

**OPTIMALISATIE MOBILE
3D-PRINTLAB**

AMobile

PBA Ontwerp- en Productietechnologie

**Door: David Gatarek & Joep de Winkel
Hogeschoolpromoter: Koen Geyskens
Bedrijfspromoter: Kevin Sel**

**Bachelorproef voorgedragen tot het behalen van de
graad en het diploma van professionele bachelor**

Campus De Nayer

Voorwoord

Voorwoord van David Gatarek en Joep de Winkel,

Wij zijn laatste jaar studenten van de professionele bachelor Ontwerp- en Productietechnologie aan Thomas More Campus De Nayer. Deze bachelorproef vormt een belangrijk onderdeel van onze opleiding en markeert het hoogtepunt van onze driejarige studie. Door onze interesse in additieve productietechnieken hebben we de keuze gemaakt om voor deze bachelorproef te kiezen

Wij willen graag onze dank uitspreken aan onze promotoren, Koen Geyskens en Kevin Sel voor hun begeleiding, expertise en inzicht gedurende ons onderzoek. Onze oprechte dank gaat ook uit naar Wouter Nuyts voor zijn waardevolle expertise en inzicht en naar Jan Ooms voor het mogelijk maken van het gebruik van het verwarmde bed. Daarnaast willen we Jeroen Mingneau bedanken voor het aanbieden en het gebruik van de nieuwe versie van Siemens NX. We zijn ook dankbaar voor KUKA België voor het beschikbaar stellen van de benodigde documentatie en voor alle bedrijven die materialen hebben gesponsord waardoor we onbezorgd verder konden werken.

Dit eindwerk is het resultaat van teamwork, lange dagen en de steun van velen. We hopen dat ons werk een positieve impact heeft op de opleiding en toekomstige studenten.

Samenvatting

Het onderzoek naar AMobile ontstond uit de toenemende vraag naar grootschalige additieve manufacturing (LSAM) en de daarmee gepaard gaande uitdagingen. AMobile is opgezet met als doel bedrijven en scholen kennis te laten maken met grootschalig 3D-printen door middel van demonstraties en workshops op locatie.

Deze bachelorproef richt zich op de verbetering van de functionaliteit, efficiëntie en het gebruiksgemak van AMobile. Dit wordt bereikt door een literatuurstudie naar thermoplasten en een praktijkonderzoek naar de printparameters van verschillende materialen. De literatuurstudie geeft inzicht in de meest geschikte thermoplasten voor gebruik met de Pulsar-extruder. Het praktijkonderzoek richt zich op de optimalisatie van printparameters voor materialen zoals PLA en PETG. Het doel hiervan is om de geschiktheid van deze materialen voor de schroef extruder te bepalen en de bijbehorende extrusie parameters te optimaliseren.

Daarnaast omvat het project handleidingen om de gebruiksvriendelijkheid van AMobile te vergroten. Deze handleidingen dekken verschillende aspecten zoals de opstelling van de KUKA-robot, de bediening ervan en de CAM-setup. Het uiteindelijke doel is om de workflow te optimaliseren, van 3D-ontwerp tot het geprinte object.

Door deze aanpak is AMobile toegankelijker geworden voor een breder publiek en zijn er grote stappen gemaakt om het gebruiksgemak te vergroten.

Inhoudstafel

VOORWOORD	3
SAMENVATTING	4
LIJST MET FIGUREN	8
LIJST MET TABELLEN	12
LIJST MET AFKORTINGEN EN SYMBOLEN	13
INLEIDING	14
1. INITIATIEFASE	15
1.1. Probleemstelling	15
1.2. Doelstelling	15
2. LITERATUURSTUDIE	16
2.1. Fused Filament Fabrication (FFF)	16
2.2. Fused Granulate Fabrication (FGF)	17
2.3. Large Scale Additive Manufacturing (LSAM)	17
2.4. Robot	18
2.4.1. Opbouw industriële robot	19
2.5. Software	19
2.5.1. Siemens NX	19
2.5.2. AiSync / pro	19
2.5.3. AdaOne	20
2.5.4. Fusion 360	20
2.5.5. SprutCAM X Robot	20
2.6. Kunststoffen	20
2.6.1. Thermoplasten	21
2.6.1.1. <i>Amorf</i>	21
2.6.1.2. <i>Semi-kristallijn</i>	21
2.6.1.3. <i>Materialen</i>	22
2.6.1.3.1. <i>Vezelversterking</i>	23
2.6.1.4. <i>Gerecycleerd materiaal</i>	24
2.6.1.5. <i>Printparameters</i>	25
2.6.2. Pellet extruder	27
3. AMOBILE	28
3.1. Opbouw	28
3.1.1. Trailer	28
3.1.2. KUKA KR20 R1810-2	29
3.1.3. KR C4	30
3.1.4. Pulsar extruder	31
3.1.5. Beckhoff PLC & TwinCAT 3	32
3.2. Beginsituatie	33

4. MARKSTUDIE	35
4.1. Pellet aanvoersysteem	35
4.1.1. Dyze design – automated pellet feeding	35
4.1.2. TUmaker – pellet pro feeder	35
4.1.3. Hopper	36
4.2. Printoppervlak	36
4.2.1. PEI-folie	36
4.2.2. Glas plaat	36
4.2.3. Schilders tape	37
4.2.4. Verpakkingstape	37
4.2.5. Kapton	37
4.2.6. Garolite	37
4.2.7. Geperforeerd plaat	38
4.2.8. OSB-plaat	38
4.2.9. Betonplex	38
4.2.10. MDF-plaat	38
4.2.11. Lastafel met inserts	39
4.2.12. ABS pellet bed	39
4.3. Afzuiging	40
4.3.1. Toilet ventilator	40
4.3.2. N3 afzuiging	40
4.3.3. HEYLO-afzuiging	40
4.4. Print oriëntatie	41
4.4.1. Verticale (0°)	41
4.4.2. Schuin (45°)	41
4.4.3. Horizontaal (90°)	41
4.5. SWOT-analyse	42
5. TUSSENTIJD OPTIMALISATIE	43
5.1.1. Materiaal aanvoer	43
5.1.2. Stappen motor	44
5.1.3. Post processor & Extrusie	47
5.1.4. Kalibratie methode	48
6. ONDERZOEK	49
6.1. Printparameters	49
6.1.1. Voortloopsnelheid	49
6.1.2. Extrusie output	51
6.2. 3D model	53
6.3. Constante laagtijd	54
6.4. Printoppervlak	55
6.4.1. Gesponsord materiaal	56
6.5. Siemens NX	57
6.5.1. Planar additive thinwall	57
6.5.2. Freeform additive coating	58
6.6. Pellet aanvoersysteem	59
6.7. Kosten pellet aanvoersysteem	69

6.8. Bouwvolume	70
6.9. Kalibratie	72
6.9.1. Kost kalibratie	73
6.10. Stappen motor	74
6.11. Easy HMI	75
6.12. Transport positie	76
6.13. Beckhoff PLC	78
7. OPTIMAAL PROCES	79
7.1. 3D model	79
7.2. Programmatie	79
7.3. Printparameters	79
7.4. Robotic rules	80
7.5. Virtual machine	80
7.6. Post processor	80
7.7. KUKA KR20	80
7.8. Beckhoff licentie	80
7.9. Kalibratie	80
7.10. TCP & BASE	81
7.11. Materiaal aanvoer	81
7.12. Temperatuur zones	81
7.13. Extrusie schroef	81
7.14. Programma importeren	81
7.15. Programma actief	81
7.16. Programma testen	81
7.17. Materiaal purge	82
7.18. Programma starten	82
7.19. Printen & controle	82
8. RESULTATEN	83
8.1. Cases	83
9. VEILIGHEIDSANALYSE	85
10. AANBEVOLEN VERBETERINGEN	85
10.1. T4F3	85
10.2. Actuele tussenafstand	85
10.3. Constante laagtijd	85
10.4. Variërende breedte en hoogte	86
10.5. Adaptieve voortloopsnelheid	86
10.6. Extruder 90 draaien	86
10.7. Beckhoff licentie	86
10.8. Virtuele machine	86
BESLUIT	87

BIBLIOGRAFIE	88
BIJLAGEN	91
A. Materiaal offertes:	91
B. Pellet aanvoer offerte:	94
C. Materiaal datasheet:	95

Lijst met figuren

Figuur 1: Filament extruder	16
Figuur 2: Granulaat extruder	17
Figuur 3: Thermwood - LSAM MT	18
Figuur 4: Large scale additive manufacturing in FGF	18
Figuur 5: Da Vinci surgical robot	18
Figuur 6: Robot axis	19
Figuur 7: Siemens NX logo	19
Figuur 8: AI-build logo	19
Figuur 9: Adaxis logo	20
Figuur 10: Autodesk fusion 360 logo	20
Figuur 11: SprutCAM logo	20
Figuur 12: Kunststofgroepen	20
Figuur 13: Verschillende thermoplast structuren	21
Figuur 14: Glasvezels	23
Figuur 15: Koolstofvezels	23
Figuur 16: Houtvezels	23
Figuur 17: Bamboe vezel	23
Figuur 18: Vlasvezel	23
Figuur 19: Pellet types	24
Figuur 20: Afkoel grafiek thermoplast	25
Figuur 21: IR interpas temperatuur	25
Figuur 22: Viscositeit water, olie & honing	26
Figuur 23: Pellet extruders CEAD	27
Figuur 24: Trailer binnen	28
Figuur 25: Trailer buiten	28
Figuur 26: KUKA KR20 R1810-2	29
Figuur 27: Payload diagram KR20 R1810-2	29
Figuur 28: Werkgebied KR20 R1810-2	30
Figuur 29: Rotatiegebied KR20 R1810-2	30
Figuur 30: KR C4 & SmartPAD-2	30
Figuur 31: SmartPAD-2	30

Figuur 32: Dyze Design - Pulsar	31
Figuur 33: Demonteerde reductiekas	31
Figuur 34: Voorbeeld beckhoff PLC-componenten	32
Figuur 35: Figuur: beginopstelling voor Bachelor proef	33
Figuur 36: Dyze design - pellet feeder	35
Figuur 37: TUmaker - pellet feeder	35
Figuur 38: 3D-print hopper	36
Figuur 39: PEI-folie	36
Figuur 40: Glas plaat	36
Figuur 41: Schilders tape	37
Figuur 42: Verpakkingstape	37
Figuur 43: Kapton folie	37
Figuur 44: Garolite plaat	37
Figuur 45: Geperforeerd plaat	38
Figuur 46: OSB-plaat	38
Figuur 47: Betonplex	38
Figuur 48: MDF-plaat	38
Figuur 49: Cead - print & lastafel	39
Figuur 50: Pellet bed - ABS	39
Figuur 51: Toilet ventilator	40
Figuur 52: Nederman - N3	40
Figuur 53: HEYLO-afzuiging	40
Figuur 54: Verticale oriëntatie	41
Figuur 55: Schuine oriëntatie	41
Figuur 56: Horizontale oriëntatie	41
Figuur 57: SWOT-analyse	42
Figuur 58: Visualisatie opstelling tijdens Bachelor proef	43
Figuur 59: Oude koppelstuk	43
Figuur 60: Oude hopper	43
Figuur 61: Nieuwe koppelstuk PETG	44
Figuur 62: Nieuwe hopper PETG	44
Figuur 63: PLC-omkasting plaat met componenten	44
Figuur 64: EL7041-0052 - Stappenmotor terminal	45
Figuur 65: Labobron	45
Figuur 66: EL7041-0052 - kabel connectie	45
Figuur 67: Materiaal ophoping extruder	46
Figuur 68: Ophoping op schroef	46
Figuur 69: Proper schroef van materiaal	46
Figuur 70: Geen connectie externe bus (SYS-44)	47
Figuur 71: Connectie externe bus (SYS-44)	47
Figuur 72: Siemens NX Post configurator - Deposition output data	47
Figuur 73: Siemens NX - OLP Command	47

Figuur 74: Pendrijfver met platkop _____	48
Figuur 75: kalibratie punt _____	48
Figuur 76: Visualisatie tijdens kalibreren _____	48
Figuur 77: Pendrijver in kalibratie punt _____	48
Figuur 78: T4F3 ingevulde parameters _____	49
Figuur 79: T4F3 interpas temperatuur Y:70°C _____	50
Figuur 80: IR-beeld interpastemperatuur _____	50
Figuur 81: Doorsnede geprinte laag _____	50
Figuur 82: Materiaal prop rPLA _____	51
Figuur 83: grafiek output test 1 _____	51
Figuur 84: Vierkant output test 2 _____	51
Figuur 85: Grafiek output test 2 _____	52
Figuur 86: Toenemende laagbreedte _____	52
Figuur 87: Adaptieve output grafiek voor een bepaalde laag geometrie _____	52
Figuur 88: Sheet body _____	53
Figuur 90: NX open programma _____	54
Figuur 91: Piramide test; _____	54
Figuur 92: Goed hechting PETG op verwarmt glas _____	55
Figuur 93: Warping PLA+ op schilders tape _____	55
Figuur 94: (a) = planar additive thinwall (b) = freeform additive coating _____	57
Figuur 95: In het groen de traversal _____	57
Figuur 96: Varierende laag hoogte _____	58
Figuur 97: bodemlaag met continue toolpad _____	58
Figuur 98: Luchtversterker principe _____	59
Figuur 99: Venturi-pomp principe _____	59
Figuur 100: Defenitieve ontwerp venturi-pomp _____	60
Figuur 101: Lijn schema aanvoersysteem _____	61
Figuur 102: Test opstelling pellet aanvoer _____	63
Figuur 103: Pellet sensor kabel _____	63
Figuur 104: Pellet sensor connectie _____	63
Figuur 105: Koppelstuk PETG _____	64
Figuur 106: Hopper PETG _____	64
Figuur 107: ZA-hopper _____	64
Figuur 108: Hopper _____	64
Figuur 109: Schuifstuk _____	64
Figuur 110: Deksel _____	65
Figuur 111: Bevestiging filter stuk _____	65
Figuur 112: Draai mechanisme deksel _____	65
Figuur 113: Draai mechanisme hopper _____	65
Figuur 114: Volledige hopper _____	65
Figuur 115: Alu flens _____	66
Figuur 116: Bevestiging flens opstelling _____	66

Figuur 117: Hopper & slang bevestiging	66
Figuur 118: Buisklem op joint A3	66
Figuur 119: Buisklem op basis frame	66
Figuur 120: Compressor - CPRA 24 MS20	67
Figuur 121: MDF-plaat	67
Figuur 122: Schuim mat	67
Figuur 123: MDF-plaat met poten	67
Figuur 124: Compressor rechte achter in de trailer	68
Figuur 125: Venturi-pomp aangesloten op installatie	68
Figuur 126: Opslagruimte pellets	68
Figuur 127: Printvolume frame met oude hopper	70
Figuur 128: Printvolume verwarmt bed met oude hopper	70
Figuur 129: Optimale printvolume frame met oude hopper	70
Figuur 130: Frame uit de trailer	71
Figuur 131: Printvolume tafelblad	71
Figuur 132: Kalibratie set MEMD	72
Figuur 133: Kalibratie meetklok SN5001	72
Figuur 134: Meetklok met korte meetstift	72
Figuur 135: Meetklok houder versie 1	72
Figuur 136: Meetklok met lange meetstift	73
Figuur 137: Meetklok houder versie 2	73
Figuur 138: Voedingsbron 48V	74
Figuur 139: Voedingsbron tussen het frame	74
Figuur 140: KUKA.HMI Easy	75
Figuur 141: Voorbeeld van een easy HMI	75
Figuur 142: Oude transport positie zonder ondersteuning	76
Figuur 143: Transport positie en joints waardes	76
Figuur 144: Eerste aanpassing transport positie	77
Figuur 145: Definitieve transport positie	77
Figuur 146: Bout M12 in KUKA frame	77
Figuur 147: Houten ondersteun balk	77
Figuur 148: Definitieve transport positie	77
Figuur 149: Voorbeeld Beckhoff interface	78
Figuur 150: Visualisatie opstelling einde Bachelor proef	79
Figuur 151: Tussenafstand	85
Figuur 152: Foutmelding siemens NX	86

Lijst met tabellen

Tabel 1: Pellet type voor extruder	24
Tabel 2: Printoppervlak resultaten	55
Tabel 3: Kost opsomming pellets	56
Tabel 4: Overzicht van componenten pellet aanvoersysteem	59
Tabel 5: Testen op pellet transport met venturi-pomp	60
Tabel 6: Componenten lijst - aanvoersysteem	60
Tabel 7:Arduino programma	62
Tabel 8: Kost opsomming automatische pellet aanvoer	69
Tabel 9: Kost kalibratie tool	73
Tabel 10: Case 1 - koffietafel	83
Tabel 11: Case 2 - Kast	83
Tabel 12: Case 3 – Lamp	84
Tabel 13: Case 4 - bloempot	84

Lijst met afkortingen en symbolen

ABS	Acrylonitril-butadieen-styreen
AC	Alternating Current
AI	Artificial Intelligence
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CTe	Coefficient of Thermal Expansion
DC	Direct Current
FFF	Fused Filament Fabrication
FGF	Fused Granulate Fabrication
HMI	Human-Machine Interface
IO	Input/Output
IR	Infrared
LFAM	Large Format Additive Manufacturing
LSAM	Large Scale Additive Manufacturing
PA	Polyamide
PC	Polycarbonate
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol
PLA	Polylactic Acid
PLC	Programmable Logic Controller
PP	Polypropylene
TCP	Tool Center Point
Tg	Glasovergangstemperatuur
Vs	Voortloopsnelheid

Inleiding

Deze bachelorproef richt zich op de optimalisatie van AMobile, een mobiel 3D-printlab dat gebruik maakt van een 6-assige KUKA-robot voor additieve productietechniek FGF (Fused Granulate Fabrication), die ter beschikking is gesteld door het onderzoeksteam van Thomas More. Centraal in dit project staat een diepgaande literatuurstudie en een praktijkgericht onderzoek om de functionaliteit, efficiëntie en het gebruiksgemak van AMobile te verbeteren.

De literatuurstudie biedt inzicht in de meest geschikte thermoplasten voor de extruder. Het praktijkonderzoek richt zich vervolgens op de optimalisatie van printparameters voor materialen, met als doel de geschiktheid van materialen te bepalen en de bijbehorende extrusie parameters te optimaliseren.

Een ander belangrijk aspect van het project is de ontwikkeling van handleidingen om de gebruiksvriendelijkheid van AMobile te vergroten. Deze handleidingen omvatten diverse aspecten zoals de opstelling en bediening van de KUKA-robot en de CAM-setup, wat bijdraagt aan een optimale workflow van 3D-ontwerp tot geprint object.

De procesoptimalisatie van AMobile omvat de analyse van de oorspronkelijke staat en de implementatie van noodzakelijke aanpassingen om de prestaties, betrouwbaarheid en efficiëntie van de 3D-printopstelling te vergroten. Dit wordt bereikt door een combinatie van handmatige en geautomatiseerde processen, het gebruik van gespecialiseerde software voor programmering en simulatie, en het aanpassen van de extrusie snelheid op basis van afkoelingsvoorspellingen.

1. Initiatiefase

1.1. Probleemstelling

Sinds april 2023 beschikt Campus De Nayer over een mobiel 3D-printlab, uitgerust met een KUKA-robot en een Dyze Design schroefextruder Pulsar. Deze geavanceerde installatie wordt momenteel voornamelijk gebruikt door het onderzoeksteam Duurzame Productie. Op korte termijn is het echter de bedoeling om het mobiele lab ook in het onderwijs te integreren, specifiek als onderdeel van de labproeven voor de AMT-expert (Additive Manufacturing Technology).

Omdat de installatie nog in de beginfase verkeert, is er aanzienlijk veel onderzoek nodig om de werking en mogelijkheden volledig te optimaliseren. Niet elk materiaal is geschikt voor de extruder, en er is nog veel onbekend over de optimale extrusietemperaturen en -snelheden. Daarnaast moeten verschillende randcomponenten worden geïntegreerd en/of verbeterd.

In deze bachelorproef zal het onderzoek zich richten op het gebruik van specifieke materialen, namelijk PP, PLA en PE(T). Deze materialen zijn in voldoende hoeveelheden beschikbaar op de campus. Het doel is om de geschiktheid van deze materialen voor de schroefextruder te bepalen en de bijbehorende extrusieparameters te optimaliseren.

1.2. Doelstelling

- Het project omvat een tweedelige benadering met een literatuurstudie naar meest geschikte thermoplasten voor de Pulsar-extruder, gevolgd door praktijkonderzoek naar optimale printparameters voor materialen zoals PP, PLA en PE(T).
- Demonstratiestuk om de mogelijkheden van het mobiele 3D-printlab ten toon te stellen. Bijkomend een uitgebreide handleiding voor het gebruik van het print lab, inclusief opstelling, KUKA-robot bediening en CAM setup.
- Optimalisatie van de gehele workflow van 3D ontwerp tot geprint stuk en veiligheidsstudie van het mobiel 3D-printlab

2. Literatuurstudie

In dit hoofdstuk zullen een aantal basisbegrippen en termen verklaren die veelvuldig worden gebruikt in deze bachelor proef. Deze begrippen en termen zijn essentieel voor de opzet en vergelijkingen die in de studie worden uitgevoerd.

De literatuurstudie is opgedeeld in verschillende hoofdstukken die relevant zijn voor de bachelor proef:

- Fused Filament Fabrication (FFF)
- Fused Granulate Fabrication (FGF)
- Large Scale Additive Manufacturing (LSAM)
- Robot
- Software
- Kunststoffen

2.1. Fused Filament Fabrication (FFF)

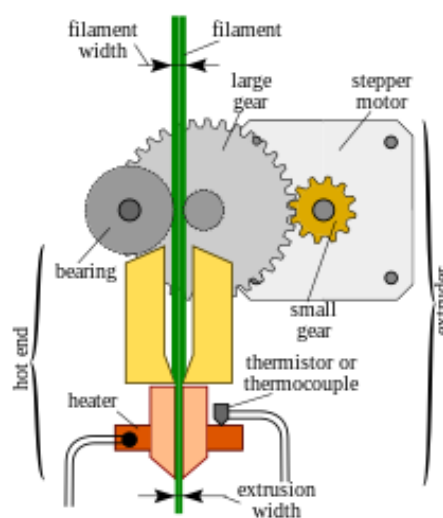
FFF staat voor Fused Filament Fabrication, en wordt voornamelijk gebruikt bij desktop 3D-printers. Deze technologie maakt gebruik van filament dat door een verwarmde nozzle wordt geperst. De diameter van de nozzle is beperkt door de diameter van het gebruikte filament. Het meest gebruikte filament heeft een diameter van 1,75 mm, maar er bestaat ook filament van 2,85 mm. Dit betekent dat er geen nozzle van 3 mm gebruikt kan worden. De meest gebruikte nozzle diameter is 0,4 mm.

PROS

- Gebruiksgemak
- Toegankelijkheid voor hobbyisten en kleine bedrijven
- Hoge mate van ontwerpvrijheid

CONS

- Lagere printsnelheid t.o.v. FGF
- Beperkt in nozzle diameter door filament



Figuur 1: Filament extruder

2.2. Fused Granulate Fabrication (FGF)

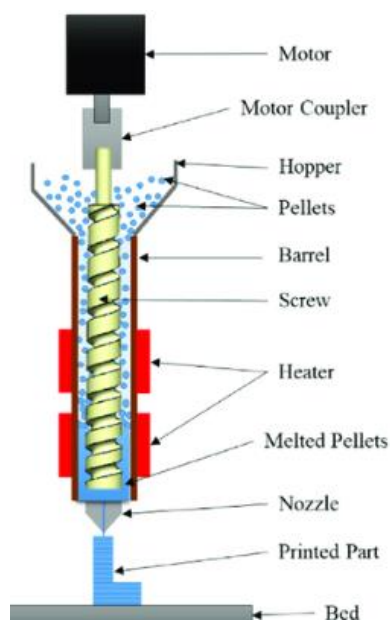
FGF staat voor Fused Granulate Fabrication, en wordt voornamelijk gebruikt voor grootschalig printen. Bij deze technologie worden pellets via een roterende schroef door de verwarmde extruder getransporteerd, waar ze smelten door temperatuur en druk. Hierdoor is er minder beperking op de nozzle diameter dan bij andere technologieën.

PROS

- Hogere printsnelheid t.o.v. FFF
- Grote variatie aan hoogwaardige thermoplasten
- Lagere materiaal kost
- Geschikt voor recycleert materiaal

CONS

- Strengere ontwerprichtlijnen t.o.v. FFF
- Tijdroven verwerking (complexe bewerkingen)



Figuur 2: Granulaat extruder

2.3. Large Scale Additive Manufacturing (LSAM)

LSAM staat voor Large Scale Additive Manufacturing. Daarnaast zijn er ook andere termen voor printen op grote schaal, zoals Large Format Additive Manufacturing (LFAM) en Big Area Additive Manufacturing (BAAM). Op dit moment wordt printen op grote schaal voornamelijk gedaan met behulp van een robotarm. Dit komt door de vrijheid van beweging, het grote bouwoppervlak en de beperkte voetafdruk. Daarnaast worden gantry-systemen gebruikt, die vergelijkbaar zijn met cartesian desktopprinters maar dan op grotere schaal. Bij gantry-systemen is het printoppervlak beperkt door het frame van de gantry.

Het printen op grote schaal is in grote lijnen vergelijkbaar met het printen op desktopformaat 3D-printers, waarbij laag voor laag kunststof wordt toegevoegd om een 3D-model te creëren. Er zijn echter ook belangrijke verschillen. Op grote schaal wordt uitsluitend geprint met pellets om kosten te verlagen en de productie-output te maximaliseren, waardoor een hogere productiesnelheid mogelijk is. Door deze hogere output kunnen grotere nozzles worden gebruikt en kunnen laagbreedtes van 30 mm worden bereikt, waardoor sterke prints kunnen worden gemaakt zonder infill. In sommige gevallen is het echter nodig om een interne structuur, zoals ribben, toe te voegen voor extra sterkte.

Printstukken met grote laagbreedtes kunnen worden nabewerkt door te frezen, waardoor het mogelijk is om mallen en andere onderdelen exact op maat te maken. Omdat start- en stoppunten bij printen op grote schaal beter zichtbaar zijn, is het beter om ontwerpen te maken waarbij een continue baan mogelijk is. Bij het printen met een robot kan gebruik worden gemaakt van de bewegingsvrijheid om te printen zonder ondersteunend materiaal, wat tijd en materiaal bespaart.



Figuur 3: Thermwood - LSAM MT

2.4. Robot

Een robotarm is een complex mechanisch systeem dat bestaat uit verschillende beweegbare onderdelen, zoals gewrichten en segmenten die samen een flexibele structuur vormen. Deze structuur bootst vaak de anatomie van een menselijke arm na.

De robotarm wordt vaak gebruikt in industriële omgevingen om taken te automatiseren die repetitief, gevaarlijk of nauwkeurig zijn. Met zijn capaciteit om herhalende bewegingen met hoge precisie en snelheid uit te voeren, kan een robotarm productieprocessen verbeteren en efficiënter maken.

Het vermogen van een robotarm om taken uit te voeren kan worden aangestuurd via verschillende methoden, zoals handmatige bediening en CAM (Computer Aided Manufacturing) technologie. Handmatige bediening biedt directe controle over de bewegingen van de robotarm, terwijl CAM-technologie vooraf geprogrammeerde instructies gebruikt om taken te automatiseren en te optimaliseren. Dit maakt robotarmen zeer veelzijdige en aanpasbare hulpmiddelen voor een breed scala aan toepassingen.



Figuur 4: Large scale additive manufacturing in FGF



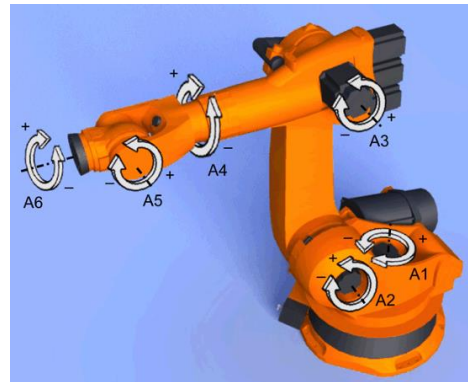
Figuur 5: Da Vinci surgical robot

2.4.1. Opbouw industriële robot

Een grondig begrip van de structuur van industriële robots is van fundamenteel belang voor het begrijpen van hun werking. Dit omvat voornamelijk de besturingssysteem en de mechanische opbouw van de robot.

De robot bestaat uit roterende onderdelen die samen een robotarm vormen. Elk gewricht (joint) van deze arm is uitgerust met een servomotor en bijbehorende transmissie om nauwkeurige bewegingen en positionering mogelijk te maken. Bovendien is elk gewricht voorzien van een positiesensor die feedback geeft aan het besturingssysteem, waardoor het de exacte positie van de arm kan bepalen en regelen.

Om deze bewegingen te coördineren is een geavanceerd besturingssysteem nodig. Dit systeem bevat een intern geheugen waarin programma's kunnen worden opgeslagen en uitgevoerd. Het bedieningspaneel dient als interface tussen de gebruiker en het besturingssysteem, waardoor gebruikers programma's kunnen selecteren, bewerken en starten om de programmeerde taken uit te voeren.



Figuur 6: Robot axis

2.5. Software

Softwarepakketten worden veel toegepast om verschillende processen te versnellen of vergemakkelijken, daarom zijn er CAD/CAM en slicers ter beschikking voor additive productie. Door hun combinatie is het mogelijk om 3D modellen te creëren, te optimaliseren en vervolgens te vertalen naar instructies die de 3D-printer begrijpt.

2.5.1. Siemens NX

Siemens NX is een geavanceerd softwarepakket dat wordt gebruikt in verschillende fasen van het productieontwikkelingsproces, dit omvat 3D-modelling (CAD), manufacturing (CAM), simulatie & analyse (CAE).



Figuur 7: Siemens NX logo

Door de geavanceerde manufacturing omgeving biedt siemens NX een mogelijkheid om AM multi-axis programmering. Dit stelt in staat om complexe objecten te voorzien van geoptimaliseerde bewegingspaden voor de gebruikte setup, die vervolgens worden gegenereerd en gesimuleerd voor het productieproces.

Siemens NX biedt een grote range aan mogelijke oplossing binnen het softwarepakket maar ook gebruiksvriendelijke en efficiënte omgeving voor productontwikkeling. Deze combinatie van functionaliteit maakt siemens NX tot een krachtig platform voor het volledige proces.

2.5.2. AiSync / pro

AiSync / pro is een Cloud gebaseerde platform die kunstmatige intelligentie (Ai) gebruikt voor het genereren, optimaliseren en controleren van additieve productieprocessen. Door AI-algoritmes kan de AI Build-software realtime gegevens van het printproces analyseren, potentiële problemen detecteren en aanpassingen maken om optimale printkwaliteit en efficiëntie te garanderen. Door een Cloud gebaseerde platform kan men het proces lokaal en op afstand controleren en monitoren.



Figuur 8: AI-build logo

2.5.3. AdaOne

AdaOne is een geavanceerd softwarepakket dat gebruikt wordt in robot additive manufacturing (RAM) voor metalen, kunststoffen en beton. Met een breed scala aan functies binnen de software het mogelijk om componenten te optimaliseren, geavanceerde toolbaanopties te gebruiken en procesplanning met simulatiemogelijkheden uit te voeren. De integratie van monitorsystemen zorgt voor een all-in oplossing.



Figuur 9: Adaxis logo

2.5.4. Fusion 360

Fusion 360 is een uitgebreid softwarepakket dat 3D-modellering (CAD), productie (CAM), simulatie en analyse (CAE) omvat. Het staat bekend om zijn gebruiksvriendelijkheid, kostenefficiëntie en snelle leercurve. Hoewel de ondersteuning voor additive manufacturing nog beperkt is en in ontwikkeling, biedt Fusion 360 multi-axis deposition voor Direct Energy Deposition (DED) processen en ondersteunt de robotintegratie via plug-ins. Met regelmatige software-updates evolueert de software snel en zal het naar verwachting uitgroeien tot een krachtig platform voor additive manufacturing.



Figuur 10: Autodesk fusion 360 logo

2.5.5. SprutCAM X Robot

SprutCAM X Robot is een functie binnen het SprutCAM X-softwarepakket die wordt gebruikt voor het programmeren van CNC-machines, waaronder robots. Met SprutCAM X Robot kunnen robotbewegingen en gereedschapspaden worden geprogrammeerd en gesimuleerd.



Figuur 11: SprutCAM logo

2.6. Kunststoffen

Er bestaat een brede diversiteit aan kunststoffen die in de wetenschap worden ingedeeld in drie hoofdgroepen: thermoharders, thermoplasten en elastomeren. Deze classificatie is gebaseerd op de moleculaire structuur en de reactie op temperatuur en druk van deze polymeren.

Thermoharders zijn polymeren die bij verhitting een permanente chemische cross-linking ondergaan, waardoor ze onomkeerbaar hard worden. Thermoplasten daarentegen hebben een lineaire of licht vertakte moleculaire structuur, waardoor ze smelten bij verhitting en opnieuw gevormd kunnen worden. Elastomeren zijn polymeren met een flexibele, rubberachtige structuur die de oorspronkelijke vorm kunnen herstellen na vervorming, dankzij de aanwezigheid van willekeurige netwerken van polymeerketens.

Deze classificatie biedt een basis voor het begrijpen van de eigenschappen en toepassingen van diverse kunststoffen in verschillende wetenschappelijke en industriële contexten. Thermoplasten zijn geschikt voor 3D-printing omdat ze kunnen worden gesmolten en opnieuw gevormd.



Figuur 12: Kunststofgroepen

2.6.1. Thermoplasten

Thermoplasten zijn een categorie kunststoffen die onderscheiden door hun reactie op temperatuur. Wanneer thermoplasten worden verwarmd, worden ze zacht en vervormbaar, waardoor ze in verschillende vormen kunnen worden gevormd. Belangrijk is dat deze vervorming omkeerbaar is. Bij het afkoelen behouden thermoplasten hun nieuwe vorm.

2.6.1.1. Amorf

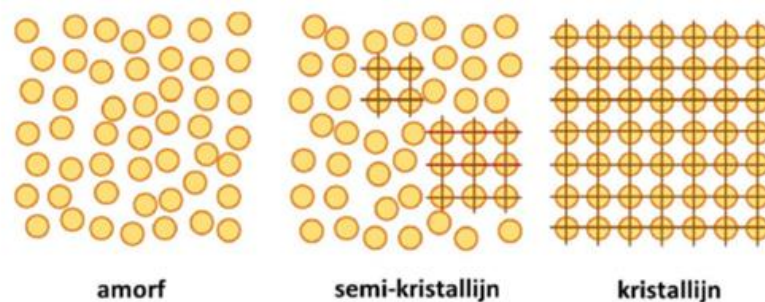
Amorfe materialen kenmerken zich door een gebrek aan duidelijk geordende structuur. Amorfe thermoplasten hebben een moleculaire structuur die willekeurig is gerangschikt, zonder een scherp smeltpunt. Dit betekent dat ze tot aan de glasovergangstemperatuur hard blijven en vervolgens geleidelijk zachter worden. Dit resulteert in minder interne spanning tijdens het printproces, waardoor er minder krimp en vervorming optreedt. Deze eigenschappen maken amorfe materialen gemakkelijker verwerkbaar. Bovendien hebben ze de neiging om plastisch te buigen voordat ze breken, waardoor ze effectief zijn in het absorberen van energie.

2.6.1.2. Semi-kristallijn

Kristallijne thermoplasten onderscheiden zich door hun geordende en regelmatige moleculaire structuur. Geen enkele thermoplast is volledig kristallijn, want dit zou het materiaal te bros maken en onbruikbaar als kunststof. De meeste semi-kristallijne thermoplasten bestaan voor 30-80% uit kristallijne gebieden, terwijl het resterende percentage amorf is. Hoe ordelijker en symmetrischer de moleculaire structuur, des te hoger de kristalliniteit van de thermoplast.

Bij semi-kristallijne thermoplasten is er sprake van een smeltpunt. Wanneer een semi-kristallijn materiaal van vloeibaar naar vast gaat, verandert de mate van kristalliniteit (degree of crystallinity). Omdat kristallijne gebieden een andere dichtheid hebben dan amorfe gebieden, ontstaat er een verschil in volume waardoor interne spanningen ontstaan. Dit kan leiden tot vervormingen van het 3D-geprinte object.

Een snelle kristallisatiesnelheid leidt tot extra interne stress en meer vervormingen.



Figuur 13: Verschillende thermoplast structuren

2.6.1.3. Materialen

Het type materiaal heeft een grote invloed op de verwerkbaarheid ervan. Hoewel materialen dezelfde naam kunnen delen, betekent dit niet dat ze dezelfde eigenschappen hebben. Door verschillende additieven toe te voegen, kan een materiaal volledig anders reageren, waardoor het beter of slechter te printen is.

Enkele voorbeelden van virgin materialen zijn:

PLA:

PLA (melkzuur of Polyactide) is een biologisch afbreekbaar en biocompatibel polymeer dat wordt geproduceerd uit hernieuwbare plantaardige grondstoffen, zoals maïszetmeel of suikerriet. Het materiaal heeft een lage smelttemperatuur, waardoor het gemakkelijk te printen is. PLA vertoont goede printbaarheid met minimale krimp en warping tijdens het printproces. Bovendien is PLA biologisch afbreekbaar en recyclebaar onder de juiste omstandigheden, waardoor het een aantrekkelijke keuze is voor milieubewuste toepassingen.

PET:

PET (Polyethyleentereftalaat) is bekend om zijn sterkte, taaiheid en helderheid. Het wordt vaak gebruikt voor verpakkingsdoeleinden, zoals plastic flessen voor frisdranken. PET is relatief gemakkelijk te printen en heeft goede mechanische eigenschappen.

PETG:

PETG (polyethyleentereftalaat-glycol) is een variatie van PET die is gemodificeerd met glycol, waardoor het meer flexibel en impactbestendig wordt. Het behoudt ook de helderheid van PET. PETG is geschikt voor toepassingen waarbij een hogere slagvastheid en buigzaamheid vereist zijn.

ABS:

ABS (Acrylonitril-butadien-styreen) is een duurzaam en slagvast polymeer dat vaak wordt gebruikt voor 3D-printen. Het biedt goede mechanische eigenschappen en is bestand tegen temperaturen. ABS heeft echter de neiging om krom te trekken tijdens het afkoelen, waardoor het soms lastig te printen is zonder een verwarmd printbed.

PA:

PA (Polyamide), ook bekend als nylon, is een veelzijdige thermoplast met uitstekende mechanische eigenschappen. Het is sterk, slijtvast en bestand tegen impact. PA is geschikt voor functionele onderdelen en wordt vaak gebruikt in engineeringtoepassingen.

PC:

PC (Polycarbonaat) is een sterk en slagvast polymeer met uitstekende optische helderheid. Het is bestand tegen hoge temperaturen en heeft goede elektrische eigenschappen. PC wordt gebruikt voor onderdelen die bestand moeten zijn tegen impact en hoge temperaturen.

PP:

PP (Polypropyleen) is een veelzijdige thermoplast met een lage dichtheid, waardoor het licht van gewicht is. Het heeft goede chemische bestendigheid en is bestand tegen vele zuren en basen. PP wordt vaak gebruikt voor toepassingen waarbij flexibiliteit, hittebestendigheid en chemische bestendigheid vereist zijn, zoals in de medische industrie.

2.6.1.3.1. Vezelversterking

Naast virgin materialen kan men ook kiezen voor vezel versterkt materiaal. De toevoeging van vezels aan het materiaal beïnvloedt zowel de printbaarheid als de prestaties van het geprinte onderdeel. Vezels helpen de dimensionale stabiliteit van het geprinte materiaal te verbeteren en verminderen krimp- en krommingseffecten.

GLASVEZELS

Glasvezels bieden een kosteneffectieve versterking voor additieve productiematerialen. Ze vormen de middenweg tussen prijs en prestatie en leveren een aanzienlijke verbetering van stijfheid aan de geprinte structuur.

Een andere eigenschap is te vinden in de lage thermische geleidbaarheid van glasvezels. Ze hebben een lagere thermische geleidbaarheid dan koolstofvezels. Glasvezelprints koelen daarom iets langzamer af in vergelijking met vergelijkbare prints met koolstofvezels.

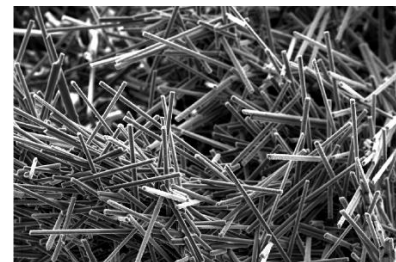


Figuur 14: Glasvezels

KOOLSTOFVEZELS

De grootste verbetering van mechanische eigenschappen wordt geleverd door de toevoeging van koolstofvezels aan materialen. Koolstofvezels hebben uitstekende sterkte en stijfheid, gecombineerd met een lager gewicht dan glasvezels.

Daarnaast hebben koolstofvezels een lage Coëfficiënt van Thermische Uitzetting (CTE), wat helpt om de thermische uitzetting van de complete geprinte structuur te verminderen. Dit is zeer gunstig voor toepassingen zoals mallen die worden gebruikt bij verhoogde temperaturen.



Figuur 15: Koolstofvezels

Koolstofvezels zijn de duurste van de versterkende vezels en hun gebruik moet worden gerechtvaardigd door het toepassingsgebied van het geprinte onderdeel.

BIO-BASED VEZELS

Bio-based vezels afkomstig van hernieuwbare bronnen dragen bij aan milieuvriendelijke productie. Ze zijn echter doorgaans minder sterk dan glas- en koolstofvezels, wat hun toepassingsgebied kan beperken. De maximale proces temperatuur waarbij degradatie kan optreden is een belangrijk aandachtspunt, waardoor bio-based materialen minder geschikt zijn voor toepassingen met hogere temperaturen.

Het droogproces van bio-based materialen is ook cruciaal vanwege hun gevoeligheid voor vochtabsorptie. Grondig drogen voor gebruik is essentieel om problemen tijdens het printen te voorkomen en de kwaliteit van geprinte objecten te waarborgen.



Figuur 16: Houtvezels



Figuur 17: Bamboe vezel



Figuur 18: Vlasvezel

2.6.1.4. Gerecycleerd materiaal

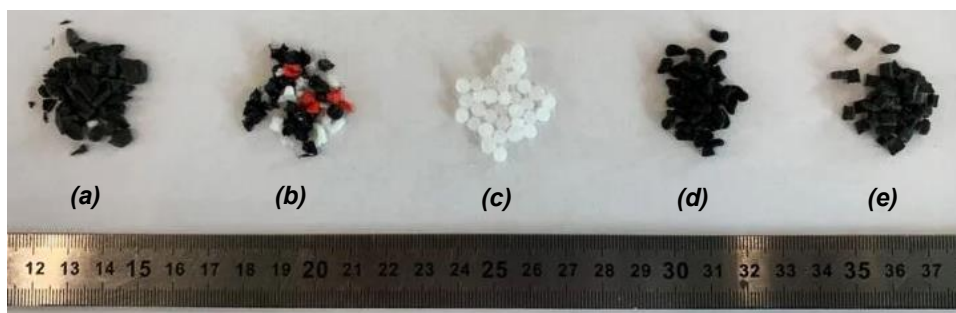
Pellet-extruders maken het mogelijk om met gerecycleerd materiaal te werken, waarbij mislukte prints versnipperd en vervolgens hergebruikt kunnen worden om nieuwe objecten te printen. Dit bevordert duurzaamheid en vermindert de ecologische voetafdruk van producten. Bovendien kunnen hierdoor materiaalkosten worden bespaard.

Dyze Design heeft een tabel opgesteld met de ideale pellet vormen. Versnipperd materiaal, aangeduid als "flakes," kan weliswaar verwerkt worden, maar is niet ideaal. Door de onregelmatige vorm van versnipperd materiaal kunnen er blokkades ontstaan in de extruderopening, wat leidt tot een inconsistente materiaalstroom. Deze problemen kunnen verminderd worden door het versnipperde materiaal aan te vullen met bolvormige pellets van hetzelfde materiaal.

Een andere oplossing om problemen met versnipperd materiaal te voorkomen, is het smelten van het versnipperde materiaal en er pellets van te maken met een beter verwerkbare vorm, zoals cilinders. Het nadeel hiervan is dat er extra verwerkingskosten zijn en dat het materiaal een extra warmtecyclus doorloopt, wat de eigenschappen van het materiaal kan verminderen. Dit nadeel kan deels worden verholpen door tijdens het smeltproces materiaal toe te voegen dat minder warmtecycli heeft doorlopen.

Pellet Type	Air Conveying	Feeding	Extrusion Flow	Note
Sphere	Great	Great	Great	Ideal format
Repro (Flat disk)	Fair	Good	Great	Good format
Cylinder (2.85 mm chopped)	Good	Fair	Good	Ok
Cylinder (1.75 mm chopped)	Fair	Bad	Bad	Not ideal, Mix with better format
Flakes	Bad	Bad	Fair	Not ideal, Mix with better format
Powder	Bad	Incompatible	Incompatible	Incompatible

Tabel 1: Pellet type voor extruder



Figuur 19: Pellet types

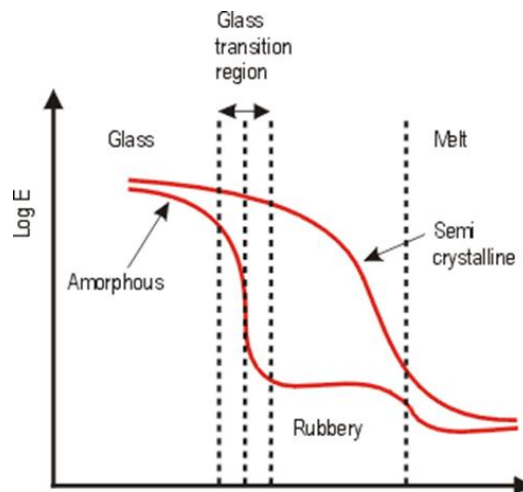
(a) flakes, (b) shredded, (c) sphere, (d) cylinder, (e) repro

2.6.1.5. Printparameters

Bij het printen op grote schaal zijn bepaalde eigenschappen van cruciaal belang en moeten deze zorgvuldig worden overwogen.

GLAS OVERGANGSTEMPERATUUR

Bij de glasovergangstemperatuur (T_g) van een thermoplast beginnen de moleculen te bewegen, waardoor het materiaal van een glasachtige naar een rubberachtige fase overgaat. Hoe hoger de T_g , hoe hoger de printtemperatuur moet zijn, waardoor het temperatuurverschil tussen de omgevingstemperatuur en de laagtemperatuur groter wordt. Dit resulteert in een grotere thermische uitzetting, wat leidt tot meer vervorming. Daarnaast bepaalt de T_g de minimale interpas-temperatuur om een goede hechting tussen de geprinte lagen te garanderen.



Figuur 20: Afkoel grafiek thermoplast

INTERPAS TEMPERATUUR

Bij het printen op grote schaal wordt niet actief gecoeld vanwege de negatieve mechanische effecten die dit kan veroorzaken. De temperatuur van de vorige laag wordt bepaald door de tijd tussen de lagen. Door rekening te houden met de afkoelsnelheid van het materiaal en de printsnelheid hierop aan te passen, kan de gewenste interpas-temperatuur worden bereikt. Als de baanlengte van een laag te lang is voor de output van de printkop, kan de printsnelheid niet worden ingesteld op de juiste waarde, waardoor de interpas-temperatuur onder de optimale waarde zal zakken.



Figuur 21: IR interpas temperatuur

Als de temperatuur van de vorige laag onder de glasovergangstemperatuur (T_g) van het materiaal ligt, kunnen de moleculen niet bewegen, wat resulteert in een zwakke hechting. Wanneer de temperatuur boven T_g ligt, ontstaan er polymeerketenverstrengelingen en intermoleculaire verbindingen zoals Van der Waals-krachten en waterstofbruggen, wat zorgt voor een sterke verbinding tussen de lagen. Een hogere interpas-temperatuur leidt tot een sterkere verbinding tussen de lagen.

Het succes van de print hangt af van het vinden van de juiste balans in de interpas-temperatuur. Als deze te hoog is, kan de vorige laag niet sterk genoeg zijn om het gewicht van de nieuwe laag te dragen, waardoor deze in elkaar zakt. Het vinden van de juiste balans is cruciaal voor een succesvolle en sterke 3D-print.

VISCOSITEIT

De viscositeit van een kunststof beschrijft het vloeigedrag. Water heeft bijvoorbeeld een lage viscositeit en honing heeft een hoge viscositeit. Kunststof gedraagt zich viskeus wanneer de temperatuur boven de glasovergangstemperatuur (T_g) ligt; hoe hoger de temperatuur, hoe lager de viscositeit.

Kunststof is niet-newtoniaans, wat betekent dat de viscositeit afhankelijk is van de snelheidsgradiënt waarmee de vloeistof wordt vervormd. In een schroefextrusie proces betekent dit dat een kunststof minder viskeus wordt bij een hoger toerental van de schroef. Als de viscositeit te laag is, zal het materiaal niet de vorm van de extrusie behouden en wegstromen, waardoor er geen structuur kan worden geprint. Aan de andere kant, als de viscositeit te hoog is, hebben de polymeerketens in de laag niet voldoende beweeglijkheid om een goede binding met de voorgaande laag materiaal te vormen.



Figuur 22: Viscositeit water, olie & honing

THERMISCHE UITZETTINGCOËFFICIËNT

De thermische uitzettingscoëfficiënt van een thermoplast is een belangrijke eigenschap die de mate van krimp van het materiaal beïnvloedt. Wanneer het materiaal afkoelt van de extrusietemperatuur naar de omgevingstemperatuur verandert het volume van het materiaal. Een lagere uitzettingscoëfficiënt betekent minder vervorming en verbetert de dimensionele stabiliteit van het materiaal.

Het toevoegen van vezels aan kunststoffen kan de vervorming verder verminderen doordat de vezels helpen bij het versterken van de matrix van het materiaal. Vezel versterkte kunststoffen hebben over het algemeen een lagere thermische uitzettingscoëfficiënt dan onversterkte kunststoffen, wat resulteert in minder krimp en een betere dimensionele nauwkeurigheid van de uiteindelijke prints.

Door te begrijpen hoe de thermische uitzettingscoëfficiënt werkt en hoe deze kan worden beïnvloed door materiaalsamenstelling, kunnen fabrikanten en ontwerpers betere keuzes maken bij het selecteren van materialen voor 3D-printtoepassingen, vooral op grote schaal waar dimensionale nauwkeurigheid cruciaal is.

2.6.2. Pellet extruder

Bij het printen op grote schaal worden pellets, ook wel granulaat genoemd gebruikt. Pellets zijn kunststof korrels die in de extruder door verschillende warmtezones worden gesmolten. Het gebruik van pellets vergroot de maximale output aanzienlijk. De Pulsar kan bijvoorbeeld tot 3 kg/h verwerken, maar er zijn ook extruders die tot 250 kg/h aankunnen. Dit maakt grootschalig printen niet alleen haalbaar maar ook zeer efficiënt. Daarnaast bespaart het gebruik van pellets aanzienlijk op de materiaalkosten.

Voor meer informatie over de opbouw van een pellet extruder, zie de scriptie 'Aansturing 3D-printkop op KUKA robotarm' van Tristan, hoofdstuk '7.3 Hardware'.



Figuur 23: Pellet extruders CEAD

3. AMobile

AMobile is een mobiele robotinstallatie voor 3D-printen die eenvoudig naar verschillende locaties kan worden vervoerd. Het hoofddoel van de AMobile is om scholen, bedrijven en beurzen te voorzien van educatieve sessies over de mogelijkheden van Large scale additive manufacturing technologie.

Aangezien het project nog in de beginfase zit, is het momenteel uitdagend om efficiënt te printen. Onze doelstelling is om het volledige proces te optimaliseren, zodat het toegankelijk wordt voor gebruikers zonder specifieke voorkennis.

3.1. Opbouw

AMobile is samengesteld uit diverse componenten die het 3D-printen mogelijk maken. In dit hoofdstuk zullen specifieke componenten besproken worden.

3.1.1. Trailer

De aanhangwagen is een op maat samengestelde constructie die speciaal is ontworpen voor gemakkelijk transport en om van buiten naar binnen te kunnen kijken tijdens verschillende beurzen of workshops. Het gebruik van een railsysteem maakt het mogelijk om de benodigde componenten, zoals de KUKA robot, het besturingssysteem en het printoppervlak stabiel te bevestigen. De aanwezigheid van dit railsysteem biedt tevens flexibiliteit en efficiëntie bij het opzetten en afbreken van de installatie bij nodige onderhoud.



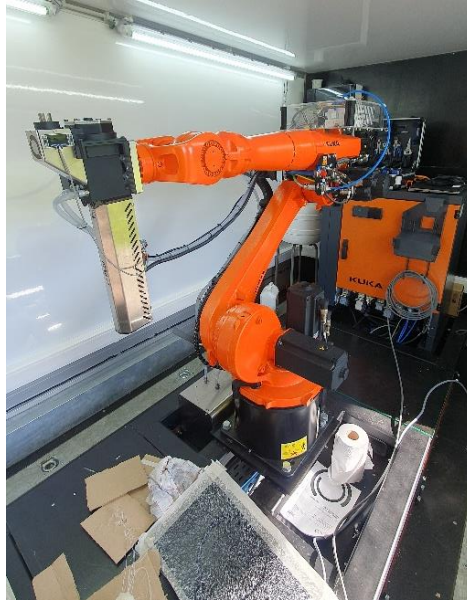
Figuur 24: Trailer binnen



Figuur 25: Trailer buiten

3.1.2. KUKA KR20 R1810-2

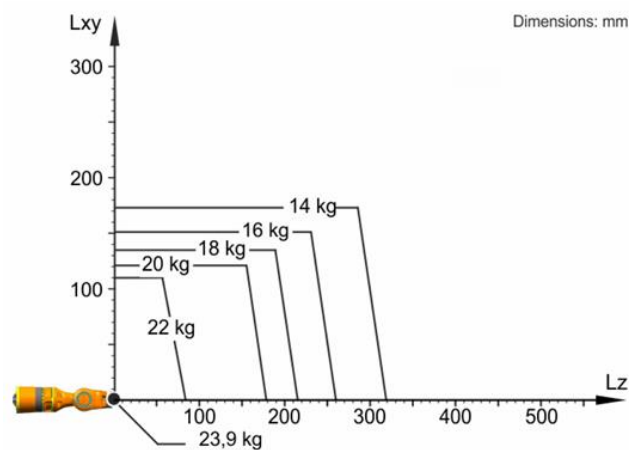
Het AMobile is uitgerust van een KUKA KR20 R1810-2 robot met 6 joints. Dit type robot is afkomstig van de KR CYBERTECH-familie, het zijn de breedste serie modellen in de lichte payload-segment met de hoogste vermogensdichtheid. Ze zijn optimaal geschikt voor ruimtebesparende cel ontwerpen en bieden uitstekende prestaties, met bijzonder lage operationele kosten op lange termijn.



Figuur 26: KUKA KR20 R1810-2

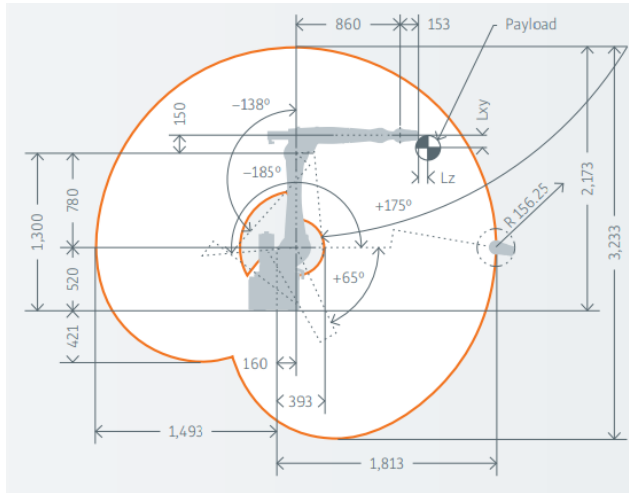
De nominale payload van de robot is 20 kg, wat is geoptimaliseerd voor de dynamische prestaties van de robot. De effectieve toegestane payload kan variëren op basis van de positie van het zwaartepunt en de massa van de effector die aan de robot is bevestigd. De maximale payload van 23,9 kg is alleen haalbaar wanneer het zwaartepunt op exact 0 mm is gepositioneerd en een aanvullende belasting is geoptimaliseerd voor deze specifieke belasting toestand.

Het payload diagram gebruikt het zijaanzicht van de robotflens wanneer deze volledig uitgestrekt is als referentiepunt, waardoor een helder inzicht wordt geboden in de optimale belasting condities voor de robot.

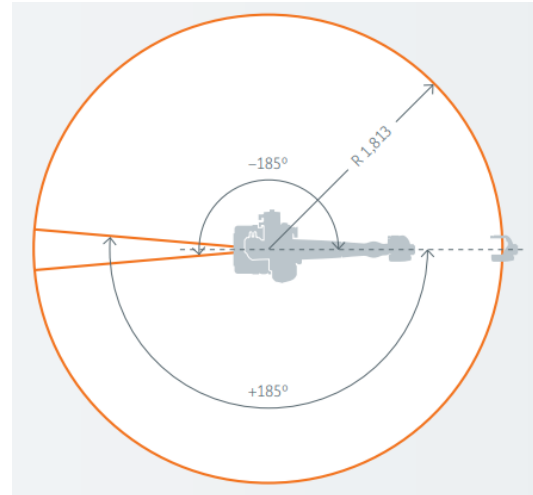


Figuur 27: Payload diagram KR20 R1810-2

Het werkvolume van de robot is een belangrijke overweging, omdat dit het maximale bereik bepaalt dat effectief kan worden gebruikt. De maximale lengte van de robotarm bedraagt 1813 mm, terwijl de minimale lengte van de robotarm 393 mm is vanaf het centrum van J1 (zie figuur 28). Het resulterende werkvolume dat effectief kan worden benut bedraagt 23,30 m³, waardoor een breed scala aan toepassingen mogelijk is. Met een zeer compact vloeroppervlak van 430,5 x 370 mm kan de beschikbare ruimte efficiënt worden gebruikt.



Figuur 28: Werkgebied KR20 R1810-2



Figuur 29: Rotatiegebied KR20 R1810-2

De herhaalbaarheid van de robotpositie bedraagt +/- 0,04 mm, wat betekent dat de robot bij het verplaatsen naar een specifiek punt slechts +/- 0,04 mm kan afwijken van het nominale punt. Het niveau van herhaalbaarheid heeft geen invloed op de nauwkeurigheid van de robot. De nauwkeurigheid van de robot is gerelateerd aan de kalibratie van de joints. Deze kan worden beoordeeld door de geprogrammeerde positie van het TCP te vergelijken met de werkelijke positie van het TCP.

3.1.3. KR C4

Voor de aansturing van de KUKA KR20 R1810-2 robot wordt gebruikgemaakt van een KUKA KR C4 robotbesturingssysteem. Dit systeem is ontworpen voor het aansturen van maximaal 9 robotassen en kan functioneren binnen een omgevingstemperatuur tussen +5°C en +45°C. De nominale aansluitspanning bedraagt AC 3x380V met een netfrequentie van 50 Hz.



Figuur 30: KR C4 & SmartPAD-2



Figuur 31: SmartPAD-2

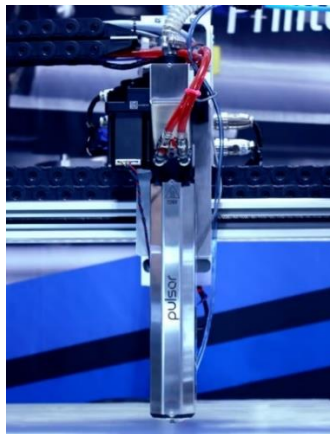
De KR C4 robotbesturing zorgt voor naadloze uitvoering van programma's en biedt mogelijkheden voor geavanceerde controleprocessen voor robot, PLC (Programmable Logic Controller), CNC-beweging en veiligheid. Met de ingebouwde PLC kunnen externe componenten worden aangestuurd. Als het optionele

pakket KUKA.CNC wordt toegevoegd kan de robot worden geprogrammeerd met behulp van G-code, wat de integratie van robot in een bestaande CNC-omgeving vereenvoudigt.

Daarnaast biedt de KR C4 besturing de mogelijkheid om rechtstreeks op de robotbesturing zelf te programmeren met behulp van eenvoudige en flexibele inline formulieren. Deze formulieren stellen gebruikers in staat om zelf eenvoudige processen te programmeren. Voor het invullen van deze inline formulieren wordt de KUKA smartPAD-2 gebruikt.

3.1.4. Pulsar extruder

Voor het printen wordt er de Pulsar van Dyze Design gebruikt, die aan de robotflens is bevestigd. Deze granulaatextruder kan tot 2,5 kg materiaal per uur verwerken en weegt ongeveer 7 kg. Met de drie verwarmingszones kan de extruder temperaturen tot 500°C bereiken, waardoor het mogelijk is om zowel standaard als geavanceerde thermoplasten te printen.



Figuur 32: Dyze Design - Pulsar

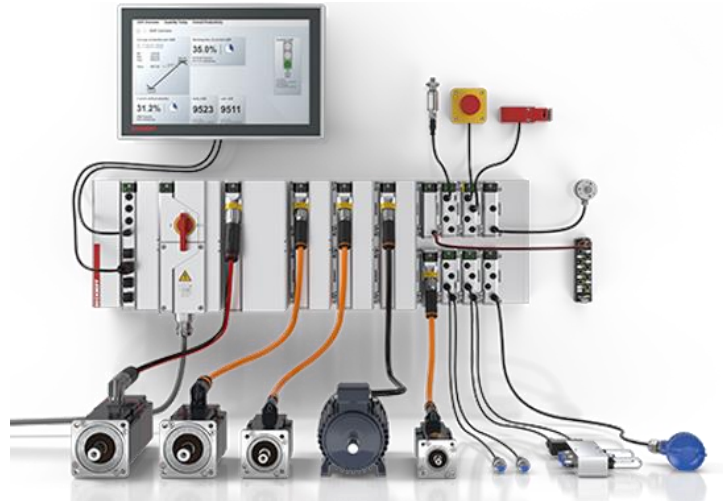
De extruder biedt de mogelijkheid om drie verschillende nozzles te vervangen, waaronder nozzle formaten van 1 mm, 3 mm en 5 mm. Deze nozzles kunnen indien nodig worden verwisseld voor verschillende toepassingen. De extruder maakt gebruik van een stappenmotor en een reductiekast om de schroef in beweging te brengen. De geïnstalleerde stappenmotor is een NEMA23 LDO-57STH75-2804, die het benodigde toerental genereert. Door de reductiekast wordt het toerental overgebracht en verlaagd met een overbrengingsverhouding van $i = Z1 \cdot Z3 / Z2 \cdot Z4 = 15 \cdot 16 / 50 \cdot 55 = 0,08727$, zodat de schroef tijdens het verwerkingsproces op het juiste toerental draait.



Figuur 33: Demonteerde reductiekas

3.1.5. Beckhoff PLC & TwinCAT 3

De aansturing van de pulsar extruder en de verwarmingselementen wordt via de Beckhoff PLC (Etherbus X44) gebeurt. Deze PLC bevat alle benodigde componenten om de Pulsar en zijn componenten correct en veilig aan te sturen. Door externe PLC-componenten aan te sluiten op de KR C4, is het mogelijk om het printproces verder te automatiseren en gebruiksvriendelijker te maken.

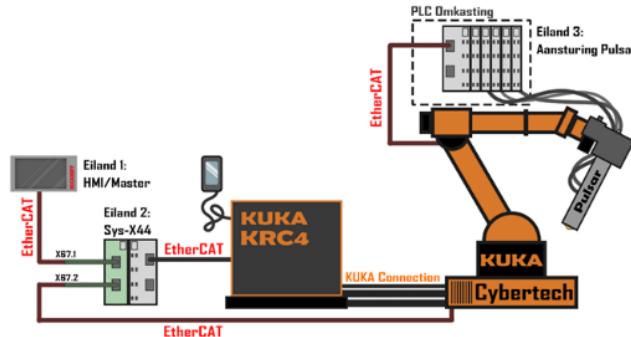


Figuur 34: Voorbeeld bechhoff PLC-componenten

Met behulp van het TwinCAT 3-programma kan de verbinding tussen de KR C4 en de Beckhoff PLC volledig tot stand worden gebracht. Hierdoor kunnen ze met elkaar communiceren door de benodigde ingangen en uitgangen af te lezen en waarden uit te wisselen.

3.2. Beginsituatie

Om het proces te laten functioneren, moeten verschillende stappen worden ondernomen om de AMobile operationeel te maken. In dit hoofdstuk wordt de workflow voor de verschillende stappen die aanbod komen tijdens het opstarten van een print besproken. Daarna wordt op basis hiervan verder werken aan het optimaliseren van de AMobile.

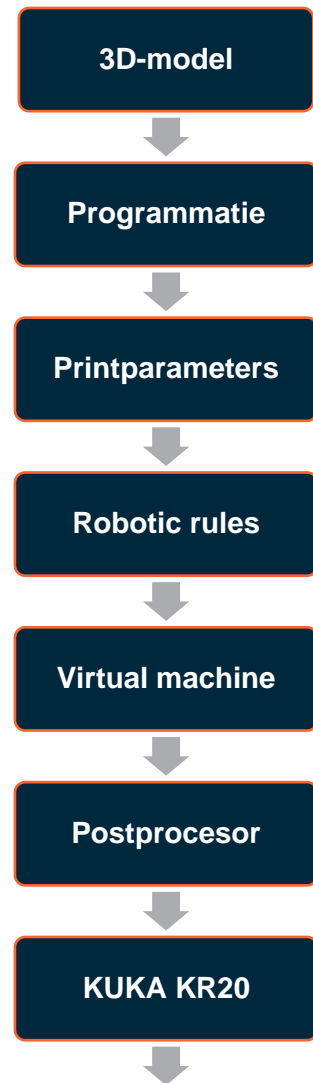


Figuur 35: Figuur: beginopstelling voor Bachelor proef

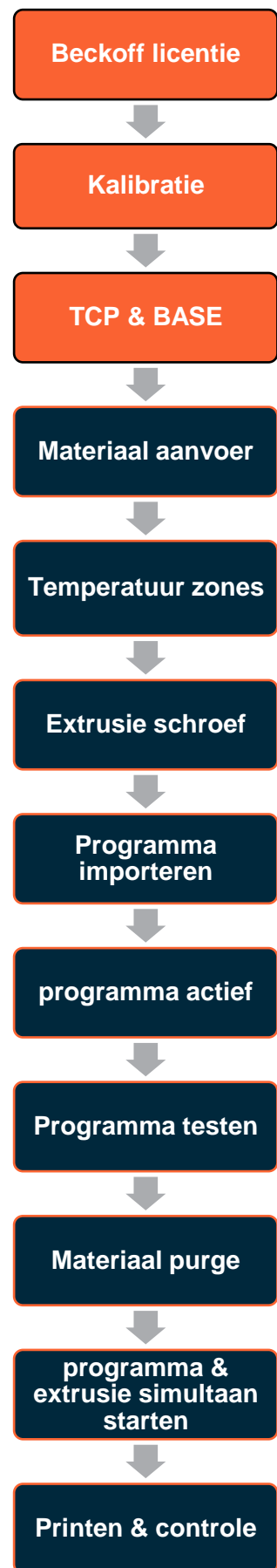
Handmatig

Enmalig uitvoeren

- **3D-model:**
Voordat er geprint kan worden, wordt het object gemodelleerd volgens de richtlijnen met specifieke voorwaarden en beperkingen voor het FGF-printen.
- **Programmatie:**
Voor het programmeren van gereedschapsbanen wordt de CAM-omgeving van Siemens NX 2312 gebruikt, die de technologie voor multi-axis deposition aanbiedt.
- **Print parameters:**
De printparameters voor de voorloopsnelheid van de robot en de schroefnelheid worden handmatig berekend op basis van de laaghoogte en laagbreedte
- **Robotic rules:**
Robotic rules worden toegepast om de assenoriëntatie en posities van de robot te definiëren voor een correcte werking nadat de programmering en printparameters zijn ingesteld.
- **Virtual machine:**
Als eindcontrole voert men een robot simulatie uit in Siemens NX 2312 om te controleren of alle gereedschapsbanen en bewegingen correct worden uitgevoerd.
- **Postprocessor:**
Nadat de robot simulatie grondig is geëvalueerd, kunnen de gereedschapsbanen worden omgezet naar een machinetaal die door de robotbesturing kan worden gelezen en uitgevoerd.
- **KUKA KR20:**
De robotbesturing wordt opgestart om de robot te kunnen bedienen via SmartPAD-2 en andere benodigde componenten.



- **Beckhoff licentie:**
De licentie van Beckhoff moet elke 7 dagen worden verlengd, zodat men de HMI van Beckhoff kan gebruiken om de benodigde parameters in te stellen.
- **Kalibratie:**
Om te voorkomen dat de bewegingen van de robotarm onnauwkeurig worden uitgevoerd, wordt de robot afgesteld. Deze afstelling wordt alleen uitgevoerd wanneer de robot zijn positie verliest of als de TCP afwijkt.
- **TCP & BASE:**
Om te kunnen printen, is het noodzakelijk om het TCP (Tool Center Point) en de BASE (G54) te definiëren. Dit gebeurt één keer om ervoor te zorgen dat de robotbewegingen nauwkeurig worden benaderd. Indien nodig kan dit proces worden herhaald.
- **Materiaal aanvoer:**
Voor het printen wordt het materiaal handmatig toegevoegd aan de hopper om het naar de extruder te voeren. Dit moet regelmatig gebeuren gedurende de print proces
- **Temperatuur zones:**
De temperatuurzones worden ingesteld op basis van het specifieke materiaal en deze gegevens kunnen worden gevonden in de datasheet van de fabrikant.
- **Extrusie schroef:**
De berekende schroefsnelheid wordt ingesteld op het Beckhoff HMI. Deze wordt omgerekende naar graden per seconde.
- **Programma importeren:**
Om het programma te kunnen gebruiken, importeert men het postprocesbestand op SmartPAD-2.
- **Programma actief:**
Om het programma uit te voeren, moet het programma worden geselecteerd op de SmartPAD-2.
- **Programma testen:**
Tijdens het testen van het programma controleert men of de gereedschapsbanen overeenkomen met de robot simulatie en de hechting op het printoppervlak correct verloopt.
- **Materiaal purge:**
Voordat men definitief kan beginnen met printen, voert men een materiaalpurge uit om een constante materiaalstroom te verkrijgen en eventuele onzuiverheden weg te werken.
- **Programma & extrusie simultaan starten:**
Nadat het programma is geselecteerd en de schroefsnelheid is ingesteld, selecteert men de automatische modus en start men tegelijkertijd het programma en de extruder om definitief te gaan printen.
- **Printen & controle:**
Tijdens het printen vult men handmatig systematisch materiaal aan in de hopper om tekorten te voorkomen en voert men visuele controles uit op het object en de extruder.



4. Markstudie

Tijdens de marktstudie zal uitgebreid onderzoek worden gedaan naar bestaande producten en componenten van diverse bedrijven, wat zal resulteren in een diepgaande evaluatie. Dit proces omvat zorgvuldige verzameling en analyse van gegevens en informatie over verschillende aspecten van de markt, waardoor een breder begrip ontstaat van de marktdynamiek, trends en concurrentie.

4.1. Pellet aanvoersysteem

Een pellet aanvoersysteem is een essentieel onderdeel van een productiesysteem dat is ontworpen om een grote hoeveelheid pellets op te slaan en deze efficiënt naar de extruder te transporteren tijdens het productieproces. Het systeem zorgt voor een continue toevoer van materiaal naar de extruder, wat cruciaal is voor een soepel verlopend productieproces. Pellets worden veel gebruikt in industriële processen zoals kunststofverwerking.

4.1.1. Dyze design – automated pellet feeding

VOORDELEN:

- Efficiënte pellet transport
- Automatisch aanvoer
- Compact

NADELEN:

- Duur in aankoop
- Perslucht installatie inbouwen
- Exclusief opslagruimte voor pellets



Figuur 36: Dyze design - pellet feeder

4.1.2. TUmaker – pellet pro feeder

VOORDELEN:

- Efficiënte pellet transport
- Verschillende opslag volumes
- Materiaal sensor

NADELEN:

- Duur in aankoop
- Perslucht installatie inbouwen



Figuur 37: TUmaker - pellet feeder

4.1.3. Hopper

VOORDELEN:

- Verschillende opslag volumes
- Goedkoop
- Printbaar

NADELEN:

- Extra gewicht aan extruder
- Pellets voorraad beperkt



Figuur 38: 3D-print hopper

4.2. Printoppervlak

Een printbed is een basis onderdeel waar het object wordt geprint, het bed oppervlak wordt gebruikt om het geextrudeerde materiaal op te bouwen naar een gewenst object. Het printbed kan verschillende vormen hebben afhankelijk van de machine opstelling, waarvan deze nog verwarmd kan worden om de hechting te verbeteren en warping te voorkomen.

4.2.1. PEI-folie

VOORDELEN:

- Goedkoop
- Verschillende groottes
- Vervangbaar

NADELEN:

- Alleen geschikt voor PETG



Figuur 39: PEI-folie

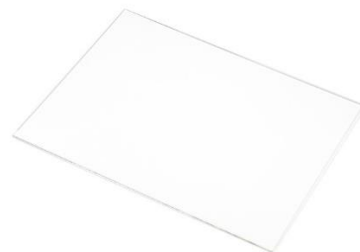
4.2.2. Glas plaat

VOORDELEN:

- Lage uitzettingcoëfficiënt
- Verschillende groottes
- Goedkoop

NADELEN:

- Niet flexibele
- Breekbaar



Figuur 40: Glas plaat

4.2.3. Schilders tape

VOORDELEN:

- Verschillende formaten
- Makkelijk verkrijgbaar
- Goedkoop

NADELEN:

- Een of meermalig gebruik
- Wegwerp



Figuur 41: Schilders tape

4.2.4. Verpakkingstape

VOORDELEN:

- Verschillende formaten
- Makkelijk verkrijgbaar
- Goedkoop

NADELEN:

- Een of meermalig gebruik
- Wegwerp



Figuur 42: Verpakkingstape

4.2.5. Kapton

VOORDELEN:

- Verschillende groottes
- Hittebestendige tape
- Goedkoop
- Vervangbaar

NADELEN:

- Alleen geschikt voor ABS



Figuur 43: Kapton folie

4.2.6. Garolite

VOORDELEN:

- Goedkoop
- Verschillende groottes
- Vormvast

NADELEN:

- Brandbaar



Figuur 44: Garolite plaat

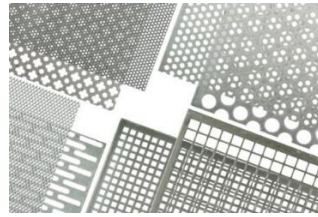
4.2.7. Geperforeerd plaat

VOORDELEN:

- Goedkoop
- Grote keuze aan geometrie

NADELEN:

- Ruwe bodem



Figuur 45: Geperforeerd plaat

4.2.8. OSB-plaat

VOORDELEN:

- Goedkoop
- Duurzaam
- Licht van gewicht

NADELEN:

- Niet water bestendig



Figuur 46: OSB-plaat

4.2.9. Betonplex

VOORDELEN:

- Goedkoop
- Licht van gewicht
- Stevig en hard
- Antislip oppervlak

NADELEN:

- Verschillende diktes
- Verschillende types



Figuur 47: Betonplex

4.2.10. MDF-plaat

VOORDELEN:

- Goedkoop
- Licht van gewicht
- Duurzaam
- Stevig en hard

NADELEN:

- Verschillende diktes
- Verschillende types



Figuur 48: MDF-plaat

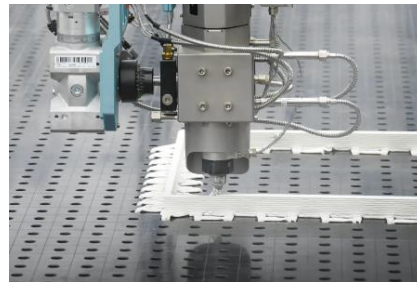
4.2.11. Lastafel met inserts

VOORDELEN:

- Stabiel opstelling
- Lock inserts

NADELEN:

- Duur in aankoop
- Groot formaat
- Grote massa



Figuur 49: Cead - print & lastafel

4.2.12. ABS pellet bed

VOORDELEN:

- Stabiel opstelling

NADELEN:

- Duur in aankoop
- Grote formaten
- Grote massa



Figuur 50: Pellet bed - ABS

CONCLUSIE:

Op basis van de marktanalyse zullen verschillende printoppervlakken worden getest. De details van deze tests zijn te vinden in hoofdstuk '6.4. Printoppervlak'.

4.3. Afzuiging

Een afzuigingsysteem is een component of apparaat dat wordt gebruikt om dampen en gassen die vrijkomen tijdens het printproces af te voeren. Dit zorgt voor een veiligere werkomgeving voor zowel de gebruikers als de machine.

4.3.1. Toilet ventilator

VOORDELEN:

- Goedkoop
- Grote voorraad
- Niet complex

NADELEN:

- Beperkte luchtstroom



Figuur 51: Toilet ventilator

4.3.2. N3 afzuiging

VOORDELEN:

- Compact opstelling
- Mobiel

NADELEN:

- Onderhoud
- Duur in aankoop
- Exclusie darmen



Figuur 52: Nederman - N3

4.3.3. HEYLO-afzuiging

VOORDELEN:

- Compact opstelling
- Kleine
- Filter toegang

NADELEN:

- Filter kost
- Duur in aankoop
- Exclusie darmen



Figuur 53: HEYLO-afzuiging

4.4. Print oriëntatie

De printoriëntatie van de nozzle is de richting waarin de spuitmond van de extruder is gepositioneerd ten opzichte van het print oppervalk en het te print object. Het bepaalt de hechting, support, nauwkeurigheid en oppervlakafwerking met rekening houdend met de geometrie van het object

4.4.1. Verticale (0°)

VOORDELEN:

- Technologie is ver ontwikkeld

NADELEN:

- Geen complexe geometrieën
- Beperkt hoogte opbouw



Figuur 54: Verticale oriëntatie

4.4.2. Schuin (45°)

VOORDELEN:

- Verbeterd aerodynamica onderdeel
- Verticaal sterkere delen
- Layer mix (rechte- en gebogen lijnen)
- Geen support nodig

NADELEN:

- Vereist specifieke printkop en nozzle
- Technologie is in onderontwikkeling



Figuur 55: Schuine oriëntatie

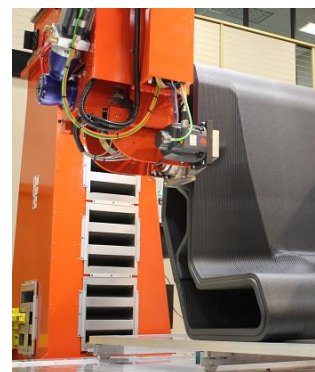
4.4.3. Horizontaal (90°)

VOORDELEN:

- Printsnelheden
- Nadrukken wiel
- Lange objecten printen

NADELEN:

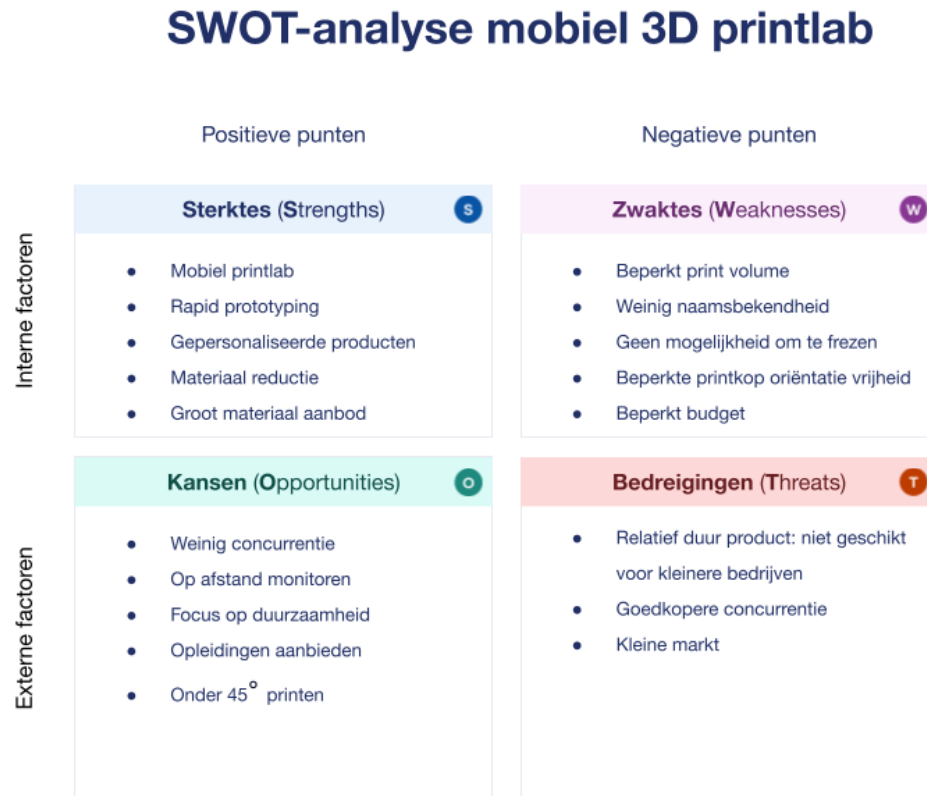
- Technologie is in onderontwikkeling
- Geen complexe geometrieën
- Materiaal compatibiliteit



Figuur 56: Horizontale oriëntatie

4.5. SWOT-analyse

Een SWOT-analyse (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) is een strategisch managementinstrument dat wordt gebruikt om de sterke en zwakke punten, kansen en bedreigingen van een bedrijf of een project te identificeren.

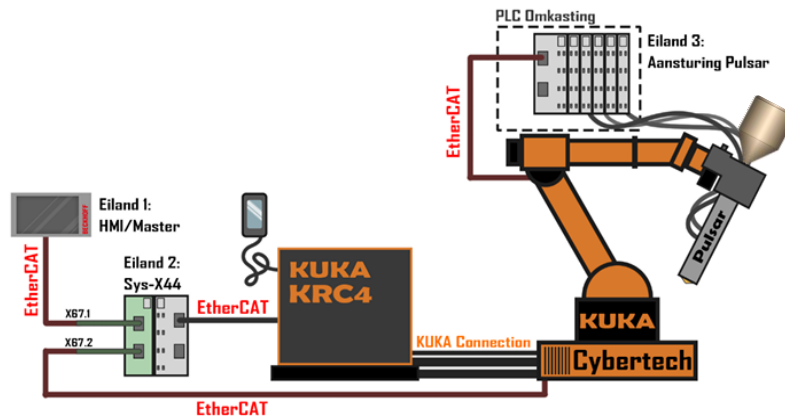


Figuur 57: SWOT-analyse

5. Tussentijds optimalisatie

Dit hoofdstuk richt zich op de tussentijds optimalisatie van AMobile. De oorspronkelijke staat van AMobile is geanalyseerd en vervolgens zijn de noodzakelijke aanpassingen geïdentificeerd en geïmplementeerd om het proces te verbeteren.

Gedurende het onderzoek zijn voortdurend verbeteringen aangebracht, waarbij elke stap zorgvuldig werd geanalyseerd en geïmplementeerd. De keuzes voor optimalisatie waren gebaseerd op grondige systeemvereisten die we tijdens het werken met AMobile hebben geïdentificeerd en ervaren



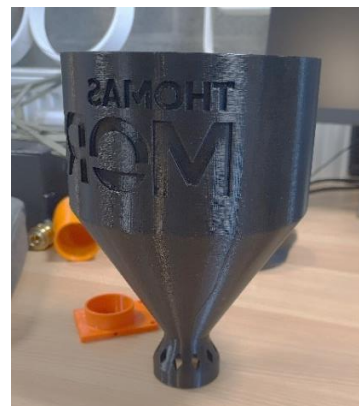
Figuur 58: Visualisatie opstelling tijdens Bachelor proef

5.1.1. Materiaal aanvoer

In het begin van de bachelorproef is geconstateerd dat tijdens het 3D-printen de pellets regelmatig vastliepen tijdens de aanvoer naar de extruder. Dit probleem werd veroorzaakt door het koppelstuk met ventilatiegaten, dat de doorgang van de pellets blokkeerden. Bovendien bleek de capaciteit van de hopper te beperkt, wat resulteerde in frequente bijvulling tijdens het printproces.

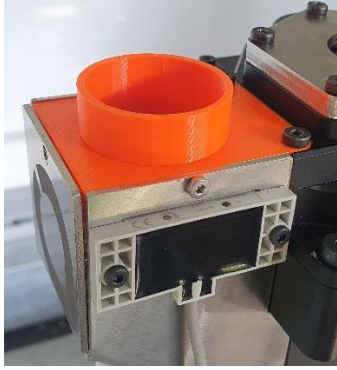


Figuur 59: Oude koppelstuk

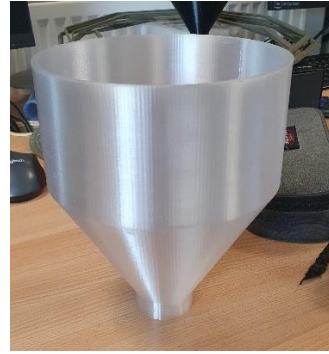


Figuur 60: Oude hopper

Om deze problemen aan te pakken, is er een koppelstuk gemaakt en de hopper opnieuw ontworpen en vervaardigd met behulp van FFF-techniek. De aanpassingen aan het koppelstuk omvatten het vergroten van het gat om de materiaalstroom te verbeteren en het elimineren van ventilatiegaten die tot verstopping leidden. Bij de nieuwe hopper is het volume vergroot en de interne geometrie aangepast om een continue en efficiënte materiaaltoevoer te bevorderen.



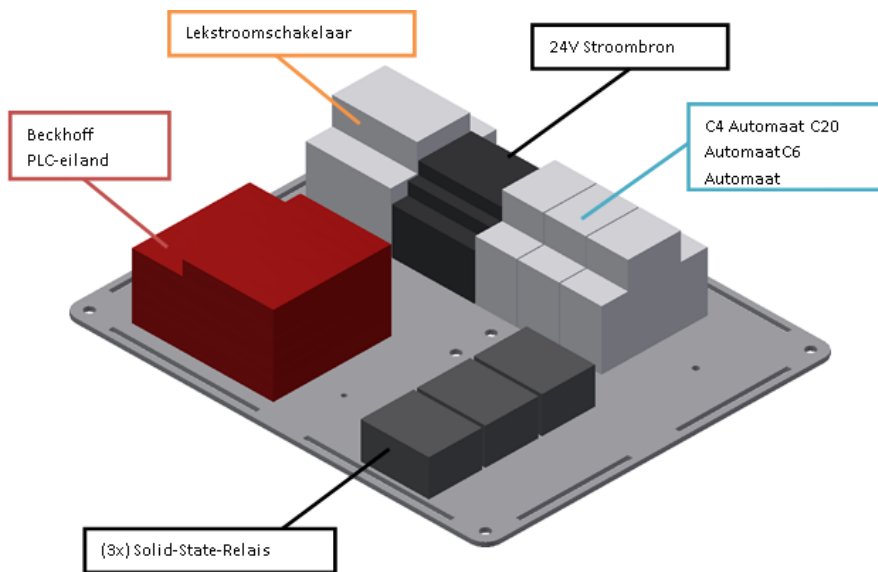
Figuur 61: Nieuwe koppelstuk PETG



Figuur 62: Nieuwe hopper PETG

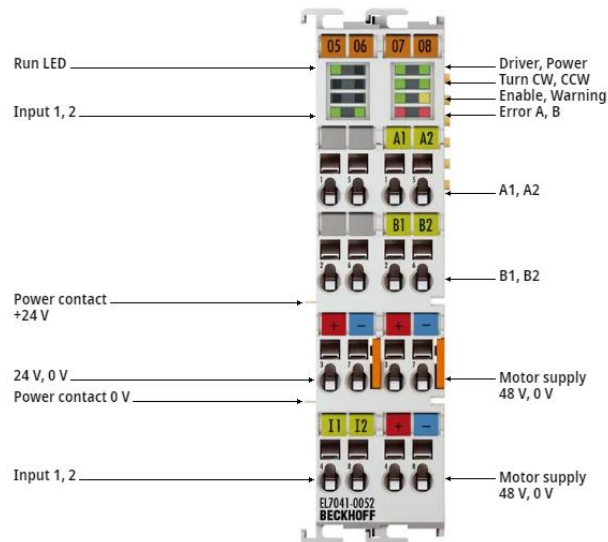
5.1.2. Stappen motor

Bij het extruderen van diverse materialen is vastgesteld dat de stappenmotor stappen overslaat wanneer het toerental hoger is dan 18 rpm, wat resulteert in haperingen. Na een uitgebreide analyse van de elektrische configuratie is ontdekt dat de stappenmotor wordt gevoed met 24V. Uit de datasheet is gebleken dat de stappenmotor eigenlijk op 48V moet worden aangesloten om zijn maximale koppel te bereiken.



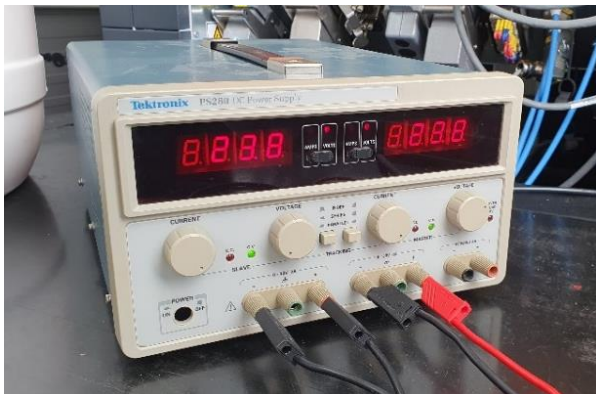
Figuur 63: PLC-omkasting plaat met componenten

Het was niet mogelijk om de huidige PLC-opstelling te wijzigen vanwege het feit dat de voedingsbron van 24V ook andere Beckhoff I/O-kaarten van stroom voorziet. Door de specifieke Beckhoff I/O-kaart te identificeren die verantwoordelijk is voor het aansturen van de stappenmotor in de opstelling is er een externe voeding van 48v op aangesloten.

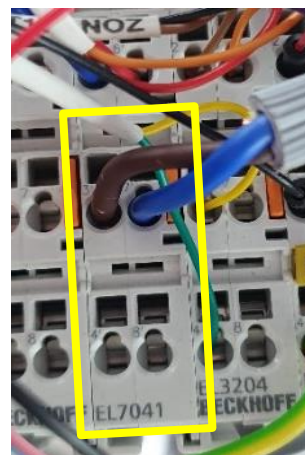


Figuur 64: EL7041-0052 - Stappenmotor terminal

Om de extruder operationeel te houden heeft men een labobron geleend en direct aangesloten, zodat er verder gewerkt kon worden.



Figuur 65: Labobron



Figuur 66: EL7041-0052 - kabel connectie

Nadat de voedingsbron was aangekoppeld, heeft onze bedrijfspromotor een aantal parameters in de Beckhoff PLC vervangen voor 48V. Deze aanpassingen zijn essentieel voor een goede werking van het systeem. Tijdens de testen met de labobron om te controleren of alle ingestelde parameters correct waren, stuitte men op een probleem tijdens het extruderen. Omdat de extrusiesnelheid via de laptop werd gestart, roteerde de schroef in de verkeerde richting, wat resulteerde in materiaalophoping.

Om het probleem op te lossen, moest er onderhoud worden uitgevoerd om de extruder weer aan de gang te krijgen. Hiervoor werd de instructiegids van Dyze gebruikt om het probleem zo snel mogelijk op te lossen. Deze kan men terugvinden in de bijlagen



Figuur 67: Materiaal ophoping extruder



Figuur 68: Ophoping op schroef

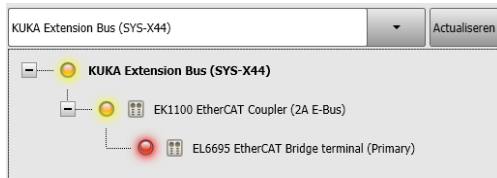
Nadat de extruder weer in elkaar was gezet, heeft men een controletest uitgevoerd om er zeker van te zijn dat de extruder correct functioneerde. Hierbij werd de schroef geactiveerd via het Beckhoff HMI. Tijdens verschillende tests werd opgemerkt dat het probleem niet was opgelost en dat de extruder nog steeds stappen oversloeg tijdens het extruderen bij hoge extrusie snelheden.



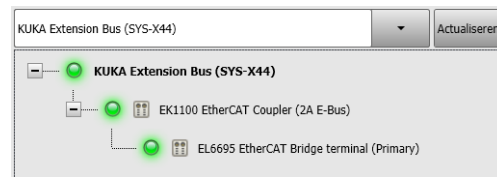
Figuur 69: Proper schroef van materiaal

5.1.3. Post processor & Extrusie

Om een print te starten moest gelijktijdig de extrusie en het programma inschakelen met een lichte vertraging, wat niet erg gebruiksvriendelijk was. Vanwege het onvermogen van de externe EtherCAT-bus (SYS-X44) om communicatie tot stand te brengen tussen de KR C4 en de Beckhoff PLC, was automatisering van het proces niet mogelijk. Na uitgebreide aanpassingen die onze bedrijfspromotor heeft gedaan aan de Beckhoff PLC is het gelukt om de communicatie te herstellen en hebben zijn er tests uitgevoerd met commando's om de extrusie aan en uit te zetten.

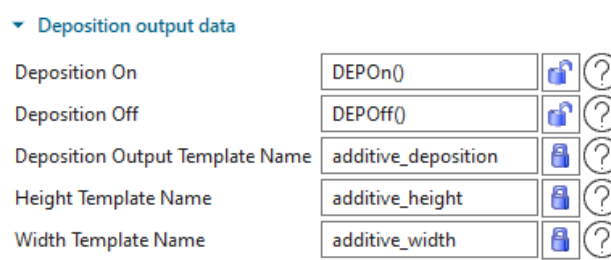


Figuur 70: Geen connectie externe bus (SYS-44)



Figuur 71: Connectie externe bus (SYS-44)

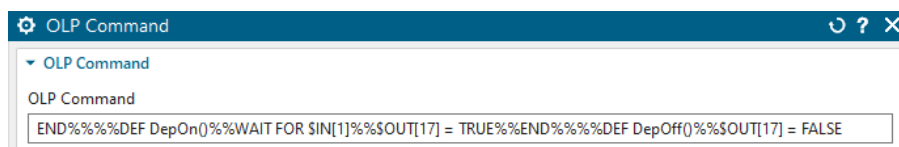
Aangezien de automatische integratie van Siemens NX tijdens het postproces niet plaatsvond, waren handmatige aanpassingen in de 'Post Configurator' onder het sub-tabblad 'Deposition Output Data' vereist om de commando's correct te laten werken. De instellingen voor 'Deposition ON' en 'Deposition OFF' moesten aangepast worden vanwege een foutieve interpretatie tijdens de uitvoering van het programma (zie figuur 72).



Figuur 72: Siemens NX Post configurator - Deposition output data

Om extrusiecommando's te kunnen gebruiken, dienen specifieke commando's te worden toegevoegd aan het gewenste programma binnen de 'END Events Rule' van het 'OLP Command'. Deze toevoeging zorgt ervoor dat de extrusiecommando's worden opgenomen in het postprocessor-programma, wat essentieel is voor het correct uitvoeren van de gewenste extrusie taak tijdens het productieproces.

Op deze manier worden de juiste instructies voor extrusie geïntegreerd in de machinecode die wordt gegenereerd door de postprocessor, waardoor een naadloze uitvoering van de extrusiebewerkingen mogelijk wordt.



Figuur 73: Siemens NX - OLP Command

5.1.4. Kalibratie methode

Tijdens het meten van de TCP werd een aanzienlijk grotere meetfout waargenomen dan verwacht. Om dit te verifiëren zijn meerdere TCP-metingen uitgevoerd, waarbij steeds weer grote afwijkingen werden vastgesteld. Om dit probleem op te lossen, was kalibratie noodzakelijk.

Aangezien er op de campus geen specifieke kalibratiegereedschappen beschikbaar waren voor onze KUKA-robot, moesten er geïmproviseerd worden om dit uit te kunnen voeren. Hiervoor is een platte pendrijver gebruikt als alternatieve kalibratietool.

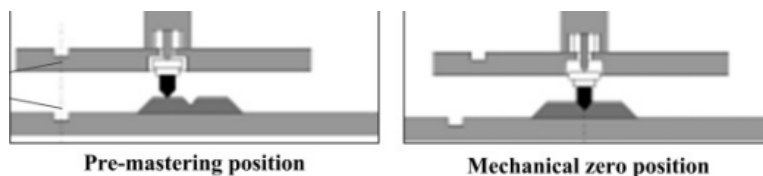


Figuur 74: Pendrijver met platkop



Figuur 75: kalibratie punt

Aangezien elke joint een kalibratiepunt heeft, is het niet eenvoudig om dit snel te definiëren. Elk punt heeft een pin en een V-groef, door deze op één lijn te brengen in de laagste positie kan de robot correct worden gekalibreerd (Zie *figuur 76*).



Figuur 76: Visualisatie tijdens kalibreren

Omdat de positie handmatig moest worden uitgevoerd, was het lastig om te weten wanneer het gereedschap zich in de laagste positie bevond. Dit moest worden bepaald door te duwen en te voelen wanneer het gereedschap bewoog. Hierdoor kostte het veel tijd om de kalibratie nauwkeurig uit te voeren.



Figuur 77: Pendrijver in kalibratie punt

Na de kalibratie werd de TCP-meting uitgevoerd om te controleren of de meetfout niet opnieuw zou optreden. Het bleek dat de gewrichten optimaal waren gekalibreerd, waardoor de meetfout niet meer optrad.

6. Onderzoek

Gedurende het onderzoek zijn voortdurend verbeteringen aangebracht, waarbij elke stap zorgvuldig werd geanalyseerd en geïmplementeerd. De keuzes voor optimalisatie waren gebaseerd op grondige systeemvereisten die tijdens het werken met AMobile zijn geïdentificeerd en ervaren

Om het proces maximaal te kunnen optimaliseren, moet er onderzoek gedaan worden naar verschillende aspecten. In dit hoofdstuk bespreken men een aantal punten die uitgebreid zijn onderzocht.

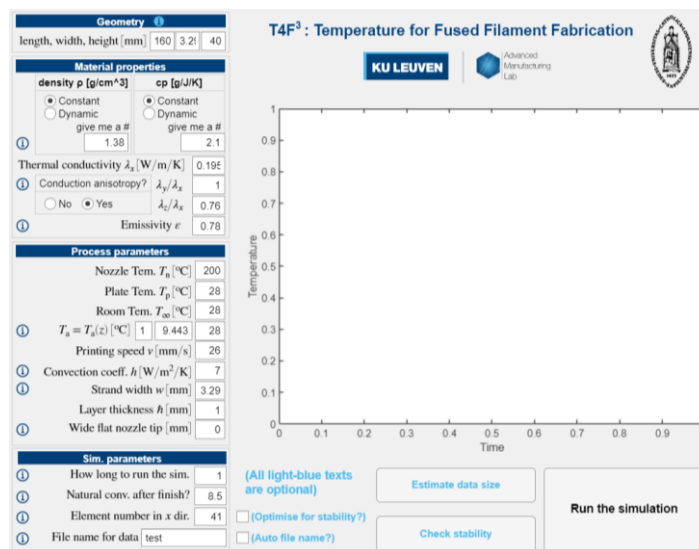
6.1. Printparameters

6.1.1. Voortloopsnelheid

Om ervoor te zorgen dat de temperatuur tijdens het printen niet te hoog oploopt, moet de voortloopsnelheid bepaald worden op basis van de afkoelsnelheid van de vorige laag. Aanvankelijk werd dit gedaan door het temperatuurverschil tussen de nozzle en de gewenste interpas temperatuur te berekenen ($200^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C} = 130^{\circ}\text{C}$) en deze waarde te delen door de afkoelsnelheid van het materiaal, verkregen uit een eerdere test: $(130^{\circ}\text{C}) / (1,385^{\circ}\text{C/s}) = 93,86 \text{ s}$. Hieruit werd de laagtijd bepaald, waarmee vervolgens de voortloopsnelheid berekend kon worden: $2089,3 \text{ mm} / 93,86 \text{ s} = 22,26 \text{ mm/s}$.

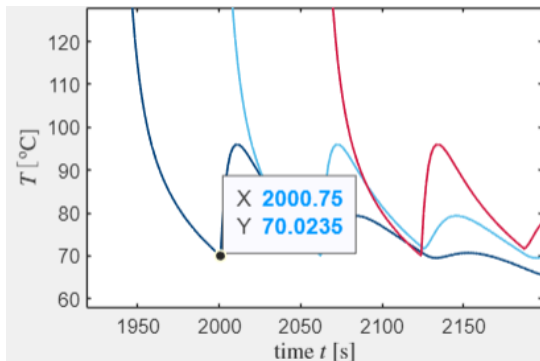
Het nadeel van deze methode is dat de afkoeling afhankelijk is van de geometrie van de laag. Bij een andere laaggeometrie moesten er opnieuw testen uitvoeren worden om de afkoelsnelheid te bepalen, wat tijd en materiaal kostte. Bovendien is de afkoeling niet lineair, waardoor deze methode niet bruikbaar was voor verschillende baanlengtes. Om deze problemen te overkomen, werd er gezocht naar een betere oplossing en vonden die bij de KU Leuven.

PhD studenten van de KU Leuven hebben een software ontwikkeld genaamd T4F3, die de afkoeling van een laag kan berekenen. Door het invoeren van een voortloopsnelheid kan met deze software de interpas temperatuur voor een specifieke laaggeometrie bepaald worden. Als de interpas temperatuur te hoog is, moet de voortloopsnelheid verlaagd worden en de simulatie opnieuw laten draaien. De software berekent ook de laagtijd, dit helpt om de voortloopsnelheid nauwkeurig te bepalen en zo het printproces te optimaliseren.

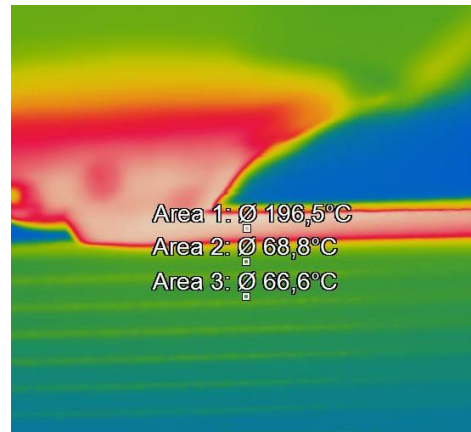


Figuur 78: T4F3 ingevulde parameters

Om de resultaten van T4F3 te verifiëren, zijn de lagen van verschillende testen gefilmd met een IR-camera en vervolgens geanalyseerd. In figuur 80 is te zien dat de interpas temperatuur 68,8 graden bedraagt.



Figuur 79: T4F3 interpas temperatuur Y:70°C



Figuur 80: IR-beeld interpastemperatuur

Om te controleren of de voorspelde interpas temperatuur van T4F3 juist is, moeten de teststukken worden doorgezaagd, gepolijst en onder een microscoop worden geanalyseerd. Door het oppervlak en de hecht lengte te meten, kan er geverifieerd worden of de parameters die vooraf in T4F3 zijn ingevoerd correct waren. Deze stappen zijn essentieel om de nauwkeurigheid van de software te bevestigen en om ervoor te zorgen dat de printparameters optimaal zijn ingesteld voor consistente en kwalitatief hoogwaardige resultaten



Figuur 81: Doorsnede geprinte laag

Uit de microscoopbeelden is af te leiden dat de hecht lengte groter is dan voorspeld. Hierdoor stijgt de $\lambda z/\lambda x$ -waarde, wat resulteert in een lagere voorspelde interpas temperatuur. Dit brengt de voorspelde waarde dichter bij de werkelijke temperatuur. De convectiecoëfficiënt heeft ook een aanzienlijke invloed op de afkoeling; een hogere coëfficiënt resulteert in een lagere voorspelde temperatuur. Het inschatten van deze waarde is echter zeer moeilijk, vooral als er met open deuren wordt geprint en het buiten waait.

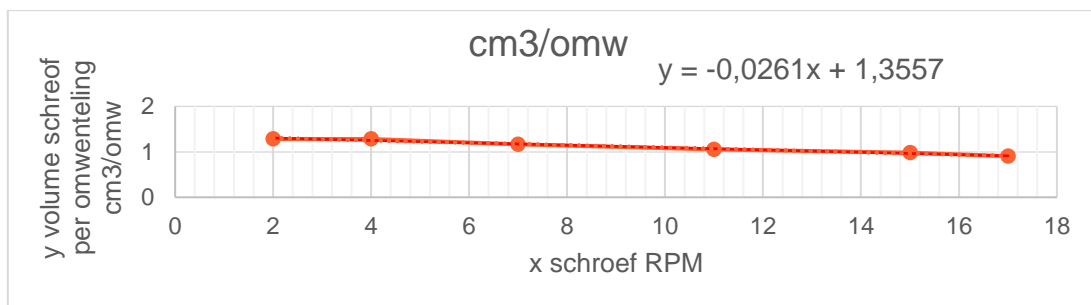
6.1.2. Extrusie output

Wanneer het volume per omwenteling bekend is kan op basis van de laaggeometrie en voortloopsnelheid het toerental berekend worden. In eerste instantie is er een test uitgevoerd waarbij gedurende een bepaalde tijd materiaal werd geëxtrudeerd bij een constant toerental, waarna het gewicht van het geëxtrudeerde materiaal werd gewogen. Door dit gewicht te delen door het aantal omwentelingen dat de extruder in die tijd heeft gemaakt, kon het gewicht per omwenteling berekend worden. Door vervolgens dit gewicht te delen door de dichtheid van het materiaal, kan het volume per omwenteling bepaald worden.



Figuur 82: Materiaal prop rPLA

Er is al snel vastgesteld dat het volume per omwenteling hoger is bij een lager toerental en lager is bij een hoger toerental. Dit fenomeen ontstaat doordat bij een hogere schroefsnelheid de afschuifsnelheid van de kunststof toeneemt, wat resulteert in een afname van de viscositeit, ook wel bekend als shear thinning. Hierdoor neemt de druk in de extruder af, wat resulteert in een lager volume per omwenteling.



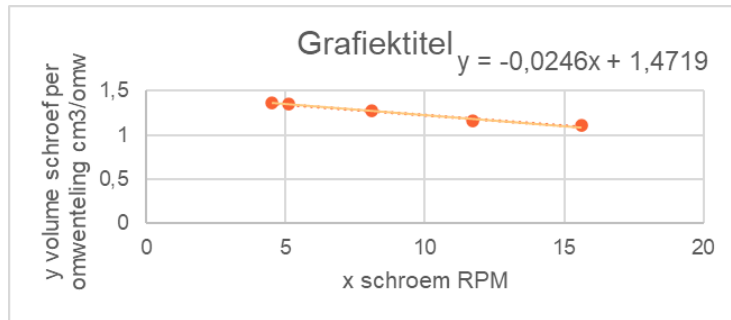
Figuur 83: grafiek output test 1

Bij het printen werd opgemerkt dat de gegevens van de eerste outputtest, waarbij het materiaal gewogen werd niet klopten. Om deze reden is er een nieuwe test opgezet, waarbij een vierkant geprint werd bij verschillende toerentallen en voortloopsnelheden, en vervolgens de resulterende breedte werd gemeten. Alle verzamelde gegevens worden ingevoerd in een Excel-bestand (output testen + formule), waarbij het volume per omwenteling automatisch wordt berekend voor de verschillende toerentallen.



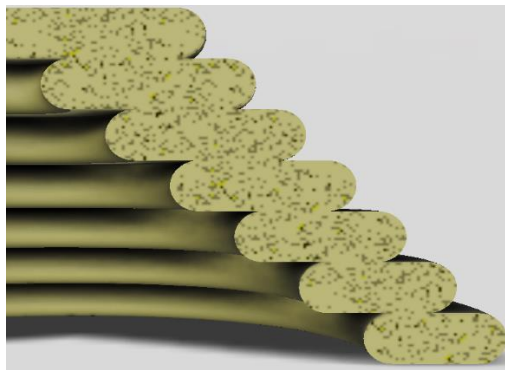
Figuur 84: Vierkant output test 2

Deze gegevens werden vervolgens in een tabel geplaatst, waarna een grafiek werd gegenereerd om hier vervolgens een formule uit af te leiden.



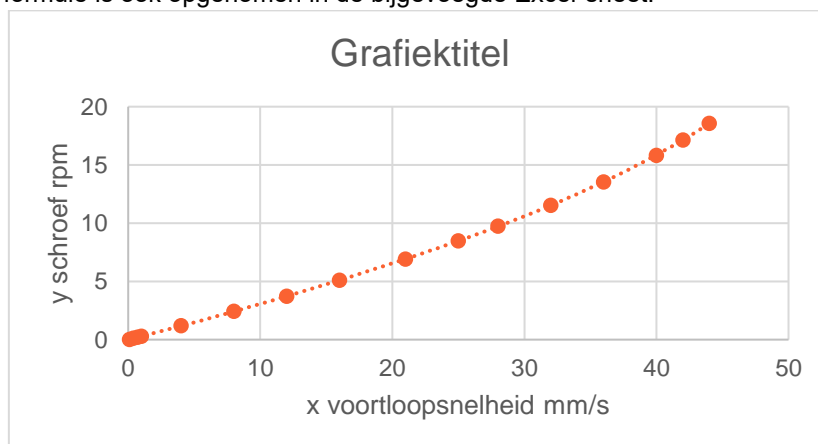
Figuur 85: Grafiek output test 2

Bij het printen van een piramide is het noodzakelijk om een constante laagtijd te handhaven, dit betekent dat zowel de voortloopsnelheid als de extrusiesnelheid telkens verlaagd moeten worden. In eerste instantie werd er geen rekening gehouden met de toename van de output bij een lager toerental, waardoor de extrusie enkel lineair aangepast kon worden. Dit resulteerde echter in bredere lagen aan de bovenkant van de piramide, zoals te zien is in figuur 85.



Figuur 86: Toenemende laagbreedte

Om dit probleem aan te pakken, is er een adaptieve outputformule ontwikkeld die de toename van het volume per omwenteling bij een lager toerental in overweging neemt. De formule berekent de schroefsnellheid (RPM) op basis van de te printen geometrie en de voortloopsnelheid. Om deze adaptieve formule te illustreren (zie *figuur 87*). Deze formule is ook opgenomen in de bijgevoegde Excel-sheet.



Figuur 87: Adaptieve output grafiek voor een bepaalde laag geometrie

Onderstaand ziet u de adaptieve outputformule die de schroefsnelheid bepaalt op basis van de voortloopsnelheid (V_s) en de vooraf bepaalde laagbreedte en -hoogte. De waarden die in het geel zijn gemarkeerd, zijn afkomstig uit de formule van outputtest 2 (zie figuur 85), waardoor de schroefsnelheid zich aanpast wanneer de output per omwenteling verandert.

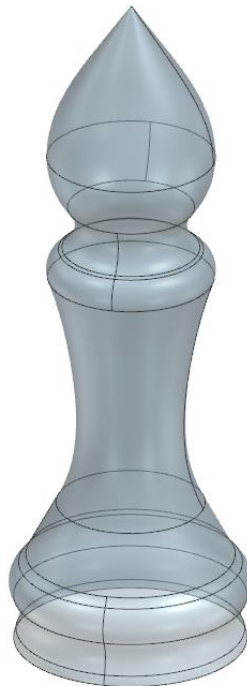
$$RPM = \frac{-1,4719 + \sqrt{1,4719^2 - 4 \times -0,0246 \times - \left(V_s \times 60 \left(\left((B - H) \times H \right) + \left(\pi \times \left(\frac{H}{2} \right)^2 \right) \right) \div 1000 \right)}}{2 \times -0,0246}$$

Rpm = toeren per minuut *H = laag hoogte*
B = laag breedte *Vs = voortloopsnelheid*

Om de formule van figuur 85 voor een nieuwe materiaal soort te bepalen is er een test programma opgesteld waarbij er een zig zag patroon geprint wordt waarbij iedere lijn een op voorhand bepaalde voortloopsnelheid en extrusiesnelheid heeft. Door achteraf de breedte van de verschillende secties in een bijgevoegde excel template te zetten worden het volume per omwenteling waardes automatisch berekent. Deze waarde worden in een grafiek gezet zoals figuur 85 en hier wordt de nieuwe formule uit gehaald.

6.2. 3D model

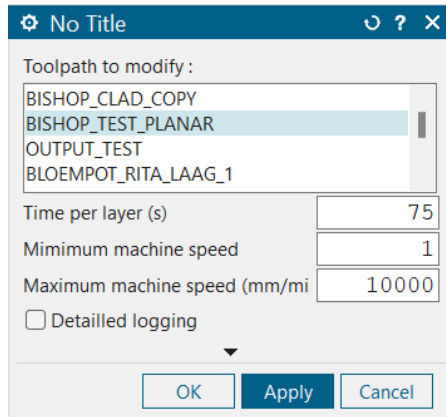
Voordat er geprogrammeerd kan worden moet er een 3D model gemaakt worden. Door verschillende modellen te tekenen en programmeren is er opgemerkt dat het programmeren het makkelijkste is met een sheet body. Door gebruik te maken van een sheet body hoef je niet op voorhand de breedte van het model te bepalen. Hierdoor kan er tijdens het programmeren nog bepaald worden wat de baanbreedte gaat zijn en kunnen er makkelijk wijzigingen aangebracht worden. Omdat het niet nodig is om de vorm een dikte te geven (waarbij vaak foutmelding ontstaan) is er meer vormvrijheid en nauwkeurigheid.



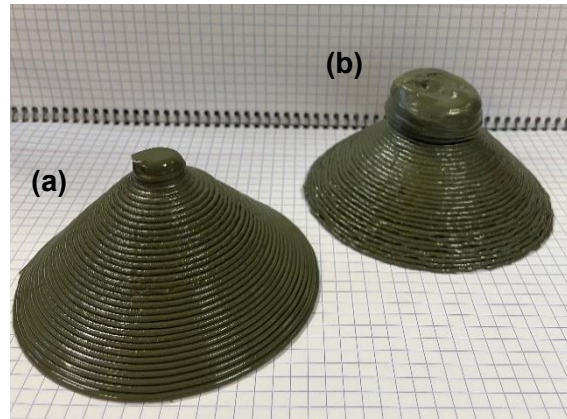
Figuur 88: Sheet body

6.3. Constante laagtijd

Om ervoor te zorgen dat de bovenste lagen van een piramide tijdens het printen niet te warm worden, is het essentieel dat de laagtijd constant blijft, zodat alle lagen dezelfde tijd krijgen om af te koelen. Hiervoor wordt een NX Open-programma gebruikt dat automatisch de snelheid per laag aanpast om de ingegeven laagtijd te handhaven. Dit betekent dat de voortloopsnelheid geleidelijk wordt verlaagd tijdens het printen van de piramide.



Figuur 89: NX open programma



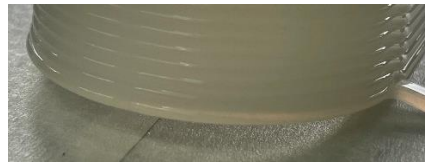
*Figuur 90: Piramide test;
(a) constante laagtijd, (b) geen constante laagtijd*

6.4. Printoppervlak

Er zijn verschillende ondergronden getest op zowel een verwarmt bed als niet verwarmt om te bepalen welke oppervlakken het meest geschikt zijn voor elk type thermoplast. Deze testen zijn essentieel om het gedrag van thermoplasten op verschillende ondergronden te begrijpen, met nadruk op hechting en warping. Omdat een verwarmt bed geen nood bleek te zijn is deze verwijderd zodat er een groter bouwvolume ontstond.



Figuur 91: Goed hechting PETG op verwarmt glas



Figuur 92: Warping PLA+ op schilders tape

Hiervan is een overzicht gemaakt met alle oppervlakken en thermoplasten die zijn getest. Tijdens deze testen is er soms gebruik gemaakt van lijm om de hechtingsprestaties te verbeteren.

		Thermoplasten			
		PLA	PETG	PP	ABS
Oppervlakken	Aluminium niet verwarmt	1	1	1	*
	Aluminium verwarmt	2	2	1	*
	Glas niet verwarmt	2	3	1	*
	Glas verwarmt	3	5	1	*
	Schilders tape niet verwarmt	3	2	1	*
	Schilders tape verwarmt	4	4	1	*
	Packing tape niet verwarmt	2	*	1	*
	Packing tape verwarmt	3	*	2	*
	MDF	4	*	*	*
	OSB	5	*	*	*
	Betonplex	4	*	*	*

1 = Zeer slecht

2 = Slecht

3 = Mattig

4 = Goed

5 = Zeer goed

* = Moet nog getest worden

Tabel 2: Printoppervlak resultaten

Uit de testen kan worden geconcludeerd dat elk type thermoplast zich door zijn chemische samenstelling, anders gedraagt op verschillende oppervlakken. Bovendien is gebleken dat de toevoeging van lijm zoals haarlak aan het oppervlak de hechtingsprestaties aanzienlijk verbetert in vergelijking met een onbehandeld oppervlak.

6.4.1. Gesponsord materiaal

Door contact op te nemen met verschillende fabrikanten die pellet materiaal aanbieden, zijn er samples van verschillende materiaal kosteloos ontvangen om testen mee uit te voeren. Dit heeft geleid tot een aanzienlijke kostenbesparing.

Er is een tabel opgesteld met de ontvangen materialen en hun prijs per kilo per fabrikant. Alle materiaaloffertes zijn opgenomen in de bijlage A en de datasheets in bijlage C.

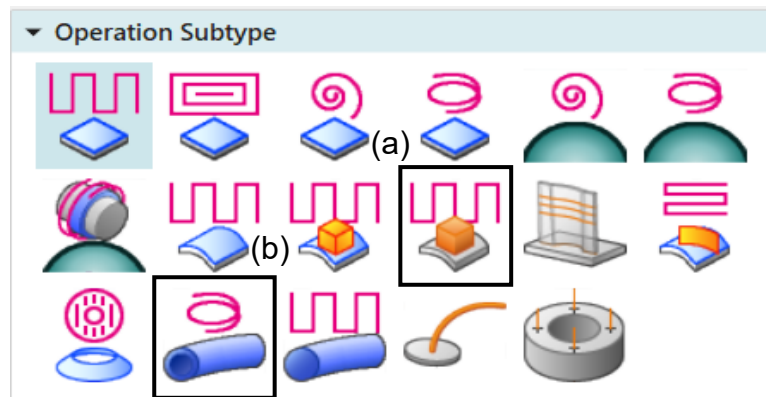
<i>Bedrijf</i>	<i>Materiaal</i>	<i>€/kg</i>	<i>Qty.</i>	<i>Σ</i>
Airtech	T-100GF	€ 8,39	5 kg	€ 41,95
	C-250CF	€ 34,44	5 kg	€ 172,20
	S-150CF	€ 28,86	5 kg	€ 144,30
Xenia	23-C20-3DP	€ 14,20	5 kg	€ 71
	28-C20-3DP	€ 16,40	5 kg	€ 82
Lati	LATIGEA B20 AM	€ 8,20	5 kg	€ 41
	LATER G AM	€ 5,90	5 kg	€ 29,50
Mitsubishi chemical	rPLA Matt	€ 6,20	240 kg	€ 1488
	rPET-G	€ 3,37	100 kg	€ 337
	Light Wood PLA	€ 11,90	60 kg	€ 714
	rPETG CF	€10,71	40 kg	€ 428,40
	Σ		475 kg	€ 3549,35

Tabel 3: Kost opsomming pellets

6.5. Siemens NX

Omdat Siemens NX niet specifiek ontworpen is voor additive manufacturing met robots, heeft men verschillende bewerkingsmethoden moeten uitproberen om de meest geschikte aanpak te vinden. Voor grootschalig printen blijkt het gebruik van een continue toolpad de beste optie te zijn. Hoewel stepovers mogelijk zijn, worden de start- en stoppunten bij grootschalig printen zeer zichtbaar, waardoor deze methode minder wenselijk is.

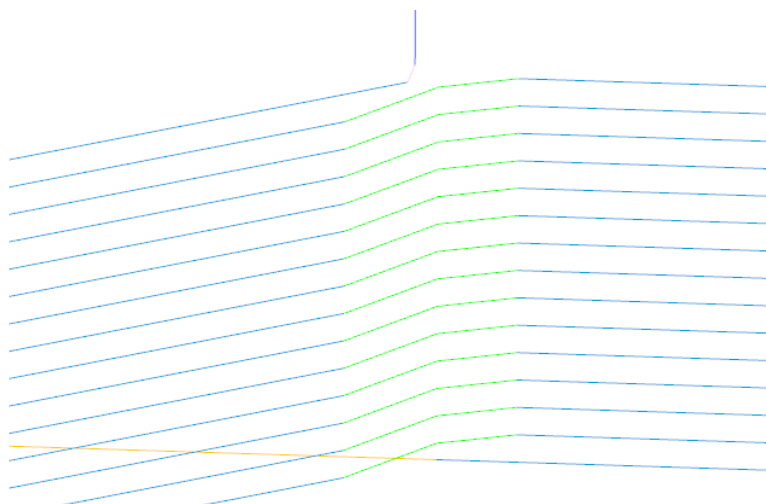
Na het testen van verschillende bewerkingen bleken *'planar additive thin wall'* en *'freeform additive coating'* het meest effectief te zijn. Deze bewerkingen leverden de beste resultaten op voor ons doel.



Figuur 93: (a) = planar additive thinwall (b) = freeform additive coating

6.5.1. Planar additive thinwall

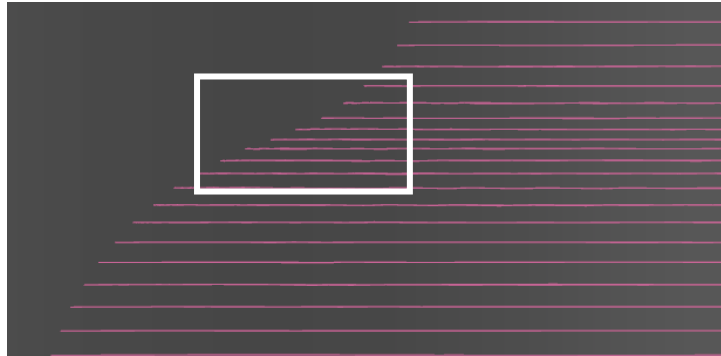
De *'planar additive thinwall'* operatie is perfect geschikt voor het printen van stukken met verticale wanden. De eenvoud van het instellen van de parameters en de controle over de hoek om naar de volgende laag te gaan (Zie figuur 95) maken deze bewerking ideaal voor het snel programmeren van eenvoudige stukken.



Figuur 94: In het groen de traversal

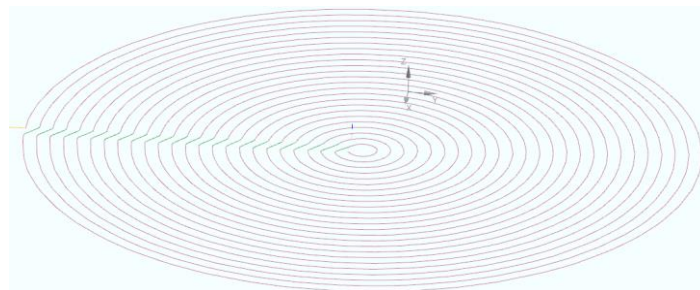
6.5.2. Freeform additive coating

'De 'freeform additive coating' operatie wordt het best gebruikt voor het printen van modellen waar overhangende gebieden in zitten en dus niet enkel uit verticale wanden bestaat. Deze bewerking houdt rekening met de tussenafstand volgens de contour van het 3D-model, waardoor de afstand tussen de banen consistent blijft. Zoals te zien is in figuur 96, wordt de afstand tussen de lagen kleiner binnen het witte kader, wat een nauwkeurigere en stevigere constructie mogelijk maakt.



Figuur 95: Varierende laag hoogte

Uit de experimenten bleek dat wanneer de in- en out-tolerance (zie scriptie 'Aansturen van robotarm vanuit cam omgeving voor additive manufacturing' van Kevin Sel) te laag zijn ingesteld, de robot begint te happeren vanwege de grote hoeveelheid punten die in korte tijd verwerkt moeten worden. Aanvankelijk moest de vorm van de bodem handmatig worden getekend om een continue toolpad te garanderen. Later werd een klein gat in het midden van de bodem gecreëerd, waardoor dit als 'drive geometry' geselecteerd kon worden. Hierdoor ontstond via 'smooth stepover' automatisch een continue toolpad voor een dichte bodemlaag (zie handleiding Siemens NX)



Figuur 96: bodemlaag met continue toolpad

6.6. Pellet aanvoersysteem

Vanwege de noodzaak om regelmatig materiaal bij te vullen bij het printen van grote objecten, is er gezocht naar een oplossing. Eerst is er een marktstudie naar pellet aanvoersystemen gedaan om de verschillende mogelijkheden te verkennen. Vervolgens is er besloten om zelf een betaalbare variant te ontwikkelen.

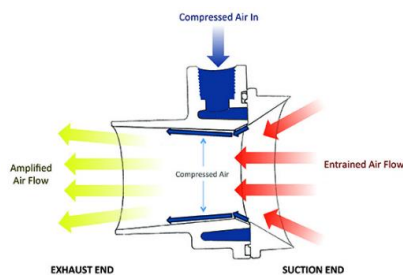
Om kosten te besparen, is er gekeken naar diverse componenten die geïntegreerd kunnen worden in het aanvoersysteem. Op basis hiervan is er een lijst opgesteld met mogelijke aankoopcomponenten, zelf te ontwerpen onderdelen en onderdelen die niet aangeschaft hoeven te worden. Met behulp van deze lijst is er een overzicht gemaakt van wat er nodig was om het systeem te realiseren (zie Tabel 4).

Aankoop	Zelf ontwerpen	Niet-aankoop
Compressor	Luchtversterker	Capacitieve sensor (pulsar)
Pvc-slang	Venturi-pomp	Besturing systeem (arduino)
Persluchtslang	Hopper	Slangklem
Magneetventiel		Buizenklem

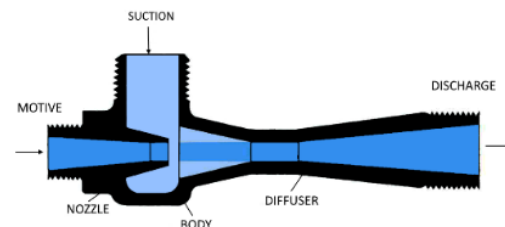
Tabel 4: Overzicht van componenten pellet aanvoersysteem

Vanwege de hoge kosten van een luchtversterker en een venturi-pomp is er besloten om ons eigen ontwerp te maken dat specifiek geschikt is voor onze toepassing. Met behulp van FFF-technologie kunnen er snel prototypes geproduceerd worden en indien nodig gemakkelijk aanpassingen gemaakt worden aan het ontwerp.

Het werkingsprincipe van een luchtversterker en een venturi-pomp is in feite hetzelfde. Wanneer lucht door de vernauwing gaat, neemt de snelheid toe en daalt de druk. Dit creëert een lagedrukgebied bij de vernauwing, waardoor pellets worden aangezogen vanuit een aanzuigleiding. Vervolgens worden de pellets met hoge snelheid meegevoerd in de slang.



Figuur 97: Luchtversterker principe



Figuur 98: Venturi-pomp principe

In eerste instantie zijn er verschillende tests uitgevoerd op luchtversterkers. Hieruit bleek dat de geometrie van het persluchtkanaal een cruciale rol speelt voor een optimale toevoer. Na het produceren van verschillende prototypes is het optimale ontwerp geprint en getest. Uit de tests bleek dat dit ontwerp beter presteerde dan eerdere prototypes.

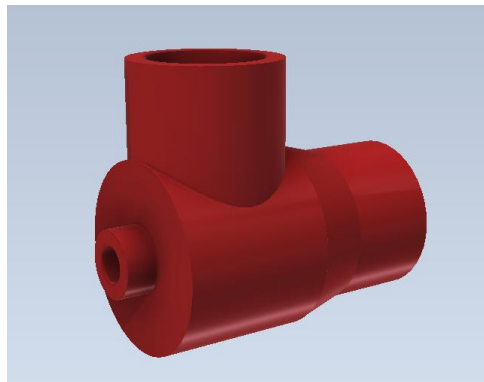
Na een suggestie van onze docent is er een venturi-pomp ontworpen. Hiermee zijn vervolgens tests uitgevoerd en is het tweede ontwerp vergeleken met de luchtversterker. Uit deze vergelijking bleek dat de venturi-pomp nog beter presteerde dan de luchtversterker. Daarom is er besloten om de venturi-pomp te gebruiken. Een ander voordeel van een venturi pomp is de materiaal aanvoer van bovenaf

Vervolgens zijn er tests uitgevoerd op het transporteren van pellets. Hiervoor zijn PVC-slangen aangeschaft om de realiteit na te bootsen. Eerst zijn er testen gedaan met de persluchtinstallatie die beschikbaar was, en daarna is er ook getest met de compressor die is aangeschaft. Op basis hiervan kon er bepaald worden wat het meest efficiënte ontwerp is om pellets aan te voeren (zie Tabel 5).

Test	Naam	Druk [bar]	Binnen dia. [mm]	Slang lengte [m]	Tijd [sec]	Massa [gr]
1.	Venturi pomp V1	9	25	2	30	1765
2.	Venturi pomp V1	9	25	7	30	1780
3.	Venturi pomp V2	9	25	7	30	1815
4.	Venturi pomp V2	6	25	7	6	465
5.	Venturi pomp V2	10	25	7	6	483
6.	Venturi pomp V2	6	25	2	8	574
7.	Venturi pomp V2 (materiaal langs bovenaf)	6	25	7	8	657
8.	Venturi pomp V2 (materiaal langs bovenaf)	8	25	7	8	720

Tabel 5: Testen op pellet transport met venturi-pomp

Uit de testresultaten kon er geconcludeerd worden dat het aanvoeren van materiaal van bovenaf beter is en meer materiaal gedurende een kortere tijd kan transporteren. Omdat de druk in het opslagvat snel afneemt, wordt de compressor na 6 seconden ingeschakeld. Om ervoor te zorgen dat elke aanvoercyclus voldoende druk heeft wordt de aanvoertijd van pellets met 2 seconden verlengd, waardoor de compressor efficiënter kan werken.

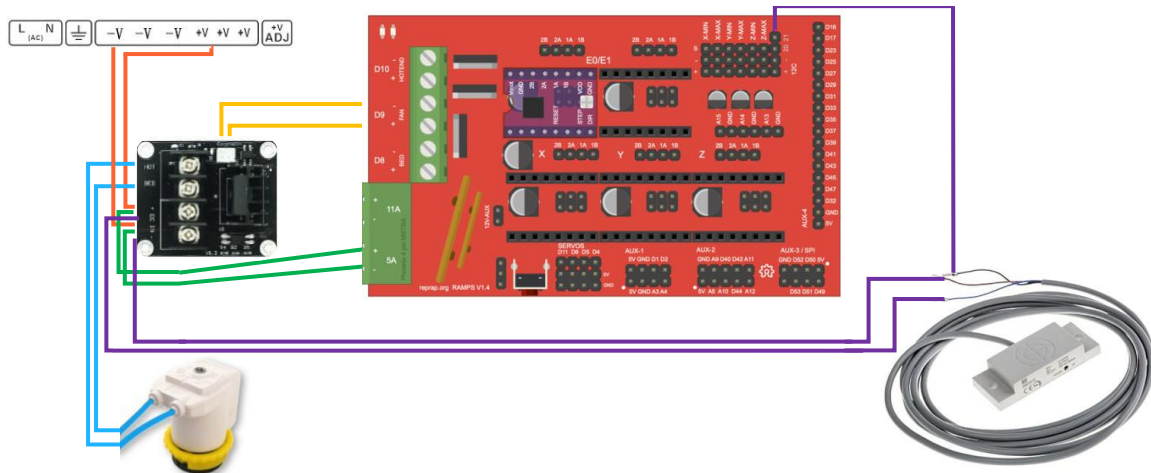


Figuur 99: Definitieve ontwerp venturi-pomp

Voor de automatische besturing van de pellet aanvoer is er besloten om een arduino te gebruiken vanwege het gemak van programmeren, de eenvoud en de kostenbesparing. Om het systeem operationeel te maken, is er een magneetventiel en een capacatieve sensor geïntegreerd. De capacatieve sensor maakt het mogelijk om pellets te detecteren en de perslucht aan te sturen wanneer nodig.

Componenten	
Arduino	UNO
Ramps	V1.4
Mosfet	NCEP01T18T
Magneetventiel	RPE 24Vdc
Capacatieve sensor	CE34SN10DNC

Tabel 6: Componenten lijst - aanvoersysteem



Figuur 100: Lijn schema aanvoersysteem

Om ervoor te zorgen dat het systeem werkt, is de Arduino geprogrammeerd om bij het niet detecteren van materiaal in de aanvoer een signaal van de capacatieve sensor te ontvangen. Vervolgens stuurt de Arduino een signaal om het magneetventiel te activeren, waardoor perslucht gedurende 8 seconden wordt vrijgegeven en pellets worden meegenomen.

Als veiligheidsmaatregel is geïmplementeerd dat als de capacatieve sensor gedurende 9 seconden na het activeren van het magneetventiel geen materiaal detecteert, het magneetventiel terugkeert naar zijn beginpositie.

Er is ook een resetknop aan de zijkant van de Arduino toegevoegd als extra veiligheidsmaatregel. Deze knop kan worden gebruikt als de capacatieve sensor bij het opstarten geen materiaal detecteert, zodat deze handmatig kan worden geactiveerd.

Hiervoor heeft men gebruikgemaakt van open-source bronnen om de Arduino te programmeren.

```

// Definieer het signaalpin voor het Ramps-bord
#define RAMP_SIGNAL_PIN 9 // Pin op Ramps-bord voor het signaal (D9)

// Instellingen voor de tijd
#define SIGNAL_DURATION 8000 // Duur van het signaal in milliseconden (9 seconden)
#define SENSOR_DELAY 100 // De tijd in milliseconden dat de sensor laag moet zijn voordat D9 hoog wordt

const int CAP_SENSOR_PIN = 20; // Pin voor de capacitieve sensor

unsigned long sensorStartMillis = 0; // Variabele om het starttijdstip van het sensorcontact bij te houden
unsigned long signalStartMillis = 0; // Variabele om het starttijdstip van het signaal bij te houden
bool signalActive = false; // Variabele om bij te houden of het signaal actief is

void setup() {
  pinMode(RAMP_SIGNAL_PIN, OUTPUT); // Zet het signaalpin voor Ramps-bord als uitgang
  pinMode(CAP_SENSOR_PIN, INPUT); // Zet de capacitieve sensorpin als ingang
  Serial.begin(9600); // Start de seriële communicatie
}

void loop() {
  int capValue = !digitalRead(CAP_SENSOR_PIN); // Omgekeerd de status van de capacitieve sensor (0 of 1)

  unsigned long currentMillis = millis(); // Huidige tijd

  // Als het signaal actief is en de tijd voor het signaal voorbij is
  if (signalActive && currentMillis - signalStartMillis >= SIGNAL_DURATION) {
    digitalWrite(RAMP_SIGNAL_PIN, LOW); // Zet het signaalpin voor Ramps-bord laag
    signalActive = false; // Markeer dat het signaal niet meer actief is
  }

  // Als de sensor laag wordt
  if (capValue == LOW) {
    // Als dit de eerste keer is dat de sensor laag wordt, start de timer voor het sensorcontact
    if (sensorStartMillis == 0) {
      sensorStartMillis = currentMillis; // Start de timer voor het sensorcontact
    }

    // Als de tijd dat de sensor laag is 0,3 seconden is
    if (currentMillis - sensorStartMillis >= SENSOR_DELAY) {
      // Als het signaal niet actief is en de tijd voor het signaal voorbij is
      if (!signalActive && currentMillis - sensorStartMillis <= SIGNAL_DURATION) {
        signalStartMillis = currentMillis; // Start de timer voor het signaal
        digitalWrite(RAMP_SIGNAL_PIN, HIGH); // Zet het signaalpin voor Ramps-bord hoog
        signalActive = true; // Markeer dat het signaal actief is
      }
    }
  } else {
    // Reset de timer voor het sensorcontact als de sensor niet laag is
    sensorStartMillis = 0;

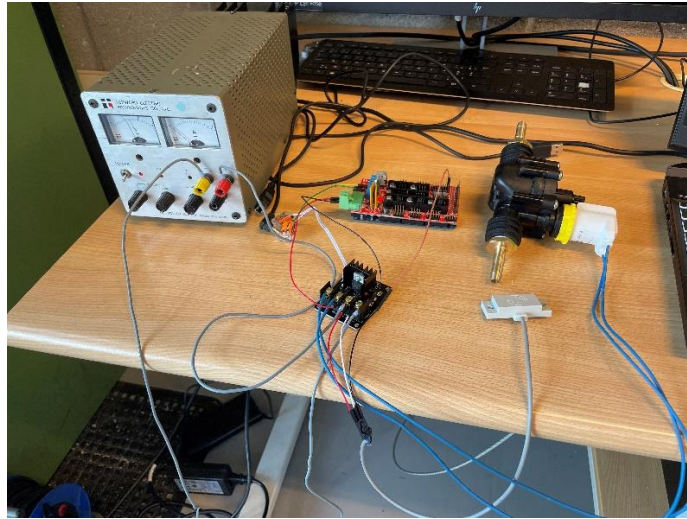
    // Als het signaal actief is en de tijd voor het signaal voorbij is
    if (signalActive && currentMillis - signalStartMillis >= SIGNAL_DURATION) {
      digitalWrite(RAMP_SIGNAL_PIN, LOW); // Zet het signaalpin voor Ramps-bord laag
      signalActive = false; // Markeer dat het signaal niet meer actief is
    }
  }

  delay(100); // Wacht een korte periode voordat de meting opnieuw wordt uitgevoerd
}

```

Tabel 7: Arduino programma

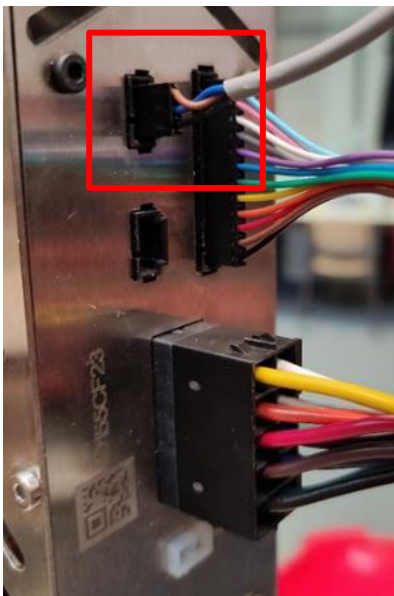
Voor het testen van het Arduino-programma heeft men een eenvoudige testopstelling opgebouwd met de benodigde componenten om het geheel operationeel te maken. Hierdoor kon men controleren of de programmastappen correct werden uitgevoerd.



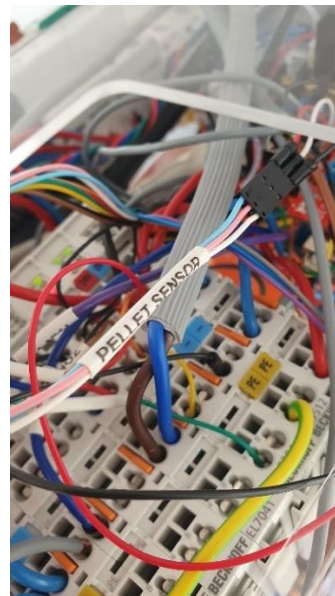
Figuur 101: Test opstelling pellet aanvoer

Nadat het programma was getest, werd de opstelling verplaatst naar de trailer om alles samen te voegen. Voor het plaatsen werd gebruikgemaakt van de bestaande behuizing waarin alle elektrische componenten zijn geplaatst, zodat alle elektronica op één plek bij elkaar is.

Tijdens het koppelen werd opgemerkt dat de kabels van de capacitieve sensor rechtstreeks waren verbonden met de extruder, wat resulteerde in dat alle kabels samenkwamen in de behuizing.

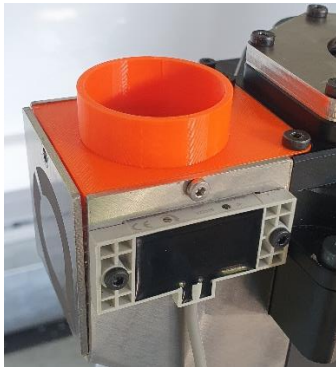


Figuur 102: Pellet sensor kabel

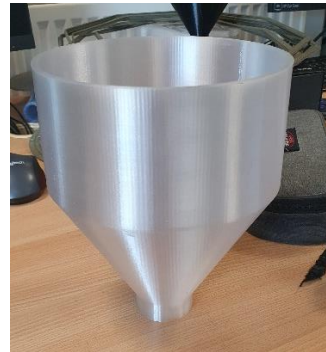


Figuur 103: Pellet sensor connectie

Vanwege de beperkingen van de bestaande hopper voor de automatische pellet aanvoer is zowel de hopper als het koppelstuk volledig herontworpen om het gebruik van twee afzonderlijke stukken voor de bevestiging te vermijden, waarbij ervoor gekozen werd om beide componenten te integreren.



Figuur 104: Koppelstuk PETG



Figuur 105: Hopper PETG

Hierdoor is het component stevig genoeg om mogelijk impact van de PVC-slang op te vangen. Voor het koppelstuk van de PVC-slang naar de hopper heeft men ervoor gekozen om dit niet rechtstreeks te integreren met de hopper. Dit voorkomt dat de volledige hopper moet worden geprint in geval van schade.

Op basis van de gegevens voor het aanvoeren van pellets gedurende een periode van 8 seconden, is besloten om de hopper zo compact mogelijk te maken rekening houdend met de specifieke massa dat wordt vervoerd naar de hopper.



Figuur 106: ZA-hopper



Figuur 107: Hopper

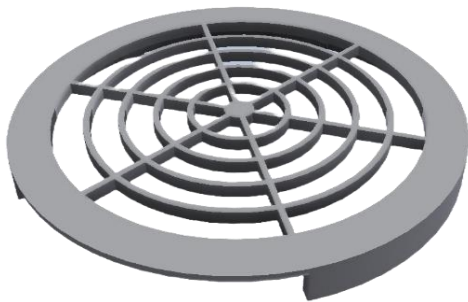
Om dit probleem te voorkomen, heeft men een schuifstuk ontworpen dat op de hopper kan worden geschoven en waar de PVC-slang aan kan worden bevestigd. Hierdoor kan het schuifstuk eenvoudig worden vervangen indien nodig, zonder dat de hele hopper opnieuw geprint hoeft te worden.



Figuur 108: Schuifstuk

Tijdens het transporteren van pellets naar de hopper wordt er lucht meegevoerd. Om deze lucht vrij te laten komen, is een deksel ontworpen waardoor alle lucht kan ontsnappen. Dit deksel fungeert tevens als veiligheidsmaatregel om te voorkomen dat pellets op de grond terechtkomen (Zie figuur 110).

Om te voorkomen dat de pellets weglekken, is er een tussendeel ontworpen waarin een filterdoek aan de binnenzijde kan worden geplaatst. Met een eenvoudig klikmechanisme kan dit deel gemakkelijk worden bevestigd en losgekoppeld (Zie figuur 111).

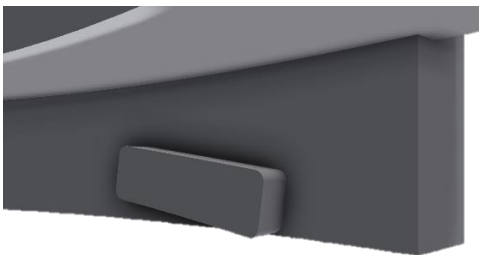


Figuur 109: Deksel



Figuur 110: Bevestiging filter stuk

Om ervoor te zorgen dat het deksel op zijn plaats blijft, is een draai mechanisme ontworpen en geïntegreerd. Dit systeem zorgt ervoor dat het deksel stevig vastzit en niet loskomt. Bovendien zijn er aanpassingen aan de hopper gemaakt door sleuven te integreren, waardoor het deksel goed kan worden vastgedraaid.



Figuur 111: Draai mechanisme deksel



Figuur 112: Draai mechanisme hopper

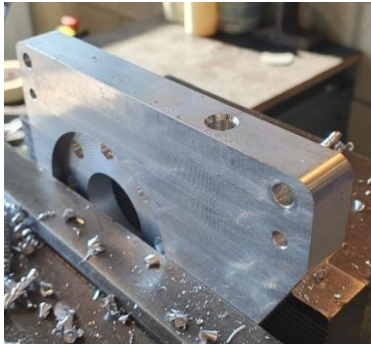
Nadat alle onderdelen geprint waren, zijn ze geassembleerd om te controleren waar eventuele lichte nabewerking nodig was. Daarna is de hopper op de extruder gemonteerd om te verifiëren of deze goed past.



Figuur 113: Volledige hopper

Na het passen van de hopper op de extruder moesten er lichte aanpassingen aanbrengen aan de aluminium flens. Omdat er een PVC-slang gebruikt wordt om pellets aan te voeren die aan de hopper is gekoppeld en kan afbreken, is er een bevestigingspunt nodig om deze te ondersteunen.

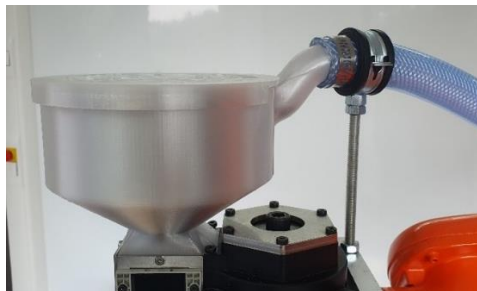
Door een gat te boren en te tappen kon er een draadstang gebruikt worden om de opstelling te verstevigen. Hierdoor kon er een buisklem gemonteerd worden als ondersteuning waardoor de gehele opstelling stabiel geïnstalleerd werd op de juiste hoogte.



Figuur 114: Alu flens



Figuur 115: Bevestiging flens opstelling



Figuur 116: Hopper & slang bevestiging

Om ervoor te zorgen dat de PVC-slang netjes wordt weggewerkt, zijn er enkele plekken op de robotarm geselecteerd waar buisklemmen konden worden bevestigd. Hiervoor zijn twee bouten verwijderd en vervangen door korte draadstangen en moeren.



Figuur 117: Buisklem op joint A3



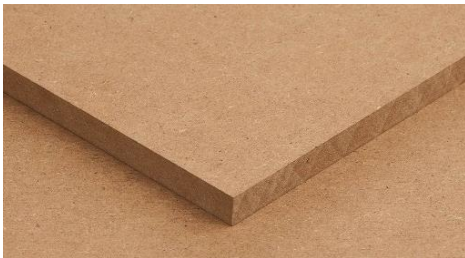
Figuur 118: Buisklem op basis frame

Om ervoor te zorgen dat het aanvoer systeem aangesloten kan worden op perslucht werd de compressor in de trailer geplaatst. Omdat de compressor tijdens het gebruik trillingen veroorzaakt, is er naar een oplossing gezocht om deze trillingen te beperken.



Figuur 119: Compressor - CPRA 24 MS20

Hiervoor werd een schuim gebruikt onder de steunpunten van de compressor. Aangezien de compressor niet rechtstreeks aan de vloer van de trailer bevestigd kan worden, is er gekozen om een MDF-plaat te gebruiken die beschikbaar was op de campus. Deze is op maat gezaagd en gebruikt als een stevige ondergrond voor de compressor.



Figuur 120: MDF-plaat



Figuur 121: Schuim mat

Om het schuim op zijn plaats te houden, is er besloten om houders te printen met behulp van FFF-techniek en deze te voorzien van een inleg van schuim.



Figuur 122: MDF-plaat met poten

Vervolgens is de positie van de compressor op de MDF-plaat vastgelegd en op die plekken de houders gelijmd. Nadat de houders stevig vastzaten, is de compressor op het schuim geplaatst.

Er is gekozen om de compressor rechtsachter in de trailer te plaatsen, zodat ongebruikte ruimte optimaal benut wordt.



Figuur 123: Compressor rechte achter in de trailer

Om lucht en pellets te kunnen voeren, zijn er persluchtslangen en PVC-slangen gebruikt om de componenten met elkaar te verbinden. Hiervoor moest de persluchtslang verkort en aangepast worden door de koppeling te verwijderen, omdat het niet mogelijk was om deze rechtstreeks op onze magneetklem en venturi-pomp te plaatsen.

Voor het koppelen van de persluchtslang en PVC-slang is er een slangklem gebruikt om een goede verbinding tussen de componenten te garanderen.



Figuur 124: Venturi-pomp aangesloten op installatie

Voor het opslaan van pellets is er momenteel een emmer gekozen. Er is een gat in de bodem van de emmer gemaakt om de venturi-pomp eronder te plaatsen. Omdat de venturi-pomp deels uitsteekt, zijn er houten balken onder de emmer geplaatst om ruimte te creëren voor de pomp.



Figuur 125: Opslagruimte pellets

Nadat het automatische pellet aanvoersysteem was opgesteld, zijn er nog een aantal tests uitgevoerd om ervoor te zorgen dat alle componenten en onderdelen goed met elkaar verbonden waren.

6.7. Kosten pellet aanvoersysteem

Tijdens het zoeken naar een automatische pellet aanvoersysteem is er een offerte aangevraagd bij Dyze Design (Zie bijlage B). Uiteindelijk is er besloten om het aanvoersysteem zelf te ontwerpen en bouwen. Hiervoor moesten verschillende componenten worden aangeschaft.

Beide opties zijn in een tabel geplaatst om ze te vergelijken op totale kosten (inclusief btw).

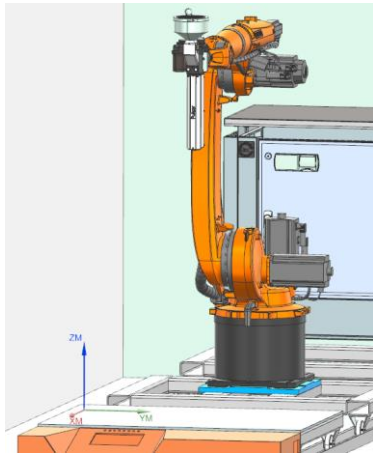
Componenten	Qty.	Dyze design	Eigen opbouw
Compressor CPRA 24 MS20	1	€ 289,49	€ 289,49
Super-flex perluchtslang	1	€ 36,12	€ 36,12
Spoel 24V DC	1	/	€ 52,76
RPE huis 1 ½''	1	/	€ 79,80
PVC-slang 25/34mm	7m	/	€ 44,24
Voeding 48V	1	€ 54,50	€ 54,50
Ramps v1.4	1	/	€ 16,00
Externe mosfet module 25A	1	/	€ 16,00
Arduino	1	/	€ 62,50
Pellet voeding systeem	1	€ 948,78	/
Slang ¾''	10m	€ 287,57	/
Verzendingkost	1	€ 67,65	/
3D-print venturi-pomp	1	/	€ 1,00
	Σ	€ 1684,11	€ 652,41

Tabel 8: Kost opsomming automatische pellet aanvoer

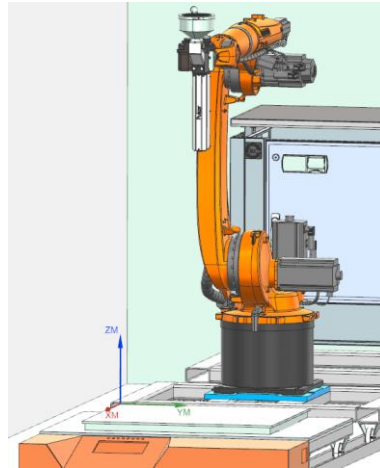
6.8. Bouwvolume

Doordat men grootschalig print, wil men grote objecten printen de beperking hiervan is het opbouw van de trailer. Doordat er een frame ingebouwd is heeft men een bepaald oppervlak waarop geprint kan worden. In de oude opstelling werd het printvolume beperkt door de hopper en de gebruikte opstelling.

Tijdens print onderzoek heeft men twee opstellingen gebruikt om te printen, op het frame en op verwarmt bed.



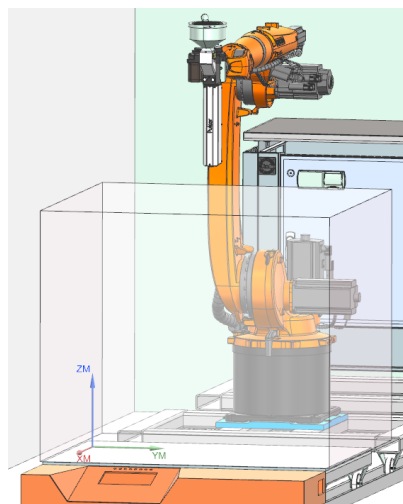
Figuur 126: Printvolume frame met oude hopper



Figuur 127: Printvolume verwarmt bed met oude hopper

L x B x H = 800mm x 1100 mm x 955mm	L x B x H = 702mm x 776mm x 914,6mm
Volume = 840400 cm ³	Volume = 498230 cm ³

Om de frame opstelling optimaal te benutten in de oude opstelling heeft men 285mm in de lengte kunnen winnen om groter te printen, dat houdt in dat er minstens 1M³ kon geprint worden.



Figuur 128: Optimale printvolume frame met oude hopper

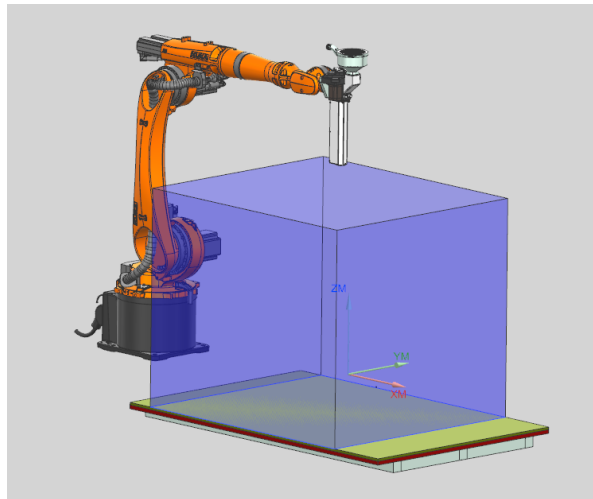
L x B x H = 1085mm x 1100mm x 955mm
Volume = 1139792,5 cm ³

Door dat men de hopper heeft herontwerpen voor het automatische pellet aanvoer heeft men extra marge gecreëerd om hoger te printen. Om het opstelling volledig te benutten heeft men besloten om de frame uit de trailer te halen en in plaats daar van een tafelblad te gebruiken.



Figuur 129: Frame uit de trailer

Door het tafelblad te implementeren kon men het opstelling lager positioneren waardoor men een aantal cm winnen.



Figuur 130: Printvolume tafelblad

$L \times B \times H = 1150\text{mm} \times 1100\text{mm} \times 1050\text{mm}$
$\text{Volume} = 1328250 \text{ cm}^3$

Het printvolume is afhankelijk van de te printen geometrie. Wanneer een object met een beperkte hoogte geprint wordt, kan er hoger en breder worden geprint.

6.9. Kalibratie

Aangezien de robot de vorige keer handmatig is gekalibreerd en dit niet ideaal is, is er gezocht naar een betere optie. Tijdens de zoektocht werd een kalibratie set gevonden op de webshop van KUKA die geschikt is voor onze robot. Deze set is echter zeer duur, waardoor op korte termijn niet direct beslist zal worden om hierin te investeren.



Figuur 131: Kalibratie set MEMD

Een alternatieve optie is het gebruik van een analoge meetklok voor de robot. Aangezien deze meetklok niet meer te koop is via KUKA en alleen via tweedehands beschikbaar is, is er besloten om zelf een kalibratie set te ontwerpen.



Figuur 132: Kalibratie meetklok SN5001

Hiervoor is een analoge meetklok gebruikt die beschikbaar was op de campus en op basis daarvan een houder ontworpen die past in de kalibratie positie van de robot.

Nadat de meetklok is opgemeten, is de houder ontworpen en geprint met FFF-techniek. Tijdens het testen van de houder met de meetklok, werd er geconcludeerd dat 2 van de 6 punten onbereikbaar waren.



Figuur 133: Meetklok met korte meetstift



Figuur 134: Meetklok houder versie 1

Hierdoor is er besloten een andere meetklok te gebruiken met een langer meetstift en is de houder herontwerpen. Uit de tests bleek dat alle kalibratiepunten nu bereikbaar waren.

Achteraf is de kalibratieprocedure uitgevoerd om te controleren of het gebruiksgemak is verbeterd.



Figuur 135: Meetklok met lange meetstift



Figuur 136: Meetklok houder versie 2

6.9.1. Kost kalibratie

Voor de kalibratie van de KUKA-robot zijn er verschillende opties overwogen. Ten eerste is de prijs van de MEMD-kalibratie set van KUKA gevonden via hun webshop. Omdat deze set niet direct aangeschaft zou worden. Is er besloten om een meetklok te gebruiken die beschikbaar was op de campus en op basis daarvan een houder ontworpen.

De zelfgemaakte kalibratie tool is minder nauwkeurig en minder gebruiksvriendelijk dan de MEMD van KUKA. Maar desondanks is het een grote verbetering ten opzichte van de handmatige kalibratie die in het begin uitgevoerd is. In tabel 9 ziet u een vergelijken van de kosten van beide kalibratie tools.

	<i>KUKA MEMD</i>	<i>Eigen opbouw</i>
Σ	€ 2036,75	€ 119.50

Tabel 9: Kost kalibratie tool

6.10. Stappen motor

Omdat er een geleende labobron gebruikt werd, is er een voedingsbron van 48V aangeschaft, waardoor deze definitief in de opstelling geïntegreerd kon worden.



Figuur 137: Voedingsbron 48V

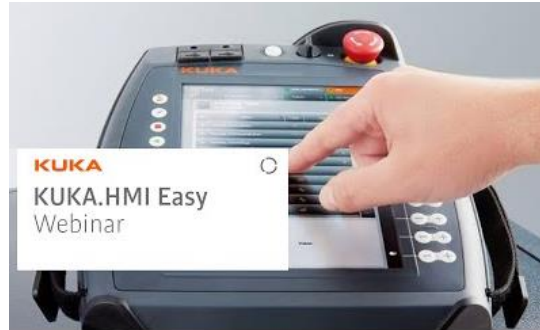
Doordat er niet genoeg ruimte was in de bekisting van de KUKA-robot, is de voedingsbron tussen het frame geplaatst. Nadat de bron was gekoppeld zijn er tests uitgevoerd om te controleren of de extruder correct werkte.



Figuur 138: Voedingsbron tussen het frame

6.11. Easy HMI

Momenteel maakt men gebruik van de smartPAD-2 en de Beckhoff HMI om alle vereiste instellingen en waarden voor het printen in te stellen. Om de bediening gebruiksvriendelijker en eenvoudiger te maken, overweegt men aanschaf en integratie van de 'KUKA.HMI EASY' plug-in op het smartPAD-2.



Figuur 139: KUKA.HMI Easy

Deze plug-in is bedoeld om externe programma's of zelf ingestelde functies te bedienen op het smartPAD-2. Door dit te integreren met de Beckhoff HMI op het smartPAD-2, wordt alles bedienbaar via één scherm.

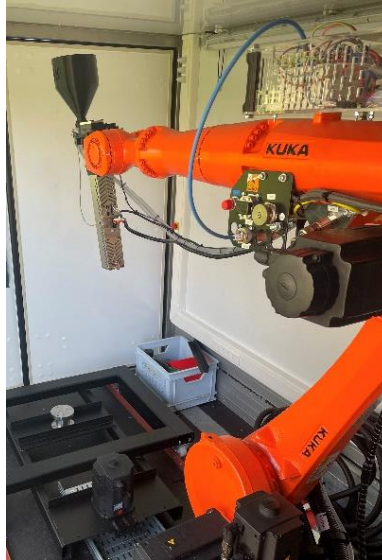


Figuur 140: Voorbeeld van een easy HMI

Het resterende Beckhoff HMI-scherm kan worden gebruikt als een reservescherm voor het geval er problemen optreden met het smartPAD-2.

6.12. Transport positie

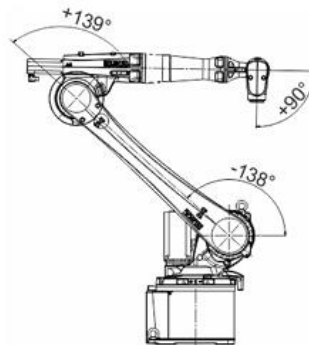
Doordat de AMobile regelmatig wordt getransporteerd is het niet geschikt voor de robot aangezien de gewrichten hun positie kunnen verliezen of ongeldige waarden kunnen aflezen, wat resulteert in de noodzaak tot her kalibratie.



Figuur 141: Oude transport positie zonder ondersteuning

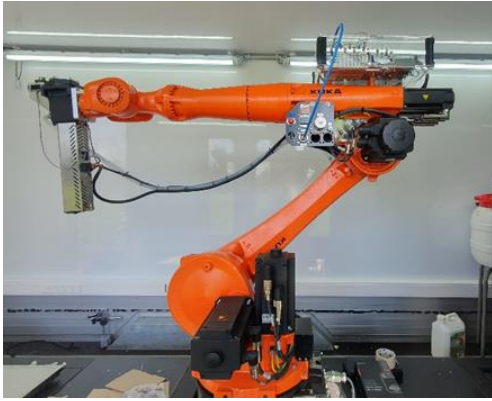
Om dit probleem te voorkomen, is de datasheet van KUKA geraadpleegd en een transportpositie vastgesteld die moet worden gebruikt tijdens het transport. Om de transportpositie van de robot niet handmatig te hoeven instellen, is er een programma gemaakt in Siemens NX met de onderstaande waarden (zie *Figuur 143*).

Axis	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Angle	0°	-138°	+139°	0°	+90°	0°

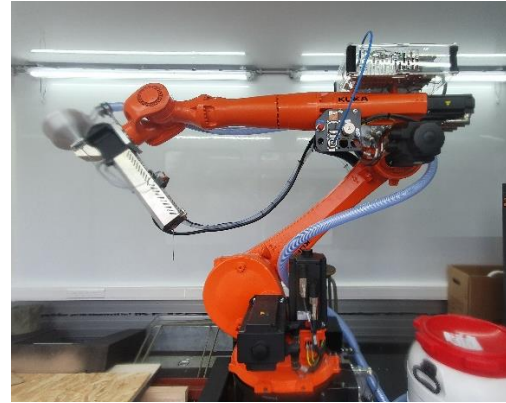


Figuur 142: Transport positie en joints waardes

Omdat de extruder aan de robotflens is bevestigd, was het niet mogelijk om joint A5 volgens de datasheet uit te voeren. Daarom is deze waarde in het programma aangepast naar 40°. Tijdens het uitvoeren van het programma deden zich geen complicaties voor. Na de test werd opgemerkt dat de robot niet uit zijn transportpositie wilde bewegen vanwege een optredende singulariteit in joint A4. Om dit te voorkomen, is joint A4 in het programma geroteerd met -15°.



Figuur 143: Eerste aanpassing transport positie



Figuur 144: Definitieve transport positie

Voor de ondersteuning van de arm is gekozen voor een houten balk en het getapte gat in het KUKA-frame te gebruiken. Voor het gat is een bout van M12 gebruikt. De aanpassing in de houten balk omvat het boren van een gat voor de bout die erdoorheen gaat en aan de bovenkant vorm te geven naar de contouren van joint A4.

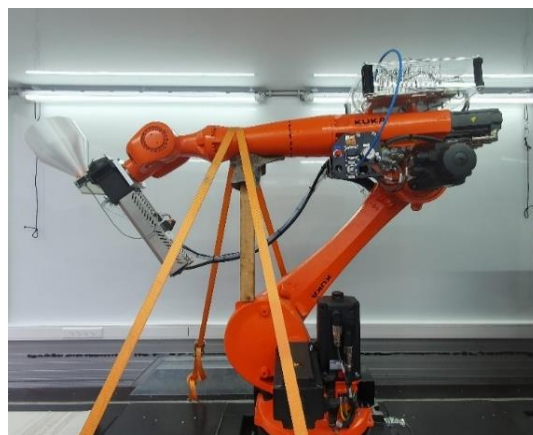


Figuur 145: Bout M12 in KUKA frame



Figuur 146: Houten ondersteun balk

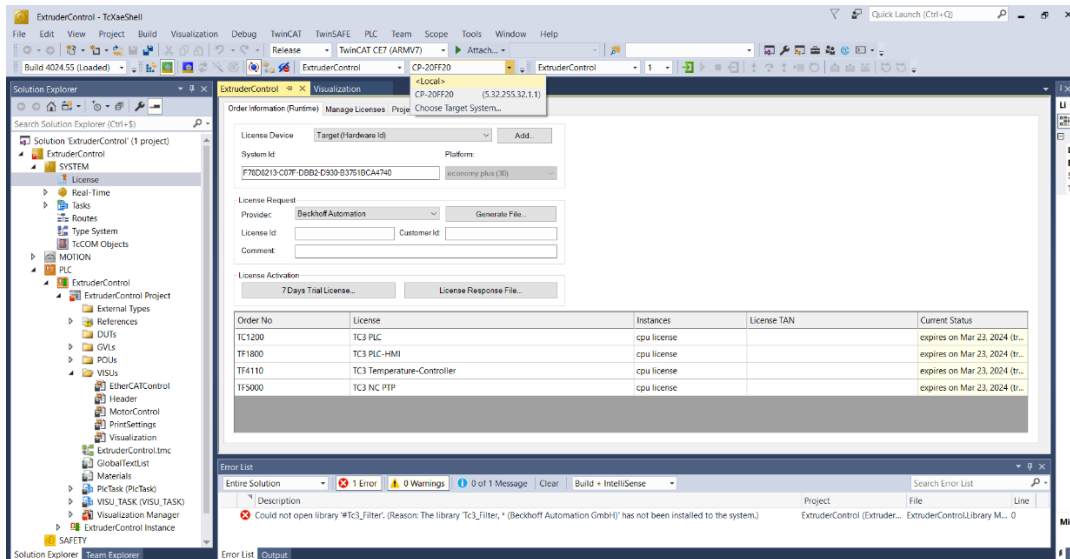
Om de ondersteuningsbalk te kunnen plaatsen, moet men handmatig in de +Z richting transleren. Na het plaatsen van de balk zal men met een langzame snelheid in de -Z richting zakken en tegelijkertijd houtenbalk bewegen totdat het stevig klemt. Om beschadiging van het lakwerk te voorkomen, wordt er een handschoen tussen het hout en joint A4 geplaatst. Als extra veiligheidsmaatregel zal de robot worden vastgezet met spanbanden (Zie figuur 148).



Figuur 147: Definitieve transport positie

6.13. Beckhoff PLC

In de bechhoff PLC zijn een aantal aanpassingen gedaan. Zo wordt de actuele TCP-snelheid van de robot overgenomen en deze wordt in een formule gezet die de RPM van de schroef bepaald aan de hand van de gewenste breedte en hoogte van de laag. Ook zijn de gegevens van de stappenmotor aangepast omdat deze verkeerd stonden.



Figuur 148: Voorbeeld Beckhoff interface

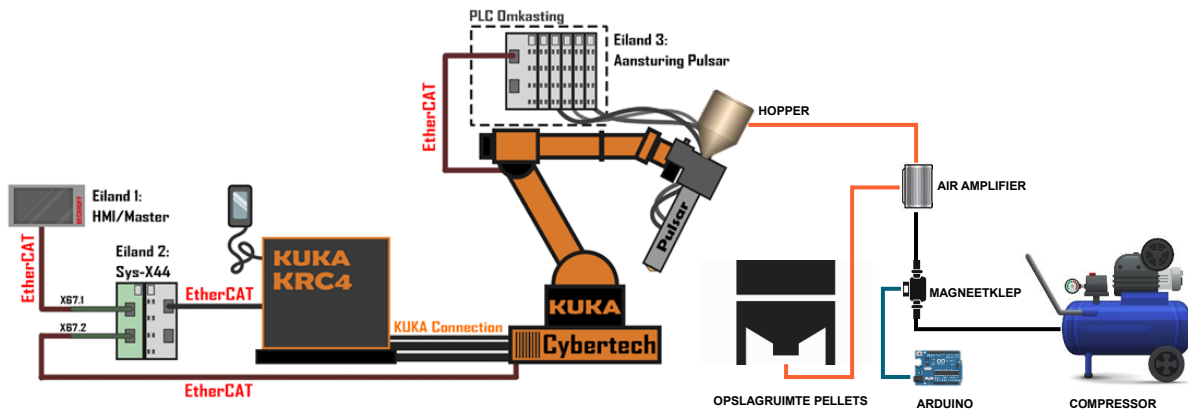
$$RPM = \frac{-1,4719 + \sqrt{1,4719^2 - 4 \times -0,0246 \times - \left(V_s \times 60 \left(\left((B - H) \times H \right) + \left(\pi \times \left(\frac{H}{2} \right)^2 \right) \right) \div 1000 \right)}}{2 \times -0,0246}$$

Rpm = toeren per minuut
B = laag breedte

H = laag hoogte
Vs = voortloopsnelheid

7. Optimaal proces

Dit hoofdstuk richt zich op de procesoptimalisatie van AMobile. De oorspronkelijke staat van AMobile is geanalyseerd, en noodzakelijke aanpassingen zijn geïdentificeerd en geïmplementeerd om het proces te verbeteren. Het uiteindelijke doel was om de prestaties, betrouwbaarheid en efficiëntie van de 3D-printopstelling te verhogen.



Figuur 149: Visualisatie opstelling einde Bachelor proef

Handmatig

Enmalig uitvoeren

Automatisch

7.1. 3D model

Voor het modelleren van een object voor FGF-printen zijn verschillende richtlijnen en beperkingen van toepassing. Om dit proces te vereenvoudigen, heeft men een handleiding opgesteld met alle benodigde informatie. Deze handleiding 'Guide ontwerp & materiaal' bevat uitgebreide instructies en kan worden gevonden in de bijlage.

3D-model

7.2. Programmatie

Voor het programmeren van gereedschapspaden wordt de CAM-omgeving van Siemens NX 2312 gebruikt, die technologie voor multi-axis depositie aanbiedt. Hiervoor is een uitgebreide handleiding opgesteld, gebaseerd op verschillende bewerkingen die geschikt zijn voor FGF-toepassingen binnen Siemens NX, inclusief een NX Open programma om de laagtijd in te stellen. De handleiding 'Siemens NX' kan worden gevonden in de bijlage.

Programmatie

7.3. Printparameters

Om de voortloopsnelheid te bepalen, maakt men gebruik van software genaamd T4F3, die de afkoeling voorspelt. Voor meer uitleg over deze software, zie het hoofdstuk over 'onderzoek'.

Printparameters

Daarnaast is er een adaptieve outputformule ontwikkeld om de extrusiesnelheid te bepalen. Meer informatie hierover is te vinden in het hoofdstuk 'onderzoek'.

7.4. Robotic rules

Door het toepassen van 'robotic rules' in Siemens NX2312 wordt de assenoriëntatie, posities van de robot en de extruder gedefinieerd voor een correcte werking. Deze stap wordt uitgevoerd nadat de programmering is voltooid. Verdere details hierover zijn te vinden in de handleiding '*Siemens NX*' in de bijlage.

Robotic rules



7.5. Virtual machine

Als eindcontrole wordt een robot simulatie uitgevoerd in Siemens NX 2312 om te verifiëren of alle gereedschapspaden en bewegingen correct worden uitgevoerd. Dit stelt ons in staat om de toolbanen te controleren voordat het programma daadwerkelijk op de KUKA-robot wordt uitgevoerd. Verdere details hierover zijn te vinden in de handleiding '*Siemens NX*' in de bijlage.

Virtual machine



7.6. Post processor

Nadat de robot simulatie grondig is geëvalueerd, kunnen de gereedschapsbanen worden omgezet naar KUKA-machinetaal die door de robotbesturing kan worden gelezen en uitgevoerd.

Post processor



7.7. KUKA KR20

Voor het besturen van de KUKA-robot wordt het besturingssysteem operationeel gemaakt. Door gebruik te maken van het smartPAD-2 kan men de robot bedienen. Uitgebreide informatie hierover is te vinden in de handleiding '*BCW Trailer & KUKA*', deze kan worden gevonden in de bijlage.

KUKA KR20



7.8. Beckhoff licentie

De licentie van Beckhoff moet elke zeven dagen worden verlengd om de HMI van Beckhoff te kunnen gebruiken voor het instellen van de benodigde parameters. Meer informatie hierover is te vinden in gedetailleerde gebruiksinstructies in de handleiding '*BCW trailer & KUKA*', deze kan worden gevonden in de bijlage.

Beckhoff licentie



7.9. Kalibratie

Om te voorkomen dat de bewegingen van de robotarm onnauwkeurig worden uitgevoerd, wordt de robot afgesteld. Deze afstelling wordt alleen uitgevoerd wanneer de robot zijn positie verliest of als de TCP afwijkt. Meer informatie over gebruiksinstructies in de handleiding '*BCW trailer & KUKA*', deze kan worden gevonden in de bijlage.

Kalibratie



7.10. TCP & BASE

Om te kunnen printen, is het noodzakelijk om het 'TCP' en de 'BASE' te definiëren. Dit gebeurt één keer om ervoor te zorgen dat de robotbewegingen nauwkeurig worden benaderd. Indien nodig kan dit proces worden herhaald. Verdere details hierover zijn te vinden in de handleiding 'BCW trailer & KUKA' in de bijlage.



7.11. Materiaal aanvoer

Voor het printen wordt het pellet materiaal handmatig toegevoegd aan de opslagruimte, waarna het via een automatische pellet aanvoer naar de extruder wordt getransporteerd. De pellet aanvoer wordt geactiveerd wanneer de capacatieve sensor geen materiaal detecteert, de frequentie hiervan is afhankelijk van de extrusiesnelheid. Uitgebreide informatie over de opbouw van 'Automatische pellet aanvoer' is te vinden in het hoofdstuk 'Onderzoek'.



7.12. Temperatuur zones

Voor het instellen van de temperatuur zijn er verschillende pre-sets aangemaakt voor diverse materialen. Hierdoor hoeft men enkel het juiste materiaal te selecteren op de Beckhoff HMI, waarna de temperaturen automatisch worden ingesteld. Verdere details hierover zijn te vinden in de handleiding 'BCW trailer & KUKA' in de bijlage.



7.13. Extrusie schroef

Dankzij aanpassingen aan de Beckhoff HMI-interface hoeft men enkel de laaghoogte en laagbreedte in te geven waarna de adaptieve outputformule de extrusie regelt aan de hand van de voortloopsnelheid. Meer informatie hierover is te vinden in het hoofdstuk 'Onderzoek' en in de handleiding 'BCW trailer & KUKA' in de bijlage.



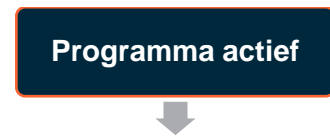
7.14. Programma importeren

Om het programma te kunnen gebruiken, importeert men het postproces bestand op SmartPAD-2. Vervolgens kan men het programma gebruiken. Meer informatie hierover is te vinden in de handleiding 'BCW trailer & KUKA' in de bijlage.



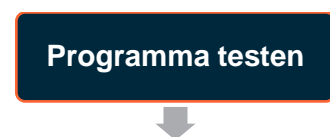
7.15. Programma actief

Om het programma uit te voeren, moet het programma worden geselecteerd op de SmartPAD-2. Uitgebreide instructies hierover zijn te vinden in de handleiding 'BCW trailer & KUKA' in de bijlage.



7.16. Programma testen

Tijdens het testen van het programma wordt gecontroleerd of de gereedschapsbanen overeenkomen met de robot simulatie en de hechting op het printoppervlak correct verloopt. Uitgebreide instructies hierover zijn te vinden in de handleiding 'BCW trailer & KUKA' in de bijlage.



7.17. Materiaal purge

Voordat men definitief kan beginnen met printen, voert men een materiaalpurge uit om een constante materiaalstroom te verkrijgen en eventuele onzuiverheden weg te werken. Uitgebreide instructies hierover zijn te vinden in de handleiding '*BCW trailer & KUKA*' in de bijlage.

Materiaal purge



7.18. Programma starten

Nadat het programma is geselecteerd en de schroefsnelheid is ingesteld, selecteert men de automatische modus en start men het programma. Dankzij de geïmplementeerde commando's in het programma wordt de extruder automatisch geactiveerd en gedeactiveerd. Gedetailleerde instructies hierover zijn te vinden in de handleiding '*BCW trailer & KUKA*' in de bijlage.

Programma starten



7.19. Printen & controle

Tijdens het printen voert men visuele controles uit op zowel het object als de extruder. Indien er een tekort aan pellets in de opslagruimte is, dient men deze bij te vullen.

Materiaal purge


8. Resultaten

Gedurende onze bachelorproef zijn er verschillende cases geprint om de mogelijkheden van LSAM te demonstreren.

8.1. Cases

Tijdens de opendeurdag en de FTI aan Thomas More werden diverse meubels ontworpen en geprint om de mogelijkheden van de FGF-techniek te demonstreren aan de bezoekers. Deze techniek en innovatieve vorm van 3D-printen, werd toegepast in verschillende cases. Het doel was om de veelzijdigheid en de potentie van FGF-technologie in meubelontwerp en productie te illustreren. De getoonde meubels varieerden in complexiteit en ontwerp, wat de bezoekers een breed inzicht gaf in de toepassingen en voordelen van deze geavanceerde productiemethode.

Case 1	
Naam	Koffietafel
Nozzle	Ø3 mm
Oppervlak	Schilders tape
Printtijd	4u 30min
Materiaal	LW-PLA
Massa	6,75 kg
Datum geprint	9-3-2024
Prijs	€ 106,75



Tabel 10: Case 1 - koffietafel

Case 2	
Naam	Kast
Nozzle	Ø3 mm
Oppervlak	Schilders tape
Printtijd	3u 57min
Materiaal	LW-PLA
Massa	4,9 kg
Datum geprint	17-3-2024
Prijs	€ 77,49




Tabel 11: Case 2 - Kast

Case 3	
Naam	Lamp
Nozzle	Ø3 mm
Oppervlak	Glas
Printtijd	7u 35min
Materiaal	PETG
Massa	4,5 kg
Datum geprint	18-4-2024
Prijs	€ 26,55



Tabel 12: Case 3 – Lamp

Case 4	
Naam	Bloempot
Nozzle	Ø3 mm
Oppervlak	Osb
Printtijd	4u 5min
Materiaal	rPLA
Massa	4 kg
Datum geprint	20-04-2024
Prijs	€ 24,80



Tabel 13: Case 4 - bloempot

9. Veiligheidsanalyse

In overleg met onze bedrijfspromotor is besloten de veiligheidsanalyse in het addendum op te nemen.

10. Aanbevolen verbeteringen

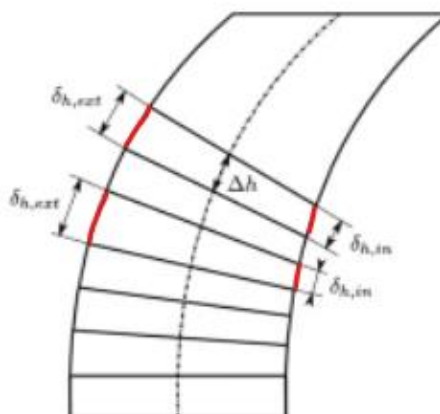
Omdat er voortdurend aan AMobile wordt gewerkt, zijn er enkele punten van verbetering geïdentificeerd die aangepakt kunnen worden.

10.1. T4F3

Om het proces te optimaliseren, is er een voorstel gedaan aan de PhD studenten van de KU Leuven om de gewenste interpas temperatuur in te voeren, zodat de software automatisch de voortloopsnelheid kan bepalen. Er is overlegd met de PhD studenten waarin duidelijk is gemaakt dat het waardevol zou zijn als de software specifiek wordt aangepast voor LSAM, met een module die dit mogelijk maakt. Ze hebben toegezegd om deze functionaliteit verder te ontwikkelen wanneer ze tijd hebben.

10.2. Actuele tussenafstand

Door de werkelijke tussenafstand van twee opeenvolgende lagen door te geven aan Beckhoff, kan de extrusie automatisch aangepast worden tijdens het printen van gebogen vormen waarbij de buitenste lagen verder uit elkaar liggen dan de binnenste lagen. Zoals te zien is in figuur 149, wordt de werkelijke tussenafstand in het rood weergegeven die verschilt bij het printen van een gebogen buis. Als de extrusie niet wordt aangepast, zouden er bredere banen aan de binnenkant en smallere banen aan de buitenkant ontstaan.



Figuur 150: Tussenafstand

10.3. Constante laagtijd

Het programma dat we van een medewerker bij Siemens hebben ontvangen, werkt momenteel niet voor de coating-operatie in Siemens NX. Deze coating-operatie is noodzakelijk voor het printen van overhangende structuren. De contactpersoon die dit programma heeft ontwikkeld, heeft ons geïnformeerd dat hij in juli verder aan het programma zal werken, zodat het ook compatibel wordt met de coating-operatie.

10.4. Variërende breedte en hoogte

Voor de adaptieve outputformule moeten er breedte- en hoogtewaarden worden meegegeven. Als deze waarden tijdens een printproces aangepast worden door ze tijdens het programmeren aan te passen en ervoor zorgen dat deze breedte- en hoogtewaarden in het post-processed bestand worden opgenomen, kan er tijdens het printen op bepaalde plekken de breedte en/of hoogte aangepast worden.

10.5. Adaptieve voortloopsnelheid

Wat bijzonder interessant zou zijn, is als de T4F3-data voor het bepalen van de laagtijd geïntegreerd kan worden in de postprocessor. Dit zou betekenen dat wanneer je de breedte tijdens een print aanpast, de laagtijd ook automatisch wordt aangepast om een constante interpas temperatuur te behouden. Momenteel zou wanneer er tijdens een print de breedte wordt aangepast, vooraf de voortloopsnelheid moeten worden berekend met behulp van T4F3 om ervoor te zorgen dat de interpas temperatuur correct is.

10.6. Extruder 90 draaien

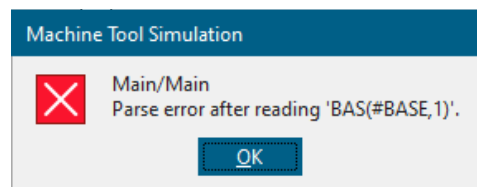
Door de aluminium flens aan te passen waarmee de extruder aan de robot bevestigd is, kan de extruder 90 graden draaien. Deze aanpassing zorgt voor meer bewegingsvrijheid, wat resulteert in een verbeterde materiaaltoevoer vooral wanneer de extruder onder een hoek staat

10.7. Beckhoff licentie

Door de Beckhoff-licentie aan te schaffen, is er geen noodzaak voor de wekelijkse licentievernieuwing.

10.8. Virtuele machine

Door de foutmeldingen die optreden tijdens het uitvoeren van een simulatie in de 'Machine Code Based Simulation' te elimineren, kunnen de geprogrammeerde banen beter gecontroleerd en geverifieerd worden.



Figuur 151: Foutmelding siemens NX

Besluit

Er kan worden gesteld dat het onderzoek en de ontwikkeling van het AMobile-project aanzienlijke uitdagingen met zich meebrachten en veel inspanning vergden om de functionaliteit, efficiëntie en het gebruiksgemak te optimaliseren. De beginfase omvatte een grondige literatuurstudie naar de technologie, software en thermoplasten hierop volgde een praktisch onderzoek met verschillende materialen om optimale printparameters te bepalen. Ondanks deze inspanningen bleek het proces complex en veeleisend te zijn.

Een cruciaal onderdeel van het project was het gebruik van Siemens NX-software om het 3D-printproces te programmeren en te controleren. Siemens NX bleek echter niet de ideale software te zijn voor additieve manufacturing met robots. De software is niet specifiek ontworpen voor dit doel, wat leidde tot de noodzaak om met verschillende bewerkingsmethoden te experimenteren om de meest geschikte aanpak te vinden. De behoefte aan een continue gereedschapsban werd als cruciaal geïdentificeerd voor grootschalig printen, maar de beperkingen van Siemens NX maakten het uitdagend om de gewenste resultaten te bereiken.

Hoewel in deze bachelorproef aanzienlijke vooruitgang is geboekt in het optimaliseren van AMobile en waardevolle inzichten zijn gedaan in grootschalig 3D-printen, is er nog altijd ruimte voor verbetering. Toekomstige ontwikkelingen zouden zich moeten richten op de integratie van meer geschikte software en het integreren van de besturingssystemen om de mogelijkheden en het gebruiksgemak van AMobile verder te verbeteren, zodat het een effectief hulpmiddel blijft voor bedrijven en onderwijsinstellingen die zich wagen aan grootschalig 3D-printen.

Bibliografie

- Adaxis. (sd). *Software*. Opgehaald van <https://adaxis.eu/software/>
- Additivemanufacturing.media. (2023, Apr 13). *3D Printing with Plastic Pellets – What You Need to Know*. Opgehaald van <https://www.additivemanufacturing.media/articles/3d-printing-with-plastic-pellets-what-you-need-to-know>
- Ai-build. (sd). *Additive manufacturing software*. Opgehaald van <https://ai-build.com/>
- Anderson, T. (2016, Dec 21). *Choosing the Best 3D Printing Bed Surface*. Opgehaald van Matterhackers: <https://www.matterhackers.com/news/choosing-the-right-3d-print-bed-surface>
- Aon3D. (2022, Feb 10). *Shrinkage, Residual Stress and Poor Layer Welding in 3D Printing*. Opgehaald van Aon3d: <https://www.aon3d.com/material-science/shrinkage-residual-stress-and-poor-layer-welding-in-3d-printing/#:~:text=How%20to%20reduce%20warping%2C%20residual,decrease%20warping%20and%20residual%20stress.>
- CEAD. (2020, Apr 16). *What pellet extruder output is needed for your application?* Opgehaald van robotextruder: <https://robotextruder.com/3d-printing/what-pellet-extruder-output-do-you-need-for-your-application/>
- Cead. (2021, Dec 14). *SIEMENS NX CAM AND THE CEAD AM FLEXBOT*. Opgehaald van <https://ceadgroup.com/siemens-nx-cam-am-flexbot/>
- CEAD. (2023, May 31). *OPTIMIZING MATERIAL SELECTION FOR LARGE SCALE 3D PRINTING: A STEP-BY-STEP APPROACH*. Opgehaald van CEAD: <https://ceadgroup.com/optimizing-material-selection-for-large-scale-3d-printing/>
- Cead. (2024, Jan 29). *3D PRINTING WITH PELLET EXTRUDERS VERSUS WITH FILAMENT*. Opgehaald van Cead: <https://ceadgroup.com/3d-printing-with-pellet-extruders-versus-with-filament/>
- Cead. (2024, Mar 5). *CEAD AND ADAXIS INTEGRATION REDEFINES EFFICIENCY IN ROBOTIC LARGE FORMAT 3D PRINTING*. Opgehaald van <https://ceadgroup.com/cead-and-adaxis-integration-redefines-efficiency-in-robotic-large-format-3d-printing/>
- CEAD. (sd). *How do I choose the right nozzle size for large format 3D printing?* Opgehaald van knowledge.ceadgroup: <https://knowledge.ceadgroup.com/how-do-i-choose-the-right-nozzle-size-for-large-format-3d-printing>
- CEAD. (sd). *THE BENEFITS AND WEAKNESSES OF 3 COMMONLY USED THERMOPLASTIC MATERIALS FOR LARGE SCALE 3D PRINTING*. Opgehaald van CEAD: <https://ceadgroup.com/the-benefits-and-weaknesses-of-3-commonly-used-thermoplastic-materials-for-large-scale-3d-printing/>
- CKN. (2023, Feb). *Thermal phase transitions of polymers - A102*. Opgehaald van Compositeskn: <https://compositeskn.org/KPC/A102>

- components, E. (2023, Jan 30). *A comparison: Amorphous vs crystalline polymers*. Opgehaald van Essentra components: <https://www.essentracomponents.com/en-gb/news/manufacturing/injection-moulding/the-difference-between-amorphous-and-semi-crystalline-plastics>
- Corrosionpedia. (2023, Dec 15). *Glass Transition Temperature (T_g)*. Opgehaald van corrosionpedia: <https://www.corrosionpedia.com/definition/593/glass-transition-temperature-tg>
- Daems, K. (2021-2022). *LARGE SCALE ROBOTIC PRINTING*.
- design, D. (2018, Jul 10). *3D Printer Print Speed Calculation: How to find the optimal speed for reliable and constant print quality*. Opgehaald van dyzedesign: <https://dyzedesign.com/2018/07/3d-print-speed-calculation-find-optimal-speed/>
- Design, D. (2024, Jan 5). *Automatic Pellet Feeding System*. Opgehaald van Dyze design: <https://docs.dyzedesign.com/pellet-feeding-system.html#updating-the-pfs-controller-s-firmware>
- Dyze Design. (sd). *Pulsar™ Large-Scale Pellet Extruder*. Opgehaald van <https://dyzedesign.com/pulsar-pellet-extruder/>
- Dyze Desing docs. (sd). *Pulsar™ Pellet Extruder*. Opgehaald van <https://docs.dyzedesign.com/pulsar.html#what-s-in-the-box>
- Evo 3D. (sd). *Ai build*. Opgehaald van Evo 3D: <https://evo3d.co.uk/pages/ai-build>
- Frankland, J. (2013, Jan 9). *Understanding Viscosity in Extrusion*. Opgehaald van Plastics Technology: <https://www.ptonline.com/articles/understanding-viscosity-in-extrusion>
- Hodgson, G. (sd). *Flow math*. Opgehaald van manual.slic3r: <https://manual.slic3r.org/advanced/flow-math>
- Ile Kauppila. (2024, Feb 22). *Robotic Arm 3D Printing – The Ultimate Guide*. Opgehaald van All3DP: <https://all3dp.com/1/robotic-arm-3d-printing-platforms-software/#adaxis>
- Ile Kauppila. (2024, Mar 6). *The Best Pellet 3D Printers in 2024*. Opgehaald van All3DP: <https://all3dp.com/1/cheaper-3d-printing-with-pellets/>
- Int J Adv Manuf Technol. (2021). *Screw-assisted 3D printing with granulated materials: a systematic review*. Opgehaald van <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8169388/>
- Jasonxue. (2023, Dec 5). *How to Optimize Your 3D Printing with Pellet Extruder Technology*. Opgehaald van jieyatwinscrew: <https://jieyatwinscrew.com/blog/how-to-optimize-your-3d-printing-with-pellet-extruder-technology/>
- Keane, P. (2021, Aug 24). *A Closer Look at AI Build*. Opgehaald van 3dprinting: <https://3dprinting.com/news/a-closer-look-at-ai-build/>
- MCP. (2021, July). *Amorphous vs. Crystalline Polymers*. Opgehaald van Mallard creek polymers: <https://www.mcpolymers.com/library/amorphous-vs-crystalline-polymers>
- Michielsen, T. (2021-2022). *AANSTURING 3D-PRINTKOP OP KUKA ROBOTARM*.

- Nuyts, W. (2019-2020). *LARGE SCALE WAAM VAN STRUCTURELE*.
- O'Connell, J. (2021, Jan 31). *Non-Planar 3D Printing: All You Need to Know*. Opgehaald van ALL3DP: <https://all3dp.com/2/non-planar-3d-printing-simply-explained/>
- O'Connell, J. (2024, Feb 14). *3D Print Layer Separation: 8 Tips to Avoid Delamination*. Opgehaald van ALL3DP: <https://all3dp.com/2/3d-print-delamination-tips-tricks-to-avoid-layer-separation/>
- O'Connell, J. (2024, Apr 20). *Glass Transition Temperatures of PLA, PETG & ABS*. Opgehaald van ALL3DP: <https://all3dp.com/2/pla-petg-glass-transition-temperature-3d-printing/>
- Ooms, J. (2011-2012). *Procesoptimalisatie van own-built 3D-printer*.
- pslc.ws. (2024). *The crux of crystallinity*. Opgehaald van pslc.ws: <https://pslc.ws/macrog/crystal.htm>
- Sel, K. (2018-2019). *AANSTUREN VAN ROBOTARM VANUIT CAM*.
- Siemens. (sd). *NX AM Multi-axis*. Opgehaald van <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/products/nx-am-multi-axis/>
- Team, S. (2023, Apr). *Getting into large-scale 3D printing*. Opgehaald van blog-spatial: <https://blog.spatial.com/large-scale-3d-printing>
- Temprado, D. (2023, Jul 12). *3D Printing With Foam – The Ultimate Guide*. Opgehaald van ALL3DP: <https://all3dp.com/1/foam-lightweight-filament-how-and-why-to-3d-print-with-it/>
- Thermwood. (sd). *Thermwood Announces Vertical Layer Printing*. Opgehaald van <https://info.thermwood.com/thermwood-announces-vertical-layer-printing-lp-0>
- Yousuf Pasha Shaik, J. S. (2021, Aug). *A Scientific Review on Various Pellet Extruders Used in 3D Printing FDM Processes*. Opgehaald van <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=110955>

Bijlagen

A. Materiaal offertes:

CONFIDENTIAL



Mitsubishi Chemical Europe GmbH | Schiessstraße 47, 40549 Düsseldorf

Mitsubishi Chemical Europe GmbH
Schiessstraße 47
40549 Düsseldorf | Germany

Melanie RORATO
T +49 1727231394
Melanie.rorato@mcgc.com
www.mitsubishi-chemical.com

Date: 16.05.2024

RE: pellets materials offer

Dear Joep and David,

Thank you very much for your request and the interest in our product portfolio.

We herewith submit our quotation, subject to MCE's general terms and conditions of sales. Please find below our quotation, provided that your orders will be binding on MCE only upon express acceptance by MCE order confirmation:

MATERIAL REFERENCE	Type	sampling till 200 kgs €/kg
rPETG TR NA	recycled	3,37
rpetg uv colors	recycled	7,73
rpetg g6 uv colors	recycled	7,26
rPETG G19 UV BU6/ GR1/ RD1/ OR1/ SI1	recycled	8,64
rPETG G30 LW GY2	recycled	8,40
rPETG G30 UV WH1	recycled	8,90
rPETG C15 LW BK=> RPETG C15 LW BK2	recycled	10,31
rPP G30 UV BK1	recycled	4,17
rPETG G20 FR NA	recycled	10,71
PLA TH NA	virgin	9,38
PC C20 LW BK	virgin	14,13
PC G30 LW NA	virgin	10,11
ABS C20 LW BK	virgin	12,56
ABS LW S NA	virgin	9,38
ASA LW NA	virgin	9,31
PLA W20 LW NA	biobased	11,90
PMMA 2400 TR NA	virgin	8,97

Mitsubishi Chemical Europe GmbH | Schiessstraße 47 | 40549 Düsseldorf | Germany | Telephone +49 (0)211 5205410 | Fax +49 (0)211 52054181
Geschäftsführer/Managing Director Kazunari Sasaki, Fahrettin Dogan | Registered in Düsseldorf, Register No. HRB 71391 | Ust.Id.Nr. / VATIDNo.: DE 293154960
| SteuerNr. / TaxNumber: 103/5747/2810



ADVANCED MATERIALS GROUP

USA • UK • EUROPE • INDIA • CHINA

Airtech Europe Sarl
 18, Zone Industrielle Haneboesch
 L-4562 DIFFERDANGE
 Phone: +352 58 22 82 1
 VAT Reg No.: LU23575583
 CRN: B36184
 Banque et caisse d'Epargne de l'Etat (Luxembourg)
 USD ACC IBAN: LU400019009543226000
 EURO ACC IBAN: LU950019100007915000
 SWIFT: BCEELULL

SALES QUOTE
Sales Quote Number: SQ-039233 Sales Quote Date: Feb 9, 2024 Page: Page 1 of 1 <small>FORM AIRTECH 1</small>

Bill to: QUOTE_EU_EUR
 Thomas More University
 Ontwerp- & productietechnologie
 Jan de Nayerlaan 5
 Campus De Nayer
 2860 SINT-KATELJINE-WAVER
 Belgium

Ship to:
 Thomas More University
 Ontwerp- & productietechnologie
 Jan de Nayerlaan 5
 Campus De Nayer
 2860 SINT-KATELJINE-WAVER
 Belgium

Freight Terms: Ex Works
 Payment Terms: 30 days invoice date, TO BE APPROV

Quote By: Daniela Mauceri - quote@airtech.lu
 Requested By:
 Salesperson: Jean-Marie Lehen

Quote Valid Thru: May 9, 2024

Prices Including VAT: No

Ln.	Item No.	HS Code	Product Description	Unit	Quantity	Unit Price(EU)	Extended Price
10	3DPC250CF55 3D Print Technology	3907400090	DAHLTRAM C-250CF THERMOPLASTIC PELLET Mid T Lead times subject to change. Call for current lead times.	KG	25	34,44	861,00
QUANTITY QUOTED AVAILABLE AT TIME OF QUOTATION READY TO SHIP: 6-8 WORKING DAYS A.R.O. MOQ / MULTI: 25/25							
20	3DPT100GF55 3D Print Technology	3907400090	DAHLTRAM T-100GF THERMOPLASTIC PELLET Lo Lead times subject to change. Call for current lead times.	KG	25	8,39	209,75
QUANTITY QUOTED NOT AVAILABLE AT TIME OF QUOTATION READY TO SHIP: TO BE CONFIRMED MOQ / MULTI: 25/25							
30	3DPS150CF55 3D Print Technology	3903330000	DAHLTRAM S-150CF THERMOPLASTIC PELLET Low Lead times subject to change. Call for current lead times.	EA	25	28,88	721,50
QUANTITY QUOTED AVAILABLE AT TIME OF QUOTATION READY TO SHIP: 6-8 WORKING DAYS A.R.O. MOQ / MULTI: 25/25							

Total EUR 1 792,25

- The "ready to ship" date is an indicative lead time for having the material ready for pick up at Airtech's docks. Airtech cannot be held responsible for global transportation and supply issues.
 - Ready to ship times are subject to change based on material availability/order volumes
 - Prices are valid for Purchase Orders placed prior to the expiration date of the quote and for shipments prior to pricing validity dates.
 - For all Custom Product quotes: please call for current "ready to ship" times.
 - The Airtech Advanced Material Group endeavours to hold prices up to the expiration date indicated, however, prices will be subject to change due to unusual CPI level, cost, usage or other situations beyond our control.
- AIRTECH RESERVES THE RIGHT TO ADJUST PRICING AFTER A 14 DAY NOTICE DUE TO UNFORESEEN COST INCREASES.

NOTE: Publication or dissemination of all or part of the information contained in this quotation and/or future contracts developed from the information provided in this quotation may render the quotation and its associated contracts null and void.



XENIA Srl Unipersonale
Via Dante Alighieri 23/A
36065 Mussolente (VI) – Italy
Ph. +39 0424 878446
Info@xeniamaterials.com
www.xeniamaterials.com

C.F./P.IVA/REG.IMPR.02469600247
REA 233637/VI
Capitale Sociale €100.000,00 I.v.

Dear Sirs
Thomas More
Jan Pieter de Nayerlaan 5
2860 Sint-Katelijne-Waver ()

To the Kind Attention of:
Joep de Winkel
David Gatarek

Mussolente, 05/02/2024

OFFER

<u>Object:</u>	XEGREEN® 23-C20-3DP XECARB® 28-C20-3DP
<u>Our Offer no.:</u>	29 rev. 1 dated 05/02/2024
<u>Your request no.:</u>	e-mail dated 02/02/2024

Joep, David,
Following your request, we are sending you our best quotation of the materials below:

Description	Batch / Quantity [kg]	Cost (€/kg)
XEGREEN® 23-C20-3DP (PET-G-20%CF 3DP Modified)	25	14,20
	100	13,70
XECARB® 28-C20-3DP (ABS-20%CF 3DP Modified)	25	16,40
	100	15,90

Delivery terms & conditions: DAP 2860 Sint-Katelijne-Waver Belgium BE – Incoterms® 2021
Payment term: advanced bank transfer

Xenia S.r.l.'s General Conditions of Sale available at http://www.xeniamaterials.com/wp-content/uploads/2018/01/General-Conditions-of-Sale_281118.pdf shall be applied to all our supplies, any general conditions of purchase of the Client being excluded.

Xenia S.r.l.'s maximum liability for damages arising out of defects of Materials and/or Products is limited to an amount equal to the value of the defective Materials and/or Products.

We remain at your disposal for any clarification you may need, Kind Regards.

XENIA Srl
Alfio Agostini

Mod. CS030 rev. 5 del 11/12/12

B. Pellet aanvoer offerte:



PRINT. BETTER

Dyze Design
1505 Saint-Thomas Suite 100
Suite 100
Lemoyne QC J4P 3S2
Canada

Invoicing address:
Thomas More Mechelen-Antwerpen vzw, Financiële dienst
Campus De Nayer
Jan de Nayerlaan 5
2860 Sint-Katelijne-Waver
Belgium
Shipping address:
Thomas More Mechelen-Antwerpen vzw, Joep De winkel
Campus De Nayer
Jan de Nayerlaan 5
2860 Sint-Katelijne-Waver
Belgium

Thomas More Mechelen-Antwerpen vzw, Joep De winkel
Campus De Nayer
Jan de Nayerlaan 5
2860 Sint-Katelijne-Waver
Belgium
HST: BE0455411733

Quotation # SO3454

Quotation Date: 02/05/2024 15:01:02 Salesperson: Gabriel Paquin Payment Terms: CBS - Cash Before Shipment Expiration Date: 04/05/2024

DESCRIPTION	QUANTITY	UNIT PRICE	DISC.(%)	TAXES	AMOUNT
[DDK-01343] Pellets Feeding System	1.000 Unit(s)	1,650.00	15.00		1,402.50 CAS
[DDK-01394] Pellets Feeding hose (3/4" ID)	10.000 m	50.00	15.00		425.00 CAS
Shipping					
UPS Worldwide Expedited	1.000 Unit(s)	100.00	0.00		100.00 CAS
Subtotal					100.00 CAS

Subtotal	1,927.50 CAS
Subtotal Without Discount	2,250.00 CAS
Discount Subtotal	322.50 CAS
Total	1,927.50 CAS

*This quote has an educational discount.

Documentation :
<https://docs.dyzedesign.com/pellet-feeding-system.html#what-s-in-the-box>

Payment terms:
Payment for goods purchased from the company shall be made prior to shipping without exceptions. No goods will be delivered as long as payment hasn't been received.

Tel: +1 438-238-1400 Mail: info@dyzedesign.com Web: <http://www.dyzedesign.com>

GST 819049727RT0001 // PST 1222840593TQ0001

Page: 1 / 1

C. Material datasheet:



5700 Skylab Road
Huntington Beach
CA 92647 USA

Phone : +1 714-899-8100
Fax : +1 714-899-8179

E-mail : airtech@airtech.com
Website : www.airtech.com

PROCESSING DATA SHEET

DAHLTRAM® C-250CF

Medium temperature additive manufacturing

■ PROCESSING RECOMMENDATIONS

All processing parameters below are meant to act as guidance for Large Format Additive Manufacturing machines. Processing times and temperature may vary depending on the system that is processing them and may not be optimal. Consult an Airtech Additive Manufacturing Expert for additional guidance and recommendations when processing on your machine.

Physicals	Typical Value
Drying Temperature Inlet	245°F (118°C)
Drying Temperature Outlet (if applicable)	195°F (91°C)
Drying Time	5 hours minimum
Post Drying Setback Temperature Inlet*	195°F (91°C)
Post Drying Setback Temperature Outlet* (if applicable)	145°F (118°C)
Maximum Moisture Content	0.02 %
Extruder Zone 1 Temp	530°F (277°C)
Extruder Zone 2 Temp	550°F (288°C)
Extruder Zone 3 Temp	570°F (299°C)
Extruder Zone 4 Temp	600°F (316°C)
Extruder Zone 5 Temp	600°F (316°C)
Extruder Nozzle Temp	640°F (338°C)
Post Print Annealing Required	Optional

■ PROCESSING NOTES

- Drying time dependent on pre drying material condition and drying time equipment. Airtech recommends testing moisture content prior to processing.
- Zone temperatures and substrate temperature may vary with equipment and processing conditions. Airtech recommends testing prior to use.
- * Setback temperatures are to maintain dryness without exposing materials to multiple heat cycles. This is typically used after printing if same material will be printed again within approximately one week.

Last updated : 2022-04-19

Catalog position : **Print-Tech®**

As the conditions or methods of use, including storage, are beyond our control, Airtech International, Inc. does not assume any responsibility for the performance of its material for any particular use. The material is sold "as is". Airtech International, Inc. disclaims, and buyer waives, any and all implied warranties, including without limitation the implied warranties of merchantability and of fitness for particular use. The information contained herein represents typical properties and should not be used for specification purposes. Any translation is provided for your convenience only. The official language is English and the official law is California, USA.

PROCESSING DATA SHEET

DAHLTRAM® S-150CF

Low temperature additive manufacturing

■ PROCESSING RECOMMENDATIONS

All processing parameters below are meant to act as guidance for Large Format Additive Manufacturing machines. Processing times and temperature may vary depending on the system that is processing them and may not be optimal. Consult an Airtech Additive Manufacturing Expert for additional guidance and recommendations when processing on your machine.

Physicals	Typical Value
Drying Temperature Inlet	176°F (80°C)
Drying Temperature Outlet (if applicable)	156°F (69°C)
Drying Time	4 hours minimum
Post Drying Setback Temperature Inlet*	176°F (80°C)
Post Drying Setback Temperature Outlet* (if applicable)	156°F (69°C)
Maximum Moisture Content	0.05 %
Extruder Zone 1 Temp	440°F (227°C)
Extruder Zone 2 Temp	445°F (229°C)
Extruder Zone 3 Temp	460°F (238°C)
Extruder Zone 4 Temp	480°F (249°C)
Extruder Zone 5 Temp	480°F (249°C)
Extruder Nozzle Temp	490°F (254°C)
Post Print Annealing Required	Optional

■ PROCESSING NOTES

- Drying time dependent on pre drying material condition and drying time equipment. Airtech recommends testing moisture content prior to processing.
- Zone temperatures and substrate temperature may vary with equipment and processing conditions. Airtech recommends testing prior to use.
- * Setback temperatures are to maintain dryness without exposing materials to multiple heat cycles. This is typically used after printing if same material will be printed again within approximately one week.

Last updated : 2022-04-19

Catalog position : [Print-Tech*](#)

As the conditions or methods of use, including storage, are beyond our control, Airtech International, Inc. does not assume any responsibility for the performance of its material for any particular use. The material is sold "as is". Airtech International, Inc. disclaims, and hereby waives, any and all implied warranties, including without limitation the implied warranties of merchantability and of fitness for particular use. The information contained herein represents typical properties and should not be used for specification purposes. Any translation is provided for your convenience only. The official language is English and the official law is California, USA.

PROCESSING DATA SHEET

DAHLTRAM® T-100GF

Low temperature additive manufacturing

■ PROCESSING RECOMMENDATIONS

All processing parameters below are meant to act as guidance for Large Format Additive Manufacturing machines. Processing times and temperature may vary depending on the system that is processing them and may not be optimal. Consult an Airtech Additive Manufacturing Expert for additional guidance and recommendations when processing on your machine.

Physicals	Typical Value
Drying Temperature Inlet	65°C
Drying Temperature Outlet (if applicable)	65°C
Drying Time	4 hours minimum
Maximum Moisture Content	0,05 %
Extruder Zone 1 Temp	221°C
Extruder Zone 2 Temp	260°C
Extruder Zone 3 Temp	266°C
Extruder Zone 4 Temp	266°C
Extruder Zone 5 Temp	271°C
Extruder Nozzle Temp	277°C
Post Print Annealing Required	Optional

■ PROCESSING NOTES

- Drying time dependent on pre drying material condition and drying time equipment. Airtech recommends testing moisture content prior to processing.
- Zone temperatures and substrate temperature may vary with equipment and processing conditions. Airtech recommends testing prior to use.

Last updated : 2023-09-21

Catalogue position : **Print-Tech®**

As the conditions or methods of use, including storage, are beyond our control, Airtech Europe does not assume any responsibility for the performance of this material for any particular use. The material is sold "as is". Airtech Europe disclaims, and hereby waives, any and all implied warranties, including without limitation the implied warranties of merchantability and fitness for particular use. The information contained herein represents typical properties and should not be used for specification purposes. This translation is provided for your convenience only. The official language is English and the official law is Luxembourg.

FGF Light Wood

FGF Light Wood is a modified PLA based granule, that smells and feels like wood. Light Wood is easy to print at a low temperature.

Material features:

- Feels and smells like wood
- Easy to print at low temperature
- Very low warping

Colours:

Colours on request. Ask your accountmanager.



Packaging:

FGF Light Wood is available in 20kg bag

Processing recommendations

Drying	8hr,50°C*, <250ppm
Zone 1 Temperature	160±20 °C
Zone 2 Temperature	180±20 °C
Zone 3 Temperature	200±20 °C
Mass temperature	181 °C
Die temperature	205±20 °C

Material properties

Description	Testmethod	Typical value
Specific gravity	ISO 1183	1,2 g/cc
MFR 200°C/5 kg	ISO 1133	5 g/10min
Tensile Strength at Yield	ISO 527	37 Mpa
Tensile Strength at Break	ISO 527	37 Mpa
Elongation-Strain at Yield	ISO 527	2%
Elongation-Strain at Break	ISO 527	2%
Tensile modulus	ISO 527	4180 Mpa
Impact strength - Charpy notched 23°C	ISO 179	7 kJ/m2
Vicat softening temperature	ISO 306	N/A
Mold shrinkage	Internal method (ISO 294-4 based)	N/A

Additional info:

*As PLA materials crystallize, it is advised to either have an agitated dryer, or dry at a lower temperature for a longer period. This avoids that the pellets stick to each other during drying. Avoid prolonged residence time in the extruder, as this can degrade the resin in the fibres.

Storage: Cool and dry (15-25°C) and away from UV light. This enhances the shelf life significantly.

The values presented in this publication are based on MCPP's knowledge and experience and are intended for reference purposes only. While MCPP has made every reasonable effort to ensure the accuracy of the information in this publication, MCPP does not guarantee that it is error-free, nor does MCPP make any other representation, warranty or guarantee that the information is accurate, correct, reliable or current. MCPP reserves the right to make any adjustments to the information contained herein at any time without notice. MCPP expressly disclaims warranties of any kind regarding the information contained herein, including, but not limited to, any warranties of merchantability or fitness of a particular purpose, use or application. MCPP shall not be liable for any damage, injury or loss induced from the use of MCPP's products in any application. Each user should thoroughly review this publication before selecting a product and, in view of the many factors that may affect processing and application of the product, each user should carry out their own investigations and tests and determining the safety, suitability, technical suitability, proprietary rights, and disposal/ recycling practices of the materials for the intended application.

FGF Recycled CARBON-P

CARBON-P is our carbon fiber reinforced PET-G based filament. The result is a more than twice as stiff material as PET-G. CARBON-P is suitable for a very wide variety of applications besides the typically mentioned RC parts, drones, automotive and more.

Material features:

- Carbon fiber reinforced PET-G
- Extremely stiff
- Increased impact
- No warping and dimensionally stable
- Matt surface
- Abrasive (see * at additional info*)



Colours:

Colours on request. Ask your accountmanager.

Packaging:

FGF recycled Carbon-P is available in 20kg bag

Processing recommendations

Drying	6hr,70°C. <200ppm
Zone 1 Temperature	220±20 °C
Zone 2 Temperature	245±20 °C
Zone 3 Temperature	220±20 °C
Mass temperature	218 °C
Die temperature	220±20 °C

Material properties

Description	Testmethod	Typical value
Specific gravity	ISO 1183	1,31 g/cc
MFR 200°C/5 kg	ISO 1133	3,8 g/10min
Tensile Strength at Yield	ISO 527	101 Mpa
Tensile Strength at Break	ISO 527	100 Mpa
Elongation-Strain at Yield	ISO 527	2,7%
Elongation-Strain at Break	ISO 527	3,7%
Tensile modulus	ISO 527	9930 Mpa
Impact strength - Charpy notched 23°C	ISO 179	7 kJ/m2
Vicat softening temperature	ISO 306	75°C
Mold shrinkage	Internal method (ISO 294-4 based)	0,16%
Thermal expansion coefficient	ISO 11359	7,3*10 ⁻⁵ mm/mm°C

Additional info:

Due to virtually no warping of CARBON-P, this filament can also be printed without a heated bed. Please consider the use of a hardened steel nozzle and, if used, a gear pump, when printing with CARBON-P. The carbon fibers are abrasive and will result in fast wear of brass nozzles.

Storage: Cool and dry (15-25°C) and away from UV light. This enhances the shelf life significantly.

The values presented in this publication are based on MCPP's knowledge and experience and are intended for reference purposes only. While MCPP has made every reasonable effort to ensure the accuracy of the information in this publication, MCPP does not guarantee that it is error-free, nor does MCPP make any other representation, warranty or guarantee that the information is accurate, correct, reliable or current. MCPP reserves the right to make any adjustments to the information contained herein at any time without notice. MCPP expressly disclaims warranties of any kind regarding the information contained herein, including, but not limited to, any warranties of merchantability or fitness of a particular purpose, use or application. MCPP shall not be liable for any damage, injury or loss, including from the use of MCPP's products in any application. Each user should thoroughly review this publication before selecting a product and, in view of the many factors that may affect processing and application of the product, each user should carry out their own investigations and tests and determining the safety, health, technical suitability, proprietary rights, and disposal/ recycling practices of the materials for the intended application.*

FGF Recycled PET-G

FGF Recycled PET-G is a strong, high clarity, odor neutral material. These characteristics, together with the high impact strength, excellent flexibility and practically no shrinkage make PET-G an excellent material which combines the advantages of both PLA and ABS.

Material features:

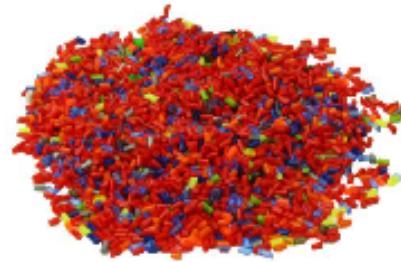
- High clarity
- Strong & Flexible
- Almost no "warping"
- Odor neutral printing

Colours:

Colours on request. Ask your accountmanager.

Packaging:

FGF recycled PET-G is available in 20kg bag



Processing recommendations

Drying	4hr,65°C*. <400ppm
Zone 1 Temperature	190±20 °C
Zone 2 Temperature	205±20 °C
Zone 3 Temperature	230±20 °C
Mass temperature	237 °C
Die temperature	250±20 °C

Material properties

Description	Testmethod	Typical value
Specific gravity	ISO 1183	1,27 g/cc
MFR 190°C/2,16 kg	ISO 1133	6,4 g/10min
Tensile Strength at Yield	ISO 527	50 Mpa
Elongation-Strain at Yield	ISO 527	5,9%
Elongation-Strain at Break	ISO 527	23%
Tensile modulus	ISO 527	2020 Mpa
Impact strength - Charpy notched 23°C	ISO 179	8,1 kJ/m2
Vicat softening temperature	ISO 306	72°C
Mold shrinkage	Internal method (ISO 294-4 based)	0,2-0,5%

Additional info:

*It is advised to either have an agitated dryer, or dry at a lower temperature for a longer period. This avoids that the pellets stick to each other during drying.

Storage: Cool and dry (15-25°C) and away from UV light. This enhances the shelf life significantly.

The values presented in this publication are based on MCPP's knowledge and experience and are intended for reference purposes only. While MCPP has made every reasonable effort to ensure the accuracy of the information in this publication, MCPP does not guarantee that it is error-free, nor does MCPP make any other representation, warranty or guarantee that the information is accurate, correct, reliable or current. MCPP reserves the right to make any adjustments to the information contained herein at any time without notice. MCPP expressly disclaims warranties of any kind regarding the information contained herein, including, but not limited to, any warranties of merchantability or fitness of a particular purpose, use or application. MCPP shall not be liable for any damages, injury or loss induced from the use of MCPP's products in any application. Each user should thoroughly review this publication before selecting a product and, in view of the many factors that may affect processing and application of the product, each user should carry out their own investigations and tests and determine the safety, lawfulness, technical suitability, proprietary rights, and disposal/recycling practices of the material for the intended application.

FGF Recycled PLA MATT

FGF Recycled PLA MATT is an easy to print variant on the everyday material PLA, with an aesthetical matt effect. Its surface diffuses light to give it a matt look and creates a rough feeling. PLA MATT is slightly abrasive, please consider using a hardened nozzle.

Material features:

- Matt effect, low light refraction
- Easy to print rough surface
- Reliable bed adhesion
- Improved printing speed compared to PLA

Colours:

Colours on request. Ask your accountmanager.

Packaging:

FGF recycled PLA MATT is available in 20kg bag



Processing recommendations

Drying	6hr, 50°C*, <250ppm
Zone 1 Temperature	180±20 °C
Zone 2 Temperature	190±20 °C
Zone 3 Temperature	200±20 °C
Mass temperature	209 °C
Die temperature	210±20 °C

Material properties

Description	Testmethod	Typical value
Specific gravity	ISO 1183	1,38 g/cc
MFR 200°C/5 kg	ISO 1133	32,3 g/10min
Tensile Strength at Yield	ISO 527	47 Mpa
Tensile Strength at Break	ISO 527	50 Mpa
Elongation-Strain at Yield	ISO 527	2,2%
Elongation-Strain at Break	ISO 527	1,8%
Tensile modulus	ISO 527	5750 Mpa
Impact strength - Charpy notched 23°C	ISO 179	1,9 kJ/m2
Vicat softening temperature	ISO 306	58°C
Mold shrinkage	Internal method (ISO 294-4 based)	0,09%

Additional info:

*As PLA materials crystallize, it is advised to either have an agitated dryer, or dry at a lower temperature for a longer period. This avoids that the pellets stick to each other during drying. Please consider the use of a hardened steel nozzle and, if used, a gear pump, when printing with PLA MATT. The matting agent is mildly abrasive and will result in faster wear of brass nozzles.

Storage: Cool and dry (15-25°C) and away from UV light. This enhances the shelf life significantly.

The values presented in this publication are based on MCPP's knowledge and experience and are intended for reference purposes only. While MCPP has made every reasonable effort to ensure the accuracy of the information in this publication, MCPP does not guarantee that it is error-free, nor does MCPP make any other representation, warranty or guarantee that the information is accurate, correct, reliable or current. MCPP reserves the right to make any adjustments to the information contained herein at any time without notice. MCPP expressly disclaims warranties of any kind regarding the information contained herein, including, but not limited to, any warranties of merchantability or fitness of a particular purpose, use or application. MCPP shall not be liable for any damages, injury or loss induced from the use of MCPP's products in any application. Each user should thoroughly review this publication before selecting a product and, in view of the many factors that may affect processing and application of the product, each user should carry out their own investigations and tests and determine the safety, lawfulness, technical suitability, proprietary rights, and disposal/recycling practices of the material for the intended application.

XECARB[®] 28-C20-3DP

20% carbon fiber reinforced ABS, 3D printing modified

Physical properties	Test condition	Standard	Unit	Dam / Cond.
Density		ISO 1183	g/cm ³	1,12
Water absorption (Equilibrium value)	23 °C ; 50 % RH		%	
Water absorption (Saturation value)	23°C ; H ₂ O		%	
Post-shrinkage				
parallel		Sim. ISO 294-4	%	
normal		Sim. ISO 294-4	%	

Mechanical properties – Injection molded

Tensile modulus	1 mm/min	ISO 527	MPa	14000
Tensile strength at break	5 mm/min	ISO 527	MPa	110
Tensile elongation at break	5 mm/min	ISO 527	%	1,2
Flexural modulus	2 mm/min	ISO 178	MPa	10000
Flexural strength	2 mm/min	ISO 178	MPa	140
Flexural stress at 3.5% strain	2 mm/min	ISO 178	MPa	
Flexural strain at break	2 mm/min	ISO 178	%	1,8
Notched Izod Impact strength	23 °C ; 50 % RH	ISO 180	kJ/m ²	6
Unnotched Izod Impact strength	23 °C ; 50 % RH	ISO 180	kJ/m ²	15

Mechanical properties – 3D printed

Tensile modulus				
Longitudinal	1 mm/min	ISO 527	MPa	12000
Transversal	1 mm/min	ISO 527	MPa	4000
Tensile strength at break				
Longitudinal	5 mm/min	ISO 527	MPa	90
Transversal	5 mm/min	ISO 527	MPa	30
Tensile elongation at break				
Longitudinal	5 mm/min	ISO 527	%	1,0
Transversal	5 mm/min	ISO 527	%	0,9
Flexural modulus				
Longitudinal	2 mm/min	ISO 178	MPa	9000
Transversal	2 mm/min	ISO 178	MPa	4000
Flexural strength				
Longitudinal	2 mm/min	ISO 178	MPa	140
Transversal	2 mm/min	ISO 178	MPa	50

Thermal properties

Melting point	10 °C/min	ISO 11357	°C	
HDT – heat deflection temperature	0,45 MPa a 120 °C/h	ISO 75	°C	
HDT – heat deflection temperature	1,80 MPa a 120 °C/h	ISO 75	°C	
HDT – heat deflection temperature	8.00 MPa a 120 °C/h	ISO 75	°C	

XEGREEN® 23-C20-3DP

20% carbon fiber reinforced PET-G, 100% recycled content, 3D printing modified



Physical properties	Test condition	Standard	Unit	Dam / Cond.
Density		ISO 1183	g/cm ³	1,35
Water absorption (Equilibrium value)	23 °C ; 50 % RH		%	
Water absorption (Saturation value)	23°C ; H ₂ O		%	
Post-shrinkage				
parallel		Sim. ISO 294-4	%	
normal		Sim. ISO 294-4	%	

Mechanical properties

Tensile modulus	1 mm/min	ISO 527	MPa	15000
Tensile strength at break	5 mm/min	ISO 527	MPa	140
Tensile elongation at break	5 mm/min	ISO 527	%	3,0
Flexural modulus	2 mm/min	ISO 178	MPa	13000
Flexural strength	2 mm/min	ISO 178	MPa	210
Flexural stress at 3.5% strain	2 mm/min	ISO 178	MPa	
Flexural strain at break	2 mm/min	ISO 178	%	2,7
Deflection at break			Mm	
Deflection at 3,5% strain			mm	
Notched Izod impact strength	23 °C ; 50 % RH	ISO 180	kJ/m ²	9
Unnotched Izod impact strength	23 °C ; 50 % RH	ISO 180	kJ/m ²	50
Notched Izod impact strength	-30 °C	ISO 180	kJ/m ²	
Unnotched Izod impact strength	-30 °C	ISO 180	kJ/m ²	

Thermal properties

Melting point	10 °C/min	ISO 11357	°C	
HDT – heat deflection temperature	0,45 MPa a 120 °C/h	ISO 75	°C	
HDT – heat deflection temperature	1,80 MPa a 120 °C/h	ISO 75	°C	
HDT – heat deflection temperature	8,00 MPa a 120 °C/h	ISO 75	°C	
VICAT – softening temperature	10 N a 120 °C/h	ISO 306	°C	
VICAT – softening temperature	50 N a 120 °C/h	ISO 306	°C	
Coefficient of linear thermal expansion				
30-50°C parallel			10 ⁻⁴ /K	
30-50°C normal			10 ⁻⁴ /K	
Maximum usage temperature				
short term			°C	
long term			°C	

Electrical properties

Volume resistivity			Ω·m	
Surface resistivity		ISTR 18L-A	Ω	



PROVISIONAL DATA SHEET
18/06/2020

Lot Q70004

LATER G AM NT:0048

Compound based on Glycol modified Copolyester (PETG). 3D printing version.

PHYSICAL PROPERTIES - Typical values	STANDARDS	SI UNITS	
Density			
material	ISO 1183	1.29	g/cm ³
MECHANICAL PROPERTIES - Typical values	STANDARDS	SI UNITS	
CHARPY impact strength (sample 80x10x4 mm)			
Unnotched, Injection moulding	ISO 179-1eU	NB	kJ/m ²
Notched, Injection moulding	ISO 179-1eA	2.7	kJ/m ²
Tensile elongation (speed 5 mm/min)			
At yield, Injection moulding	ISO 527-1	3.6	%
At break, Injection moulding	ISO 527-1	>100	%
Tensile strength (speed 5 mm/min)			
At yield, Injection moulding	ISO 527-1	50	MPa
At break, Injection moulding	ISO 527-1	NB	MPa
Elastic modulus			
Tensile (speed 1 mm/min), Injection moulding	ISO 527-1	2300	MPa
THERMAL PROPERTIES - Typical values	STANDARDS	SI UNITS	
VICAT - softening point			
50 N (heating rate 50°C/h), Injection moulding	ISO 306	75	°C
HDT - Heat Deflection Temperature			
0.45 MN/m ² , Injection moulding	ISO 75	70	°C
1.81 MN/m ² , Injection moulding	ISO 75	64	°C
SPECIMENS PRINTED UNDER THE FOLLOWING CONDITIONS			
Melt temperature (moulding process)		230	°C
Mould temperature (moulding process)		30	°C

NOTES

Data were obtained by a few lots of material and are subjected to variations. The above listed properties may be subjected to variations and therefore can not be adopted as specifications. In addition, the same properties may be influenced by several factors, like manufacturing techniques used and the size and the shape of the part. Therefore, the contents of this publication does not imply that all the produced parts will have the same properties as indicated in the data sheet itself. Customer should always check the property values on the produced parts. Customer should always make sure of having the most recent copy of the publication. Material properties are obtained by tests based on standards used for samples moulded by injection process. Material suitable for FFF purpose.

The material has not to be considered suitable for specific applications in medical sector. The material has not to be considered suitable for potable water and/or food contact. Material for industrial use only.



PROVISIONAL DATA SHEET
02/11/2022

LATIGEA B20 AM NAT.:0097

Product made of Bio-polymer resin from renewable sources. 3D printing version.

PHYSICAL PROPERTIES - Typical values	STANDARDS	SI UNITS	
Density			
material	ISO 1183	1.24	g/cm ³
MECHANICAL PROPERTIES - Typical values	STANDARDS	SI UNITS	
CHARPY impact strength (sample 80x10x4 mm)			
Notched, Injection moulding	ISO 179-1eA	4	kJ/m ²
Tensile elongation (speed 5 mm/min)			
At break, Injection moulding	ISO 527-1	2	%
Tensile strength (speed 5 mm/min)			
At break, Injection moulding	ISO 527-1	50	MPa
Elastic modulus			
Tensile (speed 1 mm/min), Injection moulding	ISO 527-1	3500	MPa
THERMAL PROPERTIES - Typical values	STANDARDS	SI UNITS	
HDT - Heat Deflection Temperature			
0.45 MN/m ² , Injection moulding	ISO 75	105	°C
FILAMENT EXTRUSION PARAMETERS	STANDARDS	SI UNITS	
Material drying (at least ...)		4 ore @ 100 °C	
Extrusion temperature		190 ÷ 210	°C
SPECIMENS PRINTED UNDER THE FOLLOWING CONDITIONS			
Nozzle temperature		190 ÷ 210	°C
Bed temperature		60	°C
Annealing conditions (per mm)		1 h @ 00°C	
Object resolution		0.15	mm
Shell thickness		0.6	mm
Print speed		40	mm/s
Infill		100	%

NOTES

Data were obtained by a few lots of material and are subjected to variations. The above listed properties may be subjected to variations and therefore can not be adopted as specifications. In addition, the same properties may be influenced by several factors, like manufacturing techniques used and the size and the shape of the part. Therefore, the contents of this publication does not imply that all the produced parts will have the same properties as indicated in the data sheet itself. Customer should always check the property values on the produced parts. Customer should always make sure of having the most recent copy of the publication. Material properties are obtained by tests based on same standards used for injection moulded samples. Material suitable for FFF purpose.

The material has not to be considered suitable for specific applications in medical sector. The material has not to be considered suitable for potable water and/or food contact. Material has to be stored and processed at low temperatures in order to prevent cracking and filament rupture. Material for industrial use only.



VOLG ONS

www.thomasmore.be
[fb.com/ThomasMoreBE](https://www.facebook.com/ThomasMoreBE)
[#WeAreMore](https://twitter.com/ThomasMoreBE)

**THOMAS
MORE**

**ADDENDUM:
OPTIMALISATIE MOBILE
3D-PRINTLAB**

AMobile

PBA Ontwerp- en Productietechnologie

**Door: David Gatarek & Joep de Winkel
Hogeschoolpromoter: Koen Geyskens
Bedrijfspromoter: Kevin Sel**

**Bachelorproef voorgedragen tot het behalen van de
graad en het diploma van professionele bachelor**

Campus De Nayer

Inhoudstafel

INHOUDSTAFEL	3
LIJST MET FIGUREN	4
LIJST MET TABELLEN	5
1. GUIDE	6
1.1. Materialen	6
1.2. Design	10
1.2.1. 3D-model	10
1.2.2. Infill	10
1.2.3. Overlap	11
1.2.4. Overhang	11
1.2.5. Scherpe hoeken	12
1.2.6. Laag geometrie	12
2. ONDERZOEK	13
2.1. Laaghechting	13
2.2. Siemens NX	16
2.2.1. Bodem programmeren	16
2.2.2. Multi planar printen	16
2.2.3. Traversal	17
2.2.4. Breedte & Hoogte	18
2.3. Extruder positie	19
2.4. Bouwvolume	21
2.5. Materiaal wissel	23
2.6. Output test	24
2.7. Easy HMI	25
2.7.1. Main	26
2.7.2. Temperature	27
2.7.3. Motor control	28
3. VEILIGHEIDSANALYSE	29
4. RESULTATEN	30
4.1. Cases	30
5. DANKWOORD	31
BIBLIOGRAFIE	32
BIJLAGEN	33

Lijst met figuren

Figuur 1: Thermoplasten piramide	9
Figuur 2: Voorbeeld van continue sketch	10
Figuur 3: Voorbeeld van surfaces model 1	10
Figuur 4: Voorbeeld van manuele infill sketch	10
Figuur 5: Voorbeeld van surface model 2	10
Figuur 6: Voorbeeld van baan overlap	11
Figuur 7: Visualisatie van Overhang hoek	11
Figuur 8: Siemens NX - design for additive manufacturing	11
Figuur 9: Scherpe hoeken	12
Figuur 10: Beam verhouding - a) 1:8, b) 1:4, c) 1:2	12
Figuur 11: IR lage interpas	13
Figuur 12: IR middel interpas	13
Figuur 13: IR hoge interpas	13
Figuur 14: Uitgesneden trekstaven - Lage interpas	13
Figuur 15: Spanning rek diagram voor lage interpas	14
Figuur 16: Spanning rek diagram voor middel interpas	14
Figuur 17: Spanning rek diagram voor hoge interpas	14
Figuur 18: Doorsnede van lage interpas sample	15
Figuur 19: Voorbeeld bloempot bodem	16
Figuur 20: Print oriëntaties	16
Figuur 21: Siemens NX - coating	17
Figuur 22: Postpro programma in notepad++	17
Figuur 23: ZA extruder rotatie J5 onder 45°	19
Figuur 24: Extruder rotatie J6 onder 45°	19
Figuur 25: Volle adapter	19
Figuur 26: Lightweight adapter	19
Figuur 27: Flens en adapter op J6	20
Figuur 28: Hopper design 1	20
Figuur 29: Hopper design 2	20
Figuur 30: Extruder onder 45° met hopper design 2	20
Figuur 31: ZA dynamic simulation van trace	21
Figuur 32: VA werkgebied robot 1	21
Figuur 33: Werkgebied robot 2	21
Figuur 34: Optimale printvolume	22
Figuur 35: Alternatieve printvolume	22
Figuur 36: Knop aan beckhoff HMI	23
Figuur 37: Kabels van capacitieve sensor	23
Figuur 38: Slang verbinding	23
Figuur 39: Reset knop arduino	23

Figuur 40: Output test opstelling ZigZag	24
Figuur 41: Output test excel opstelling	24
Figuur 42: Hoofdmenu & weergave	25
Figuur 43: Easy HMI tabbladen	25
Figuur 44: Uitgang 'kukaON' & 'Temperatuur control' laag	26
Figuur 45: Uitgang 'kukaON' & 'Temperatuur control' hoog	26
Figuur 46: Display temperature	27
Figuur 47: Display motor control	28

Lijst met tabellen

Tabel 1: Case 5 – Loper	30
Tabel 2: Case 6 - Opslagruimte pellets	30
Tabel 3: Case 7 - Toren	30

1. Guide

In dit hoofdstuk worden richtlijnen besproken voor materiaalkeuze en ontwerp. Deze richtlijnen zijn bedoeld om te ondersteunen bij het maken van keuzes tijdens het ontwerpen van complexe objecten.

1.1. Materialen

De selectie van materialen speelt een cruciale rol bij het bepalen van de functionele haalbaarheid en de eigenschappen waaraan een ontwerp moet voldoen. Om materialen effectief te kunnen vergelijken, is het noodzakelijk om eerst een aantal eigenschappen vast te stellen.

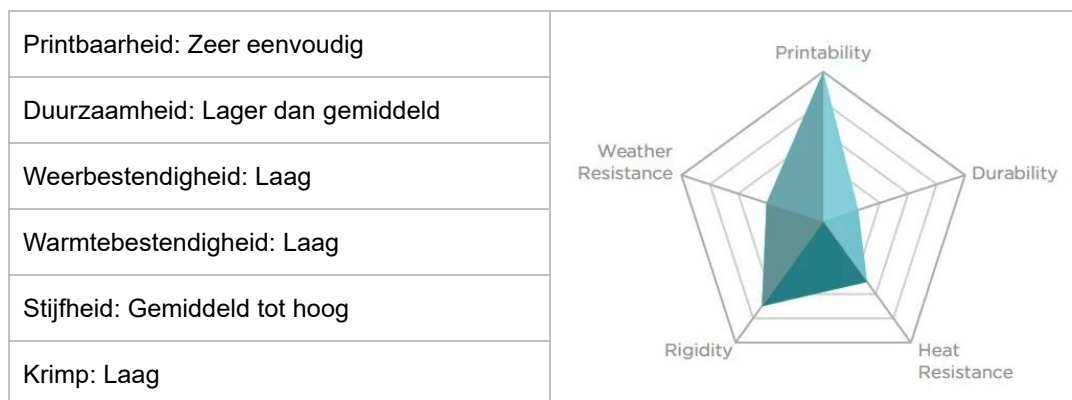
- **Printbaarheid:** dit verwijst naar hoe gemakkelijk en consistent een materiaal kan worden verwerkt en geprint met een 3D-printer zonder problemen
- **Duurzaamheid:** dit betreft de mate waarin een materiaal bestand is tegen slijtage, breuk en andere vormen van fysieke schade over een langere periode.
- **Weerbestendigheid:** dit geeft aan hoe goed een materiaal bestand is tegen omgevingsfactoren zoals Uv-straling, vocht, temperatuurwisselingen en andere weersomstandigheden.
- **Stijfheid:** dit beschrijft de mate van weerstand van een materiaal tegen buigen of vervormen onder belasting

Deze eigenschappen hebben een directe invloed op het toepassingsgebied van het materiaal.

Daarnaast is het van groot belang om materialen vooraf te drogen voor het printproces. Deze informatie wordt verstrekt in de datasheet door de producenten en is essentieel voor het waarborgen van de kwaliteit.

PLA:

PLA is ideaal voor ontwerpen met beperkte structurele eisen, zoals beginnersprojecten, decoratieve objecten en prototypen die geen hoge hitte- of slagvastheid vereisen.



PROS

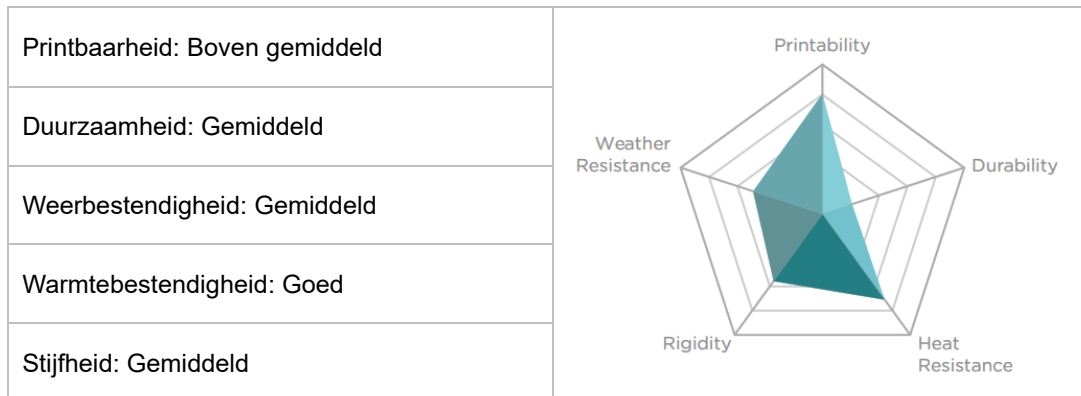
- Goedkoop
- Stijf en goede sterkte
- Maatnauwkeurigheid

CONS

- Lage hittebestendigheid
- Niet UV-bestendig
- Niet toegepast voor voeding en levensmiddelen.
- Absorptie vocht

PETG:

PETG is geschikt voor ontwerpen die duurzaamheid vereisen, zoals functionele onderdelen, onderdelen die buiten worden gebruikt of objecten die enige flexibiliteit en sterkte vereisen.



PROS

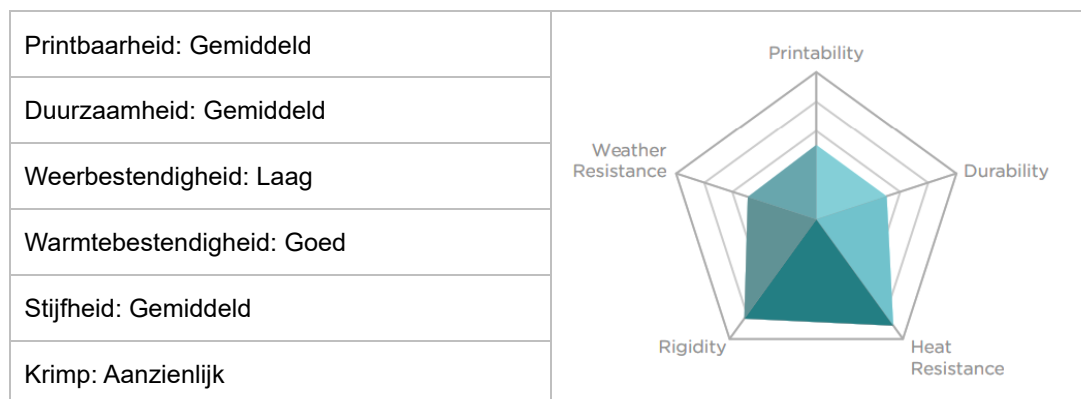
- Meestal geurloos bij printen
- Voeding veilig

CONS

- Absorptie vocht

ABS:

ABS wordt gebruikt voor projecten die stevigheid en hittebestendigheid vereisen, zoals Functionele prototypes, gereedschappen, en onderdelen.



PROS

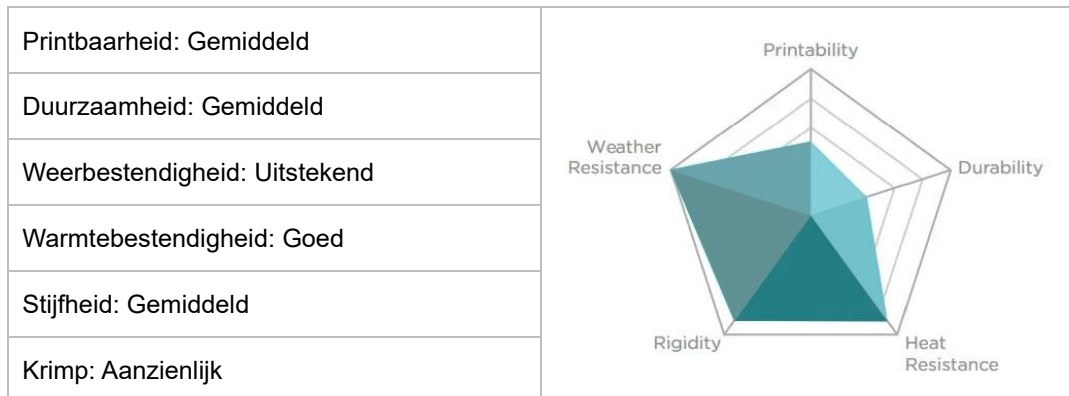
- Goedkoop
- Goede slag en slijtvastheid
- Goede hittebestendigheid

CONS

- Zwaar kromtrekking (warping)
- Verwarmd bed of verwarmde kamer nodig
- Geur
- Krimp

ASA:

ASA is ideaal voor ontwerpen die UV-bestendigheid en weerbestendigheid vereisen, zoals buitenprojecten, onderdelen voor auto's of tuinmeubelen en elk object dat blootgesteld wordt aan de buiten elementen.



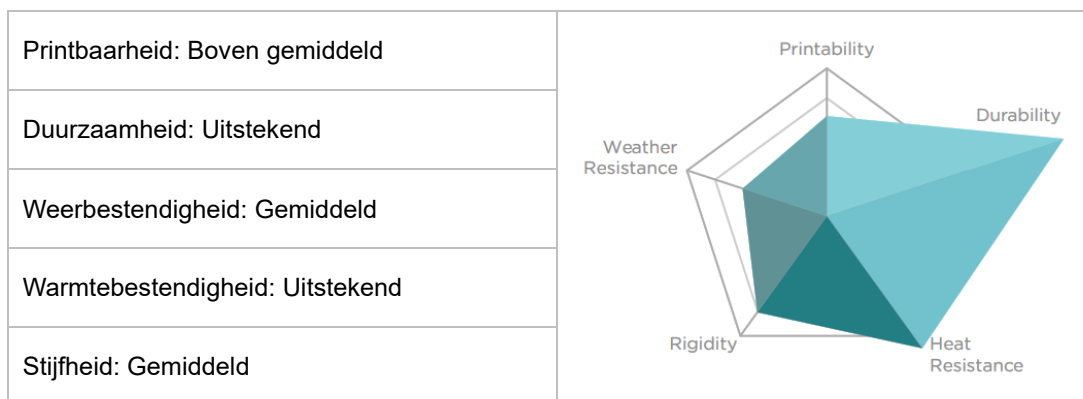
PROS

- Uv-bestendig
- Hoge slag en slijtvastheid
- Hoge glasovergangstemperatuur

CONS

- Duur

PC:



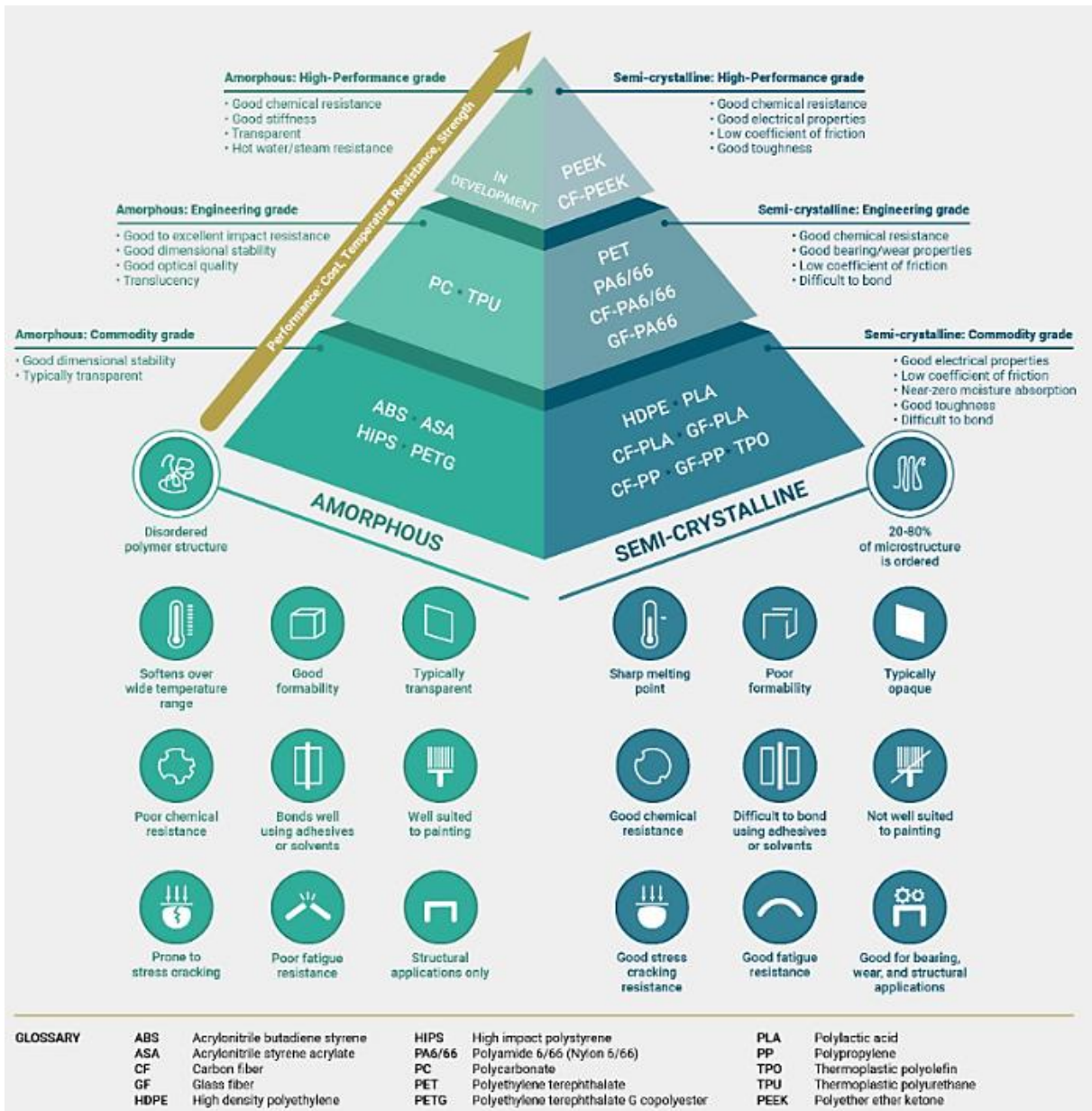
PROS

- Schokbestendig
- Hittebestendig

CONS

- Absorptie vocht

De samenstelling van een materiaal kan erg verschillend zijn van elkaar ondanks dat ze gekenmerkt zijn door dezelfde naam. Hierdoor kan het zijn dat de ene PLA soort beter verwerkbaar is dan de andere. Let hier dus goed voor op en gebruik materialen die gemaakt zijn voor het FGF-proces.



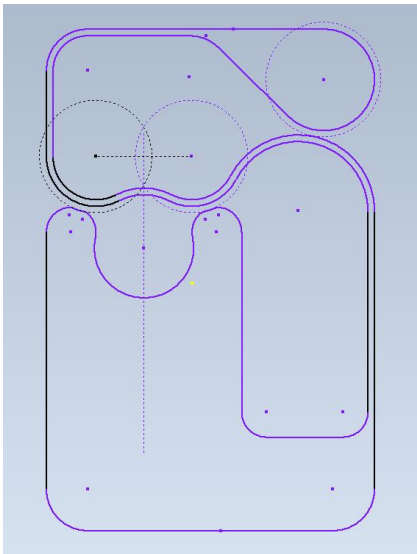
Figuur 1: Thermoplasten piramide

1.2. Design

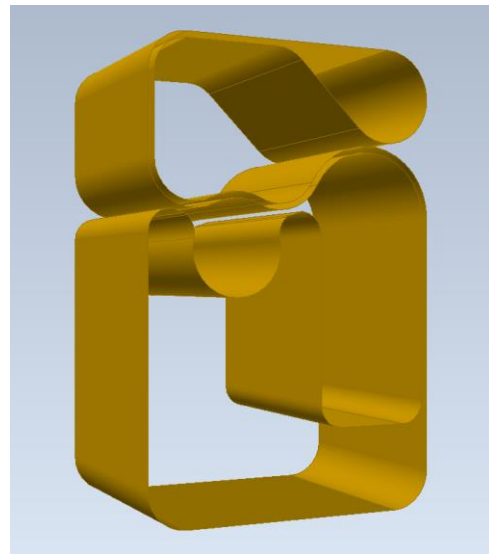
Om ervoor te zorgen dat een print van de eerste keer succesvol is, moet er rekening gehouden worden met een aantal regels en de beperkingen van het FGF-proces.

1.2.1. 3D-model

Omdat start en stop punten bij het printen op grote schaal erg opvallend zijn wordt er meestal gewerkt met een continue vorm. Bij het modelleren van een 3D model moet er dus rekening gehouden worden dat de vorm gesloten is. Modelleren wordt gedaan aan de hand van surfaces om zo het programmeren en eventuele aanpassingen die gedaan moeten worden te vergemakkelijken.



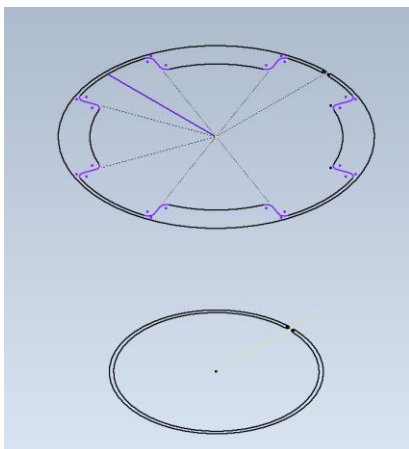
Figuur 2: Voorbeeld van continue sketch



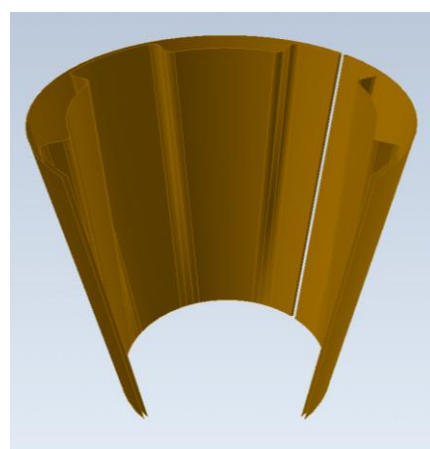
Figuur 3: Voorbeeld van surfaces model 1

1.2.2. Infill

Bij het printen op grote schaal wordt geen infill gebruikt zoals bij desktop FDM-printers. Echter kunnen er wel versteviging structuren worden aangebracht zoals ribben. Hierbij moet er ook rekening gehouden worden dat de vorm continue blijft. Momenteel worden verstevigingen vooral manueel aangebracht maar er zijn ook al softwareprogramma's waarbij dit automatisch gegenereerd kan worden zoals ADAONE.



Figuur 4: Voorbeeld van manuele infill sketch



Figuur 5: Voorbeeld van surface model 2

1.2.3. Overlap

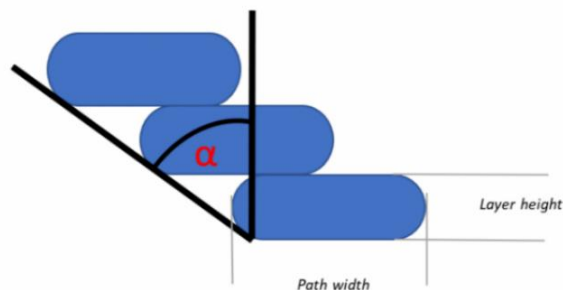
Wanneer er verstevigingen worden aangebracht moet er rekening gehouden worden met de overlap tussen de twee banen om er zo voor te zorgen dat de verbinding sterk is. Voor de beste resultaten wordt een overlap waarde van 5-10% aangehouden ten opzichte van de laagbreedte.



Figuur 6: Voorbeeld van baan overlap

1.2.4. Overhang

De overhang die met robots geprint kan worden is sterk afhankelijk van de print oriëntatie. Zoals in de scriptie vermeld kunnen er overhang 90° graden geprint worden zonder support te gebruiken. Dit is enkel mogelijk wanneer de printkop ook onder 90° graden geplaatst is. Wanneer de printkop verticaal georiënteerd is kunnen er overhang van 45° graden geprint worden.



Figuur 7: Visualisatie van Overhang hoek

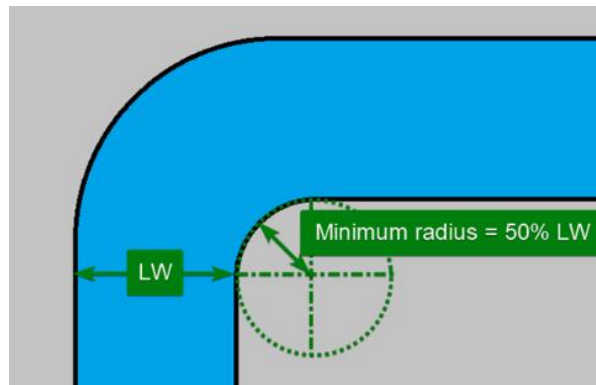
In Siemens NX modeling omgeving kan men 3D-modellen valideren op overhang. Deze kan men terugvinden in het tabblad 'Design for additive manufacturing' onder 'Overhang angle'. Hierdoor kan de maximum overhang angle bekeken worden en indien nodig aanpassing aangebracht worden aan het model.



Figuur 8: Siemens NX - design for additive manufacturing

1.2.5. Scherpe hoeken

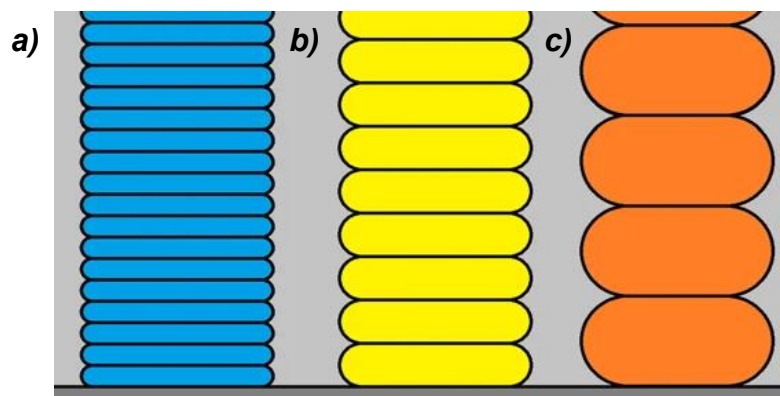
Om ervoor te zorgen dat er geen materiaal ophoopt in de hoeken, moeten de hoeken afgerond worden met een straal van minstens de laagbreedte waarmee je aan het printen bent.



Figuur 9: Scherpe hoeken

1.2.6. Laag geometrie

Voor het bepalen van de juiste laag hoogte en breedte kun je voor de beste resultaten gebruik maken van verhoudingen tussen de 1:2, 1:4 en 1:8. Er is ook al succesvol geprint met een verhouding van 1:1,5 maar dit was met een hoogte van 2mm en breedte van 3mm. Wanneer de lagen groter worden gaat deze verhouding niet meer zo goed werken.

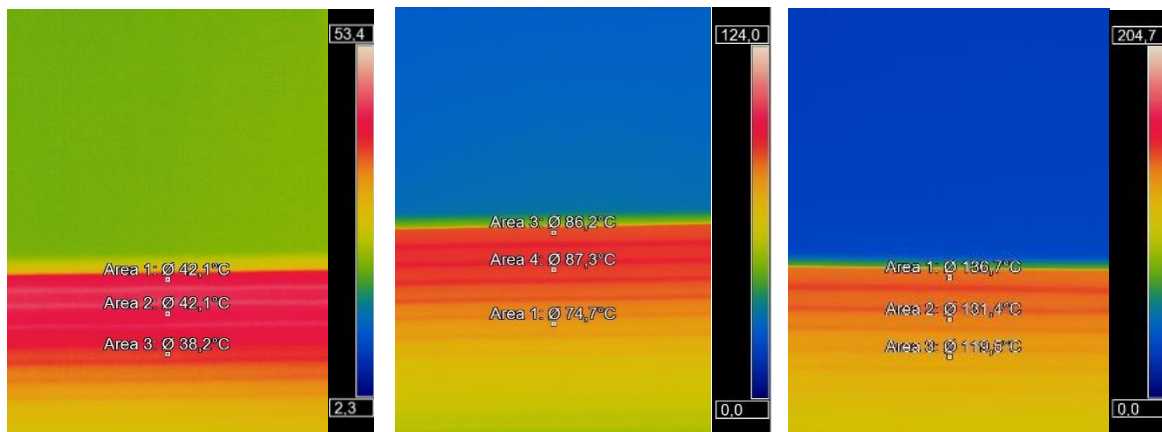


Figuur 10: Beam verhouding - a) 1:8, b) 1:4, c) 1:2

2. Onderzoek

2.1. Laaghechting

Om te achterhalen wat het effect van verschillende interpas temperaturen op de hechting tussen de lagen is heeft men treksterkte testen uitgevoerd. Hiervoor zijn er muren geprint met 3 verschillende interpas temperaturen een lage van 42°C, middel van 86°C en een hoge van 136°C.

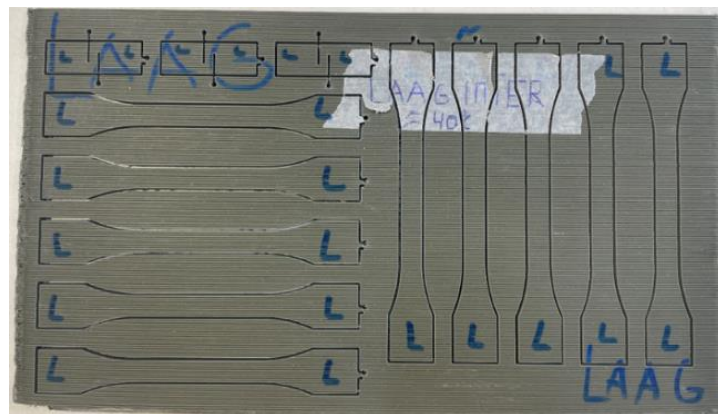


Figuur 11: IR lage interpas

Figuur 12: IR middel interpas

Figuur 13: IR hoge interpas

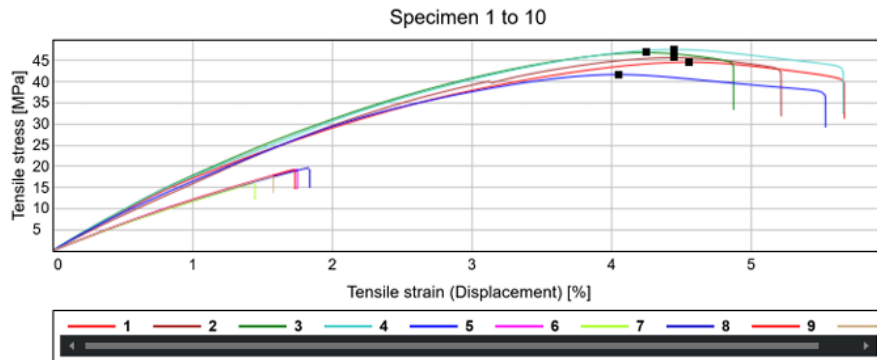
Vervolgens zijn er met een waterstraalsnijder trekstaven uitgesneden om hier vervolgens een treksterkte test op uit te voeren. De testen zijn uitgevoerd volgens de ISO 527-2/1B normering met een loading speed van 1mm/min.



Figuur 14: Uitgesneden trekstaven - Lage interpas

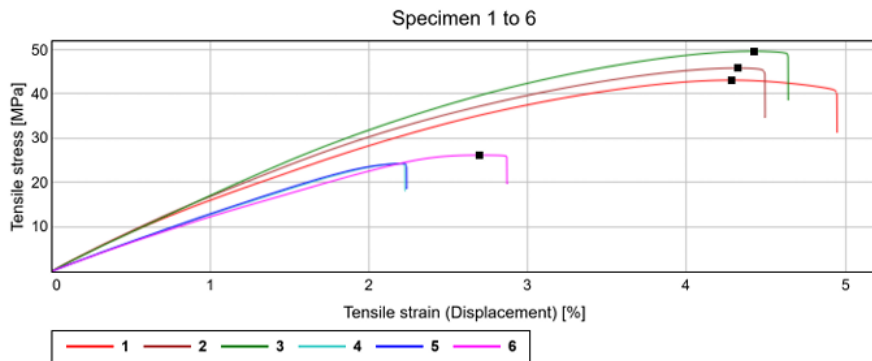
Door het uitvoeren van treksterkte testen werden er spanningsrek diagrammen bekomen. Uit deze gegeven kan het verschil in sterkte van de z-richting berekend worden ten opzichte van de x-richting. Deze gegevens kan men terugvinden in bijlage C.

- **Lage interpas - treksterkte:** De tensile stress in de x-richting is 45,3 MPa, terwijl deze in de z-richting 18,35 MPa is. Dit betekent dat de tensile stress in de z-richting 40,51% van die in de x-richting bedraagt.



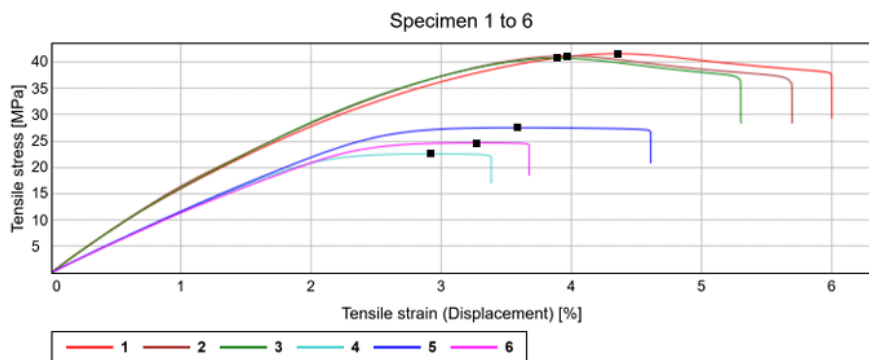
Figuur 15: Spanning rek diagram voor lage interpas

- **Middel interpas - treksterkte:** De tensile stress in de x-richting is 46,16 MPa, terwijl deze in de z-richting 24,9 MPa is. Dit betekent dat de tensile stress in de z-richting 53,9% van die in de x-richting bedraagt.



Figuur 16: Spanning rek diagram voor middel interpas

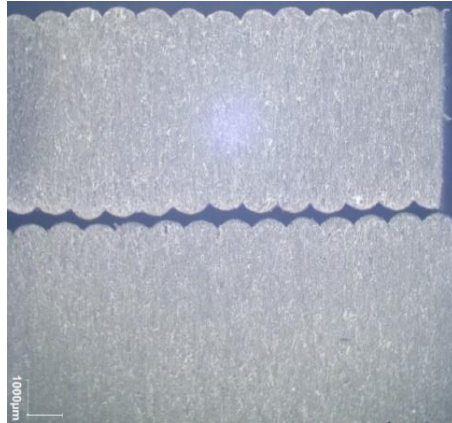
- **Hoge interpas - treksterkte:** De tensile stress in de x-richting is 41,2 MPa, terwijl deze in de z-richting 24,9MPa is. Dit betekent dat de tensile stress in de z-richting 60,4% van die in de x-richting bedraagt



Figuur 17: Spanning rek diagram voor hoge interpas

Uit de test resultaten is goed te zien dat er bij een hoge interpas temperatuur in de z-richting nog altijd verlenging optreedt na de maximale spanning. Dit wijst erop dat de hechting tussen de lagen zeer goed is.

De resultaten van de testen in de z-richting zijn niet volledig correct omdat er spanningsconcentraties optreden tussen de lagen waardoor er eerder breuk zal optreden. Hoeveel invloed de spanningsconcentraties hebben op de test is onduidelijk.

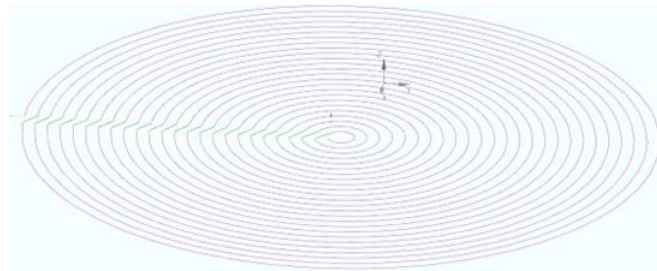


Figuur 18: Doorsnede van lage interpas sample

2.2. Siemens NX

2.2.1. Bodem programmeren

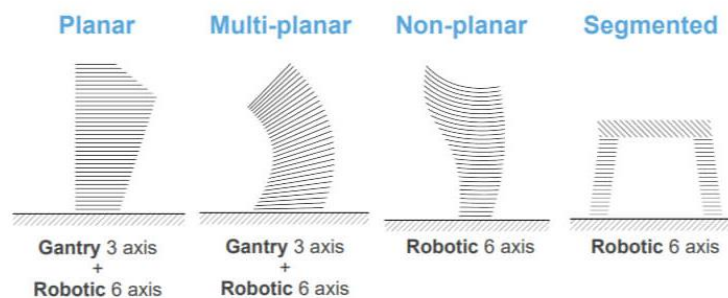
Wanneer men een bodem van bijvoorbeeld een bloempot automatisch via een continue pad wilt programmeren, moet men een klein gaatje in het midden van de bloempot maken. Hierdoor kan er gebruik gemaakt worden van de coating operatie aan de buitenkant en binnenkant een guidecurve leggen. Vervolgens kan men zoals uitgelegd in de Siemens NX handleiding 'smoothe stepover' op infill passes aanzetten waardoor er automatisch een continue pad gegenereerd zal worden.



Figuur 19: Voorbeeld bloempot bodem

2.2.2. Multi planar printen

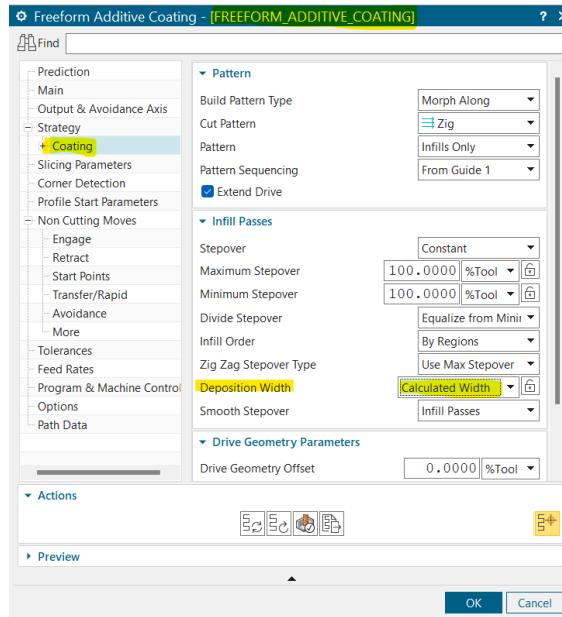
Bij het printen van een gebogen buis moet er multi-planar gebruikt worden zodat er een continue baan bekomen wordt. In de figuur 20 hieronder zie men dat de banen aan de binnenkant dichters bij elkaar liggen dan de banen aan de buitenkant. Wanneer de extrusie hetzelfde blijft resulteert dit in bredere banen aan de binnenkant en minder brede banen aan de buitenkant. Door gebruik te maken van de functie 'calculate width' in de coating operatie wordt het verschil tussen de lagen in ieder punt berekend. Deze berekende waarde kan doorgegeven worden aan de output formule zodat de extrusie constant aanpast om over extrusie te voorkomen.



Figuur 20: Print oriëntaties

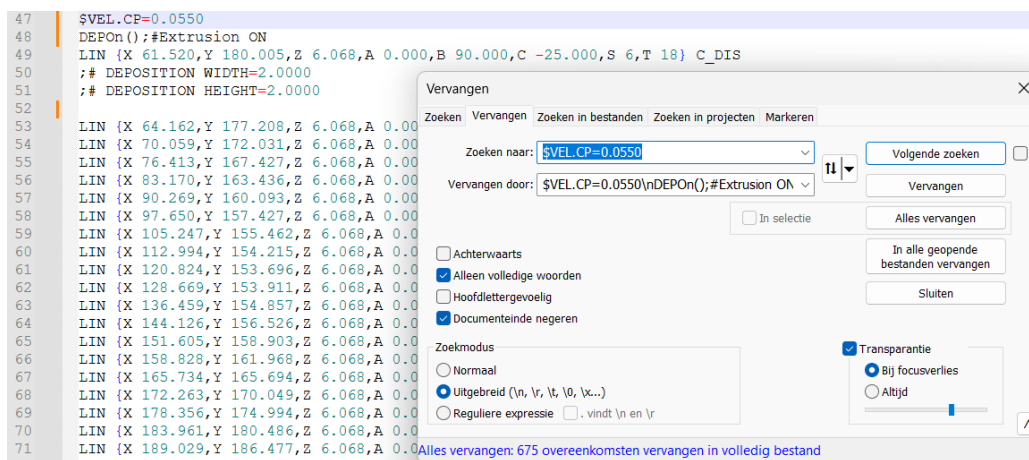
2.2.3. Traversal

Wanneer er meerdere stukken tegelijk geprint worden moet de robot een traversal beweging maken om van de ene naar het andere stuk te gaan. Wanneer er op hoge snelheid geprint wordt (meer dan 30mm/s) start en stop de extrusie niet direct. Omdat de robot moet versnellen en vertragen en de actuele TCP-snelheid gebruikt wordt voor de output formule en het onbekend is hoelang het duurt, voordat deze waarde doorgestuurd wordt resulteert dit in een extrusie die te laat start en te vroeg stopt. Dit kan opgelost worden door de adaptieve output formule niet te gebruiken en op voorhand uitgereken RPM in te geven. Maar dan begint de extruder nog altijd net iets te laat. Dit kan opgelost worden door de extruder tijdens de inloop al aan te zetten. Dit kun je doen door bij feedrates de 'approach' op rapid te zetten hierdoor komt er een 'VEL.CP' waarde te staan tussen de inloop.



Figuur 21: Siemens NX - coating

Vervolgens alle 'DEPon();#Extrusion ON' te verwijderen doormiddel van vervangen en de regel 'vervangen door' leeg te laten. Vervolgens zoek je naar 'VEL.CP=*****' en vervang je deze waarde door 'VEL.CP=*****\nDEPon();#Extrusion ON'. Hierdoor wordt automatisch het extrusie aan commando voor de inloop gezet. Nu moet de lengte van de inloop wel nog afgesteld worden zodat de extrusie op het juiste punt begint, dit is afhankelijk van de snelheid.



Figuur 22: Postpro programma in notepad++

2.2.4. Breedte & Hoogte

Wanneer je de breedte en hoogte vanuit het programma wilt gebruiken om de extrusie aan te sturen moet de naam van het commando veranderd worden van:

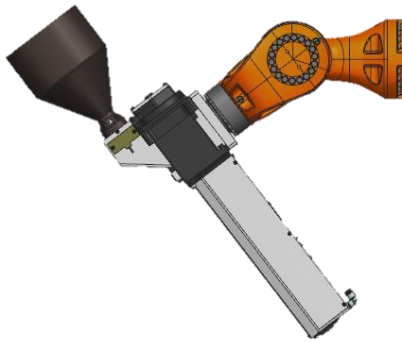
```
;/# DEPOSITION WIDTH=  
;/# DEPOSITION HEIGHT=
```

Naar:

```
TRIGGER WHEN DISTANCE=0 DELAY=0 DO oKUKAWidth=  
TRIGGER WHEN DISTANCE=0 DELAY=0 DO oKUKAHeigth=
```

2.3. Extruder positie

Om ervoor te zorgen dat er multi-planer geprint kan worden is er een adapter ontworpen waardoor de extruder 90° graden gedraaid kon worden. Hierdoor kan de extruder gemakkelijk in de juiste richting gekanteld worden zodat de materiaal aanvoer optimaal blijft.



Figuur 23: ZA extruder rotatie J5 onder 45°



Figuur 24: Extruder rotatie J6 onder 45°

Door de extruder positie te roteren is er meer bewegingsvrijheid gecreëerd waardoor de materiaal aanvoer optimaal kan blijven tijdens het printen onder hoek. Hiervoor is er een adapter ontworpen en lightweighting toegepast om de totale massa zo laag mogelijk te houden. Door een aantal iteraties uit te voeren heeft men het best presterende ontwerp gekozen.



Figuur 25: Volle adapter

Massa: 0,602 kg



Figuur 26: Lightweight adapter

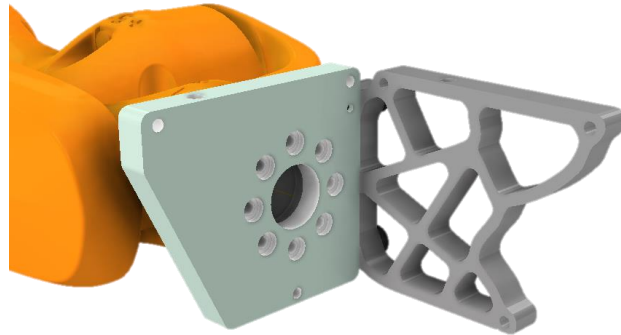
Massa: 0,195 kg

Door de twee adapters te vergelijken kan men zeggen dat er een massa reductie van 67,61% is behaald.

$$\frac{(Oorspronkelijke\ massa\ [kg] - nieuwe\ massa\ [kg])}{Oorspronkelijke\ massa\ [kg]} \times 100 = verschil\ \%$$

$$\frac{(0,602\ kg - 0,195\ kg)}{0,602\ kg} \times 100 = 67,61\ \%$$

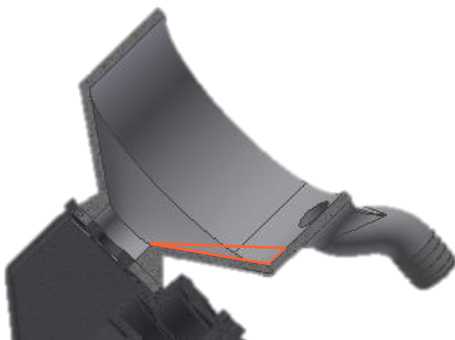
Voor de flens zijn er lichte aanpassing aangebracht om de adapter te kunnen monteren. Hiervoor zijn er drawings creëert om te kunnen verspannen, deze kan men terugvinden in bijlage B.



Figuur 27: Flens en adapter op J6

Omdat de hopper werd ontworpen om veel pellets op te slaan heeft deze een grote diameter met een helings hoek van 35° . Bij het positioneren van de extruder onder 45° , ontstaat er hierdoor een slecht materiaal aanvoer, waardoor er in de hopper deels materiaal ophoopt deze is aangeduid in het rood in figuur 28.

Door de hopper te herontwerpen voor een goede materiaal flow, heeft men de helling hoek aangepast naar 65° . Hierdoor is de materiaal aanvoer verbeterd maar dit zorgde wel voor een beperkte materiaal opslag, Om dit te verhelpen is de hopper langer gemaakt. De pellet aanvoer tijd moest hierdoor verlaagd worden van 8s naar 6 seconden.



Figuur 28: Hopper design 1



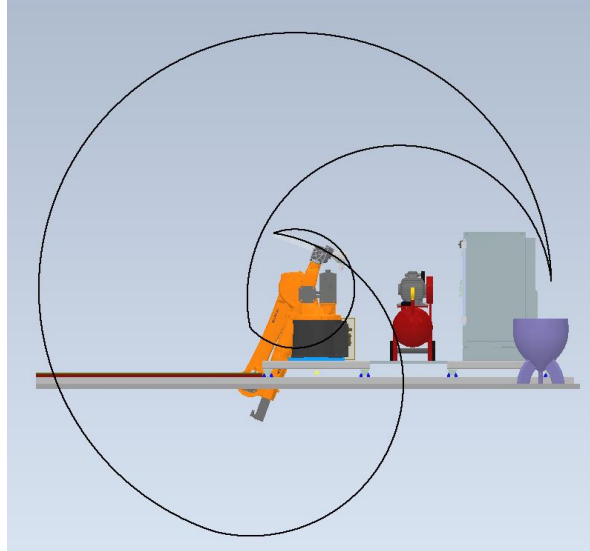
Figuur 29: Hopper design 2



Figuur 30: Extruder onder 45° met hopper design 2

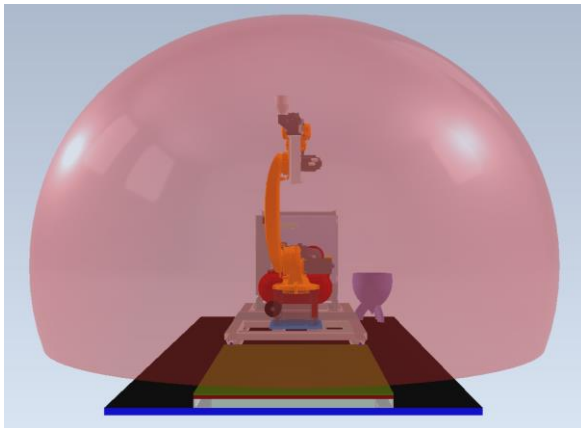
2.4. Bouwvolume

Door gebruik te maken van 'dynamic simulation' in inventor heeft men een controle uitgevoerd van het nieuwe werkgebied. Hiervoor is er een 'trace' aangelegd op de nozzle en een 'ref point' centraal in joint 1. Door de juiste waardes aan de joints te geven, kon men beweging simuleren en het verloop van de trace volgen (Zie figuur 31).

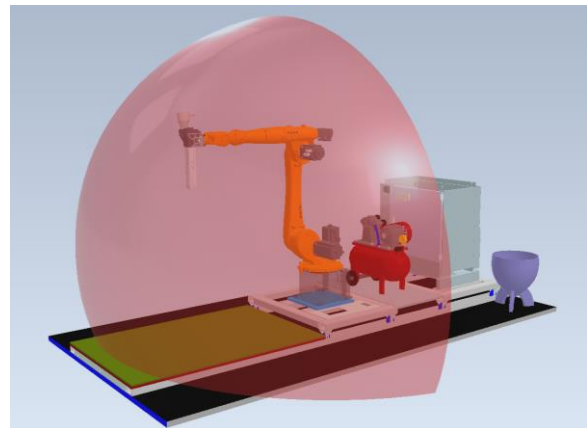


Figuur 31: ZA dynamic simulation van trace

Op basis van de trace heeft men het werkelijk werkgebied gecreëerd dat de robot met de pulsar extruder kan bereiken. Omdat het printoppervlak voor de robot zich bevindt, heeft men de trace revolved. Hierdoor kan de mogelijke range van de robot bekijken worden (Zie figuur 32 & 33).

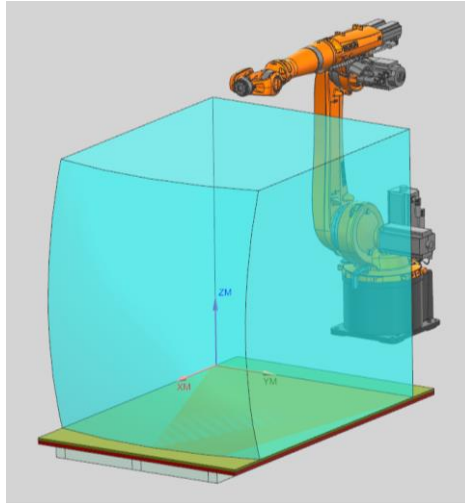


Figuur 32: VA werkgebied robot 1



Figuur 33: Werkgebied robot 2

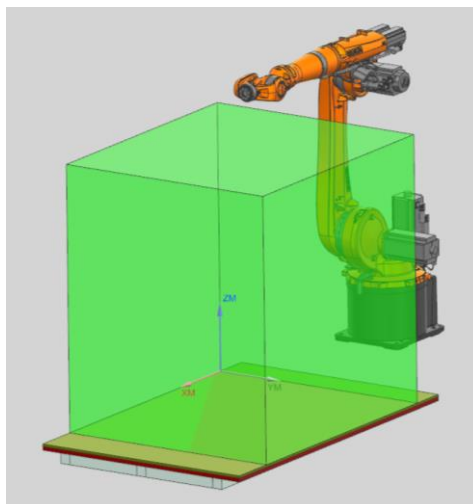
Omdat het werkgebied groter is dan de trailer, heeft men het bereik gedefinieerd dat men kan bereiken (Zie figuur 34).



Figuur 34: Optimale printvolume

Volume = 2,0258 m³

Omdat dat de robot zijn beweging in rotatie uitvoert kunnen er problemen optreden wanneer er op de uiterste randen geprint wordt zonder rekening te houden met de afronding. Om ervoor te zorgen dat dit niet gebeurt heeft men een alternatief printvolume opgesteld die de robot zonder problemen kan bereiken (Zie figuur 35).



Figuur 35: Alternatieve printvolume

L x B x H = 1,28m x 1,1m x 1,3m

Volume = 1,8258 m³

Door een vergelijking te maken tussen het oude printvolume met het frame en het alternatieve printvolume, kan men zeggen dat het printvolume met 217 % is vergroot.

$$\frac{\text{Nieuwe printvolume [m}^3\text{]}}{\text{Oude printvolume [m}^3\text{]}} \times 100 = \text{verschil \%}$$

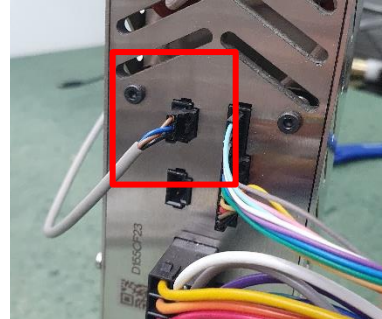
$$\frac{1,8258 \text{ m}^3}{0,84 \text{ m}^3} \times 100 = 217 \%$$

2.5. Materiaal wissel

Bij een materiaal wissel kan men met de knop langs de beckhoff HMI de magneetklep uitzetten. Vervolgens kan men de capacatieve sensor die de pellets detecteert uittrekken, hierdoor zal er een signaal worden gestuurd om de magneetklep te openen. Maar omdat deze uit is gezet zal er niks gebeuren.



Figuur 36: Knop aan beckhoff HMI



Figuur 37: Kabels van capacatieve sensor

Vervolgens kan men de slang die verbonden is met de pellet opslag bak losmaken aan het koppelstuk en deze in een bak richten. Door vervolgens op de reset knop te drukken van de arduino zal er opnieuw een signaal gestuurd worden naar de magneetklep nu zet men de knop van de magneetklep terug aan, waardoor deze 6 seconden open zal blijven. Als de opslagbak nog niet leeg is drukt u nogmaals op de reset knop. Herhaal dit totdat de opslag bak leeg is. Vergeet op het einde niet de pellet sensor terug in de bovenste ingang te steken.



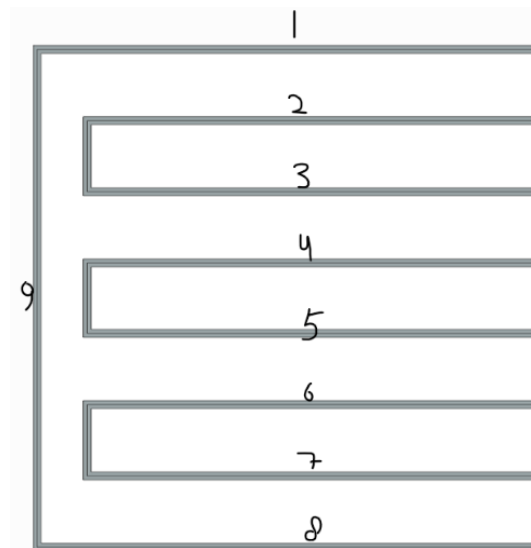
Figuur 38: Slang verbinding



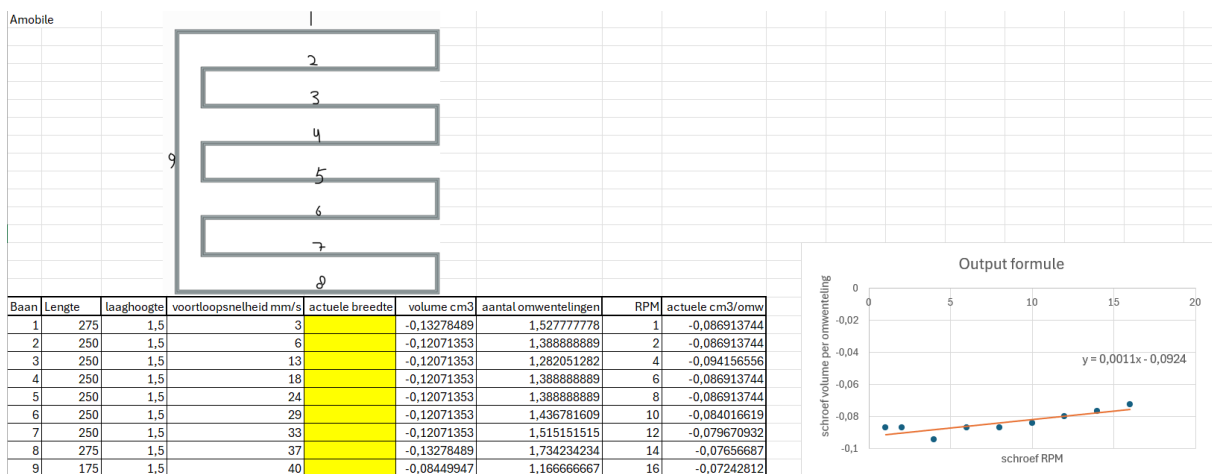
Figuur 39: Reset knop arduino

2.6. Output test

Wanneer men met een nieuw materiaal begint of een andere nozzle grote gebruikt moet er eerste een output test gedaan worden. De output testprogramma is een zigzag patern, waarbij aan verschillende voortloop snelheden en verschillende extrusie snelheden banen worden neergelegd. De breedte van de verschillende banen moet je vervolgens met een schuifmaat opmeten en ingeven in het opgesteld Excel bestand. Vervolgens wordt automatisch het volume per omwenteling berekend en wordt er een grafiek gemaakt van deze waardes. Uit de grafiek komt een formule en deze moet ingegeven worden in de adaptieve output formule.



Figuur 40: Output test opstelling ZigZag

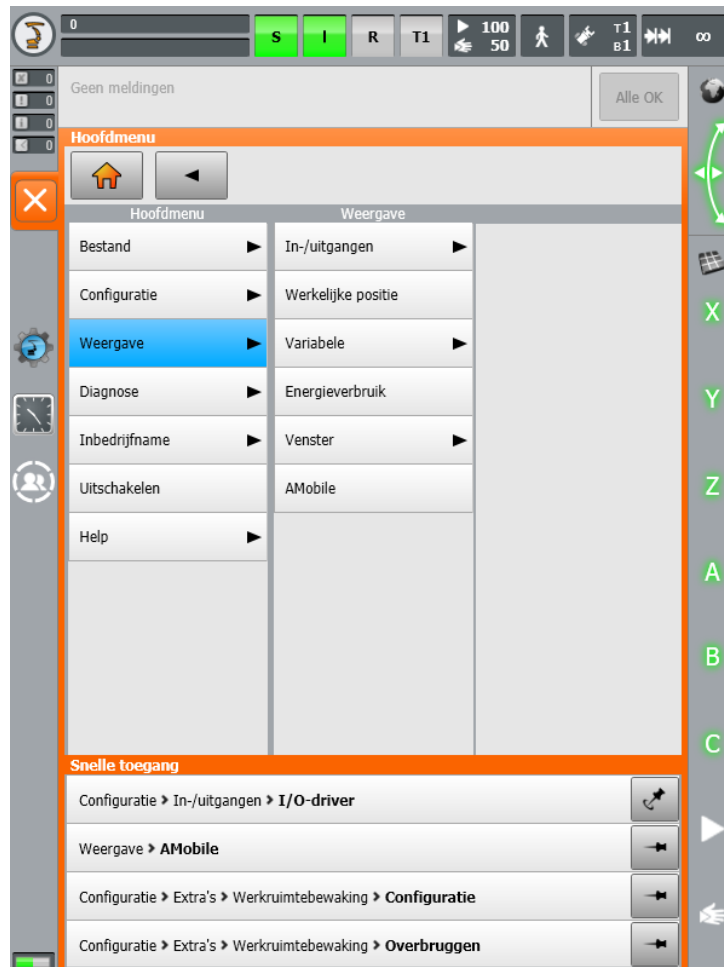


Figuur 41: Output test excel opstelling

2.7. Easy HMI

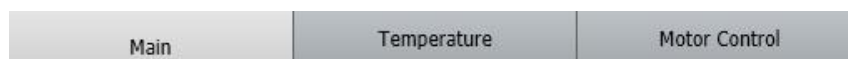
Door de 'KUKA.HMI EASY' te integreren op het smartPAD-2 zijn alle zelf ingestelde functies bedienbaar via één scherm. Hierdoor staan alle mogelijk functies en variabelen bij elkaar waardoor de gebruiksvriendelijkheid vergroot wordt. Het Beckhoff HMI-scherm kan worden gebruikt als een reservescherm voor het geval dat er problemen optreden met de smartPAD-2.

Om de communicatie tussen EtherCAT en KR C4 tot stand te brengen, moeten verschillende digitale uitgangen worden geactiveerd voor het printproces. Voordat dit proces kan worden gestart, dient men eerst naar het hoofdmenu te navigeren (selecteer het robot icoon linksboven). Zodra het hoofdmenu is geopend, selecteer men 'Weergave' en vervolgens 'AMobile'. Dit opent het betreffende Easy HMI tabblad.



Figuur 42: Hoofdmenu & weergave

De volgende tabbladen worden weergegeven waar alle nodige uitgangen staan om te kunnen printen.



Figuur 43: Easy HMI tabbladen

2.7.1. Main

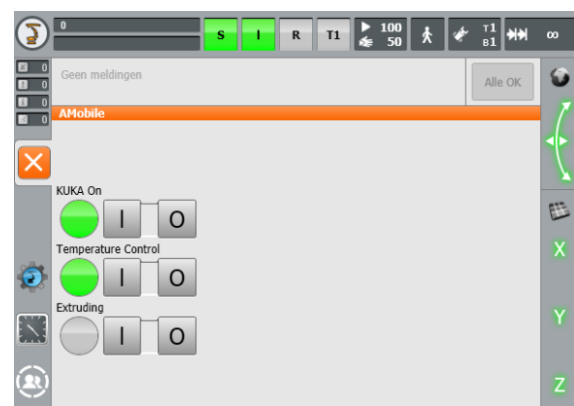
De volgende uitgangen gaan men in 'Main' tabblad die standaard laag staan, moeten worden ingesteld op hoog om de communicatie tussen de componenten te voltooien: Uitgang 1 'KukaON' en Uitgang 9 'heatcontrol'.

- **Uitgang 'KukaON'** is bedoeld voor de communicatie tussen het KR C4 en EtherCAT, wat het mogelijk maakt dat het KR C4 specifieke programmaregels kan lezen tijdens de uitvoering van een programma (bv. wachttijd, extrusie aan/uit, ...).
- **Uitgang 'Temperatuur control'** is bedoeld om de verwarmingselementen te activeren, zodat ze op de ingestelde temperatuur worden gebracht.

Om de uitgangen hoog te zetten, is het belangrijk dat de gebruikersgroep is ingesteld op 'expert' of 'administrator' (zie sectie '2.2.3. Gebruikersgroep'). Nadat dit is gedaan, drukt men één van de dodemansknoppen in in de middenpositie. Vervolgens kan men naar de specifieke uitgang gaan en de toets 'I' selecteren, waardoor de groene lichtindicator zal worden weergegeven als de uitgang hoog is gezet.



Figuur 44: Uitgang 'kukaON' & 'Temperatuur control' laag



Figuur 45: Uitgang 'kukaON' & 'Temperatuur control' hoog

Door de uitgang 'Extruding' handmatig of automatisch hoog te zetten, wordt de extrusieschroef bediend om materiaal te extruderen wanneer de verwarmingselementen de juiste temperatuur hebben bereikt en de gewenste snelheid selectie is ingesteld (zie sectie '2.7.2. Temperature' & '2.7.3 motor control').

2.7.2. Temperature

In het tabblad 'temperature' door een materiaal te selecteren in het witte kader, verschijnen er vijf materiaalopties waarbij een temperatuurconfiguratie beschikbaar zijn. De vijf keuzes zijn: Custom, PLA, HDPE, PP en ABS. De 'Custom' optie heeft geen vooraf ingestelde temperatuurconfiguratie en moet handmatig worden ingesteld in het 'Input' kader.

Om temperatuur handmatig in te stellen, is het belangrijk dat de gebruikersgroep is ingesteld op 'expert' of 'administrator' (zie sectie '2.2.3. Gebruikersgroep'). Nadat dit is gedaan, drukt men één van de dodemansknoppen in in de middenposititie. Vervolgens kan men naar de specifieke 'inpunt' gaan en de waarde ingeven.

• T1: nozzle temp	• T2: midden temp	• T3: boven temp
-------------------	-------------------	------------------

In het 'actuele' kolom toont de werkelijke temperatuurwaarde met een nauwkeurigheid van +/- 3°C.



Figuur 46: Display temperature

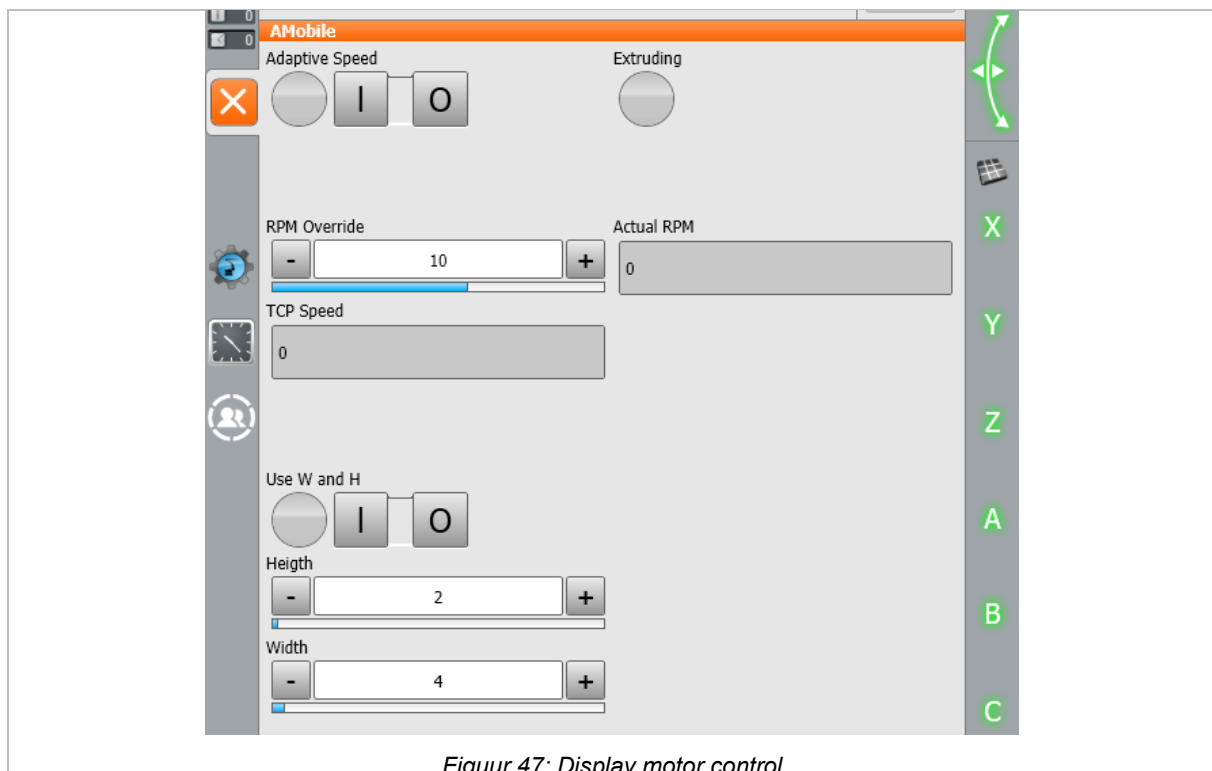
2.7.3. Motor control

In het 'motor control' tabblad kan men verschillende varianten selecteren de extruder zal werk op basis van voor ingestelde parameters op de smartPAD-2 of in postprocessor.

Het is belangrijk dat de gebruikersgroep is ingesteld op 'expert' of 'administrator' (zie sectie '2.2.3. Gebruikersgroep'), om mogelijke aanpassingen te maken.

Variant:

- 1) Door 'Adaptive speed' en 'Use W and H' niet hoog te zetten, kan men bij 'RPM override' een bepaalde waarde instellen en handmatig of automatisch extruderen.
- 2) Door 'Adaptive speed' en 'Use W and H' hoog te zetten, kan men op de smartPAD-2 handmatig W en H instellen. Waardoor de Beckhoff PLC formule wordt toegepast om de extrusie te regelen.
- 3) Door 'Adaptive speed' en 'Use W and H' hoog te zetten, kan de KUKA postproces programma lezen en waardes als oKUKAWidth en oKUKAHeight overnemen. Vooringestelde waardes op de smartPAD-2 worden overgeschreven door de waardes die in het programma staan. Waardoor de Beckhoff PLC formule wordt toegepast om de extrusie te regelen.
- 4) Door 'Adaptive speed' en 'Use W and H' hoog te zetten, kan de KUKA postproces programma lezen en waardes als oKUKARPM overnemen. Vooringestelde waardes op de smartPAD-2 worden overgeschreven door de waardes die in het programma staan. Waardoor de Beckhoff PLC formule wordt toegepast om de extrusie te regelen.




Figuur 47: Display motor control

3. Veiligheidsanalyse

Voor AMobile is een veiligheidsinstructiekaart ontwikkeld, gebaseerd op de opgedane ervaringen gedurende de projectperiode. Hierin zijn alle essentiële veiligheidsmaatregelen opgenomen om gebruikers te informeren over de benodigde persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM's) en de mogelijke gevaren tijdens het gebruik van AMobile. De veiligheidsinstructiekaart is te vinden in bijlage A.

4. Resultaten

4.1. Cases

Case 5		
Naam	Loper	
Nozzle	Ø3 mm	
Oppervlak	Osb	
Printtijd	4u 55min	
Materiaal	rPLA	
Massa	1,6 kg	
Datum geprint	23-5-2024	
Prijs	€ 9,92	

Tabel 1: Case 5 – Loper

Case 6		
Naam	Opslagruimte pellets	
Nozzle	Ø3 mm	
Oppervlak	Osb	
Printtijd	6u 25min	
Materiaal	rPLA	
Massa	3,80 kg	
Datum geprint	31-5-2024	
Prijs	€ 23,56	

Tabel 2: Case 6 - Opslagruimte pellets

Case 7		
Naam	Toren	
Nozzle	Ø3 mm	
Oppervlak	Osb	
Printtijd	8u	
Materiaal	rPLA	
Massa	2,75 kg	
Datum geprint	4-6-2024	
Prijs	€ 17.05	

Tabel 3: Case 7 - Toren

5. Dankwoord

Graag willen we oprechte dank uitspreken aan Robbe Boon voor de gastvrijheid en de gelegenheid om treksterkte samples bij hem uit te snijden. Uw bereidheid om ons te helpen en de faciliteiten ter beschikking te stellen was van onschatbare waarde voor ons onderzoek.

Daarnaast willen we Jie Zhang hartelijk bedanken voor de ondersteuning bij het gebruik van de T4F3 software en het uitvoeren van de mechanische testen. Uw expertise en geduld hebben een cruciale rol gespeeld in het succesvol voltooien van deze tests.


Dankzij jullie bijdragen en samenwerking hebben we belangrijke stappen kunnen zetten in ons onderzoek.


Bibliografie




- 3d-demand. (sd). *De Juiste Materiaalkeuze voor jou 3D-Print*. Opgehaald van 3d-demand: <https://3d-demand.nl/de-juiste-materiaalkeuze-voor-uw-3d-print-eeen-gids/>
- Badiee, A. (2023, Sep 20). *Design considerations for large scale additive manufacturing, part 1*. Opgehaald van Savonia: <https://www.savonia.fi/en/3d/design-considerations-for-large-scale-additive-manufacturing-part-1/>
- Badiee, A. (2023, Dec 5). *Design considerations for large scale additive manufacturing, part 2*. Opgehaald van Savonia: <https://www.savonia.fi/en/3d/design-considerations-for-large-scale-additive-manufacturing-part-2/>
- CEAD. (sd). *Can I 3D print with infill?* Opgehaald van CEAD Knowledge Base: <https://knowledge.ceadgroup.com/large-scale-3d-print-with-infill>
- CEAD. (sd). *Design cheatsheet - Bead geometry guidelines*. Opgehaald van CEAD Knowledge Base: <https://knowledge.ceadgroup.com/cheatsheet-guidelines-for-large-scale-am-design#Cheatsheet>
- CEAD. (sd). *How do I choose the right nozzle size for large format 3D printing?* Opgehaald van CEAD Knowledge Base : <https://knowledge.ceadgroup.com/how-do-i-choose-the-right-nozzle-size-for-large-format-3d-printing>
- Duckleberry. (sd). *3D Print gids – Filament materiaal keuze*. Opgehaald van Duckleberry: <https://www.duckleberry.nl/3d-print-gids-filament-materiaal-keuze/>
- Gagatstudio. (sd). *FDM 3D PRINT MATERIALEN*. Opgehaald van Gagatstudio: <https://gagatstudio.com/3d-printen/fdm-materialen>
- Kardach, K. (2021, Jan 12). *How to calculate maximum overhang angle*. Opgehaald van Omni3d: <https://omni3d.com/blog/how-to-calculate-maximum-overhang-angle/>
- Simplify3d. (sd). *Ultimate 3D Printing Materials Guide*. Opgehaald van Simplify3d: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/>

Bijlagen

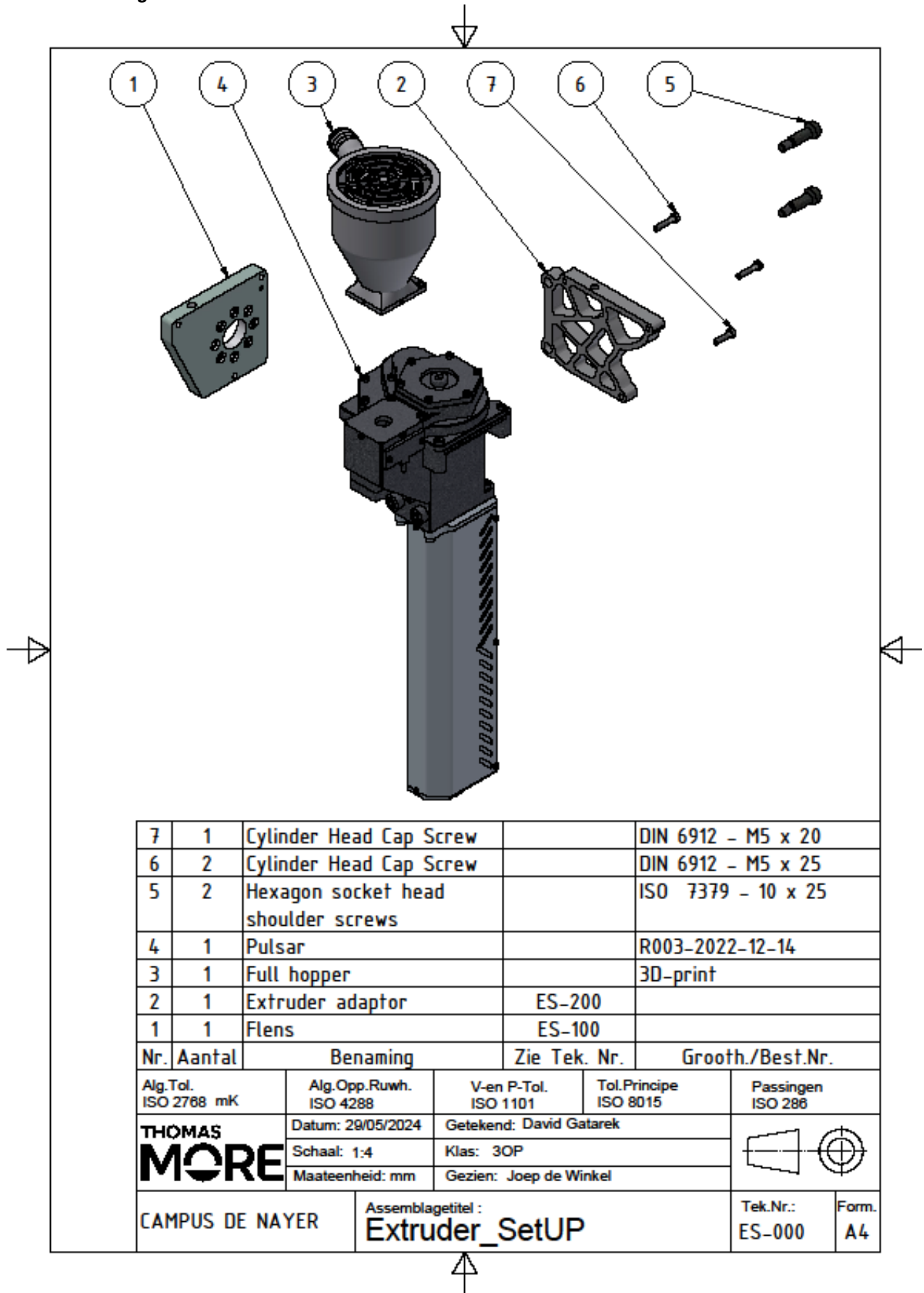
A. Veiligheidsinstructiekaart

	VEILIGHEIDSINSTRUCTIEKAART		24/05/2024
	AMobile		Versie 1 Pagina 1/1

Identificatie van het arbeidsmiddel:				
Intern nr.		Merk:	KUKA	
Lokaal:		Type:	KR20 R1810-2	
Opm.:		Serienr.:	130372	
		Bouwjaar:	2021-04	

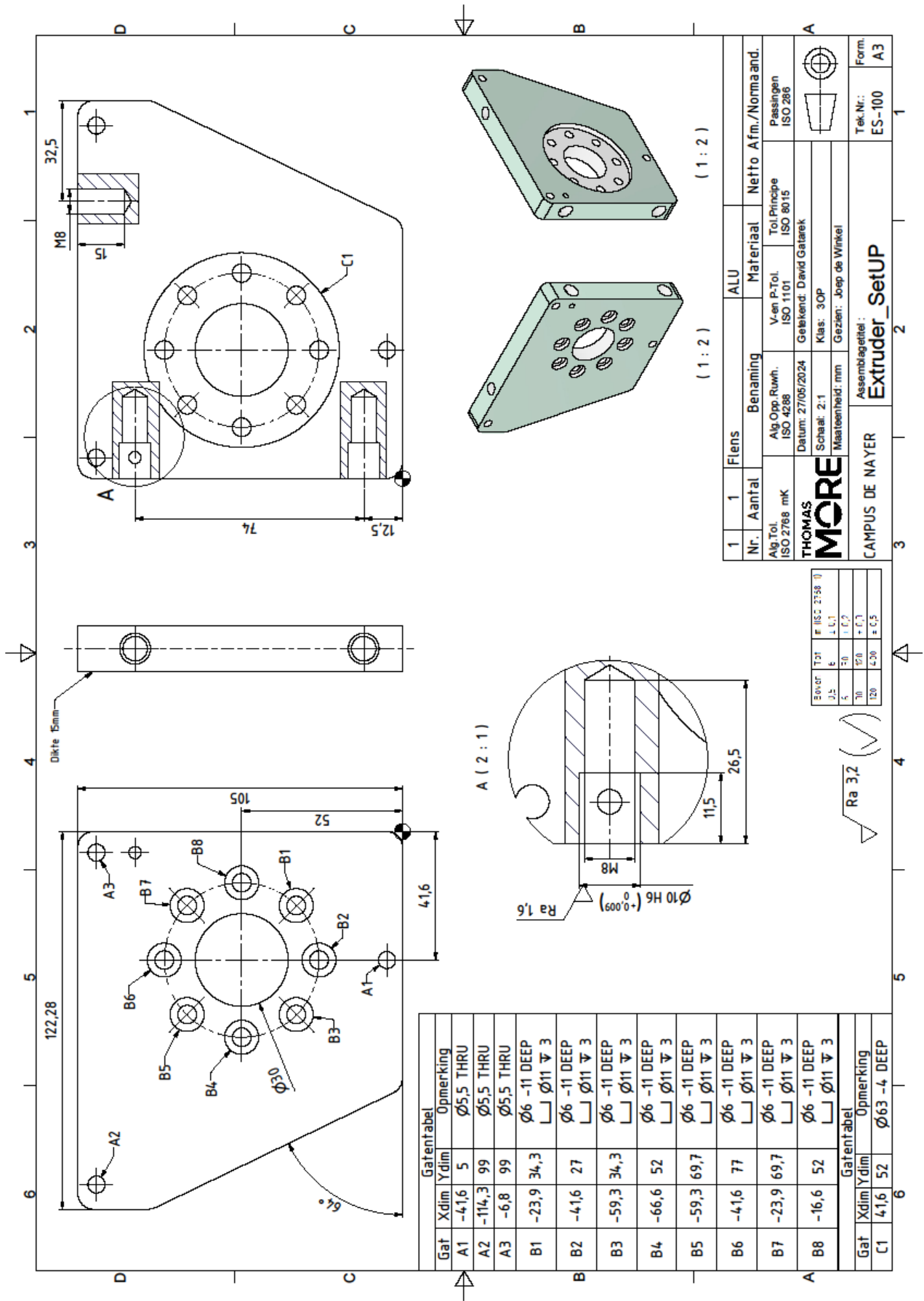
Specifieke veiligheidsinstructies bij het gebruik van het arbeidsmiddel	
<p>Werkvoorbereiding</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Gebruik de volgende persoonlijke beschermingsmiddelen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gehoorbescherming ▪ Voetbescherming ▪ Oogbescherming ▪ Beschermde kleding ✓ Gebruik de volgende handleidingen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ BCW trailer & KUKA ✓ Werkomgeving: <ul style="list-style-type: none"> ▪ De staat van het opstelling en robotarm controleren. ▪ De bijhorende componenten aansluiten voor starten. <p>Veilig werken</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Let op voor hete objecten en materiaal, laat het afkoelen door omgeving temperatuur indien nodig. ✓ Lange loshangende haren zijn verboden tijdens het gebruik van de robotarm. Bind lange haren samen aan achterzijde van het hoofd. ✓ Loshangende sierraden en /of armbanden dienen verwijderd of veilig weggestopt te worden. ✓ Tijdens bewegen met de robotarm neem een veilige afstand. ✓ Niet eten, drinken of roken aan de robotarm. 	 <p style="font-size: small;">Behandelen van zware, scherpe of hete voorwerpen Beschermingsmiddelen verplicht</p>
Bijzondere risico's	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Electrocutie. ✓ Warme componenten of objecten. ✓ Klemmen/pletten van de lichaam/handen bij het bewegen met de robotarm. ✓ Struikelen door verhogingen of objecten. ✓ Blootstelling aan lawaai, trillingen en schokken. 	
Noodsituaties	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ongeval: schakel de machine uit, breng het slachtoffer in veiligheid en verwittig een EHBO-verlener via het noodnummer ✓ Brand: schakel de machine uit, gebruik een geschikt blusmiddel (poeder of schuim) en waarschuw via het noodnummer. 	

B. Drawings



7	1	Cylinder Head Cap Screw		DIN 6912 - M5 x 20
6	2	Cylinder Head Cap Screw		DIN 6912 - M5 x 25
5	2	Hexagon socket head shoulder screws		ISO 7379 - 10 x 25
4	1	Pulsar		R003-2022-12-14
3	1	Full hopper		3D-print
2	1	Extruder adaptor	ES-200	
1	1	Flens	ES-100	

Nr.	Aantal	Benaming	Zie Tek. Nr.	Grooth./Best.Nr.
Alg.Tol. ISO 2768 mK		Alg.Opp.Ruwh. ISO 4288	V-en P-Tol. ISO 1101	Tol.Principe ISO 8015
THOMAS MORE		Datum: 29/05/2024	Getekend: David Gatarek	
		Schaal: 1:4	Klas: 30P	
		Maateenheid: mm	Gezien: Joep de Winkel	
CAMPUS DE NAYER			Assemblagetitel : Extruder_SetUP	Tek.Nr.: ES-000
				Form. A4

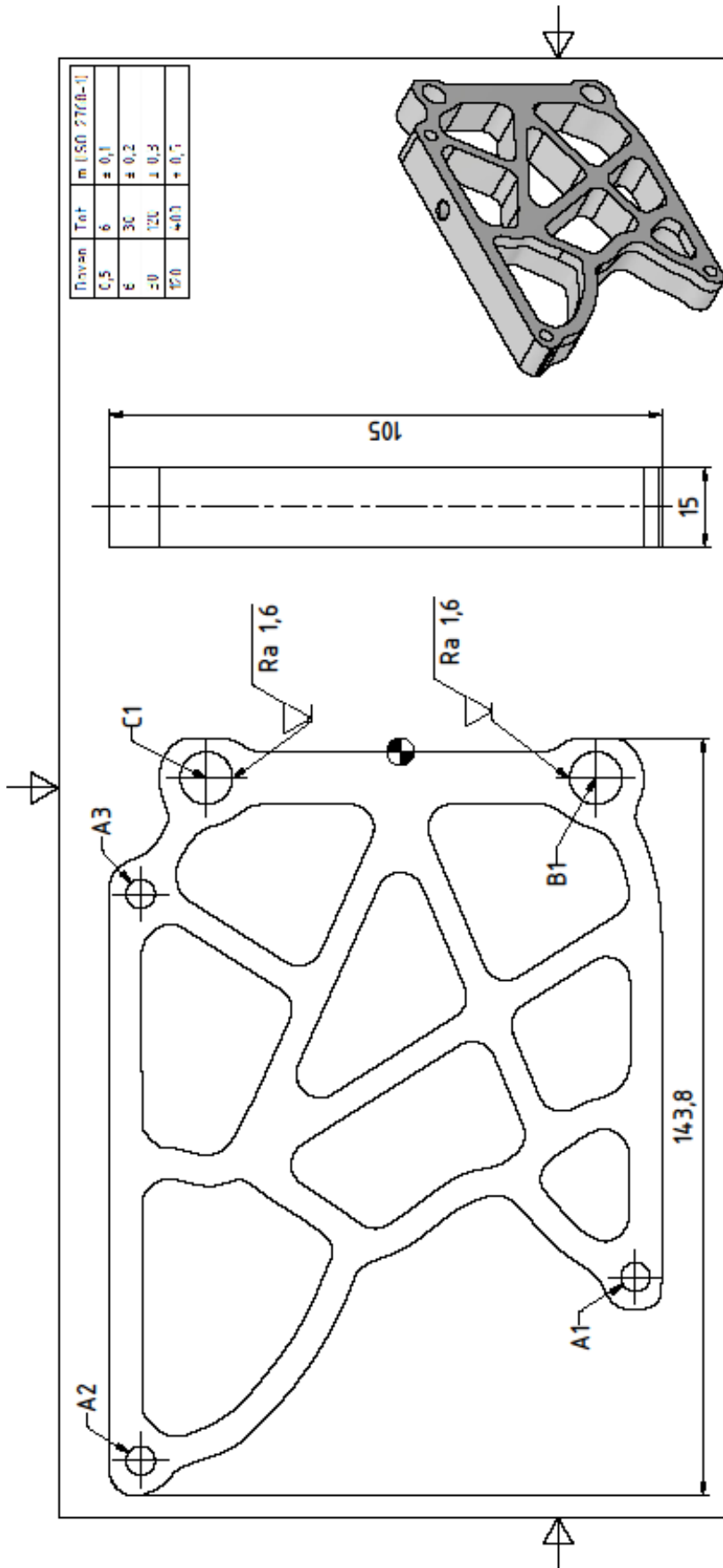


Gatentabel		Opmerking	
Gat	Xdim Ydim		
A1	-4,16 5	Ø5,5 THRU	
A2	-114,3 99	Ø5,5 THRU	
A3	-6,8 99	Ø5,5 THRU	
B1	-23,9 34,3	Ø6 -11 DEEP	└┘ Ø11 ▽ 3
B2	-4,16 27	Ø6 -11 DEEP	└┘ Ø11 ▽ 3
B3	-59,3 34,3	Ø6 -11 DEEP	└┘ Ø11 ▽ 3
B4	-66,6 52	Ø6 -11 DEEP	└┘ Ø11 ▽ 3
B5	-59,3 69,7	Ø6 -11 DEEP	└┘ Ø11 ▽ 3
B6	-4,16 77	Ø6 -11 DEEP	└┘ Ø11 ▽ 3
B7	-23,9 69,7	Ø6 -11 DEEP	└┘ Ø11 ▽ 3
B8	-16,6 52	Ø6 -11 DEEP	└┘ Ø11 ▽ 3
Gatentabel		Opmerking	
Gat	Xdim Ydim		
C1	4,16 52	Ø63 -4 DEEP	

1	1	Flens	ALU	Materiaal	Netto Afm./Normaand.
Nr.	Aantal	Benaming			
Agg.Tol.	ISO 2768 mK	Alg.Opp.Ruwht.	ISO 4288	V-en P-Tol.	ISO 1101
THOMAS		Datum:	27/05/2024	Geleidend:	David Gatarek
MORE		Schaal:	2:1	Klas:	30P
CAMPUS DE MAYER		Maatteenhed:	mm	Gezien:	Joop de Winkel
Assemblagetitel:		Extruder_Setup			
Tek.Nr.:		ES-100			
Form:		A3			

Over TDT	ISO 2738 1)
J.5	6
5	50
20	50,0
120	120

1	1	Flens	ALU	Materiaal	Netto Afm./Normaand.
Nr.	Aantal	Benaming			
Agg.Tol.	ISO 2768 mK	Alg.Opp.Ruwht.	ISO 4288	V-en P-Tol.	ISO 1101
THOMAS		Datum:	27/05/2024	Geleidend:	David Gatarek
MORE		Schaal:	2:1	Klas:	30P
CAMPUS DE MAYER		Maatteenhed:	mm	Gezien:	Joop de Winkel
Assemblagetitel:		Extruder_Setup			
Tek.Nr.:		ES-100			
Form:		A3			



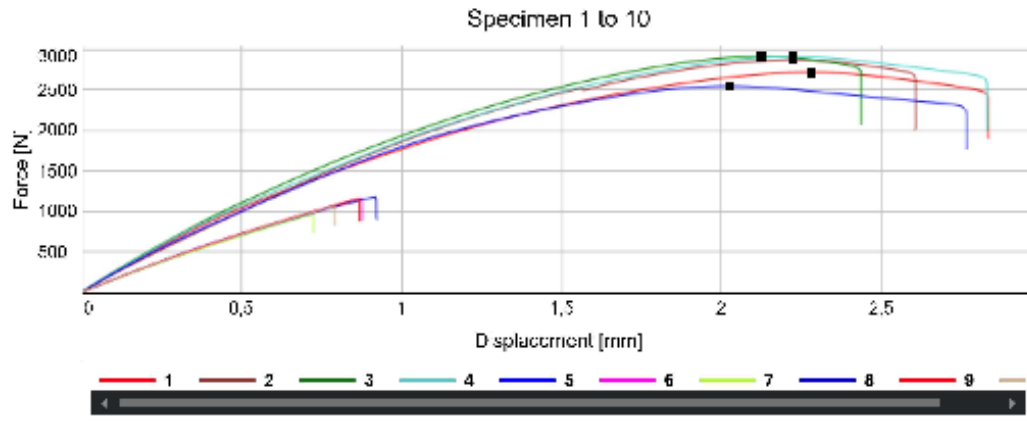
(1 : 2)

Gatentabel		Extruder adaptor		Alu		Netto Afm./Normaand.	
Gat	Xdim	Ydim	Opmerking	Nr.	Aantal	Benaming	Materiaal
A1	-99,7	-44,6	Ø5,5 THRU	1	1	Alg.Tol. ISO 2768 mK	Alu
A2	-134,5	49,4	Ø5,5 THRU			Alg.Opp.Ruwh. ISO 4288	
A3	-27	49,4	Ø5,5 THRU			V-en P-Tol. ISO 1101	
B1	-5	-37,1	Ø10H6 THRU			Datum: 27/05/2024	
C1	-5	36,9	Ø10H6 THRU			Schaal: 1:1	
						Maateenheid: mm	
						Getekend: David Gatarek	
						Klas: 30P	
						Gezien: Joep de Winkel	
						Passingen ISO 286	
				THOMAS MORE Assemblagetitel : Extruder_SetUP			
				Tek.Nr.:		Form.	
				ES-200		A4	

C. Laag hechting – rPLA

- Spanning rek diagram – Low interpas

Jawe with serrated face
load cell 5 kN
sample ISO 527-1/1B



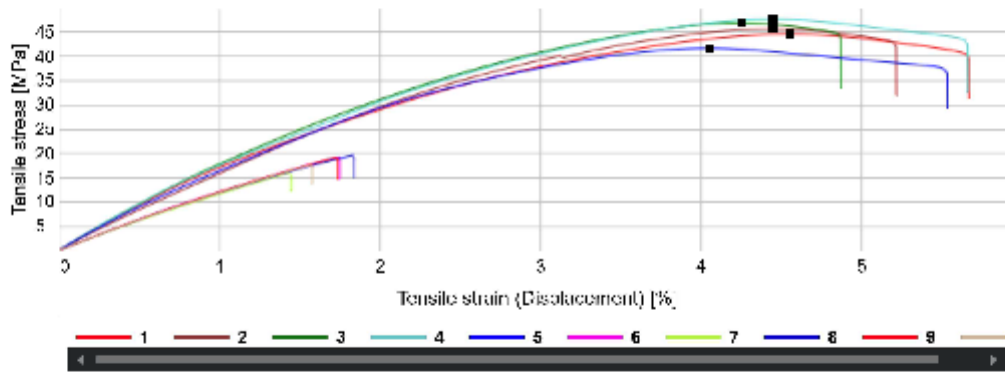
	Modulus (E-modulus) [MPa]	Modulus (Automatic Young's) [MPa]	Modulus (Segment 0,0375 mm - 0,1875 mm) [MPa]
1	---	1868,6288	1876,6373
2	---	1645,1618	1668,6403
3	---	1810,6218	1820,2078
4	---	1916,7268	1928,2360
5	---	1768,8808	1790,1023
6	---	1313,4746	1281,7026
7	---	1278,8853	1246,0612
8	---	1300,9778	1277,9137
9	---	1300,3805	1278,3110
10	---	1300,6243	1288,6164

	Modulus (Segment 0,05% - 0,25%) strain [MPa]	Maximum Tensile stress [MPa]	Tensile strain (STRAIN AVE2) at Maximum Tensile stress [mm/mm]
1	1820,2006	44,5882	0,0466
2	1724,7768	46,6916	0,0445
3	1865,8857	46,8781	0,0425
4	1864,0238	47,6122	0,0445
5	1846,6082	41,6914	0,0405

	Modulus (Segment 0,00% - 0,25% strain) [MPa]	Maximum Tensile stress [MPa]	Tensile strain (STRAIN AVEZ) at Maximum Tensile stress [mm/mm]
6	1312,4182	19,2567	0,0175
7	1270,0268	16,0572	0,0145
8	1301,6488	16,8267	0,0184
9	1299,3717	19,2081	0,0173
10	1284,3204	17,6197	0,0158

	Tensile stress at Tensile strength [MPa]	Displacement at Break (Standard) [mm]	Tensile stress at Yield (Zero slope) [MPa]
1	44,5881	2,8333	44,5882
2	45,8918	2,8085	45,8916
3	46,8781	2,4386	46,8781
4	47,6122	2,8288	47,6122
5	41,8913	2,7681	41,8914
6	19,2567	0,6754	—
7	16,0572	0,7283	—
8	16,8267	0,9191	—
9	19,2081	0,8685	—
10	17,6197	0,7885	—

Specimen 1 to 10



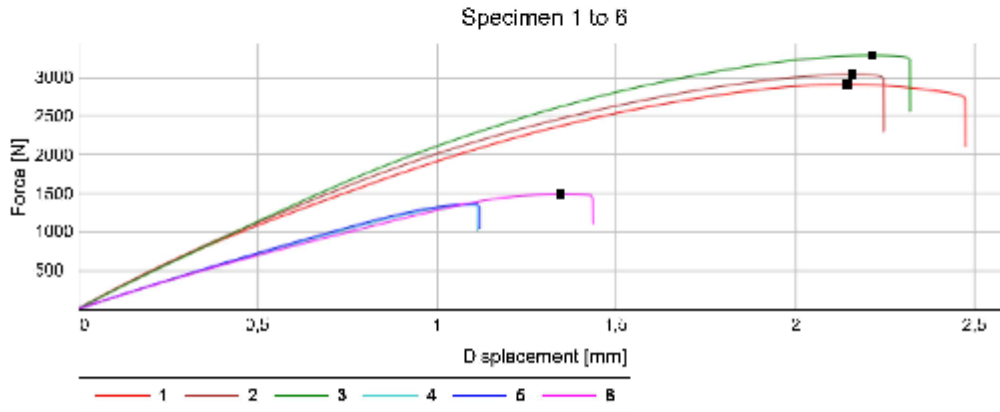
	Displacement at Maximum Tensile stress [mm]	Force at Maximum Tensile stress [kN]	Tensile at Maximum Tensile stress [N/mm²]
1	2,28	2,72	2717,84
2	2,22	2,87	2872,54

	Displacement at Maximum Tensile stress (mm)	Force at Maximum Tensile stress [kN]	Tenacity at Maximum Tensile stress [N/tex]
3	2,12	2,91	2913,86
4	2,22	2,91	2911,21
5	2,02	2,66	2649,19
6	0,87	1,18	1166,40
7	0,72	0,99	993,43
8	0,82	1,18	1177,80
9	0,87	1,16	1162,97
10	0,79	1,09	1057,16

	Tensile displacement at Maximum Tensile stress (mm)	Tensile strain (STRAIN AVE2) at Maximum Tensile stress [%]	Maximum Tensile stress [MPa]
1	2,28	4,58	44,60
2	2,22	4,46	45,68
3	2,12	4,26	46,88
4	2,22	4,46	47,61
5	2,02	4,05	41,89
6	0,87	1,75	19,26
7	0,72	1,46	18,08
8	0,82	1,64	19,63
9	0,87	1,73	19,21
10	0,79	1,68	17,82

- Spanning rek diagram – Mid interpas

Jaws with serrated face
load cell 5 kN
sample ISO 527-1/1B



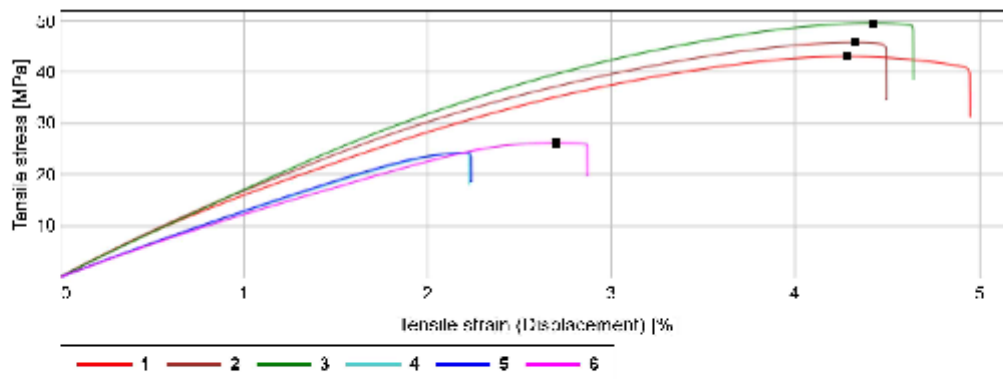
	Modulus (E-modulus) [MPa]	Modulus (Automatic Young's) [MPa]	Modulus (Segment 0,0375 mm - 0,1875 mm) [MPa]
1	—	1772,1248	1764,3628
2	—	1794,8065	1808,2968
3	—	1730,4807	1752,4545
4	—	1338,2062	1322,8515
5	—	1347,9242	1338,2505
6	—	1307,1768	1288,7884

	Modulus (Segment 0,05% - 0,25% strain) [MPa]	Maximum Tensile stress [MPa]	Tensile strain (STRAIN AVE2) at Maximum Tensile stress [mm/mm]
1	1621,1916	43,0819	0,0428
2	1539,8519	45,8116	0,0432
3	1788,4357	49,5780	0,0442
4	1345,8838	24,3189	0,0220
5	1355,6308	24,2878	0,0221
6	1324,2987	26,1927	0,0289

	Tensile stress at Tensile strength [MPa]	Displacement at Break (Standard) [mm]	Tensile stress at Yield (Zero slope) [MPa]

	Tensile stress at Tensile strength [MPa]	Displacement at Break (Standard) [mm]	Tensile stress at Yield (Zero slope) [MPa]
1	43,0819	2,4718	43,0819
2	45,8114	2,2449	45,8118
3	49,5759	2,8179	49,5780
4	24,3199	1,1114	—
5	24,2878	1,1172	—
6	26,1927	1,4329	26,1927

Specimen 1 to 6



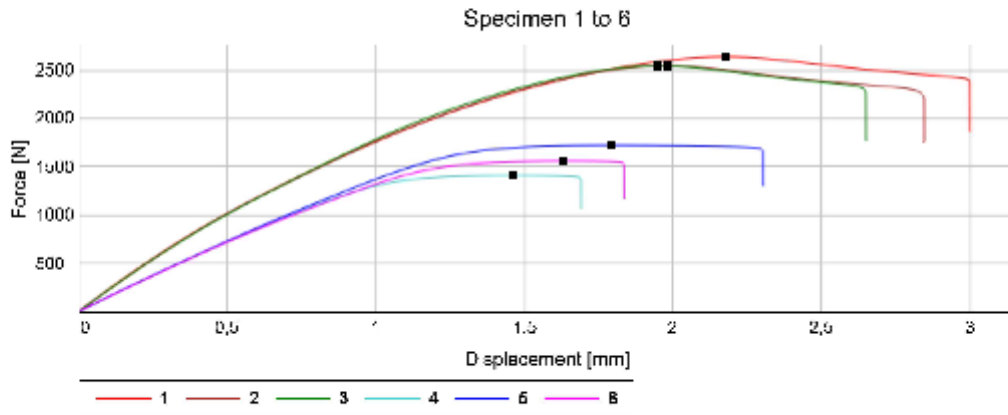
	Displacement at Maximum Tensile stress [mm]	Force at Maximum Tensile stress [kN]	Tenacity at Maximum Tensile stress [N/m ²]
1	2,14	2,91	2912,13
2	2,18	3,04	3040,88
3	2,21	3,29	3295,49
4	1,10	1,35	1351,16
5	1,10	1,38	1380,95
6	1,36	1,48	1482,93

	Tensile displacement at Maximum Tensile stress [mm]	Tensile strain (STRAIN AVE2) at Maximum Tensile stress [%]	Maximum Tensile stress [MPa]
1	2,14	4,29	43,08
2	2,18	4,32	45,81
3	2,21	4,42	48,58
4	1,10	2,20	24,32
5	1,10	2,21	24,29

	Tensile displacement at Maximum Tensile stress (mm)	Tensile strain (STRAIN AVE2) at Maximum Tensile stress (%)	Maximum Tensile stress [MPa]
6	1,35	2,69	28,19

- Spanning rek diagram – Hi interpas

jaws with serrated face
load cell 5 kN
sample ISO 527-1/1B



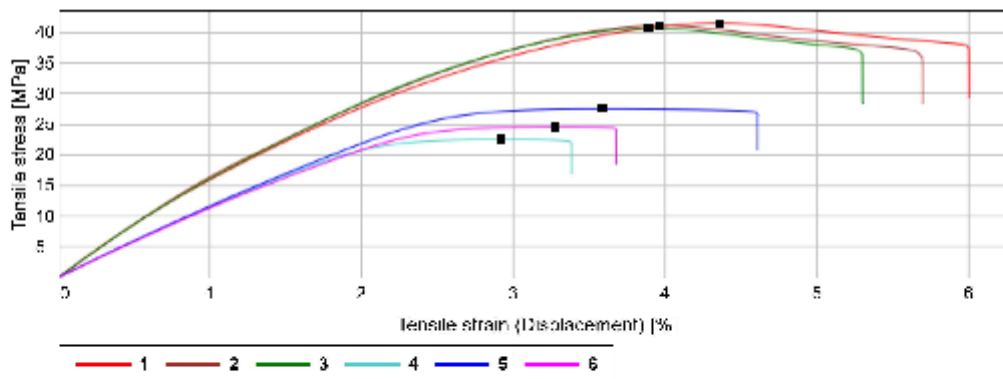
	Modulus (E-modulus) [MPa]	Modulus (Automatic Young's) [MPa]	Modulus (Segment 0,0375 mm - 0,1875 mm) [MPa]
1	---	1748,8468	1761,0677
2	---	1757,3191	1758,9878
3	---	1746,6017	1748,4845
4	---	1214,4381	1205,4497
5	---	1204,8531	1205,0365
6	---	1178,2661	1173,7376

	Modulus (Segment 0,05% - 0,25% strain) [MPa]	Maximum Tensile stress [MPa]	Tensile strain (STRAIN AVE2) at Maximum Tensile stress [mm/mm]
1	1780,3888	41,5721	0,0435
2	1788,0867	41,1603	0,0388
3	1781,6510	40,7395	0,0388
4	1223,3173	22,5661	0,0282
5	1222,0707	27,5351	0,0365
6	1191,8631	24,6818	0,0328

	Tensile stress at Tensile strength [MPa]	Displacement at Break (Standard) [mm]	Tensile stress at Yield (Zero slope) [MPa]
1	1780,3888	2,2	1761,0677
2	1788,0867	2,2	1758,9878
3	1781,6510	2,2	1748,4845
4	1223,3173	1,8	1205,4497
5	1222,0707	1,8	1205,0365
6	1191,8631	1,5	1173,7376

	Tensile stress at Tensile strength [MPa]	Displacement at Break (Standard) [mm]	Tensile stress at Yield (Zero slope) [MPa]
1	41,5721	2,8865	41,5721
2	41,1803	2,8441	41,1803
3	40,7334	2,8470	40,7335
4	22,5561	1,5887	22,5561
5	27,5351	2,3011	27,5351
6	24,6818	1,8343	24,6818

Specimen 1 to 6



	Displacement at Maximum Tensile stress [mm]	Force at Maximum Tensile stress [kN]	Tenacity at Maximum Tensile stress [N/m ²]
1	2,18	2,54	2638,85
2	1,98	2,55	2545,83
3	1,95	2,54	2544,81
4	1,46	1,41	1411,82
5	1,79	1,72	1722,70
6	1,58	1,58	1580,44

	Tensile displacement at Maximum Tensile stress [mm]	Tensile strain (STRAIN AVE2) at Maximum Tensile stress [%]	Maximum Tensile stress [MPa]
1	2,18	4,35	41,57
2	1,98	3,98	41,18
3	1,95	3,88	40,73
4	1,46	2,92	22,57
5	1,79	3,58	27,54

	Tensile displacement at Maximum Tensile stress (mm)	Tensile strain (STRAIN AVE2) at Maximum Tensile stress (%)	Maximum Tensile stress [MPa]
6	1,68	3,28	24,68



VOLG ONS

www.thomasmore.be
fb.com/ThomasMoreBE
[#WeAreMore](https://twitter.com/ThomasMoreBE)

**THOMAS
MORE**