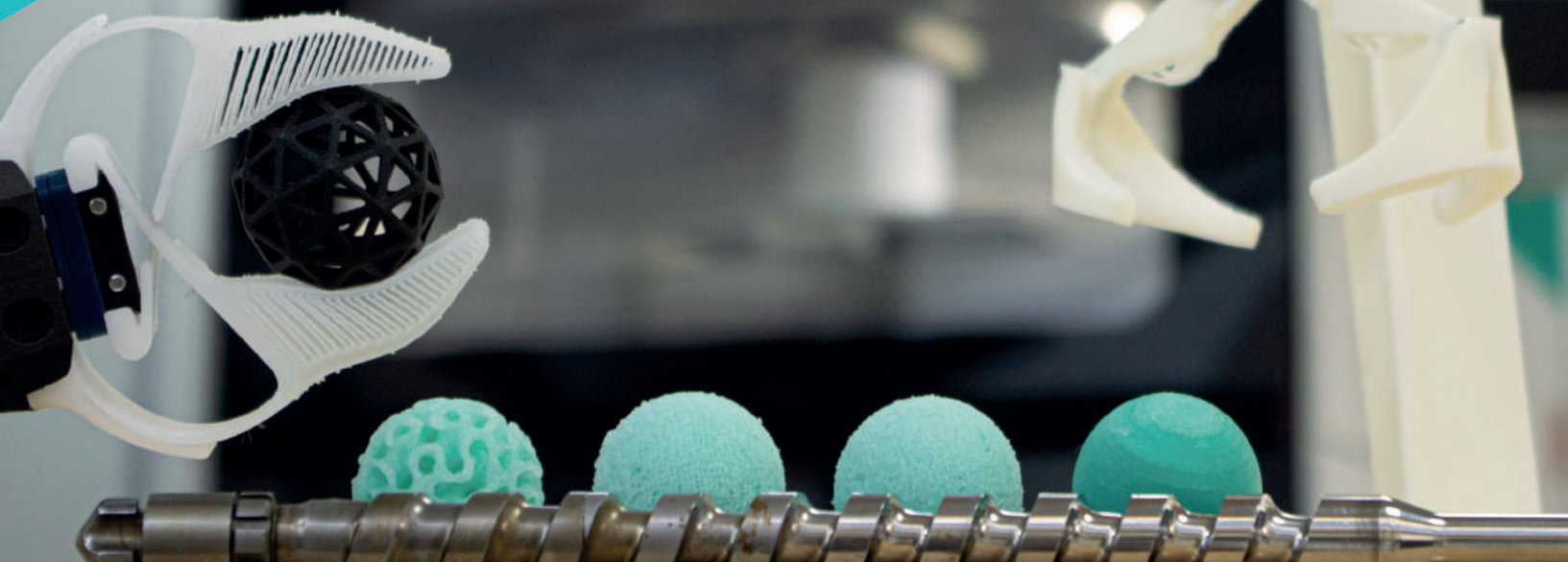


*Lectoraat Kunststoftechnologie*

# Industrial Additive Manufacturing: Freeforming



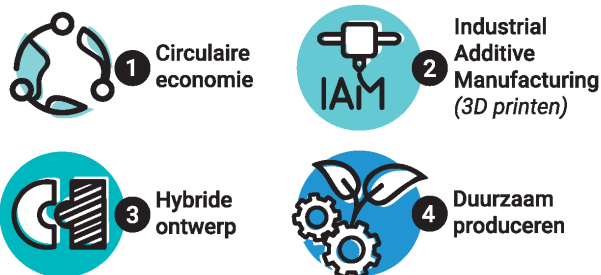
TECH  
FOR  
FUTURE

hogeschool  
**Windesheim**

# Colofon

- Titel:** Industrial Additive Manufacturing: Freeforming
- Publicatie nummer:** LKT-AM-109527-2309
- Publicatie datum:** September 2023
- Auteurs:** P. Dijkstra, D. van Voorthuizen, K. Hermans, G. Heideman
- Financiering:** Dit project is mogelijk gemaakt door TechForFuture ([www.techforfuture.nl](http://www.techforfuture.nl)); dit Centre of Expertise is een samenwerking tussen hogeschool Saxion en hogeschool Windesheim.
- In samenwerking met:** Flamco, M&G Group, MOBA, Schoeller Allibert, Universitair Medisch Centrum Groningen (UMCG)
- Fotografie:** Hogeschool Windesheim

**Onderzoekslijnen:**



Deze publicatie van Windesheim valt onder een Creative Commons Naamsvermelding 4.0 Internationaal-licentie. Dit betekent dat de kennis uit deze publicatie hergebruikt mag worden als basis voor de ontwikkeling van nieuwe kennis mits de naam van de auteur en/of Windesheim hierbij vermeld wordt.

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 nawerkbaar is, maar bedrijfsspecifieke data is soms weggelaten.



# Inhoudsopgave

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Nomenclatuur .....</b>                                               | <b>3</b>  |
| <b>1. Inleiding.....</b>                                                | <b>5</b>  |
| <b>2. Workflow en werking APF-proces .....</b>                          | <b>6</b>  |
| 2.1. Algemene workflow AM-processen .....                               | 6         |
| 2.2. Basiswerking APF-proces.....                                       | 6         |
| <b>3. Procesparameters en ontwerprichtlijnen .....</b>                  | <b>9</b>  |
| 3.1. Procesparameters .....                                             | 9         |
| 3.2. Ontwerprichtlijnen.....                                            | 13        |
| <b>4. Literatuuronderzoek, state of the art.....</b>                    | <b>17</b> |
| 4.1. Gebruikte materialen en verwerking .....                           | 17        |
| 4.2. Mechanische eigenschappen .....                                    | 18        |
| 4.3. Toepassingen.....                                                  | 20        |
| 4.4. Conclusies literatuur .....                                        | 21        |
| <b>5. Kwalificatie van materialen voor APF.....</b>                     | <b>22</b> |
| 5.1. Instellen extrusieproces .....                                     | 22        |
| 5.2. Instellen parameters druppelextrusie .....                         | 23        |
| 5.3. Instellen printproces .....                                        | 26        |
| <b>6. Printen van Polypropyleen .....</b>                               | <b>29</b> |
| 6.1. PP-grade voor folie (Adsyl).....                                   | 30        |
| 6.2. spuitgietgrade PP's.....                                           | 34        |
| 6.2.1. Verwerkbaarheid .....                                            | 34        |
| 6.2.2. Mechanische eigenschappen.....                                   | 38        |
| 6.3. Conclusies .....                                                   | 40        |
| <b>7. Printen van Thermoplastische Elastomeren.....</b>                 | <b>41</b> |
| 7.1. TPU, 70 Shore A .....                                              | 42        |
| 7.2. SEBS, 30 Shore A .....                                             | 43        |
| 7.3. Conclusies .....                                                   | 46        |
| <b>8. Printen van schuimachtig materiaal met procesparameters .....</b> | <b>47</b> |
| <b>9. Printen van meerdere materialen in één product (2K) .....</b>     | <b>51</b> |
| 9.1. Ontwerp, software voorbereiding en printproces.....                | 51        |
| 9.2. Verbinding tussen materialen .....                                 | 53        |
| 9.3. Conclusies .....                                                   | 55        |
| <b>10. Technology demonstrators .....</b>                               | <b>56</b> |
| 10.1. Gripper voor objecten met ongelijke vorm .....                    | 56        |
| 10.2. Schuimachtig materiaal met TPMS-structuren.....                   | 60        |
| 10.3. Gripper voor sensitieve componenten.....                          | 64        |

|                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 10.4. Insert moulding om APF-geprinte onderdelen .....                                         | 69        |
| <b>11. Kennisdisseminatie .....</b>                                                            | <b>76</b> |
| 11.1. Betrokkenheid met het onderwijs .....                                                    | 76        |
| 11.2. Deelname aan evenementen.....                                                            | 76        |
| <b>12. Conclusies en aanbevelingen.....</b>                                                    | <b>78</b> |
| <b>Bijlage 1. Instelprocedure druppelextrusie Arburg en aanvullingen door Windesheim .....</b> | <b>80</b> |
| <b>Bijlage 2. Smitgietinstellingen LyondellBasell Adsyl 5C 30F en Total-Hanwha BJ550.....</b>  | <b>83</b> |
| <b>Bijlage 3. Procesparameters voor insert moulding.....</b>                                   | <b>84</b> |
| <b>Referentielijst .....</b>                                                                   | <b>85</b> |

## Nomenclatuur

| Afkorting | Term                            | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ABS       | Acrylonitril-butadien-styreen   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| APF       | Arburg Plastic Freeforming      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|           | Armat                           | Door Arburg vermarkt oplosbaar supportmateriaal.                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|           | Contour                         | Buitenste schil in de X- en Y-richtingen van een geprint object.                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| DLP       | Digital Light Processing        | AM-proces waarbij laagsgewijs wordt gebouwd met een thermohardende hars die wordt uitgehard middels een (UV-) projector.                                                                                                                                                                                                                                       |
| A         | Discharge (Austrag)             | Druppelvolumen (procesparameter)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| DAR       | Drop Aspect Ratio (Form Factor) | Verhoudingsgetal in de slicing software dat de afstand tussen de druppels in de X- en Y-richtingen kwantificeert als ratio van de laagdikte.                                                                                                                                                                                                                   |
|           | Droplet chain (Druppelketting)  | Een streng druppels zoals die door de APF wordt geëxtrudeerd.                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| DPC       | Droplet Parameter Calculator    | Door Windesheim ontwikkelde methode om materiaalkwalificatie te vergemakkelijken.                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|           | Extrudate-DAR                   | De verhouding tussen druppelhoogte en breedte (DAR) van het geëxtrudeerde materiaal in een druppelketting.                                                                                                                                                                                                                                                     |
| FDM       | Fused Deposition Modelling      | Merkterm van Stratasys voor het FFF-proces.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| FFF       | Fused Filament Fabrication      | Een AM-techniek waarbij kunststof draad wordt gevoed door een verwarmde nozzle en wordt geëxtrudeerd. Door laagsgewijs vanaf een bouwplaat op te bouwen ontstaan 3D producten. Het proces kent grote gelijkenissen aan APF, maar is in tegenstelling tot APF beschikbaar in vele varianten, van goedkoop en laagdrempelig tot zeer industrieel en hoogwaardig. |
| HDPE      | High-density Polyethyleen       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|           | Infill                          | Kern of opvulling in de X- en Y-richtingen van een geprint object.                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| LT        | Laagdikte (Layer Thickness)     | De dikte van een laag in de slicer en tijdens printen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| LKT       | Lectoraat Kunststoftechnologie  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|           | Onderextrusie                   | Het extruderen van kleinere hoeveelheden materiaal dan waar de slicing software rekening mee houdt. Dit kan leiden tot inzakking van materiaal.                                                                                                                                                                                                                |
|           | Overextrusie                    | Het extruderen van grotere hoeveelheden materiaal dan waar de slicing software rekening mee houdt. Dit kan leiden tot uitpuilen van materiaal.                                                                                                                                                                                                                 |
| PP        | Polypropyleen                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| SLS       | Selective Laser Sintering       | Een industriële AM-techniek waarbij laagsgewijs onderdelen worden opgebouwd uit kunststof poeder welke wordt versmolten met een laser.                                                                                                                                                                                                                         |

| Afkorting | Term                              | Toelichting                                                                                                                                                                                     |
|-----------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           | Slicing software                  | Software ter voorbereiding van het printproces, waarbij het 3D model onder andere in lagen (slices) wordt opgedeeld.                                                                            |
| IM        | Spuitsieten (Injection Moulding)  |                                                                                                                                                                                                 |
| SLA       | Stereolithografie                 | AM-proces waarbij laagsgewijs wordt gebouwd met een thermohardende hars die wordt uitgehard middels een (UV-)laser.                                                                             |
|           | Strut lattice                     | Een familie roosterstructuren waarbij knooppunten zijn verbonden door rechte, stangvormige elementen.                                                                                           |
| SEBS      | Styreen-ethyleen-butyleen-styreen |                                                                                                                                                                                                 |
|           | TChamber                          | Temperatuur van de verwarmde bouwkamer.                                                                                                                                                         |
| TPU       | Thermoplastisch Polyurethaan      |                                                                                                                                                                                                 |
| TPE       | Thermoplastische Elastomeren      | Flexibele, rubberachtige materialen welke als smelt te verwerken zijn.                                                                                                                          |
|           | TNozzle                           | Temperatuur van de nozzle.                                                                                                                                                                      |
| TPMS      | Triply Periodic Minimal Surface   | Een familie roosterstructuren waarbij sprake is van een doorlopend, dubbel gekromd oppervlak.                                                                                                   |
|           | TZone1                            | Temperatuur van zone 1 van de barrel                                                                                                                                                            |
|           | TZone2                            | Temperatuur van zone 2 van de barrel.                                                                                                                                                           |
|           | Vat (Photo)polymerisation         | Containerterm voor alle AM-technieken waarbij harsen door middel van blootstelling aan licht van specifieke golflengtes wordt uitgehard. Voorbeelden van dergelijke technieken zijn SLA en DLP. |
|           | VSlicer                           | Virtueel druppelvolumen als resultaat van de in de slicing software opgegeven laagdikte en DAR.                                                                                                 |

# 1. Inleiding

In de afgelopen jaren zijn veel bedrijven ingestapt in de industrie van Additive Manufacturing (AM, 3D-printen). Eén van deze bedrijven is Arburg, een machinefabrikant uit de spuitgietindustrie. Vanuit haar expertise met spuitgieten heeft Arburg een proces ontwikkeld voor het printen van thermoplasten, genaamd Arburg Plastic Freeforming (APF). Ten opzichte van andere AM-technologieën onderscheidt het APF-proces zich door:

- Als grondstof standaard granulaat te gebruiken;
- Producten op te bouwen middels extrusie van kleine druppels;
- Geïntegreerde proces logging voor kwaliteitsborging;

De techniek is in 2013 in Duitsland geïntroduceerd en vanaf 2016 wereldwijd uitgerold. Sinds haar introductie is APF niet wijd verspreid of breed geadopteerd. Desondanks is er wel interesse naar de techniek; zo is het Lectoraat Kunststoftechnologie door verscheidene organisaties benaderd omdat zij nieuwsgierig waren naar het APF-printproces. Dit leidde in 2021 tot het vormen van een consortium tussen het Lectoraat Kunststoftechnologie, Flamco, M&G Group, MOBA, Schoeller Allibert en het Universitair Medisch Centrum Groningen (UMCG). Er is geïnvesteerd in een tweedehands machine en met financiering door deze organisaties en TechForFuture is een tweejarig onderzoeksproject opgetuigd om uit te zoeken wat het APF-proces voor hen en de industrie kan betekenen. De hoofdzakelijke thema's in het onderzoek waren:

- Mogelijkheden en grenzen van het APF-printproces voor de constructeur;
- De verwerkbaarheid van spuitgietgrades Polypropyleen (PP);
- De verwerkbaarheid van Thermoplastische Elastomeren (TPE's);
- De mogelijkheden voor printen van producten met meerdere materialen (2K);
- Ontwikkeling van 'technology demonstrators', voorbeeldcasussen welke laten zien hoe APF-technologie naar meerwaarde zou kunnen worden ingezet;

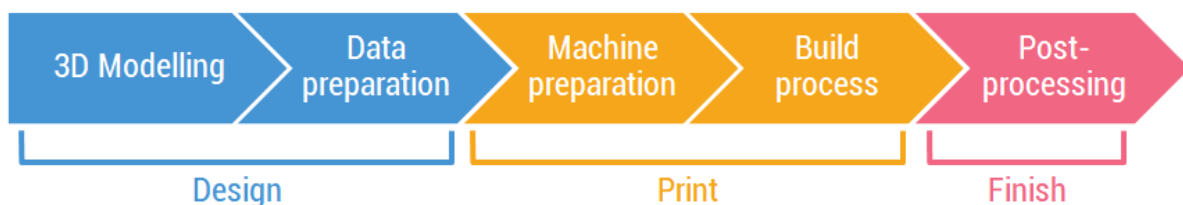
De thema's zijn in dit rapport behandeld. Er is een introductie geschreven van de AM-workflow en een verdieping in de APF-technologie. De stand der techniek in de literatuur is beschreven en kennishiaten op verscheidene thema's zijn aangevuld met experimenteel werk. Tot slot zijn enkele van de ontwikkelde technology demonstrators uitgelicht.

## 2. Workflow en werking APF-proces

Dit hoofdstuk beschrijft kortstondig een algemene workflow die geldt in Additive Manufacturing (AM), de werking van het Arburg Plastic Freeforming (APF) bouwproces en hoe deze verschilt van andere AM-technologieën.

### 2.1. Algemene workflow AM-processen

AM-processen delen in de basis dezelfde processtappen, welke schematisch zijn weergegeven in Figuur 1. Het startpunt is digitaal: een 3D model wordt geëxporteerd in een universeel bestandsformat (bijvoorbeeld .STL of .3MF). Van het 3D model worden basisparameters ingesteld, zoals schaalgrootte, aantal, positie en oriëntatie in de bouwruimte van de machine. Aan ieder model worden de gewenste procesparameters toegekend. Deze data wordt verstuurd naar de machine, en na enkele voorbereidingen bij de machine start het (laagsgewijze) bouwproces. Na het bouwproces worden modellen uit de machine genomen en wordt eventueel aanwezig steunmateriaal (support) verwijderd. Afhankelijk van de gewenste specificatie kunnen nabewerkingen worden toegepast ten bate van afwerking, nauwkeurigheid en mechanische eigenschappen. Voorbeelden zijn: Kleur- en oppervlaktebehandelingen, boren, frezen en warmte-nabehandeling.



Figuur 1. Weergave van processtappen in Additive Manufacturing (AM).

### 2.2. Basiswerking APF-proces

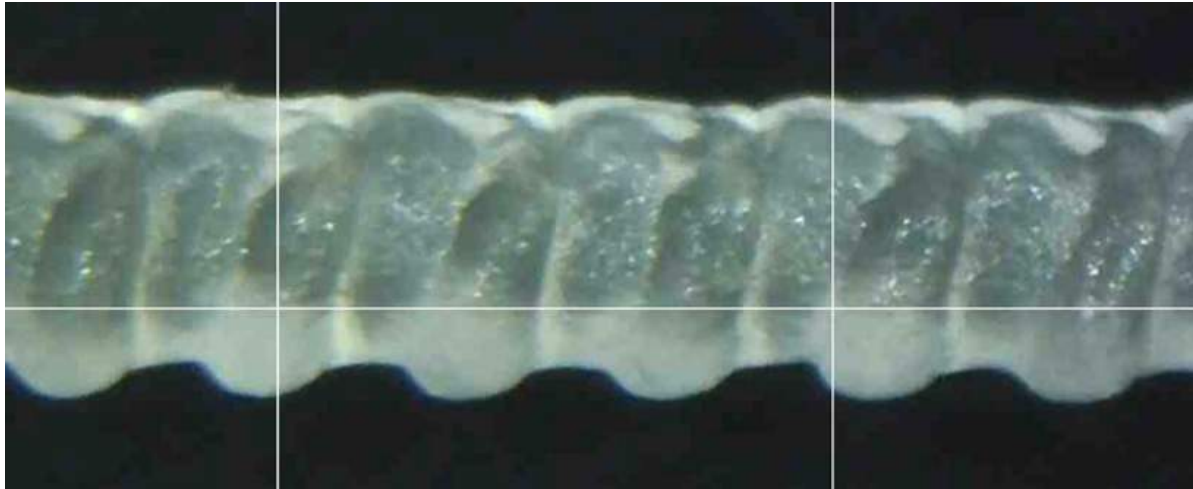
Arburg Plastic Freeforming (APF) is een Additive Manufacturing (AM, 3D-print) techniek waarbij thermoplastische kunststoffen door een opening (nozzle) worden geëxtrudeerd en het product laag voor laag op een bewegende bouwplaat wordt opgebouwd. Op het eerste gezicht lijkt APF op Fused Filament Fabrication (FFF), echter verschillen de technieken op 3 punten:

- Vorm van uitgangsmateriaal
- Manier van opsmelten
- Wijze van materiaal doseren

Het systeem van APF staat schematisch weergegeven in Figuur 3 en wordt puntsgewijs beschreven. Waar FFF gebruik maakt van kunststof filament dat wordt opgesmolten in een capillair, gebruikt APF standaard kunststofgranulaat (4) zoals wordt gebruikt in conventionele processen als extrusie en spuitgieten. Dit granulaat wordt opgesmolten in een verwarmde cilinder (barrel) met een draaiende schroef (5).

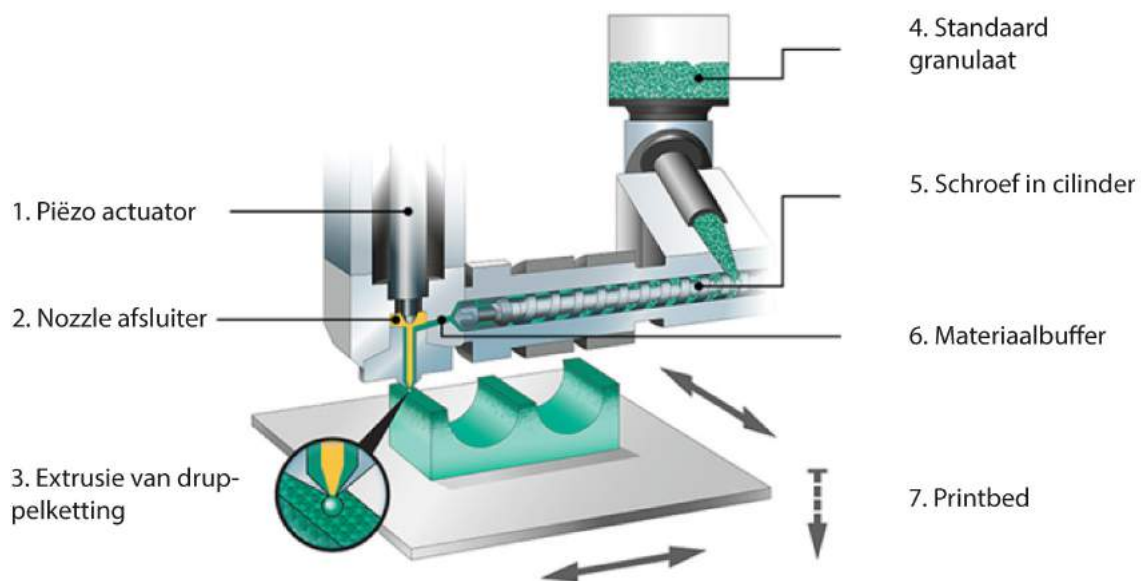
Doseren van materiaal gebeurt bij FFF door het voortstuwen (en terugtrekken) van filament. Bij APF wordt gebruik gemaakt van een techniek uit het spuitgieten, waarbij een materiaalbuffer (6) verzamelt voor de schroef. Wanneer deze buffer groot genoeg is stopt de schroef met draaien en wordt deze vooruit geduwd. Hierbij fungeert de schroef als een plunjer om materiaal te extruderen. Het materiaal wordt geëxtrudeerd door een nozzle met naaldafsluiter (2) welke bij hoge frequentie wordt geopend en

gesloten door een piëzo-actuator (1). Het systeem extrudeert dus geen draad, maar reeksen van druppels (druppelkettingen) zoals weergegeven in Figuur 2.



**Figuur 2.** Druppelketting onder de microscoop van Total-Hanwha BJ550 bij een discharge van 120%. De breedte van het extrudaat in de afbeelding is circa 0,35mm.

Naast deze verschillen bevindt de bewegende bouwplaat (7) bij APF zich in een verwarmde bouwkamer. Hoewel dit bij FFF soms ook wordt toegepast is meestal de bouwplaat en niet de bouwkamer verwarmd. Daarnaast zijn APF-machines uitgerust met meerdere injectie-eenheden (discharge units), zodat meerdere materialen in één product kunnen worden verwerkt zoals bij 2K spuitgietproducten ook het geval is. Er kan ook voor wateroplosbaar supportmateriaal als tweede materiaal gekozen worden. Dit vergemakkelijkt nabewerking ten opzichte van het ondersteunen met regulier bouw materiaal, welke mechanisch moet worden verwijderd.



**Figuur 3.** Schematische weergave van APF-proces, met granulaat als bouwstof, een schroef in verwarmde barrel voor opsmelten, sperring op de neus voor drukopbouw en een naald waarmee de doorstroming wordt geopend en afgesloten. Afbeelding van Arburg GmbH + Co KG.

Er zijn enkele aspecten die APF onderscheidt van de meeste FFF-systemen:

- Inzetten van conventionele kunststofgranulaten als bouw materiaal;
- Verwarmen van materiaal en extrudaat tot een homogene smelt;
- Extrusie tot (reeksen) druppels (*in plaats van draden bij FFF*);
- Nauwkeurige dosering / controle over het geëxtrudeerde volume;
- Een afkoelproces van geëxtrudeerd materiaal welke onafhankelijk is van de afstand tot de bouwplaat (*in tegenstelling tot FFF-systemen met enkel een verwarmde bouwplaat*);
- De mogelijkheid tot printen van meerdere materialen in één product;
- Een systeem met open procesparameters waarop klanten zelf materialen kunnen kwalificeren en inzetten.

Arburg heeft de APF-technologie in 2013 in de markt geïntroduceerd. Tegenwoordig zijn verschillende modellen verkrijgbaar, waarvan de belangrijkste specificaties zijn weergegeven in Tabel 1. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van een Freeformer 200-3X.

| Freeformer models & specifications |                  |     | 200-3X | 300-3X | 750-3X |
|------------------------------------|------------------|-----|--------|--------|--------|
| Number of injection units (max.)   |                  |     | 2      | 3      |        |
| Nozzle temperature (max.)          | Standard         | °C  | 350    | 350    |        |
|                                    | High-temperature | °C  | -      | 450    |        |
| Build chamber temperature (max.)   | Standard         | °C  | 120    | 120    |        |
|                                    | High-temperature | °C  | -      | 200    |        |
| Dimensions of build volume         | X                | mm  | 154    | 234    | 330    |
|                                    | Y                | mm  | 134    | 134    | 230    |
|                                    | Z                | mm  | 230    |        |        |
| Maximum injection pressure         |                  | bar | 800    |        |        |

**Tabel 1. Specificaties van verschillende Freeformer modellen volgens gegevens van Arburg [1-3].**

APF-technologie onderscheidt zich met de nodige potentiële voordelen. Het benutten van deze voordelen vraagt echter wel om kennis van spuitgieten én AM, zoals verderop in de publicatie meermaals zal blijken. In praktijk hebben bedrijven vaak niet de expertise van spuitgieten én AM op dezelfde afdeling. Dit leidt ertoe dat partijen met AM expertise onvoldoende kennis hebben van spuitgieten om de voordelen van APF maximaal te benutten. Andersom hebben afdelingen met spuitgietskennis moeite met het benutten van de ontwerpvrijheid van AM.

Zoals tevens zal blijken verderop in de publicatie, is er in publiek domein relatief weinig literatuur over de mogelijkheden van en de 'best practices' met APF. Dit onderschrijft de relevantie van het uitgevoerde onderzoek en dit rapport.

### 3. Procesparameters en ontwerprichtlijnen

In het vorige hoofdstuk is het APF-proces kortstondig beschreven. Dit hoofdstuk beschrijft in detail het printproces. Hierbij worden de procesparameters van zowel software als machine beschreven en worden tevens ontwerprichtlijnen gegeven.

#### 3.1. Procesparameters

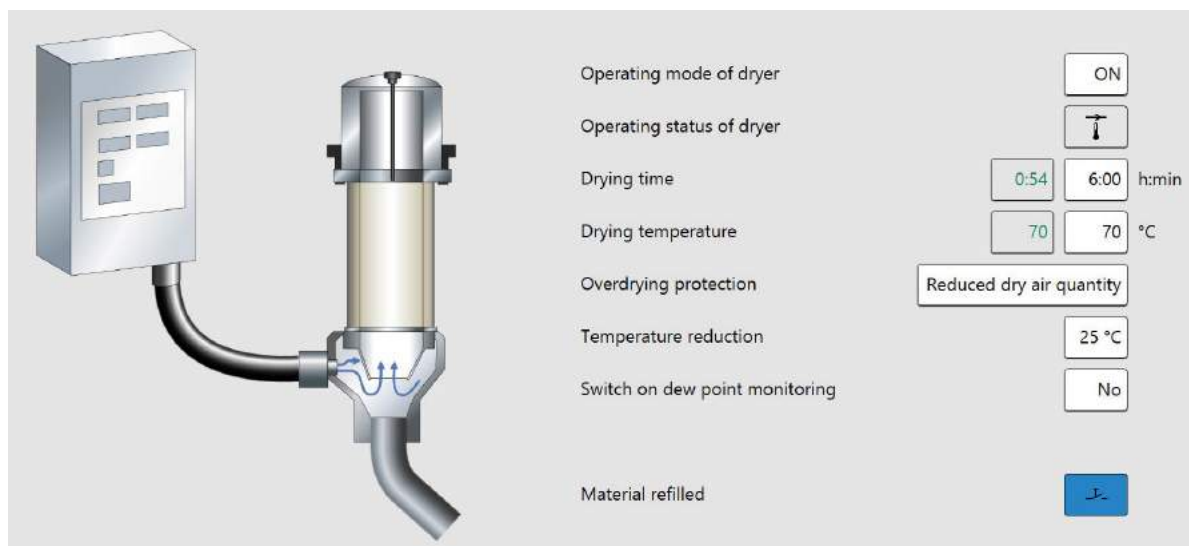
Het APF-proces kent vele procesparameters. Een deel hiervan wordt ingesteld op de machine en een deel in de slicing software. Arburg heeft de parameters als volgt ingedeeld:

- Drogen en voeden → Machine
- Verwarming (materiaal én bouwkamer) → Machine
- Dosereren (druppelvolumen) → Machine
- Productgeometrie → Software
- Laagdikte en afstand tussen druppels → Software
- Aanbrengvolgorde druppels → Software

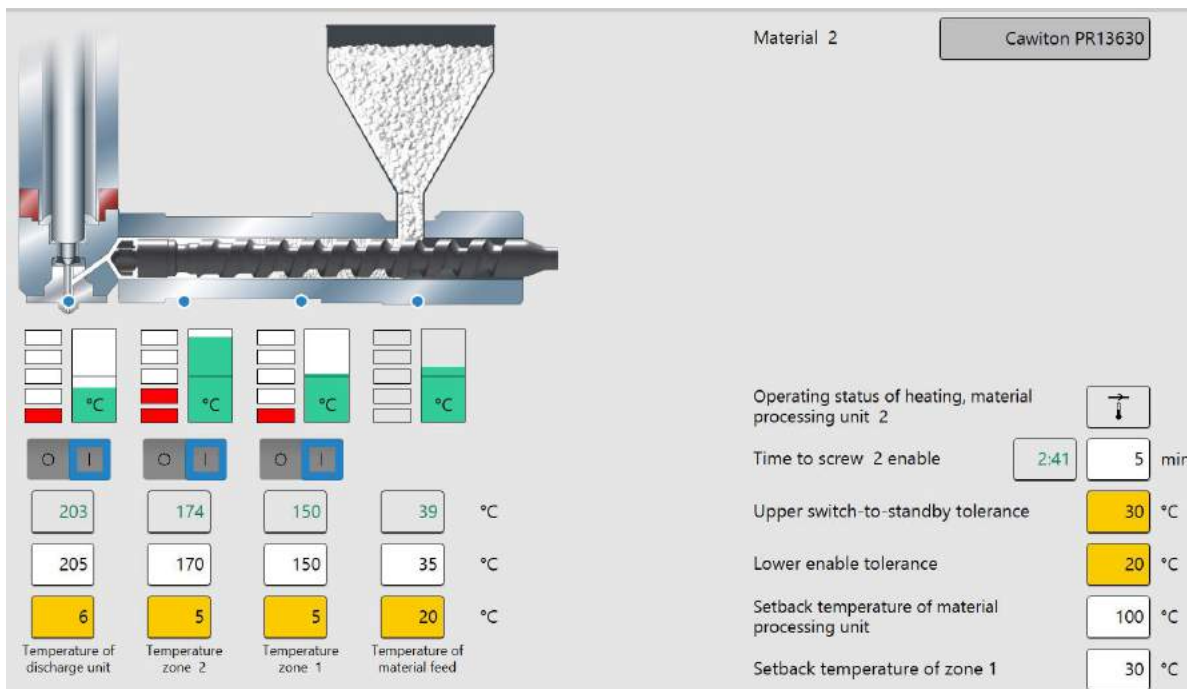
Hieronder worden de parameters van de machine en software in verder detail uitgelegd en afgebeeld.

#### Machine parameters

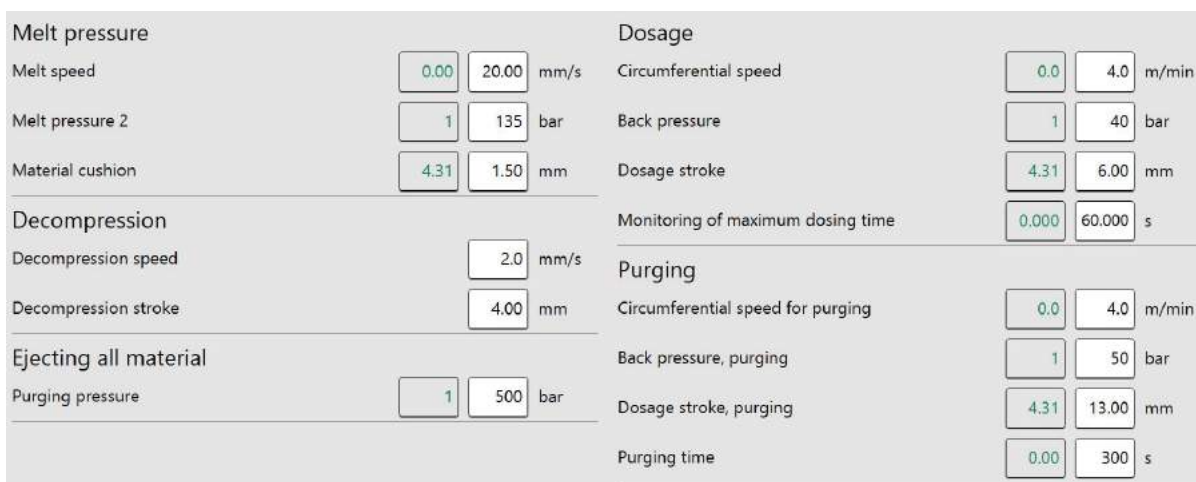
Op de machine worden parameters voor het drogen (Figuur 4), opsmelten (Figuur 5), en het voeden ingesteld (Figuur 6). Dit zijn grotendeels dezelfde parameters als welke worden toegepast in het spuitgietsproces. Het voornaamste verschil zit in de indeling van de verwarmingszones: waar een spuitgietschroef gebruikelijk in 3 zones wordt verwarmd, kent het APF-proces voor de schroef 2 zones en voor de nozzle een 3<sup>e</sup> zone. De zone bij de hopper wordt gemonitord maar bij de Freeformer 200-3X niet actief verwarmd of gekoeld.



Figuur 4. Instellingen voor droogproces.



**Figuur 5.** De temperatuurstellingen voor de barrel zijn soortgelijk aan het spuitgietproces.

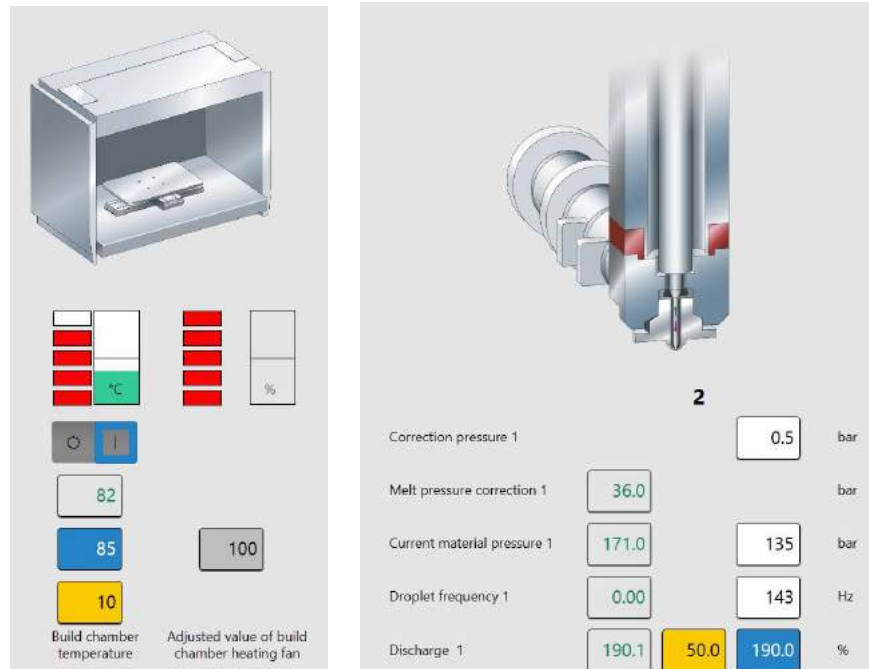


**Figuur 6.** De instellingen voor voeden zijn soortgelijk aan het spuitgietproces.

Naast deze parameters worden ook de volgende parameters ingesteld:

- Bouwkamertemperatuur (Figuur 7, links), welke invloed heeft op het afkoelproces van het materiaal na extrusie;
- Discharge (Figuur 7, rechts) ofwel het ingestelde druppelvolumen. Deze instelling wordt uitgedrukt als percentage van een door Arburg bepaald standaard volumen. Het druppelvolumen resulteert uit de voorwaartse verplaatsingssnelheid van de schroef en de frequentie waarmee de nozzle wordt gesloten en geopend. De machine monitort de frequentie van de piëzo actuator en de voorwaartse verplaatsingssnelheid van de schroef. Bij fluctuaties in stromingsweerstand houdt de machine de discharge zo constant mogelijk door de verplaatsingssnelheid van de schroef bij te stellen;
- De snelheid van het printproces. De bewegingssnelheden die zijn ingesteld in de slicing software zijn tijdens het printproces te corrigeren in het bereik van 1 – 100%. De instelling kan gebruikt worden wanneer tijdens het printen blijkt dat een lagere printsnelheid nodig is om de stabiliteit van het printproces te bewaren, en wordt normaliter dan ook niet ingezet;

- De afstand van de bouwplaat tot de nozzle. Normaliter wordt deze ingesteld op dezelfde afstand als de laagdikte in de slicing software. Door de afstand anders in te stellen kan adhesie aan de bouwplaat worden verhoogd (kleiner dan laagdikte) of verlaagd (groter dan laagdikte).



**Figuur 7.** Links de instellingen voor bouwkamertemperatuur, rechts voor druppelvolumen (discharge).

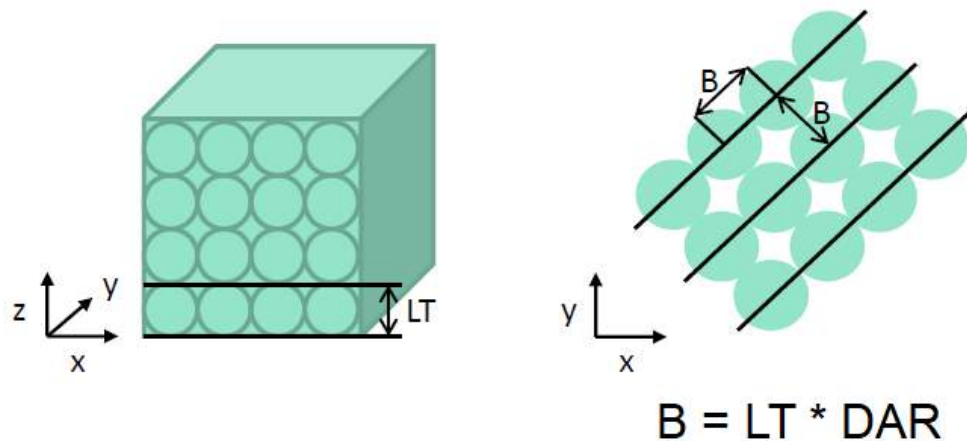
Verschiede materialen kunnen uiteenlopende instellingen vereisen. De parameters worden opgeslagen in een zogeheten materiaalprofiel. Hierdoor kunnen bij het wisselen van materiaal de juiste parameters gemakkelijk ingeladen worden. Door de software wordt aan ieder materiaalprofiel een Globally Unique Identifier (GUID), een unieke code, toegekend. Instellingsprofielen in de slicing software worden met behulp van de GUID gekoppeld aan materiaalprofielen op de machine. Hierdoor wordt geborgd dat printjobs alleen uit het beoogde materiaal worden geprint, en niet per ongeluk met het verkeerde materiaal.

## Slicing software parameters

Datavoorbereiding voor APF vindt plaats in MiniMagics, een softwarepakket van Materialise NV. In MiniMagics worden te printen 3D-modellen in de gewenste oriëntatie en locatie van de bouwplaat gezet. Als uitgangspunt worden hiervoor bestanden gebruikt met de extensie .STL. Hierna worden de 3D-modellen verwerkt in de zogeheten Build Processor, een software module waarmee procesparameters aan elk onderdeel wordt toegekend. De Build Processor kent enkele profieltypen:

- Slicing profile, waarmee de laagdikte (in micrometers) wordt ingesteld voor de gehele printjob;
- Scaling profile, waarin schaalfactoren worden vastgelegd voor de X, Y en Z-richtingen van de gehele printjob. Dit maakt het mogelijk om te compenseren voor eventueel aanwezige krimp in het printproces;
- Part profile, deze beschrijft een uitgebreide set parameters welke de eigenschappen en afwerking van het materiaal beïnvloeden. Wanneer in één printjob meerdere onderdelen worden ingeladen, dan kan aan elk onderdeel een ander part profile worden toegekend.

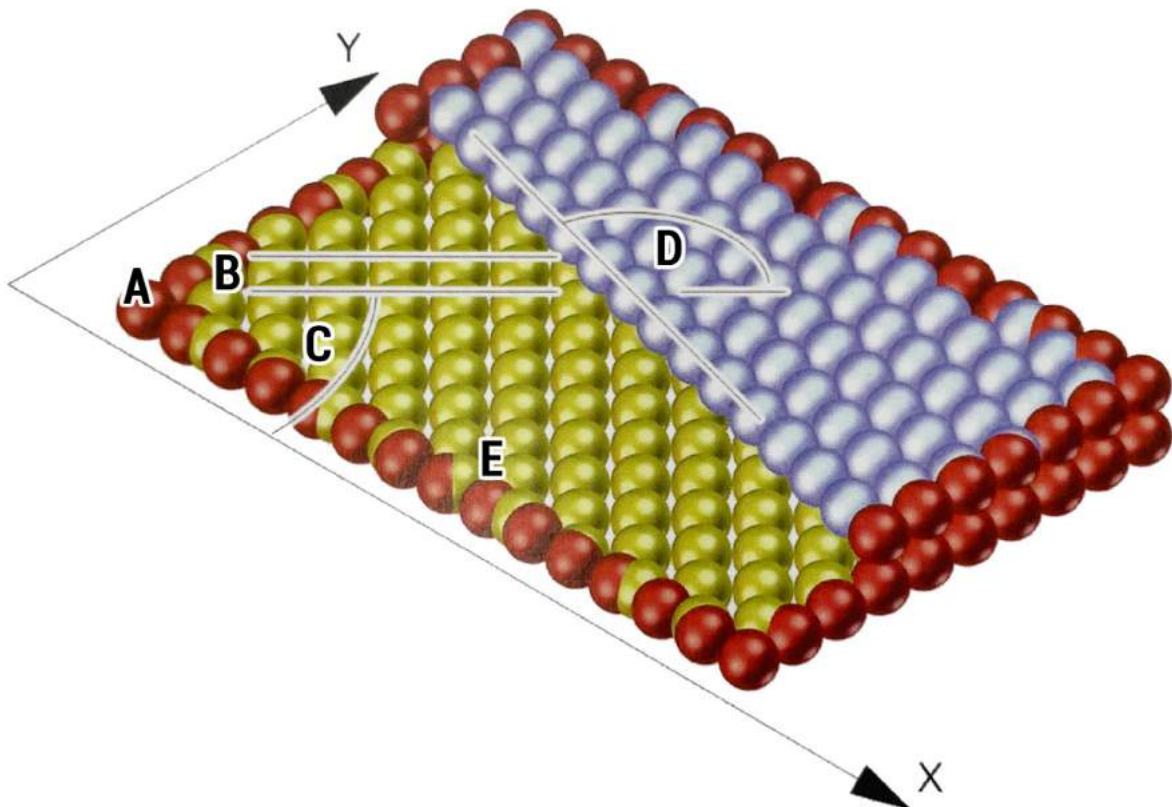
Van de genoemde profielen in de Build Processor is het 'part profile' het meest omvangrijk. De belangrijkste parameter in het part profile is de Drop Aspect Ratio (DAR). De ingevoerde waarde voor DAR wordt vermenigvuldigd met de laagdikte, de resulterende waarde is de onderlinge afstand tussen druppels in de X en Y richting. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 8. DAR wordt gebruikt om machinepaden vast te leggen en heeft vergaande implicaties op het printproces en printkwaliteit. Een complicerende factor is dat DAR afhankelijk is van parameters zoals materiaaltype, verwerkingstemperatuur, discharge én laagdikte. Het instellen van het printproces bij voor APF nieuwe materialen wordt nader toegelicht in hoofdstuk 5.



*Figuur 8. Schematische weergave van de functie van Drop Aspect Ratio (DAR) en laagdikte (LT) voor het vastleggen van onderlinge afstand tussen geëxtrudeerde druppels in de X- en Y-richtingen / binnen de printlaag (B). Afbeelding van Arburg GmbH + Co KG.*

Het part profile bevat nog vele andere parameters. De belangrijkste van deze parameters staan hieronder, waarvan de dikgedrukte parameters in Figuur 9 met onderstaande letters zijn weergegeven:

- A. Aantal contourlijnen aan de huid (X- en Y-richtingen) van het onderdeel;**
  - B. Infill percentage, gestuurd door de tussenafstand tussen parallelle banen van de vulling;**
  - C. Start angle: hoek tov. X-richting waar infill in eerste laag mee wordt aangelegd;**
  - D. Increment angle: hoekverdraaiing van infill voor elke opeenvolgende laag;**
  - E. Infill-contour overlap: overlap tussen de infill en contour(en);**
- 
- F. Printvolgorde
    - F1. Eerst contour of eerst infill;
    - F2. Contouren van buiten naar binnen printen of andersom (alleen bij meerdere contouren);
  - G. Bewegingssnelheden;
    - G1. Bewegingssnelheden zonder extrusie;
    - G2. Snelheid tijdens continue extrusie (infill voor wanddiktes  $\geq 10\text{mm}$  in de XY-richting);
    - G3. Snelheid tijdens discrete extrusie (contour en infill voor wanddiktes  $\leq 2\text{mm}$  in de XY-richting);



*Figuur 9. Schematische weergave van de hoofdzakelijke contour- en infill parameters, zijnde A. Aantal contouren, B. infill percentage, C. Start angle, D. increment angle, E. Infill-contour overlap. Afbeelding van Arburg GmbH + Co KG.*

Voor wanddiktes tussen 2 en 10mm wordt de bouwsnelheid van de infill berekend, waarbij een bouwsnelheid recht evenredig toeneemt met wanddikte. De bewegings- of bouwsnelheid volgt uit de afstand tussen druppels ( $DAR \cdot laagdikte$ ) vermenigvuldigd met de frequentie waarmee de nozzle kan worden geopend en gesloten. De machine in dit onderzoek print met een maximale frequentie van 70Hz voor contouren en 240Hz voor infill. De bouwsnelheid hangt af van de ingestelde procesparameters, maar zijn typisch 15–25mm/s voor contouren en 50–85mm/s voor infill. Door een reeks hardware- en software-updates ligt bij nieuwe machines de maximale frequentie en bouwsnelheid hoger.

### 3.2. Ontwerprichtlijnen

Om producten te kunnen realiseren, moeten ontwerpen voldoen aan bepaalde randvoorwaarden willen ze produceerbaar zijn met APF. Richtlijnen bieden ontwerpers handvatten om tot een geschikt ontwerp te komen. Hieronder volgt een overzicht van belangrijke ontwerprichtlijnen.

#### Materiaalkeuze

Het APF-proces kan standaard granulaat voeden. Hierdoor kunnen veel materiaaltypes én grades worden ingezet in het printproces, van commodity- en engineering plastics tot aan thermoplastische elastomeren met een lage hardheid. Desondanks is niet ieder materiaal geschikt voor APF. In hoofdstuk 5 staat in detail beschreven aan welke voorwaarden het materiaal moet voldoen om deze te kunnen verwerken, en hoe verwerkbaarheid wordt beoordeeld en geoptimaliseerd.

## Mechanische eigenschappen

Bij FFF wordt veelal een (nagenoeg) massieve huid geprint en wordt een laag infillpercentage of vulgraad gebruikt voor de kern. Ook bij APF kan de vulgraad worden ingesteld. Het wijzigen van de vulgraad biedt de mogelijkheid om de mechanische eigenschappen te beïnvloeden.

Waarin APF essentieel verschilt van FFF is de nauwkeurige materiaaldosering. Met APF kan hierdoor in veel gevallen de dichtheid van massief materiaal worden behaald of in ieder geval benaderd. Onder de juiste omstandigheden kunnen dan ook hoogwaardige mechanische eigenschappen worden behaald welke vergelijkbaar zijn aan die van conventionele verwerking.

Desondanks zijn de mechanische eigenschappen niet hetzelfde als bij conventionele verwerking; in het ontwerpproces zal hier dus rekening mee moeten worden houden. In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op mechanische eigenschappen uit geraadpleegde literatuur. In dit onderzoek is ook experimenteel werk verricht met betrekking tot mechanische eigenschappen: In hoofdstuk 6 zijn de mechanische eigenschappen van verschillende grades PP onderzocht, en van één PP-grade ook de invloed van procesparameters op de mechanische eigenschappen. Hoofdstuk 8 behandelt de mechanische eigenschappen onder compressie van schuimachtige materiaalstructuren geprint uit TPU.

## Discharge

Het druppelvolumen heeft een directe invloed op de productiesnelheid en resolutie van het printproces. Met resolutie wordt niet zozeer de maatnauwkeurigheid bedoeld, maar de laagdikte, ruwheid en minimale wanddikte. De discharge wordt ingesteld als een percentage van een druppelvolumen, in stappen van 0,1%. Per nozzlemaat is bij een discharge instelling van 100% een ander druppelvolumen toegekend welke past bij het formaat van de nozzle. Er zijn drie nozzleformaten beschikbaar: 0,15, 0,20 en 0,25mm.

De maximale output van de Freeformer 200-3X met een 0,25mm nozzle, 200% discharge en een frequentie van 240Hz is geschat op circa 70cm<sup>3</sup>/uur. De daadwerkelijke productiecapaciteit ligt meestal lager, omdat procesparameters in praktijk afgestemd worden op de productgeometrie en eisen omtrent ruwheid en afwerking. Arburg geeft een output tot 14cm<sup>3</sup>/uur op bij hun standaard procesparameters voor ABS (INEOS Terluran GP-35) op de 200-3X [1]. Dergelijke output is ook mogelijk op desktop FFF-printers met een fractie van de aanschafprijs hebben van de Freeformer. Het APF-proces is hierdoor mogelijk niet commercieel interessant wanneer FFF toereikend is. APF kan het beste worden ingezet worden bij applicaties waar kwaliteit en reproduceerbaarheid van hoog niveau moeten zijn en bij materialen welke met andere printtechnieken niet (goed) verwerkbaar zijn. Hierbij kan gedacht worden aan engineering polymeren, materiaalgrades met certificering (bijvoorbeeld implanteerbaar of vlamvertragend) en thermoplastische elastomeren.

## Wanddikte

Voor het APF-printproces geldt een minimale wanddikte, welke afhankelijk is van de gekozen procesparameters. In de bouwrichting (Z-richting) is de minimale wanddikte gelijk aan de laagdikte; dwars op de bouwrichting (X- en Y-richtingen) bedraagt de minimale wanddikte de breedte van twee druppels. Ter referentie is in Tabel 2 een lijst met minimale wanddiktes van enkele materialen bij verschillende instellingen weergegeven.

| Material | Grade                      | Discharge | Layer thickness | DAR    | Min. wall thickness (XY) |
|----------|----------------------------|-----------|-----------------|--------|--------------------------|
|          |                            | %         | mm              |        | mm                       |
| SEBS     | Wittenburg Cawiton PR13630 | 50%       | 0.200           | 1.1000 | <b>0.44</b>              |
|          |                            | 75%       | 0.300           | 0.7333 | <b>0.44</b>              |
|          |                            | 75%       | 0.250           | 0.9640 | <b>0.48</b>              |
|          |                            | 100%      | 0.250           | 1.1131 | <b>0.56</b>              |
| PP       | Total-Hanwha BJ550         | 160%      | 0.250           | 1.4100 | <b>0.71</b>              |
|          |                            | 190%      | 0.250           | 1.5500 | <b>0.78</b>              |
|          |                            | 290%      | 0.300           | 1.4567 | <b>0.87</b>              |
|          |                            | 390%      | 0.333           | 1.4445 | <b>0.96</b>              |

**Tabel 2. Procesparameters van SEBS (Wittenburg Cawiton PR13630) en PP (Total-Hanwha BJ550) met in de rechterkolom de minimale wanddikte welke hoort bij elke set procesparameters.**

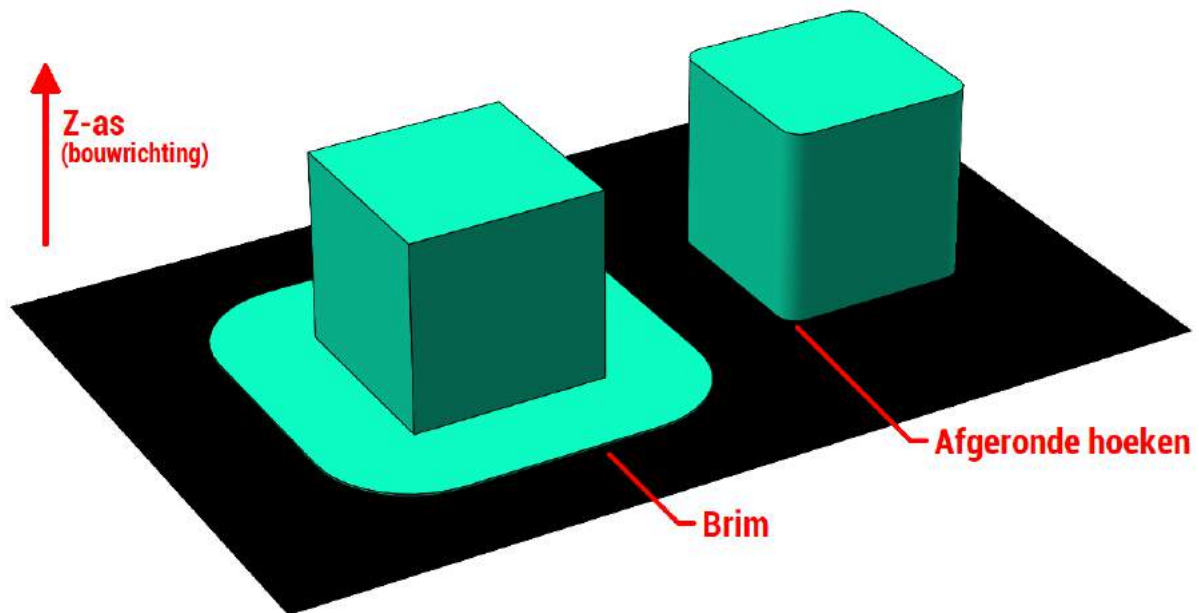
In praktijk kan desondanks een grotere minimale wanddikte noodzakelijk zijn, bijvoorbeeld om te voorkomen dat het geprinte object vervormt door de bewegingen en richtingswisselingen van de bouwplaat. Dit geldt in het bijzonder voor zachte en flexibele materialen of bij het printen van objecten met een grote hoogte (Z-richting) ten opzichte van het voetoppervlak op de bouwplaat. Tijdens het hier beschreven onderzoek is geen limiet voor een maximale wanddikte geconstateerd.

## Geometrie

De Freeformer kan meerdere materialen printen tijdens één printjob. Dit biedt de mogelijkheid (wateroplosbaar) steunmateriaal te gebruiken. Op deze wijze hoeft in het ontwerp weinig rekening gehouden te worden met de eigen ondersteuning van een ontwerp tijdens het printen.

Het gebruik van steunmateriaal verhoogt echter ook het materiaalgebruik, printtijd en vereist naderhand verwijdering. Het gebruik van steunmateriaal kan daarom het beste worden geminimaliseerd of algeheel vermeden door een productontwerp wat zichzelf ondersteunt tijdens het printproces. De ontwerpregels hiervoor zijn soortgelijk aan FFF. In de basis moet sprake zijn van:

- Adhesie aan de bouwplaat. Dit wordt gerealiseerd door een plat vlak van enige omvang als contactoppervlak tussen de bouwplaat en de eerste laag. Indien het contactoppervlak van het product onvoldoende adhesie biedt, kan met behulp van een brim (Figuur 10 L) adhesie aan de bouwplaat worden verhoogd;
- Een vorm welke weerstand biedt tegen pelkrachten die het product kunnen doen oprullen van de bouwplaat. Dit kan worden gefaciliteerd door vanuit het bovenaanzicht op de bouwplaat:
  - Langwerpige delen zoveel mogelijk te vermijden;
  - Scherpe buitenhoeken te vermijden door deze af te ronden (Figuur 10 R);
  - Het gebruik van een brim (Figuur 10 L);
- Een vorm waarbij overhangende delen zichzelf ondersteunen. De grens hiervan is niet hard, maar als leidraad geldt een maximale overhanghoek van 15 à 20° ten opzichte van de Z-richting. Dit is een kleinere hoek dan bij FFF printen (circa 45°) en is voor ontwerpers welke bekend zijn met FFF één van de grootste verschillen om rekening mee te houden tijdens het ontwerpproces.



*Figuur 10. Producten moeten adhesie hebben aan de bouwplaat. Door krimp in het printproces ontstaan pelkrachten waardoor producten kunnen opkrullen van de bouwplaat. Hier is met name sprake van bij (scherpe) buitenhoeken. Een brim helpt dit tegen te gaan én vergroot de algehele adhesie aan de bouwplaat door het contactoppervlak met de bouwplaat te vergroten. Een brim is in de regel maar één laag dik en kan na het printproces relatief eenvoudig mechanisch worden verwijderd. Tegen opkrullen helpt het ook om vanuit het bovenaanzicht op de bouwplaat afrondingen aan te brengen op de buitenhoeken van het product.*

## 4. Literatuuronderzoek, state of the art

De afgelopen jaren zijn er een aantal publicaties geweest omtrent APF. Het aantal is gering, mogelijk vanwege de nieuwheid van de techniek. Desalniettemin worden de uitgegeven teksten in dit hoofdstuk behandeld. Een deel hiervan beschrijft de verwerking van kunststoffen met de Freeformer en de mechanische eigenschappen. Andere beschrijven de mogelijkheid om met APF te produceren voor een specifieke toepassing.

In veel onderzoeken worden mechanische eigenschappen beproefd. Dit gebeurt veelal door middel van trekproeven (E-modulus, treksterkte en rek bij breuk), hoewel ook kerfslagsterkte, vermoeiingsweerstand, oppervlakteruwigheid en trouser tear zijn bepaald. Mechanische eigenschappen zijn onderzocht met ABS, maar ook met PP [4], PMMA [5], PLA [6] en Carbonyl ijzerpoeder met binder [7]. De mechanische eigenschappen zijn ook vergeleken met spuitgieten [8-11].

### 4.1. Gebruikte materialen en verwerking

Met APF kan granulaat verwerkt worden van thermoplastische kunststoffen. Om een materiaal succesvol te kunnen verwerken zullen de verwerkingsparameters achterhaald moeten worden. Dit gebeurt door de invloed en interactie tussen parameter en productkwaliteit te analyseren. Dit is een complex proces aangezien deze interacties voor APF nog niet geheel begrepen worden [5].

In de meeste onderzoeken wordt ABS (INEOS Terluran GP-35) gebruikt, dit materiaal is door Arburg gekwalificeerd waardoor er verwerkingsparameters bekend zijn en gebruikt kunnen worden. Behalve de genoemde ABS is ook een ander amorf kunststof in onderzoeken gebruikt, namelijk PMMA [5, 12]. PMMA is inert en transparant en wordt onder andere gebruikt voor implantaten en lenzen. Hentschel et al. [5] hebben de verwerkingsparameters van een 'medical grade' PMMA bepaald op basis van door Arburg aangeleverde instellingen van een andere PMMA. Het proces om tot nieuwe printinstellingen te komen is beschreven, de drop aspect ratio (DAR), discharge, temperatuur, stuwdruk en infill-contour overlap zijn voor deze PMMA aangepast zodat maatnauwkeurige proefstukken geprint konden worden. Vervolgens zijn er trekstaven geprint en er zijn mechanische eigenschappen bepaald. Het bleek dat materiaal dat niet specifiek voor 3D printen bedoeld is, toch verwerkt kan worden op de APF.

In tegenstelling tot veel FFF-printers kan de APF ook semi-kristallijne thermoplasten verwerken zoals PP [4, 13, 14]. In een onderzoek is met PP op een composietplaat van PP met glasvezel geprint en zo een hybride component gemaakt [13]. Er wordt gerapporteerd dat ongewenste krimp en de daardoor veroorzaakte vervorming niet volledig voorkomen kon worden, ondanks een veelomvattend optimalisatie proces. De krimp wordt veroorzaakt door de semi-kristallijne structuur van het materiaal en is sterk afhankelijk van de geometrie van het onderdeel.

Ovlaque et al. [14] hebben ook PP verwerkt en meten verschillen in kristallisatie door inhomogene afkoeling binnen een onderdeel of printjob [15]. Dit wordt vooral veroorzaakt omdat de hete neus invloed heeft op de temperatuur inbreng en op een aantal plaatsen langer verblijft (keerpunt), herhaaldelijk passeert of sneller beweegt. Het is mogelijk gebleken dat kristallen opnieuw smelten door de nabijheid van de neus die een nieuwe laag aan het printen is.

Een voordeel van de APF techniek is dat er met granulaat gewerkt kan worden en niet met filament, waardoor het knikken van filament bij zachte materialen wordt voorkomen [16, 17]. Zodoende is het mogelijk zachte materialen te verwerken die niet met filament printers gebruikt kunnen worden. Tevens kunnen er materiaalcombinaties geprint worden met harde en zachte materialen. Zo zijn ABS en TPU samen geprint en is de adhesie tussen de materialen onderzocht [18]. Omdat het mogelijk is de positie van druppelkettingen te specificeren kan het hechtvlak (interface) tussen beide materialen aangepast worden. Door de plaatsing van druppelkettingen van beide materialen aan te passen is de interface vergroot en is er in geslaagd de adhesie tussen de twee materialen te verbeteren.

Een drietal medical grade PLA's (PLA, PCLA, PLATMC) zijn gebruikt in een onderzoek naar de variatie van (thermo)mechanische eigenschappen binnen een printjob [6]. Deze kunststoffen worden onder andere gebruikt voor medische implantaten die bedoeld zijn om te degraderen binnen het lichaam. Tijdens de verwerking vindt thermische degradatie plaats en variatie daarbinnen is onwenselijk. Doordat bij APF met de schroef wordt gedoseerd en vervolgens de gedoseerde hoeveelheid geprint, heeft het materiaal dat zich het dichtste bij de neus (en nozzle) bevindt een kortere verblijftijd in de verwarmde cilinder ten opzichte van materiaal dat zich bij de schroefpunt bevindt. Tevens is de verblijftijd langer dan bij spuitgieten het geval is [5]. De thermische degradatie van de polymeren is onder andere gemeten door verschillen in de molaire massa vast te stellen tussen het ingangsgranulaat en verwerkt materiaal. Na verwerking is de molaire massa zowel aan het begin van een dosering als aan het eind bepaald. De molaire massa blijkt lager te zijn aan het eind van een druppelketting bij PLA en PLATMC en bij hogere temperaturen zoals 240°C ook bij PCLA [6].

Ook farmaceutische polymeren zijn gebruikt zoals Hypromellose Acetate Succinate (HPMCAS) en Polyethylene Oxide (PEO) [19]. Er zijn poreuze tabletten geprint met verschillende vulpercentages (infill). Het blijkt mogelijk de porositeit te gebruiken om de medicijn dosering over de tijd te sturen. Ook met TPU zijn poreuze structuren gebouwd om medicijnen te doseren [20].

In een andere studie is Carbonyl ijzerpoeder samen met een binder (verhouding 60/40) gebruikt om trekstaven te produceren analoog aan metaal spuitgieten (Metal Injection Moulding, MIM) [7]. Het is met dit materiaal mogelijk gebleken om proefstukken te produceren die vergelijkbaar zijn met MIM wat betreft dichtheid.

Buhl et al. hebben getracht ABS met antibacterieel materiaal in poedervorm en als vloeistof te mengen in het voed- en opsmeltproces van de printer [21]. De mengwerking in het APF-proces was onvoldoende om een antibacterieel product te printen. Dit werd wel bereikt door het ABS en antibacterieel materiaal vooraf te componderen.

## 4.2. Mechanische eigenschappen

Een aantal studies hebben de mechanische eigenschappen van APF geprinte materialen beproefd en gerapporteerd. In de meeste gevallen was dit ABS (INEOS Terluran GP-35) [9, 22, 23], maar ook PMMA is gebruikt [5]. De geprinte ABS-proefstukken (trekstaven volgens ISO 527) zijn tevens vergeleken met spuitgietproefstukken [9, 22, 23]. Het is mogelijk om ABS trekstaven te printen in het XY-vlak met een vergelijkbare treksterkte (32,4 MPa, 90%) en E-modulus (100%) aan de spuitgietvariant [22, 23]. De rek bij breuk behaalt 70% van de spuitgietwaarde. In de Z-richting wordt de treksterkte echter gereduceerd tot minder dan 30% van de spuitgiet exemplaren en de rek bij breuk tot <10% van de spuitgietwaarde. Met PMMA wordt een E-modulus van 93% en een treksterkte van 72% gehaald t.o.v. de gerapporteerde waarde uit het datablad van de materiaalfabrikant. De slagsterkte van APF-geprint ABS is ook gemeten

(20 kJ/m<sup>2</sup>) en werd vergeleken met spuitgietwaardes, welke twee tot vijf keer zo hoog zijn ten opzichte van APF [9].

Uit deze publicaties blijkt dat het mogelijk is om met ABS op de Freeformer treksterktes en E-moduli te behalen die vergelijkbaar zijn met spuitgieten. Echter blijven de rek bij breuk en slagsterkte achter. Tevens is er sprake van anisotropie waarbij rechtopstaande proefstukken (Z-richting) duidelijk lagere waardes behalen.

Drie studies hebben verwerkingsinstellingen gevarieerd en mechanische eigenschappen beproefd van ABS [22-24]. Proefstaven (INEOS Terluran GP-35) zijn geprint in de XY-richting waarna er trekproeven zijn uitgevoerd.

Volgens Charlon et. al. blijkt de dichtheid sterk te correleren met de stijfheid en sterkte van de ABS-proefstaven. De dichtheid van de proefstaven wordt beïnvloed door discharge, infill, het aantal contourlijnen, de infill-contour overlap, neustemperatuur en increment angle. Deze bepalen E-modulus en treksterkte tot een maximum (=plafond) waarbij deze niet verder toenemen. Ook Pinter et al. vonden een duidelijk verband tussen mechanische eigenschappen als E-modulus, buigmodulus en treksterkte en de dichtheid van de proefstukken [9]. Hirsch et. al. hebben de dichtheid niet onderzocht maar merken op dat de form factor (DAR) en laagdikte een grote invloed heeft op de treksterkte en E-modulus. Een kleinere form factor (DAR) en laagdikte bij gelijke discharge resulteert in een kleinere druppelafstand waardoor er in dezelfde geometrie meer materiaal geëxtrudeerd wordt.

Een hoge dichtheid blijkt moeilijk te combineren met een hoge maatnauwkeurigheid. De dichtheid wordt verhoogd door de druppelkettingen met enige druk tegen vorige lagen te leggen waardoor holtes en poriën worden gevuld. Dit zorgt er echter ook voor dat de maatnauwkeurigheid negatief beïnvloed wordt [24].

Charlon et. al. hebben geen overeenkomst gevonden tussen verwerkingsparameters en de gemeten rek bij breuk. Bij het onderzoek van Hirsch et. al. hebben de kamer-, neustemperatuur, laagdikte en printrichting invloed op de rek bij breuk, waarbij hogere temperaturen leiden tot een hogere breukrek. Er wordt daarbij opgemerkt dat de invloed van de verwerkingstemperatuur op de rek bij breuk groter is bij kleinere laagdiktes (150 µm t.o.v. 200 µm). Bij het onderzoek van Charlon et. al. is de laagdikte gevarieerd van 250 tot 310 µm.

Drie studies behandelen de invloed van printrichting van de vulling op de mechanische eigenschappen [22, 23]. Alle drie gebruiken hetzelfde materiaal (ABS, INEOS Terluran GP-35), maar de gebruikte verwerkingsparameters en het aantal proefstukken per printjob verschillen wel. Alle proefstukken zijn geprint in het XY-vlak waarbij de 0°-richting de lengterichting van de trekstaaf is. In de genoemde onderzoeken is de stijfheid het laagste wanneer enkel in de 0°-richting geprint wordt. De 90°-richting en afwisselende hoeken (0/90°, 90/0°, 45/-45° en 45/90°) leverden hogere waarden op. De verschillen tussen de E-moduli bleken substantieel te zijn, van circa 1600MPa in de 0°-richting tot circa 2050MPa in de 45/90°-richting [24]. Er werd minder overeenkomst tussen de onderzoeken gevonden wat betreft de treksterkte.

De verschillen in verwerkingsinstellingen tussen de studies maken het lastig deze verschillen te duiden. Wel blijken de proefstukken met de 45°-printrichting (45/-45° en 45/90°) de hoogste waardes op te leveren binnen de onderzoeken (respectievelijk circa 35MPa en 32MPa). Wanneer de dichtheid

van de proefstukken bepaald werd, bleek dat de proefstukken met de hoogste dichtheid de beste mechanische eigenschappen te behalen [24].

Hentschel et al. heeft mechanische en uiterlijke eigenschappen van geprint PMMA vastgesteld [5]. De printinstellingen zijn zo gekozen dat de proefstukken visueel in orde zijn en geen vervorming vertonen. Dit leverde mechanische eigenschappen op die lager waren dan de (vermoedelijk spuitgiet) gegevens van de PMMA fabrikant. Het blijkt dat het produceren van een onderdeel wat visueel in orde is en geen vervorming vertoont niet automatisch leidt tot een onderdeel dat optimale mechanische eigenschappen heeft.

Het uiterlijk wordt voor een deel bepaald door de oppervlakteruwheid. Van de geteste parameters blijken de laagdikte en DAR hebben de meeste invloed op oppervlakteruwheid. Met een kleinere laagdikte en DAR wordt de ruwheid geminimaliseerd [22].

Uit de behandelde onderzoeken blijkt dat de treksterkte en E-modulus vooral wordt bepaald door de dichtheid. De dichtheid wordt bepaald door discharge, infill percentage, aantal contourlijnen, infill-contour overlap en nozzle temperatuur. Wanneer er met geprint wordt met laagdiktes  $\leq 200 \mu\text{m}$  blijken de nozzle- en bouwkamer temperatuur invloed te hebben op de rek bij breuk. Ook de printrichting heeft hierop invloed. Dit blijkt ook het geval wanneer PP verwerkt wordt. Daarbij wordt opgemerkt dat hogere (bouwkamer) temperaturen bijdragen aan een betere adhesie tussen de druppelkettingen [4].

### 4.3. Toepassingen

Een aantal onderzoeken hebben getracht om de APF te gebruiken voor een specifieke toepassing. In de medische industrie worden materialen gecertificeerd voor gebruik in bepaalde toepassingen. Omdat de APF gevoed wordt met granulaat is er geen extra verwerkingsstap nodig zoals het maken van filament, wat een nieuwe certificering met zich mee zou brengen. Het bleek mogelijk om met de APF een PMMA te verwerken die gebruikt wordt in de medische diagnostische industrie [5].

Lab-on-a-chip wordt onder andere gebruikt voor geneesmiddelen en biomedische toepassingen. Ten behoeve van het maken van een lab-on-a-chip is het mogelijk gebleken om een vloeistofdicht reservoir voor een celcultuur direct op een onderliggend product te printen [25].

Door met bijvoorbeeld de laagdikte, discharge of het vulpercentage te variëren kunnen verschillende open schuimstructuren geprint worden met de APF. Open schuimstructuren kunnen o.a. worden gebruikt voor filtratie. Het bleek mogelijk om reproduceerbaar open celstructuren te printen met poriëngroottes van 22 tot  $466 \mu\text{m}$  [8].

Het printen van kleine onderdelen zoals een stent met een diameter van 4 mm is niet gelukt op de APF [26]. Geprinte lagen koelen nauwelijks af, onder andere doordat het printbed dicht bij de nozzle blijft terwijl deze constant warmte uitstraalt. Hierdoor behouden de lagen niet hun vorm wanneer er een nieuwe laag tegenaan geprint wordt.

Uit ander onderzoek blijkt dat andere printtechnieken zoals SLS (EOS) en FFF (Ultimaker) veelal nauwkeuriger zijn en kleinere maattoleranties kunnen behalen dan APF [27]. Er is geen vorm- of plaatstolerantie gemeten waarbij de APF het meest nauwkeurig was. Dit wordt verklaard door de kleinere laagdiktes die bij de andere printers mogelijk waren.

## 4.4. Conclusies literatuur

In de afgelopen jaren zijn er enkele onderzoeken gepubliceerd die naar Arburg Plastic Freeforming verwijzen. Verschillende materialen zijn gebruikt op de machine, vaak ABS maar ook materialen als PP, PMMA, PLA en TPU. Mechanische eigenschappen zijn beproefd en blijken in veel gevallen afhankelijk van de dichtheid van de geprinte proefstukken. Voor de rek bij breuk blijkt de adhesie tussen druppelkettingen ook van belang te zijn.

Een aantal onderzoeken wijzen op de mogelijkheden die het printen met kunststofgranulaat heeft, onder meer voor het printen van gecertificeerde medische polymeren en zachte kunststoffen. Andere onderzochte mogelijkheden is het overprinten van PP op een PP-composiet en 2K printen met ABS en TPU.

De gevonden literatuur wijst op de mogelijkheid om diverse materialen te verwerken met APF die met andere printtechnieken nauwelijks mogelijk zijn, zoals semi-kristalijn of zacht materiaal. Denk bijvoorbeeld aan PP of Thermoplastische Elastomeren (TPE's). Toch zijn er erg weinig onderzoeken over APF waarin de genoemde materialen worden behandeld of gebruikt. Met de beschikbare informatie is het niet voldoende mogelijk om de (on)mogelijkheden van geprinte TPE of PP producten met APF te benoemen. Om de mogelijkheden en grenzen van de techniek en materialen te duiden is aanvullend (praktijk) onderzoek nodig.

## 5. Kwalificatie van materialen voor APF

Eerder in de publicatie is reeds benoemd dat de Freeformer grote vrijheid in materiaalkeuze biedt door het gebruik van standaard granulaat en open instellingen. Hoewel Arburg en derden al verscheidene materialen succesvol hebben verwerkt op de machine, is de kans groot dat een beoogde materiaalgrade nog niet eerder is verwerkt op de Freeformer. In dergelijke gevallen moet de verwerkbaarheid van een materiaalgrade op de Freeformer worden beoordeeld of gekwalificeerd.

In dit hoofdstuk staan de belangrijkste stappen en bevindingen omtrent kwalificatie van materiaal en printproces beschreven. Hierbij is gebruik gemaakt van een basisprocedure van Arburg en aanvullingen en verbeteringen op deze procedure door het Lectoraat Kunststoftechnologie. Kennis van de werking van de machine en beschikbare parameters (zie hoofdstuk 3) is van belang als voorkennis om dit hoofdstuk te begrijpen.

Voor een stabiel en succesvol proces moet aan enkele randvoorwaarden worden voldaan. Globaal kent APF hierin grote overeenkomsten met FFF. Er moet namelijk sprake zijn van:

- Een stabiel extrusieproces;
- Extrusie van de juiste hoeveelheid materiaal;
- Adhesie van de smelt aan de bouwplaat;
- Adhesie van de smelt aan reeds geprint materiaal;
- Vormbehoud van reeds geprint materiaal tijdens het printproces;

Elk van deze aspecten wordt getoetst en bijgesteld waar dit nodig én mogelijk is. Als aan één van de bovenstaande randvoorwaarden niet (volledig) wordt voldaan, dan is er geen sprake van een stabiel printproces en kan geen hoogwaardig eindproduct worden behaald.

### 5.1. Instellen extrusieproces

Materiaalkwalificatie begint met het verkrijgen van een stabiel extrusieproces. Bij een stabiel extrusieproces is sprake van een constante temperatuur en een min of meer constante druk bij een gegeven discharge; de smelt oogt homogeen en is vrij van sporen van (thermische) degradatie, luchtbellen of vocht in het materiaal. Voor het bereiken van een stabiel extrusieproces met APF zijn enkele belangrijke randvoorwaarden bekend:

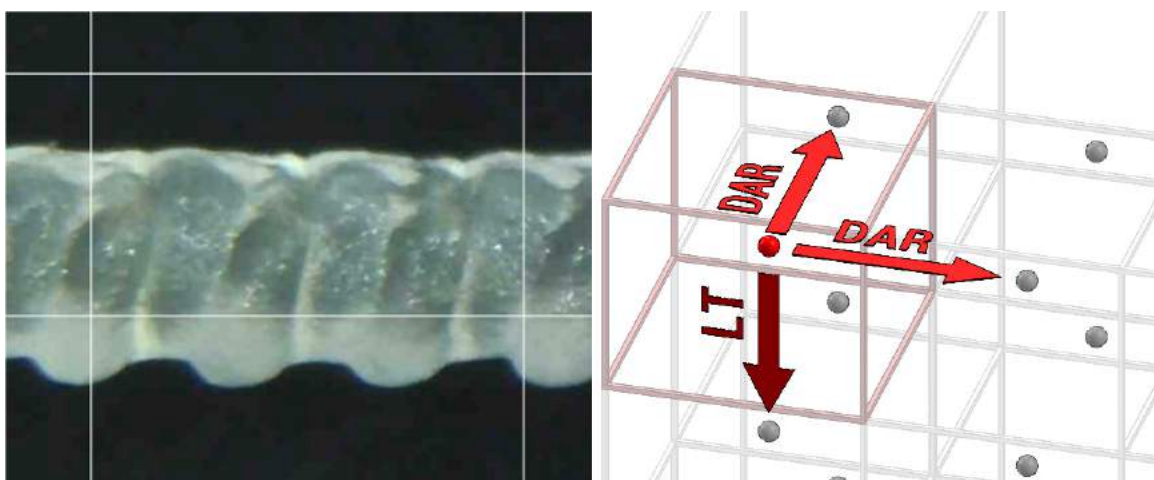
- Het materiaal heeft het formaat van standaard granulaat. De voorkeur gaat uit naar extrusie- en spuitgietgrades;
- Het granulaat is verwerkbaar bij temperaturen  $\leq 350^{\circ}\text{C}$  ( $\leq 450^{\circ}\text{C}$  voor de 'High-temperature' versie) waarbij de injectiedruk bij voorkeur  $\leq 600$  bar en in ieder geval  $\leq 800$  bar moet blijven. Hoewel het afhangt van het type polymeer, de smeltviscositeit en de beoogde productiesnelheid of hier aan wordt voldaan, zijn in dit onderzoek materialen over een breed bereik aan smeltviscositeiten (4–34g/10min) succesvol geprint;
- Het materiaal is voldoende thermisch stabiel voor een verblijftijd in de cilinder van minimaal 5 minuten en bij voorkeur meer dan 10 minuten;
- Bij voorkeur is het materiaal vrij van vaste deeltjes en vulstoffen. Eventueel aanwezige vaste deeltjes of vulstoffen in het granulaat hebben een maximale deeltjesgrootte van circa  $10\mu\text{m}$  ten behoeve van het passeren door de spleet tussen de naald en de nozzle van de printer [28];
- Wanneer de nozzle afgesloten is mag er onder bedrijfsdruk geen materiaal uit lekken;

- Het materiaal moet van tevoren zijn gedroogd conform de eisen welke bij verwerking via extrusie of spuitgieten worden gesteld.

Bij het samenstellen van procesparameters zijn spuitgiet- of extrusieparameters van de materiaalleverancier geschikt als startpunt. Hierbij wordt geadviseerd de temperaturen aan de lage kant in te stellen van wat de materiaalleverancier adviseert. Dit omdat de verblijftijd in de Freeformer in de regel langer is dan bij conventionele productie en thermische degradatie uiteraard voorkomen moet worden. Initieel moet het extrusieproces slechts stabiel zijn. Zodra een stabiel printproces is bereikt, dan kan worden gekozen parameters als de temperatuur, dosering en decompressie te optimaliseren.

## 5.2. Instellen parameters druppelextrusie

Zodra een stabiel extrusieproces behaald is, worden de parameters voor druppelextrusie ingesteld. In beginsel worden hiervoor drie parameters gebruikt: discharge, laagdikte en Drop Aspect Ratio (DAR). Op de machine wordt discharge ingesteld, het werkelijke volume van één druppel zonder beschrijving van vorm (Figuur 11 L). De laagdikte en DAR worden in de slicing software vastgelegd en beschrijven de onderlinge afstand tussen druppels in de X, Y- (DAR) en Z- (laagdikte) richting. De druppelafstanden beschrijven een doosvormig, virtueel druppelvolumen  $V_{\text{slicer}}$  (Figuur 11 R).



**Figuur 11.** Links: 'Droplet chain' of druppelketting welke door de machine is geëxtrudeerd. Met discharge wordt een expliciet volume voor een druppel beschreven, maar niet haar vorm. Rechts: Schematische weergave van laagdikte (LT) en Drop Aspect Ratio (DAR), welke de vorm van een druppel en hierdoor impliciet een druppelvolumen beschrijven.

De mate waarin de slicer parameters overeenkomen met de geëxtrudeerde druppels heeft invloed op processtabiliteit, meetnauwkeurigheid én materiaaldichtheid. Dit maakt het instellen van laagdikte, DAR en discharge één van de belangrijkste aspecten van materiaalkwalificatie. Tabel 3 beschrijft enkele complicaties welke tijdens dit onderzoek zijn geobserveerd als gevolg van een slechte overeenkomst tussen de parameters van de slicer en de geëxtrudeerde druppels.

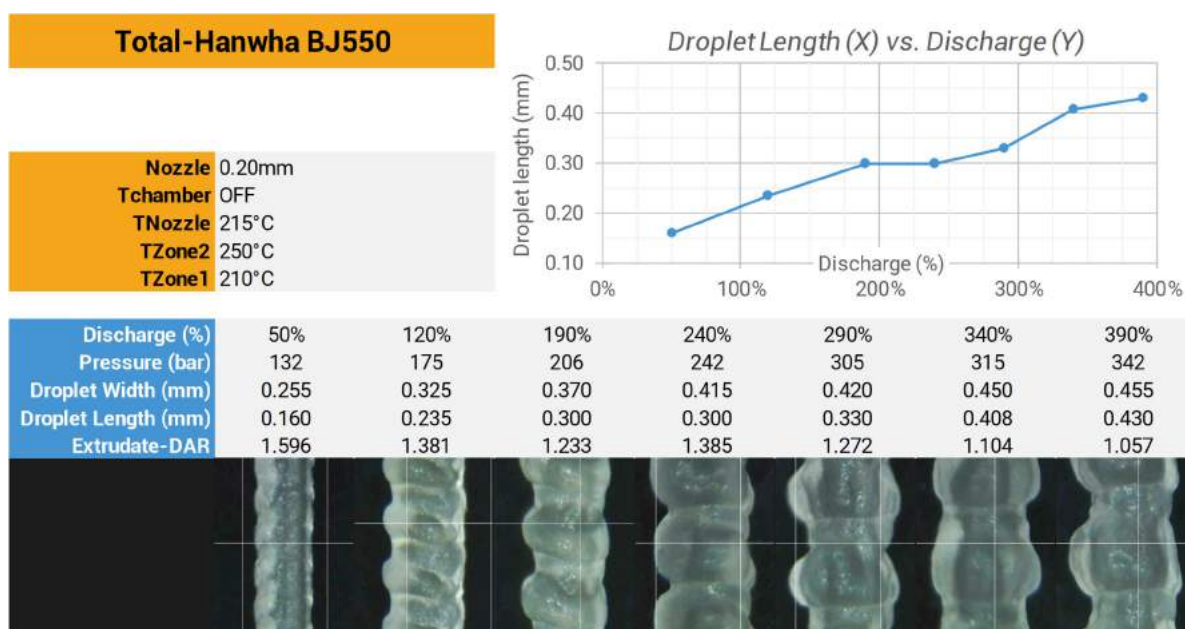
|                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $V_{\text{Slicer}} < \text{Discharge}$                                    | Overextrusie: Hoge materiaaldichtheid maar slechte maatnauwkeurigheid, verdrukking van materiaal. In extreme situaties: materiaal puilt uit, instabiel printproces. Zie Figuur 13.                                                                            |
| $V_{\text{Slicer}} > \text{Discharge}$                                    | Onderextrusie: Goede maatnauwkeurigheid maar lage materiaaldichtheid, aanwezigheid van luchtinsluitingen (poriën). In extreme situaties: print zakt in, instabiel printproces. Zie Figuur 13.                                                                 |
| Afwijking druppelvorm tussen $V_{\text{Slicer}}$ en geëxtrudeerde druppel | Kleine verschillen worden in het proces opgevangen. In extremere gevallen conformeert het extrudaat niet goed naar slicer volume. Een stabiel printproces is mogelijk, maar vereist compromissen ten aanzien van materiaaldichtheid en/of maatnauwkeurigheid. |
| Laagdikte > Lengte druppel                                                | Extrudaat hecht niet (goed) aan ondergrond. Onder deze omstandigheden is geen stabiel printproces mogelijk.                                                                                                                                                   |

**Tabel 3. Invloed van de mate van overeenkomst tussen de beschrijving van druppelvolumen en -vorm en werkelijk geëxtrudeerde druppelvolumen en -vorm.**

Arburg heeft een procedure voor het vaststellen van geschikte parameters voor laagdikte, DAR en discharge. Hieronder volgt een samenvatting van de methodiek welke Windesheim hanteert inclusief haar eigen verbeteringen en aanvullingen. In Bijlage 1 staan de methodiek van Arburg en de aanvullingen van Windesheim afzonderlijk beschreven.

## Discharge en laagdikte

Het instellen van druppelextrusie begint met het selecteren van discharge (druppelvolumen). Het instellen van discharge heeft invloed op de benodigde laagdikte en DAR en is bepalend voor de oppervlaktekwaliteit, detailniveau en (volumetrische) bouwsnelheid die wordt behaald. Het uitvoeren van een 'discharge scan' biedt hulp bij het selecteren van de discharge. Een discharge scan bestaat uit het vastleggen van de lengte, breedte en vorm van druppels voor een uiteenlopend bereik van discharge met behulp van een microscoop (Figuur 12).



**Figuur 12. Discharge scan van PP (Total-Hanwha BJ550). Uit de discharge scan blijkt de invloed van discharge op druppellengte- en vorm. De gegevens worden ingezet bij het kiezen van een geschikte combinatie van discharge en laagdikte.**

Voor een stabiel printproces moeten geëxtrudeerde druppels langer zijn dan de laagdikte, anders verbinden druppels niet (op de juiste plaats) met de bouwplaat of onderliggende printlaag. Arburg stelt dat de druppellengte idealiter 1,1 – 1,3x groter is dan de laagdikte [28]. De grafiek rechtsboven in Figuur 12 geeft de relatie tussen discharge (X-as) en druppellengte (Y-as) weer zodat een juiste combinatie van discharge en laagdikte kan worden geselecteerd.

In veel gevallen moet de afweging worden gemaakt tussen hoge oppervlaktekwaliteit en detailniveau (kleinere druppels en laagdiktes) versus hoge productiesnelheid (grotere druppels en laagdiktes). Initieel wordt een combinatie van discharge en laagdikte gekozen; mocht tijdens of na kwalificatie blijken dat de resulterende afwerking of productiesnelheid nog te wensen overlaat, dan fungeert de discharge scan als databank waarmee gemakkelijk en snel een nieuwe combinatie van discharge en laagdikte kan worden gekozen.

### Drop Aspect Ratio (DAR)

Met een gekozen combinatie van discharge en laagdikte blijft er één onbekende over: de drop aspect ratio (DAR). De DAR-waarde voor de slicer kan worden geschat door het corrigeren van de 'Extrudate-DAR' (Figuur 12) van de gekozen discharge voor de mate waarin de druppel in elkaar wordt geduwd om de laagdikte te behalen, zoals beschreven door Vergelijking 1.

$$DAR_{Slicer} \approx DAR_{Extrudate} * \frac{Droplet\ length}{Layer\ thickness}$$

*Vergelijking 1. Formule voor het maken van een eerste schatting van Drop Aspect Ratio (DAR) voor de slicer software.*

Vervolgens wordt een reeks DAR-waarden gegenereerd, zowel lager (kleinere XY-afstand tussen druppels) als hoger (grotere XY-afstand tussen druppels) dan de geschatte waarde. Met deze instellingen worden vervolgens gelijktijdig proefstukken geprint, zoals weergegeven in Figuur 13. Visueel wordt beoordeeld bij welke DAR het minste sprake is van onder- of overextrusie. Daarna wordt een reeks kubussen geprint met kleinere verschillen tussen de DAR instellingen. Door dit proces te herhalen wordt stapsgewijs toegewerkt naar een visueel acceptabele kwaliteit. Afhankelijk van de gewenste kwaliteitseisen kan uiteraard de kwaliteit ook worden beoordeeld aan de hand van metingen aan maatnauwkeurigheid, materiaaldichtheid en mechanische eigenschappen.



**Figuur 13.** Proefstukken geprint uit ABS (INEOS Terluran GP-35) met een 0.20mm nozzle, een laagdikte van 300µm, 115% discharge en DAR-waarden van 0.70 (links) tot 1.00 (rechts). Op de samples met DAR 0.70 en 0.80 zijn duidelijke sporen van overextrusie zichtbaar, het kunststof puilt uit. Het sample met DAR 1.00 toont tekenen van onderextrusie, de bovenkant vertoont kuiltjes.

Zodra DAR is vastgelegd, dan kan worden gekozen voor verdere optimalisatie aan bijvoorbeeld het aantal contouren en de overlap tussen infill en contour. In de slicing software kunnen per printrichting (X, Y en Z) ook schaalfactoren worden ingesteld om krimp te compenseren.

De stapsgewijze methode van Arburg voor vaststellen van DAR vereist beschikbaarheid van de machine voor printproeven en kan tijdrovend zijn. Om de schatting van DAR te verbeteren, is Windesheim gekomen met de Droplet Parameter Calculator (DPC). In Bijlage 1 staat de DPC gedetailleerd uitgelegd; samengevat moet de gebruiker in de DPC de volgende gegevens invoeren:

- Een reeds gekwalificeerde combinatie van discharge, laagdikte en DAR (begin parameter set);
- Twee van de drie parameters (discharge, laagdikte, DAR) van de nieuwe parameter set.

De DPC berekent de overgebleven onbekende. In praktijk is de gemakkelijkste aanpak om de discharge scan te gebruiken als hulpmiddel bij de keuze van discharge en laagdikte, en DAR te laten berekenen door de calculator. De berekende waarde is het meest nauwkeurig wanneer de begin-parameter-set van hetzelfde polymeer is. Desalniettemin kunnen ook de instellingen van een ander polymeer, zoals één van de door Arburg gekwalificeerde standaard materialen, worden gebruikt als begin parameter set.

Tijdens het onderzoek is de DPC veelvuldig gebruikt als deel van kwalificatie en optimalisatie voor verscheidene materialen. Hoewel de DPC berust op de nodige aannames en vereenvoudigingen (zie ook Bijlage 1), bleek de calculator nauwkeuriger dan de schatting met Vergelijking 1 en werd in veel gevallen zelfs een stabiel printproces met hoogwaardige printkwaliteit behaald zonder extra printproeven of (iteratieve) wijzigingen aan DAR.

### 5.3. Instellen printproces

Omdat het instellen van het juiste extrusievolume wordt bereikt met printproeven, worden aan het printproces gerelateerde aspecten gelijktijdig met deze proeven ingesteld.

#### Adhesie aan bouwplaat

Voor een succesvol printproces moet sprake zijn van adhesie tussen printmateriaal en bouwplaat zodat het geprinte materiaal vast blijft zitten aan de bouwplaat tijdens het printproces. Tegelijk is het gewenst dat het geprinte object naderhand van de bouwplaat te verwijderen is zonder deze te beschadigen.

Voor het faciliteren van bouwplaatadhesie hanteert Arburg in eerste plaats het gebruik van een door Arburg ontwikkelde kunststof bouwplaat met een ruw oppervlak. Op deze bouwplaat hechten de meeste materialen in meer of mindere mate. Wanneer er onvoldoende adhesie is wordt gebruik gemaakt van het printen van een (water)oplosbaar supportmateriaal (Armat). Er zijn verschillende types Armat beschikbaar voor compatibiliteit met polaire en apolaire materialen. Omdat de machine een vacuümtafel heeft kan desgewenst ook ander plaatmateriaal als bouwplaat worden ingezet.

Ondanks het gebruiksgemak voor bouwplaatadhesie en ondersteuning van overhangende elementen in een ontwerp, kent het inzetten van Armat inherente nadelen: het materiaal bezet een discharge unit en het printen van Armat kost extra tijd zowel bij het printen als het verwijderen naderhand. Een alternatief voor Armat is gewenst, en om 2K ontwerpen te kunnen printen op machines met twee discharge units (zoals bij het Lectoraat Kunststoftechnologie) zelfs noodzakelijk.

Uit proeven lijkt adhesie aan de bouwplaat afhankelijk te zijn van diverse aspecten:

- Het type materiaal dat wordt geprint;
- Het type materiaal van de bouwplaat;
- Hechtingsmiddelen, coatings of verontreinigingen op de bouwplaat;
- Het contactoppervlak tussen print en bouwplaat;
  - Bodemvlak van het ontwerp;
  - Het gebruik van een brim bij de eerste printlaag;
  - Oppervlakteruwheid van de bouwplaat;
- De afstand tussen nozzle en bouwplaat;
- De temperatuur van de smelt en bouwkamer;

Het verschilt per materiaal hoe uitdagend het is om de gewenste adhesie aan de bouwplaat te krijgen. Ervaringen binnen dit onderzoek met betrekking tot specifieke materialen zijn verderop in dit rapport beschreven. In Hoofdstuk 6 wordt PP behandeld en in Hoofdstuk 7 thermoplastische elastomeren.

## Adhesie tussen printlagen

Naast adhesie tussen de bouwplaat en eerste printlaag moet er ook sprake zijn van adhesie tussen het extrudaat en reeds geprinte lagen materiaal. In essentie is bij extrusie op onderliggende lagen sprake van een lasproces, waarbij de ondergrond een lagere temperatuur heeft dan het extrudaat. Adhesie bij lasprocessen ontstaat door moleculaire diffusie van polymeerketens, waarbij de adhesie afhankelijk is van het polymeer, de verwerkingstemperatuur en de aanwezigheid van eventuele vullers [29-31]. Op soortgelijke wijze kan verwacht worden dat de adhesie tussen printlagen afhankelijk is van materiaaleigenschappen als moleculair gewicht, morfologie, smelttemperatuur en kristalliniteit, alsmede de temperatuur van het extrudaat en de onderliggende laag.

In extreme gevallen is de adhesie tussen het extrudaat en de onderliggende laag zo slecht dat objecten in het printproces delamineren of extrudaten algeheel niet hechten. Dergelijke problemen kunnen ontstaan wanneer het materiaal additieven bevat die adhesie hinderen, zoals 'mold release agents' of wanneer de onderliggende laag reeds te ver is afgekoeld en/of gekristalliseerd.

## Vervorming tijdens printproces

Het laatste aspect van materiaalkwalificatie is het bereiken van een printproces waarbij geen, of minimale, vervorming van het te printen object optreedt. Vervorming kan om de volgende redenen optreden:

- Opkrullen van object;
  - Opbouw krimp(spanning) in materiaal, zie hoofdstuk 6;
  - Onvoldoende adhesie aan bouwplaat;
  - Temperatuur bouwkamer te laag, kristallisatie treedt te kort na extrusie op;
- Inzakken van object onder eigen gewicht;
  - Lage stijfheid van bouw materiaal;
  - Temperatuur bouwkamer te hoog, onvoldoende afkoelsnelheid;
  - Overhang(hoek) te groot;

- Deformatie bij richtingswisselingen van de bouwtafel;
  - Lage stijfheid van bouw materiaal;
  - Object met grote hoogte ten opzichte van voetoppervlak aan bouwplaat;

Omdat het vervormen van objecten gerelateerd kan zijn aan de geometrie ervan, is het geadviseerd in een gevorderd stadium van materiaalkwalificatie objecten te produceren die de beoogde applicatie representeren, of proefobjecten te produceren met complexere geometrieën om de printkwaliteit te beoordelen bij verschillende wanddiktes, overhangs en formaten. Materiaalspecifieke bevindingen zijn gerapporteerd in Hoofdstuk 6 en 7.

## 6. Printen van Polypropyleen

Met dank aan haar breed inzetbare eigenschappen en gunstige prijs is Polypropyleen één van de meest gebruikte kunststoffen wereldwijd [32]. Het materiaal wordt ook veel gebruikt bij spuitgieten voor productie van behuizingen en complexe 3D geometrieën. Ook naar de verwerking van PP via Additive Manufacturing is veel interesse.

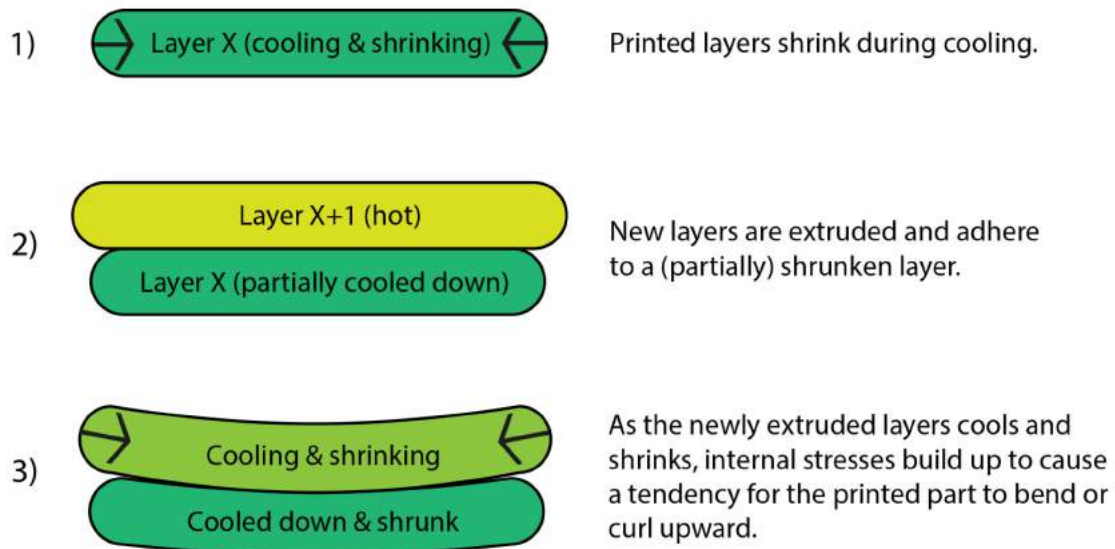
Ondanks de interesse vanuit de industrie wordt geprint PP nog niet veel toegepast. In Tabel 4 zijn mechanische eigenschappen uit datasheets vergeleken van twee PP Copolymeren voor spuitgieten met die van verscheidene commercieel beschikbare PP's voor FFF en SLS printen. Hieruit blijkt dat de mechanische eigenschappen van de meeste PP printmaterialen niet representatief zijn voor gespuitsgiet PP, wat de mogelijkheden voor prototyping en productie van reserveonderdelen via AM ernstig limiteert.

| Process               | Company        | Grade name          | Modulus       |      | Yield Strength |      | Strain @ Break |      |
|-----------------------|----------------|---------------------|---------------|------|----------------|------|----------------|------|
|                       |                |                     | Tensile (MPa) |      | Tensile (MPa)  |      | %              |      |
| Print orientation --> |                |                     | XY            | Z    | XY             | Z    | XY             | Z    |
| FFF                   | BASF           | Ultrafuse PP        | -             | -    | 15.5           | 9    | 119            | 5.4  |
| FFF                   | Braskem        | FL100PP             | -             | -    | 16             | -    | -              | -    |
| FFF                   | Ultimaker      | Ultimaker PP        | 253           | 234  | 10.6           | 8.6  | >800           | 22.8 |
| SLS                   | AM Polymers    | PP01                | 820           | 800  | 18             | 16   | 30             | 10   |
| SLS                   | BASF           | Ultrasint PP nat 01 | 1400          | 1400 | 28             | 28   | 30             | 10   |
| SLS                   | DSM            | Arnilene AM6002 (P) | 800           | 800  | 17.6           | 16.8 | 9              | 6    |
| IM                    | Total          | Hanwha BJ550        | -             |      | 28             |      | >200           |      |
| IM                    | LyondellBasell | EP540P              | 1300          |      | 28             |      | >50            |      |

**Tabel 4. Vergelijking van mechanische eigenschappen tussen PP grades verwerkt via FFF (Fused Filament Fabrication), SLS (Selective Laser Sintering) en PP Copolymeren verwerkt via spuitgieten (IM).**

Aangezien voor APF conventionele granulaten gebruikt worden als grondstof lijkt het een logische keuze om gebruikmakend van deze techniek PP te printen. Desondanks zijn ook voor APF weinig voorbeelden beschikbaar waarbij met PP geprint is.

Verscheidene bronnen rapporteren dat PP bij verwerking met FFF een sterke neiging heeft tot kromtrekken of opkrullen van de bouwplaat [13, 33-35]. De reden hiervoor is tweeledig. Allereerst is bij een laagsgewijze opbouw het opkrullen van materiaal een inherent risico, omdat een warme laag gelegd op een koelere laag. De koelere laag is al (gedeeltelijk) gekrompen; de warme laag hecht aan de koelere laag maar gaat nog verder afkoelen en krimpen. Hierdoor ontstaan spanningen, welke laag na laag hoger oplopen en materiaal kan doen opkrullen van de bouwplaat, zie Figuur 14. Daarnaast is PP sprake van een semi-kristallijne structuur in het materiaal. De kristallijne fracties zijn niet aanwezig in de smelt, maar ontstaan wanneer de gesmolten kunststof afkoelt. Deze kristallijne fracties krimpen meer dan amorfe delen waardoor er een grotere krimp ontstaat dan bij amorfe kunststoffen. Dit versterkt het risico tot opkrullen welke al inherent is aan de laagsgewijze opbouw.



**Figuur 14:** Opmakend van laagsgewijs opgebouwd product door krimp.

Vanwege de verwachte uitdagingen met het printen van PP is er voor gekozen eerst een PP-grade te gebruiken welke reeds succesvol is verwerkt via APF. De grade in kwestie is LyondellBasell Adsyl 5C 30F, een PP-grade die normaliter wordt ingezet voor productie van biaxiaal georiënteerde folies. Van dit materiaal, afgekort tot Adsyl, is een evaluatie gemaakt met de door Arburg aangeleverde procesparameters. Hierna is een optimalisatietraject van producteigenschappen uitgevoerd. De kennis uit dit traject is vervolgens gebruikt om het printen met spuitgietgrades PP te evalueren.

## 6.1. PP-grade voor folie (Adsyl)

Voor het printen van LyondellBasell Adsyl 5C 30F (Adsyl) is in eerste instantie gebruik gemaakt van de standaard procesparameters. Deze zijn weergegeven in Tabel 5. Een proef met een PP bouwplaat resulteerde in goede adhesie, maar het onderdeel was naderhand onlosmakelijk verbonden aan de bouwplaat. Hierna is daarom gebruik gemaakt van HDPE bouwplaten. Hoewel onderdelen aan de hoeken de neiging hadden om op te krullen, faciliteerden de HDPE bouwplaten voldoende adhesie om de onderdelen te kunnen printen en naderhand te verwijderen van de bouwplaat. De onderdelen waren, met uitzondering van het opkrullen van de hoeken, hoogwaardig van afwerking.

| APF Process parameters for Adsyl 5C 30F |          |      |                        |          |      |
|-----------------------------------------|----------|------|------------------------|----------|------|
| Parameter                               | Standard | Unit | Parameter              | Standard | Unit |
| Tnozzle                                 | 190      | °C   | Number of contours     | 1        | -    |
| Tchamber                                | 60       | °C   | Infill percentage      | 100      | %    |
| Nozzle diameter                         | 0.2      | mm   | Infill-contour overlap | 50       | %    |
| Discharge                               | 105      | %    | Start angle            | 45       | °    |
| Layer thickness                         | 200      | µm   | Increment angle        | 90       | °    |
| DAR                                     | 1.68     | -    | Speed, discrete        | 12       | mm/s |
|                                         |          |      | Speed, continuous      | 66       | mm/s |

**Tabel 5:** Standaard procesparameters van APF-proces voor LyondellBasell Adsyl 5C 30F.

Vervolgens zijn de mechanische eigenschappen van gespuitsgiet en APF-geprint Adsyl vergeleken. Voor trekproeven zijn proefstukken gebruikt met afmetingen volgens ISO 527-1 type 1A. Voor kerfslagproeven zijn proefstukken gebruikt met afmetingen volgens ISO 179-1. De geprinte proefstukken zijn vervaardigd met de instellingen in Tabel 5 met vijf proefstukken per printjob. Het

sputgieten van de trekstaven is uitgevoerd op een Engel VC 200/50 Spex, de kerfslagstaven op een Boy XS. De spuitgietinstellingen zijn gedocumenteerd in Bijlage 2.

Na productie zijn alle proefstukken minimaal 1 week bewaard bij kamertemperatuur ten behoeve van nakristallisatie van het materiaal. De dichtheid is bepaald aan de impactstaven door middel van pyknometrie. De trekproeven zijn uitgevoerd op een trekbank met 50kN load cell en een contact-type extensometer van ZwickRoell. De gebruikte treksnelheid is 1mm/minuut voor de modulus, waarna de machine automatisch overschakelde naar een treksnelheid van 50mm/minuut. Voor de kerfslagproeven zijn met een frees (ZwickRoell) kerven van type A aangebracht. De kerfslagproeven zijn uitgevoerd met een 2J hamer.

Uit de testresultaten, weergegeven in Tabel 6, blijkt dat alle geteste eigenschappen van geprint Adsyl met standaard procesparameters (APF Standard) lager uitvallen dan bij spuitgieten (IM). Hierbij springt het meest in het oog dat de dichtheid van het geprinte materiaal lager is. Bij inspectie leek bij het geprinte materiaal sprake te zijn van porositeit, wat waarschijnlijk (een deel) van het verschil verklaart. Daarnaast is er sprake van anisotropie, in het bijzonder voor de rek bij breuk.

| Mechanical properties of Adsyl 5C 30F |                   |                    |              |                   |
|---------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------|-------------------|
| Property                              | Orientation (APF) | IM                 | APF Standard | Unit              |
| Density                               | -                 | 0.88               | 0.78         | g/cm <sup>3</sup> |
| Impact Strength                       | XY                | 10                 | 7            | kJ/m <sup>2</sup> |
|                                       | Z                 |                    | -            | kJ/m <sup>2</sup> |
| Youngs modulus                        | XY                | 450                | 360          | MPa               |
|                                       | Z                 |                    | 400          | MPa               |
| Tensile Yield Strength                | XY                | 18                 | 14           | MPa               |
|                                       | Z                 |                    | 12           | MPa               |
| Elongation at Break                   | XY                | >500<br>(No break) | 122          | %                 |
|                                       | Z                 |                    | 6            | %                 |

**Tabel 6: Mechanische eigenschappen van LyondellBasell Adsyl 5C 30F verwerkt via spuitgieten (IM) versus standaard procesparameters voor APF (APF Standard).**

Met het doel de mechanische eigenschappen te verbeteren is daarom de invloed van verscheidene procesparameters onderzocht. Hierbij is gebruikt gemaakt van een Design of Experiments (DoE). Met behulp van literatuur en verkennende proeven zijn parameters geselecteerd om mee te nemen in de DoE; deze zijn weergegeven in Tabel 7.

| Process Parameters for Design of Experiments (DoE) with Adsyl 5C 30F |           |           |      |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|------|
| Parameter                                                            | Setting A | Setting B | Unit |
| Tnozzle                                                              | 190       | 270       | °C   |
| Tchamber                                                             | 60        | 90        | °C   |
| Discharge                                                            | 105       | 122.5     | %    |
| Infill-contour overlap                                               | 0         | 100       | %    |

**Tabel 7: Procesparameters voor Design of Experiments met LyondellBasell Adsyl 5C 30F.**

De hypothese was dat van elk van de parameters 'setting B' – de hogere waarde – zou resulteren in hogere mechanische eigenschappen. Uit de resultaten bleek dat met een hogere nozzle temperatuur geen wezenlijke verbetering in mechanische eigenschappen werd behaald; de overige parameters boden wél significante verhogingen van de mechanische eigenschappen. De grootste invloed kwam

van discharge en bouwkamer temperatuur. Een grotere infill-contour overlap verhoogde weliswaar de mechanische eigenschappen, maar resulteerde in afwijkingen in maatvoering ten opzichte van het 3D model ten gevolge van overextrusie. De afwijkingen in maatvoering waren dusdanig groot dat de infill-contour overlap in praktijk geen geschikte parameter lijkt om mechanische eigenschappen mee te verbeteren.

Het verhogen van de bouwkamer temperatuur bleek naast het verhogen van de mechanische eigenschappen ook het opkrullen van materiaal te verminderen. Een hogere bouwkamer temperatuur verlaagt de afkoelsnelheid en stelt kristallisatie uit. Mogelijk bouwen er daardoor minder krimpspanningen op of bereikt de constructie een grotere hoogte, stijfheid en weerstand tegen opkrullen voordat kristallisatie optreedt. Hoewel het mechanisme achter het opkrullen niet verder is bestudeerd, is duidelijk dat bouwkamer temperatuur in het bijzonder een belangrijke procesparameter is voor verwerking van Adsyl.

Aan de hand van de DoE is een set voor mechanische eigenschappen geoptimaliseerde parameters samengesteld voor het printproces, deze zijn weergegeven naast de standaard parameters in Tabel 8. Met deze geoptimaliseerde parameters zijn opnieuw trek- en impactstaven geprint en getest, met dezelfde methodiek en apparatuur als eerder in deze paragraaf is beschreven.

| APF Process parameters for Adsyl 5C 30F |          |           |      |                        |          |           |      |
|-----------------------------------------|----------|-----------|------|------------------------|----------|-----------|------|
| Parameter                               | Standard | Optimized | Unit | Parameter              | Standard | Optimized | Unit |
| Tnozzle                                 | 190      |           | °C   | Number of contours     | 1        |           | -    |
| Tchamber                                | 60       | 90        | °C   | Infill percentage      | 100      |           | %    |
| Nozzle diameter                         | 0.2      |           | mm   | Infill-contour overlap | 50       |           | %    |
| Discharge                               | 105      | 117.5     | %    | Start angle            | 45       |           | °    |
| Layer thickness                         | 200      |           | µm   | Increment angle        | 90       |           | °    |
| DAR                                     | 1.68     |           | -    | Speed, discrete        | 12       | 20        | mm/s |
|                                         |          |           |      | Speed, continuous      | 66       | 110       | mm/s |

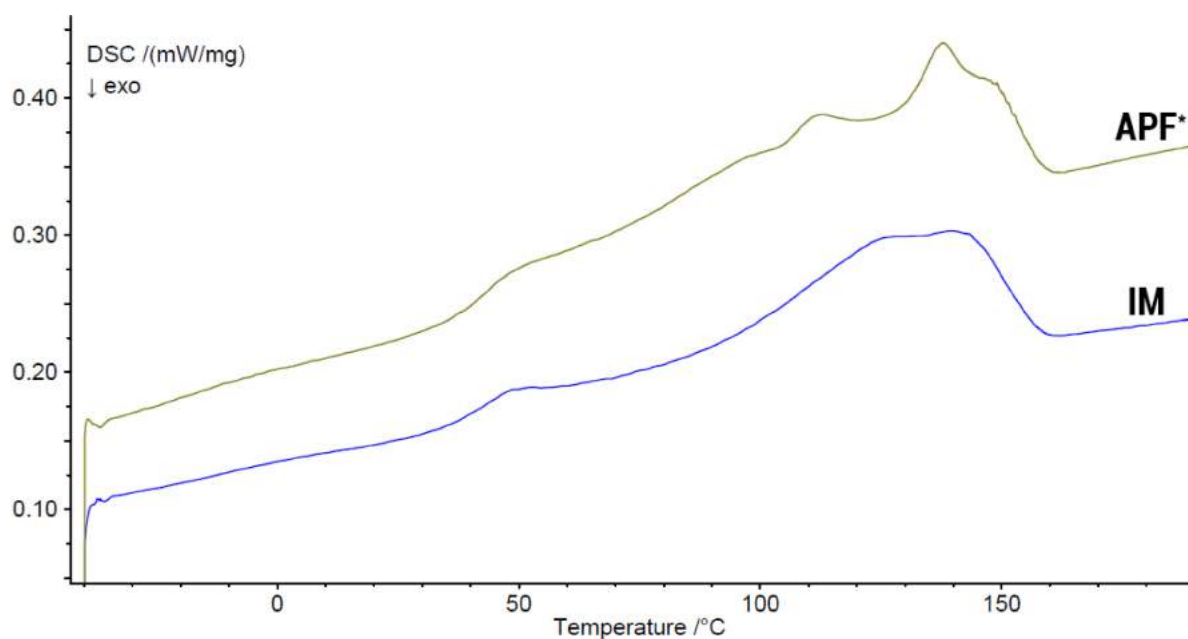
**Tabel 8: Procesparameters van APF-proces voor LyondellBasell Adsyl 5C 30F voor en na optimalisatie.**

In Tabel 9 zijn de mechanische eigenschappen van APF geprint Adsyl met geoptimaliseerde parameters (APF Optimized) weergegeven naast de eerder in dit paragraaf gerapporteerde eigenschappen van gespuitsiet (IM) en APF-geprint Adsyl met standaard procesparameters (APF Standard). De dichtheid van APF na optimalisatie komt overeen met spuitgieten en alle geteste mechanische eigenschappen van APF zijn hoger door optimalisatie. Er is nog duidelijke anisotropie aanwezig, maar er lijkt na optimalisatie sprake van enige taaiheid in de Z-richting.

| Mechanical properties of Adsyl 5C 30F |                   |                    |              |               |                   |
|---------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------|---------------|-------------------|
| Property                              | Orientation (APF) | IM                 | APF Standard | APF Optimized | Unit              |
| Density                               | -                 | 0.88               | 0.78         | 0.88          | g/cm <sup>3</sup> |
| Impact Strength                       | XY                | 10                 | 7            | 10            | kJ/m <sup>2</sup> |
|                                       | Z                 |                    | -            | 7             | kJ/m <sup>2</sup> |
| Youngs modulus                        | XY                | 450                | 360          | 550           | MPa               |
|                                       | Z                 |                    | 400          | 580           | MPa               |
| Tensile Yield Strength                | XY                | 18                 | 14           | 19            | MPa               |
|                                       | Z                 |                    | 12           | 20            | MPa               |
| Elongation at Break                   | XY                | >500<br>(No break) | 122          | 533           | %                 |
|                                       | Z                 |                    | 6            | 35            | %                 |

**Tabel 9: Mechanische eigenschappen van LyondellBasell Adsyl 5C 30F verwerkt via APF met geoptimaliseerde procesparameters (APF Optimized) in vergelijking met spuitgieten (IM) en standaard procesparameters voor APF (APF Standard).**

Een opvallend aspect is dat de modulus en sterkte van APF na optimalisatie hoger zijn dan die van gespuitsgiet materiaal. Vermoedelijk treedt bij APF een ander kristallisatietraject op dan bij spuitgieten. Via Differential Scanning Calorimetry (DSC) zijn zowel een gespuitsgiet als een in het DoE geprint proefstuk bestudeerd. De eerste opwarmcurve, weergegeven in Figuur 15, toont dat er sprake is van verschillende opsmelttrajecten als gevolg van hun thermische historie tijdens verwerking.



**Figuur 15: DSC 1<sup>st</sup> heating scans (10°C/minuut) van Adsyl 5C 30F verwerkt via spuitgieten (blauw) en APF (groen). Het verschil tussen de twee curves duidt op verschillen in kristalliniteit. \*Het APF proefstuk is verwerkt met instellingen uit de DoE. De instellingen waren hetzelfde als de 'Standaard' APF-instellingen in deze paragraaf, met uitzondering van de nozzle temperatuur (270°C), bouwkamertemperatuur (90°C) en discharge (122,5%). Met een afkoel- en tweede heating scan in de DSC (niet weergegeven in rapport) is geconstateerd dat beide proefstukken bij de tweede heating scan eenzelfde smeltpiek hebben. Dit duidt erop dat de verschillen in de eerste heating scan het gevolg zijn van de thermische historie bij APF en spuitgieten, en niet door (bijvoorbeeld) degradatie van het materiaal.**

Samenvattend blijkt dat er met Adsyl 5C 30F succesvol kan worden geprint. Met name discharge en de bouwkamer temperatuur blijken een grote invloed te hebben op de mechanische eigenschappen. Deze inzichten zijn waardevol voor het testtraject met spuitgietgrades PP.

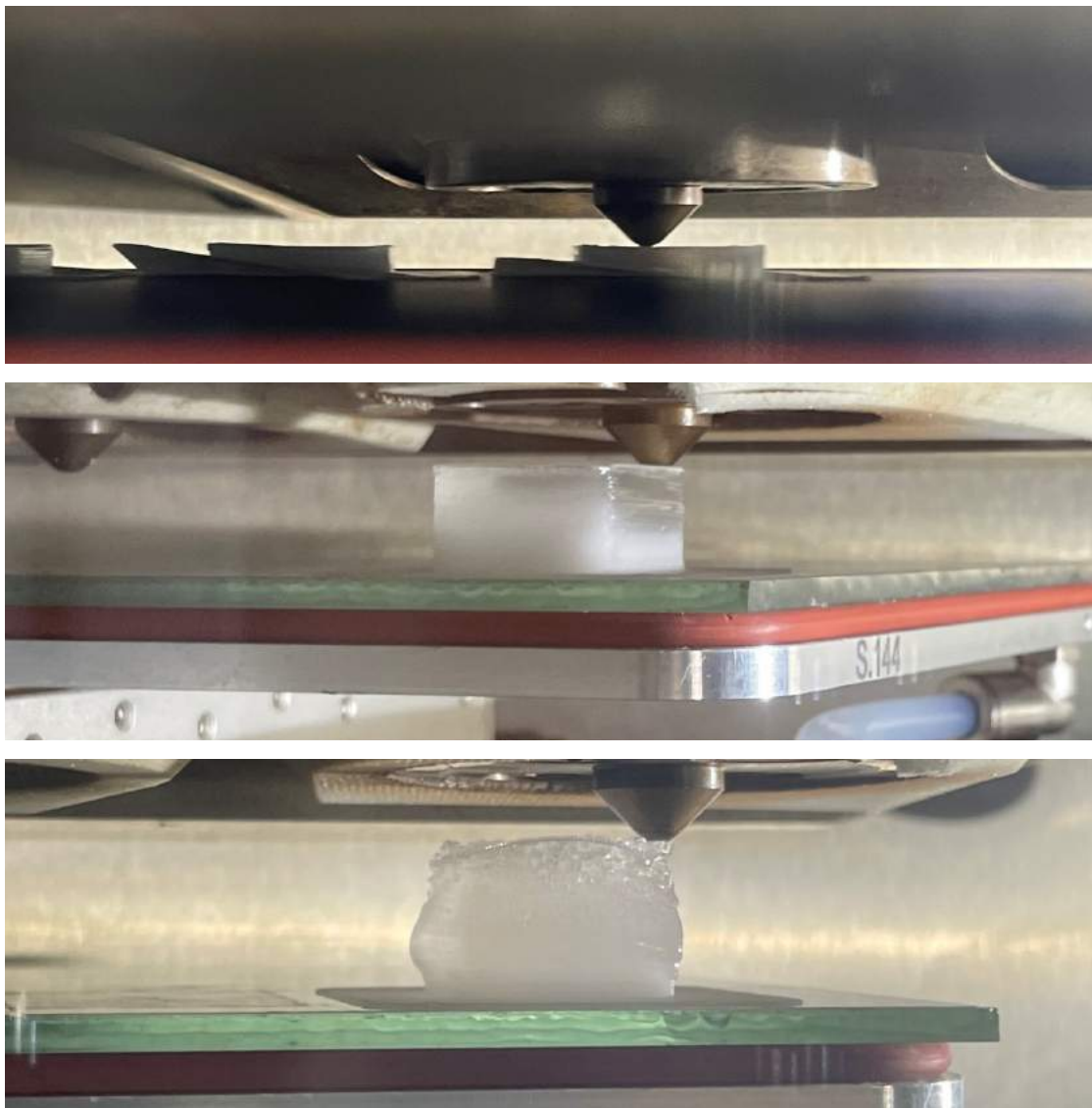
## 6.2. Spuitgietgrade PP's

| Company        | Grade name    | MFI          | Modulus |          | Yield Strength |
|----------------|---------------|--------------|---------|----------|----------------|
|                |               | 230°C/2.16kg | Tensile | Flexural | Tensile        |
|                |               | g/10min      | MPa     | MPa      | MPa            |
| LyondellBasell | Adsyl 5C 30F  | 5.5          | 450*    | -        | 18*            |
| Hyosung        | Topilene J440 | 4            | -       | 1180     | 27.5           |
| Hyosung        | Topilene J640 | 10           | -       | 1180     | 27.5           |
| Total-Hanwha   | BJ550         | 12           | -       | 1350     | 28             |
| LyondellBasell | Moplen EP540P | 15           | 1300    | -        | 28             |

### 6.2.1. Verwerkbaarheid

In de vorige paragraaf werden het dissiperen van interne spanningen en opbouwen van hoogte en stijfheid als potentiële verklaringen gegeven waarom opkrullen afneemt bij een hogere bouwkamer

temperatuur. Deze leidden tot het idee om de volumetrische bouwsnelheid te vergroten, waarbij net als met een hogere bouwkamertemperatuur tot het moment van kristallisatie meer hoogte wordt opgebouwd. Het idee is getest door bij een bouwkamer temperatuur van 125°C de discharge te verhogen van 160% naar 190%, waarbij de nieuwe procesparameters zijn berekend met de Droplet Parameter Calculator (DPC). Bij de hogere discharge werd het materiaal tot een hoogte van tientallen lagen opgebouwd zonder op te krullen. Hierbij viel tevens op dat het materiaal translucient bleef, wat er op duidde dat het materiaal nog niet was gekristalliseerd. De print zakte vervolgens tijdens het printproces door onder haar eigen gewicht, zoals weergegeven in Figuur 16 onder. Door de bouwkamer temperatuur te verlagen naar 110°C is een stabiel printproces bereikt met een minimale hoeveelheid opkrullen zonder doorzakken van de print. Deze situatie is zichtbaar in Figuur 16 midden, waar materiaal bij de bouwplaat reeds gekristalliseerd en opaak is, en de bovenste lagen nog ongekristalliseerd en translucient zijn.



**Figuur 16 : Proeven met de verwerkbaarheid van Total-Hanwha BJ550, met Boven: Verstoring van het printproces door opkrullen van het materiaal na enkele lagen; Midden: Een stabiel printproces, waarbij het opake deel bij de bouwplaat reeds is gekristalliseerd en het translucente deel bovenaan de print nog niet; Onder: Verstoring van het printproces waarbij materiaal zo snel wordt opgebouwd dat het materiaal onder eigen gewicht in ongekristalliseerde staat doorzakt.**

Vervolgens zijn producten van verschillende vorm en omvang geprint, waarvan enkele exemplaren zijn weergegeven in Figuur 17. Tijdens deze proeven is geconstateerd dat een stabiel printproces niet altijd

met dezelfde procesparameters kan worden behaald. Het lijkt dat voor een stabiel printproces de snelheid van het bouwproces in de Z-richting (printtijd per laag) en de kristallisatiesnelheid min of meer gelijk moeten zijn. Dit is te bereiken door bij een grotere dwarsdoorsnede een grotere discharge en hogere bouwkamer temperatuur te gebruiken en vice versa. Wijzigingen in discharge vereisen herevaluatie van laagdikte en DAR. Door gebruik te maken van de Droplet Parameter Calculator (Hoofdstuk 5) konden deze wijzigingen worden berekend en doorgevoerd zonder een uitgebreid kwalificatietraject.



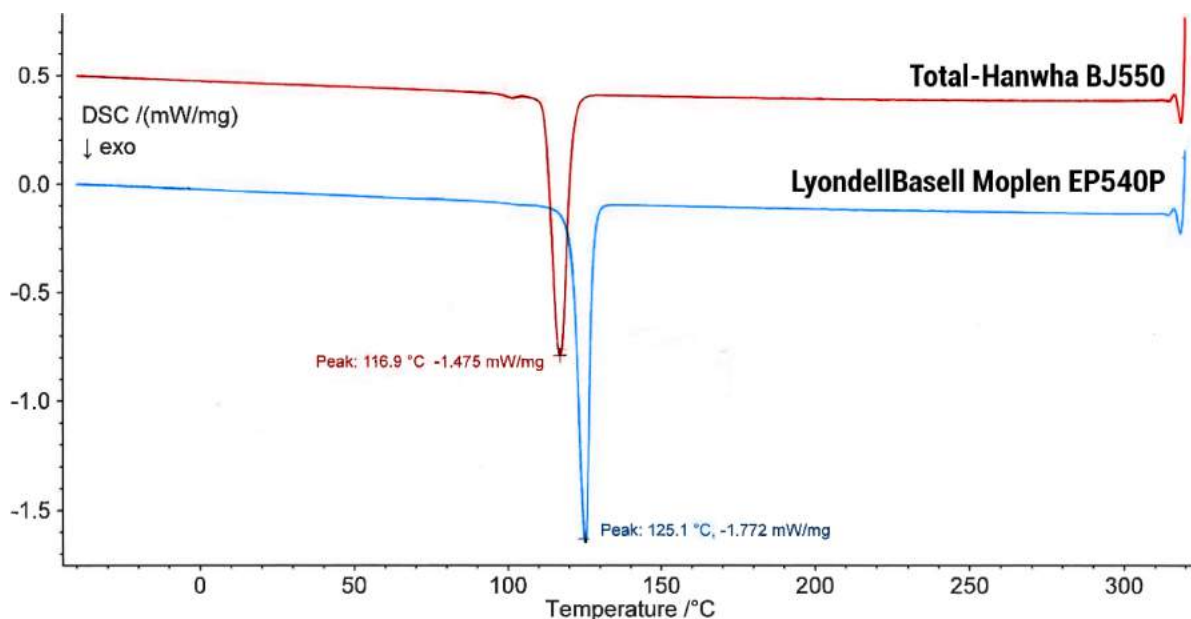
**Figuur 17:** Verscheidenheid aan producten in vorm en omvang, geprint uit Total-Hanwha BJ550 door gebruik van verschillende instellingen voor discharge en bouwkamertemperatuur. Ter indruk van omvang: De buis in de afbeelding heeft een buitendiameter van circa 105mm.

Grote veranderingen in dwarsdoorsnede binnen hetzelfde object blijken uitdagend om op te vangen in het printproces. Voor het product in Figuur 18 bleek het noodzakelijk de bouwkamer temperatuur en printsnelheid handmatig omlaag bij te stellen tijdens het printproces.



**Figuur 18:** Product met grote verandering in dwarsdoorsnede, geprint uit Total-Hanwha BJ550.

Na de verkenning met BJ550 zijn opnieuw printproeven uitgevoerd LyondellBasell Moplen EP540P (afgekort: EP540P). DSC analyses van BJ550 en EP540P granulaat zijn gebruikt om een verwachting te stellen hoe de verwerking van de twee grades zou kunnen verschillen. Uit de eerste afkoelcurve, weergegeven in Figuur 19, blijkt dat tijdens het afkoelen (met 10°C/minuut) EP540P verder kristalliseert dan BJ550 en de piek van kristallisatie optreedt bij circa 125°C (EP540P) in plaats van 117°C (BJ550). Op basis van de hogere kristallisatietemperatuur en -piek werd verwacht dat EP540P bij dezelfde instellingen als BJ550 een sterker zal neigen op te krullen. Uit proeven bleek dit ook het geval. Door voor hetzelfde model een hogere discharge en/of bouwkamer temperatuur te gebruiken konden de uit BJ550 geprinte producten ook uit EP540P geprint worden.



**Figuur 19:** Differential Scanning Calorimetry (DSC) 1st cooling plots met een afkoelsnelheid van 10°C/minuut van Total-Hanwha BJ550 en LyondellBasell Moplen EP540P. Uit de meting blijkt dat EP540P tijdens het afkoelproces verder kristalliseert dan BJ550 en de kristallisatiepiek optreedt bij een hogere temperatuur.

Uit de proeven blijkt dat de geteste PP spuitgietgrades onder de juiste omstandigheden verwerkt kunnen worden met APF. Hierbij is van belang dat materiaal niet te kort na extrusie kristalliseert, omdat materiaal anders sterk opkrult en het printproces wordt verstoord. Tegelijkertijd moet het materiaal ook niet te lang na extrusie kristalliseren, omdat het materiaal anders tijdens productie doorzakt. De timing van kristallisatie wordt beïnvloed door de bouwkamer temperatuur, de discharge en de omvang van het product.

Bij de hierboven beschreven verkennende proeven waren de keuze van discharge en bouwkamer temperatuur deels op basis van ervaring van de operator en deels proefondervindelijk. Om dit proces te vergemakkelijken en kwaliteit consistent te maken is geadviseerd een methodiek te ontwikkelen waarbij procesparameters worden bepaald aan de hand van gegevens over het materiaal (zoals DSC) en het 3D model (zoals dwarsdoorsnede).

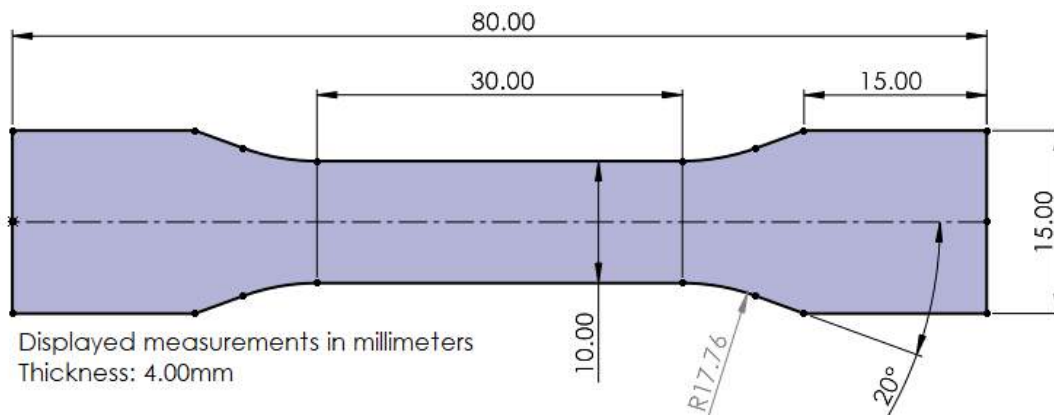
### 6.2.2. Mechanische eigenschappen

Een vergelijking is gemaakt van de mechanische eigenschappen van gespuitspuitgiet en APF-geprint Total-Hanwha BJ550. De gespuitspuitgiete proefstukken hebben afmetingen volgens ISO 527-1 type 1A en verwerkt op een Engel VC 200/50 Spex. De spuitgietinstellingen zijn gedocumenteerd in Bijlage 2.

De geprinte proefstukken zijn zowel plat (X-richting) als rechtopstaand (Z-richting) geprint met de instellingen in Tabel 11 met vijf proefstukken per printjob. Om in beide oriëntaties te printen met dezelfde bouwkamer temperatuur is gebruik gemaakt van proefstukken met een aangepaste geometrie, weergegeven in Figuur 20. De dwarsdoorsnede van het testgebied is 10x4mm, net als van de gespuitspuitgiete proefstukken. De parallelle lengte daarentegen is korter, en de uiteinden zijn anders van maatvoering.

| APF Process parameters for Total-Hanwha BJ550 |       |      |                        |       |      |
|-----------------------------------------------|-------|------|------------------------|-------|------|
| Parameter                                     | Value | Unit | Parameter              | Value | Unit |
| Tnozzle                                       | 215   | °C   | Number of contours     | 1     | -    |
| Tchamber                                      | 105   | °C   | Infill percentage      | 100   | %    |
| Nozzle diameter                               | 0.2   | mm   | Infill-contour overlap | 50    | %    |
| Discharge                                     | 190   | %    | Start angle            | 45    | °    |
| Layer thickness                               | 250   | µm   | Increment angle        | 90    | °    |
| DAR                                           | 1.55  | -    | Speed, discrete        | 26    | mm/s |
|                                               |       |      | Speed, continuous      | 90    | mm/s |

Tabel 11: Procesparameters van APF-proces voor trekstaven uit Total-Hanwha BJ550.



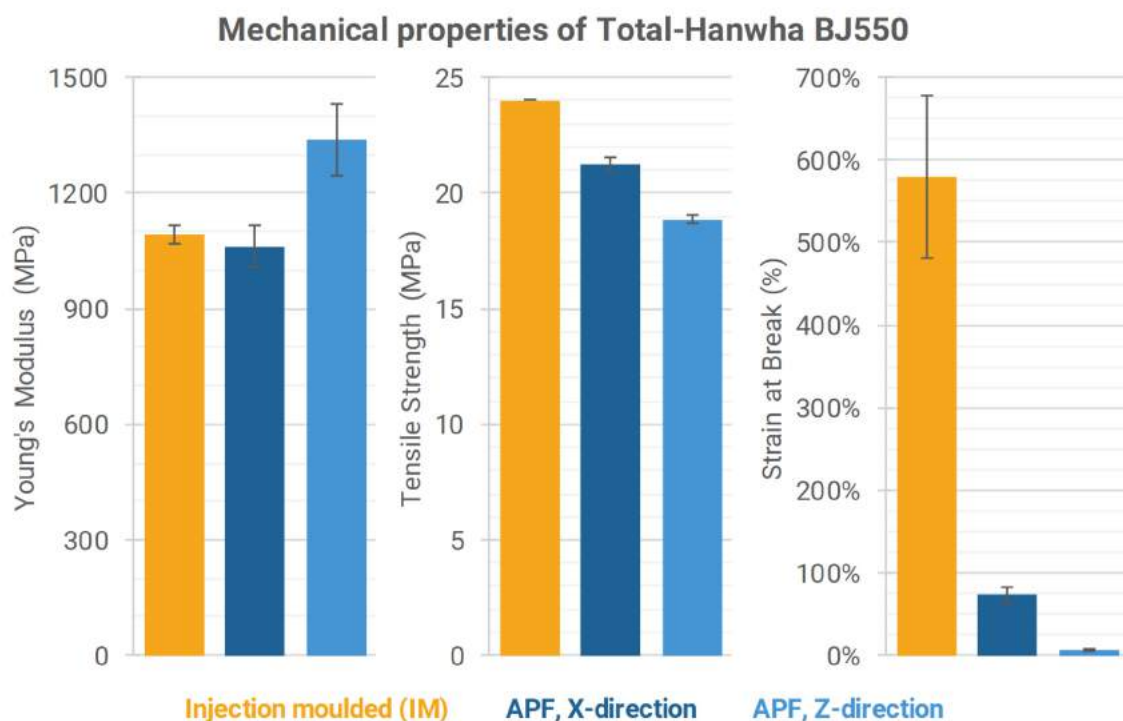
Figuur 20: Geometrie van de uit Total-Hanwha BJ550 geprinte trekstaven.

Na productie zijn alle proefstukken minimaal 1 week bewaard bij kamertemperatuur ten behoeve van nakristallisatie van het materiaal. De trekproeven zijn uitgevoerd op een trekbank met 50kN load cell en een contact-type extensometer van ZwickRoell. De gebruikte treksnelheid is 1mm/minuut voor de modulus, waarna de machine automatisch overschakelde naar een treksnelheid van 50mm/minuut. De rek bij breuk gemeten is gemeten over een lengte van 75mm voor de gespuitsgiete proefstukken en 20mm voor de geprinte proefstukken.

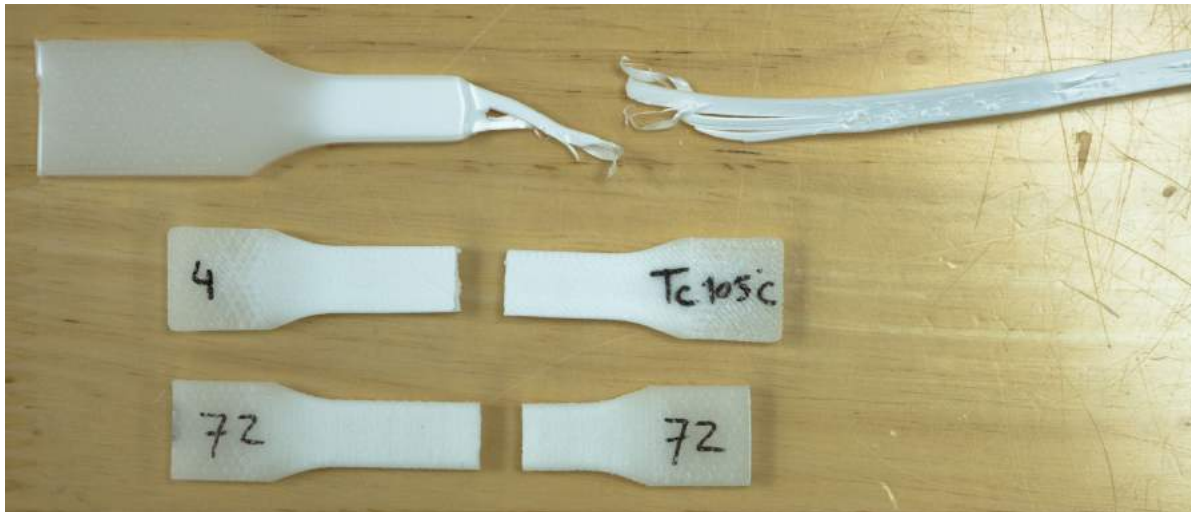
De resultaten zijn weergegeven in Figuur 21, met links een weergave van de E-modulus, in het midden de treksterkte en rechts de rek bij breuk. Hoewel tussen APF en spuitgieten de modulus en sterkte van elkaar verschillen, liggen deze in eenzelfde orde grootte en is het verschil kleiner dan 25%.

Voor de rek bij breuk gaat dit echter niet op, en behaalt BJ550 bij verwerking met APF een aanzienlijk lagere rek bij breuk dan bij verwerking met spuitgieten. Tijdens de trekproeven is tevens geobserveerd dat gespuitsgiet BJ550 het materiaal plastisch uitgerekt kan worden tot het punt waar een insnoering ontstaat en groeit. Bij APF-geprint BJ550 trad breuk op voordat een duidelijke insnoering ontstond, zowel voor proefstukken geprint in de X-richting als de Z-richting. Een vergelijking van de gebroken proefstukken is weergegeven in Figuur 22.

Tevens lijkt printoriëntatie de mechanische eigenschappen te beïnvloeden, met een hogere modulus, lagere sterkte en lagere rek bij breuk in de Z-richting versus de X-richting.



**Figuur 21:** Vergelijking van mechanische eigenschappen van Total-Hanwha BJ550 na verwerking via spuitgieten (IM) en APF met printen in platte (X) oriëntatie en opstaande (Z) oriëntatie.



*Figuur 22: Weergave van trekstaven uit Total-Hanwha BJ550 na testen. Het gespuitsgiete proefstuk (boven) toont een insnoering en vloeit vooraf aan breuk; voor de APF-geprinte proefstukken geprint in de X-richting (midden) en Z-richting (onder) is dit niet het geval.*

### 6.3. Conclusies

Een grote uitdaging bij het printen van Polypropyleen is de sterke neiging van het materiaal om tijdens verwerking op te krullen. Desondanks zijn zowel een PP grade voor folieblazen als meerdere PP spuitgietgrades succesvol verwerkt en biedt uitkomst voor de tot nu toe beperkte materiaalkeuze van PP materialen voor Additive Manufacturing.

De neiging tot opkrullen tijdens verwerking wordt bij APF beïnvloedt door de productgeometrie en procesparameters. Door de bouwkamer temperatuur en bouwsnelheid af te stemmen op het te printen product wordt een stabiel printproces verkregen. De stijfheid en treksterkte van geprint Total-Hanwha BJ550 zijn vergelijkbaar aan het gespuitsgiete materiaal; de rek bij breuk is echter duidelijk lager dan bij spuitgieten, vooral tussen de geprinte lagen (Z-richting). Vervolgonderzoek is geadviseerd om beter te begrijpen waardoor dit wordt veroorzaakt en om mogelijkheden tot verbetering te verkennen.

## 7. Printen van Thermoplastische Elastomeren

Het printen van flexibele materialen zou grote mogelijkheden kunnen bieden op gebied van ergonomie, zoals op maat gemaakte ortheses, schoenzolen, textielen, comfort-lagen en handvatten. De technologie zou ook interessant kunnen zijn voor technische onderdelen zoals balgen, verende en dempende elementen, hoezen of afdichtingen.

Helaas blijkt het printen van flexibele materialen uitdagend voor verscheidene AM-technieken. In Tabel 12 is een overzicht weergegeven van enkele grades flexibele materialen en AM-technieken, waaruit blijkt het printen van écht zachte grades slechts beperkt mogelijk is. Bij printen met FFF vindt dosering plaats door het filament voort te stuwen (feeding) en terug te trekken (retraction). Vervormingen van het filament resulteren in onnauwkeurigheden en vertragingen van zowel feeding als retraction. Dit beperkt verwerking van flexibele materialen via FFF tot relatief hoge hardheden en met lagere printsnelheden dan voor harde kunststoffen. Ook bij Powder Bed Fusion (PBF, SLS, HSS, MJF) is verwerking van flexibele materialen uitdagend. Het aanbrengen van lagen poeder met een uniforme dichtheid is essentieel voor een hoogwaardig printproces en is met hard materiaal al uitdagend. In praktijk zijn voor PBF alleen relatief harde materialen commercieel beschikbaar. Het verwerken van zachte materialen in vat polymerisation technieken (Vat-P, SLA, DLP) is goed mogelijk. Deze materialen zijn echter (nog) niet hoogwaardig recyclebaar, omdat gebruik gemaakt wordt van thermosets. Ook worden deze thermosets meestal door middel van UV-licht uitgehard. Een potentieel neveneffect van dit uithardingsmechanisme is degradatie van de flexibele eigenschappen door langdurige blootstelling aan UV-licht.

| Process | Company   | Grade name          | Hardness, Shore A |
|---------|-----------|---------------------|-------------------|
| PBF     | BASF      | Ultrasint TPU 88A   | 88                |
| PBF     | Formlabs  | TPU 90 A Powder     | 90                |
| PBF     | EOS       | EOS TPU 1301        | 86                |
| FFF     | BASF      | Ultrafuse TPU 85A   | 85                |
| FFF     | ColorFabb | Ninjatek Chinchilla | 75                |
| FFF     | Stratasys | FDM TPU 92A         | 92                |
| Vat-P   | Formlabs  | Elastic 50A         | 50                |
| Vat-P   | Formlabs  | Flexible 80A        | 80                |
| Vat-P   | Carbon    | SIL30               | 35                |

**Tabel 12:** Er zijn verscheidene AM-technieken voor flexibele materialen, maar elke techniek heeft zijn eigen beperkingen in beschikbare hardheden materiaal (PBF en FFF) of in recyclebaarheid (vat polymerisation). De gegevens zijn gehaald uit datasheets van de leveranciers [40-48].

De voedings- en doseertechniek van de Freeformer belooft mogelijkheden te bieden voor verwerking van TPE's. Voor de Freeformer zijn reeds een aantal flexibele materialen gekwalificeerd. De volgende materialen zijn in het huidige onderzoek gebruikt:

- TPU 70 Shore A (Covestro Desmopan 9370AU)
- SEBS 30 Shore A, (Wittenburg Cawiton PR13630)

Voor de verwerking van deze materialen waren reeds procesparameters beschikbaar, deze zijn dan ook als uitgangspunt genomen om de verwerkbaarheid van TPE's met APF te verkennen. Om te verkennen wat de mogelijkheden en onmogelijkheden zijn in het verwerken van thermoplastische elastomeren, is een verscheidenheid aan objecten geprint. Waar gewenst zijn aanpassingen geprobeerd aan de procesparameters. De resultaten zijn hieronder per materiaal gedocumenteerd.

## 7.1. TPU, 70 Shore A

Eerst is een verkenning uitgevoerd met 70 Shore A TPU. De gebruikte grade, Covestro Desmopan 9370AU, is een UV-gestabiliseerde spuitgiet- en extrusie grade met goede flexibiliteit bij lage temperaturen, slijtvastheid, scheurbestendigheid en chemische resistentie. Het materiaal wordt onder meer toegepast voor schoenzolen, balgen en dempende elementen.

Het voeden en extruderen van materiaal blijkt ondanks de flexibele aard geen probleem. Net als bij conventionele verwerking van TPU is het wél belangrijk dat het materiaal zeer goed wordt gedroogd, anders treedt degradatie van het materiaal op. In extreme gevallen, zoals in Figuur 23 links, is dit bij extrusie al terug te zien door verkleuring van het materiaal en de aanwezigheid van holtes in het extrudaat.

Tevens lijken de eigenschappen van het TPU afhankelijk van de verblijftijd in de smelteenheid. Bij een kleine discharge, een 2K-print of het toepassen van een oplosbaar steunmateriaal is al gauw sprake van een verblijftijd van meer dan 5 minuten. Ook bij de voorbereiding van een printproces kan de verblijftijd oplopen. Er is geobserveerd dat na dergelijke stilstand te veel materiaal wordt geëxtrudeerd voor de ingestelde discharge; de viscositeit lijkt te verminderen met verblijftijd. De machine corrigeert de druk om de discharge naar de ingestelde waarde terug te brengen. Als dit gebeurt tijdens het printproces, dan kunnen er imperfecties in de print ontstaan. In extreme gevallen kan de discharge zo ver afwijken dat de machine het printproces onderbreekt. Om dit te voorkomen is het raadzaam bij het ontwerpproces en het voorbereiden van prints rekening te houden met de invloed van verblijftijd van het materiaal.

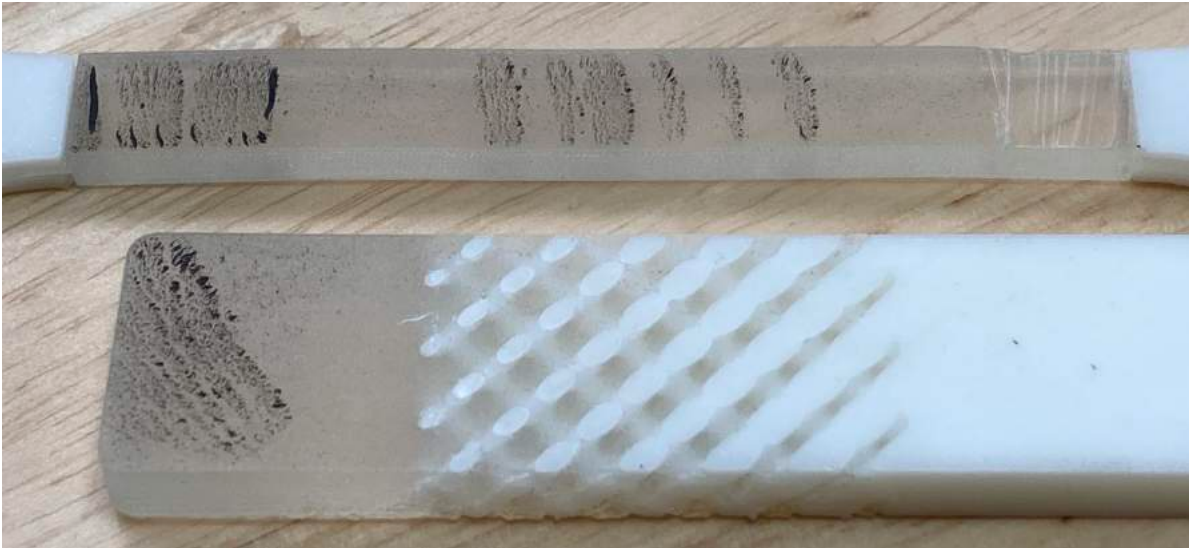
Wanneer sprake is van goed gedroogd materiaal, een korte verblijftijd in de schroef en de procesparameters staan ingesteld voor een hoge materiaaldichtheid, dan resulteert dit in translucente producten, zoals weergegeven in Figuur 23 rechts. Het materiaal is getest en succesvol verwerkt in een bereik van 60 tot en met 190% discharge.



*Figuur 23: Links een voorbeeld van een object waarvan het vergeelde gedeelte TPU is. Deze verkleuring is als gevolg van degradatie, omdat het materiaal onvoldoende was gedroogd. Ook een lange verblijftijd van het materiaal in de smelteenheid kan dergelijke problemen veroorzaken. Rechts op de afbeelding is een uit hetzelfde TPU geprint product weergegeven, waarbij gelet is op het adequaat drogen van het materiaal en het minimaliseren van de verblijftijd in de smelteenheid.*

TPU ondervindt zeer goede adhesie aan de standaard (zwarte) bouwplaat van Arburg. De adhesie kan zelfs dusdanig hoog zijn dat er resten van de bouwplaat achter blijven op het onderdeel, zoals weergegeven in Figuur 24. Het is ook voorgekomen dat het TPU onderdeel plastisch vervormde of scheurde bij het verwijderen van de bouwplaat. De adhesie aan de bouwplaat kan worden verminderd door de afstand tot de bouwplaat iets groter in te stellen dan de laagdikte of door gebruik te maken

van een coating haarlak op de bouwplaat. In dit onderzoek is bij het printen van TPU meestal de bouwplaat gecoat.



*Figuur 24: Adhesie tussen TPU en de standaard (zwarte) bouwplaat van Arburg is dermate hoog dat bij verwijdering residu van de bouwplaat achter kan blijven op de print. In extreme gevallen kan het TPU onderdeel bij verwijdering van de bouwplaat ook plastisch vervormen of scheuren.*

Het materiaal kent geen noemenswaardige neiging tot opkrullen. Ook heeft het materiaal enige stijfheid, zodat de meeste vormen, structuren en overhangs die geproduceerd kunnen worden in hard materiaal (zoals ABS) ook rechtstreeks te produceren zijn uit TPU. Een lagere bouwkamer temperatuur verhoogt de dimensionele stabiliteit van de print en dit heeft vanuit visuele afwerking de voorkeur.

De mechanische eigenschappen onder invloed van trek of buiging zijn in dit onderzoek niet getest. Uit het handmatig belasten van geprint materiaal is wél duidelijk geworden dat het materiaal in staat is tot grote elastische deformaties. De mechanische eigenschappen onder invloed van drukbelasting zijn wel getest en daar is over gerapporteerd in Hoofdstuk 8.

## 7.2. SEBS, 30 Shore A

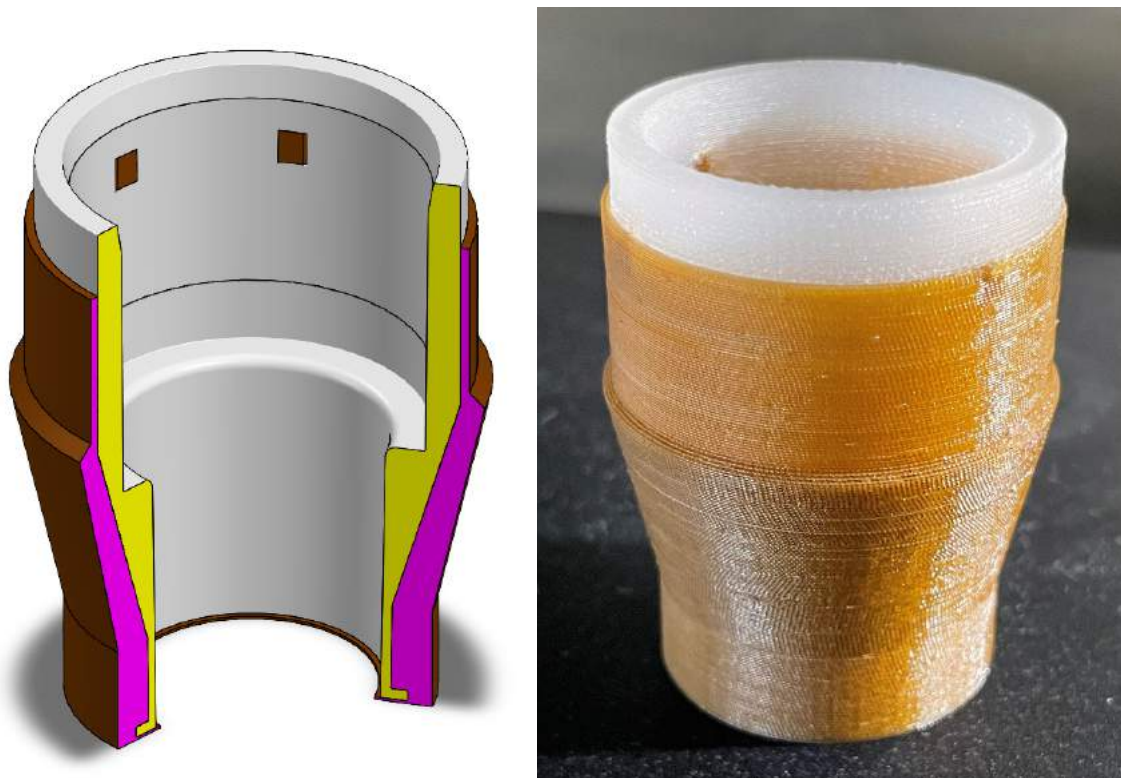
Het gebruik van 70 Shore A TPU bracht weinig uitdagingen in de verwerking, en laat zien dat APF in de basis geschikt is voor verwerking van TPE's. Een ander reeds gekwalificeerd materiaal voor de Freeformer is Wittenburg Cawiton PR13630, een SEBS materiaal voor spuitgieten en extrusie met een hardheid van 30 Shore A met een toepassingsgebied in de medische industrie.

Bij het voeden van SEBS zijn af en toe problemen geweest, waarbij materiaal bleef steken in de hopper. Als gevolg arriveert door verloop van tijd geen nieuw materiaal bij de schroef en onderbreekt de machine het printproces. Arburg biedt een optionele hopper aan waarbij periodiek het granulaat in beweging wordt gebracht door een kleine hoeveelheid perslucht te injecteren. Deze hopper was niet op de machine van Windesheim geïnstalleerd, dus is het materiaal in de hopper af en toe handmatig in beweging gebracht.

In tegenstelling tot TPU traden er bij SEBS geen duidelijke problemen op door variaties in verblijftijd van het materiaal. Een verblijftijd van 5 á 10 minuten had geen invloed op de processtabiliteit en geen zichtbare invloed op het extrudaat. Voor SEBS is gebruik gemaakt van een glazen bouwplaat met

PP-tape erop; dit resulteerde in goede adhesie tijdens het printproces en eenvoudige verwijdering van geprinte producten naderhand.

Het 30 Shore A SEBS bezit minder dimensionele stabiliteit dan harde kunststoffen tijdens het printproces. SEBS kent hierdoor meer restricties ten aanzien van hoogte en wanddikte als het materiaal zelfondersteunend geprint wordt. Ook overhangs lijken met het materiaal niet of nauwelijks mogelijk. Een simpele maar effectieve oplossing is het SEBS te ondersteunen met een stijver materiaal. Een voorbeeldcasus is een prototype van een flexibele adapter voor gebruik in de medische sector, weergegeven in Figuur 25 en Figuur 26. De adapter heeft een grotere hoogte dan diameter, en wanddiktes van 0,8 – 2,8mm. Uit SEBS (translucent, wit) is de adapter niet stijf genoeg om zichzelf te ondersteunen tijdens het printproces. Door de constructie te ondersteunen met een dunwandige schil oplosbaar steunmateriaal (Armat 12, bruin) kan het product zonder problemen uit SEBS worden geprint. Door het onderdeel met het dikwandige gedeelte naar boven te oriënteren kon het bovenste gedeelte van de print worden geproduceerd zonder steunmateriaal, zodat printtijd en steunmateriaal is bespaard.

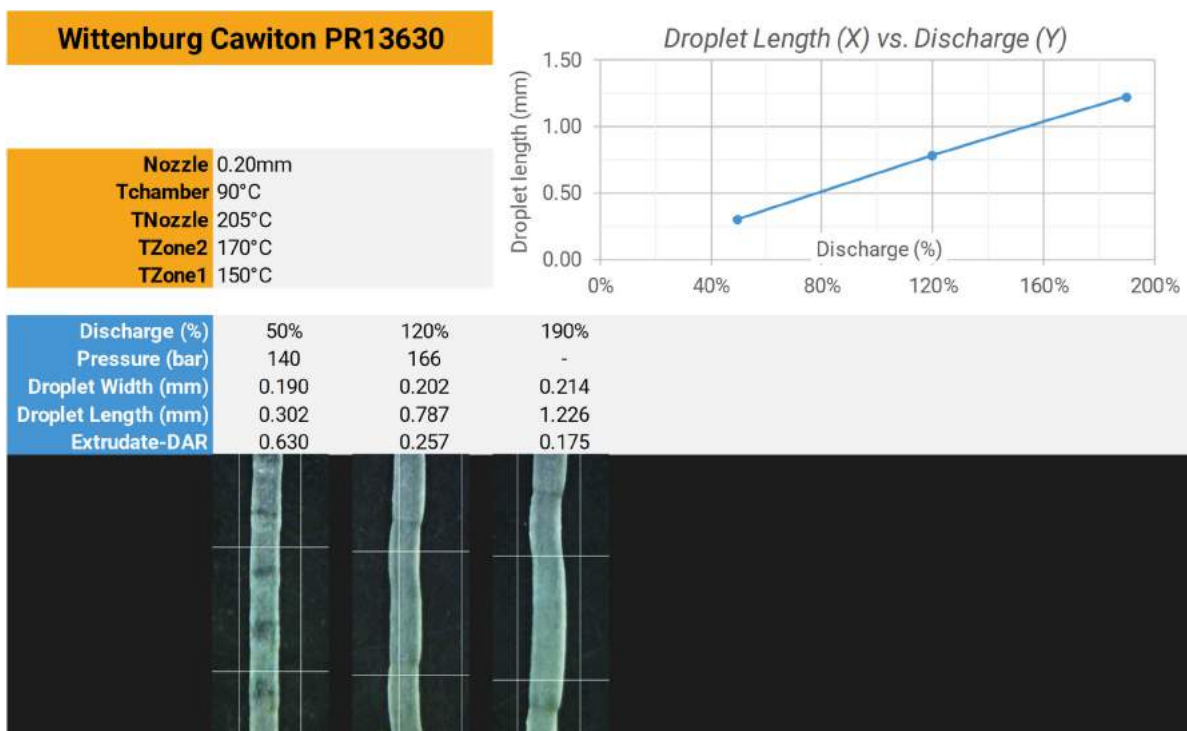


**Figuur 25: Flexibele adapter voor medische toepassing, met links een doorsnede van het model en rechts de print. De adapter is geprint uit SEBS (translucent, wit) met Armat 12 (bruin) als steunmateriaal.**



**Figuur 26:** Flexibele adapter voor medische toepassing geprint uit SEBS, na verwijdering van het wateroplosbare Armat 12 steunmateriaal.

Naast printbaarheid van verschillende vormen is aandacht besteed aan de procesparameters. De aangeleverde procesparameters gingen uit van 0,2mm nozzle, 50% discharge en 200µm laagdikte. Dit resulteert in een stabiel printproces en goede afwerking, zij het ook een lage productiesnelheid: Bij 240Hz (infill) extrudeert de machine slechts circa 8,5cm<sup>3</sup> materiaal per uur. Met het doel de productiecapaciteit te verhogen is een discharge scan uitgevoerd, welke is weergegeven in Figuur 27.



**Figuur 27:** Discharge scan van SEBS. De druppels zijn smal en lang ten opzichte van andere materialen (zoals ABS en PP) bij dezelfde discharge, waardoor het materiaal idealiter bij een lagere discharge wordt verwerkt.

Uit de discharge scan valt de vorm van de SEBS druppels op. Bij andere geteste materialen, zoals PP en ABS was sprake van het uitdijen van het extrudaat ten opzichte van de nozzle diameter, een fenomeen genaamd 'die swell'. Bij SEBS was daarentegen nauwelijks sprake van die swell, met als gevolg dat de geëxtrudeerde druppels smaller en langer zijn dan gebruikelijk. Bij 50% discharge zijn de druppels 1,5 keer langer dan de laagdikte waarmee is geprint. Voor 120% en 190% is de druppellengte respectievelijk 4 tot bijna 6 keer langer dan de breedte.

Er bestonden twijfels of met de langwerpige druppels kon worden geprint. Om dit te toetsen zijn met de Droplet Parameter Calculator (hoofdstuk 5) verscheidene combinaties procesparameters berekend met een discharge tot 190% en een laagdikte tot 300µm. Het bleek mogelijk met deze instellingen te printen. Tot een discharge van 75% werd een goede esthetische afwerking behaald, daarboven ontstonden op de (recht)opstaande oppervlakken defecten en artefacten, zoals weergegeven in Figuur 28. Ogenscheinlijk gaat het om druppels die gedeeltelijk uit het productoppervlak steken.



*Figuur 28: De geëxtrudeerde SEBS druppels zijn relatief langwerpig. Een stabiel printproces is mogelijk, hoewel wel artefacten en defecten kunnen ontstaan aan het productoppervlak.*

Een verhoging in productiecapaciteit door een hogere discharge is mogelijk, maar het zal afhangen van de toepassing of de afwerking acceptabel is. Met oog op de geringe die swell zou een grotere diameter nozzle (0,25mm) misschien beter geschikt zijn voor het printen van SEBS bij grotere druppelvolumes. Helaas deed zich in dit onderzoek niet de kans voor om te testen met een grotere diameter nozzle.

### 7.3. Conclusies

APF blijkt goed geschikt te zijn voor het printen van thermoplastische elastomeren. Hierbij blijkt het in ieder geval mogelijk materiaal van 30 Shore A te printen, wat zachter is dan met andere AM-technieken voor thermoplasten momenteel de norm is. Net als bij verwerking van ieder materiaal op Freeformer zijn er materiaalspecifieke aspecten waarop gelet moet worden. Bij de geteste TPU bleek dit het drogen en minimaliseren van verblijftijd, voor de SEBS bleek de doorstroom in de hopper een punt van aandacht. Voor het ontwerp- en printproces is duidelijk geworden dat zachtere TPE's mogelijk (oplosbaar) steunmateriaal nodig hebben om nauwkeurig te kunnen printen.

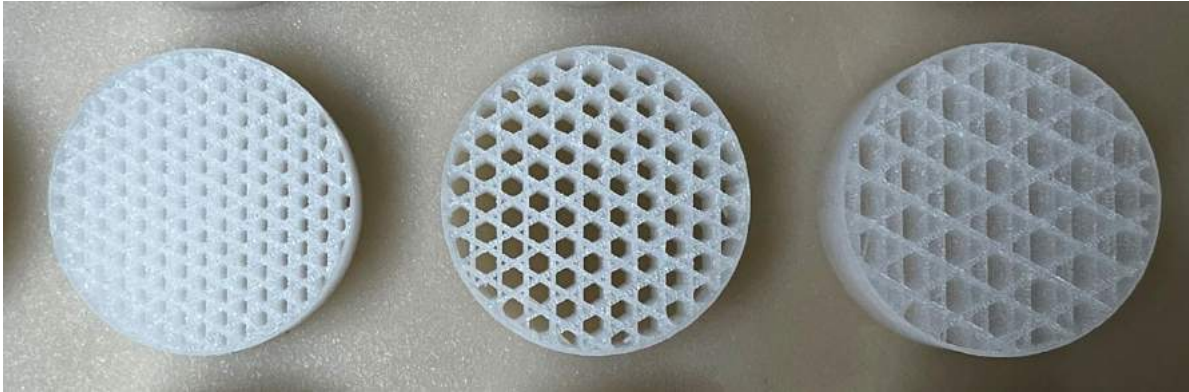
## 8. Printen van schuimachtig materiaal met procesparameters

Zoals eerder in deze publicatie beschreven biedt APF nauwkeurige controle over het geëxtrudeerde materiaalvolume. Dit is gunstig voor het bereiken van een hoge materiaaldichtheid en mechanische eigenschappen, maar biedt ook de mogelijkheid intentioneel materiaal te printen met een lagere dichtheid dan bij conventionele productie wordt bereikt. Bij verkennende proeven werd geobserveerd dat materiaal bij printen met een lagere infill een voelbaar lagere stijfheid en sterkte heeft en compressibel kan zijn. Dit effect lijkt vooral interessant voor materialen als TPE's welke grote elastische deformaties kunnen ondergaan. Zoals afgebeeld in Figuur 29 lijkt de respons vergelijkbaar aan schuim- en sponsachtige materialen. Deze karakteristieke combinatie van printproces en materiaal wordt reeds door het bedrijf Hashtag Two gebruikt voor patiëntspecifieke borstprotheses. Mogelijk zijn de eigenschappen ook geschikt voor andere functies. Denk hierbij aan verende, scharnierende of schokdempende elementen in machineonderdelen, behuizingen, persoonlijke hulpmiddelen en ortheses.



*Figuur 29: Bol geprint uit 30 Shore A SEBS (Cawiton PR13630) met een infill van 40% in gedeformeerde staat (links) en ongedeformeerde staat (rechts).*

De schuimachtige structuren kunnen worden gemaakt door de procesparameters aan te passen, welke in Hoofdstuk 3 in detail zijn uitgelegd. Met de procesparameters is het mogelijk 2.5D lattice (rooster) structuren te produceren zoals in Figuur 30. Hierbij bepalen de increment angle en het infillpercentage het type en de dichtheid van de structuur. Hieronder volgt een verkenning van mogelijkheden in het aanpassen van materiaaldichtheid door middel van de procesparameters.



**Figuur 30:** Samples geprint uit PP (Adsy 5C 30F) met een increment angle van 60° en infill van 25% (links), 20% (midden) en 15% (rechts).

Om een indruk te krijgen van toepassingsmogelijkheden zijn de compressie-eigenschappen van een 70 Shore A TPU (Desmopan 9370AU) gemeten bij verschillende infillpercentages. Er is uitgegaan van cilindrische proefstukken met nominaal 40mm diameter en een hoogte van 10mm. De Z-richting van de proefstukken is gebruikt als belastingsrichting. Voor elk infillpercentage zijn 5 proefstukken geprint met de procesinstellingen in Tabel 13.

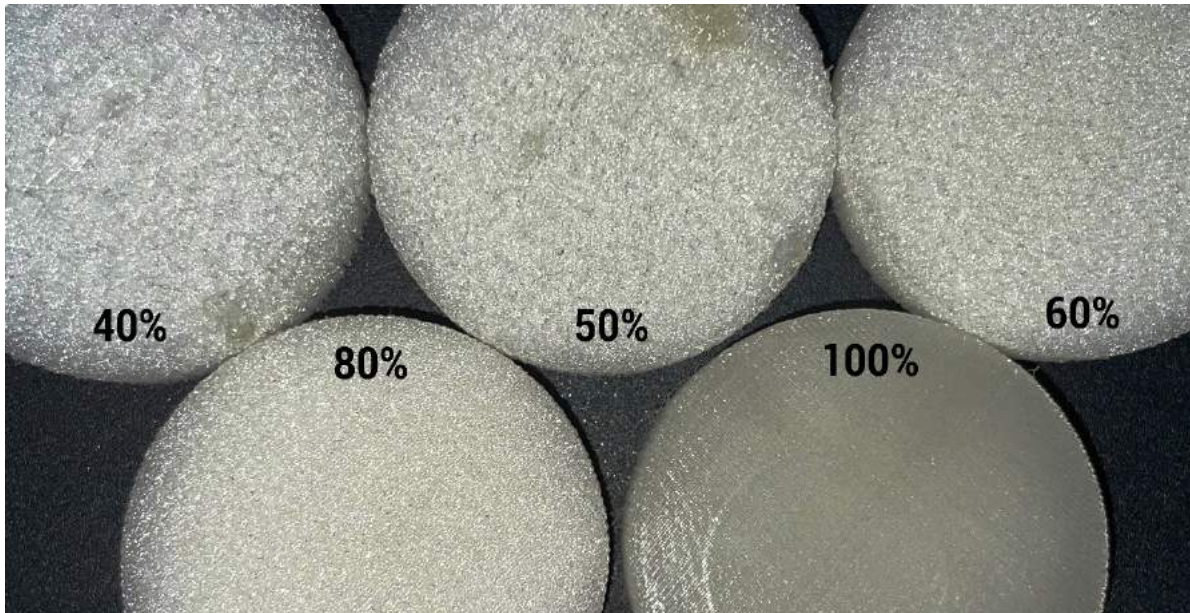
| TPU Shore 70A (Desmopan 9370AU)                 |                              |      |
|-------------------------------------------------|------------------------------|------|
| Print parameters for compression test specimens |                              |      |
| Parameter                                       | Value                        | Unit |
| Tnozzle                                         | 200                          | °C   |
| Tchamber                                        | 60                           | °C   |
| Nozzle diameter                                 | 0.20                         | mm   |
| Discharge                                       | 60                           | %    |
| Layer thickness                                 | 0.20                         | mm   |
| DAR                                             | 1.22                         |      |
| Number of contours                              | 0                            |      |
| Infill                                          | 20, 30, 40, 50, 60, 80 & 100 | %    |
| Increment angle                                 | 90                           | °    |

**Tabel 13:** Gebruikte instellingen voor productie van compressieproefstukken uit 70 Shore A TPU (Desmopan 9370AU)

Zoals weergegeven in Tabel 14, blijkt dat de hoogte van de proefstukken afneemt bij een lager infillpercentage; het materiaal zakt in. Proefstukken met infill percentages van 50% of lager bevatten ook visuele defecten en lijken inhomogeen, zoals weergegeven in Figuur 31. Desondanks is besloten wél alle proefstukken te testen ter indicatie van de eigenschappen.

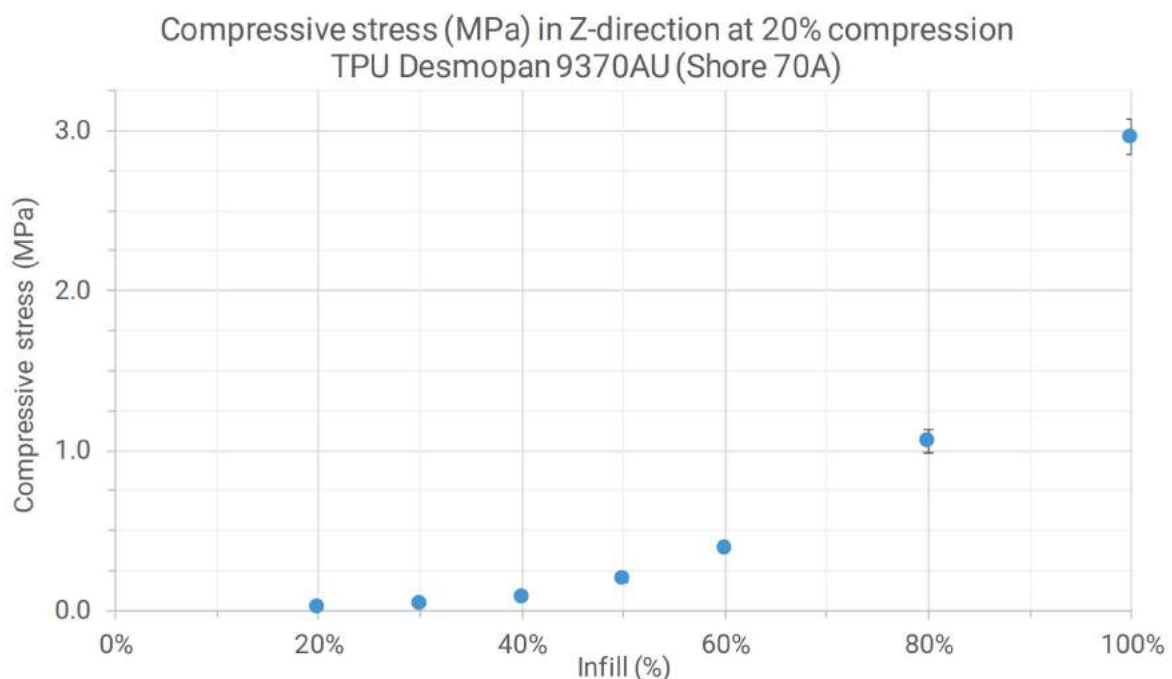
| Influence of infill percentage on specimen height |                     |                        |
|---------------------------------------------------|---------------------|------------------------|
| Infill %                                          | Average height (mm) | Offset from target (%) |
| 20%                                               | 8.89                | -11.12%                |
| 30%                                               | 9.30                | -7.00%                 |
| 40%                                               | 9.49                | -5.08%                 |
| 50%                                               | 9.69                | -3.12%                 |
| 60%                                               | 9.68                | -3.22%                 |
| 80%                                               | 9.72                | -2.80%                 |
| 100%                                              | 10.02               | 0.20%                  |

**Tabel 14:** Het infillpercentage bij printen met TPU (Desmopan 9370AU) heeft invloed op de resulterende proefstukhoogte.



**Figuur 31: Visuele defecten in de TPU proefstukken voor infills van 50% en lager.**

De compressieproeven zijn uitgevoerd op een op een Testometric M500-100CT drukbank met een 10kN krachtcel, bij kamertemperatuur met een preload van 2N en een testsnelheid van 5mm per minuut. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 32. Het infillpercentage is weergegeven op de X-as en de spanning die optreedt bij 20% compressie op de Y-as. Er is een sterke relatie tussen vulgraad en de weerstand tegen compressie in de Z-richting, waarbij de invloed van infill het sterkst is bij hoge vulpercentages. Ook is zichtbaar dat de spreiding van de spanning per datapunt klein is, duidend op een nauwkeurig proces en reproduceerbare eigenschappen.



**Figuur 32: Invloed van infill percentage (X) op compressiespanning bij 20% compressie (Y). Er is getest met 5 proefstukken per instelling. Het gemiddelde is weergegeven middels een stip, de spreiding (1x standaarddeviatie boven en onder gemiddelde) is middels een boven- en onderlijn weergegeven. Waar de spreiding niet zichtbaar is, is deze zo klein dat deze aan het beeld onttrokken door de stip welke het gemiddelde weergeeft.**

Het spanning-compressie diagram (Figuur 33) toont dat spanning evenredig toeneemt met verplaatsing bij een infill van 100% maar onevenredig bij lagere vulgraden. Effectief is er bij 100% infill sprake van één stijfheid in het gemeten bereik terwijl bij de overige samples de stijfheid toeneemt met deformatie.



**Figuur 33:** De spanning stijgt min of meer evenredig met compressie voor 100% infill maar onevenredig voor 20-80% infill.

## Conclusies

Uit de proeven blijkt duidelijk dat met het wijzigen van de vulgraad (infill) van thermoplastische elastomeren de compressie-eigenschappen in de Z-richting significant kunnen worden beïnvloed. Er zijn geen metingen verricht aan de invloed van de belastingrichting ten opzichte van de printrichting. Doordat de vorm van de infillstructuren niet in alle drie richtingen gelijk zijn is er waarschijnlijk sprake van anisotropie. Desondanks maken de verrichte metingen het potentieel duidelijk voor het wijzigen van compressie-eigenschappen. Hierbij is in geadviseerd een infill van minimaal 60% te gebruiken om inzakken en visuele defecten te vermijden.

Hoe het materiaal zich gedraagt ten opzichte van conventioneel vervaardigde schuimen is niet vergeleken. Met een dergelijke vergelijking kan beter ingeschat worden of dat de methode 'slechts' sturing biedt over de stijfheid van de TPE's, of dat het materiaal ook een geschikt alternatief zou kunnen zijn in toepassingen waar nu conventionele schuimen worden ingezet. Het printen van schuimachtige structuren heeft duidelijk potentieel, maar vraagt om vervolgonderzoek om deze naar volledige meerwaarde in te zetten.

## 9. Printen van meerdere materialen in één product (2K)

Door het gebruik van meerdere injectie-eenheden biedt APF de mogelijkheid om meerdere materialen in één onderdeel te verwerken. Met deze techniek, in dit hoofdstuk benoemd als 2K printen, zijn nieuwe technische mogelijkheden binnen handbereik, zoals:

- Het printen van meerdere kleuren of translucente en opake delen in één product;
- Het integreren van elektrisch geleidende circuits in een product;
- Het combineren van rigide en flexibele (harde en zachte) componenten tot één constructie;

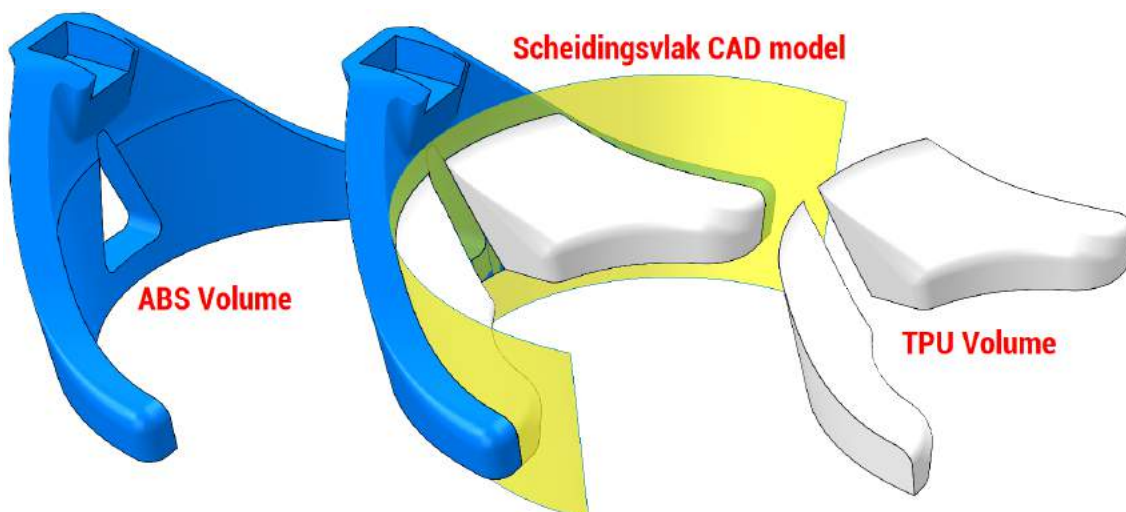
De eerste twee mogelijkheden kunnen worden behaald door gebruik van additieven. Hoewel uit Hoofdstuk 6 is gebleken dat mechanische eigenschappen kunnen worden beïnvloed met procesparameters, vereist de derde genoemde optie het gelijktijdig printen van twee wezenlijk verschillende materialen. 2K printen brengt dan ook aanvullende eisen met zich mee. In dit onderzoek zijn de volgende materiaalcombinaties succesvol geprint:

- ABS + TPU (INEOS Terluran GP-35 + Covestro Desmopan 9370AU);
- PP + SEBS (LyondellBassell Adsyl 5C 30F + Wittenburg Cawiton 13630);
- PP + SEBS (Total-Hanwha BJ550 + Wittenburg Cawiton 13630);

Hieronder volgen de stappen voor het uitvoeren van een 2K printproces en enkele belangrijke leerpunten uit dit onderzoek.

### 9.1. Ontwerp, software voorbereiding en printproces

Een 3D model voor een 2K print moet worden opgesplitst in minimaal twee volumes en moet in afzonderlijke bestanden zijn opgeslagen, zie Figuur 34. Zoals is uitgelegd in hoofdstuk 3 worden aan een printjob een slicing profile (laagdikte), scaling profile (schaalfactoren tbv. krimpcompensatie) en part profile (onderdeel specifieke parameters) toegekend. Bij het printen van meerdere onderdelen kan voor elk onderdeel een andere part profile worden ingesteld. Door daarbij part profiles van verschillende materialen te selecteren ontstaat een 2K print. Ook dient de printvolgorde te worden ingesteld; bijvoorbeeld eerst het harde, daarna het zachte materiaal.



**Figuur 34:** Het instellen van een 2K print vereist dat minimaal 2 verschillende bestanden worden ingeladen. Een methode hiervoor is om een CAD model voor 2K printen op te splitsen tot meerdere volumes via een scheidingsvlak en de volumes als verschillende bestanden op te slaan.

Hoewel part profiles per onderdeel in te stellen zijn, geldt dat voor elke printjob slechts één laagdikte, één set schaalfactoren en één bouwkamer temperatuur mogelijk is. Hoewel dit eenvoudig klinkt, kan de praktijk uitdagend zijn. Een voorbeeld is de Finray gripper demonstrator uit paragraaf 10.1 welke geprint is uit PP en SEBS. Voor PP (Total-Hanwha BJ550) wordt bij 1K prints een bouwkamer temperatuur van 100-120°C, en 40-60°C voor SEBS (Wittenburg Cawiton PR13630). PP krult bij lagere temperaturen op; SEBS wordt bij hogere temperaturen flexibel en instabiel op de bewegende bouwplaat. Met een concept van het productontwerp zijn proeven uitgevoerd bij verschillende bouwkamer temperaturen. Hierbij is een compromis gekozen in de afwerking van de twee materialen. Ook zijn kleine wijzigingen in het ontwerp doorgevoerd om de stabiliteit van SEBS tijdens het printproces te verbeteren.

Een ander aspect om rekening mee te houden is dat de benodigde injectie-eenheden vooraf aan elke print op bedrijfstemperatuur worden gebracht. Daarna worden ze om de beurt gespoeld (gepurged) en de discharge gekalibreerd en wordt het printproces gestart. Oplopende verblijftijd van een materiaal kan de smeltviscositeit veranderen en zelfs leiden tot degradatie. Daarom is het bij 2K printen belangrijk dat alle materialen c.q. injectie-eenheden vanaf de eerste laag van het printproces worden ingezet.

Het kan voorkomen dat een materiaal slechts in kleine volumes wordt geprint of dat een materiaal pas vanaf een bepaalde laag in het ontwerp is verwerkt. In dergelijke gevallen is het aan te raden om naast het product een 'purge tower' te printen. Dit is een object wat er voor dient om de injectie-eenheid door te spoelen. Een voorbeeld van deze situatie is weergegeven in Figuur 35. Indien twee materialen niet tot dezelfde hoogte (Z-richting) hoeven te worden geprint, dan schakelt de machine na het printen van de laatste laag van het 'lagere' materiaal de desbetreffende injectie-eenheid uit. Hoewel de noodzaak voor een purge tower niet altijd voorkomen kan worden, heeft het vanuit printtijd, materiaal- en energieverbruik uiteraard wel sterk de voorkeur.



*Figuur 35: De 2K (rechts) print bestaat hoofdzakelijk uit ABS, met een balg uit TPU in het bovenste gedeelte van de print. De print is alleen in de afgebeelde oriëntatie te printen zonder steunmateriaal. Om stilstand van de TPU injectie-eenheid tot de hoogte van de balg te voorkomen is de TPU purge tower (links) mee geprint.*

## 9.2. Verbinding tussen materialen

Om één constructie te vormen uit verschillende thermoplasten moet tussen deze materialen een sterke verbinding ontstaan. Uit conventionele verbindingsmethoden zoals kunststof lassen en 2K spuitgieten is reeds bekend dat kunststoffen daarvoor met elkaar compatibel moeten zijn. Zijn de kunststoffen compatibel, dan kan bij het contactoppervlak tussen de twee materialen een verbinding ontstaan door menging of diffusie op moleculair niveau. Compatibiliteit is relevant bij 2K printen vanwege het behalen van adhesie:

- Van beide materialen aan dezelfde bouwplaat;
- Tussen bouwmaterialen op het contactvlak dwars op de bouwrichting (X- en Y-richting);
- Tussen bouwmaterialen op het contactvlak tussen opeenvolgende lagen (Z-richting);

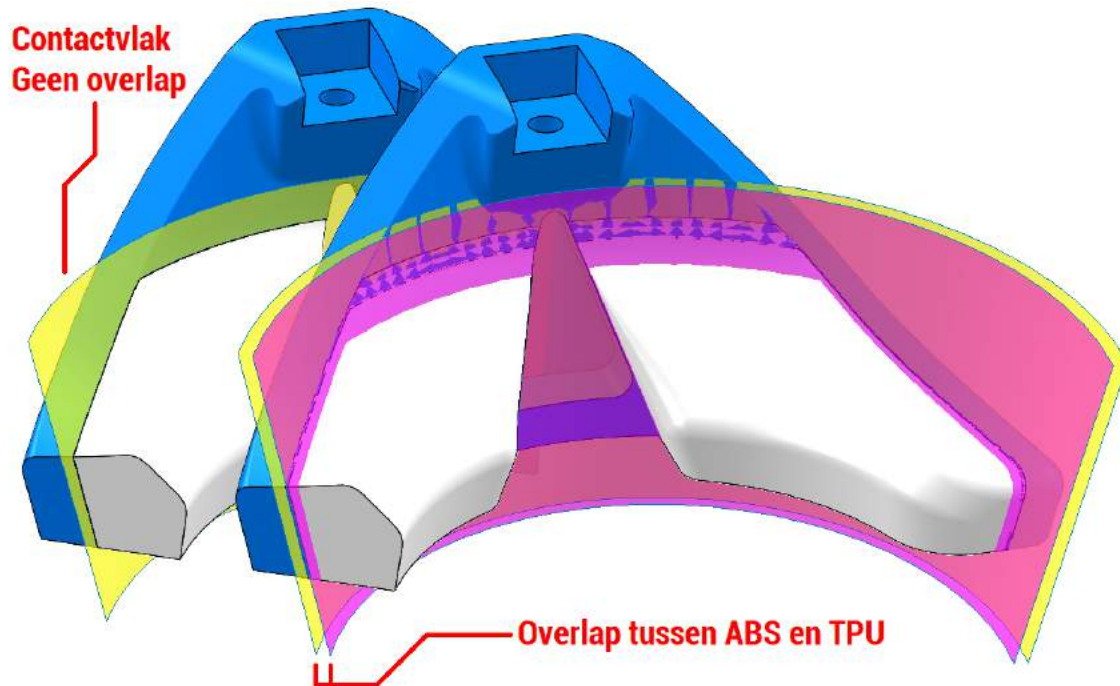
Compatibiliteit heeft dus niet alleen invloed op het eindproduct, maar ook processtabiliteit. Indien een materiaal onvoldoende adhesie heeft op de ondergrond (bouwplaat of onderliggend materiaal), dan kleeft het materiaal aan de nozzle en is geen stabiel printproces mogelijk.

Ook met compatibele materialen bleek het behalen van een sterke verbinding niet vanzelfsprekend. Bij initiële proeven werd het 3D model opgesplitst tot twee volumes, waarbij de twee volumes tegen elkaar aan liggen. Het printproces was stabiel en ogenschijnlijk lagen de materialen tegen elkaar aan. Desondanks was de verbinding tussen de materialen zeer zwak en pelden de materialen bij geringe belasting van elkaar los, zoals weergegeven in Figuur 36.



*Figuur 36: Een 2K-print uit ABS (wit, bovenste gedeelte) en TPU (translucent, onderste gedeelte), waarbij de volumes van het 3D model tegen elkaar liggen (geen overlap hebben). De resulterende verbinding is zeer zwak en de materialen pellen bij geringe belasting van elkaar los.*

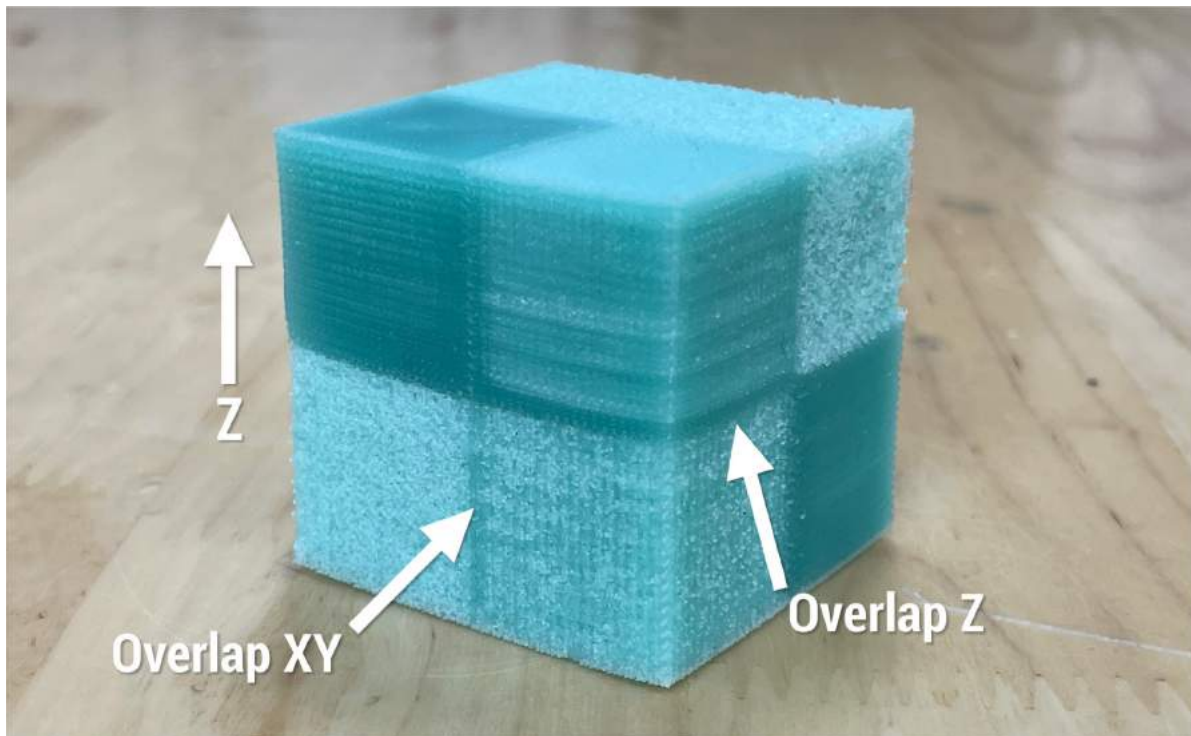
In een poging de onderlinge adhesie te verbeteren is in het 3D model een overlap aangebracht van 0,20mm in de X- en Y-richtingen, zoals weergegeven in Figuur 37. In het printproces probeert de machine beide materialen op dezelfde plek te printen, een soort lokale overextrusie. De stabiliteit van het printproces was ongewijzigd. Door de overlap in de X- en Y-richtingen ontstaat een verbinding sterk genoeg voor gebruik in de demonstrators (zie Hoofdstuk 10).



**Figuur 37:** Door in het CAD model de ABS en TPU delen in verschillende vlakken af te snijden ontstaat een overlap tussen de twee volumes/materialen in de X- en Y-richtingen. Dit verhoogt de sterkte van de verbinding tussen de twee materialen.

In de Z-richting (tussen de lagen) is het aanbrengen van een dergelijke overlap ook getest met een 1K print uit SEBS. De print bestaat uit kubussen van 20x20x20mm met infill percentages van 55 tot en met 100%. De kleine kubussen overlappen met 0,25mm in de X, de Y als de Z-richtingen, dit is tevens de laagdikte voor de print.

De print is weergegeven in Figuur 38. Bij de overlap in de X- en Y-richtingen is een nauwe strook met overextrusie zichtbaar. Deze overextrusie resulteerde niet in een verstoring van het printproces. In de Z-richting treedt overextrusie op voor meerdere lagen; een veelvoud van de overlap. De overextrusie van de overlap in de Z-richting dreigde ook de stabiliteit van het printproces in gevaar te brengen (de nozzle duwde en smeerde door het geprinte materiaal heen). Het lijkt erop dat overlappingsen in de Z-richting minder gemakkelijk en straffeloos aan te brengen zijn dan in de X- en Y-richtingen.



*Figuur 38: Kubus bestaand uit 8 volume-elementen van 20x20x20mm met infill percentages van 55%, 70%, 85% en 100% geprint met een laagdikte van 0,25mm. Tussen de volume-elementen is in zowel de X, Y als Z-richting een overlap van 0,25mm aangebracht. De overlap in de X- en Y-richtingen resulteert in een iets zichtbare strook met overextrusie, in de Z-richting is een strook met overextrusie zichtbaar welke meerdere laagdiktes - een veelvoud van de overlap - omvat. De overlap in de X- en Y-richtingen verstoort het printproces niet; die in de Z-richting dreigt de stabiliteit van het printproces te verstoren.*

### 9.3. Conclusies

Het printen van meerdere materialen in één product is mogelijk met het APF-proces. Doordat 2K-printen één laagdikte en bouwkamertemperatuur vereist voor beide materialen kan het nodig zijn dat procesparameters van materialen op elkaar worden afgestemd. Het ontwerp moet minimaal twee onderdelen omvatten, waarbij een overlap tussen de onderdelen resulteert in een sterkere verbinding. Aanvullend onderzoek is geadviseerd ten aanzien van ontwerpregels omtrent overlap en een kwantitatieve analyse van de verbindingsterkte tussen de materialen.

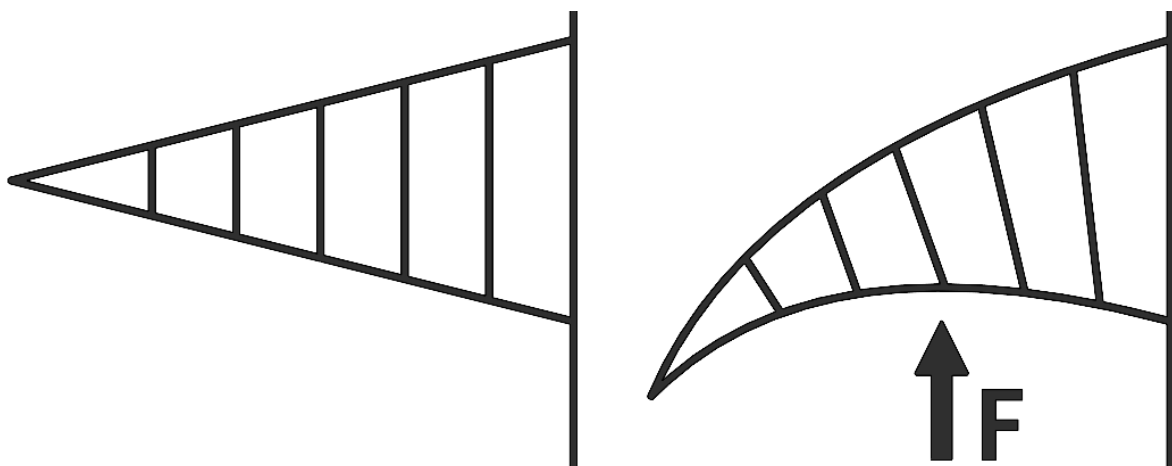
## 10. Technology demonstrators

In het project is zowel in de breedte als diepte kennis en ervaring opgedaan met APF. Met deze kennis is vanuit het perspectief van de ontwerper gekeken naar mogelijke functies en toepassingen waarin de technologie tot haar recht komt. Hierbij is waar mogelijk ook ingehaakt op de kennisvragen van de projectpartners. Hieronder volgt een greep uit de demonstrators die zijn ontwikkeld.

### 10.1. Gripper voor objecten met ongelijke vorm

Bij geautomatiseerd hanteren van objecten worden veelal grippers gebruikt. Om verscheidene redenen kan het gewenst zijn dat met één gripper verschillen in vorm en formaat kunnen worden geacommodeerd. Denk hierbij aan het hanteren van natuurproducten als groente en fruit, maar ook het kunnen inzetten van een automatiseringsoplossing op verschillende producten of productlijnen zonder onderdelen te wisselen.

Een potentieel geschikte oplossing hiervoor zijn grippers op basis van het Fin Ray effect. Bij dit effect deformeert een constructie (vinger) tegen de richting van de belasting in, zoals weergegeven in Figuur 39. Het Fin Ray effect is bij uitstek geschikt voor vingers van grippers omdat de gripper haar vorm aanpast op de vorm en het formaat van het object dat wordt vastgegrepen. Dit vergroot het contactoppervlak en de stevigheid van de greep en verlaagt de contactdruk.



*Figuur 39: Schematische weergave van het Fin Ray Effect. De constructie (finger, vinger) waarbij het effect optreedt is een driehoeksconfiguratie waarin twee buigzame vlakken (fins, vinnen) met dwarsverbindingen (ribs, ribben) aan elkaar zijn verbonden, zoals links is weergegeven. Het Fin Ray effect is het deformeren in tegengestelde richting van een zijdelingse belasting (F) op de constructie, zoals rechts is weergegeven.*

De eigenschappen van Fin Ray vingers worden bepaald door onder andere materiaalkeuze, afmetingen, wanddiktes, de configuratie van de ribben en hun verbinding met de vinnen [49, 50]. Hoewel het technisch mogelijk is Fin Ray vingers conventioneel te vervaardigen, biedt Additive Manufacturing (AM) de mogelijkheid om Fin Ray vingers te optimaliseren voor hun toepassing.

Door de vinnen uit een thermoplastische elastomeer (TPE) te produceren, kunnen zeer flexibele Fin Ray vingers worden verkregen. Zoals eerder in deze publicatie is gebleken, is Arburg Plastic Freeforming (APF) bij uitstek geschikt voor het verwerken van TPE's, terwijl dit uitdagend is met andere AM-technologieën.

Vanuit deze gedachte is een ontwerpconcept gemaakt voor een Fin Ray gripper. Hierbij is de keuze gemaakt niet alleen compliante vingers te gebruiken, maar daarnaast het openen en sluiten (actueren)

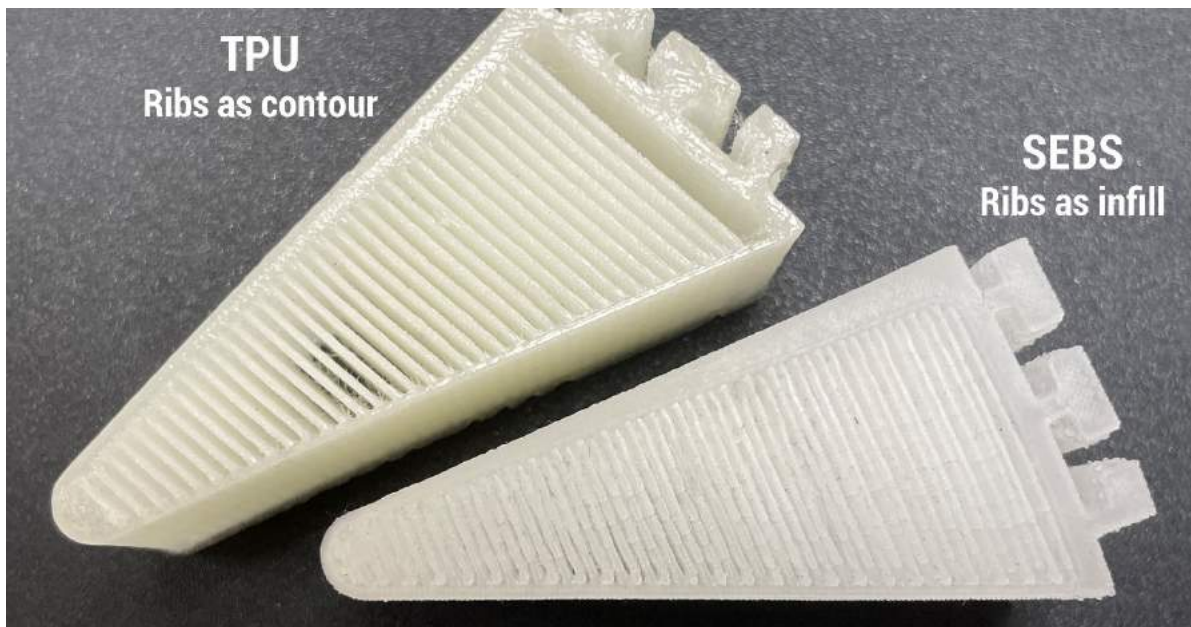
van de gripper te faciliteren door middel van een compliant mechanisme. Het ontbreken van scharnierende mechanismen resulteert in een systeem dat vrij is van smering, speling en slijtage door wrijving. Het concept gaat uit van de gripper als één object wat geprint wordt uit twee materialen, met de Fin Ray vingers uit een TPE en het actuatiemechanisme uit een hard kunststof.

Voor het eerste prototype, weergegeven in Figuur 40, is uitgegaan van een opdeling in meerdere componenten. Hierbij is het actuatiemechanisme eerst geprint uit PA12 met Selective Laser Sintering (SLS); de Fin Ray vingers zijn geprint uit 70 Shore A TPU (Covestro Desmopan 9370AU). De twee materialen werden in elkaar geschoven waarbij belasting middels een zwaluwstaartverbinding werd doorgegeven. Het prototype werkte maar de houdkracht leek beperkt te worden door een te lage stijfheid van het actuatiemechanisme ten opzichte van de Fin Ray vingers. Ook was er de wens de printtijd van circa 2 uur en 40 minuten per Fin Ray vinger in te korten.



**Figuur 40: Eerste prototype van de gripper met actuatiemechanisme uit SLS-geprint PA12 (EOS PA2200) en Fin Ray vingers uit TPU (Covestro Desmopan 9370AU). De Fin Ray vingers zijn geprint met 190% discharge, 0.25mm laagdikte en 1.55 DAR.**

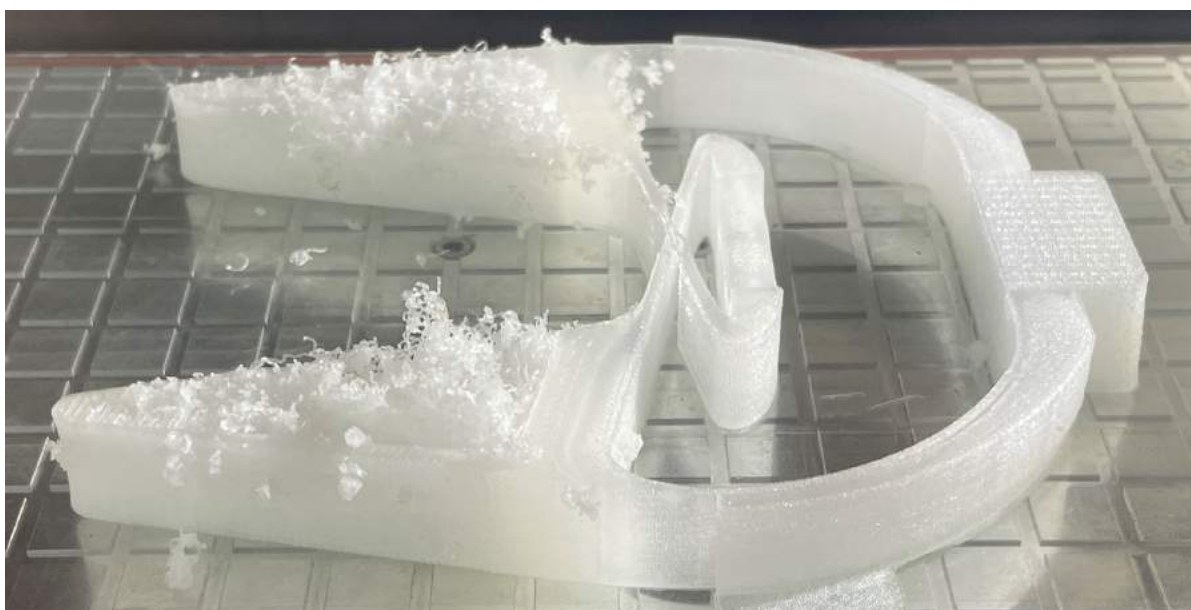
Voor de tweede iteratie is gewisseld naar SEBS 30 Shore A (Wittenburg Cawiton PR13630). Ook is gekeken naar de mogelijkheid om het printproces te versnellen. Tijdens het printen was opgevallen dat de printer veel tijd kwijt was aan de ribben, omdat deze niet werden geprint als infill (extrusie bij een frequentie tot 240Hz) maar als contour (extrusie bij een frequentie tot 70Hz). Een idee ter verbetering was daarom om de ribben niet als productgeometrie in te laden, maar een massieve volume in te laden in plaats van de ribben en een infill in te stellen met een increment angle van 0°. De printtijd werd hiermee teruggedrongen naar circa 1 uur en 15 minuten, een besparing in printtijd van meer dan 50%. Zoals zichtbaar in Figuur 41 verdient de afwerking van de als infill geprinte ribben uit SEBS aandacht en verbetering. De afwerking doet overigens niet af aan de functie en de SEBS vingers zijn een stuk flexibeler zijn dan de exemplaren uit TPU.



**Figuur 41:** *Verskil in afwerking tussen het printen van ribben als productgeometrie versus het printen als infill.*

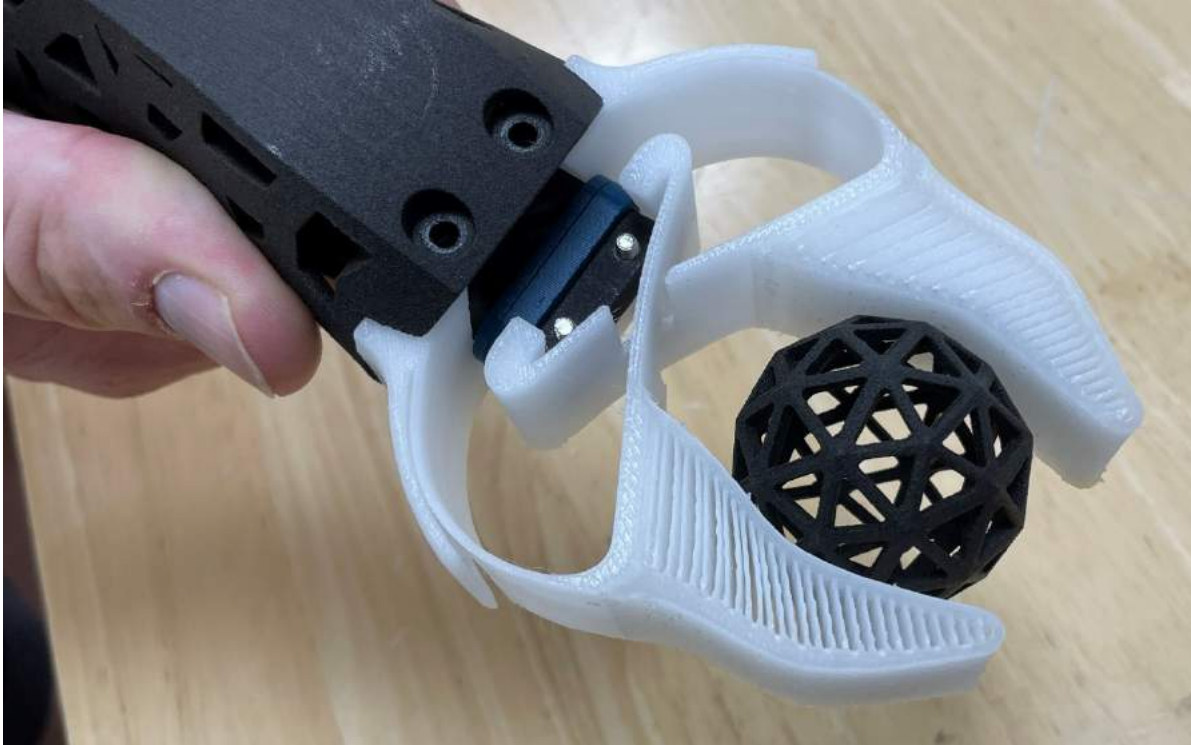
De laatste stap was om het actuatiemechanisme en de Fin Ray vingers als één product / 2K-object te printen. Hierbij is gekozen om SEBS voor de Fin Ray vingers te combineren met een spuitgietgrade PP (Total-Hanwha BJ550) voor het actuatiemechanisme. Niet alleen is er sprake van twee compatibele materialen ten gunste van verwerking, materiaalsterkte én recyclability: deze combinatie van materialen brengt veel van de opgedane kennis uit dit project samen.

Het combineren van de twee materialen in één printproces bleek wel uitdagend. Het printen van de twee materialen in één proces kan maar met één bouwkamer temperatuur. SEBS was tot op dat moment geprint in een bouwkamer tot 60°C, terwijl het gebruikte PP succesvol was geprint bij een bouwkamertemperatuur tussen 90°C en 125°C, afhankelijk van de gekozen productgeometrie en discharge. Bij een bouwkamer temperatuur van 90°C was helaas echter geen stabiel printproces mogelijk voor de SEBS ribben van de Fin Ray vingers, zoals weergegeven in Figuur 42.



**Figuur 42:** *Instabiel printproces van SEBS ribben (geprint als infill) bij een bouwkamertemperatuur van 90°C.*

Omdat de rest van de SEBS wél stabiel printte, is geprobeerd de ribben te printen uit een infill van PP. Dit resulteerde helaas in Fin Ray vingers met een hogere stijfheid dan ribben uit SEBS, maar leverde wel een stabiel printproces op. De afwerking is verder verbeterd met verscheidene iteratieve wijzigingen aan discharge, bouwkamertemperatuur en brim aan de PP component. Van de uiteindelijke gripper, weergegeven in Figuur 43, zijn meerdere exemplaren geprint.

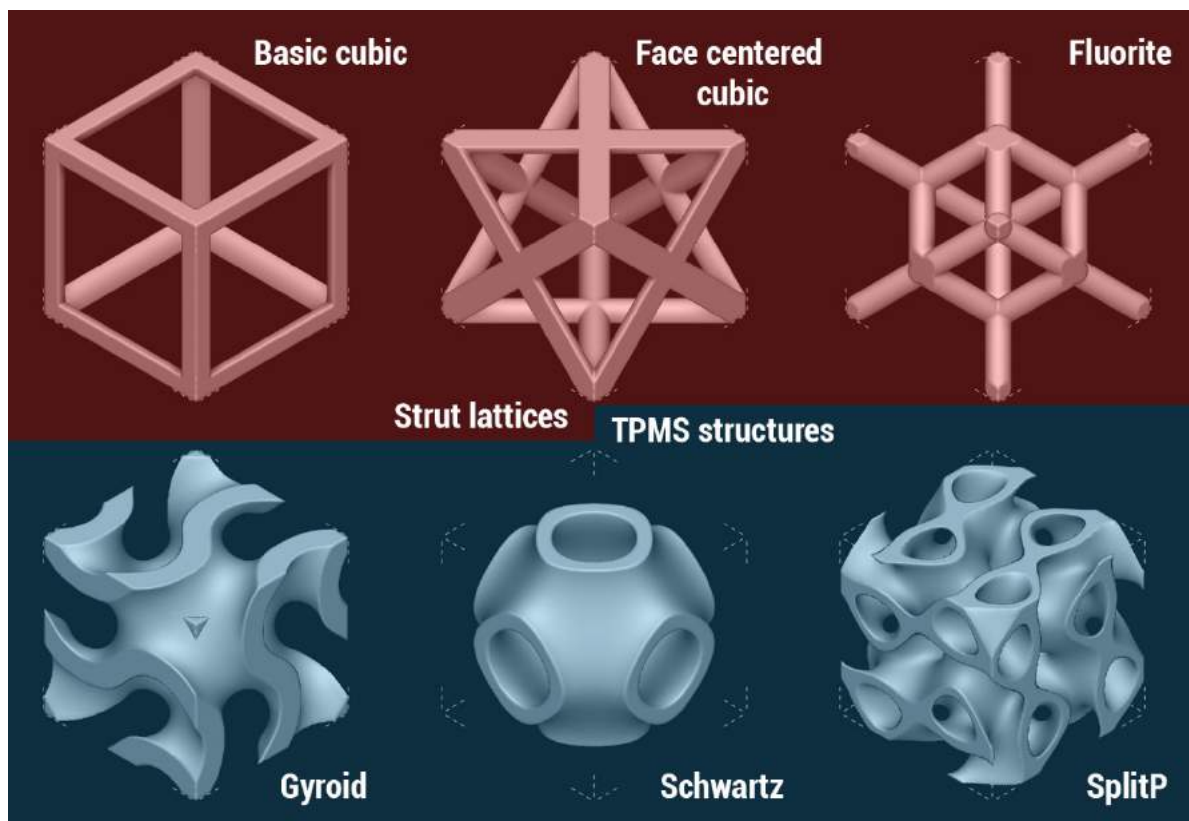


**Figuur 43:** Het 'eindproduct', een technology demonstrator voor de mogelijkheden met Arburg Plastic Freeforming in de vorm van een Fin Ray gripper uit een spuitgiet-grade PP (Total-Hanwha BJ550) en 30 Shore A SEBS (Wittenburg Cawiton PR13630) die als één component zijn geprint. De demonstrator is geprint met een bouwkamertemperatuur van 105°C en een laagdikte van 0.30mm, met voor SEBS 75% discharge en 0.7333 DAR, en voor PP 290% discharge en 1.4567 DAR.

## 10.2. Schuimachtig materiaal met TPMS-structuren

Hoofdstuk 8 beschrijft interessante mogelijkheden omtrent het printen van schuimachtige structuren door het variëren van procesparameters. Die methodiek is bruikbaar voor een infill percentage van 60% tot 100%; beneden 60% vulgraad ontstaan visuele defecten. Ook kan de vulgraad via procesparameters alleen worden toegewezen per onderdeel, waardoor effectief alleen stappen in vulgraad mogelijk zijn, maar geen traploze overgang (gradiënt) in vulgraad. Naast het genereren van schuimachtige structuren met procesparameters kan ook een schuimachtige structuur als (deel van) de productgeometrie worden ingeladen. De volgende driedimensionale structuren zouden kunnen worden ingezet:

- Strut lattices (Figuur 44-Boven). Deze structuren bestaan uit een reeks knooppunten verbonden door rechte stangen;
- Triply Periodical Minimal Surface ofwel TPMS-structuren (Figuur 44-Onder). De structuur bestaat uit een doorlopend gekromd oppervlak welke twee volumes scheidt;



**Figuur 44:** Als alternatief voor het verlagen van de vulgraad met procesparameters zouden als (deel van) de productgeometrie Strut lattices (boven) en Triply Periodical Minimal Surface (TPMS) structuren (onder) kunnen worden ingezet.

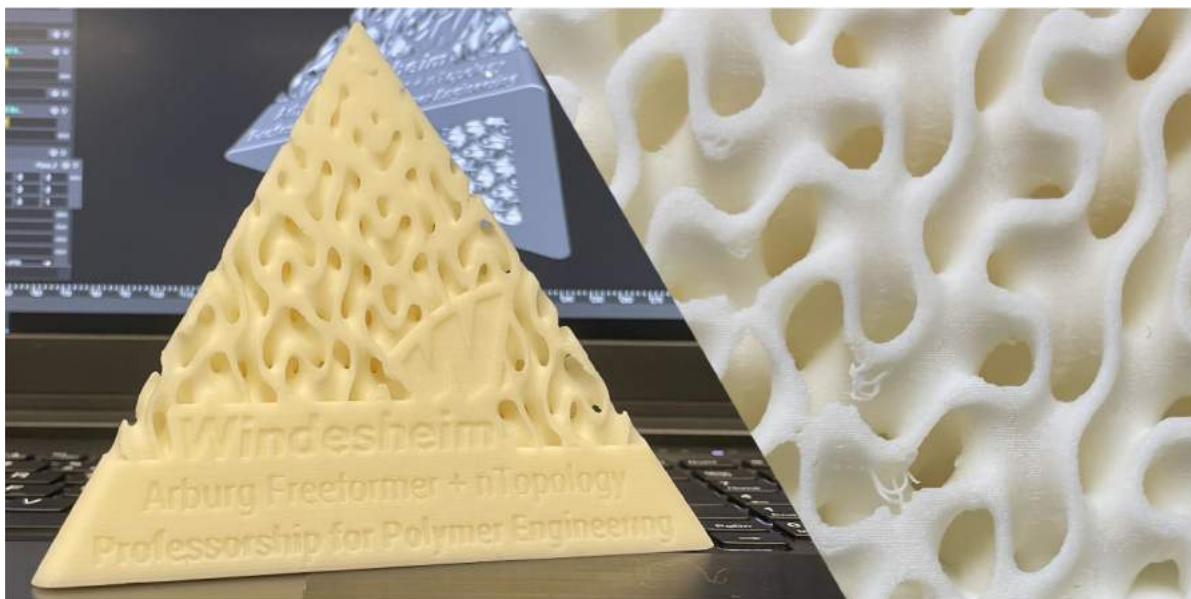
In dit onderzoek is gekozen TPMS-structuren te printen. Deze keuze is gemaakt omdat eerder in dit onderzoek (Hoofdstuk 8) is gebleken dat schuimachtige structuren in het bijzonder interessant zijn wanneer deze worden geprint uit materialen die grote elastische deformaties kunnen ondergaan, zoals thermoplastische elastomeren (TPE's). Deze materialen bezitten echter ook een lage stijfheid, waardoor structuren gemakkelijk zouden kunnen deformeren onder hun eigen gewicht of door de richtingswisselingen van de bewegende bouwplaat. Er is ingeschat dat de dubbel gekromde wanden van TPMS-structuren tijdens het printproces zichzelf beter ondersteunen dan de overhangende stangen van strut lattices.

In een ander onderzoek heeft het Lectoraat Kunststoftechnologie reeds ervaring opgedaan met het genereren van TPMS-structuren, waarbij gebruik is gemaakt van het softwarepakket nTopology. Deze ervaring is ingezet om de mogelijkheden met TPMS-structuren op de Freeformer te verkennen.

Eén type TPMS-structuur wordt bij FFF reeds veel toegepast: de Gyroid. Dit is ook gekozen als startpunt binnen dit onderzoek. Van de gyroid structuur is de celgrootte in de Z-richting groter gemaakt dan in de X- en Y-richtingen. Effectief wordt hiermee de structuur opgerekt in de Z-richting, wat overhangende elementen kleiner maakt. Voor initiële experimenten is gebruik gemaakt van ABS, omdat een hard kunststof ten opzichte van TPE's gemakkelijker print en beter haar vorm behoudt tijdens het printproces. Omdat de structuur in de basis printbaar leek op de Freeformer, zijn daarna verscheidene objecten geprint uit ABS met:

- Celgroottes (herhalingseenheid structuur) variërend van 5,5 tot en met 20mm;
- Wanddiktes variërend van 1,2 tot en met 6,5mm;
- Objecten tot een formaat van 131 x 115 x 108mm (X, Y, Z);
- Instellingen om het materiaal met hoge dichtheid te printen (1 contour en 100% infill);

Eén van de producten is weergegeven in figuur Figuur 45-L. Op de meeste plaatsen is een hoogwaardige afwerking bereikt, met uitzondering van enkele plekken aan de structuur bij de rand van het object. Daar konden overhangende elementen niet worden vermeden. Hierdoor zijn kleine defecten in afwerking zijn ontstaan, zoals weergegeven in Figuur 45-R. Opvallend is tevens dat de printtijd van gyroids als productgeometrie langer is dan wanneer het object massief zou worden geprint, ondanks de materiaalbesparing. Dit komt omdat de contour en dunne wanddiktes langzamer worden geprint dan infills met een grote wanddikte (zie Paragraaf 3.1).



**Figuur 45: Pyramide met een gyroid structuur met een celgrootte van 10x10x20mm en een wanddiktegradiënt van 2mm (onder) tot en met 6mm (boven).**

Nadat het printen van gyroids op de APF mogelijk is gebleken met ABS is overgestapt op TPE's. Er wordt verondersteld dat d.m.v. een gyroid structuur de compressie-eigenschappen van het TPE-product veranderen. Bij Arburg is de pyramide uit Figuur 45 succesvol geprint uit 70 Shore A TPU (Covestro Desmopan 9370A).

Bij Windesheim is gekozen proeven uit te voeren met 70 Shore A TPU (Covestro Desmopan 9370AU) en 30 Shore A SEBS (Wittenburg Cawiton PR13630). Hierbij zijn bollen geprint van Ø32mm diameter met een in X, Y, én Z-richting gelijke celgrootte van 10mm en wanddikte van 1,5mm. Ten opzichte van een massieve bol van hetzelfde formaat geeft dit een vulgraad van circa 30%.

Om de bol te ondersteunen tijdens productie is gebruik gemaakt van Arburg's wateroplosbare steunmaterialen, Armat 11 voor TPU en Armat 12 voor SEBS. Bij TPU bleek een stabiel printproces mogelijk door de buitenste schil van de bol te ondersteunen. Bij SEBS is dezelfde wijze van ondersteuning geprobeerd. Hierbij destabiliseerde de kern van de gyroid structuur tijdens het printproces met, zoals weergegeven in Figuur 46, een slechte afwerking tot gevolg. Om deze reden is de gyroid structuur uit SEBS ook in de kern ondersteund met Armat 12.



**Figuur 46:** Destabilisatie van het printproces van een SEBS gyroid structuur.

De gyroid bollen zijn weergegeven links in Figuur 47 (vooraan: SEBS, achter: TPU). Rechts daarvan liggen bollen waarvan de infill is aangepast met behulp van APF-procesparameters, v.l.n.r. 40%, 60% en 100% infill. De invloed van vulgraad door middel van procesparameters en gyroid-structuren op de stijfheid blijkt verschillend: de gyroid bollen hebben een vulgraad van circa 30%, maar een voelbaar hogere stijfheid dan de 40% infill bollen uit hetzelfde materiaal. Verder onderzoek is gewenst om de invloed van procesparameters en TPMS-structuren op de compressie-eigenschappen beter te begrijpen.

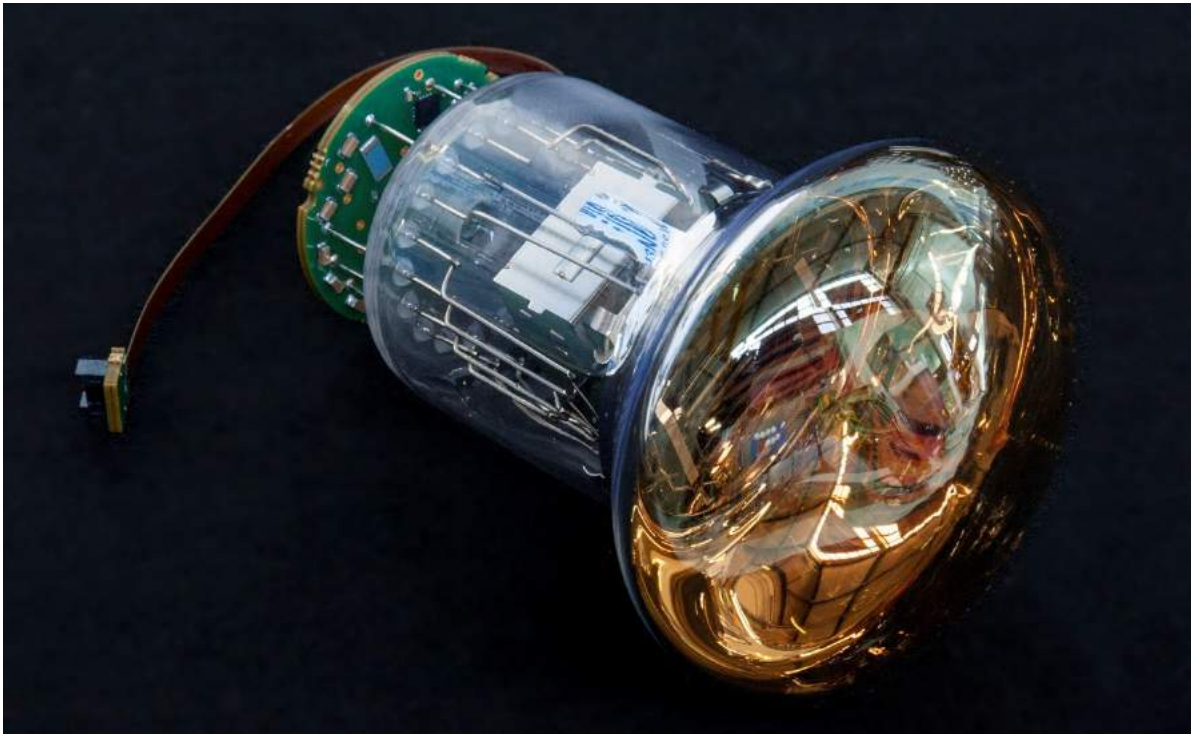


***Figuur 47: TPMS bollen uit SEBS 30 Shore A (voor) en TPU 70 Shore A (achter), met van links naar rechts: 30% vulgraad gyroid structuur, 40, 60 en 100% infill door middel van procesparameters.***

Tot dusver waren nog geen TPMS-structuren geprint op de Arburg Freeformer. Dat maakt de hierboven beschreven resultaten een primeur. Met de gebruikte methode is het mogelijk om structuren te produceren met een lagere vulgraad dan vanuit de procesparameters van APF mogelijk is wanneer er TPE gebruikt wordt. Ook is het mogelijk gradiënten in vulgraad en dus in eigenschappen aan te brengen. Met de gyroid-structuren worden andere eigenschappen behaald dan die worden behaald door het bijstellen van procesparameters. Verder onderzoek is nodig om de eigenschappen te karakteriseren en het potentieel beter te begrijpen, maar een proof of principle is in ieder geval gerealiseerd.

### 10.3. Gripper voor sensitieve componenten

Bij assemblage van meet- en analyseapparatuur wordt veelal gebruik gemaakt van sensitieve en kostbare componenten. Een voorbeeld hiervan zijn Photo Multiplier Tubes (PMTs): deze extreem gevoelige lichtsensoren kosten per stuk enkele honderden tot duizenden euro's per stuk. De constructie bevat een glazen behuizing onder vacuüm, en dit maakt de PMTs bijzonder gevoelig voor schade door schokken of impact.

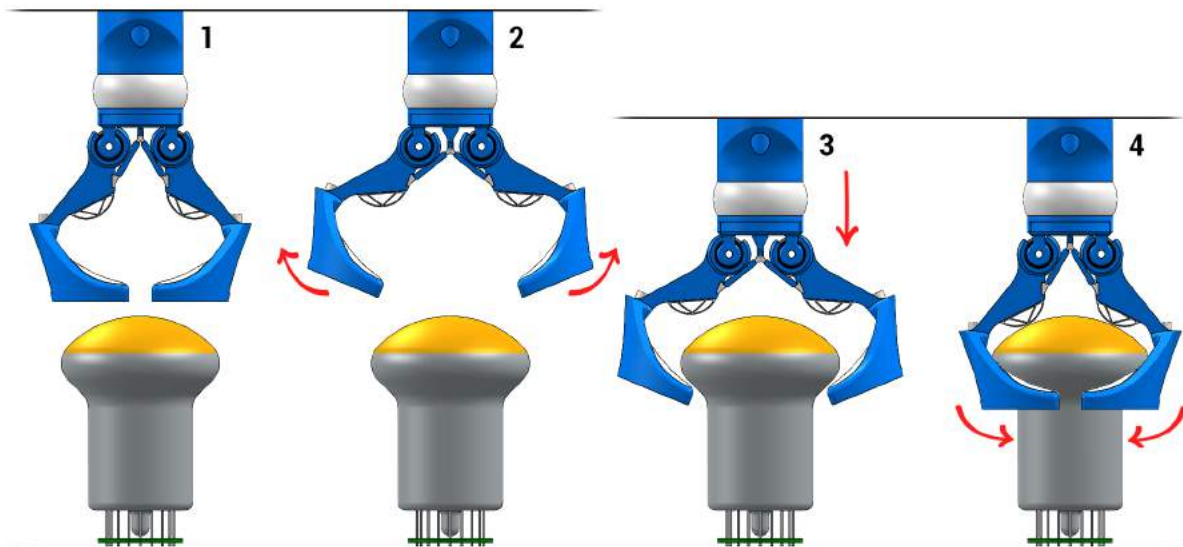


*Figuur 48: Afbeelding van een Photo Multiplier Tube (PMT). De componenten van een PMT bevinden zich in een glazen behuizing welke onder vacuüm staat. Als gevolg zijn deze sensoren gevoelig voor schade door schokken en impact, en dienen met voorzichtigheid te worden gehanteerd. Copyright KM3NeT.*

Er is een wens om automatisering toe te passen in het hanteren van PMTs. Hiervoor moet een gripper worden ontworpen waarin PMTs worden vastgehouden met een minimale grijpkracht. Daarnaast moeten de PMTs worden opgepakt, verplaatst en weggezet zonder schokken gedurende dat hele proces. In verband met de kleine beoogde oplage van de grippers komt AM in beeld. Voor de casus is voor APF gekozen om in één printproces een stijve constructie te kunnen printen voor precisie bij het positioneren van PMTs en dempende elementen voor bescherming tegen schokken. Voor deze demonstrator is gebruik gemaakt van ABS (INEOS Terluran GP-35) als hard materiaal en 70 Shore A TPU (Covestro Desmopan 9370AU) als zacht materiaal.

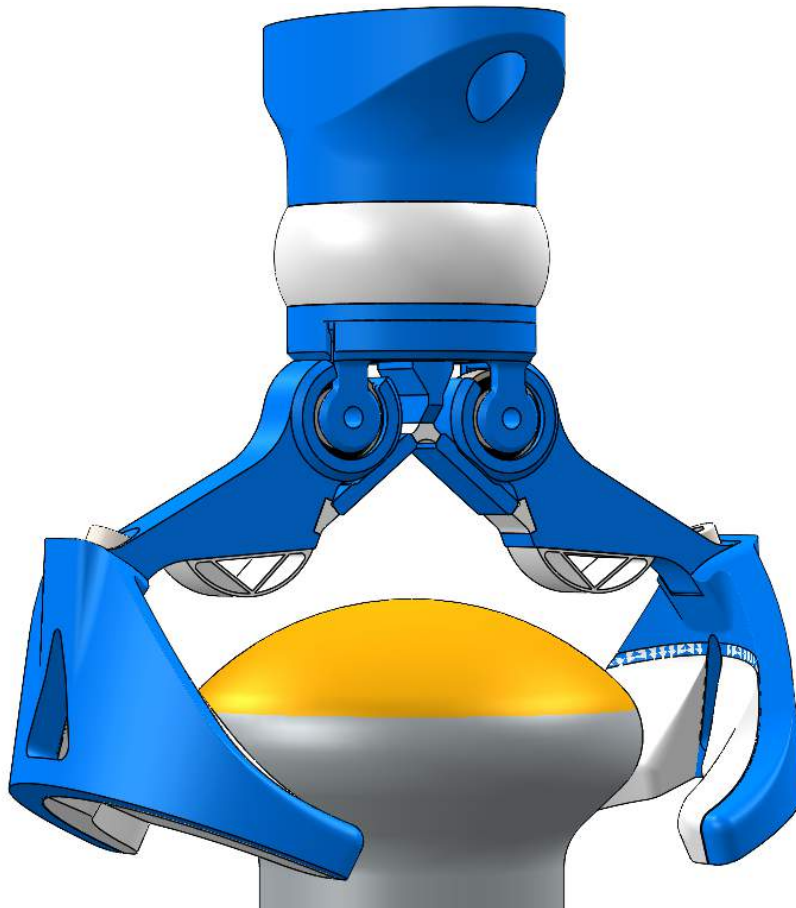
Het ontwerp van de demonstrator gaat uit van een situatie waarbij de PMTs met de sensor naar boven wijzen en niet van oriëntatie hoeven te worden gewijzigd. Figuur 49 (vanuit vooraanzicht) toont de stappen bij oppakken (en omgekeerde voor het weg zetten):

- De gripper boven de PMT te positioneren (1);
- De bekken, bevestigd aan scharnierende armen, te openen (2);
- De gripper omlaag te bewegen (3);
- De bekken te sluiten (4);
- De gripper omhoog te bewegen;



**Figuur 49: Situatieschets van het oppakken van de PMT door het demonstrator ontwerp. 1). De gripper positioneert boven de PMT; 2). De bekken worden geopend; 3). De gripper beweegt omlaag; 4). De bekken sluiten om de PMT.**

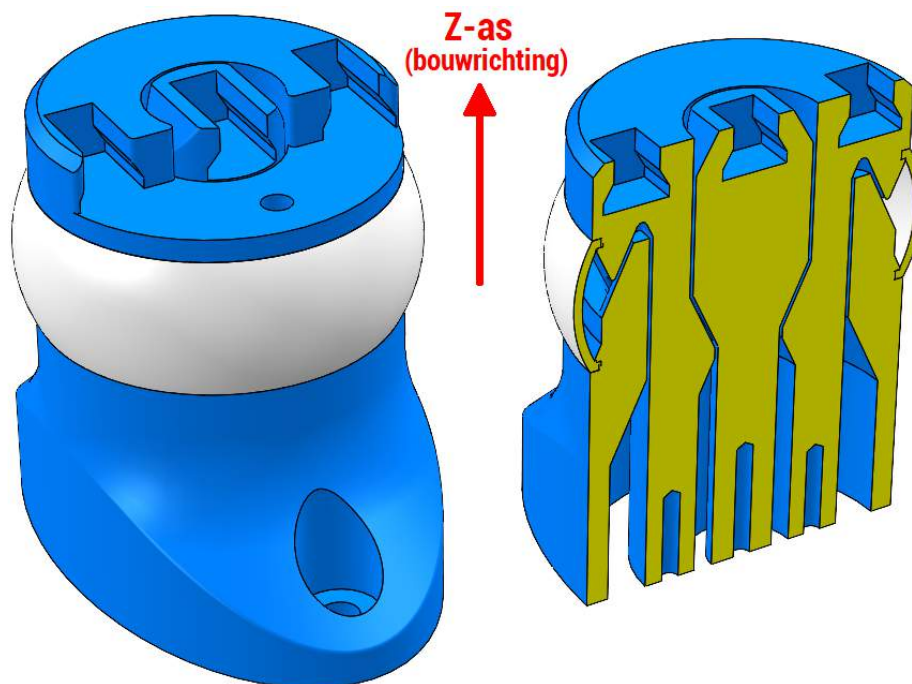
In Figuur 50 is het ontwerp van de gripper weergegeven, met ABS weergegeven in blauw en TPU in wit. De bekken van de gripper zijn gevormd naar de PMT, waarbij de PMT hoofdzakelijk van onderaf en de zijkanten wordt ondersteund. De PMT wordt niet vastgegrepen maar hangt in de bekken. In combinatie met dempende elementen op de bekken en de scharnierende armen worden laterale en verticale schokken en impact geabsorbeerd.



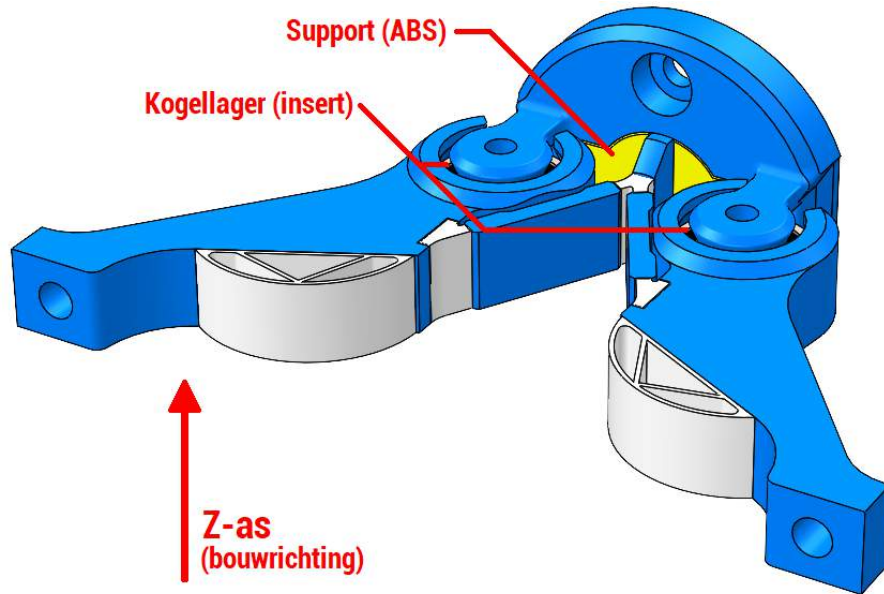
**Figuur 50: Ontwerp van de gripper met de bekken geopend. De blauw gemarkeerde delen zijn geprint uit ABS, de wit gemarkeerde delen uit TPU.**

Eén van de uitgangspunten is om het ontwerp te printen met een minimale hoeveelheid steunmateriaal. Om dit mogelijk te maken is het ontwerp is opgedeeld in vier afzonderlijk geprinte componenten:

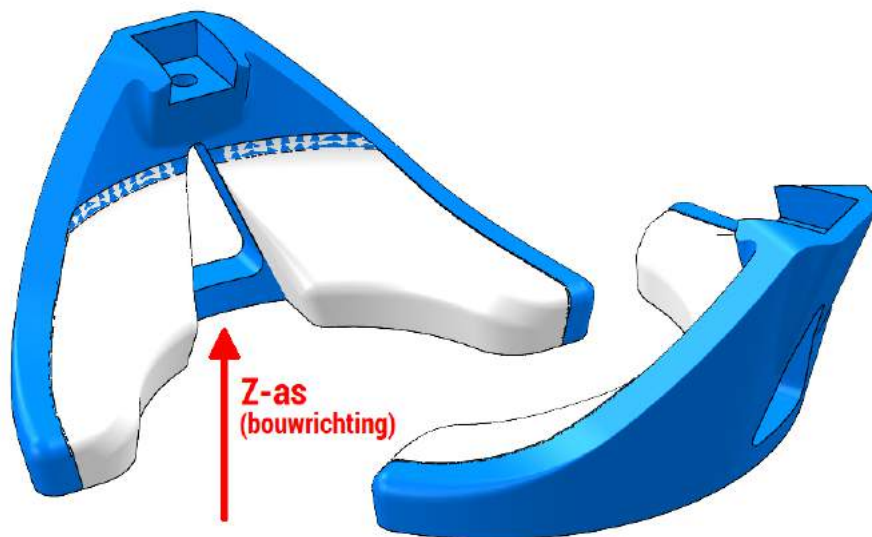
- Steun met een geïntegreerd actuatiemechanisme (Figuur 51). Deze component bestaat hoofdzakelijk uit ABS en bevat in het midden een pen (doorsnede in Figuur 51) welke dient voor actuatie van de scharnierende armen;
- Scharnierende armen (Figuur 52). Deze component bestaat uit twee ABS armen die elk door middel van een kogellager scharnieren om een as. Een mechanisme van ABS stangen verbonden met TPU filmscharnieren wordt gebruikt om de bekken te openen en te sluiten. Balgen aan de armen beschermen de PMT van schokken en impact tegen de armen. De scharnierende armen zijn bevestigd middels zwaluwstaartverbindingen en één M3 boutje. In de scharnierpunten van de armen zijn kogellagers als insert ingebracht door het printproces kortstondig te onderbreken en daarna voort te zetten. In de buurt van de deugelverbinding is een kleine hoeveelheid steunmateriaal uit ABS geprint en naderhand mechanisch verwijderd;
- Twee identieke bekken (Figuur 53). Deze component bestaat uit ABS met een kussentje geprint uit TPU met 1 contour en een infill van 60%. Elke bek wordt met één M3 boutje bevestigd aan de scharnierende arm;



**Figuur 51:** Afbeelding van de steun, met links het onderdeel en rechts een dwarsdoorsnede waarin te zien is dat het onderdeel uit meerdere concentrische elementen is opgebouwd. De steun is hoofdzakelijk geprint uit ABS (blauw) met een TPU balg (wit) voor afscherming van de bewegende (schuivende) delen.



**Figuur 52:** Afbeelding van de scharnierende armen, met ABS delen weergegeven in blauw, TPU in wit en steunmateriaal uit ABS geprint in geel. Kogellagers zijn halverwege het printproces als insert ingebracht door het printproces kortstondig te onderbreken, de lagers te plaatsen en het printproces daarna te hervatten.



**Figuur 53:** Afbeelding van de bekken, met weergave van ABS delen in blauw en TPU in wit.

Zoals beschreven in hoofdstuk 9 is in het ontwerp zoveel mogelijk uitgegaan van verbindingen tussen ABS en TPU in de X- en Y-richtingen met gebruik van een overlap ter behoeve van een sterke verbinding tussen de twee materialen. Verbindingen van ABS en TPU in de Z-richting (tussen de lagen) zijn zoveel mogelijk vermeden.

De geprinte en geassembleerde gripper is weergegeven in Figuur 54. Voor demonstratie doeleinden is de gripper geplaatst in een frame, waarbij middels een knop bovenop het frame de gripper wordt geactueerd.



**Figuur 54:** Geprinte en geassembleerde gripper in een frame voor demonstratie doeleinden. De uit ABS geprinte delen zijn gebroken wit, de uit TPU geprinte delen iets translucet.

## 10.4. Insert moulding om APF-geprinte onderdelen

In de afgelopen jaren heeft Additive Manufacturing (AM) veel in de aandacht gestaan. Lage opstartkosten, korte aanlooptijd tot productie en nieuwe ontwerp mogelijkheden lijken belangrijke redenen om te kiezen voor AM. Ten opzichte van gevestigde productietechnieken als spuitgieten is de cyclustijd per product echter lang, een vergelijking tussen AM en spuitgieten (Tabel 15) toont dat spuitgieten interessanter wordt naarmate productseries groter worden. In deze context lijkt AM beter geschikt om complementair te gebruiken aan gevestigde technieken dan om ze te vervangen.

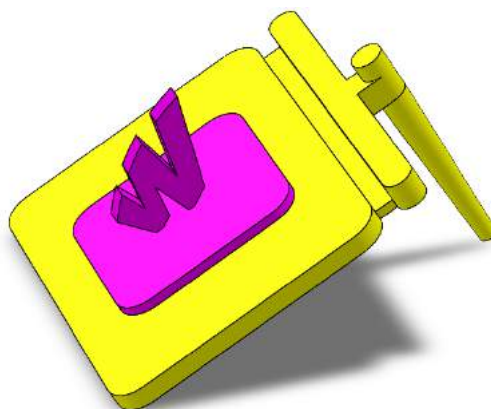
|                             | Additive Manufacturing (AM) | Injection Moulding (IM) |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Start-up costs              | Negligible                  | Mould tooling           |
| Lead time before production | Hours to days               | Weeks to months         |
| Cycle time per product      | Minutes to hours            | Seconds to minutes      |
| Primary design constraint   | (Self) supporting print     | Mould release           |
| Typical production scale    | ≤100 pieces                 | ≥10,000 pieces          |

Tabel 15: Vergelijking van typische voor- en nadelen van spuitgieten en Additive Manufacturing.

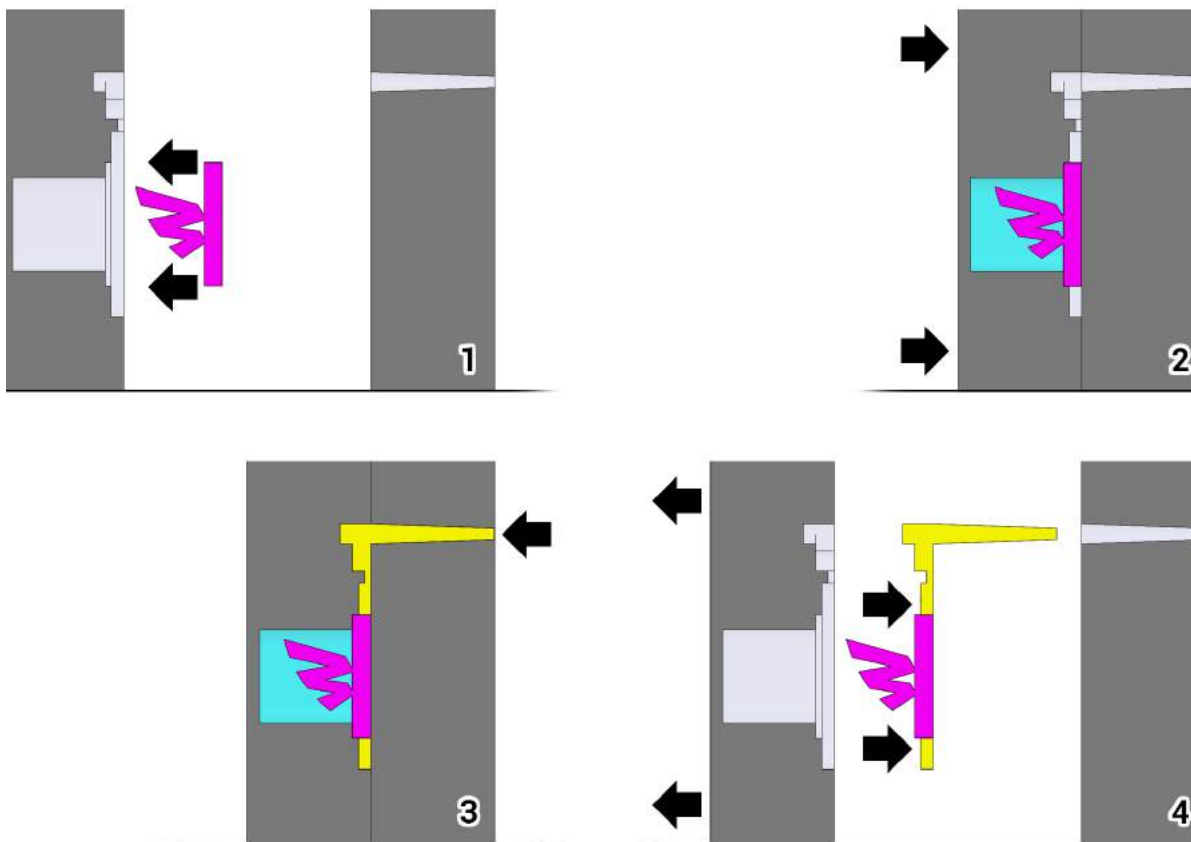
Door de industrie zijn reeds mogelijkheden verkend om AM en spuitgieten te gebruiken voor hetzelfde onderdeel in verschillende stadia van een productlevenscyclus [51]. Zo kan AM van pas komen om de markt in te treden zonder te investeren in een matrijs, of met een product eerder de markt op te kunnen. Hierna kan worden overgeschakeld op spuitgieten voor grote productseries. Ook kan AM inspringen indien een matrijs onverhoopt beschadigd raakt of voor naleveringen op de lange termijn, als alternatief voor het aanleggen van voorraden of naleveren van zeer kleine series gespuitsgiete producten. Maar is het ook mogelijk om in één onderdeel gelijktijdig de voordelen van spuitgieten en AM te benutten?

Op deze vraag aanhakend is tijdens het onderzoeksproject een gewaagd idee ontstaan om AM en spuitgieten te combineren via insert moulding. Figuur 56 geeft de stappen weer van het insert moulding proces en Figuur 55 het resulterende product:

- Een AM-insert (*magenta*) wordt in de matrijs geplaatst in een daarvoor bestemde holte (1);
- De matrijs wordt gesloten. Hierbij raakt de insert ingeklemd tussen de twee matrijshelften en sluit de insertholte (*turquoise*) af van de vormholte van de matrijs (2);
- De spuitgietholte (*geel*) wordt met gesmolten materiaal geïnjecteerd. Hierbij wordt de insert omsloten om het geprinte en gespuitsgiete deel te verbinden tot één onderdeel (3);
- Nadat de smelt is afgekoeld wordt het onderdeel uitgestoten (4);



Figuur 55: Weergave van voorbeeldproduct uit in deze paragraaf gebruikte matrijsconcept.



**Figuur 56:** Schematische weergave van insert moulding met 3D-geprinte inserts, bestaand uit de volgende stappen: 1) Plaatsen van insert (magenta) in matrijs; 2) Sluiten van matrijs, waarbij de insert de matrijsholte (lichtgrijs) en insertholte (turquoise) van elkaar scheidt; 3) Omspuiten van insert met materiaal (geel); 4) Uitstoten van product.

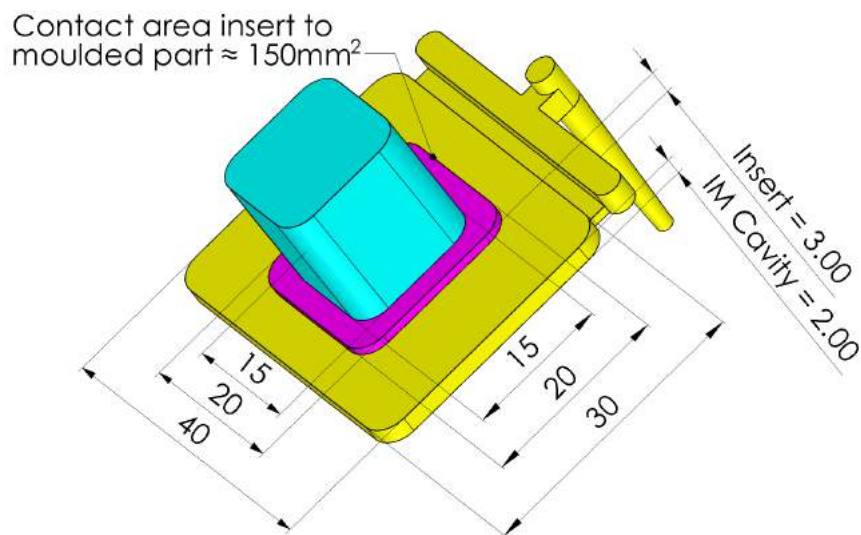
Het concept van insert moulding met geprinte inserts zou potentieel grote voordelen kunnen bieden. In plaats van een heel product te printen wordt de bulk van een product traditioneel geproduceerd: maatnauwkeurig, reproduceerbaar, snel en voor een concurrerende prijs. De, door de insert, afgesloten holte bevat vervolgens een geometrie die:

- Niet de vorm van de insertholte hoeft te volgen;
- Niet (traditioneel) lossend of produceerbaar hoeft te zijn;
- Met elke 'shot' anders zou kunnen zijn zonder dat dit het spuitgietproces beïnvloedt;

Door de insert ten opzichte van het gehele product relatief klein te houden blijven de printtijd- en kosten tot een minimum beperkt, en worden zowel het spuitgietproces als het 3D-printproces benut op hun meerwaarde. Hoewel voor productie van de insert op papier menig industrieel 3D-printproces zou kunnen volstaan, biedt APF de meeste vrijheid in materiaalkeuze voor zowel de insert als het spuitgietproces. Wil het insert moulding + AM concept slagen moet in de basis aan de volgende randvoorwaarden worden voldaan:

1. De insert moet de insertholte en spuitgietholte succesvol afsluiten;
2. De insert moet haar vorm behouden tijdens het insert moulding proces;
3. Er moet sprake zijn van een sterke verbinding tussen geprint en gesputgiet materiaal;

Om het concept op de proef te stellen is een matrijs geproduceerd met een holte volgens de afmetingen in Figuur 57.



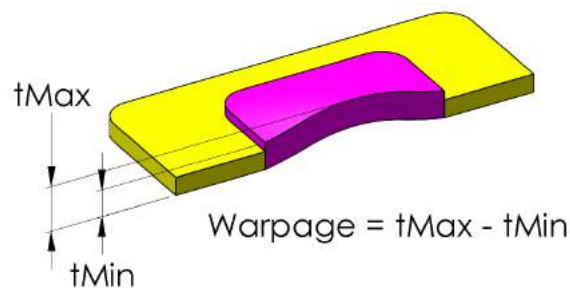
**Figuur 57: Maatvoering van testmatrijs.**

Voor de proeven is gekozen te werken met PP voor zowel de insert als het spuitgietproces. Hierbij is voor het spuitgietproces uit gegaan van één PP grade en voor het printproces zijn twee PP grades getest, zoals weergegeven in Tabel 16. Het spuitgieten is uitgevoerd op een Boy XS. De spuitgiet- en printinstellingen zijn weergegeven in Bijlage 3.

| Supplier       | Grade        | Printing | Moulding |
|----------------|--------------|----------|----------|
| LyondellBasell | Adsyl 5C 30F | X        |          |
| Hanwha-Total   | BJ550        | X        | X        |

**Tabel 16: Geteste materiaalcombinaties van printen en omspuiten in dit onderzoek.**

Het afsluiten door de insert is op de proef gesteld door te beoordelen op sporen van lekkage en vliesvorming. Hiervan was geen sprake. Voor de meetnauwkeurigheid is als indicator de vlakheid c.q. de mate van kromtrekken bepaald. Zoals weergegeven in Figuur 58 is de mate van kromtrekken bepaald door van ieder proefstuk de kleinste dikte af te trekken van de grootste dikte. De maten zijn bepaald met een micrometer en een meetklok met een meetresolutie 0.01mm. De metingen zijn verricht zowel na het printen als na het insert moulden. Bij de proeven zijn inserts met verschillende geometrieën getest; dit wordt verderop in de paragraaf toegelicht.



**Figuur 58: Door zowel de kleinste als grootste dikte te meten aan elke insert na het printen (voor het insert moulden) en na het insert moulden is de mate van kromtrekken van iedere insert gekwantificeerd.**

De metingen zijn weergegeven in Tabel 17. Hieruit blijkt dat inserts circa 0,4mm kromgetrokken zijn na het printproces. Na insert moulding zijn de inserts juist vlakker. Een mogelijke verklaring is dat de sluitkracht van de matrijs de insert tot een vlakke staat deformeert en de insert in deze staat wordt omspoten.

| Warpage of inserts    | After printing |      | After moulding |      | Change  |      |
|-----------------------|----------------|------|----------------|------|---------|------|
|                       | mm             |      | mm             |      | mm      |      |
| Material & geometry   | Average        | SD   | Average        | SD   | Average | SD   |
| BJ550 - Flat          | 0.26           | 0.09 | 0.23           | 0.02 | -0.03   | 0.10 |
| BJ550 - Dovetail      | 0.46           | 0.04 | 0.30           | 0.02 | -0.17   | 0.05 |
| BJ550 - Gyroid Fine   | 0.43           | 0.05 | 0.25           | 0.03 | -0.18   | 0.07 |
| BJ550 - Gyroid Coarse | 0.34           | 0.03 | 0.23           | 0.04 | -0.11   | 0.04 |
| Adsyl - Dovetail      | 0.53           | 0.03 | 0.29           | 0.04 | -0.24   | 0.02 |
| Adsyl - Gyroid Fine   | 0.46           | 0.03 | 0.22           | 0.16 | -0.24   | 0.16 |
| Adsyl - Gyroid Coarse | 0.46           | 0.04 | 0.14           | 0.13 | -0.32   | 0.13 |

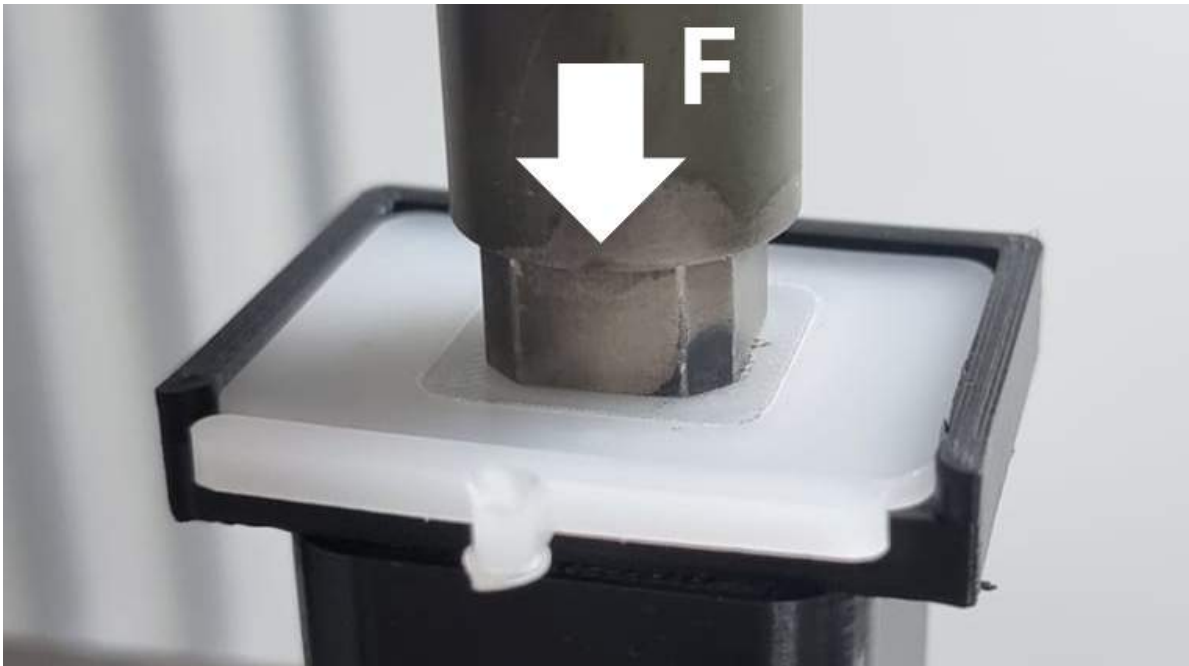
**Tabel 17: Kromtrekken van inserts van verschillende geometrieën en materialen na het printproces en na insert moulding.**

Naar aanleiding van de positieve resultaten omtrent nauwkeurigheid zijn ook inserts met een gat in het midden omspoten, zoals weergegeven in Figuur 59. In deze situatie zouden inserts onder invloed van de injectie- en nadruk gemakkelijker kunnen vervormen of tussen de matrijshelften weg worden gedrukt. Dit bleek echter niet het geval: de inserts hebben hun vorm behouden en er is geen meetbare verandering in de diameter van het gat geconstateerd als gevolg van het insert moulding proces.

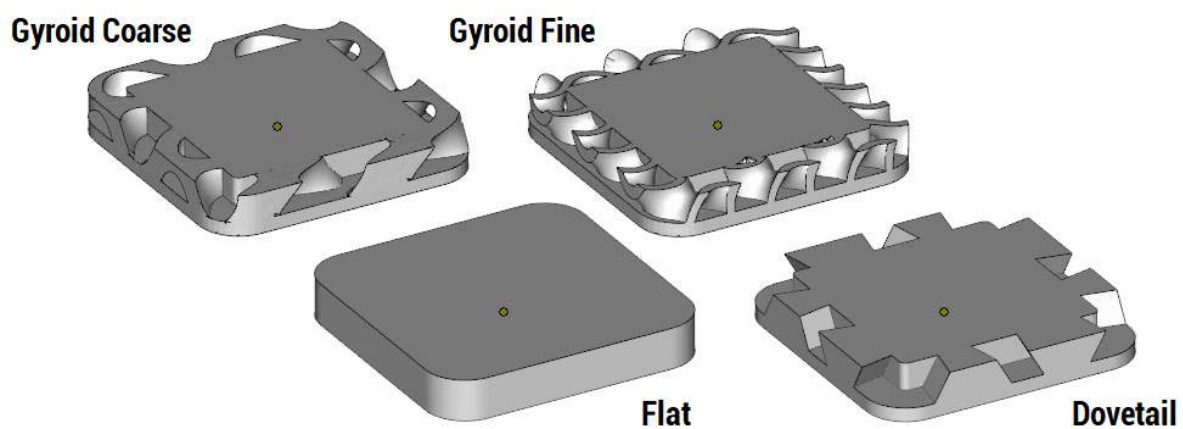


**Figuur 59: Inserts met een gat in het midden zijn succesvol omspoten, waarbij geen meetbare verandering in diameter van de gaten is geconstateerd.**

De verbindingsterkte is bepaald door proefstukken te testen op afschuifsterkte in een op maat gemaakte testopstelling, weergegeven in Figuur 60. Omdat de inserts worden geprint, kunnen laagdrempelig verschillende geometrieën worden geprint om de interface tussen insert en gespuitsgiet materiaal te vergroten, en om verbindingen te maken met mechanische interlocking. Er is daarom ook getest in hoeverre de geometrie aan de rand van de insert invloed heeft op de afschuifsterkte.



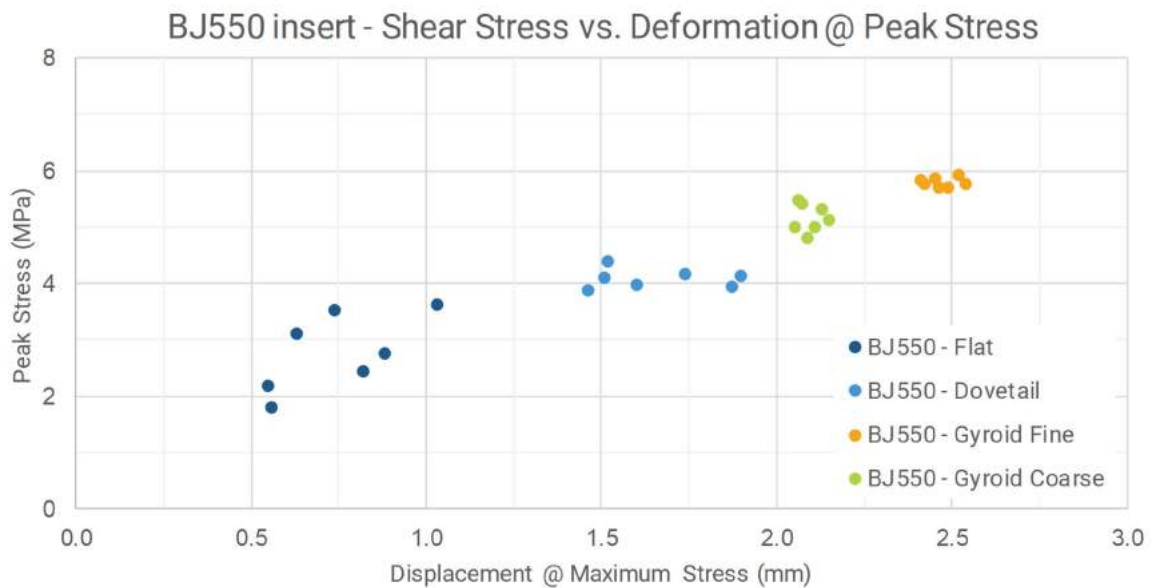
**Figuur 60:** Testopstelling voor het testen van afschuifsterkte tussen gesputgiete materiaal en geprinte insert.



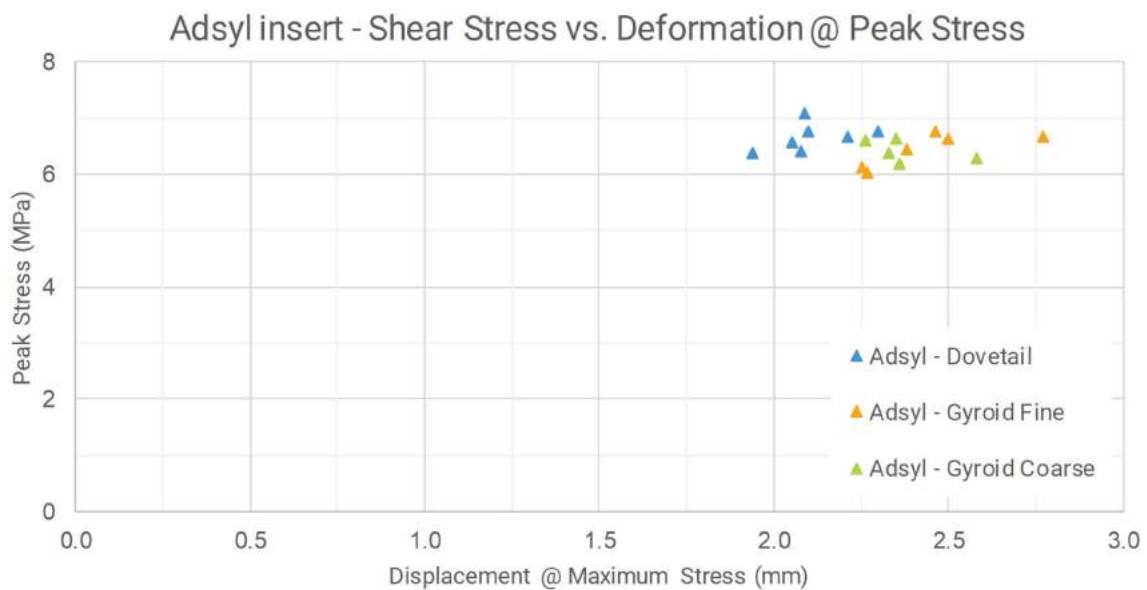
**Figuur 61:** Aan de buitenzijde van de insert zijn verschillende geometrieën geprobeerd om de invloed van de interface en mechanische interlocking tussen insert en gesputgiet materiaal te testen.

De resultaten zijn weergegeven in Figuur 62 (BJ550 insert + moulding) en Figuur 63 (Adsyl insert, BJ550 moulding). Uit de resultaten blijkt een afschuifsterkte tot circa 5,5MPa mogelijk met BJ550 inserts en tot meer dan 6,5MPa met Adsyl inserts. Hoewel het ontbreekt aan referentiegegevens in de vorm van een ononderbroken plaat, tonen de resultaten ieder geval duidelijk dat de inserts mechanisch belastbaar zijn.

Ook is duidelijk dat bij gebruik van BJ550 inserts de afschuifsterkte én spreiding van de resultaten afhankelijk is van de geometrie aan de rand van de insert, waarbij met Adsyl inserts hier geen sprake van lijkt te zijn. Een mogelijke verklaring zit in de lagere smelttemperatuur van Adsyl ten opzichte van BJ550 (zie Figuur 15 en Figuur 19 in Hoofdstuk 6). Mogelijk versmelten Adsyl inserts onder dezelfde procesparameters van het spuitgietproces beter met het aangespoten materiaal dan BJ550 inserts, met tot gevolg dat de verbindingsterkte met BJ550 inserts meer afhankelijk is van mechanische interlocking.



**Figuur 62: Afschuifsterkte van BJ550 inserts omspoten met BJ550.**



**Figuur 63: Afschuifsterkte van Adsyl inserts omspoten met BJ550.**

De resultaten omtrent verbindingsterkte zijn bemoedigend, zodanig dat nagedacht kan worden over potentiële toepassingen. Er wordt verwacht dat insert moulding van 3D-geprinte onderdelen interessant kan zijn wanneer er sprake is van:

- Een familie soortgelijke productontwerpen slechts op één of enkele details verschilt. Bijvoorbeeld een elektronisch apparaat waarvan in de basis één model behuizing wordt gebruikt, maar interne componenten en hun montagepunten verschillen per uitvoering. Door insert moulding te gebruiken kan deze familie productontwerpen worden geproduceerd uit één matrijs;
- Een speciale versie van een standaard product in kleine oplages. Bijvoorbeeld een vat met een standaard schroefdeksel waarvan in kleine oplages ook een deksel bestaat met een secundaire opening voor afnemen van monsters voor kwaliteitscontrole zonder het vat te hoeven openen. De standaard deksel zou kunnen worden gespuutgiet met een stalen plug in de matrijs en de deksel met secundaire opening uit dezelfde matrijs door de plug te verwijderen en op deze positie een insert van de secundaire opening te plaatsen;
- Massaproductie van producten op maat voor de gebruiker. Bijvoorbeeld bij een medisch hulpmiddel waar een deel van de behuizing aangepast wordt op het lichaam van de gebruiker. Door gebruik van insert moulding hoeft slechts het deel van de behuizing geprint te worden wat op maat moet zijn voor de gebruiker. Het deel van de behuizing wat bij ieder hulpmiddel gelijk is kan dan worden gespuutgiet, waarbij de verbinding tussen de twee ontstaat middels insert moulding;
- Een productontwerp wat voor het grootste deel spuitgietbaar is, maar een klein gedeelte van het ontwerp complexe, niet-lossende structuren bevat. Bijvoorbeeld wanneer voor een meetinstrument een behuizing is ontworpen met een geïntegreerd spatwaterdicht ontluichtingskanaal. Op basis van de verwachte vraag en ontwerpvrijheid was gekozen voor AM, maar de marktvraag is onderschat. Het gebruik van insert moulding kan faciliteren in de overstap naar spuitgieten zonder dat een langdurig en potentieel complex herontwerptraject nodig is.

Er zijn nog meer scenario's denkbaar. Bij elk van deze scenario's zijn alternatieve oplossingen naast insert moulding die overwogen kunnen worden; denk aan verbindingstechnieken als assemblage en lassen [52-54], het printen op spuitgietproducten [55] en het printen van (kunststof) matrijzen of matrijsdelen [56-58]. Welke oplossing het meest interessant is, zal afhankelijk zijn van de specifieke toepassing en het ontwerp in kwestie.

Al met al is sprake van een proof of concept van insert moulding van een 3D-geprinte insert, waarbij:

- Een uit Polypropyleen (PP) 3D-geprinte insert kan worden geplaatst in een holte van de matrijs, waarbij de insert een achterliggende holte afsluit en haar vorm behoudt bij blootstelling aan de temperaturen en drukken van een spuitgietproces met PP;
- De verbinding tussen het spuitgiet- en printdeel mechanisch belastbaar is;

Vervolgonderzoek op het onderwerp is geadviseerd, waarbij afhankelijk van vragen uit de industrie de aandacht bijvoorbeeld gevestigd kan worden op: materiaalkeuze, het positioneren en fixeren van inserts in de matrijs, het integreren van het concept in een geautomatiseerd proces en/of verdieping in de mechanische eigenschappen, maatnauwkeurigheid en reproduceerbaarheid.

## 11. Kennisdisseminatie

De in dit project opgedane kennis is op verscheidene wijzen verspreid. In eerste plaats uiteraard door samenwerking met de projectpartners en via deze publicatie. Daarnaast is ook sprake van kennisdisseminatie door betrokkenheid in het onderwijs en door deelname aan evenementen, welke hieronder verder staan uitgelegd.

### 11.1. Betrokkenheid met het onderwijs

Het onderzoek rond de Arburg Freeformer is verbonden met het onderwijs door inzet van stagiairs, afstudeerders, maar ook deelprojecten voor de studenten in de Minor Production Engineer, gastcolleges over de technologie en mogelijke toepassingen en rondleidingen.

De onderstaande studenten hebben een bijdrage geleverd aan dit onderzoeksproject:

Rik Gerding (stage)  
Ties Greve (stage)  
Luuk ter Horst (afstuderen)  
Jelmer Bellert (afstuderen)  
Mart van Steenberg (afstuderen)  
Richard Wiltens (afstuderen)  
Rowin Morsinkhof (stage)  
Jesse Visch (afstuderen)  
Jacco Bosscher (afstuderen)

### 11.2. Deelname aan evenementen

De onderzoeksresultaten en demonstrators zijn op verschillende (inter)nationale beurzen en congressen gepresenteerd en toegelicht:

FormNext 2021 (16–19 November 2021), Frankfurt, Duitsland

- Samples van proeven met ABS, PP (Adsyl)
- Netwerken

Hannover Messe 2022 (30 Mei–2 Juni 2022), Hannover, Duitsland

- PMT Gripper demonstrator op stand TechForFuture bij HollandHighTech NL Paviljoen

Bedrijven Info-middag Elastomeren (1 November 2022), Zwolle

- Presentatie over de mogelijkheden om TPE's te printen met APF
- Discussie met bedrijven rond actuele problemen en kennisvragen

FormNext 2022 (15–18 November 2022), Frankfurt, Duitsland

- Prototype Fin Ray gripper
- PMT Gripper
- Schuimachtig materiaal dmv. TPMS structuren
- Flexibele adapters (TPE)

AM4Production 2023 (29 Maart 2023), 's-Hertogenbosch

- Prominente plaats op beurs samen met Chemelot Innovations & Learning Labs en Arburg B.V.
- Fin Ray gripper
- PMT Gripper
- Schuimachtig materiaal dmv. TPMS structuren
- Flexibele adapters (TPE)

38<sup>e</sup> Internationale Conferentie van de Polymer Processing Society, PPS-38, St.Gallen, Zwitserland (22–26 Mei 2023)

- Poster presentatie 'Exploiting the potential of Soft Robotics & Additive Manufacturing utilizing PP & TPEs'
- Fin Ray Gripper demonstrator mee
- Andere samples mee

10 jaar TechForFuture, Teuge (1 Juni 2023)

- Fin Ray gripper
- PMT Gripper
- Schuimachtig materiaal dmv. TPMS structuren
- Flexibele adapters (TPE)

'Let's print the future' bij Festo eXperience Centre (4 Oktober 2023), Delft

- Fin Ray gripper
- PMT Gripper
- Schuimachtig materiaal dmv. TPMS structuren
- Flexibele adapters

## 12. Conclusies en aanbevelingen

De conclusies zijn opgedeeld in twee groepen, namelijk ten aanzien van de stand der techniek met APF en conclusies ten aanzien van de bijdrage van het uitgevoerde onderzoek aan de stand der techniek.

### Stand der techniek

Arburg Plastic Freeforming (APF) is enigszins verwant aan Fused Filament Fabrication (FFF), in de zin dat beide technieken door middel van materiaalextrusie laagsgewijs onderdelen opbouwen. De basisregels voor de ontwerper kennen grote overeenkomsten.

De productiesnelheid van APF is niet wezenlijk hoger dan zelfs FFF printers die een fractie van de aanschafprijs zijn van APF machines. De meerwaarde ligt niet in het concurreren met de mogelijkheden van FFF, maar het inspringen op (inherente) beperkingen van FFF en andere AM-technieken:

- Het printen van Thermoplastische Elastomeren (TPE's);
- Het printen van specifieke materialen welke als AM-grondstof niet beschikbaar zijn, zoals implanteerbare, elektrostatisch dissiperende of anderzijds gecertificeerde materiaalgrades;
- Logging en traceerbaarheid van het printproces;
- Nauwkeurige controle over de materiaaldichtheid;

Hier staat tegenover dat de techniek complex is en de nodige materiaal- en proceskennis vraagt, zowel van de ontwerper c.q. constructeur als de operator. Kennis welke specifiek het APF-proces betreft blijkt niet wijd verbreid, en dit betekent dat gebruikers bereid moeten zijn zelf kennis op te doen en deze tijd te investeren. Het instellen (kwalificeren) van nieuwe materialen voor APF in het bijzonder is een potentieel tijdrovende activiteit, afhankelijk van hoe hoog de eisen worden gesteld met betrekking tot processtabiliteit, mechanische eigenschappen, nauwkeurigheid en reproduceerbaarheid.

### Bijdrage onderzoek aan stand der techniek

Tijdens het onderzoek heeft het Lectoraat Kunststoftechnologie twee veranderingen geïntroduceerd aan de procedure van Arburg voor het kwalificeren van materialen:

- Discharge scan, waarbij bij aanvang van materiaalkwalificatie een databank wordt aangelegd over de verwerking van het materiaal over een breed bereik van (volume) output;
- Droplet Parameter Calculator (DPC), waarmee het mogelijk is procesparameters te berekenen in plaats van via een iteratief proces vast te leggen;

De verbeteringen van het LKT aan de materiaalkwalificatie procedure maakt het kwalificeren van nieuwe materialen sneller, laagdrempeliger en meer data-gedreven. Dit maakt de opgedane kennis uit materiaalkwalificaties tevens gemakkelijker overdraagbaar naar collega's of derden.

Eén van de hoofdonderwerpen in het onderzoek was een verkenning naar het printen van Polypropyleen (PP). Er is met diverse types PP, waaronder sputigietgrades, aangetoond dat dit uitdagend is, maar wel technisch mogelijk. Voor de processtabiliteit komt het zeer nauw dat materiaal na extrusie niet te vroeg, maar ook niet te laat kristalliseert. Als er een stabiel printproces wordt verkregen, dan kunnen een stijfheid en sterkte worden behaald die goed overeenkomen met die van

hetzelfde materiaal bij verwerking met spuitgieten. De taatheid is echter lager. Vervolgonderzoek naar verbetering van de taatheid en verbeteren van maatvoering en nauwkeurigheid van de geprinte onderdelen is aanbevolen.

De verkenning naar het printen van TPE's toont een breed scala aan mogelijkheden. Dit geldt zowel voor gebruik van TPE's bij hoge dichtheid als het printen van schuimachtige materiaalstructuren, waarmee de stijfheid van TPE's nog verder kan worden verlaagd. Dergelijke structuren zijn te printen door de aanpassing van procesparameters (verlagen vulgraad) en door TPMS-structuren te verwerken in de productgeometrie. De opgedane kennis rond de mechanische eigenschappen van geprinte TPE's is nog beperkt, maar vereist voor eindtoepassingen. Het advies is daarom vervolgonderzoek te verrichten naar de mechanische eigenschappen van TPE's, waarbij onder andere aandacht wordt besteed aan de invloed van printoriëntatie en de invloed van materiaaldichtheid bij het gebruik van een lagere vulgraad of TPMS-structuren.

De verkenning naar 2K printen met combinaties van hard en zacht materiaal toont interessante mogelijkheden en zijn een belangrijk aspect in meerdere technology demonstrators uit dit project. Verschillen in verwerkingstemperatuur tussen de twee materialen, met name de bouwkamer temperatuur, kan zorgen voor uitdagingen in de verwerking. Het ontwikkelen van een methodiek voor het bepalen van procesparameters bij 2K prints zou het gebruik van 2K laagdrempeliger kunnen maken. Het verkrijgen van een sterke verbinding tussen de twee materialen kan worden behaald door in het ontwerp een overlap aan te brengen tussen de materialen. Het advies is om de ontwerpregels voor en sterkte van de verbinding tussen materialen bij 2K prints nader te onderzoeken.

## Bijlage 1. Instelprocedure druppelextrusie Arburg en aanvullingen door Windesheim

In Hoofdstuk 5 staat een procedure beschreven voor het instellen van de parameters voor druppelextrusie: discharge, laagdikte en DAR. Deze beschrijving is een combinatie van een procedure van Arburg welke al bestond en aanvullingen welke Windesheim zelf heeft gemaakt op basis van opgedane ervaring tijdens onderzoek. Deze bijlage dient als aanvulling om duidelijk te maken welke delen van de procedure door Windesheim zijn gewijzigd of aangevuld, waarom en hoe.

### Instelprocedure Arburg

Als eerst worden de laagdikte en discharge gekozen. Arburg schrijft voor dat de geëxtrudeerde druppels langer moeten zijn dan de laagdikte voor een stabiel proces, met idealiter een 1,1 – 1,3x grotere druppellengte dan de laagdikte [28]. Het opmeten van de druppels kan worden uitgevoerd met behulp van een microscoop. Verder biedt Arburg geen methodiek voor de keuze van laagdikte en discharge. Als gevolg zijn ervaring en inzicht van de operator essentieel om op basis van de gewenste resolutie en afwerking voor een applicatie in te schatten welke laagdikte en discharge hier bij passen.

Zodra de laagdikte en discharge zijn vastgelegd, dan wordt de lengte-breedte verhouding van de geëxtrudeerde druppels gebruikt als een schatting voor DAR. Een reeks DAR-waarden, zowel lager als hoger, wordt gegenereerd op basis van deze schatting, en vervolgens geprint op dezelfde bouwplaat, zoals weergegeven in Figuur 64. Omdat de DAR wordt gewijzigd verschilt tussen de prints de afstand tussen de druppels in het XY-vlak.

Visueel wordt beoordeeld bij welke DAR het minste sprake is van onder- of overextrusie; door het testproces met kleinere stappen in DAR te herhalen wordt stapsgewijs toegewerkt naar een visueel acceptabele kwaliteit. Afhankelijk van de gewenste kwaliteitseisen kunnen verdere stappen worden gemaakt met metingen aan maatnauwkeurigheid, materiaaldichtheid en mechanische eigenschappen. Ook kan hierbij eventueel worden geoptimaliseerd door middel van het aantal contouren, de infill-contour overlap en maximale verplaatsingssnelheden van de bouwtafel.



**Figuur 64:** Proefstukken geprint uit ABS (INEOS Terluran GP-35) met een 0.20mm nozzle, een laagdikte van 300µm, 115% discharge en DAR-waarden van 0.70 (links) tot 1.00 (rechts). Op de samples met DAR 0.70 en 0.80 zijn duidelijke sporen van overextrusie zichtbaar, het sample met DAR 1.00 toont tekenen van onderextrusie.

Tijdens dit onderzoek is geconstateerd dat de kwalificatie van één set parameters via deze iteratieve methode meerdere dagen in beslag kan nemen, zelfs wanneer mechanische proeven en uitgebreide analysetechnieken buiten beschouwing worden gelaten. Wanneer van een reeds gekwalificeerd materiaal optimalisatie gewenst is voor bijvoorbeeld een hogere productiecapaciteit, een lagere oppervlakteruwheid of een kleinere minimale wanddikte, dan vraagt dit om een algehele herevaluatie

van discharge, laagdikte en DAR. Als gevolg is het benutten van vrijheid in materiaalkeuze en procesparameters en optimalisatie van reeds gekwalificeerde materialen tijdsintensief en kostbaar.

## Aanvulling instelprocedure Windesheim

Met als doel materiaalkwalificatie van nieuwe materialen en procesoptimalisatie van reeds gekwalificeerde materialen laagdrempeliger te maken, heeft het Lectoraat Kunststoftechnologie een aantal verbeteringen aangebracht aan de procedure van Arburg.

De eerste verbetering is de 'discharge scan' zoals beschreven in Paragraaf 5.2. Met deze methodiek wordt van ieder materiaal bij een initiële kwalificatie een database aangemaakt met wat de invloed is van discharge op de druppellengte, druppelbreedte. De systematiek maakt data inzichtelijk voor een initiële keuze van discharge en laagdikte. Dit kan tijdens de kwalificatie indien na initiële proeven toch een betere oppervlaktekwaliteit of hogere productiviteit is gewenst. Uiteraard kan dit ook als een reeds gekwalificeerd materiaal voor een ander product of toepassing ingezet gaat worden. In zulke gevallen biedt de discharge scan een databank waarmee gemakkelijk en snel een nieuwe combinatie van discharge en laagdikte kan worden gekozen.

De tweede verbetering is het introduceren van een Droplet Parameter Calculator (DPC). Waar de methode van Arburg vraagt om een initiële schatting en daarna iteratief fijn stellen van DAR, worden procesparameters bij DPC berekend aan de hand van een reeds gekwalificeerde parameter set.

De berekening berust op enkele beredeneringen en aannames. Allereerst wordt gesteld dat bij materiaalkwalificatie Parameter Set A ontstaat welke voor materiaal A een combinatie beschrijft van discharge, laagdikte (LT) en DAR die resulteert in de gewenste printkwaliteit (processtabiliteit, materiaaldichtheid, maatnauwkeurigheid en visuele afwerking).

De DPC stelt dat het door de machine geëxtrudeerde druppelvolumen Discharge onafhankelijk is van het gebruikte materiaal. Met andere woorden, materiaal A en B hebben bij een gelijke Discharge een gelijk druppelvolumen. Uiteraard kan de vorm van de druppel wél verschillen tussen materiaal A en B. De slicer beschrijft aan de hand LT en DAR de vorm en een druppelvolumen  $V_{slicer}$  waar de gesmolten druppel zich naar moet schikken.  $V_{slicer}$  wordt beschreven met de volgende formule:

$$V_{slicer} = LT * (DAR * LT)^2$$

**Vergelijking 2: Druppelvolumen als functie van parameters laagdikte (LT) en drop aspect ratio (DAR) in de slicing software.**

Door aan te nemen dat de printkwaliteit van Parameter Set A adequaat wordt beschreven door alleen  $Discharge_A$  en  $V_{slicer_A}$ , dan biedt dit de volgende mogelijkheden:

1. Parameter Set A kan als basis dienen voor een parameter set van materiaal B zolang de volumes  $Discharge_A$  en  $V_{slicer_A}$  gelijk blijven. Hierbij wordt een laagdikte voor materiaal B ( $LT_B$ ) gekozen passend bij de druppellengte van materiaal B bij  $Discharge_A$  en wordt de bijbehorende waarde van  $DAR_B$  berekend volgens Vergelijking 3:

$$DAR_B = \frac{\sqrt{\frac{V_{slicer_A}}{LT_B}}}{LT_B}$$

**Vergelijking 3: Berekening van DAR bij het veranderen van laagdikte en onveranderd druppelvolumen.**

2. De productiesnelheid en het detailniveau kunnen direct worden gestuurd door  $\text{Discharge}_A$  te vergroten of verkleinen tot  $\text{Discharge}_C$ ;  $\text{Vslicer}_A$  wordt evenredig vergroot of verkleind tot  $\text{Vslicer}_C$  zoals beschreven in Vergelijking 4.

$$\text{Vslicer}_C = \text{Vslicer}_A * \frac{\text{Discharge}_A}{\text{Discharge}_C}$$

**Vergelijking 4: Berekening van een nieuw druppelvolumen in de slicer bij wijziging naar een nieuwe discharge-waarde.**

Door  $\text{LT}_C$  te kiezen passend bij de druppellengte bij  $\text{Discharge}_C$  wordt de bijbehorende waarde van  $\text{DAR}_C$  berekend volgens Vergelijking 5:

$$\text{DAR}_C = \frac{\sqrt{\frac{\text{Vslicer}_C}{\text{LT}_C}}}{\text{LT}_C}$$

**Vergelijking 5: Berekening van DAR bij wijziging van Discharge en evenredige wijziging van het druppelvolumen in de slicer.**

DPC is ingezet als gereedschap bij kwalificatie van een verscheidenheid aan materialen waaronder ABS, TPU, SEBS en verscheidene grades PP. De volgende observaties zijn gemaakt:

- Bij inzetten van DPC voor kleine wijzigingen in discharge (ca. 1/3<sup>e</sup> vergroten of verkleinen) voor printen van hetzelfde materiaal zijn geen zichtbare tekenen van onder- of overextrusie opgetreden. Vanuit het criterium processtabiliteit was de berekende waarde van de DPC voor kleine wijzigingen rechtstreeks inzetbaar;
- Bij grote wijzigingen in discharge (verdubbelen of halveren) voor printen van hetzelfde materiaal is de door DPC berekende DAR een geschikt startpunt, maar vergt verdere afstelling voor een stabiel printproces. Mogelijk zijn kleine druppels beter in staat dan grote druppels zich bij extrusie te deformeren tot het doosvormig volume welke de slicing software beschrijft;
- In het onderzoek is eerst gewerkt met een door Arburg geadviseerde en reeds gekwalificeerde grade PP (LyondellBassell Adsy 5C 30F). Het materiaal wijkt in verwerking duidelijk af van PP spuitgietgrades (zoals Total-Hanwha BJ550) met een lagere verwerkingstemperatuur, hogere viscositeit (lagere MFI) en een andere lengte-breedte verhouding van geëxtrudeerde druppels. Door de verschillen tussen deze materialen zijn de door DPC berekende parameters voor het nieuwe materiaal niet toereikend om de juiste balans te vinden tussen onder- en overextrusie voor het nieuwe materiaal. In dergelijke gevallen is verdere afstelling en kwalificatie vereist;
- Er zijn verschillende spuitgietgrades PP gekwalificeerd. Toen eenmaal één spuitgietgrade was gekwalificeerd is deze parameter in DPC als uitgangspunt gebruikt om voor nog enkele spuitgietgrades de parameters te berekenen. Dit leidde tot een stabiel printproces en visueel soortgelijke printkwaliteit;

Hoewel de DPC niet onder alle omstandigheden het gewenste printresultaat geeft zonder verdere afstelling, vergemakkelijkt de DPC materiaalkwalificatie en procesoptimalisatie. Zowel de DPC als discharge scan hebben een grote rol van betekenis gehad in de resultaten van dit onderzoek. Een voorbeeld hierbij is de gripper in Paragraaf 10.3, waar zowel de instellingen van de twee componenten (SEBS en PP) moesten worden gekwalificeerd voor één laagdikte en geoptimaliseerd voor een balans tussen visuele afwerking en productiesnelheid.

## Bijlage 2. Smitgietinstellingen LyondellBasell Adsyl 5C 30F en Total-Hanwha BJ550

| Parameter                 | Unit | Tensile specimens   |              | Impact specimens    |
|---------------------------|------|---------------------|--------------|---------------------|
|                           |      | <i>Adsyl 5C 30F</i> | <i>BJ550</i> | <i>Adsyl 5C 30F</i> |
| Temperature 1 (Transport) | °C   | 180                 | 210          | 215                 |
| Temperature 2             | °C   | 190                 | 220          | N/A                 |
| Temperature 3             | °C   | 200                 | 230          | 230                 |
| Temperature 4 (Nozzle)    | °C   | 200                 | 230          | N/A                 |
| Chiller/ mould            | °C   | 40                  | 40           | 26                  |
| Injection time            | s    | 1.88                | 1.88         | 0.32                |
| Packing pressure          | bar  | 60                  | 25           | 110                 |
| Packing time              | s    | 30                  | 40           | 20                  |
| Cooling time              | s    | 20                  | 20           | 35                  |
| Dosage speed              | rpm  | 120                 | 120          | 50                  |
| Back pressure             | bar  | 10                  | 10           | 8                   |

## Bijlage 3. Procesparameters voor insert moulding

| APF Process parameters for insert moulding |       |       |      |                        |       |       |      |
|--------------------------------------------|-------|-------|------|------------------------|-------|-------|------|
| Parameter                                  | Adsyl | BJ550 | Unit | Parameter              | Adsyl | BJ550 | Unit |
| Tnozzle                                    | 190   | 215   | °C   | Number of contours     | 1     |       | -    |
| Tchamber                                   | 90    | 110   | °C   | Infill percentage      | 100   |       | %    |
| Nozzle diameter                            | 0.2   |       | mm   | Infill-contour overlap | 50    |       | %    |
| Discharge                                  | 117.5 | 190   | %    | Start angle            | 45    |       | °    |
| Layer thickness                            | 200   | 250   | µm   | Increment angle        | 90    |       | °    |
| DAR                                        | 1.68  | 1.55  | -    | Speed, discrete        | 20    | 26    | mm/s |
|                                            |       |       |      | Speed, continuous      | 110   | 90    | mm/s |

| IM Process parameters for insert moulding |                    |       |
|-------------------------------------------|--------------------|-------|
| Parameter                                 | Unit               | Value |
| Temperature 1 (Transport)                 | °C                 | 225   |
| Temperature 2                             | °C                 | N/A   |
| Temperature 3                             | °C                 | 240   |
| Temperature 4 (Nozzle)                    | °C                 | N/A   |
| Mould                                     | °C                 | 26    |
| Injection speed                           | cm <sup>3</sup> /s | 10    |
| Packing pressure                          | bar                | 350   |
| Packing time                              | s                  | 5     |
| Cooling time                              | s                  | 20    |
| Dosage speed                              | rpm                | 140   |
| Back pressure                             | bar                | 100   |

## Referentielijst

1. ARBURG GmbH + Co KG, 2022. "Technical Data - Freeformer 200-3X."
2. ARBURG GmbH + Co KG, 2022. "Technical Data - Freeformer 300-3X."
3. ARBURG GmbH + Co KG, 2022. "Technical Data - Freeformer 750-3X."
4. S. Charlon, J. Le Boterff, J. Soulestin, 2021. "Fused filament fabrication of polypropylene: Influence of the bead temperature on adhesion and porosity." *Additive Manufacturing*.38.
5. L. Hentschel, F. Kynast, et al., 2020. "Processing Conditions of a Medical Grade Poly(Methyl Methacrylate) with the Arburg Plastic Freeforming Additive Manufacturing Process." *Polymers (Basel)*.12(11).
6. A. Ahlinder, S. Charlon, et al., 2020. "Minimise thermo-mechanical batch variations when processing medical grade lactide based copolymers in additive manufacturing." *Polymer Degradation and Stability*.181.
7. Q. Spiller, J. Fleischer, 2018. "Additive manufacturing of metal components with the ARBURG plastic freeforming process." *CIRP Annals*.67(1):225-8.
8. A. Hirsch, C. Dalmer, E. Moritzer, 2020. "Investigation of Plastic Freeformed, Open-Pored Structures with Regard to Producibility, Reproducibility and Liquid Permeability."
9. P. Pinter, S. Baumann, et al., 2018. "Mechanical Properties of Additively Manufactured Polymer Samples using a Piezo Controlled Injection Molding Unit and Fused Filament Fabrication compared with a Conventional Injection Molding Process." *Solid Freeform Fabrication 2018*.
10. H. Ramezani Dana, M. Ben Azzouna, et al., 2017. "Développement de matériaux cellulaires avec mise en oeuvre par fabrication additive bimatière." *23ème Congrès Français de Mécanique*.
11. J. Knöchel, M. Kropka, et al., 2018. "Resistance of 3D printed polymer structures against fatigue crack growth." *6th International Conference Integrity-Reliability-Failure*.
12. Q. Weitzel, A. Bitar, et al., 2022. "3D-printing of transparent granulate materials for light guides and scintillation detectors." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*.
13. E. Moritzer, A. Hirsch, et al., 2019. "Plastic droplet welding: bond strength between plastic freeforming structures and continuous fiber-reinforced thermoplastic composites." *Welding in the World*.63(3):867-73.
14. P. Ovlaque, M. Bayart, et al., 2022. "On the temperature evolution and related crystallinity of polypropylene parts processed via material extrusion." *Additive Manufacturing*.58.
15. V. Srinivas, C. S. J. van Hooy-Corstjens, J. A. W. Harings, 2018. "Correlating molecular and crystallization dynamics to macroscopic fusion and thermodynamic stability in fused deposition modeling; a model study on polylactides." *Polymer*.142:348-55.

16. N. Kumar, P. K. Jain, et al., 2018. "Extrusion-based additive manufacturing process for producing flexible parts." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*.40(3).
17. Y. Sun, A. D. Juncos Bombin, et al., 2022. "Application of 3DP & 3DBP for promoting cutaneous wound regeneration." *Bioprinting*.
18. S. Guessasma, H. Nouri, F. Roger, 2017. "Microstructural and Mechanical Implications of Microscaled Assembly in Droplet-based Multi-Material Additive Manufacturing." *Polymers (Basel)*.9(8).
19. B. Zhang, J. Nasereddin, et al., 2021. "Effects of porosity on drug release kinetics of swellable and erodible porous pharmaceutical solid dosage forms fabricated by hot melt droplet deposition 3D printing." *International Journal of Pharmaceutics*.604.
20. R. Malcolm, N. Welsh, et al., 2018. "Density mediated drug release with AM produced rings."
21. S. Buhl, J. Vogt, et al., 2020. "Integration of antimicrobial substances in 3-D printed plastics." *Current Directions in Biomedical Engineering*.6(3):295-7.
22. A. Hirsch, F. Hecker, E. Moritzer, 2019. "Proces parameter optimization to improve the mechanical properties of Arburg Plastic Freeformed components." *Solid Freeform Fabrication: Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
23. H. Ramezani Dana, F. Barbe, et al., 2019. "Polymer additive manufacturing of ABS structure: Influence of printing direction on mechanical properties." *Journal of Manufacturing Processes*.44:288-98.
24. S. Charlon, J. Soulestin, 2020. "Thermal and geometry impacts on the structure and mechanical properties of part produced by polymer additive manufacturing." *Journal of Applied Polymer Science*.137(35).
25. K. Gunther, F. Sonntag, et al., 2017. "Universal Micromachining Platform and Basic Technologies for the Manufacture and Marking of Microphysiological Systems." *Micromachines (Basel)*.8(8).
26. J. Fajardo Cortes, 2017. "3D printing of patient specific bioresorbable cardiovascular stents."
27. P. Minetola, F. Calignano, M. Galati, 2020. "Comparing geometric tolerance capabilities of additive manufacturing systems for polymers." *Additive Manufacturing*.32.
28. ARBURG GmbH + Co KG, 2018. "ARBURG Kunststoff Freiformen, Materialqualifizierung."
29. C. S. Davis, K. E. Hillgartner, et al., 2017. "Mechanical strength of welding zones produced by material extrusion additive manufacturing." *Addit Manuf*.16:162-6.
30. K. Raz, F. Sedlacek, 2019. "Effect of Melt Temperature on Weld Line Strength." *Key Engineering Materials*.
31. G. Jadhav, V. Gaval, et al., 2023. "Weld-lines and its strength evaluation in injection molded parts: A review." *Polymer Engineering & Science*.
32. Plastics Europe, 2022. "Plastics – the Facts 2022."

33. Magigoo, 2020. "3D Printing PP (Polypropylene) – Why and how?" Web page accessed on: 01.09.2023, available from: <https://magigoo.com/blog/3d-printing-polypropylene-why-and-how/>
34. Leapfrog. "3D Printing with Polypropylene." Web page accessed on: 01.09.2023, available from: <https://www.lpfrg.com/guides/3d-printing-polypropylene/>
35. Xometry, 2022. "All About PP 3D Printing Filament: Materials, Properties, Definition." Web page accessed on: 01.09.2023, available from: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/pp-3d-printing-filament/>
36. LyondellBasell, 2022. "Technical Datasheet - Moplen EP540P."
37. Songhan. "Technical Datasheet - Hyosung Topilene J440."
38. Songhan. "Technical Datasheet - Hyosung Topilene J640."
39. Hanwha Total. "Technical Datasheet - BJ550."
40. BASF, 2021. "Technical Datasheet - Ultrasint TPU 88A."
41. BASF, 2022. "Technical Datasheet - TPU 85A."
42. Carbon, 2020. "Technical Datasheet - SIL 30."
43. EOS, 2022. "Technical Datasheet - TPU 1301."
44. FormLabs, 2020. "Technical Datasheet - Flexible 80A."
45. FormLabs, 2020. "Technical Datasheet - Elastic 50A."
46. FormLabs, 2023. "Technical Datasheet - TPU 90A."
47. NinjaTek, 2021. "Technical Datasheet - Chinchilla."
48. Stratasys, 2018. "Technical Datasheet - FDM TPU 92A."
49. K. Elgeneidy, P. Lightbody, et al., 2019. "Characterising 3D printed Soft Fin Ray Fingers with Layer Jamming for Delicate Grasping."
50. K. Elgeneidy, A. Fansa, et al., 2020. "Structural Optimization of Adaptive Soft Fin Ray Fingers with Variable Stiffening Capability." 2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft).
51. KrausMaffei Technologies GmbH + Electro Optical Systems GmbH, 2022. "The Best of Both Worlds: Combining AM and IM to Master the Whole Life Cycle of Your Parts."
52. M. Heilig, B. Baudrit, et al., 2018. "Schweißen von lasergesinterten Kunststoffbauteilen aus PA12: Heizelementschweißen und Ultraschallschweißen."

53. R. Singh Rana, I. Singh, A. Kumar Sharma, 2023. "Ultrasonic welding of printed/molded sustainable polymer specimens with energy directors." *Ultrasonics*.134:107078.
54. M. Wolf, J. Werner, D. Drummer, 2020. "Weld seam morphology and bond strength of infrared and vibration welded SLS parts of polyamide 12 as a function of the layer build-up direction and the welding process." *Additive Manufacturing*.36.
55. Lectoraat Kunststoftechnologie, 2020. "Unpublished Work - FFF Printing with a robot on a curved injection moulded product."
56. Addifab. "Freeform Injection Moulding (FIM) Technology." Web page accessed on: 26.09.2023, available from: <https://www.addifab.com/technology>
57. Fortify. "Whitepaper - 3D Printed Mold Tooling, The Fast, Inexpensive Solution For Prototype & Low Volume Molding."
58. Compañía Levantina de Reductores S.L. "3D printed injection moulds: advantages and limitations." Web page accessed on: 19.09.2023, available from: <https://clr.es/blog/en/3d-printed-injection-moulds/>

## Projectpartners

Dit project is uitgevoerd in samenwerking met:



Schoeller Allibert



# Industrial Additive Manufacturing: Freeforming

## Over het 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 publicatie

Met behulp van Additive Manufacturing is al veel mogelijk; de keuze van beschikbare materialen is echter nog wel minder breed dan bij conventionele verwerkingstechnieken als spuitgieten. Een mogelijk antwoord hiervoor is Arburg Plastic Freeforming (APF), een industriële 3D-print techniek die thermoplastisch kunststofgranulaat als grondstof gebruikt.

In publiek domein was onvoldoende kennis om APF technologie op waarde te schatten. Het Lectoraat Kunststoftechnologie heeft in samenwerking met en gefinancierd door Flamco, M&G, MOBA, Schoeller Allibert en het Universitair Medisch Centrum Groningen (UMCG) en TechForFuture een tweejarig onderzoeksproject uitgevoerd om uit te zoeken wat het APF-proces voor hen en voor de industrie kan betekenen, om zo bij te dragen aan de beschikbare kennis en optimale implementatie van technieken zoals Additive Manufacturing in het bedrijfsleven.

