging hebben om poreus te zijn. Geprint RVS 316L heeft daarnaast geen ideale thermische eigenschappen voor een warmtewisselaar, maar wellicht dat andere materialen de functie beter vervullen.
Verstelbare propellerschoep	Voordeel door vormvrijheid, korte doorlooptijd	Door de vormvrijheid die SLM biedt kunnen complexe geometrieën snel gerealiseerd worden. Door de korte doorlooptijd kunnen aanpassingen snel worden doorgevoerd.
Hijsgereedschap	Voordeel door vormvrijheid, topologie-optimalisatie	SLM maakt het mogelijk om de complexe vormen die voortkomen uit topologie-optimalisatie te produceren. Dit resulteert in lichtgewicht onderdelen die in dit geval de arbeidsomstandigheden van de medewerkers kan verbeteren.
Magnetisch slot	Korte doorlooptijd	Bij het ontwikkelen van een nieuw slotmechanisme is SLM toegepast voor prototyping om op korte termijn allerlei testen uit te kunnen voeren en het ontwerp te verbeteren.
Kniescharnier onderbeenprothese	Vormvrijheid, gewichtsbesparing, minder assemblage	Door een ruimte van ten minste 0,2mm tussen scharnierende delen open te laten, kunnen scharnierende mechanismen in één keer worden geprint, zonder dat assemblage nodig is. Door het scharnier slim te ontwerpen wordt supportmateriaal tussen de bewegende delen vermeden.
Uitlaatsierstuk	Visuele kwaliteit van onderdelen	Uitlaatsierstukken kunnen worden geproduceerd middels SLM, maar om tot een glanzend product te komen is intensieve nabewerking nodig.
Frame en scharnier	Gewichtsbesparing, voordeel door vormvrijheid, topologie-optimalisatie	Door de vormvrijheid die SLM biedt kunnen complexe geometrieën relatief eenvoudig worden geproduceerd. In dit geval resulteerde dit in een gewichtsbesparing en een verbetering van de functie van het onderdeel.
Mixer	Kostenbesparing door reductie van het aantal productieprocessen	Door een mixer, normaliter geproduceerd door een combinatie van lasersnijden, zetten, lassen en draaien, opnieuw te ontwerpen voor SLM kan dit onderdeel nu goedkoper geproduceerd worden. Ook is het onderdeel dankzij het nieuwe ontwerp beter te reinigen, wat noodzakelijk is voor deze toepassing in de voedingsmiddelenindustrie.

8.1 - Matrijsinsert met Conformal Cooling – MOBA b.v.

Een van de meest bekende toepassingen voor SLM is het maken van spuitgietmatrijzen (of delen daarvan) met complexe koelkanalen. Waar deze koelkanalen normaliter worden geboord (cilindervormig), biedt SLM de vrijheid om de koelkanalen zodanig te ontwerpen dat ze de contouren van het spuitgietproduct nauwkeurig volgen. Dit principe wordt ook wel *Conformal Cooling* genoemd.

In samenwerking met MOBA b.v., wereldmarktleider op het gebied van sorteer- en verpakkingsmachines voor eieren, is een project opgezet om te verkennen wat de mogelijkheden en effecten van Conformal Cooling inhouden. MOBA b.v. beschikt over alle faciliteiten die nodig zijn voor het bouwen van spuitgietmatrijzen en heeft daarnaast een groot aantal spuitgietmachines. Mede hierdoor werd het gehele traject (van herontwerp tot spuitgietproduct) inzichtelijk.

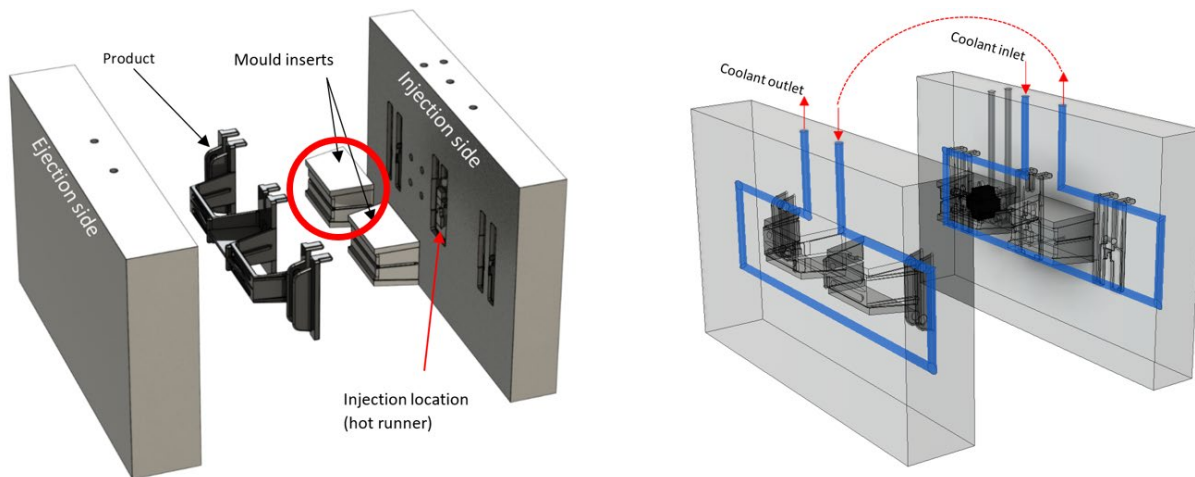


Figuur 48 - MOBA Chain Bridge, product met hot spots

In Figuur 48 is het spuitgietproduct weergegeven waarvoor de matrijskoeling geoptimaliseerd is. Van oudsher was van dit product bekend dat de koelkanalen niet optimaal waren vormgegeven, met zogeheten *hot spots* als gevolg. Door deze vorm van ongelijkmatig afkoelen wijkt de maatvoering van het spuitgietproduct af van het ontwerp.

Herontwerp van de matrijsinsert

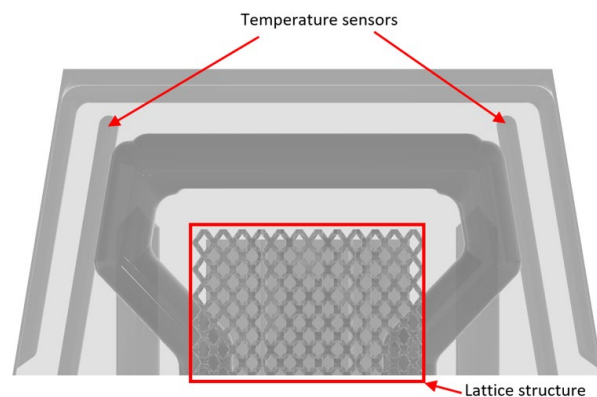
Omdat het productdeel ter plaatse van de hot spots wordt gevormd door een *matrijsinsert* (Figuur 49), kan de koeling worden geoptimaliseerd door slechts dit inzetstuk te voorzien van koelkanalen. Hieruit blijkt ook meteen dat het vaak niet noodzakelijk is om de gehele spuitgietmatrijs te 3D-printen, wat in dit geval zou resulteren in onnodig hoge kosten.



Figuur 49 - Opbouw van de matrijs (links) en koelkanalen (rechts) in de originele situatie. De in rood omcirkelde matrijsinsert wordt in dit onderzoek voorzien van Conformal Cooling

Voor het herontwerp worden niet alleen geïntegreerde supports (Figuur 16) en druppelvormige koelkanalen (Figuur 33) toegepast, ook wordt gebruik gemaakt van een lattice structuur om materiaal en gewicht te besparen. Daarnaast zijn 2 extra holtes aangebracht om ruimte te maken voor temperatuursensoren, welke worden uitgelezen tijdens het spuitgieten (Figuur 50).

De koelkanalen hebben een diameter van $D = 8\text{mm}$, gelijk aan de diameter van de originele koelkanalen. Om de mechanische integriteit van de insert te behouden is de afstand van het hart van het koelkanaal tot de vormholte gekozen op 12mm ($1,5 \times D$).

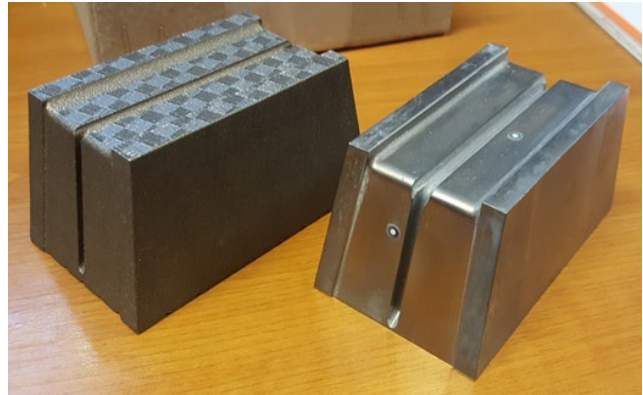


Figuur 50 - Het herontwerp van de insert biedt ruimte voor 2 temperatuursensoren en bevat daarnaast een lattice structuur

Een spuitgietmatrijs vereist in de meeste gevallen een glad (gepolijst) oppervlak om tot een fraai uitziend spuitgietproduct te komen. Omdat SLM resulteert in oppervlakten met een relatief hoge oppervlakteruwheid, is op alle buitenste contouren een toegift van 1mm gezet. Hierdoor wordt ruimte gecreëerd voor nabewerking middels frezen en zinkvonken.

Productie van de matrijsinsert

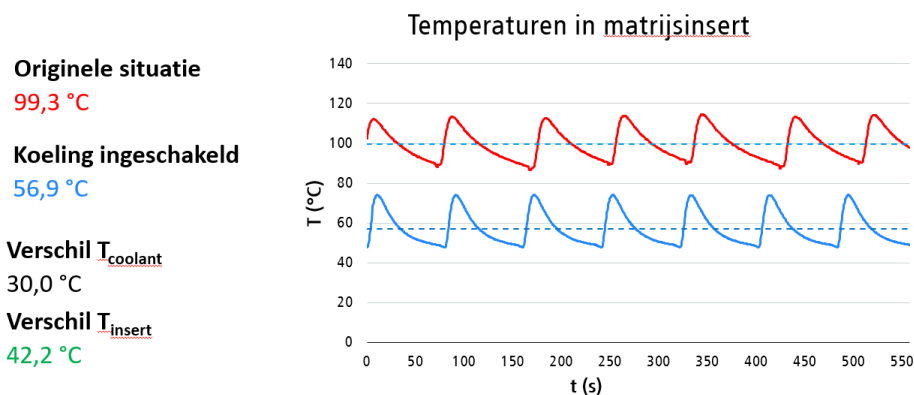
De insert is geprint in RVS 316L met de ConceptLaser M1 bij de Technicampus. De geïntegreerde supports zijn vervolgens doorgezaagd met een lintzaag, zodat het onderdeel verder kan worden nabewerkt door de matrijzenmakerij bij MOBA. De bovenzijde en de verschillende sluitvlakken zijn op maat gefreesd en de zijkanten van de vormholte (met de complex vormgegeven sleuf) worden nabewerkt middels een zinkvonkproces. De gaten die bestemd zijn voor de bevestiging van de insert aan de matrijshelft zijn op conventionele wijze voorzien van M8 schroefdraad. Vervolgens zijn de temperatuursensoren (PT100) geplaatst in de daarvoor bestemde gaten. De bestaande matrijshelft is voorzien van extra koelleidingen en o-ringen, zodat de koelkanalen in de matrijsinsert verbonden kon worden met een aparte temperatuureenheid (koelsysteem).



Figuur 51 - Ruwe print (links) naast de originele insert (rechts)

Resultaten van de proefspuitingen

Tijdens de proefspuitingen is met name aandacht besteed aan de temperatuur van de matrijsinsert. De standaard koelwatertemperatuur voor dit product is 70 °C. Om de effecten te vergroten is de koelwatertemperatuur voor de insert verlaagd naar 40 °C, terwijl de koelwatertemperatuur in de originele koelleiding gelijk is gebleven. Doordat de koelkanalen ter hoogte van de insert dichter bij de vormholte gepositioneerd zijn, wordt een temperatuurverschil verwacht van groter dan (70 °C – 40 °C =) 30 °C. Deze verwachting wordt bevestigd door de experimenten, met een gemiddeld temperatuurverschil van 42,2 °C (Figuur 52).



Figuur 52 – De gemiddelde temperaturen in de matrijsinsert tijdens het spuitgieten. Het verschil in gemeten temperatuur van de matrijsinsert is groter dan het verschil in koelwatertemperatuur, doordat de koelkanalen dichter langs het product lopen.

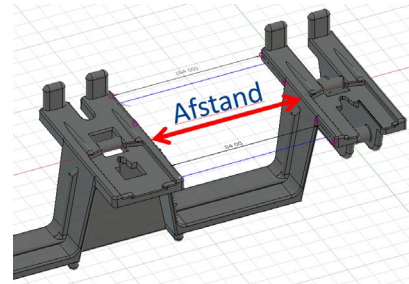
Het effect van Conformal Cooling op de producteigenschappen

Een belangrijk argument voor Conformal Cooling is het (potentieel) verlagen van de cyclustijden in het spuitgietproces. Hoewel dit met deze studie niet bevestigd kan worden (slechts een klein deel van de matrijs werd geoptimaliseerd), is het wel interessant om na te gaan welke producteigenschappen beïnvloed kunnen worden door aanpassingen aan de matrijskoeling.

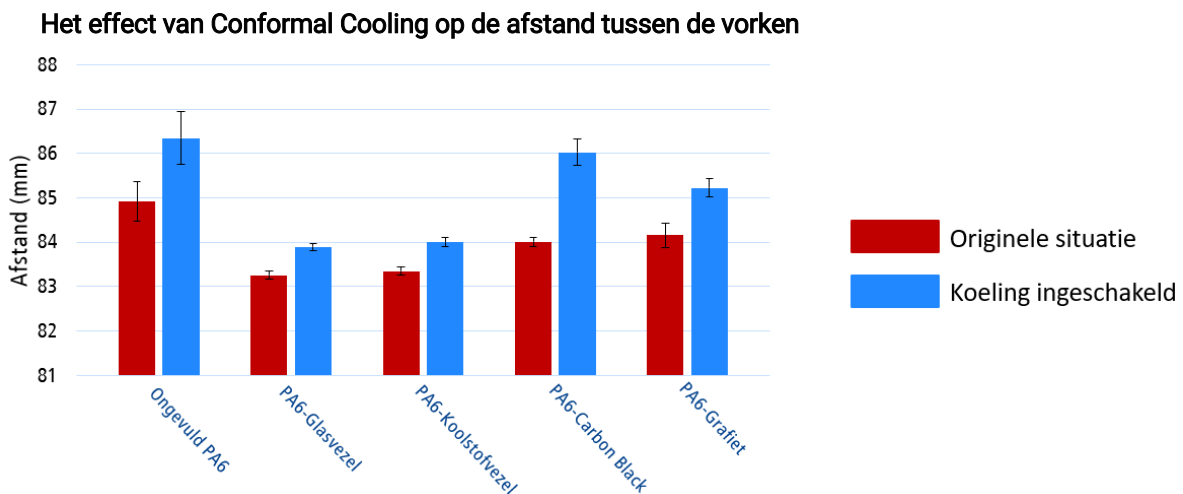
Maatvoering

Het meest duidelijke verschil op productniveau is merkbaar op het gebied van maatvoering. Hiervoor is de afstand tussen de vorken, die onderdeel zijn van het product, opgemeten (Figuur 53). Indien het product sneller wordt afgekoeld, krijgt het materiaal minder tijd om te krimpen. Hierdoor zal de afstand tussen de vorken groter zijn dan in de originele situatie, waar het materiaal meer tijd krijgt om te krimpen.

Koeling is niet de enige parameter die van invloed is op de krimp, het materiaal zelf speelt hierin ook een grote rol. Tijdens de proefspuitingen zijn verschillende compounds van Polyamide 6 (PA6) gebruikt, met daarin vulstoffen met verschillende eigenschappen. In Figuur 54 is weergegeven hoe de verschillende compounds beïnvloed worden door het in- en uitschakelen van Conformal Cooling in de matrijsinsert.



Figuur 53 - De afstand tussen de vorken is gebruikt als indicator van het effect van Conformal Cooling op de maatvoering.



Figuur 54 - De afstand tussen de vorken als resultaat van verschillende additieven en koelconfiguraties

Uit deze experimenten blijkt dat het toepassen van Conformal Cooling in alle gevallen leidt tot een grotere afstand tussen de vorken. Dit effect is kleiner bij vezelge vulde varianten van PA6.

Conclusies

SLM is geschikt als productietechniek voor matrijzen of matrijsinserts. Nabewerking is noodzakelijk, maar er kan een voordeel behaald worden doordat Conformal Cooling kan worden toegepast om de cyclustijden van het spuitgietproces te verkorten. Daarnaast heeft het optimaliseren van het koelsysteem in een spuitgietmatrijs effect op de maatvoering van het product. Door het product zo homogeen mogelijk af te koelen, wordt de maatnauwkeurigheid van het onderdeel vergroot en/of beter voorspelbaar.

Dit artikel bevat informatie uit de scriptie getiteld: "The effects of Conformal Cooling Channels on crystallinity and electrical properties of injection-moulded polyamide 6/carbon composites". Dit project is uitgevoerd ter afronding van de Master Polymer Engineering. Wilt u meer weten over dit onderzoek? Vraag naar de volledige scriptie!

8.2 – Inlaatspruitstukken Classic Mini Cooper – Wolfs Engineering

Het is soms lastig om voor oldtimers aan bepaalde reserve-onderdelen te komen. Wolfs Engineering ondervindt dit probleem ook bij het vinden van nieuwe inlaatspruitstukken voor de klassieke Mini Cooper. Wolfs Engineering is niet geheel onbekend met AM en heeft verscheidene pogingen gedaan om deze onderdelen te 3D-printen in kunststof (FDM, SLS). Deze pogingen hadden tot dusver allemaal hetzelfde resultaat: de inlaatspruitstukken waren niet bestand tegen de temperaturen en mechanische belastingen waaraan de onderdelen worden blootgesteld tijdens het rijden.

Op basis van de materiaaleigenschappen en de verwachte belasting, is gekozen om een proef te doen met inlaatspruitstukken van RVS 316L die geproduceerd zijn met SLM. Het product is hiervoor wel herontworpen voor AM en de SLM techniek.

Op het moment van uitgave van deze publicatie zijn de testen nog in volle gang, en vooralsnog succesvol: de betreffende Mini rijdt al een aantal maanden probleemloos verder met 3D-geprinte inlaatspruitstukken van RVS 316L.



Figuur 55 - De inlaatspruitstukken tijdens het uitpakken van de build job



Figuur 56 - Het vlak frezen van het aansluitvlak; hier zaten de supports bevestigd



Figuur 57 - Montage van de spuitstukken



Figuur 58 - De spuitstukken in de huidige gebruikssituatie

8.3 – Pompwaaier - Sitech Services b.v.

Eén van de services die Sitech levert, is inspectie en onderhoud van industriële (pomp-)installaties. Eén van de taken in hun werkzaamheden is het vervangen van pompwaaiers, die zorgen voor voldoende druk en debiet voor het transport van vloeistoffen in grote hoeveelheden. Echter, voor één van de pompwaaiers die Sitech levert, begint de voorraad van reserve-onderdelen op te raken.

Het wiel is in de jaren 80 in grotere aantallen gegoten. Nu nagedacht wordt over de productie van nieuwe reservedelen, is SLM ter sprake gekomen als vervanger van het gietproces. Het oorspronkelijke product (met een diameter van circa 230mm) is 3D-gescand. Om te toetsen of SLM technisch haalbaar is als vervangende productiemethode, is het model eerst in klein formaat en later in het oorspronkelijke formaat geprint.

Tijdens de eerste poging in oorspronkelijk formaat is het wiel evenwijdig aan de bouwplaat geprint, wat resulteert in grote krimpspanningen. Door de laagsgewijze aard van het proces zijn deze krimpspanningen zodanig hoog opgelopen, dat het onderdeel is losgekomen van de supports en krom is getrokken (Figuur 59). De print onder een hoek van 30 graden (Figuur 60) was succesvol. Tussen de twee schrijven van de waaier is support aangebracht dat na afloop moest worden verwijderd. Vervolgens is de pompwaaier gebalanceerd en waar nodig afgedraaid om de juiste maattoleranties te bereiken. Uiteraard waren de nabewerkingen een tijdrovend proces, maar in vergelijking met het optuigen van een gietproces voor waaierwielen, zijn wel degelijk voordelen behaald. De exacte besparing is afhankelijk van de toeleveringsketen van het bedrijf. Het onderdeel voldoet naar tevredenheid en is in gebruik.

Resumerend is het heel goed mogelijk een gegoten onderdeel te scannen en te printen. Grote maar ook kleine oppervlakken moeten wel onder een hoek worden geprint om te voorkomen dat de ingebrachte spanningen het product laten kromtrekken.



Figuur 59 - Gefaalde print dankzij hoog opgelopen krimpspanningen en deformatie



Figuur 60 - Geslaagde poging pompwaaier, georiënteerd onder een hoek van 30 graden met het bouwplatform

8.4 – Gepersonaliseerde mondstukken - PP Mouth Pieces

PP Mouth Pieces levert gepersonaliseerde mondstukken voor blaasinstrumenten. Hun mondstukken worden op dit moment geprint uit PLA (Poly Lactic Acid). Om te verkennen of een metalen versie kan resulteren in een hoogwaardiger product zijn een aantal proeven gedaan met SLM (Figuur 61). De mondstukken zijn zo georiënteerd dat nabehandeling van het lipoppervlak zoveel mogelijk wordt beperkt.

Resumerend kan worden gesteld dat het mondstuk prima geprint kan worden. Alleen de hals vraagt om een intensievere nabewerking (draaien) om goed aan te kunnen sluiten op het blaasinstrument. De rest van de geometrie kan worden nabewerkt met eenvoudige gereedschappen als bijvoorbeeld een punttang, om resten support te verwijderen en door het oppervlak vervolgens te stralen. Voor de volledigheid heeft de draaier het hele product afgedraaid, maar dit was in feite niet nodig. De opdrachtgever geeft aan dat de kosten van het printen en de nabehandeling op dit moment te hoog zijn, om een dergelijk mondstuk succesvol in de markt te kunnen zetten. De exacte getallen zijn bedrijfsspecifieke informatie en kunnen hier niet vermeld worden.



Mondstukken op bouwplaat

Figuur 61 - De print van een mondstuk



zonder nabehandeling



met nabehandeling

8.5 – Warmtewisselaar - Pienter in Ontwerpen

Onno Wolters van dit bedrijf heeft een warmtewisselaar ontwikkeld met een twee maal grotere overdracht dan de gemiddelde warmtewisselaar. De afmetingen zijn 200 mm x 150mm x 8 mm en de materiaaldikte is 0.3 mm. Een schaalmodel is geprint en vervolgens getest door de opdrachtgever zelf. Uit deze testen blijkt dat de onder- en bovenzijde niet volledig gesloten zijn en dus gaan lekken onder druk. De buisjes die in z-richting zijn geprint zijn wel dicht. Het lekprobleem kan worden opgelost door een grotere wanddikte te printen op de kritische punten.



Figuur 62 - Testdeel warmtewisselaar met een wanddikte van 0,3mm. De boven- en onderzijde van dit product zijn nog enigszins poreus

De opdrachtgever stelt dat het metaal een zeer stijve kristalstructuur heeft en dat de warmtegeleidbaarheid daardoor slecht is. Het spanningsarm gloeien bij 550 °C heeft geen invloed op de warmtegeleidbaarheid van het ge-3D-printe metaal. Door de beperkte warmtegeleiding geeft de opdrachtgever de voorkeur om de ontwikkeling voorlopig door te zetten met gestanste RVS plaat.

Ook dunwandige producten zijn dus in principe vloeistofdicht, behalve op punten (lijnen) waar een print zich opsplijt of waar printdelen bij elkaar komen. Bij het ontwerp en de oriëntatie moet hier terdege rekening mee worden gehouden om te voorkomen dat producten op bepaalde plekken poreus zijn.

8.6 – Verstelbare propellerschoep - Prop Engineering

Wim Hanekamp van Prop Engineering werkt aan een nieuw ontwerp van een rad met 44 verstelbare schoepen. Een dergelijke schoep is weergegeven in Figuur 63. Het bolle deel van de schoep is rond 20 mm, de totale lengte van de schoep is 75 mm. In de print is het bolle deel nog ingepakt in supportmateriaal. Dit product bewijst dat metaalprinten de ontwerper grote vrijheid geeft om de vorm van, in dit geval, een schoep te optimaliseren en snel opeenvolgende iteraties te maken. Prop Engineering onderzoekt op dit moment nog de eigenschappen en verdere mogelijkheden van de geprinte schoep.



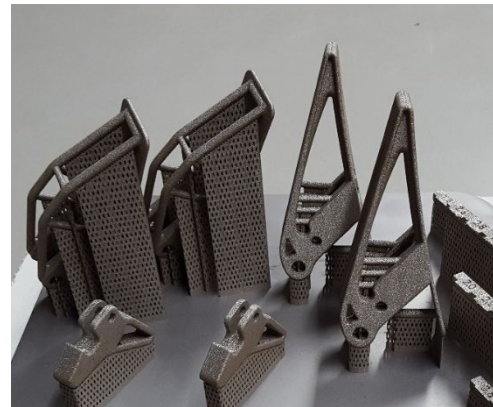
Figuur 63 - Schoep met bol deel, Prop Engineering

8.7 – Hijsgereedschap – IJssel Technologie

Scania is een belangrijke opdrachtgever van IJssel Technologie. Voor de montage van spatborden wordt een tool gebruikt die topologisch is geoptimaliseerd met SolidWorks. Met deze optimalisatieslag is een gewichtsbesparing van 31,2% bereikt. Dit geeft weer wat er mogelijk is, om de belasting van medewerkers die dagelijks met dergelijke hulpgereedschappen werken te verlagen. De economische aspecten zijn in deze ontwerpstudie niet meegenomen.



Oorspronkelijke vormgeving

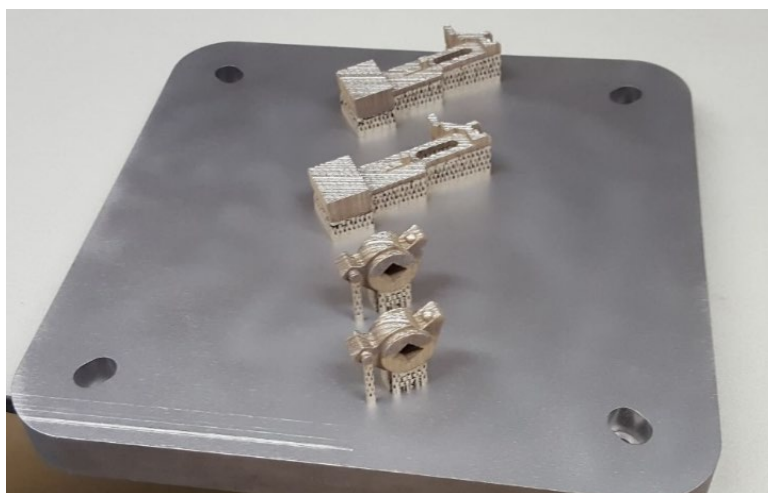


Geoptimaliseerd model

Figuur 64 - Hulpgereedschap voor de montage van spatschermen

8.8 – Magnetisch slot - Assa Abloy Apeldoorn

Assa Abloy ontwikkelt allerlei verschillende toegangssystemen, die op de markt worden gebracht onder handelsnamen als bijvoorbeeld Nemef en Lips. Voor de ontwikkeling van een nieuw type magnetisch slot zijn enkele prototypes geprint, waardoor het bedrijf in staat was om binnen enkele dagen allerlei testen uit te voeren.



Figuur 65 - Onderdelen magneetslot

8.9 – Kniescharnier onderbeenprothese Ambroise

Ambroise is gespecialiseerd in innovatieve beenprothesen. Het kniescharnier is een belangrijk onderdeel van de beenprothese. Er is onderzocht of het mogelijk is met metaalprinten het aantal onderdelen van het scharnier (nu 11) te reduceren en het scharnier in één samenstelling te printen, zodat er geen montage van de onderdelen nodig is.

Uit de diverse tests is gebleken dat het printen van het samengestelde kniescharnier het beste gaat door een printhoek te hanteren van 45 graden. Bij deze hoek is het benodigde supportmateriaal minimaal. Hierdoor was het product na een kleine nabewerking vrij draaibaar. Bij tests zijn spelingen tussen pen en gat geprint van 0,1 tot en met 1,0 millimeter. Verbindingen in het kniescharnier zijn vrij draaibaar als minimaal 0,2 millimeter speling wordt toegepast. De scharnierende verbinding met 0,1 millimeter speling is niet meer vrij draaibaar, omdat de verbinding aan elkaar gesmolten is. Het verder onderzoek naar het kniescharnier loopt nog. Er moet onder andere worden vastgesteld of een speling van 0,2mm in het scharnier leidt tot een betrouwbaar en functioneel product.



Huidige kniescharnier



Een opengewerkt geprint kniescharnier

Figuur 66 - Origineel gefabriceerd en geprint kniescharnier

8.10 – Uitlaatsierstuk - Vencer Nijverdal

Vencer is de producent van een zeer exclusieve sportauto, de Sarthe. Vanwege zijn exclusiviteit worden alle onderdelen maar in hele kleine aantallen gemaakt. Onderzocht is of het RVS einddeel van de uitlaat geprint kan worden. De huidige bewerkingen, die moeten worden uitgevoerd, maken het tot een duur onderdeel met een lange levertijd.

Er zijn proefstukken geprint met verschillende diameters, zodat Vencer vast kon stellen welke diameter na de nabewerkingen tot het beste visuele resultaat zal leiden.



Huidig einddelen



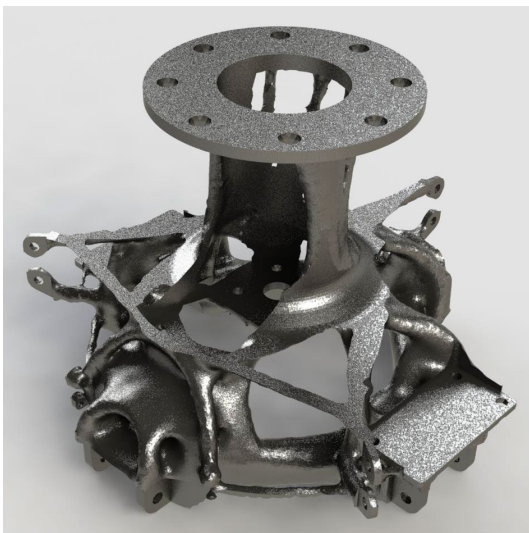
Geprint sierstuk

Figuur 67 - Huidig sierstuk en geprint sierstuk

8.11 – Frame en scharnier

Voor een machinebouwer is een case uitgevoerd rondom het herontwerp van een product door integratie van onderdelen en functies met name om kosten te besparen. Bij dit proces is tevens onderzocht of dit doel gerealiseerd kan worden met behulp van 3D-metaalprinten. Een voorbeeld van een herontworpen frame is te zien in Figuur 68. Aan het frame zitten een aantal oppervlakken die nabewerking behoeven middels frezen. De topologisch geoptimaliseerde vormgeving geeft uitstekend weer welke mogelijkheden printen biedt qua materiaal- en gewichtsbesparing.

Vaak zijn scharnieren in constructies overgedimensioneerd, waardoor er spanning op het scharnier kan komen te staan. Een intelligent herontwerp van een spanningsvrij scharnier is geprint (Figuur 69). Het scharnier kan zonder verdere nabewerking ingezet worden als de support is verwijderd. De kostentechnische kant van deze print wordt nog door de opdrachtgever onderzocht.



Figuur 68 - Een herontworpen framedeel

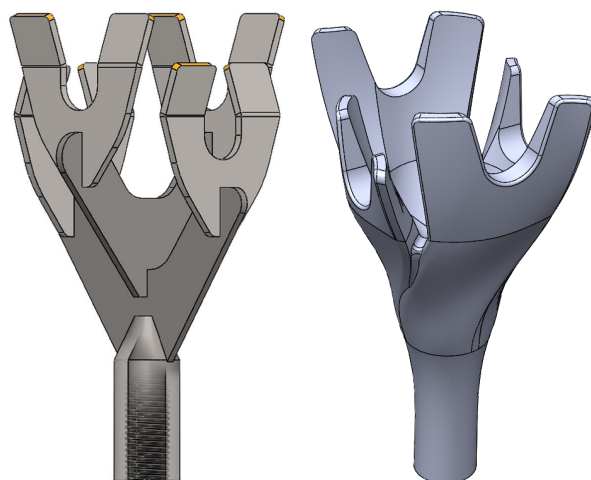


Figuur 69 - Een spanningsvrij scharnier

8.12 – Mixer - Geurtsen Machinefabriek, Deventer

Machinefabriek Geurtsen levert onder andere machines aan de voedselverwerkende industrie. In specifieke machines komen mixerkoppen voor waarmee ingrediënten worden gemengd. Deze worden grotendeels geconstrueerd uit plaatwerkdelen, die eerst worden uitgesneden, gezet en vervolgens in elkaar worden gelast.

In deze studie is een herontwerp gemaakt van de mixerkop voor SLM, waarbij tevens de kans dat voedselresten in kleine hoeken achterblijven geminimaliseerd is. Het originele en nieuwe exemplaar zijn in Figuur 70 figuur te zien.



Figuur 70 - Het oorspronkelijke ontwerp (links) en het herontwerp (rechts) van een mixerkop dat geschikt is voor SLM

Bronvermelding

1. Ding, D., et al., *Automatic multi-direction slicing algorithms for wire based additive manufacturing*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016. **37**: p. 139-150.
2. Petrovic, V., et al., *Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies*. International Journal of Production Research, 2011. **49**(4): p. 1061-1079.
3. Atzeni, E. and A. Salmi, *Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012. **62**(9-12): p. 1147-1155.
4. Chen, X., et al., *Effect of heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel 316L using arc additive manufacturing*. Materials Science and Engineering: A, 2018. **715**: p. 307-314.
5. Yadollahi, A., et al., *Effects of process time interval and heat treatment on the mechanical and microstructural properties of direct laser deposited 316L stainless steel*. Materials Science and Engineering: A, 2015. **644**: p. 171-183.
6. Gan, M.X. and C.H. Wong, *Practical support structures for selective laser melting*. Journal of Materials Processing Technology, 2016. **238**: p. 474-484.
7. Suryawanshi, J., K. Prashanth, and U. Ramamurty, *Mechanical behavior of selective laser melted 316L stainless steel*. Materials Science and Engineering: A, 2017. **696**: p. 113-121.
8. Strano, G., et al., *Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting*. Journal of Materials Processing Technology, 2013. **213**(4): p. 589-597.
9. Hitzler, L., et al. *Thermal environment and inclination angle dependencies on the surface quality of selective laser melted 316L steel*. in *Defect and Diffusion Forum*. 2016. Trans Tech Publ.
10. Chen, H., et al., *Improving additive manufacturing processability of hard-to-process overhanging structure by selective laser melting*. Journal of Materials Processing Technology, 2017. **250**: p. 99-108.
11. Gu, D. and Y. Shen, *Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods*. Materials & Design, 2009. **30**(8): p. 2903-2910.
12. Li, R., et al., *Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012. **59**(9-12): p. 1025-1035.
13. Bendsoe, M.P., *Topology optimization*. 2009: Springer.
14. Abdi, M., *Evolutionary topology optimization of continuum structures using X-FEM and isovalues of structural performance*. 2015.
15. Aremu, A., et al. *Suitability of SIMP and BESO topology optimization algorithms for additive manufacture*. in *21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF)–An Additive Manufacturing Conference*. 2010.
16. Wang, M.Y., X. Wang, and D. Guo, *A level set method for structural topology optimization*. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2003. **192**(1-2): p. 227-246.
17. Takezawa, A., S. Nishiwaki, and M. Kitamura, *Shape and topology optimization based on the phase field method and sensitivity analysis*. Journal of Computational Physics, 2010. **229**(7): p. 2697-2718.
18. Kawamura, H., H. Ohmori, and N. Kito, *Truss topology optimization by a modified genetic algorithm*. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2002. **23**(6): p. 467-473.
19. Kolonay, R. and M. Kobayashi. *Topology, shape, and sizing optimization of aircraft lifting surfaces using a cellular division method*. in *13th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis Optimization Conference*. 2010.

In samenwerking met



Aventus ^A

De school waar jij 't maakt

Green_PAC

Polymer Application Centre



Lectoraat Kunststoftechnologie

Verkenning van 3D-metaalprinttechnologie

Over Lectoraat Kunststoftechnologie

Het lectoraat Kunststoftechnologie stimuleert innovatie op het gebied van kunststofverwerking en -producten in het midden- en kleinbedrijf. Vanuit de onderzoeksprojecten, uitgevoerd door docenten van de technische opleidingen bij de Hogeschool Windesheim in samenwerking met bedrijven, vloeien nieuwe kennis en inzichten naar het Hoger Onderwijs én het bedrijfsleven.

Samenvatting

Selective Laser Melting is een relatief nieuwe technologie die grote mogelijkheden biedt voor de maakindustrie. De investeringsdrempel is echter behoorlijk groot gebleken in Nederland. Dit onderzoeksproject heeft als doel om het onderwijs en MKB-ers op een laagdrempelige manier kennis te laten maken met de technologie. In dit rapport wordt uitgelegd wat de techniek inhoudt, wat de (on-)mogelijkheden zijn en toont daarnaast een aantal praktijkvoorbeelden. 3D metaalprinten is een relatief nieuwe Additive Manufacturing (AM) technologie die grote kansen biedt voor de maakindustrie. De investeringsdrempel is voor de meeste 3D metaalprinttechnieken echter hoog en de benodigde expertise niet aanwezig in bedrijven en instellingen. De toepassing van deze technologie blijft hierdoor met name in Nederland sterk achter. Dit onderzoeksproject heeft als doel om onderwijs te ontwikkelen en MKB-ers op een laagdrempelige manier kennis te laten maken met 3D metaalprinten in het algemeen en specifiek de Selective Laser Melting techniek. In dit rapport wordt uitgelegd wat de technologie inhoudt, wat de (on-)mogelijkheden zijn en toont daarnaast een aantal praktijkvoorbeelden.