

Faculteit Industriële
Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
elektromechanica

Masterthesis

Automatisering productie steunzolen en optimalisatie CNC-freesmachines

Michael Holtappels
Wouter Willems

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Michael DAENEN

PROMOTOR :

Stefan BOONS

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE 3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE 3500 Hasselt



2023
2024

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
elektromechanica

Masterthesis

Automatisering productie steunzolen en optimalisatie CNC-freesmachines

Michael Holtappels

Wouter Willems

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Michael DAENEN

PROMOTOR :

Stefan BOONS



KU LEUVEN

Woord vooraf

Met genoegen presenteren wij hierbij onze thesis getiteld "Automatisering van de productie van steunzolen en optimalisatie van CNC-freesmachines". Deze thesis is het resultaat van gedegen onderzoek en toewijding gedurende een aanzienlijke periode. We zijn vereert onze bevindingen en inzichten met u te delen.

We willen graag onze oprechte dank uitspreken aan de personen die hebben bijgedragen aan het tot stand komen van deze thesis. In het bijzonder willen we onze waardering uiten aan onze promotoren, Prof. dr. ing. Michael Daenen, en Stefan Boons voor hun onschatbare begeleiding, waardevolle inzichten en voortdurende ondersteuning tijdens het onderzoeksproces. Hun expertise en betrokkenheid waren van onschatbare waarde voor het succes van deze masterproef.

Daarnaast willen we onze dank betuigen aan onze medestudenten en collega's, wiens intellectuele uitwisselingen en constructieve discussies hebben bijgedragen aan onze academische groei en de verfijning van onze ideeën.

Onze oprechte waardering gaat ook uit naar onze familieleden, wiens onvoorwaardelijke steun en aanmoedigende woorden ons hebben geïnspireerd en gemotiveerd gedurende ons academisch traject.

We hopen van harte dat deze thesis een waardevolle bijdrage zal leveren aan het vakgebied en nieuwe perspectieven zal bieden voor toekomstig onderzoek. We hopen dat de inhoud ervan andere studenten zal inspireren en aanmoedigen tot verdere ontwikkelingen binnen dit domein.

Diepenbeek, 21/06/2024

Michael Holtappels

Wouter Willems

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Inhoudsopgave	3
Lijst van tabellen	7
Lijst van figuren	9
Verklarende woordenlijst	1
Verklarende symbolenlijst.....	3
Abstract	5
Abstract in English.....	7
1. Inleiding	9
1.1. Situering.....	9
Probleemstelling.....	21
1.2. Doelstelling.....	22
1.3. Methode	22
1.4. Blik vooruit	24
2. Literatuurstudie	25
2.1. Inleiding	25
2.2. Marktonderzoek	25
2.3. Veiligheid.....	27
2.4. Frezen in zachte materialen.....	28
2.5. Invloed freesparameters	29
2.5.1. Meeloop en tegenloopfrezen	29
2.5.2. Levensduur van de frees	31
2.6. Invloed van de diameter van gaten op de zuigkracht.....	32
2.7. Toepassen van een CNC-sleepmes	33
2.8. 3D-printen.....	35
2.8.1. Extrusieprinten.....	35
2.8.2. Resin printen.....	36
2.8.3. Poederprinten.....	38
2.8.3. Besluit.....	38
3. Concepten.....	39
3.1. Voorgaande concepten.....	39
3.2. Nieuwe concepten.....	40
3.2.1. Concept draadsnijden	40

3.2.2.	Concept vacuümmat	42
3.3.	Conclusie	42
4.	Materiaalselectie vacuümmat	43
4.1.	Huidig materiaal.....	43
4.2.	Kracht op het onderdeel	43
4.3.	Maximale doorbuiging.....	44
4.4.	Ontwerpvereiste	44
4.4.1.	Beperkingen.....	44
4.4.2.	Objectief en vrije variabele.....	44
4.5.	Vertaling objectief en beperkingen	45
4.5.1.	Objectief	45
4.5.2.	Beperking doorbuiging.....	46
4.5.3.	Beperking plastische vervorming	47
4.6.	Granta EduPack	48
	Rangschikken van de materialen.....	48
4.8.	Materiaalselectie	51
4.8.1.	PET (Polyethyleentereftalaat).....	52
4.8.2.	POM (Polyoxymethyleen).....	53
4.8.3.	PP (Polypropyleen).....	53
4.8.4.	PVC (Polyvinylchloride)	54
4.8.5.	PS (Polystyreen)	55
4.9.	Besluit	55
5.	Vacuümtafel optimalisatie.....	57
5.1.	Onderzoek alternatief vacuümtafel	57
5.1.1.	Vacuüm cups	57
5.1.2.	Vacuümfoam	58
5.1.3.	Korrelstructuur.....	59
5.1.4.	Standaard vacuümtafel	60
5.1.5.	Besluit.....	60
5.2.	Testen aanzuigkracht en evaluatie connectiepunten	61
5.2.1.	Bespreking resultaten	61
5.2.2.	Besluit.....	63
5.3.	Optimalisatie vlakke vacuümmat.....	63
5.3.1.	Vorbereiding	63
5.3.2.	Ontwerp vlakke vacuümmat	65
6.	Optimalisatie freesstrategieën	69

6.1.	Afwerkingskwaliteit bolfrees.....	69
6.1.1.	Vorbereiding test	70
6.1.2.	Bespreking resultaten	71
6.1.3.	Besluit.....	74
6.2.	Optimale freesvervanging.....	75
6.2.1.	Situering	75
6.2.2.	Aangeboden oplossing.....	75
6.2.3.	Veranderingen.....	75
7.	Mechanisch ontwerp.....	77
7.1.	Bepaling afwijking freesblokken	77
7.1.1.	Bespreking resultaten	77
7.1.2.	Besluit.....	78
7.2.	Ontwerp prototype	79
7.2.1.	Eerste aanpassingen.....	81
7.2.2.	Optimalisatie concept	82
7.3.	Prototype 3D-printen	84
7.3.1.	Instellingen	84
7.3.2.	Resultaat	86
7.4.	Test prototype	87
7.4.1.	Vorbereiding freestest.....	87
7.4.2.	Resultaten test.....	89
7.4.3.	Besluit.....	89
7.5.	Tweede prototype.....	90
7.5.1.	Nieuwe instellingen	90
7.5.2.	Resultaat	90
7.5.3.	Besluit.....	91
7.6.	Test herwerkt prototype	92
7.6.1.	Vorbereiding freestest.....	92
7.6.2.	Resultaten freestest.....	92
7.6.3.	Besluit.....	94
8.	Finale resultaten	95
8.1.	Inleiding	95
8.2.	Eerste test: Traditionele werkwijze.....	95
8.3.	Tweede test: nieuw productieproces	97
8.4.	Derde test: nieuw productieproces zonder contour.....	99
8.5.	Besluit	101

8.5.1. Aanbevelingen en opmerkingen	102
8.5.2. Conclusie	102
8. Besluit.....	103
Referentielijst	105
Bijlagenlijst	109
Bijlage A: 2D tekening van de volledige mat	110
Bijlage B: 2D tekeningen van de opgesplitste mat.....	111
Bijlage C: 2D tekening van eerste blok.....	112
Bijlage D: Wekelijkse checklist freesmachine	113
Bijlage E: Handleiding vervangen en kalibreren frees.....	114
Bijlage F: Excel document bijhorend tot de handleiding	120

Lijst van tabellen

Tabel 1: Uitleg symbolen	45
Tabel 2: Overzicht gekozen materialen.....	51
Tabel 3: Hoogtemeting met lagen: blauw/oranje/zwart	77
Tabel 4: Hoogtemeting met lagen blauw/zwart.....	77
Tabel 5: Hoogtemeting met lagen zwart/zwart	78
Tabel 6: Tijden traditioneel productieproces.....	95
Tabel 7: Procestijden nieuw productieproces.....	97
Tabel 8: Procestijden nieuw productieproces zonder contour.....	99

Lijst van figuren

Figuur 1: Gemodelleerde steunzool in GpManager [2].....	9
Figuur 2: Samenstelling freesblok [2].....	9
Figuur 3: Einde freescycli [2].....	20
Figuur 4: Freesblok einde freesbewerking [2].....	20
Figuur 5: Steunzool op leest slijpen [2].....	21
Figuur 6: Lijmen van de bekleding [3].....	26
Figuur 7: 3D-geprinte steunzolen [8].....	26
Figuur 8: Driesnijders frees die geschikt is voor schuimblokken [10].....	28
Figuur 9: Meeloop frezen [13: p. 104].....	29
Figuur 10: Tegenloop frezen [13: p. 105].....	30
Figuur 11: Levensduur freeskop t.o.v. de snelheid [14].....	31
Figuur 12: Diameter/zuigkrachtverhouding [17: p. 14].....	32
Figuur 13: Sleepmes [21].....	33
Figuur 14: Uiteenzetting hot end en cold end [23].....	35
Figuur 15: Werking van een extruder op een hot end [23].....	36
Figuur 16: Voorbeeld van een resin 3D-printer [25].....	37
Figuur 17: Werking van een SLA, DLP en LCD-printer in volgorde [26].....	37
Figuur 18: Werking van een poeder printer [28].....	38
Figuur 19: Schematische voorstelling huidig proces.....	40
Figuur 20: Herwerkte freesblok.....	41
Figuur 21: Schematische voorstelling concept 1.....	41
Figuur 22: Schematische voorstelling concept 2.....	42
Figuur 23: Overzicht composiet samenstelling.....	48
Figuur 24: Thermische limieten.....	48
Figuur 25: Overzicht bekomen materialen.....	50
Figuur 26: Chemische samenstelling PET [29].....	52
Figuur 27: E-modulus t.o.v. de temperatuur PET.....	52
Figuur 28: Elasticiteitsmodulus i.f.v. de temperatuur bij het materiaal POM.....	53
Figuur 29: Chemische samenstelling PP [29].....	53
Figuur 30: E-modulus t.o.v. de temperatuur[30].....	54
Figuur 31: Chemische samenstelling PVC [31].....	54
Figuur 32: De temperatuur bij het materiaal PS.....	55
Figuur 33: Vacuüm cups.....	57
Figuur 34: Vacuümfoam.....	58
Figuur 35: Vacuümaanzuiging met korrelstructuur.....	59
Figuur 36: Standaard vacuümtafel.....	60
Figuur 37: Contourfrezen.....	61
Figuur 38: Onderzijde steunzool met verschillende connectiepunten.....	61
Figuur 39: Resultaten test 1 en 2.....	62
Figuur 40: Onderzijde steunzool test 3.....	62
Figuur 41: Resultaat test 3.....	63
Figuur 42: Steunzolenmaten 34 en 46.....	64
Figuur 43: Ligging van schoenmaat 34 en 46 in het freesblok.....	64
Figuur 44: Overlappend oppervlak tussen de schoenmaten.....	65
Figuur 45: Overlappende gaten met schoenmaten.....	65

Figuur 46: Vergroting gaten	66
Figuur 47: Extra toegevoegde gaten.....	66
Figuur 48: Geoptimaliseerde vacuümmat	67
Figuur 49: Gebruikte bolrees	69
Figuur 50: Zijprofiel verlijmde freesblokken	70
Figuur 51: Verlijmen freesblokken	70
Figuur 52: Dieptezicht van de gemodelleerde test	70
Figuur 53: Modelleren van de test.....	71
Figuur 54: Resultaat freestest	72
Figuur 55: Close-up geboorde gaten	72
Figuur 56: Close-up van de middelste vormen.....	73
Figuur 57: Close-up van grote gaten aan de bovenzijden	74
Figuur 58 Basis van het ontwerp	79
Figuur 59: Verzinken van de gaten	79
Figuur 60: Testen van de golfvorm	80
Figuur 61: Eindresultaat prototype.....	80
Figuur 62: Opgedeelde mat	81
Figuur 63: Herwerking opgedeelde mat	81
Figuur 64: Opgesplitste mat	82
Figuur 65: Graving in blok één	83
Figuur 66: Voorziening gaten voor magneten.....	83
Figuur 67: Close-up laaghoogte en brim.....	84
Figuur 68: Close-up van de infill en de wand dikte	85
Figuur 69: Resultaat prototype 1	86
Figuur 70: Hoogteverschil prototype 1 t.o.v. freesblok.....	87
Figuur 71: Modeleren onderkant steunzool.....	87
Figuur 72: herkalibreren freeskop	88
Figuur 73: Aflezing nieuw nulpunt	88
Figuur 74: Controle oppervlak	89
Figuur 75: Freestest prototype.....	89
Figuur 76: Resultaat prototype 2	91
Figuur 77: Hoogteverschil prototype twee t.o.v. freesblok	91
Figuur 78: Uitsneden onderkant steunzolen	93
Figuur 79: Uitsneden bovenkant steunzolen	93
Figuur 80: Procentuele verdeling stappen traditioneel productieproces.....	96
Figuur 81: Procentuele manuele arbeid traditioneel productieproces	96
Figuur 82: Procentuele verdeling stappen nieuw productieproces.....	98
Figuur 83: Procentuele manuele arbeid nieuw productieproces.....	98
Figuur 84: Nieuw productieproces zonder contourfreesen	99
Figuur 85: Procentuele verdeling stappen nieuw productieproces zonder contour.....	100
Figuur 86: Procentuele manuele arbeid nieuw productieproces zonder contour.....	101

Verklarende woordenlijst

CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numerical Control
EVA	Etyhleenvinylacetaat
Duralux	Composietmateriaal gebruikt omwille van zijn duurzaamheid en lichtgewicht eigenschappen
Leest	Boog aan de binnenzijde van de voet
PET	Polyethyleentereftalaat
POM	Polyoxymethyleen
PP	Polypropyleen
PS	Polystyreen
PVC	Polyvinylchloride
SBR	Styreen Butadiene Rubber

Verklarende symbolenlijst

ρ	Massadichtheid
h	Hoogte mat
L	Lengte
δ	Doorbuiging
MI	Materiaal index
σ_y	Spanning
E	Elasticiteitsmodulus
F	Kracht
A	Oppervlakte

Abstract

De huidige productie van steunzolen bij Spronken Orthopedie vereist intensieve manuele arbeid zoals het uitsnijden van de contouren met een breekmes en het afwerken op een slijpmachine. Deze werkwijze is niet alleen tijdrovend, maar ook is de pasvorm die op het oog geslepen wordt onvoldoende reproduceerbaar. Deze masterproef beoogt de manuele arbeid met minimaal 15% in te korten door op leest slijpen van steunzolen te automatiseren.

Eerst moeten de freesblokken waaruit de steunzolen gemaakt zijn, omgedraaid worden op de vacuümtafel. Hierbij is er gekozen om een vacuümmat te ontwerpen die het inverse reliëf van de freesblokken benadert. Vervolgens is er voor deze mat een grondige materiaalstudie uitgevoerd. Hierna is een 3D-model ontworpen en uitgestuurd naar kunststofverwerkingsbedrijven. Dit had een negatief resultaat omwille van de kostprijs, waarbij er overgestapt is naar het 3D-printen van de vacuümmat.

Door het gebruik van een nieuwe vacuümmat is de manuele arbeidstijd met 36 % ingekort. Er zijn enkel nog kleine afwerkingen nodig, zoals het uitsnijden van een deel van de steunzool en het verwijderen van bramen. De pasvorm is ook consistent en reproduceerbaar. Deze methode vertoont goede resultaten voor kleine batchgroottes en complexe steunzolen. Helaas ondervindt deze methode significante vacuümverliezen naarmate de batchgrootte vergroot. Verder onderzoek is aanbevolen.

Abstract in English

The current production of insoles at Spronken Orthopedics requires intensive manual labor such as cutting out contours with a breaker knife and finishing on a grinding machine. This method is not only time-consuming, but also the fit that is sharpened by eye is insufficiently reproducible. This master's thesis aims to shorten manual labor by at least 15% by automating the grinding step of insoles.

First, the milling blocks from which the insoles are made must be turned over on the vacuum table. Here the choice was made to design a vacuum mat that approximates the inverse relief of the milling blocks. A thorough material study was then performed for this mat. After this, a 3D-model was designed and sent out to plastic processing companies. This had a negative result because of cost, switching to 3D-printing the vacuum mat.

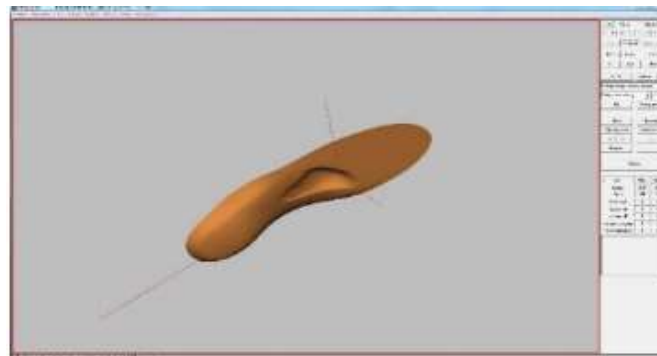
Using the new vacuum mat reduced manual labor time by 36%. Only minor finishing work is required, such as cutting out part of the insole and removing burrs. The fit is also consistent and reproducible. This method shows good results for small batch sizes and complex insoles. Unfortunately, this method experiences significant vacuum losses as the batch size increases. Further research is recommended.

1. Inleiding

1.1. Situering

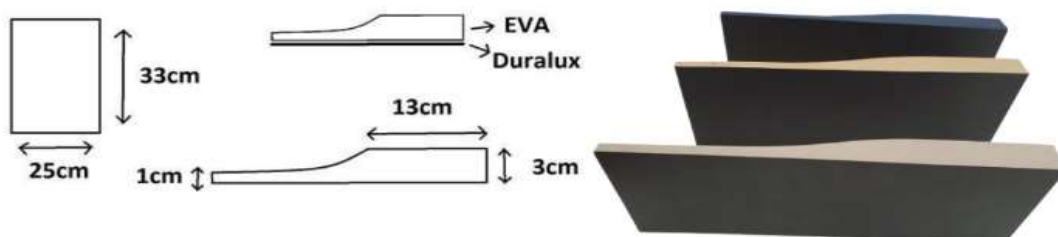
Spronken Orthopedie is een bedrijf in de orthopedische sector, gevestigd in België. Spronken biedt een uitgebreid aanbod aan technische orthopedie en revalidatie: arm- en beenprotheses, braces en orthesen, korsetten, bandages, steunzolen, elastische kousen, orthopedische schoenen, mobiliteitshulp en thuiszorgartikelen [1].

Voor deze casus ligt de focus op het optimaliseren van het productieproces van de steunzolen. Het huidige productieproces start bij het scannen van een voetzool bij een orthopedist. Deze scan wordt vervolgens doorgestuurd naar Spronken samen met een maatkaart. Hierop staat de opdracht vermeld voor de bouw van de steunzool en de gegevens over de hardheid van de steunzolen. Via het GpManager CAD/CAM-systeem wordt een steunzool gemodelleerd (zie fig. 1). Elke gemodelleerde steunzool is uniek. Voor de gemodelleerde steunzolen worden freesbanen gegenereerd in een CNC-bestand.



Figuur 1: Gemodelleerde steunzool in GpManager [2]

Deze bestanden worden ingeladen in de GpRemote, het besturingssysteem van de freesmachine, met een maximum van 10 paar per freescycli. De freesblok bestaat uit EVA met verschillende hardheden. De onderkant van de freesblokken bevatten steeds een harde duralux-laag van 1,2 mm (zie fig. 2). De freesblokken worden manueel op de freestafel geplaatst, waar ze worden aangezogen door een vacuümsysteem.



Figuur 2: Samenstelling freesblok [2]

De drieassige freesmachine gebruikt een bolrees om alle steunblokken samen uit te frezen (zie fig. 3). Indien de freestafel niet zijn maximale capaciteit heeft bereikt van 10 freesblokken dan moet de vrije oppervlakte afgedekt worden om een goed houdbaar vacuüm te creëren.



Figuur 3: Einde freescycli [2]

Na de freesbewerking worden de freesblokken manueel uit de CNC-machine verwijderd. Vervolgens moeten beide steunzolen manueel uitgesneden worden uit de freesblok met een breekmes (zie fig. 4).



Figuur 4: Freesblok einde freesbewerking [2]

Als laatste stap in het proces wordt de leest uit de steunzool geslepen door gebruik van een slijpmachine (zie fig. 5). De leest van een steunzool is de inkeping die aan de onderzijde zichtbaar is. Deze zorgt ervoor dat de voet de correcte ondersteuning van de steunzool zal krijgen.



Figuur 5: Steunzool op leest slijpen [2]

Probleemstelling

Door de beperkingen van de CNC-machine moeten er extra manuele werken uitgevoerd worden voor de afwerking van de steunzool. De huidige werkwijze bij het manuele werk voor het vervaardigen van de steunzolen vertoont verschillende problemen, zoals het vermoeiende proces van het ruwweg uitsnijden van de contour met een breekmes, de noodzaak van verdere handmatige afwerking op de slijpmachine en het gebrek aan precisie bij het aanpassen van de leest aan de individuele voetvorm. Bovendien vereist het opleiden van operators voor deze taken aanzienlijke ervaring en is het moeilijk om de juiste vorm van de leest te bereiken. De huidige machine voor het frezen van steunzolen kent ook zijn beperkingen die de efficiëntie en precisie van het proces beïnvloeden. De onmogelijkheid om de freeskop of tafel schuin te plaatsen beperkt de mogelijkheid om de complexe vorm van de leest te bereiken. Bovendien zijn de freesparameters niet geoptimaliseerd, wat resulteert in suboptimale resultaten. Bijkomend is de bolfrees initieel niet ontworpen om door de duralux-laag heen te frezen [3]. Tot slot, het gebrek aan ruimte in de freesopstelling maakt het niet mogelijk om toolwissels uit te voeren.

1.2. Doelstelling

Het verminderen van manueel werk door het optimaliseren van de CNC-freesmachine dit wil Spronken aanpakken door twee processtappen te optimaliseren: ten eerste, het automatisch uitsnijden van de steunzolen uit de freesblokken en ten tweede, de complexe vorm van de leest uit de steunzool frezen zodat dit niet meer manueel op de slijpmachine dient te gebeuren.

De uiteindelijke doelstellingen zijn:

- verminderen van manuele arbeid tijdens de productiestappen;
- meer consistent uitsnijden/frezen van de leest uit de steunzool

Het huidige proces voor een batch van 10 paar steunzolen duurt 160 tot 190 minuten. Het doel wordt verwezenlijkt als minimaal één of meer van de volgende doelstellingen bereikt zijn:

- minder manuele arbeid,
- snellere batchverwerking,
- volledige automatisering van de productiestappen,
- efficiënter proces.

1.3. Methode

Werkpakket 1: Voorbereiding

De eerste stap is een duidelijk beeld krijgen van het productieproces dat geoptimaliseerd en aangepast gaat worden. Er is een bezoek geweest bij Spronken Orthopedie. Hier werd kennisgemaakt met de externe promotor en is er een duidelijk zicht gekregen op de masterproef.

Op basis van de verworven informatie worden er studies gedaan naar de kern van het probleem. Dit wordt duidelijk door de probleemstelling op te splitsen in kleinere deelproblemen door gebruik te maken van een morfologisch overzicht.

Werkpakket 2: Optimaliseren vacuümtafel

Tijdens het onderzoek bij de firma Spronken werd duidelijk dat de vacuümtafel niet optimaal wordt benut. Om meer inzicht te verkrijgen in de mogelijkheden tot optimalisatie, is er een onderzoek gestart samen met onderzoeksgroep ACRO. Hierbij wordt er meer informatie vergaard over het effectieve gebruik van een vacuümtafel en wordt er verkend welke verbeteringen mogelijk zijn.

- testen van de freesblokken/steunzolen op verschillende vacuümtafels,
- informatie verkrijgen over het optimaal gebruiken van een vacuümtafel,
- testen van zuignappen op de steunzolen,
- informatie verkrijgen over de onderdelen waaruit een vacuümtafel bestaat.

Werkpakket 3: Optimaliseren/herwerken van het huidige productieproces

In de volgende stap wordt onderzocht of de volgorde in het productieproces optimaal is. Er wordt bekeken of er productiestappen (bijvoorbeeld het draadsnijden van de freesblokken bij de fabrikant) binnen het bedrijf kunnen gebeuren om zo de totale werking te verbeteren/versnellen. Eveneens wordt bekeken of bepaalde productiestappen samengenomen kunnen worden (bijvoorbeeld het uitsnijden en het op leest slijpen van de steunzool). Dit houdt in:

- studie naar optimale werking van de machines,
- presenteren externe promotor,
- prototype ontwerpen,
- prototype ontwerp optimaliseren,
- contact opnemen met de leveranciers.
-

Werkpakket 4: Proces optimaliseren

Vervolgens wordt er verder onderzoek gedaan naar het optimaliseren van de freesbewerking. Uit studies zal blijken of er daadwerkelijk ruimte voor verbetering is binnen de freesbewerking. Indien nodig zal er contact opgenomen worden met een derde partij die zijn expertise kan geven over het verbeteren van de freesbewerking. De ontworpen prototypes uit werkpakket 3 zullen worden getest en indien nodig geoptimaliseerd. Daarnaast zal de zuigkracht van de vlakke mat worden getest om te bepalen of deze voldoende krachtig is voor de veranderingen in het proces. Tijdens deze fase zullen de volgende stappen worden doorlopen:

- prototype testen en optimaliseren ,
- testen van het geoptimaliseerd prototype,
- optimaliseren van de freesstrategie,
- testen van de zuigkracht van de huidige vacuüm mat met uitgefreesde leest blokken,
- aanpassen van de 2^{de} vacuüm mat,
- testen van de tweede geoptimaliseerde vacuümmat.

Werkpakket 5: Realiseren van gevonden verbeteringen

Tot slot wordt het einddoel gerealiseerd door de vier werkpakketten te combineren. De eindaanpassingen worden grondig getest alvorens ze geïmplementeerd worden in het productieproces. Dit houdt in:

- complete implementatie,
- de veiligheidsnormen herbekijken,
- een kosten-batenanalyse uitvoeren.

1.4. Blik vooruit

De onderzoeken en testen met betrekking tot de optimalisatie van het frezen van steunzolen biedt een goede basis voor toekomstige ontwikkelingen en verbeteringen in de productie van steunzolen. Meerdere testen gaven bevestiging welke de beste prestaties van vacuüm aanzuigmethode levert, er is een duidelijke richting voor verdere ontwikkeling op dat gebied.

Bovendien bieden de testen met betrekking tot de freesstrategieën waardevolle inzichten in het gebruik van een bolfrees voor het frezen van steunzolen. Met de juiste aanpassingen en optimale toerentallen is het mogelijk om een goede afwerkingskwaliteit te bereiken, hoewel nabewerking nog steeds vereist kan zijn.

Naast de mechanische prototypes moeten ook andere aspecten, zoals materiaalkeuze en freesparameters worden geëvalueerd om het productieproces verder te optimaliseren.

2. Literatuurstudie

2.1. Inleiding

Voorafgaand aan het ontwerpproces is een literatuurstudie uitgevoerd met als doel inzicht te verkrijgen in het bestaande aanbod en de productiemethodes van steunzolen, de veiligheidsvoorschriften voor degelijke freesmachines, freesparameters die de afwerkingskwaliteit kunnen beïnvloeden en meer inzicht in het vacuümzuigen.

2.2. Marktonderzoek

Het huidige aanbod van steunzolen wordt onderzocht door middel van een marktonderzoek. Dit onderzoek geeft een gedetailleerder inzicht in de productieprocessen van steunzolen op de hedendaagse markt. Dit onderzoek omvat een grondige analyse van websites van vooraanstaande bedrijven zoals Vigo Group [3], Matton OrthoMedi [4], Goed [5], Orthovandewiele [6] en Runners' lab [7]. De focus is specifiek op de ontwikkeling van op maat gemaakte orthopedische inlegzolen.

De bevindingen tonen aan dat de meeste bedrijven vergelijkbare werkwijzen hanteren. Het proces begint doorgaans met het nauwkeurig opmeten van de voeten. Deze statische meting gebeurt op twee manieren: door middel van een voetafdruk in schuim of door middel van een 3D-scan. De locaties en de methodes van meten variëren afhankelijk van de vestiging of de voorkeur van de orthopedisch specialist in het ziekenhuis.

De verzamelde meetgegevens, inclusief informatie over de gewenste hardheid van de steunzolen, worden vervolgens naar de producent gestuurd. Bij bedrijven waar de meting in schuim plaatsvindt, wordt binnen de fabriek een 3D-scan van de afdruk gemaakt om deze digitaal beschikbaar te maken.

Runners' lab [7] is hier een uitzondering op omdat zij gebruik maken van een geavanceerde voetscan-technologie, waarbij de voet dynamisch wordt gemeten omdat een voet bedoeld is om te bewegen. Goed [5] biedt ook deze geavanceerde scans aan, maar alleen voor steunzolen die 3D-geprint worden.

Op basis van de 3D-scans worden steunzolen gemodelleerd die perfect aansluiten op de gescande voet. Vervolgens worden deze modellen met een CNC-machine gefreesd. Daarna worden de steunzolen bijgeslepen om in de schoenen van de klant te passen. Tot slot worden de steunzolen afgewerkt met een stoffen bekleding die erop gelijmd wordt zoals in figuur 6 te zien is.



Figuur 6: Lijmen van de bekleding [3]

Een onderscheidend kenmerk tussen de verschillende producenten is het materiaalgebruik voor de steunzolen. Ieder bedrijf biedt verschillende hardheden van EVA-kunststof aan. Alle bedrijven behalve Runners' lab en de Vigo Group bieden ook kurk aan. De Vigo Group [3] vermeldt daarnaast dat zij steunzolen van leer aanbieden, een optie die niet bij andere fabrikanten wordt genoemd. Een opkomende technologie die wordt aangeboden door Goed en Runners' lab zijn Phits steunzolen, zie figuur 7. Deze steunzolen worden 3D-geprint en zijn geoptimaliseerd voor actieve personen. Deze steunzolen zijn in samenwerking met Materialise en RSSCAN (een zusterbedrijf van Runners' lab) ontwikkeld. Spronken Orthopedie is ook bezig met een onderzoek naar het 3D-printen van steunzolen.



Figuur 7: 3D-geprinte steunzolen [8]

2.3. Veiligheid

In dit hoofdstuk van het literatuuronderzoek wordt dieper ingegaan op de veiligheidseisen met betrekking tot de CNC-freesmachines. Het doel hiervan is om een veilig gebruik van de CNC-freesmachine te waarborgen voor de operators tijdens de productie.

Volgens referentie [9] moet een CNC-freesmachine voldoen aan volgende technische, ergonomische en operationele eisen om een veilige werkomgeving te waarborgen:

- **CE-markering voor machines:** Machines die na 1 januari 1995 zijn aangeschaft, moeten voorzien zijn van een CE-markering. Dit keurmerk bevestigt dat het product voldoet aan de minimale veiligheidseisen.
- **Gebruiksaanwijzing:** Machines moeten alleen worden gebruikt volgens de instructies in de meegeleverde handleiding.
- **Veiligheidsinstructiekaart:** Voor elke machine moet er een veiligheidsinstructiekaart in het Nederlands beschikbaar zijn met duidelijke bedieningsinstructies. Werknemers die een andere moedertaal spreken, moeten ook adequate instructies ontvangen.
- **Aan-/uitknop en noodstop:** Elke machine mag slechts één knop hebben voor het in- en uitschakelen. Daarnaast moet er, indien nodig, een noodstop aanwezig en gemakkelijk bereikbaar zijn.
- **Veilige positionering:** Machines moeten zo worden geplaatst dat er geen risico's ontstaan, zoals verschuiving, omvallen, kantelen, elektrocutie of oververhitting.
- **Opleiding en veiligheidsinstructies:** Werknemers moeten voldoende getraind zijn en regelmatig worden bijgestuurd over de nieuwste veiligheidsinstructies.
- **Afdekking van bewegende onderdelen:** Bewegende onderdelen van machines moeten goed worden afgeschermd of beveiligd. Deze beveiligingen moeten ook periodiek worden gecontroleerd.

2.4. Frezen in zachte materialen

De schoenzolen worden vervaardigd uit blokken EVA, een uiterst zacht materiaal met een schuimachtige structuur. Bij het frezen van dit materiaal dienen zowel de voordelen als de nadelen zorgvuldig in overweging te worden genomen.

Allereerst is het van essentieel belang een geschikte frees te gebruiken die in staat is om door het schuim van de EVA-blokken te snijden zoals figuur 8. In [10] wordt benadrukt dat een frees met meerdere snijkanten onder een flauwe hoek vereist is, zodat er minder aan het materiaal getrokken zal worden. Dit resulteert in een vloeiende beweging bij het betreden en verlaten van de EVA-blokken. [11] wijst erop dat frezen na verloop van tijd hun scherpte verliezen door gebruik. Daarom is het cruciaal om tijdig de frees te vervangen, omdat het behoud van een scherpe frees essentieel is voor een hoogwaardige oppervlaktekwaliteit (zie bron [10, 11, 12]). Een botte frees kan leiden tot rafelen en een ongewenste afwerking van het eindproduct.



Figuur 8: Driesnijders frees die geschikt is voor schuimblokken [10]

Bij het frezen is ook een zorgvuldig ontworpen freesgeometrie van groot belang. Dit is niet alleen bevorderlijk voor een optimale oppervlakteafwerking en het vergemakkelijken van het verspanen van de blokken, maar het voorkomt ook schade aan het freesblok. Zachte materialen lopen namelijk het risico beschadigd te worden door de mechanische belasting die de frees op het blok uitoefent, zoals beschreven in [11]. Om verbranding of "koeken" op zachte materialen te voorkomen, is een constante

en voldoende voeding tijdens het frezen van groot belang, zoals aangegeven in [12]. Verder wordt in [12] benadrukt dat luchtkoeling de voorkeur heeft boven koelwater of olie, en dat nabewerking altijd noodzakelijk is bij zachte materialen om eventuele indrukkingen van het voorfrezen weg te werken.

Tijdens het voorfrezen wordt aanbevolen om 0,2 millimeter extra te laten staan boven de uiteindelijke maat, zodat de juiste vorm kan worden bereikt na het frezen. Tot slot wordt in [12] aangegeven dat bij het klemmen van zachte materialen rekening moet worden gehouden met de kracht die op het blok wordt uitgeoefend om vervorming van het freesblok te voorkomen. Het gebruik van hydraulische klemmen wordt daarom afgeraden, omdat het anders kan leiden tot afwijkingen van het eindontwerp, ongeacht of de CNC-machine het programma correct doorloopt.

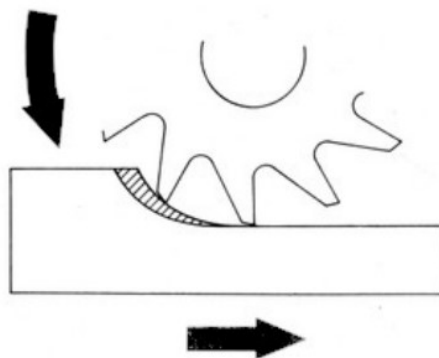
2.5. Invloed freesparameters

2.5.1. Meeloop en tegenlooppfreen

Volgens [13] zal de draairichting van de frees een rol spelen in de verspanende bewerking van materialen. De bewegingsrichting van de frees kan onderverdeeld worden in twee hoofdcategorieën: meeloop en tegenlooppfreen.

- meeloop frezen

Bij meelopend frezen is de bewegingsrichting van het werkstuk hetzelfde als die van de frees. De snijbewerking start met de maximale dikte van een spaan en vermindert dan naar nul (zie fig. 9). Dit resulteert in een drukkende beweging van de frees.

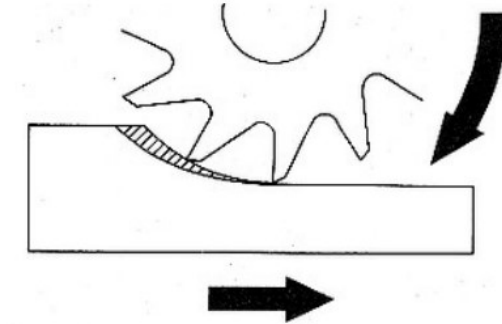


Figuur 9: Meeloop frezen [13: p. 104]

Door deze bewerking is de afgelegde weg van elke tand in het materiaal ongeveer 3% korter dan bij tegenlooppfreen dit leidt tot een iets langere standtijd. Het nadeel van deze bewegingsrichting is echter dat het ineens een goede hap uit het materiaal haalt. Dit kan resulteren in grotere krachten op de tanden van de frees maar voor een toepassing in kunststof is dit geen probleem. Het frezen in meeloop geeft een goede oppervlaktekwaliteit.

- Tegenloopfrezen

Bij tegenloopfrezen is de bewegingsrichting van het werkstuk tegengesteld als die van de frees. De snijbewerking start met een spaan van 0 en vermeerderd dan naar de maximale dikte, dit resulteert in een trekkende beweging (zie fig. 10).



Figuur 10: Tegenloop frezen [13: p. 105]

Deze bewerking werd vooral gebruikt om de spelling van de assen op te heffen. Het snijproces verloopt vlot op voorwaarde dat de tanden scherp genoeg zijn. De krachten die optreden zijn lager dan die van meeloopfrezen. Deze methode resulteert in een slechtere afwerkingskwaliteit, zeker bij degradatie van de scherppte van de tanden op de freeskop.

Uit dit resultaat kan besloten worden dat meeloopfrezen de ideale strategie is voor het uitfrezen van steunzolen. Deze methode heeft als voordelen een hogere afwerkingskwaliteit en een betere standtijd.

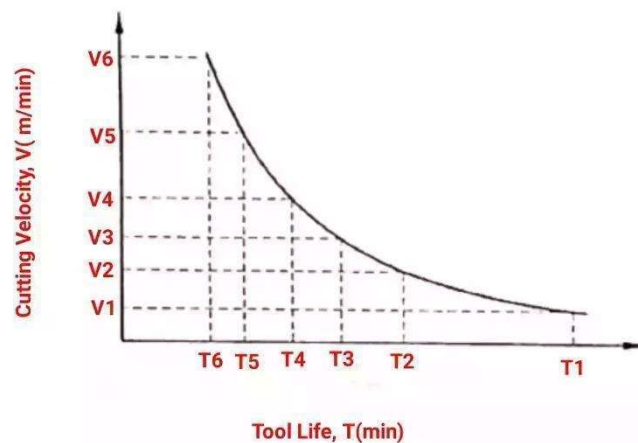
2.5.2. Levensduur van de frees

De levensduur van een freeskop speelt een cruciale rol in het efficiënt en kosteneffectief bewerken van materialen zoals EVA en Duralux bij het vervaardigen van steunzolen. Het frezen van deze materialen vereist specifieke aandacht voor de slijtage van de freeskop, aangezien deze invloed heeft op de kwaliteit van het gefreesde product. Deze inleiding richt zich op het verkennen van de factoren die de levensduur van freeskoppen beïnvloeden tijdens het bewerken van EVA en Duralux, met als doel inzicht te verschaffen in optimalisatiestrategieën die bijdragen aan duurzame en efficiënte freesprocessen.

Gedurende inspectiemomenten van de machinale apparatuur die in gebruik is bij Spronken Orthopedie werd geconstateerd dat er onvoldoende aandacht wordt besteed aan de evaluatie van de scherpte van de freeskop. Dit gaf aanleiding tot een verminderde afwerkingskwaliteit van de vervaardigde steunzolen.

Volgens [14] zijn er verschillende cruciale factoren die impact hebben op de levensduur van de frees.

- de freessnelheid heeft een drastische impact op de levensduur van de frees (zie fig. 11).



Figuur 11: Levensduur freeskop t.o.v. de snelheid [14]

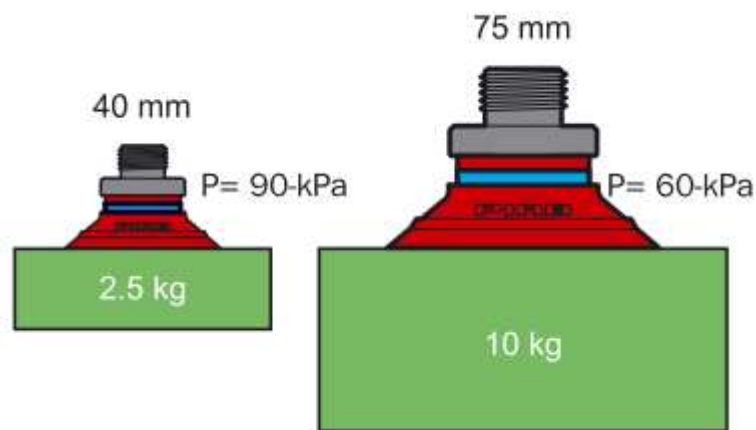
De warmte van de freeskop heeft ook een impact op de levensduur. Indien de temperatuur stijgt zal de levensduur dalen.

- Voeding en snediediepte spelen een cruciale rol, indien de parameters vergroot worden zal de wrijving tussen het punt van het gereedschap en het werkstuk toenemen. Hierdoor daalt de levensduur van de frees.

2.6. Invloed van de diameter van gaten op de zuigkracht

De huidige vacuümtafel is voorzien van een gelijkmatig verdeeld patroon van gaten waardoor vacuüm wordt aangezogen. Deze gaten hebben allemaal dezelfde kleine diameter, en gezamenlijk genereren ze voldoende zuigkracht om een freesblok op zijn plaats te houden. Echter, bij kleinere werkstukken is deze zuigkracht mogelijk ontoereikend, waardoor aanpassingen nodig zijn om meer zuigkracht op een specifiek punt te verkrijgen.

Volgens de richtlijnen van [15, 16, 17] betekent het vergroten van de diameter van de gaten een toename van de aanzuigkracht (zie fig. 12).



Figuur 12: Diameter/zuigkrachtverhouding [17: p. 14]

Niet alleen de grootte van de gaten, maar ook hun verdeling over de vacuümtafel moeten worden aangepast. Het is essentieel om ervoor te zorgen dat de gaten groter worden daar waar er overlapping plaatsvindt van verschillende schoenmaten. Om vacuümverlies te minimaliseren, dienen de gaten juist kleiner te worden gemaakt op plaatsen waar er minder overlapping is tussen de verschillende schoenmaten. Deze optimalisaties dragen bij aan een efficiënter gebruik van het vacuümsysteem en verminderen zowel de operationele kosten als de ecologische impact.

2.7. Toepassen van een CNC-sleepmes

Op de huidige CNC-machine is het niet mogelijk met een bolfrees de contour volledig uit te snijden zonder dat men het onderliggend materiaal beschadigt. De bolfrees is eveneens initieel niet ontworpen om contour of boorbewerkingen uit te voeren. Eén van de vereisten voor dit project is het automatiseren van het manueel uitsnijproces. Deze literatuurstudie bouwt verder op de mogelijkheid om een toolwissel uit te voeren waarbij een sleepmes gebruikt kan worden (zie fig. 13). Hierbij wordt eerst de steunzool uitgefreesd uit de freesblok en vervolgens vindt er een toolwissel plaats waarbij de bolfrees verwisselt wordt met een sleepmes. Tot slot snijdt het sleepmes de contour volledig uit, het afgewerkte product is dan een los paar steunzolen.



Figuur 13: Sleepmes [21]

Volgens bron [21] is een sleepmes een ideaal voorwerp om contouren uit te snijden. Hierbij wordt verduidelijkt dat een sleepmes simuleert hoe een dominante hand een mes zou hanteren. Het bestaat uit een mes dat rust op een draaibare houder die in de spiltang van de CNC-machine gaat. Wanneer de CNC-machine ingeschakeld wordt, zwaait het mes rond het lager terwijl het de beoogde contour uitfreest.

Een sleepmes is gemaakt voor het snijden in karton, fineer, vinyl en vele andere zachte materialen zoals kunststoffen. Er zijn verschillende soorten en merken van sleepmessen. Bijvoorbeeld, Donek Tools [22] is één van de meest gebruikte sleepmessen.

Voortbouwend op de bekende producent van sleepmessen, Donek Tools, kan er geconcludeerd worden dat er vier verschillende soorten sleepmessen zijn. Ze variëren van D1 tot D4, waarbij ieder mes een andere toepassing en snijdiepte heeft. De snijdiepte varieert tussen de 1,5 mm en de 6 mm. Deze snijdiepte is ruim voldoende voor de toepassing bij Spronken, hier zou er door een duralux laag van 3 mm gesneden moeten worden.

Voor het implementeren van een sleepmes op een CNC-machine worden er volgens bron[X] enkele stappen aangeraden:

- Het werkoppervlak voorbereiden: zorg ervoor dat het voorwerp ingeklemd kan worden langs alle zijden en dat het werkvlak horizontaal ligt.
- Spil instellen: zorg ervoor dat de CNC-machine losgekoppeld is en stel het toerental van de spil in op 0 toeren/minuut.
- Nulpunt programmeren: laat het mes rustig zakken, leg een dun papier over het werkvlak (om het werkvlak te beschermen), wanneer het mes het papier raakt wordt dit ingesteld als nulpunt van de Z-as.

Het sleepmes volgt de contour opgelegd door de CNC-machine. Omdat het mes achter het centerpunt van het tool staat, heeft het een slepende functie. Hierbij wordt bedoeld dat het mes altijd de contour zal volgen opgelegd door het programma.

Besluit:

Op basis van de huidige beperkingen van de CNC-machine, waarbij het gebruik van een bolfrees niet ideaal is voor het volledig uitsnijden van de gewenste steunzoolcontour, is het raadzaam om een sleepmes te overwegen voor dit project. Een sleepmes biedt de mogelijkheid om nauwkeurig en efficiënt contouren uit te snijden, zoals vereist voor de steunzolen. Door de juiste voorbereiding en configuratie te volgen, kunnen de gewenste resultaten worden bereikt, waardoor de manuele arbeid wordt verlaagd en de kwaliteit van de eindproducten wordt verbeterd.

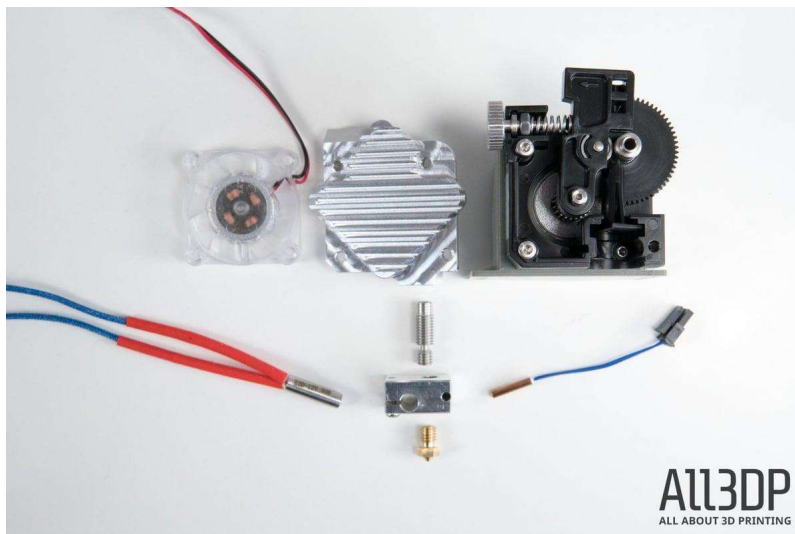
2.8. 3D-printen

Voor het produceren van gemodelleerde producten wordt momenteel onderzoek gedaan naar verschillende methoden van 3D-printen. De drie meest voorkomende technieken zijn extrusie, resin/vloeistof en poeder printen. De te vervaardigen werkstukken kenmerken zich door hun omvang en complexiteit, vaak bestaande uit talrijke holtes. Daarom is het essentieel om te overwegen welke versie van 3D-printen het meest geschikt is voor deze specifieke behoeften, inclusief de selectie van materialen.

2.8.1. Extrusieprinten

ExtrusiePrinten [23], ook bekend als Fused Filament Fabrication (FFF) 3D-printen, is een wijdverspreide techniek, met name populair in hobby toepassingen. Dergelijke printers zijn over het algemeen betaalbaar en eenvoudig van ontwerp. Bovendien zijn ze verkrijgbaar in diverse formaten en printvolumes, waardoor ze zeer flexibel zijn in gebruik.

Het extrusie printproces wordt aangedreven door meerdere gestuurde stappenmotoren, die een printkop bestaande uit een warm en koud uiteinde in drie dimensies laten bewegen. Het warme uiteinde omvat een *heat break*, een *heat block* en een *nozzle*, terwijl het koude uiteinde bestaat uit een toevoerbuis en een extruder. Deze componenten worden weergegeven in figuur 14 samen met een thermisch element, een temperatuursensor en koelvinnen met een ventilator.

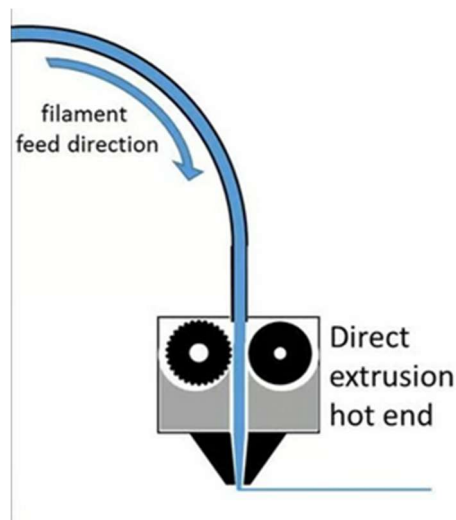


Figuur 14: Uiteenzetting hot end en cold end [23]

Deze versie van 3D-printers maakt gebruik van solide kunststoffen die op spoelen worden gewikkeld en per gewicht worden verkocht. Deze kunststof wordt vervolgens geleid naar de *heat break* met behulp van de extruder. De *heat break* zorgt ervoor dat de kunststof op een juiste snelheid smelt. Het smelten gebeurt in een *heat block*, waarin zich een verwarmingselement en een temperatuursensor bevinden om de gewenste smelttemperatuur te handhaven. Zodra de kunststof vloeibaar is, wordt deze door de *nozzle* geëxtrudeerd, waardoor het printproces kan beginnen.

De extruder duwt de kunststof door de *heat break*, waardoor de snelheid waarmee de kunststof uit de *nozzle* wordt geduwd, wordt bepaald. Deze configuratie wordt geïllustreerd in figuur 15. De printkop

volgt vervolgens laag voor laag het volledige doorgesneden oppervlak en laat overal een dunne laag kunststof achter, meestal tussen 0,05 en 0,2 mm dik.



Figuur 15: Werking van een extruder op een hot end [23]

Een extra voordeel van extrusieprinten is de beschikbaarheid van een breed gamma aan verschillende soorten kunststoffen die worden gebruikt voor diverse toepassingen.

2.8.2. Resin printen

Resin Printen [24, 25, 26], ook bekend als vloeistofprinten, is een tweede veelgebruikte optie binnen 3D-printen, vooral onder hobbyisten. Deze printers bieden vaak een beter detailniveau en een betere oppervlakte afwerking, waardoor ze bijzonder populair zijn bij mensen die miniatuurbeeldjes printen voor bordspellen.

In vergelijking met extrusieprinters zijn resin printers duurder in aanschaf en hebben ze over het algemeen een kleiner printvolume. Een voorbeeld van dergelijke printers wordt weergegeven in figuur

16. Een nadeel van resinprinters is dat de geprinte stukken achteraf moeten worden bewerkt door ze uit te harden. Tijdens het printproces komt er ook een doordringende geur vrij van de hars waarmee wordt geprint.



Figuur 16: Voorbeeld van een resin 3D-printer [25]

Resin is bijzonder gevoelig voor ultraviolet (UV) licht en daarom is het essentieel dat het printvolume altijd is omgeven door een UV-werende kap. Het werkingsprincipe van deze printers houdt in dat het printoppervlak wordt ondergedompeld in een bak met resin. Deze bak heeft een doorzichtige bodem en bevindt zich boven een lichtbron die UV-licht uitzendt. Het printoppervlak wordt typisch 0,01 tot 0,05 mm boven de bodem van de bak gehouden. Vervolgens zal de laser een doorsnede van het oppervlak met UV-licht belichten. Daarna wordt het printoppervlak verhoogd om nieuw resin eronder te laten stromen, waarna het weer wordt verlaagd totdat het geprinte stuk op dezelfde hoogte boven de bodem van de bak staat als voordien, waarna het proces zich herhaalt.

Binnen dit type 3D-printers zijn er verschillende methoden om UV-licht over te brengen, namelijk stereolithografie (SLA), Digital Light Processing (DLP), en Liquid Crystal Display (LCD). Bij een SLA-printer volgt een lichtpunt het oppervlak vergelijkbaar met hoe een extrusieprinter met de printkop werkt, wat resulteert in een nauwkeurig maar langzaam printproces. Bij een DLP-printer wordt het volledige doorgesneden oppervlak in één keer geprojecteerd, wat resulteert in een snellere printsnelheid maar een minder fijne afwerking. Tot slot projecteert een LCD-printer ook elk oppervlak in één keer, waardoor het even snel is als een DLP-printer, maar de kwaliteit van de afwerking wordt bepaald door de resolutie en de grootte van de pixels in het scherm.

In figuur 17 zal een illustratie worden gegeven waarin SLA, DLP en LCD-printers op een eenvoudige manier worden uitgelegd.



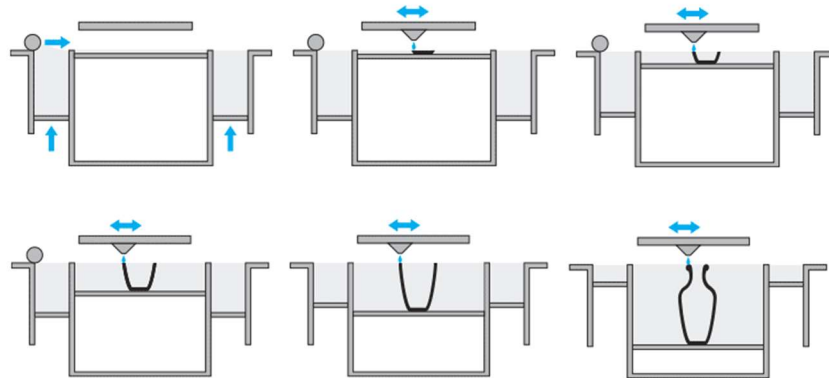
Figuur 17: Werking van een SLA, DLP en LCD-printer in volgorde [26]

2.8.3. Poederprinten

Als laatste veelvoorkomende methode van 3D-printen is poederprinten [27, 28], ook bekend als Selective Laser Sintering (SLS) printen. Deze technologie wordt voornamelijk gebruikt in de industrie en is zelden tot nooit te vinden in commerciële toepassingen. Dit komt voornamelijk door de hoge kosten van aanschaf en het aanzienlijk grotere energieverbruik in vergelijking met de eerder besproken methoden.

Poederprinters maken gebruik van een poedervormige grondstof, die zowel kunststoffen als metaalpoeders kan omvatten. De belangrijkste reden voor het gebruik van deze technologie is de mogelijkheid om metalen objecten te printen.

Het printproces begint met het aanbrengen van een dun laagje poeder over het printoppervlak. Vervolgens scant een laser het doorsneden oppervlak van het gewenste object in het poeder, waardoor het poeder smelt. Zodra het gesmolten poeder afkoelt, ontstaat er een solide vorm van de doorgelaserde doorsnede. Daarna wordt er een nieuwe laag poeder over het oppervlak verspreid, en zo wordt het object laag voor laag opgebouwd. Figuur 18 illustreert dit proces kort en bondig.



Figuur 18: Werking van een poeder printer [28]

2.8.3. Besluit

Vanwege de behoefte aan het produceren van grotere stukken voor deze proef, waarbij snelle aanpassingen aan het prototype zullen worden gemaakt, is extrusieprinten de meest geschikte optie om zo efficiënt mogelijk te werken. Extrusie Printers zijn de meest kosteneffectieve optie, zowel qua aanschafkost in verhouding tot het printvolume, als qua gebruikskosten in verhouding tot het printvolume. Extrusieprinters zijn meestal ook sneller dan de andere opties die besproken zijn. Hoewel de oppervlakteafwerking minder nauwkeurig zal zijn, heeft dit geen invloed op de resultaten van de proef.

3. Concepten

3.1. Voorgaande concepten

Een voorgaand concept dat Spronken getest heeft bestond uit het veranderen van de manier waarop de freesblokken bevestigd werden op de CNC-freesmachine. Momenteel wordt dit gedaan door de blokken met vacuüm aan te zuigen op de tafel van de CNC-machine. Hierdoor zijn de freesblokken volledig ondersteund, dit betekent dat wanneer de bolfrees volledig doorheen de duralux-laag freest, deze de vacuümtafel van de machine zal beschadigen.

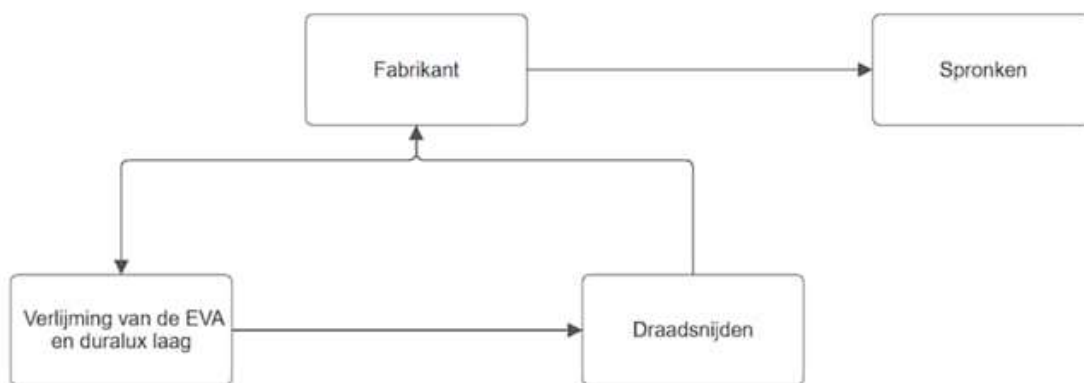
Het voorgaande concept bestond uit het idee om de freesblokken enkel voor een paar centimeter vanaf de randen te ondersteunen en de freesblokken in te klemmen langs de zijkanten. Hierdoor raken de freesblokken de tafel niet daar waar dat de steunzolen uitgefreesd zullen worden. De voordelen hiervan zijn dat de vacuümtafel niet meer nodig is, wat energiekosten bespaart tijdens productie. Bovendien is het mogelijk om de steunzolen vrijwel volledig te frezen, waardoor ze gemakkelijk uit de freesblokken kunnen worden geduwd, wat resulteert in een extra stap die wordt geëlimineerd uit het huidige productieproces (namelijk het handmatig uitsnijden van de steunzool uit de freesblok met een breekmes).

De reden dat dit concept niet doorgevoerd is tot het huidige productieproces komt door de ongewenste vervorming van de freesblokken tijdens het frezen. De lagen van EVA en duralux hebben geen sterke eigenschappen om doorbuiging tegen te gaan als erop geduwd wordt. Dit had als effect dat tijdens het frezen het contact van de bolfrees de blokken lieten doorbuigen waardoor het uit te frezen model van de steunzolen verandert. Dit resulteerde dat het product niet meer nauwkeurig op maat kon worden gemaakt. Vanuit dit inzicht werd geconcludeerd dat de freesblokken te allen tijde volledig ondersteund moeten worden.

Momenteel worden in het productieproces niet alle beschikbare gaten op de vacuümtafel benut door de huidige mat. Dit is om te voorkomen dat de blokken te zwaar worden aangezogen. Het gevolg hiervan was dat het moeilijk werd om de blokken uit de machine te halen zonder het vacuüm af te zetten. De diameter van de gaten in deze mat zijn overigens kleiner dan de afzuiggaten van de vacuümtafel. Deze bevinding is experimenteel vastgesteld tijdens het ontwerpen van deze mat. Indien de gaten dezelfde diameter hebben als de vacuümtafel, zal de aanzuigkracht te groot zijn voor de freesblokken. Dit resulteert in aanzuigbellen op de duralux-laag, dit is een ongewenste beschadiging van het eindproduct.

3.2. Nieuwe concepten

Uit huidig onderzoek zijn er twee concepten uitgewerkt en voorgelegd aan Spronken orthopedie. Hierbij is er eerst een duidelijk schema opgesteld waarbij elke stap in het proces duidelijk beschreven staat, een korte schematische samenvatting is te zien in figuur 19. Er is niet enkel bekeken welke stappen er op Spronken gebeuren maar ook de stappen die de externe leveranciers volgen om tot het beginproduct van de freesblokken te komen. Vervolgens is er onderzocht waar er ruimte voor verbetering is en hoe we het gehele proces kunnen optimaliseren.

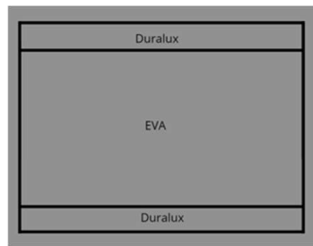


Figuur 19: Schematische voorstelling huidig proces

3.2.1. Concept draadsnijden

Na onderzoek bleek dat de leverancier van de freesblokken eerst nog verschillende stappen moet doorlopen voor het verwezenlijken van het beginproduct gebruikt door Spronken (zie schema op figuur 19). De leverancier start met een EVA laag waarbij er op beide kanten een duralux-laag verlijmt wordt. Vervolgens wordt deze blok op maat uitgesneden (33 cm op 25 cm). Tot slot gaan ze het reliëf vormen door middel van een draadsnijmachine. Hierdoor wordt het blok in twee delen uitgesneden. Dit is het eindproduct dat geleverd wordt aan Spronken.

Het 1^{ste} concept start bij het veranderen van het beginproduct. De freesblokken zullen als één geheel geleverd worden aan Spronken orthopedie zoals figuur 20 toont. Dit resulteert in het elimineren van de stap waarbij de leverancier moet draadsnijden, dit zorgt eveneens voor een goedkoper beginproduct. Het nieuwe productieproces start bij het aanvoeren van de gehele freesblokken in de CNC-freemachine. Doordat er gewerkt wordt met een blok met aan beide kanten een duralux-laag, kunnen er per blok twee steunzoolparen ontwikkeld worden. Vervolgens wordt de onderkant van het 1^{ste} steunzoolpaar in de bovenste duralux-laag uitgefreesd, dit omvat een deel van de contour en de leest van de steunzool. Hierna moet de operator de freesblokken omdraaien. Daarna kan de onderkant en de leest van het 2^{de} steunzoolpaar uitgefreesd worden.



Figuur 20: Herwerkte freesblok

Eenmaal als de leest en de contour in beide kanten gefreesd is, kan het blok in twee gesplitst worden door middel van draadsnijden. Dit is oorspronkelijk de stap die de leverancier zou doen. Door deze stap uit te stellen is het mogelijk om de complexe onderzijde van de steunzool in het freesblok te frezen. Vervolgens kan men zoals in het huidige proces al reeds gedaan wordt, de bovenkant van de steunzool uitfrezen. Het finale product bevat de complexe vorm van de voet (bovenkant) en de leest (onderkant), een schematische voorstelling van dit concept is te zien in figuur 21.

Bijkomend moet er rekening gehouden worden dat tijdens het uitfrezen van de voet aan de bovenkant, de steunzool niet geëjecteerd wordt. Dit komt omdat er alreeds aan de onderzijde de leest en een deel van de contour gefreesd is, dit zorgt voor een kleiner oppervlak aan de onderzijde van de steunzolen waarop het vacuüm kan aanzuigen. Dit kan verholpen worden door de steunzool nog op twee plaatsen (tip en hiel) te verbinden aan de freesblok. Vervolgens zal de operator de steunzolen uit de freesblokken moeten duwen of snijden.

Voor het verwezenlijken van dit concept moeten er aanpassing gedaan worden aan de te leveren blokken. Eveneens moet er een draadsnijmachine gekocht of ontworpen worden die in staat is om de huidige modellen van freesblokken uit te snijden. Tot slot moet een operator opgeleid worden om met de draadsnijmachine te werken.

Het nadeel van dit concept is dat er ten alle tijden twee paar steunzolen gelijktijdig geproduceerd moeten worden. Dit geeft een logistiek probleem wat voordien niet bestond. Er zal ook getest moeten worden of de aanzuigkracht van de huidige mat hoog genoeg is om de blokken met gefreesde leest op hun plaats te kunnen houden. Tot slot kan dit concept niet volledig geïmplementeerd worden totdat de huidige voorraad aan freesblokken opgewerkt is.



Figuur 21: Schematische voorstelling concept 1

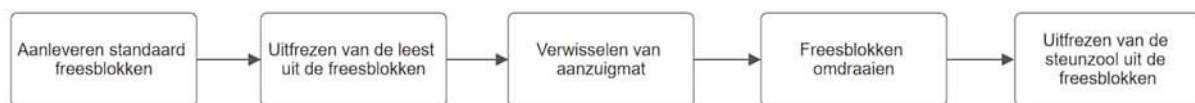
3.2.2. Concept vacuümmat

Het 2^{de} concept bestaat uit het realiseren van een nieuwe vacuümmat, deze mat zal het inverse reliëf van de freesblokken benaderen. Hierdoor kunnen de freesblokken omgedraaid worden zodat de duralux-laag bovenaan ligt.

Het productieproces start bij het plaatsen van de freesblokken op de nieuwe vacuümmat, alle freesblokken liggen met de duralux-laag naar boven. Vervolgens wordt de contour en leest van de steunzolen uitgefreesd. Hierna kan men opteren om te werken op de volgende freesmachine waarbij de standaard mat ligt of er kan gekozen worden voor het verwisselen van de nieuwe mat en te vervangen door de reeds gebruikte standaard mat. Daarna worden de freesblokken omgedraaid, met de alreeds uitgefreesde contour en leest. Vervolgens start de operator de CNC-machine opnieuw en wordt de bovenkant van de steunzool uitgefreesd, een schematische voorstelling is in figuur 22 te zien.

Bijkomend moet er opnieuw rekening gehouden worden zoals bij concept één dat de steunzolen tijdens de finale freesbewerking niet geëjecteerd worden. Hierbij zal wederom een klein deel van de steunzool nog in contact moeten blijven met het freesblok.

De vlakke vacuümmat dient te worden getest om te bepalen of deze voldoende aanzuigkracht creëert om de freesblok met een gefreesde leest effectief te kunnen aanzuigen. Het tweede concept heeft als voordeel dat het meteen geïmplementeerd kan worden omdat de mat snel in en uit de machine gehaald kan worden, en er geen verandering is aan toelevering van freesblokken.



Figuur 22: Schematische voorstelling concept 2

3.3. Conclusie

Na zorgvuldige overweging van de voorgestelde concepten bij Spronken orthopedie, wordt Concept twee gekozen. Dit besluit is gebaseerd op de overwegende voordelen, dat gericht is op het realiseren van een nieuwe vacuümmat met het inverse reliëf van de freesblokken. Dit concept biedt een oplossing voor de problemen met de huidige vacuümtafel en het vermijdt de noodzaak om het beginproduct van de freesblokken aan te passen. Door de eenvoudige hanteerbaarheid, verwisselbaarheid en simpliciteit van Concept twee kan het snel worden geïmplementeerd, zonder significante verstoring van het bestaande productieproces.

4. Materiaalselectie vacuümmat

In dit onderdeel wordt er gezocht naar het optimale materiaal voor het realiseren van een mat. Deze mat zorgt voor een verbinding tussen de CNC vacuümtafel en de freesblokken gebruikt voor het realiseren van steunzolen. Met hulp van het programma Granta EduPack wordt een selectie van materialen opgebouwd waaruit een conclusie wordt afgeleid met betrekking tot het meest optimale materiaal.

4.1. Huidig materiaal

Het huidige materiaal voor een mat gebruikt voor het vacuümzuigen op een CNC-machine moet goede vacuümeigenschappen hebben en moet duurzaam zijn. Enkele materialen die gebruikt worden zijn:

Rubbers (elastomeren):

- Siliconenrubber [18]: hoge duurzaamheid kan oorspronkelijke structuur behouden zonder te barsten, zeer goed bestendig tegen veroudering en het heeft een hoog smeltpunt (300°C) waarbij het zijn mechanische structuur zal behouden. Toepassingen zijn in de auto-industrie voor het realiseren van pakking, afdichtingen,...
- Nitrilrubber [19]: is bestendig tegen olie, brandstof en andere chemicaliën. Hoe meer nitril hoe beter het tegen chemicaliën kan. Toepassingen zijn olieslangen, dichtingsringen,...

Kunststoffen:

- PVC (polyvinylchloride) [20]: is gemakkelijk mechanisch te verwerken (lijmen, schuren, frezen,...) en kan hoge belastingen en drukken verdragen. Toepassingen zijn PVC-buizen, verpakkingen, speelgoed, tafel matten,...
- Polyurethaan: is sterk, buigzaam en slijtvast. Ook kan de onderlinge verhouding tussen zachte en harde segmenten worden aangepast voor een specifieke toepassing. Toepassing ervan is onder andere het interieur van een wagen.

4.2. Kracht op het onderdeel

De kracht uitgeoefend op de mat is vrij miniem. De enige kracht die er zal voorkomen is de freeskop die een kracht uitwerkt op het freesblok tijdens het frezen. Deze kracht gaat het grootst zijn wanneer er een intrede/boorbewerking gemaakt wordt in de duralux-laag.

De schatting van deze kracht bedraagt 20 kg.

4.3. Maximale doorbuiging

De maximale doorbuiging wordt geschat omdat deze later nodig zal zijn bij de gekozen beperkingen voor de materiaalselectie. De doorbuiging moet zo klein mogelijk zijn zodat de vervormingen van de steunzolen tijdens het frezen miniem zijn.

Onder de belasting van de freeskop mag er een maximale doorbuiging δ van 2 mm voorkomen.

4.4. Ontwerpvereiste

4.4.1. Beperkingen

Om later te kunnen filteren in Granta EduPack, zijn er vanaf het begin al een aantal beperkingen nodig. Bij deze beperkingen is er rekening gehouden met de hanteerbaarheid, gebruiksomgeving en duurzaamheid.

- gebruikstemperatuur tussen de 0 en 60°C,
- doorbuiging kleiner dan 2 mm,
- niet plastisch vervormbaar.

4.4.2. Objectief en vrije variabele

Bij het selecteren van een geschikt materiaal is ervoor gekozen om de kostprijs te minimaliseren. Hiervoor is gekozen omdat de kans dat de freeskop door het freesblok heen freest reëel is. Dit heeft een catastrofale impact op de levensduur van de mat. Om de kostprijs van deze fout zo klein mogelijk te houden wordt er gezocht naar een zo goedkoop mogelijk materiaal dat voldoet aan de opgestelde beperkingen. Als vrije variabele is ervoor gekozen om de dikte van de mat te laten variëren.

4.5. Vertaling objectief en beperkingen

De volgende stap is om het objectief en de beperkingen in een formulevorm te formuleren, om later te kunnen gebruiken bij de materiaalselectie in Granta EduPack. Bij de beperkingen wordt dit gedaan voor de opgelegde maximale doorbuiging en het niet plastisch vervormbaar zijn. Een overzicht van de gebruikte symbolen hierbij is gevisualiseerd in onderstaande tabel.

Tabel 1: Uitleg symbolen

Symbool	Betekenis
ρ	Massadichtheid
h	Hoogte mat
L	Lengte
δ	Doorbuiging
MI	Materiaal index
σ_y	Spanning
E	Elasticiteitsmodulus
F	Kracht
A	Oppervlakte

4.5.1. Objectief

Het objectief is om de kostprijs te minimaliseren. De massa wordt verder uitgewerkt naar de afmetingen van de vacuümmat.

$$kost = m \cdot C \quad (4.1)$$

$$kost = \rho \cdot V \cdot C \quad (4.2)$$

$$kost = \rho \cdot A \cdot L \cdot C \quad (4.3)$$

$$kost = \rho \cdot b \cdot h \cdot L \cdot C \quad (4.4)$$

4.5.2. Beperking doorbuiging

De eerste beperking is de maximale doorbuiging die kleiner moet zijn dan 2 mm.

Hierin wordt het traagheidsmoment I verder uitgewerkt:

$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot \frac{b \cdot h^3}{12}} \quad (4.5)$$

Hierna wordt de formule afgeleid in functie van de hoogte:

$$h = \sqrt[3]{\frac{F \cdot L \cdot 4}{b \cdot E \cdot \delta}} \quad (4.6)$$

Formule invullen in het objectief:

$$kost = \rho \cdot b \cdot \sqrt[3]{\frac{F \cdot L \cdot 4}{b \cdot E \cdot \delta}} \cdot L \cdot C \quad (4.7)$$

Om de materiaalindex MI te bereiken worden alle materiaal onafhankelijke variabelen verwijderd. Deze zal later gebruikt worden in Granta EduPack:

$$MI_1 = \frac{\rho \cdot C}{E^{1/3}} \text{ (MI zo groot mogelijk = kostprijs maximaliseren)} \quad (4.8)$$

$$MI_1 = \frac{E^{1/3}}{\rho \cdot C} \text{ (MI zo groot mogelijk = kostprijs minimaliseren)} \quad (4.9)$$

4.5.3. Beperking plastische vervorming

De tweede beperking is dat er geen plastische vervorming door doorbuiging mag zijn.

$$F = \frac{Z_p \cdot \sigma_y}{L} \quad (4.10)$$

Hierin wordt de Z_p verder uitgewerkt om de vrije variabele h in de vergelijking te krijgen:

$$F = \frac{\frac{b \cdot h^2}{4} \cdot \sigma_y}{L} \quad (4.11)$$

Daarna wordt deze hoogte h afgezonderd:

$$h = \sqrt{\frac{4 \cdot F \cdot L}{b \cdot \sigma_y}} \quad (4.12)$$

Formule invullen in het objectief:

$$kost = \rho \cdot b \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot F \cdot L}{b \cdot \sigma_y}} \cdot L \cdot C \quad (4.13)$$

Om de materiaalindex MI te bereiken worden alle materiaal onafhankelijke variabelen verwijderd. Deze zal later gebruikt worden in Granta EduPack:

$$MI_2 = \frac{\rho \cdot C}{\sigma_y^{1/2}} \text{ (MI zo groot mogelijk = kostprijs maximaliseren)} \quad (4.14)$$

$$MI_2 = \frac{\sigma_y^{1/2}}{\rho \cdot C} \text{ (MI zo groot mogelijk = kostprijs minimaliseren)} \quad (4.15)$$

4.6. Granta EduPack

Met behulp van Granta EduPack kan er nu een materiaalselectie gemaakt worden. Hiervoor worden de gekozen beperkingen en berekende materiaalindexen gebruikt. De beperkingen worden toegepast met behulp van de filterfunctie binnen het pakket.

Afbeelding 23 biedt een overzicht van de samenstelling van het composietmateriaal. De nadruk ligt op het gebruik van bulkmaterialen, waarbij alleen materialen worden geselecteerd die gemakkelijk verwerkt kunnen worden. Dit betekent dat de selectie materialen uitsluit die bestaan uit vezels en andere complexe structuren. Bovendien is er bewust gekozen voor het gebruik van rubbers en thermoplasten, die als kunststoffen bekend staan. Deze keuze is strategisch om de kostprijs te verlagen.

Composition overview		
	Minimum	Maximum
Form	Bulk material; Other	
Material family	Composite (polymer matrix); Elastomer (therm...	
Base material		
% filler (by weight)		%
Filler/reinforcement		
Filler/reinforcement form		
Additive		
Renewable content		%

Figuur 23: Overzicht composiet samenstelling

Afbeelding 24 toont de thermische eigenschappen van het materiaal, waarbij een maximale werkingstemperatuur van 60°C is gekozen. Deze keuze omvat een ruime veiligheidsmarge om te voorkomen dat het materiaal week wordt bij een verhoogde werkingstemperatuur. Als voorzorgsmaatregel is de minimale temperatuur vastgesteld op 0°C. Deze parameters illustreren een zorgvuldige benadering om de materiaalprestaties te waarborgen binnen een veiligheidsbereik, waarbij zowel de hogere als lagere uitersten van het temperatuurspectrum in overweging zijn genomen.

Thermal properties			
	Exists	Minimum	Maximum
Melting point			°C
Glass temperature			°C
Maximum service temperature		60	°C
Minimum service temperature			0 °C

Figuur 24: Thermische limieten

Rangschikken van de materialen

In dit gedeelte worden de meest geschikte materialen gekozen aan de hand van een lijn die getekend wordt door de twee beperkingen aan elkaar gelijk te stellen. Hiervoor worden eerst de eindformules van de beperkingen aan elkaar gelijkgesteld.

$$\rho \cdot b \cdot \sqrt[3]{\frac{F \cdot L \cdot 4}{b \cdot E \cdot \delta}} \cdot L \cdot C = \rho \cdot b \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot F \cdot L}{b \cdot \sigma_y}} \cdot L \cdot C \quad (4.16)$$

Vervolgens worden de $\frac{1}{MI_1}$ en $\frac{1}{MI_2}$ ingevuld in de formules en worden ze verder afgeleid:

$$\frac{1}{MI_1} \cdot b \cdot \sqrt[3]{\frac{F \cdot L \cdot 4}{b \cdot \delta}} \cdot L = \frac{1}{MI_2} \cdot b \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot F \cdot L}{b}} \cdot L \quad (4.17)$$

$$\frac{1}{MI_1} \cdot \frac{\sqrt[3]{\frac{F \cdot L \cdot 4}{b \cdot \delta}}}{\sqrt{\frac{4 \cdot F \cdot L}{b}}} = \frac{1}{MI_2} \quad (4.18)$$

Breedte en hoogte invullen:

$$\frac{1}{MI_1} \cdot \frac{\sqrt[3]{\frac{200 \cdot 330 \cdot 4}{250 \cdot 2}}}{\sqrt{\frac{4 \cdot 200 \cdot 330}{250}}} = \frac{1}{MI_2} \quad (4.19)$$

Herwerken naar MI_2 :

$$MI_1 \cdot \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot 200 \cdot 330}{250}}}{\sqrt[3]{\frac{200 \cdot 330 \cdot 4}{250 \cdot 2}}} = MI_2 \quad (4.20)$$

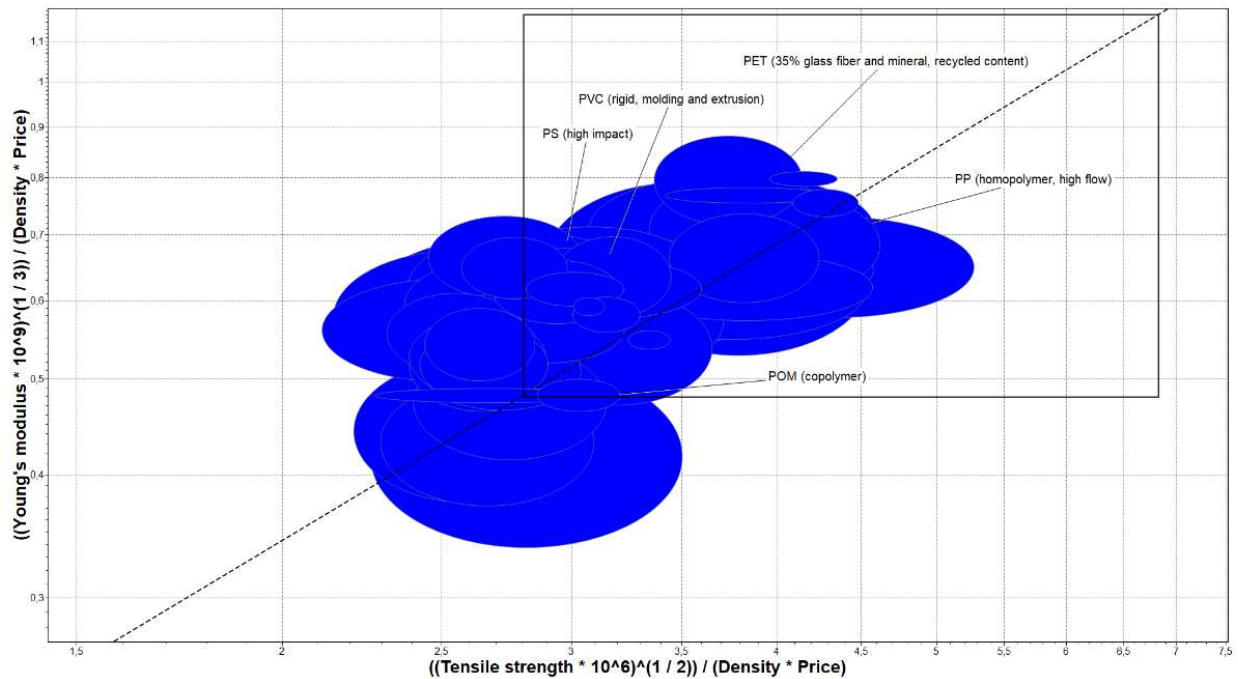
Verder uitwerken geeft:

$$MI_1 \cdot 4,02 = MI_2 \quad (4.21)$$

Logaritmische koppelfactor:

$$\text{Log}(MI_2) = 0,6 + \text{log}(MI_1) \quad (4.22)$$

Uit de logaritmische vergelijking wordt een waarde afgeleid die vervolgens wordt gebruikt om een lineaire regressielijn in de grafiek te construeren. Omdat er een positieve waarde in de vergelijking staat, wordt de rechte in het programma ingevuld met als x-waarde 1 en als y-waarde $1 + 0,6 = 1,6$. Vanop deze rechte wordt er een rechthoek getekend die met de twee hoekpunten op de rechte ligt. De rechthoek wordt zodanig groot gemaakt zodat er vijf verschillende materiaalgroepen geselecteerd zijn (zie fig. 25).



Figuur 25: Overzicht bekomen materialen

Uitgekomen materialen:

- PET
- POM
- PP
- PS
- PVC

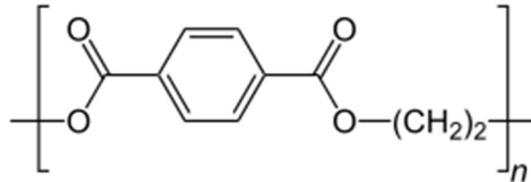
4.8. Materiaalselectie

Tabel 2: Overzicht gekozen materialen

Materiaal	PET	POM	PP	PVC 'rigid'	PS
Samenstelling	Homogeen, 35% verstevigd met glasvezels	Copolymeer	Homopolymeer	Amorfe thermoplast	85-95% styreen en 5-15% cis-butadiene rubber
Gebruik	Elektrische aansluitingen en afdichtingen,...	Machineonderdelen, automobielsector, elektrische en elektronische componenten,...	Voedselcontainers, speelgoed, engineering,...	Bouwmaterialen, verpakkingen, automobielsector en speelgoed	Verpakkingen, isolatiemateriaal, elektronica en technische onderdelen
Prijs [euro/kg]	1,51 – 1,85	2,17– 2,98	1,15 - 1,21	1,58 - 1,71	1,84 - 1,92
Dichtheid [kg/m ³]	1370 - 1400	1390 – 1410	895 - 909	1300 - 1490	1030 - 1060
E-modulus [GPa]	9,39 – 9,87	2,6 - 3,2	0,824 - 1,02	2,48 - 3,3	1,16 - 2,55
Vloeispanning [MPa]	65 - 70	57,2 -71,7	24,1 - 28,4	41,4 - 52,7	19 - 41,4
Recyclebaar	ja	ja	ja	ja	ja
Smelttemperatuur	255 – 265 °C	160 – 175 °C	140 – 150 °C	/	/

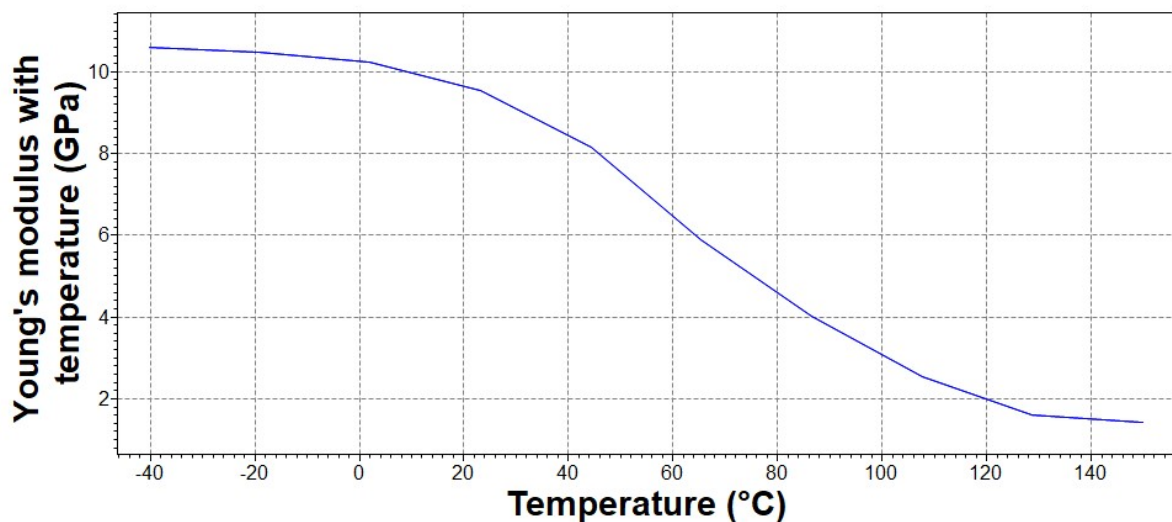
4.8.1. PET (Polyethyleentereftalaat)

Polyethyleentereftalaat is een thermoplastisch polymeer, het bestaat uit lange ketens van esterbindingen (zie fig. 26). Dit materiaal biedt uitermate hoge sterktes als polymeer. Het is eveneens ook transparant, waardoor het ideaal geschikt is voor toepassingen waarbij helderheid een belangrijk punt is. Indien transparantie niet van de essentie is, kunnen er kleurstoffen toegevoegd worden, dit geeft wel een nadelig effect op de recycleerbaarheid.



Figuur 26: Chemische samenstelling PET [29]

Onderstaande figuur 27 toont de invloed van temperatuur op de elasticiteitsmodulus van het materiaal PET. Op de y-as staat de elasticiteitsmodulus en op de x-as staat de temperatuur. Bij een temperatuur van 0°C heeft het materiaal een elasticiteitsmodulus van ongeveer 10,2 GPa. Naarmate de temperatuur stijgt naar 50°C, daalt de elasticiteitsmodulus tot ongeveer 7 GPa. Dit duidt op een significante afname van de stijfheid van het materiaal bij toenemende temperaturen.



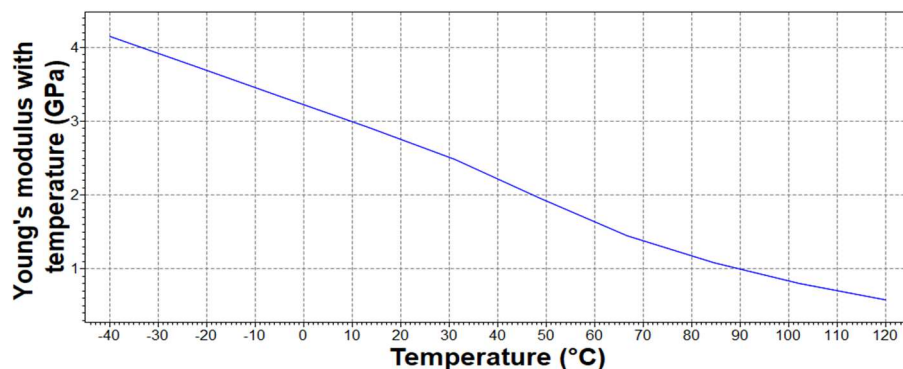
Figuur 27: E-modulus t.o.v. de temperatuur PET

Dit materiaal is zeer sterk door de glasvezelversterking, echter maakt dit het materiaal relatief duur. Bijkomend maakt de glasvezelversterking het materiaal moeilijker te bewerken wat eveneens de kostprijs beïnvloedt. Dit maakt het materiaal overgedimensioneerd voor de huidige toepassing.

4.8.2. POM (Polyoxymethyleen)

Polyoxymethyleen is een thermoplastisch polymeer, het bestaat uit herhalende eenheden van methyleenoxiden met nog andere monomeren. Deze monomeren maken het materiaal sterker en verbeteren de taaiheid. De monomeren kunnen bijkomend ook het materiaal beter bestand maken tegen agressieve omgevingen.

Onderstaande figuur 28 toont de invloed van temperatuur op de elasticiteitsmodulus van het materiaal POM. Op de y-as staat de elasticiteitsmodulus en op de x-as staat de temperatuur. Bij een temperatuur van 0°C heeft het materiaal een elasticiteitsmodulus van ongeveer 3,25 GPa. Naarmate de temperatuur stijgt naar 50°C, daalt de elasticiteitsmodulus tot ongeveer 1,9 GPa. Dit duidt op een significante afname van de stijfheid van het materiaal bij toenemende temperaturen.

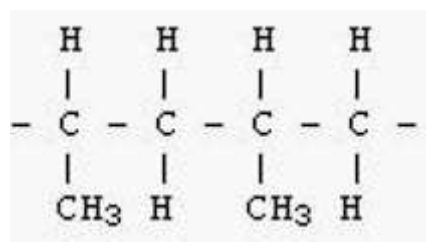


Figuur 28: Elasticiteitsmodulus i.f.v. de temperatuur bij het materiaal POM

Het materiaal POM vertoont dus een opvallende afname in elasticiteitsmodulus bij hogere temperaturen. Ondanks deze afname blijft de elasticiteitsmodulus nog steeds ruim voldoende voor de huidige toepassing. Het materiaal is echter te duur voor de huidige toepassing.

4.8.3. PP (Polypropyleen)

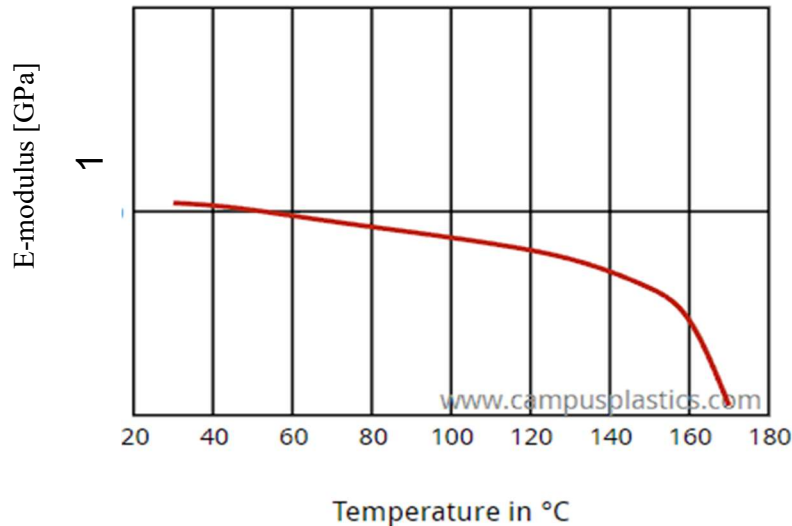
Polypropyleen is een thermoplastische polymeer van propaan. als homopolymeer bestaat enkel uit propyleeneenheden in zijn ketens, waarbij elke monomeer bestaat uit drie koolstofatomen en zes waterstofatomen (zie fig. 29)]. Door deze gekende en regelmatige structuur is het gedrag lineair. Het materiaal heeft een lage dichtheid (895 – 909 kg/m³) en relatief hoge sterkte voor deze dichtheids grootte, waardoor het een lichtgewicht materiaal is. Eveneens is Polypropyleen ook bestand tegen veel chemicaliën en biedt het een goede weerstand tegen vermoeidheid en impact.



Figuur 29: Chemische samenstelling PP [29]

Via de website Campusplastics, is het gedrag van het materiaal in kaart gebracht [30]. Hierbij is het verband te zien tussen de E-modulus en de temperatuur. Het gedrag neemt lineair af tot een temperatuur van 140 graden, boven deze temperatuur neemt de sterkte drastisch af (zie fig. 30). Dit komt omdat dit rond de smelttemperatuur ligt van het materiaal.

Bijkomend is het materiaal goed te verwerken door zijn regelmatige structuur. Het materiaal kan op

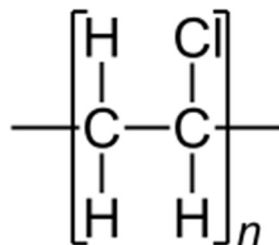


Figuur 30: E-modulus t.o.v. de temperatuur[30]

verschillende manieren verwerkt worden: extrusie, spuitgieten en 3D-printen. Tot slot is het materiaal ook recyclebaar, wat een positieve bijdrage geeft.

4.8.4. PVC (Polyvinylchloride)

PVC staat voor Polyvinylchloride, en ‘rigid’ verwijst naar de stijfheid van het materiaal. Het materiaal wordt gekenmerkt door zijn stijfheid en weerstand tegen vervorming onder belasting. Tijdens het produceren van dit materiaal worden er geen weekmakers toegevoegd zodat het een harde structuur krijgt. De chemische structuur van PVC ‘rigid’ is lineair en bestaat uit een herhalende ketting van vinylchloride (zie fig. 31).

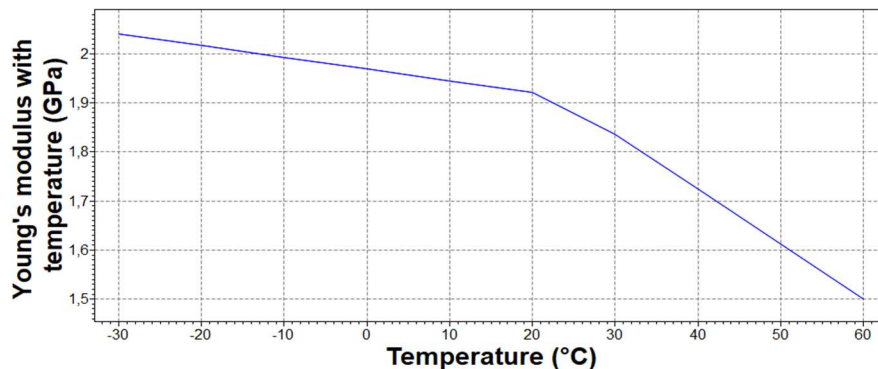


Figuur 31: Chemische samenstelling PVC [31]

PVC ‘rigid’ is gekenmerkt door zijn hoge stijfheid, hardheid en slagvastheid. Het is bestand tegen chemicaliën, corrosie en vocht, waardoor het bruikbaar is in veel toepassingen. Maar het materiaal is relatief zwaar en heeft een hoge dichtheid, wat het overgedimensioneerd maakt voor de huidige toepassing.

4.8.5. PS (Polystyreen)

Onderstaande figuur 32 illustreert de invloed van temperatuur op de elasticiteitsmodulus van het materiaal PS. Op de y-as staat de elasticiteitsmodulus en op de x-as staat de temperatuur. Bij een temperatuur van 0°C heeft het materiaal PS een elasticiteitsmodulus van ongeveer 1,96 GPa. Als de temperatuur stijgt naar 50°C, daalt de elasticiteitsmodulus tot ongeveer 1,61 GPa.



Figuur 32: De temperatuur bij het materiaal PS

Uit de figuur blijkt dat het materiaal PS een afname vertoont in elasticiteitsmodulus bij hogere temperaturen, zij het minder significant dan bij sommige andere materialen. Desondanks blijft de elasticiteitsmodulus nog steeds voldoende voor de huidige toepassing.

4.9. Besluit

Op basis van de vijf uitgekomen materialen is er gekozen voor het materiaal PP omwille van volgende eigenschappen:

1. Stijfheid en sterkte: Polypropyleen (PP) heeft een relatief hoge elasticiteitsmodulus (0,824 - 1,02 GPa) en vloeispanning (24,1 - 28,4 MPa). Dit betekent dat het PP-freesblok voldoende stijfheid en sterkte zal bieden om de vereiste functie uit te voeren.
2. Prijs: Polypropyleen (PP) heeft een lagere prijs (1,15 - 1,21 euro/kg) in vergelijking met andere materialen zoals PET, POM en PS. Dit maakt PP economisch aantrekkelijk.
3. Dichtheid: Polypropyleen (PP) heeft een lage dichtheid (895 - 909 kg/m³), wat betekent dat het freesblok lichtgewicht zal zijn. Dit kan handig zijn voor hantering en verlaging van de intensiteit van de manuele arbeid.
4. Verwerkbaarheid: Polypropyleen (PP) is goed te verwerken vanwege zijn regelmatige structuur. Het kan worden geëxtrudeerd, gespoten gegoten en zelfs 3D-geprint, wat flexibiliteit biedt bij de productie van het freesblok.
5. Recyclebaarheid: Polypropyleen (PP) is recyclebaar, wat betekent dat het materiaal aan het einde van zijn levensduur kan worden gerecycled, waardoor de milieu-impact wordt verminderd.

Al met al, gezien de combinatie van stijfheid, prijs, lage dichtheid, verwerkbaarheid en recyclebaarheid, is polypropyleen (PP) het meest geschikte materiaal voor de huidige toepassing.

5. Vacuümtafel optimalisatie

5.1. Onderzoek alternatief vacuümtafel

In volgend onderdeel worden de testen bij ACRO besproken, dit gaf verdere inzicht in zowel de werking van een vacuümtafel en andere varianten ervan. Momenteel wordt een vacuümtafel gebruikt om freesblokken aan te zuigen, waarbij de afmetingen van de tafel zorgvuldig zijn afgestemd op een batch van 10 freesblokken (1650 op 500 mm). In eerste instantie is er gekozen voor een vacuümmat die de freesblokken van de vacuümtafel scheidt. Het bleek dat zonder mat de aanzuigkracht zodanig groot is, dat het reliëf van de cirkelvormige aanzuiggaten in de duralux bleven staan en zo de kwaliteit van de steunzool drastisch negatief beïnvloede.

De implementatie van de vacuümmat heeft dit probleem effectief opgelost. Bovendien zijn de aanzuiggaten verkleind naar 5 mm en wordt nu slechts de helft van de gaten gebruikt. Deze aanpassingen hebben geresulteerd in minimale indrukkingen in de duralux, terwijl er nog steeds voldoende aanzuigkracht is om de blokken op hun plaats te houden.

Echter, vanwege de beperkingen van de CNC-freesmachine en de freestafel, is het niet mogelijk om de onderkant van de steunzool uit te frezen, wat zowel het uitsnijden als het op leest slijpen inhoudt. Om deze uitdagingen aan te pakken en meer informatie te verkrijgen over mogelijke alternatieven, werd er een onderzoek uitgevoerd in samenwerking met de onderzoeksgroep ACRO.

Tijdens dit onderzoek zijn verschillende tests uitgevoerd om mogelijke vervangingen of optimalisaties van de freestafel te ontdekken.

5.1.1. Vacuümcups

Het gebruik van vacuümcups (zie fig. 33), waarbij alle cups dicht opeen zijn geplaatst, maakt het mogelijk om het reliëf van de freesblokken alleen te benaderen op de vlakke stukken. Dit kan echter leiden tot instabiliteit in het midden van de freesblokken, aangezien de cups geen ondersteuning bieden in dat gebied.

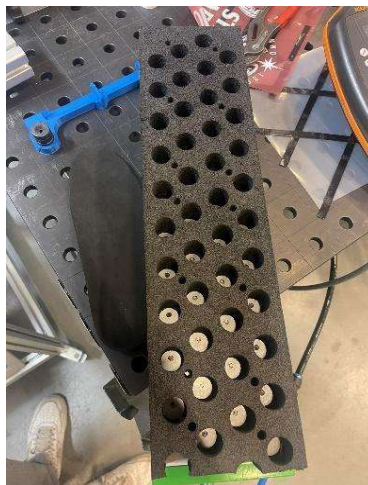


Figuur 33: Vacuümcups

Een bijkomend nadeel is dat bij een foutieve bewerking, waarbij er te diep wordt gefreesd, de zuignap direct kan worden beschadigd en moet worden vervangen. Dit resulteert niet alleen in extra kosten, maar ook in een oponthoud in het productieproces, wat ongewenst is vanuit zowel een economisch als een operationeel perspectief.

5.1.2. Vacuümfoam

Het gebruik van vacuümfoam als alternatieve methode biedt de mogelijkheid om complexere vormen aan te zuigen door middel van een foamlag over de vacuümaanzuiging (zie fig. 34). Deze foamlag kan zich vervormen om een duidelijke aanzuigverbinding te creëren, waardoor de freesblokken stevig kunnen worden vastgehouden.



Figuur 34: Vacuümfoam

Een belangrijk nadeel van deze methode is echter dat tijdens het aanzuigen het freesblok niet meer horizontaal ligt, wat verdere bewerkingen zoals frezen bemoeilijkt. Deze ongelijkheid kan leiden tot onnauwkeurigheden en inconsistenties in het uiteindelijke product, wat de kwaliteit en precisie van het freesproces kan aantasten.

Bovendien, net als bij de vacuümcups, kan een foutieve bewerking waarbij te diep wordt gefreesd leiden tot beschadiging van de foamlag, wat resulteert in extra kosten en tijdverlies voor vervanging.

5.1.3. Korrelstructuur

De aanzuigmethode waarbij een speciaal soort korrel wordt gebruikt, biedt een interessante benadering voor het vastzetten van de freesblokken (zie fig. 35). In deze methode kunnen de korrels gemakkelijk worden verplaatst wanneer het vacuüm uit staat, wat flexibiliteit biedt bij het positioneren van de blokken. Echter, blijkt het toch zeer uitdagend om het freesblok volledig te omsluiten en een stabiele aanzuiging te creëren met deze korrels.



Figuur 35: Vacuümaanzuiging met korrelstructuur

Wanneer het vacuüm wordt ingeschakeld, worden de korrels echter zeer hard en bieden ze een stevige ondergrond voor de freesblokken. Het nadeel is dat het nog steeds moeilijk is om te garanderen dat het freesblok horizontaal ligt, wat precisie en consistentie in het freesproces kan beïnvloeden.

Een ander aandachtspunt is de hoge kosten die gepaard gaan met deze complexe aanzuigmethode. De aanschafprijs en het onderhoud van de benodigde apparatuur en materialen maken het een dure optie voor het productieproces.

Bovendien, zoals bij de andere methoden, kan een foutieve bewerking waarbij te diep wordt gefreesd leiden tot beschadiging van het omhulsel en het vrijkomen van de korrels uit de omsluiting. Dit kan ernstige gevolgen hebben voor de kwaliteit en integriteit van zowel het eindproduct als de freesopstelling.

5.1.4. Standaard vacuümtafel

De standaard vacuümtafel (zie fig. 36) bleek de beste resultaten op te leveren tijdens de testen. Met deze methode kon er voldoende aanzuigkracht worden gegenereerd, waardoor de freesblokken stevig op hun plaats bleven liggen en horizontaal werden gehouden tijdens het freesproces.



Figuur 36: Standaard vacuümtafel

Echter, om de complexe vormen van de freesblokken goed te benaderen, is het noodzakelijk om een nieuwe vacuümmat te ontwikkelen die specifiek is afgestemd op deze vormen. Door een op maat gemaakte vacuümmat te ontwerpen, kan de vorm van de freesblokken nauwkeuriger worden benaderd, wat essentieel is voor het behalen van optimale resultaten bij het frezen.

5.1.5. Besluit

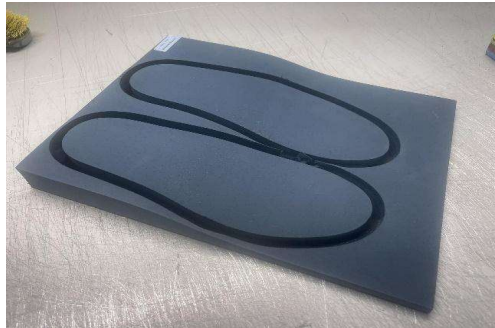
De uitgevoerde testen bieden waardevolle inzichten in verschillende aanzuigmethoden voor het frezen van complexe vormen. Hoewel elke methode zijn eigen voor- en nadelen heeft, blijkt uit de resultaten dat de standaard vacuümtafel de beste prestaties levert. Deze methode biedt voldoende aanzuigkracht om de freesblokken stevig op hun plaats te houden en horizontaal te positioneren tijdens het frezen.

Echter, om de complexe vormen van de freesblokken effectief te benaderen, is het noodzakelijk om een nieuwe vacuümmat te ontwikkelen die specifiek is afgestemd op deze vormen. Dit gaf verdere confirmatie dat het aanpassen van een vacuümmat naar het inverse reliëf van de freesblokken het beste gaat zijn.

Hoewel alternatieve methoden zoals vacuümcups, vacuümfoam en korrelaanzuiging interessante benaderingen zijn, brengen ze uitdagingen met zich mee zoals instabiliteit, ongelijkheid en hoge kosten. Deze methoden lijken daarom minder geschikt voor het frezen van complexe vormen in vergelijking met de standaard vacuümtafel.

5.2. Testen aanzuigkracht en evaluatie connectiepunten

Voor verdere uitwerking van het concept is onderzocht of de vlakke vacuümmat voldoende aanzuigkracht kan genereren nadat de leest en een deel van de contour zijn uitgefreesd. Om dit te simuleren is eerst de contour van de steunzool uitgefreesd (zie fig. 37).



Figuur 37: Contourfreen

Vervolgens zijn grote delen van de randen met een breekmes weggesneden, waarbij proefondervindelijk drie verschillende posities en afmetingen van connectiepunten zijn overgelaten om te bepalen welke connectiepunten het beste resultaat opleveren. Tot slot is er manueel met een breekmes de leest in de steunzool gesneden, dit is om het verkleinde oppervlak van de steunzool te simuleren.

5.2.1. Bespreking resultaten

De eerste test omvatte een klein contactpunt aan de tip en aan de hiel. Hoewel dit relatief goede resultaten opleverde, stond de steunzool tijdens het frezen niet heel stabiel, wat aangeeft dat dit geen geschikte optie is (zie fig. 38).



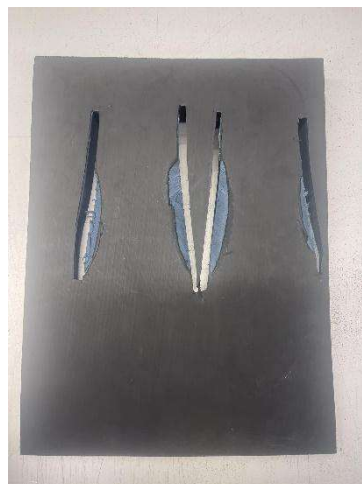
Figuur 38: Onderzijde steunzool met verschillende connectiepunten

De tweede test betrof enkel een contactpunt aan de tip, wat catastrofale resultaten opleverde. De steunzool kon vrij bewegen tijdens het freesproces en na verloop van tijd kon het contactpunt de snijkracht niet weerstaan, waardoor de steunzool werd geëjecteerd (zie fig. 39).



Figuur 39: Resultaten test 1 en 2

De derde test omvatte een groter oppervlak aan de tip en aan de hiel (zie fig. 40), wat uitstekende resultaten opleverde. De steunzool was zeer stabiel tijdens het frezen en vertoonde een goede afwerkingskwaliteit (zie fig. 41).



Figuur 40: Onderzijde steunzool test 3

5.2.2. Besluit

Er kan geconcludeerd worden dat de onderkant van de steunzool gemodelleerd moet worden zoals in test 3 (zie fig. 41). Dit heeft echter als nadeel dat de steunzool als eindproduct niet volledig is uitgefreesd, maar de basisvorm van de leest is aanwezig, waardoor de kans op menselijke fouten en manuele arbeid wordt verkleind. Alleen op eenvoudige delen moeten de connectiepunten nog met een breekmes worden uitgesneden en moeten de randen met een slijpmachine verder worden bewerkt.



Figuur 41: Resultaat test 3

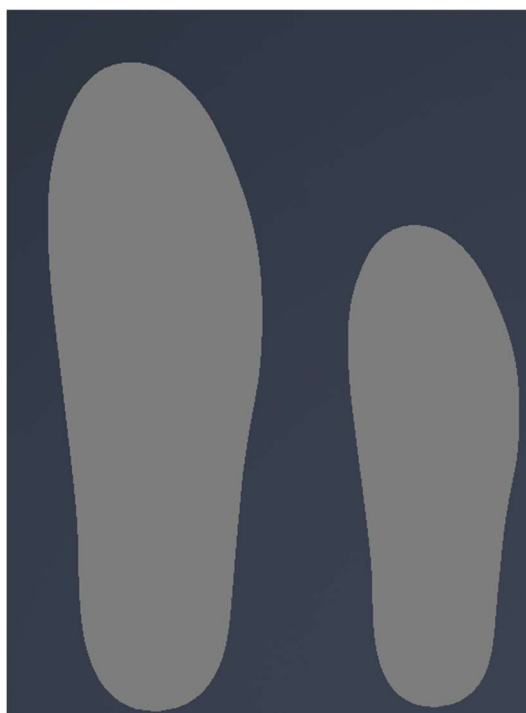
De resultaten zijn besproken met de begeleider, die verder bevestigde dat dit een goed resultaat is. Dit betekent dat er overgegaan kan worden tot het daadwerkelijk mechanische ontwerp.

5.3. Optimalisatie vlakke vacuümmat

Het herwerkte productieproces, waarbij de leest eerst uit de steunzool wordt gefreesd, resulteert in aanzienlijk verminderd contactoppervlak tussen de steunzool en de vacuümtafel. De huidige mat die op de tafel ligt laat toe dat de helft van de gaten die zich in de tafel bevinden doorgelaten worden zodat de freesblokken aangezogen kunnen worden. Voor de volledige freesblokken is dit voldoende zuigkracht om ervoor te zorgen dat de blokken vast blijven liggen op de tafel, maar niet meer voor de steunzolen waarvan de leest al gefreesd is. Hierom zal er een aanpassing gemaakt worden aan de vlakke mat die gebruikt wordt. Er wordt gekeken naar de ligging van de steunzolen op de vacuüm tafel en dan zal de aanzuigkracht verbeterd worden waar nodig. Er zal ook gekeken worden naar het verminderen van het vacuüm lek door de aanzuigpunten te optimaliseren.

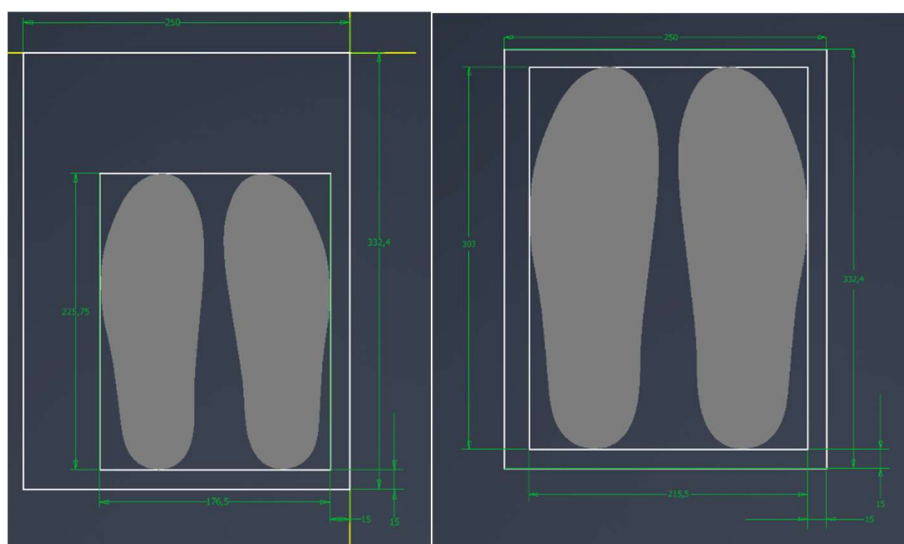
5.3.1. Voorbereiding

Om een overzicht te verkrijgen van het bereik van maten, werden de grootste en kleinste schoenmaten voor steunzolen digitaal opgevraagd bij Spronken Orthopedie (zie fig. 42). De kleinste maat is 34 en de grootste maat is 46, de figuur toont de rechter steunzool van beide maten langs elkaar.



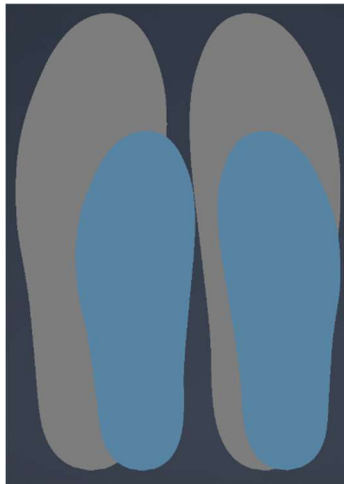
Figuur 42: Steunzolenmaten 34 en 46

De steunzolen hebben altijd dezelfde locatie in het freesblok maar omdat de steunzolen zoveel verschillen in grootte geeft dit uiteenlopende resultaten. De rechter steunzool zal altijd 15 mm van de achter- en zijwand van het freesblok gemodelleerd worden. Vervolgens zal de linker steunzool ook 15mm van de achterwand verwijderd worden en 15 mm van de rechter steunzool, dit geeft onderstaand resultaat voor beide maten. Figuur 43 toont de lay-out voor schoenmaten 34 en 46.



Figuur 43: Ligging van schoenmaat 34 en 46 in het freesblok

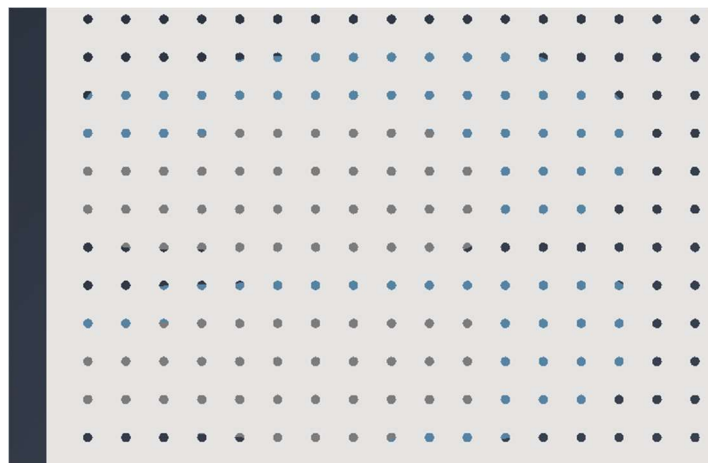
Bovenstaande afbeeldingen tonen de afmetingen van de freesblokken met de twee schoenmaten in op de locatie die toegewezen wordt door Spronken Orthopedie. De gebruikte oppervlakte van de freesblokken is zeer verschillend. Het overlappende oppervlak is weergegeven in figuur 44.



Figuur 44: Overlappend oppervlak tussen de schoenmaten

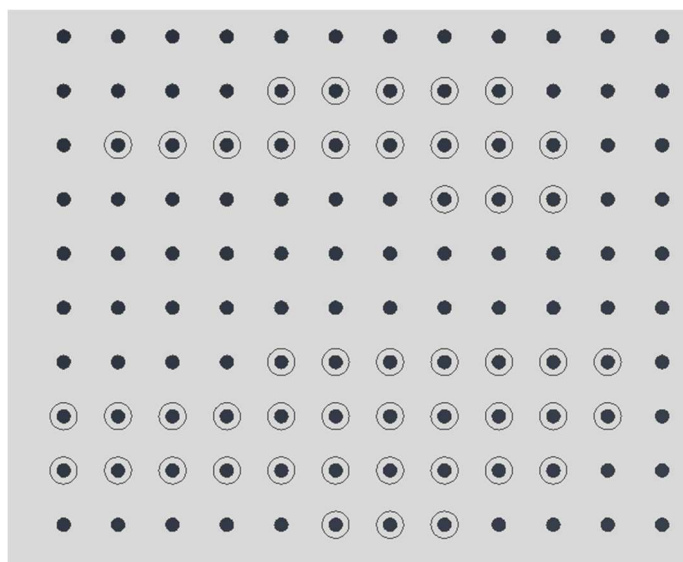
5.3.2. Ontwerp vlakke vacuümmat

Uit onderzoek is gebleken dat grote gaten een beter vacuüm kunnen creëren [15, 16, 17], om deze reden zullen de plekken waar de schoenmaten overlappen grotere gaten krijgen. De plekken waar de maten niet overlappen, worden extra gaten toegevoegd zodat er zoveel mogelijk aanzuigpunten zijn met zo weinig mogelijk lekverlies voor tussenliggende maten. Voor de start van dit ontwerp zijn de maten van het gatenpatroon overgenomen uit het ontwerp van de gegolfde mat. Vervolgens worden de twee verschillende schoenmaten van steunzolen onder de mat met gaten geplaatst zodat er een duidelijk overzicht gemaakt kan worden waar er overlapping is, dit is te zien in figuur 45.



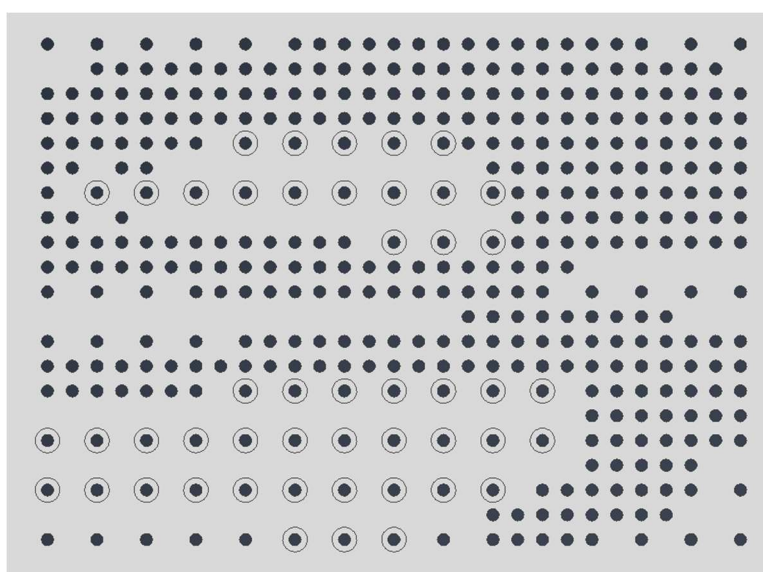
Figuur 45: Overlappende gaten met schoenmaten

Als eerste zullen de overlappende gaten vergroot worden tot 10 millimeter. Om ervoor te zorgen dat er voldoende ondersteuning is voor de freesblokken zullen de gaten maar 1 millimeter diep uitgeboord worden. Op deze manier kan er meer aanzuigkracht gegenereerd worden maar zal de vervorming minimaal zijn. Het resultaat hiervan is te zien in figuur 46.



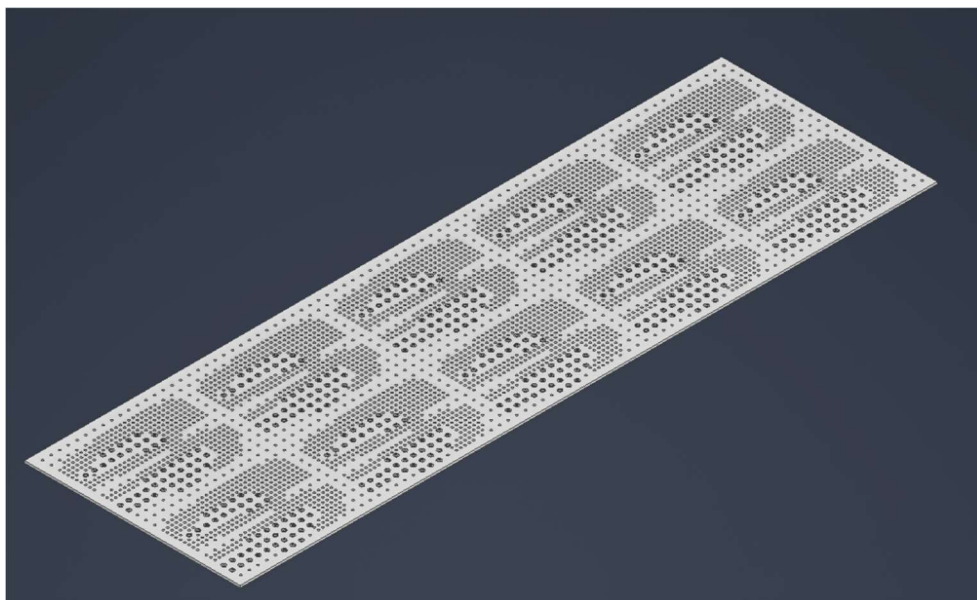
Figuur 46: Vergroting gaten

Er is duidelijk te zien dat er voor de rechtse steunzool meer overlap is, dit is het gevolg van de locatie die gegeven wordt aan de steunzolen door Spronken Orthopedie. Als volgende stap worden er op plaatsen waar geen overlapping is extra gaten bijgeplaatst, dit is mogelijk omdat tot op heden maar de helft van de gaten in de vacuümtafel benut worden. Figuur 47 toont het resultaat voor één paar steunzolen.



Figuur 47: Extra toegevoegde gaten

Door extra gaten toe te voegen aan het ontwerp zijn de afdrukken van twee steunzolen veel beter zichtbaar. Langs de onderzijden van de mat worden alle gaten verzonken zodat de gaten op de vacuümtafel makkelijker zullen aansluiten, zelfs als de mat scheef ligt. Tot slot wordt dit patroon vermenigvuldigd en op de tien nodige plaatsen gemodelleerd zodat de mat in figuur 48 bekomen wordt.



Figuur 48: Geoptimaliseerde vacuümmat

6. Optimalisatie freesstrategieën

6.1. Afwerkingskwaliteit bolrees

Voor het uitfrezen van de steunzolen is met het huidige programma: GpManager het onvermijdelijk om een verticale beweging te programmeren zonder een boorbewerking. Een bolrees (zie figuur 49) gebruikt in de huidige opstelling is initieel niet ontworpen voor boorbewerkingen. In dit hoofdstuk worden er testen uitgevoerd om te beoordelen in hoeverre dit toch mogelijk is en wat de impact is op de afwerkingskwaliteit.



Figuur 49: Gebruikte bolrees

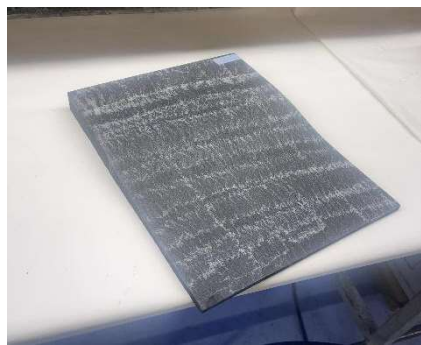
Ten eerste wordt de freescyclus van het proces geanalyseerd, waaruit kan worden geconcludeerd dat de huidige freesstrategie niet optimaal is. De freescyclus start met een verticale intrede in de freesblok, in het midden van de steunzool. Deze boorbewerking freest direct tot de vereiste diepte voor het uitfrezen van de steunzool, zonder tussenstappen. De freescyclus eindigt met een boorbewerking tot de frees een gepaste diepte heeft bereikt om vervolgens de contour van de steunzool uit te frezen. Omdat EVA-kunststof een zacht materiaal is, kan dit worden bereikt met de huidige frees en leidt dit tot een gunstig eindresultaat. Voor het uitvoeren van het nieuwe concept moet de frees echter ook door de duralux-laag kunnen frezen. In dit hoofdstuk zullen ook tests worden uitgevoerd om te onderzoeken of de bolrees door de Duralux-laag kan frezen. Hierbij wordt niet alleen bekeken of de frees in staat is om een boorbewerking uit te voeren, maar ook of een ander resultaat kan worden bereikt door een inloopbeweging te modelleren.

6.1.1. Voorbereiding test

Voor het uitvoeren van de testen worden twee freesblokken op elkaar verlijmd (zie fig. 50 en 51), dit simuleert hoe het nieuwe concept zou starten. Hierbij ontstaat er een vlak oppervlak waarbij de duralux-laag naar boven is gericht, dit is het startoppervlak om op te frezen.

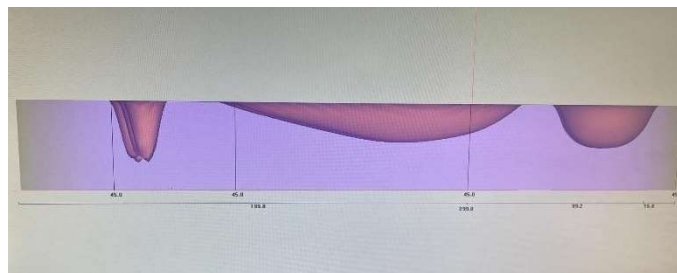


Figuur 50: Zijprofiel verlijmde freesblokken



Figuur 51: Verlijmen freesblokken

Om verschillende freesstrategieën te testen, worden diverse vormen en dieptes gegenereerd in het CAD/CAM-systeem: GpManager. Dit systeem is geoptimaliseerd voor het ontwerpen van steunzolen, waardoor er aanzienlijke beperkingen zijn in de mogelijke vormen die gemodelleerd kunnen worden. Het uiteindelijke resultaat is te zien in afbeelding 52 voor het zijaanzicht en afbeelding 53 voor het bovenaanzicht.



Figuur 52: Dieptezicht van de gemodelleerde test

Elke vorm wordt meermaals gemodelleerd in het model, zodat de snijsnelheid van de frees kan worden aangepast tijdens de test. Hierbij kan er vergeleken worden wat de invloed van de snijsnelheid op de afwerkingskwaliteit is. De zes cirkelvormige gaten aan de onderzijde van het model worden gebruikt voor het simuleren van boorwerkingen. Voor het frezen van de contour van een steunzool wordt in de realiteit eerst een verticale boorfunctie gebruikt. Dit is zo gemodelleerd om de juiste freesdiepte te verkrijgen voor het uitfrezen van de contour. Hierbij zal het nadelig effect van de boorwerking minder zichtbaar zijn omdat de frees langsheen de boorbewerking beweegt om de contour uit te frezen. Tijdens

de test zal er enkel een boorbewerking gesimuleerd worden, die het daadwerkelijke effect van het boren zichtbaar zal maken. Tijdens de test zal er waargenomen worden hoe goed de bolfreees door de duralux-laag kan frezen.



Figuur 53: Modelleren van de test

De vier vormen in het midden van het testmodel worden gemodelleerd om een inloophbewerking te simuleren. Hierbij wordt er onderzocht of een inloophbewerking een positief effect heeft op de afwerkingskwaliteit. Deze zullen voornamelijk waargenomen worden terwijl de freees de bewerking uitvoert. De inloop zal in het midden van de vorm plaatsvinden, deze zijn niet meer zichtbaar aan het einde van de proef omdat alles rondom de inloop weg gefreesd zal worden. De middelste vormen zullen aan de zijkanten schuin worden afgewerkt. Dit is van belang, zodat aan het einde van de test gecontroleerd kan worden hoe diep de bolfreees minstens in het werkstuk moet gaan om een goede afwerking te creëren, zowel in de EVA als in de duralux. Bijkomend simuleert dit het beste de vorm van de leest. De twee grote gaten aan de bovenzijde van het object dienen eveneens om de afwerkingskwaliteit te controleren in relatie tot de diepte waarop een bolfreees wordt gebruikt.

6.1.2. Bespreking resultaten

Tijdens de test worden de toerentallen gewisseld tussen 20.000, 15.000, 10.000 en 6.000 toeren per minuut om de verschillende afwerkingen te evalueren. Bijkomend wordt er ook aandacht besteed aan de geluiden die ontstaan tijdens het frezen in de Duralux-laag bij verschillende toerentallen. Het eindresultaat wordt weergegeven in afbeelding 54.



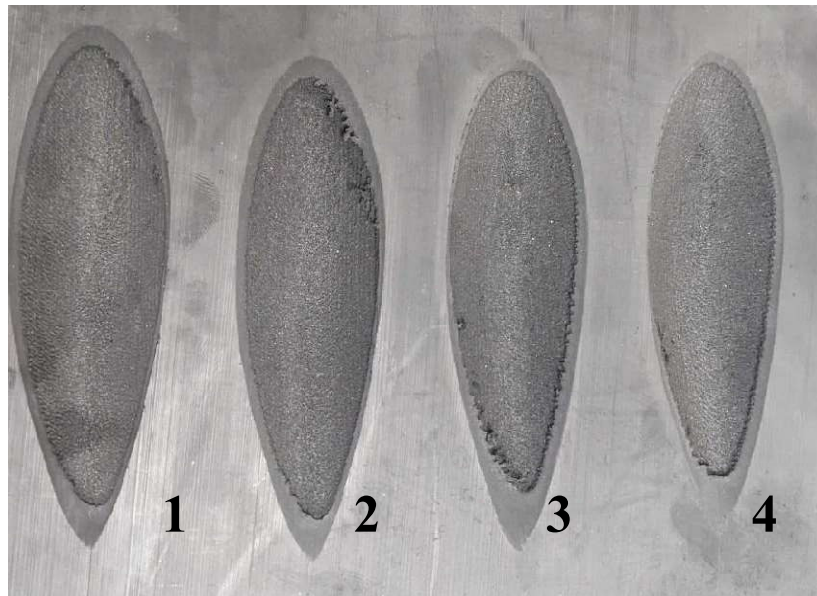
Figuur 54: Resultaat freetest

Ten eerste zullen de zes gaten aan de onderzijde worden onderzocht (zie fig. 55). Tijdens de boorcyclus is een zeer duidelijk schurend geluid te horen, ongeacht het toerental dat wordt gebruikt. Dit fenomeen wordt veroorzaakt doordat de Duralux-laag eerst omlaag wordt geduwd terwijl de bolfrees erop wrijft met hogere toerentallen. Dit is te wijten aan het feit dat een bolfrees geen vertanding heeft aan de top. Bijkomend is de top van de bolfrees vlak wat zorgt dat de draaisnelheid in het midden 0 toeren/min bedraagt. Zodra de bolfrees diep genoeg in het freesblok is, zal de bolfrees in één beweging de cirkelvormige rand uitsnijden uit de Duralux-laag. Echter, nadat deze cirkelvorm is uitgesneden, ondervinden de uitgesneden Duralux-spanen moeilijkheden bij het verlaten van het geboorde gat omdat de bolfrees geen groeven heeft voor spaanafvoer. Ten slotte zijn er kleine bollen in het centrum van het gat zichtbaar (zie fig. 51) omdat de bolfrees vlak is aan de top.



Figuur 55: Close-up geboorde gaten

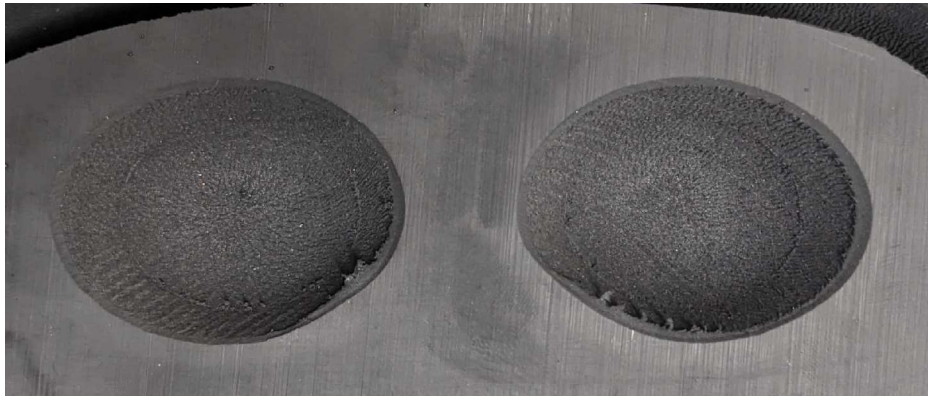
Ten tweede zullen de vier vormen in het midden van het freesblok worden bekeken. Een *close-up* hiervan is te zien in figuur 56. De vier vormen zijn gefreesd met vier verschillende snelheden, wat resulteerde in opvallende verschillen. Allereerst kan er worden opgemerkt dat de inloopbewerking een beter geluid produceert bij het frezen van de Duralux op ieder toerental. Hoewel er nog steeds een schurend geluid hoorbaar is bij de eerste intrede in het materiaal, is dit geluid zachter en van kortere duur. Bovendien kan het verspaande materiaal gemakkelijker uit het werkstuk worden verwijderd omdat er een gleufvorm ontstaat. Dit zorgt ervoor dat de frees efficiënter kan werken wat resulteert in een langere levensduur.



Figuur 56: Close-up van de middelste vormen

- Nummer vier wordt uitgefreesd op 20.000 toeren per minuut. Over het algemeen vertoont deze vorm de beste afwerkingskwaliteit. Het enige gebied waar bramen kunnen ontstaan, is de versmalling aan de onderkant van de vorm, waar EVA overgaat in Duralux. Deze braamvorming is echter klein genoeg om gemakkelijk te worden verwijderd met fijnkorrelig schuurpapier. Deze handeling vergt weinig tijd en kan geen fouten veroorzaken in het product.
- Nummer twee wordt uitgefreesd op 10.000 toeren per minuut. De afwerking in de EVA-laag is acceptabel, maar voelt ruwer aan dan die van de uiterst rechtse vorm. Er is aanzienlijk meer braamvorming op de Duralux-laag en de bramen zijn ook groter. Hoewel deze bramen nog steeds kunnen worden verwijderd met schuurpapier, zal dit aanzienlijk meer tijd in beslag nemen.
- Nummer één is uitgefreesd op 15.000 toeren per minuut. De EVA-laag vertoont een gladde afwerking, maar er is een grotere hoeveelheid braamvorming dan bij maximale toeren. De bramen zijn ongeveer even groot als bij maximale toeren, maar ze komen in grotere hoeveelheden voor. Deze kunnen waarschijnlijk in één beweging worden verwijderd met fijnkorrelig schuurpapier.
- Nummer twee, wordt gefreesd op 6.000 toeren per minuut. De EVA-laag voelt zeer grof aan en de braamvorming op de Duralux bestaat uit grote korrels die talrijk aanwezig zijn. Dit vertegenwoordigt de slechtste afwerking die binnen deze test is bereikt.

De twee grote vormen bovenaan in het vlak worden van dichtbij getoond in figuur 57. Beide gaten zijn gemaakt met een boorbewerking en vertonen op het gebied van geluid dezelfde effecten als de eerder besproken gaten. De Duralux spanen hadden minder moeite om uit de gaten te komen omdat deze worden vergroot na het boren.



Figuur 57: Close-up van grote gaten aan de bovenzijden

- Het linker gat is gefreesd op 20.000 toeren per minuut en heeft een gladde afwerking in de EVA en een kleine hoeveelheid braamvorming aan de Duralux-laag.
- Het rechter gat is gefreesd op 10.000 toeren per minuut en heeft een grovere afwerking met meer braamvorming aan de Duralux-laag.

6.1.3. Besluit

Uit de test kan worden geconcludeerd dat het mogelijk is om de leest te frezen met een bolfreees, mits er een kleine nabewerking met fijnkorrelig schuurpapier wordt uitgevoerd. Het is noodzakelijk om een inloopbewerking te gebruiken voor het efficiënt gebruik van de bolfreees. Om een goede afwerking te verkrijgen, wordt verwacht dat er minstens een toerental van 15.000 toeren per minuut wordt gebruikt. Deze test heeft waardevol inzicht gegeven in de materiaaleigenschappen en het gebruik van een bolfreees.

6.2. Optimale freesvervangning

6.2.1. Situering

Voor een optimale freesbewerking is het essentieel dat de frees scherp is. Tijdens het uitvoeren van de masterproef is herhaaldelijk vastgesteld dat de gebruikte frees bot is. Dit komt doordat er onvoldoende aandacht wordt besteed aan hoe lang de frees al in gebruik is en hoeveel steunzolen ermee gefreesd zijn. Een botte frees leidt tot aanzienlijk meer bramen op de gefreesde steunzolen, wat de kwaliteit sterk vermindert. Op dit moment wordt de frees pas vervangen wanneer de afwerkingskwaliteit onaanvaardbaar slecht is, wat veel te laat is.

6.2.2. Aangeboden oplossing

Voor het ontwikkelen van het concept is het noodzakelijk een scherpe bolfrees te gebruiken, aangezien deze door de Duralux-laag moet kunnen frezen. Daarom is er een checklist opgesteld die wekelijks wordt doorlopen. Op deze checklist wordt aangegeven wanneer de frees vervangen moet worden. Tevens wordt er genoteerd hoeveel steunzolen er gefreesd zijn en wanneer de frees voor het laatst is vervangen. Op basis van deze gegevens kan worden bepaald hoeveel steunzolen gefreesd kunnen worden voordat de frees aan vervanging toe is. Dit maakt het mogelijk om onderhoud in te plannen en de productiesnelheid en kwaliteit optimaal te houden. Deze checklist is voorgelegd aan Spronken Orthopedie als voorstel om hun freesproces te verbeteren, de checklist is toegevoegd aan de bijlagen van de master thesis.

6.2.3. Veranderingen

Spronken Orthopedie heeft ons advies en de checklist intern besproken en zijn tot de conclusie gekomen dat de checklist niet opgenomen zal worden in het productieproces. Er worden wel nieuwe maatregelen doorgevoerd die intern opgesteld worden. Er is namelijk besloten dat de bolfrezen viermaal per jaar voor alle twee de freesmachines gelijktijdig vervangen zullen worden, op deze manier kan het vast onderhoud makkelijk ingeplant worden. Bijkomend is er een handleiding gemaakt waarin duidelijk beschreven staat hoe de frees vervangen wordt en hoe de frees vervolgens gekalibreerd wordt. Iedere keer als er een nieuwe frees in de machine gestoken wordt is het nodig dat deze een nieuw nulpunt toegekend krijgt in de software van de CNC-machine. Dit komt doordat de frees manueel vervangen wordt en dus nooit op dezelfde diepte in de houder geduwd kan worden. Er is ook een frees bestand aangemaakt dat dient ter kalibratie van de frees. in de handleiding staat de toegelaten afwijking van zowel het kalibratie frees stuk als van het nulpunt van de machine. De kalibratie zal op drie verschillende freesblokken met verschillende hardheid uitgevoerd worden om zo correct als mogelijk te zijn. Tot slot is er in de handleiding uitgelegd hoe de digitale schuifmaat waarmee de kalibratie steunzolen opgemeten worden, gekalibreerd kan worden. Al deze maten worden opgenomen in een bijbehorende excel document zodat er bij vreemde fouten in de productie of terugkerende afwijkingen gekeken kan worden naar de afwijkingen van de huidige frezen en van voorgaande frezen. De handleiding wordt toegevoegd aan de bijlagen van de master thesis.

7. Mechanisch ontwerp

7.1. Bepaling afwijking freesblokken

Het doel van dit onderzoek is om de ideale hoogte te bepalen voor het benaderen van de freesblokken voor het ontwikkelen van de mat, gebaseerd op de hoogte afwijkingen van dezelfde batches van freesblokken.

7.1.1. Bespreking resultaten

Tabel 3: Hoogtemeting met lagen: blauw/oranje/zwart

	laag	hoog
1	11,7	32,9
2	11,6	32,8
3	11,8	33,1
4	11,7	32,9
5	11,7	32,7
6	11,6	32,8
7	11,6	32,9
8	11,7	32,7
9	11,7	32,7
10	11,5	32,8

- Gemiddelde hoogte aan de bovenkant: $11,66 \pm 0,25$
- Gemiddelde hoogte aan de onderkant: $32,83 \pm 0,38$
- Gemiddeld hoogteverschil: $21,17 \pm 0,37$

Tabel 4: Hoogtemeting met lagen blauw/zwart

	laag	hoog
1	9,9	32
2	10	32,2
3	10,2	32,1
4	9,9	32
5	10	32,2
6	10,1	32,1
7	10	31,9
8	10,2	32
9	10,1	32,1
10	9,9	32,9

- Gemiddelde hoogte aan de bovenkant: $10,03 \pm 0,35$
- Gemiddelde hoogte aan de onderkant: $32,15 \pm 0,84$
- Gemiddeld hoogteverschil: $22,12 \pm 1,00$

Tabel 5: Hoogtemeting met lagen zwart/zwart

	laag	hoog
1	9,4	32
2	9,7	32,4
3	9,7	32,6
4	9,6	32,2
5	9,7	32,1
6	9,6	32,2
7	9,7	32,2
8	9,2	32,2
9	9,9	32,3
10	9,6	32,3

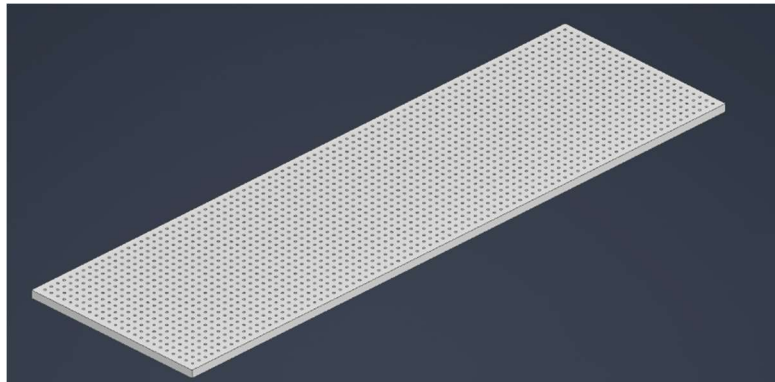
- Gemiddelde hoogte aan de bovenkant: $9,61 \pm 0,57$
- Gemiddelde hoogte aan de onderkant: $32,25 \pm 0,49$
- Gemiddeld hoogteverschil: $22,64 \pm 0,59$

7.1.2. Besluit

Uit bovenstaande resultaten kan worden geconcludeerd dat er een hoogteverschil van ± 21 mm genomen moet worden. Er is gekozen voor het kleinste hoogteverschil omdat indien nodig door de vacuümanzuiging het reliëf toch nog benaderd kan worden. Indien er een groter hoogteverschil genomen wordt zal het veel moeilijker zijn de vorm toch nog mooi te doen omsluiten.

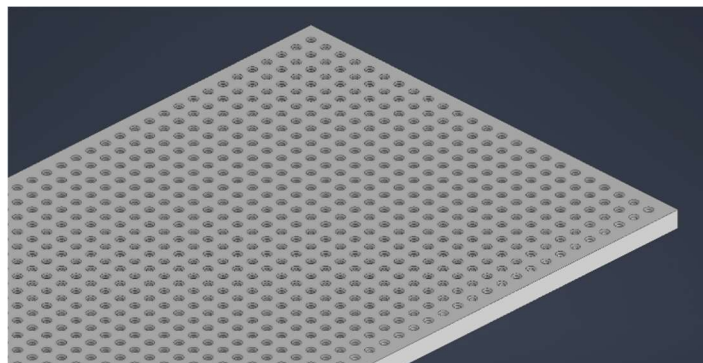
7.2. Ontwerp prototype

Het ontwerpen van de vacuümmat begint met het nauwkeurig meten van de vacuümtafel waarop deze zal worden geplaatst. Niet alleen wordt het oppervlak van de tafel gemeten, maar ook het patroon van de gaten in de tafel is van cruciaal belang. Deze afmetingen worden overgenomen als basis voor de mat, hoewel de diameter van de aanzuiggaten van de tafel worden aangepast. Deze aanpassing is gebaseerd op de bevindingen van een eerdere projectevaluatie met betrekking tot deze tafel, waarbij is vastgesteld dat de grote gaten in de tafel aanzuigbellen creëren in de duralux-laag. Op basis van de ervaring van de werknemers die de machine bedienen, wordt de aanzuigkracht verminderd, zodat de freesblokken gemakkelijker van de tafel kunnen worden verwijderd. Als gevolg hiervan wordt besloten om slechts de helft van de gaten in de tafel door te laten naar het freesblok, wat resulteert in het onderstaande resultaat, weergegeven in figuur 58. Om ervoor te zorgen dat het patroon van de mat nauwkeurig overeenkomt met het patroon op de tafel, wordt een bovenaanzicht van de mat afgedrukt en over de tafel gelegd voor visuele controle.



Figuur 58 Basis van het ontwerp

De geboorde gaten in de mat zullen aan de onderzijde worden verzonken, zodat het patroon van de mat nauwkeurig overeenkomt met het patroon van de tafel, zelfs als de mat enigszins verschoven is. Dit resulteert in het effect zoals weergegeven in figuur 59.

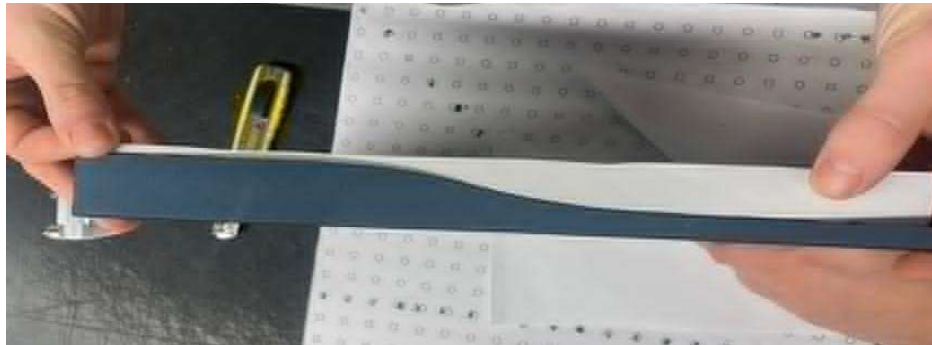


Figuur 59: Verzinken van de gaten

De mat is ontworpen om ervoor te zorgen dat het freesblok met de Duralux-laag naar boven toe gericht kan worden. Om dit op te lossen zijn de freesblokken opgemeten en is er een negatieve mal ontworpen die in de mat wordt afgedrukt. Het is essentieel dat het freesblok nauw aansluit op de mat, vandaar dat de afmetingen zo nauwkeurig mogelijk moeten zijn. Het probleem bij het opmeten is echter dat er

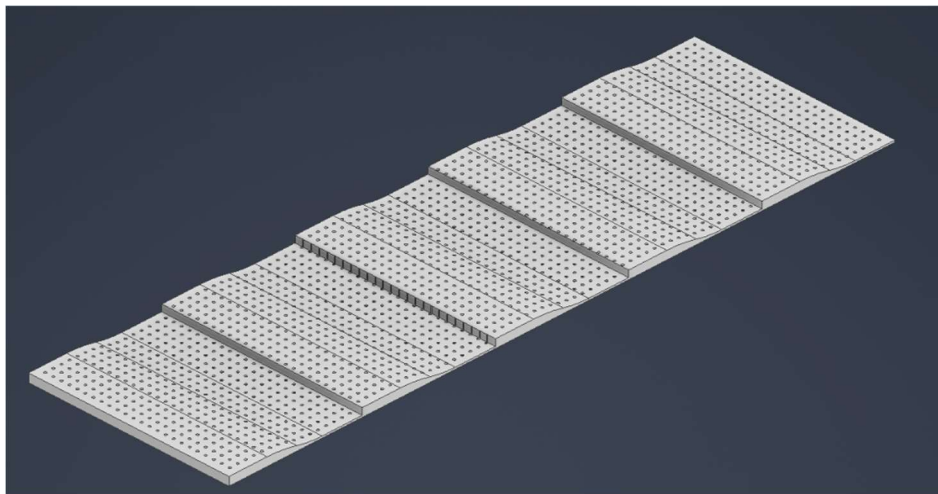
aanzienlijke variatie in dikte is tussen de geleverde freesblokken en het is tevens lastig om de golfvorm nauwkeurig op te meten.

Om het eerste probleem aan te pakken, zijn er verschillende freesblokken van diverse types opgemeten en de gemiddelde spreiding van de diktes bepaald. Voor het tweede probleem is er een vorm zo nauwkeurig mogelijk ontworpen en afgedrukt op papier. Vervolgens is deze vorm tegen de freesblokken gedrukt, zoals te zien is in figuur 60. Dit proces wordt herhaald totdat een goede aansluitende vorm is bereikt.



Figuur 60: Testen van de golfvorm

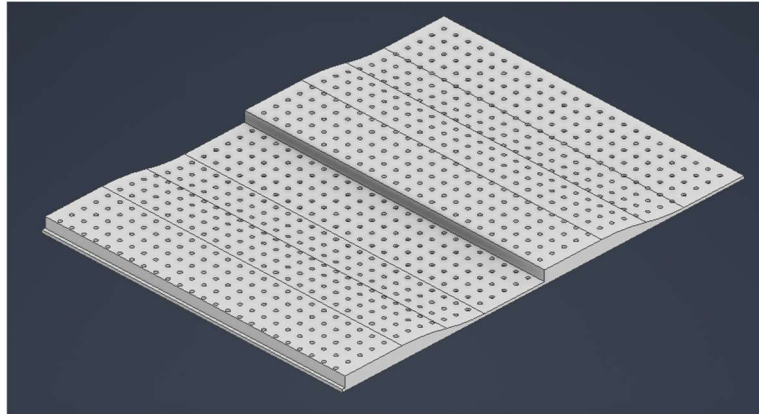
De vorm van figuur 45 wordt vijf keer achter elkaar herhaald, zodat er in totaal tien freesblokken op de tafel kunnen worden geplaatst. Op deze manier wordt de maximale capaciteit van de tafel benut. Dit resulteert in het onderstaande resultaat van figuur 61, in de bijlage is de 2D tekening toegevoegd.



Figuur 61: Eindresultaat prototype

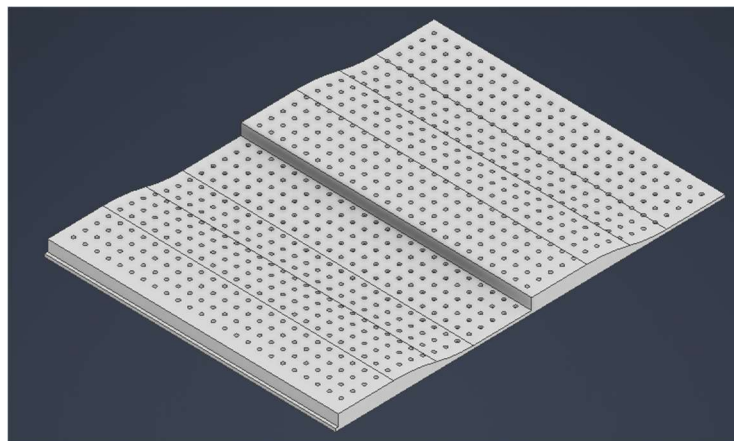
7.2.1. Eerste aanpassingen

Na feedback van meerdere producenten zijn er aanpassingen doorgevoerd aan het ontwerp voordat het wordt vervaardigd. Een van de eerste grote uitdagingen betrof de grootte van de mat, met een lengte van bijna 1,7 meter, wat resulteerde in beperkingen voor veel CNC-machines vanwege een onvoldoende groot werkgebied. Om deze reden is besloten om voor bedrijven die de mat niet in één geheel kunnen produceren, een opgesplitste versie te leveren, bestaande uit twee afzonderlijke stukken. Dit resulteert in twee afzonderlijke objecten. Figuur 62 toont een van de twee opgedeelde stukken van de mat.



Figuur 62: Opgedeelde mat

Een tweede aanpassing betreft het gatenpatroon. Sommige gaten bevonden zich zeer dicht bij de rand, wat het risico op doorscheuren vergrootte. Hoewel het patroon niet kon worden gewijzigd in vorm of grootte, konden er wel gaten worden verwijderd. Het nadeel van het verwijderen van deze gaten is dat dit de zuigkracht zou verminderen. Echter, gezien de nauwkeurige pasvorm met de freesblokken, zou dit geen probleem mogen opleveren en kunnen de betreffende gaten veilig worden verwijderd. Dit resulteert in het resultaat zoals weergegeven in afbeelding 63 in de laatste rij die links te zien is. In de bijlagen zijn de twee 2D tekeningen toegevoegd.

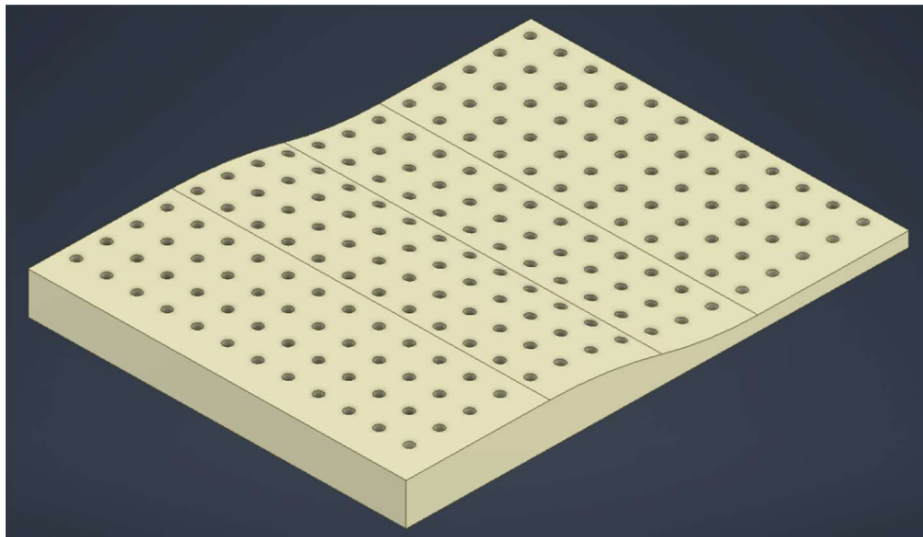


Figuur 63: Herwerking opgedeelde mat

7.2.2. Optimalisatie concept

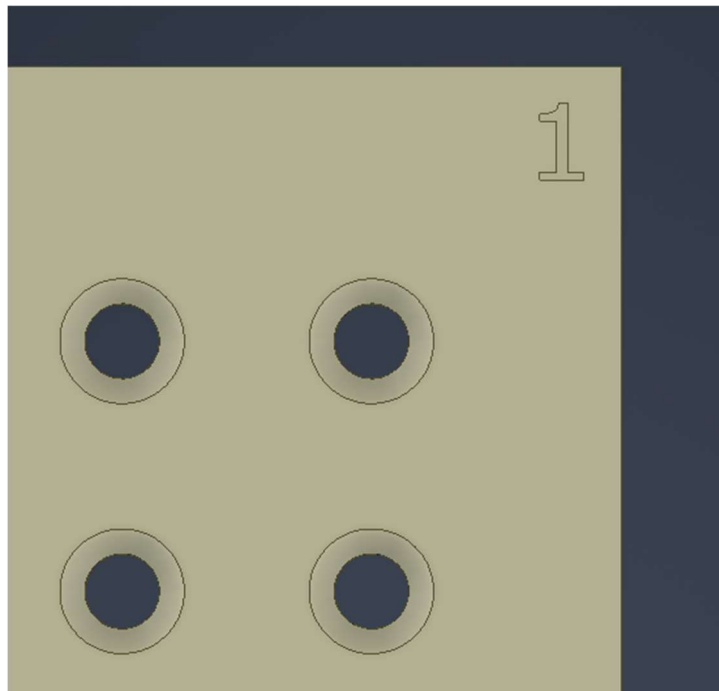
Tot op heden was het plan om deze mat te ontwerpen met behulp van SBR, aangezien dit materiaal aanzienlijke voordelen biedt op het gebied van gebruik en onderhoud voor werknemers vanwege zijn elastische eigenschappen. Na enkele weken wachten op reacties van producenten is geconcludeerd dat het bewerken van SBR niet door veel producenten wordt uitgevoerd. Dit komt doordat SBR een zeer elastisch materiaal is, waardoor producenten geen garantie kunnen bieden op de nauwkeurigheid van de afmetingen.

Om deze reden is het ontwerp van de mat opnieuw aangepast, zodat het in meer verschillende stukken kan worden geproduceerd, waardoor de voordelen van het gebruik behouden kunnen blijven terwijl het gemaakt wordt van PP (Polypropyleen). De grote mat wordt nu opgesplitst in 10 verschillende blokken, zodat elk freesblok een individueel blok kan bewerken. De minimale dikte van de blokken wordt nu met 5 mm verhoogd. Deze aanpassing is ingevoerd vanwege de oorspronkelijke vereiste om de mat gemakkelijk op te kunnen rollen. Echter, momenteel is het van groter belang dat de blokken sterker zijn. Een voorbeeld hiervan is in afbeelding 64 te zien.



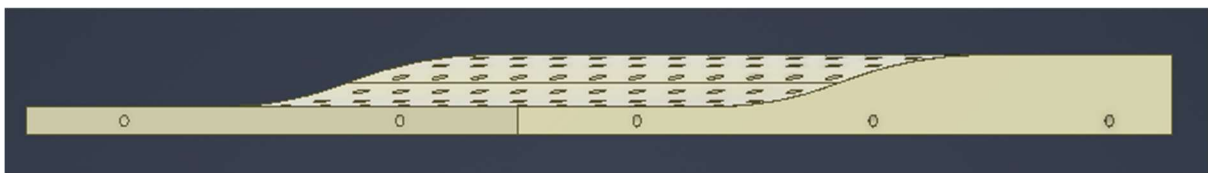
Figuur 64: Opgesplitste mat

Elk blok is uniek vanwege het specifieke gatenpatroon dat erin is aangebracht. Daarom zal er aan de onderzijde van de blokken een nummering worden aangebracht, zie figuur 65. Een blad zal worden opgehangen bij de machine waarop de volgorde van nummering wordt genoteerd, om verwarring te voorkomen.



Figuur 65: Graving in blok één

Tot slot worden er gaten aan de zijkanten van de blokken gemaakt, zodat er achteraf magneten in vastgelijmd kunnen worden. Deze magneten zullen ervoor zorgen dat de blokken een stevige verbinding vormen op de freestafel, wat het vacuüm lek zal verminderen. Er zijn vijf van deze gaten te zien in figuur 66. In de bijlage is de mechanische 2D tekening van het eerste blok toegevoegd.



Figuur 66: Voorziening gaten voor magneten

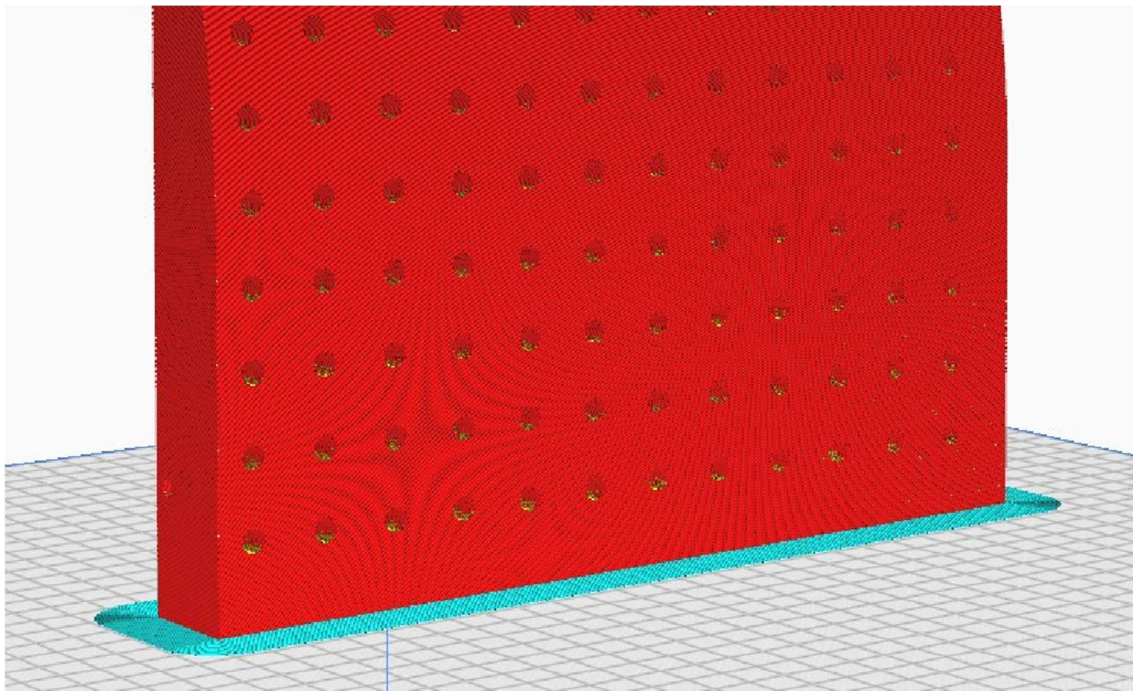
7.3. Prototype 3D-printen

Na de evaluatie van de kosten voor het prototype bleek dat de productiekosten aanzienlijk hoog zijn. Als alternatief is het voorstel om het prototype met behulp van 3D-printing te vervaardigen voorgelegd aan Spronken Orthopedie, die hiermee akkoord zijn gegaan. Om de eigenschappen van het gefreesde materiaal zo goed mogelijk te behouden, is ervoor gekozen om gebruik te maken van Treed PP filament. Polypropyleen staat bekend als een uitdagend materiaal om mee te 3D-printen, en daarom is er nauw samengewerkt met het hoofd van de afdeling 3D-printing bij Spronken Orthopedie.

7.3.1. Instellingen

Treed PP filament vereist een hogere smelttemperatuur dan de meer gangbare filamenten die worden gebruikt bij 3D-printen. Daarom wordt de *nozzle* temperatuur ingesteld op 245 graden Celsius. Om een betere hechting van het PP aan het printbed te garanderen, wordt het printbed op 100 graden Celsius ingesteld.

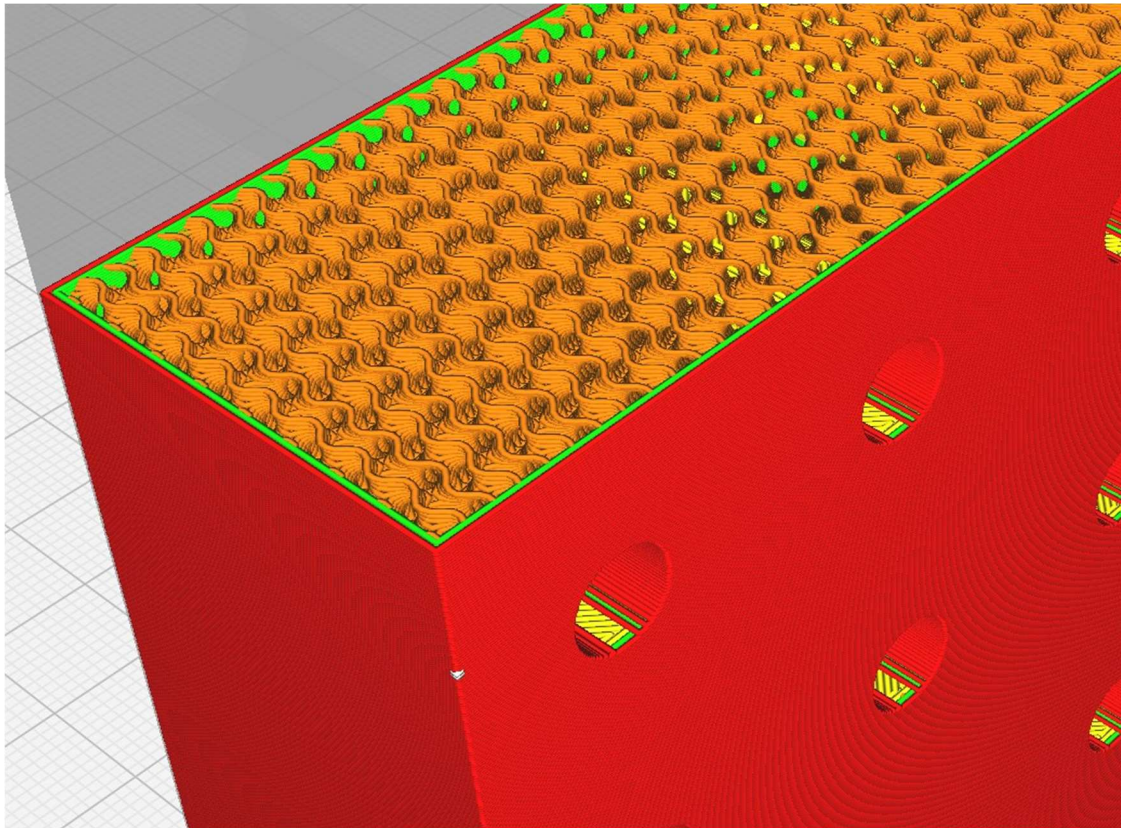
Een *nozzle* van 0,4 mm wordt gebruikt, wat betekent dat de lijnbreedte hieraan ook gelijk zal zijn. De laaghoogte is standaard ingesteld op 0,16 mm, behalve voor de eerste laag, waar de laaghoogte 0,28 mm zal zijn. Deze initiële laaghoogte wordt ook gebruikt voor de *brim* die wordt toegevoegd om een betere hechting van de print aan het printbed te garanderen. Een *brim* bestaat uit een aantal extra randen, in dit geval 25 stuks, die aan de eerste laag van de print worden toegevoegd om een groter contactoppervlak met het printbed te creëren. Deze randen kunnen later worden verwijderd. Figuur 67 illustreert de laaghoogte en de *brim* op het prototype in de slicer-software.



Figuur 67: Close-up laaghoogte en brim

Om een goede stevigheid te waarborgen, wordt een wanddikte van 5 mm gebruikt, wat 2 mm meer is dan de normale methode. Dit wordt gedaan om de kans op doorbuiging te minimaliseren. Om extra stevigheid aan het product toe te voegen, wordt een gyroid-*infill* van 30% toegepast. De *infill* verwijst naar de vorm van de interne vulling van een print, wat helpt om materiaal te besparen en tegelijkertijd de printtijd te verkorten.

In het prototype wordt de gyroid-vorm van *infill* gebruikt, waarbij slechts 30% van het totale volume wordt opgevuld. Figuur 68 toont deze *infill* van dichtbij in het oranje, waarbij ook de wanddikte van te zien is. Het gyroid-model wordt gekozen op basis van de ervaring van het hoofd van de 3D-printafdeling bij Spronken Orthopedie, vanwege de stevige vorm van *infill*.



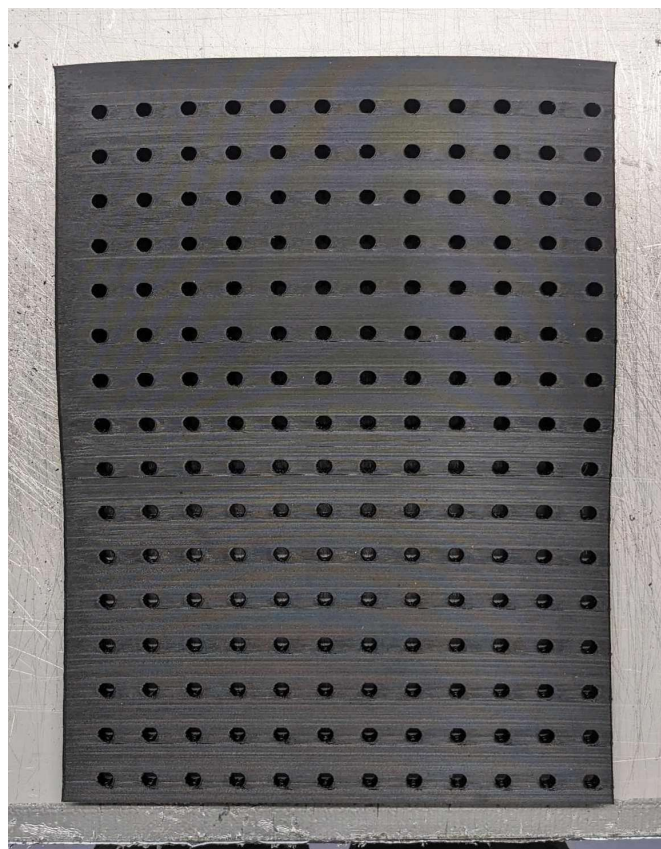
Figuur 68: Close-up van de infill en de wand dikte

Treed PP wordt over het algemeen langzaam geprint om de kans op fouten in de print te minimaliseren. Daarom wordt een printsnelheid van 35 mm/s gebruikt voor dit materiaal. Hoewel dit het printproces aanzienlijk vertraagt, zorgt het voor een meer nauwkeurige en betrouwbare print. Als gevolg hiervan zal de totale printtijd voor het prototype 72 uur bedragen.

7.3.2. Resultaat

In figuur 69 wordt het geprinte prototype van Treed PP getoond, waarbij *warping* is opgetreden aan de onderzijde waar het aan het printbed was bevestigd. *Warping*, het kromtrekken van de print tijdens of na het printen tijdens het afkoelen, is een veelvoorkomend fenomeen dat te verwachten is bij Treed PP. Dit kan verschillende oorzaken hebben, waarvan temperatuurverschillen de belangrijkste zijn.

Tijdens het printproces wordt het plastic verwarmd tot het vloeibaar is en vervolgens snel afgekoeld tot het weer vast wordt. Als dit afkoelproces te snel verloopt, kan krimp optreden. Een andere factor die heeft bijgedragen aan de kans op *warping* bij dit model, is het grote vlakke oppervlak met een aanzienlijke wanddikte die zich op het printbed bevond. Dit resulteerde in een ongelijke warmteverdeling, waarbij de onderste laag meer warmte vasthoudt dan de lagen erboven. Dit leidde tot krimp in de hoger geprinte lagen, die op hun beurt de onderste lagen meetrokken.



Figuur 69: Resultaat prototype 1

Het eerste prototype vertoont ook enkele afwijkingen in de vorm, zoals te zien is in figuur 70. Hoewel het reliëf goed wordt gevolgd voor het onderste deel, is er een onvolledige stijging naar het dikkere deel van het prototype. Het is van cruciaal belang dat deze blokken de juiste vorm correct volgen, aangezien dit essentieel is voor het genereren van maximale afzuigkracht en om ervoor te zorgen dat het freesblok vlak ligt in de CNC-machine. Deze kwestie zal later worden besproken tijdens de uitgevoerde tests.



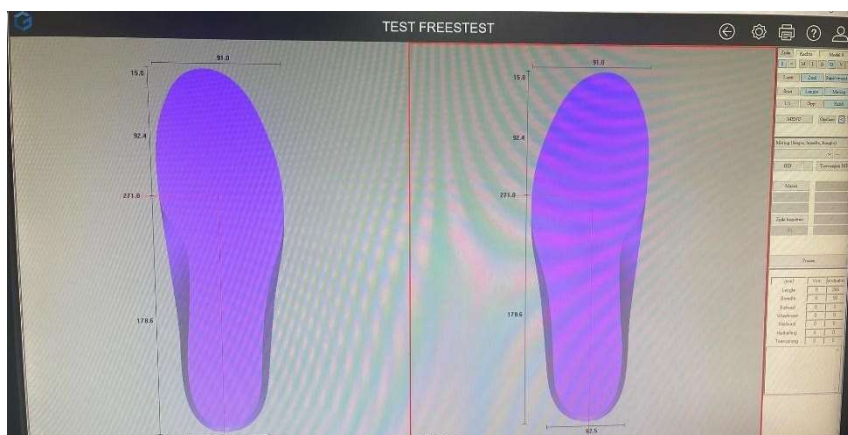
Figuur 70: Hoogteverschil prototype 1 t.o.v. freesblok

7.4. Test prototype

Bij volgende test wordt er gekeken of het prototype goed aansluit op de freesblokken en of het voldoende vacuüm doorlaat om de freesblokken op zijn plaats te houden gedurende het gehele freesproces. Het is van cruciaal belang dat de gehele vacuümtafel afgedekt is om de lekken maximaal te onderdrukken.

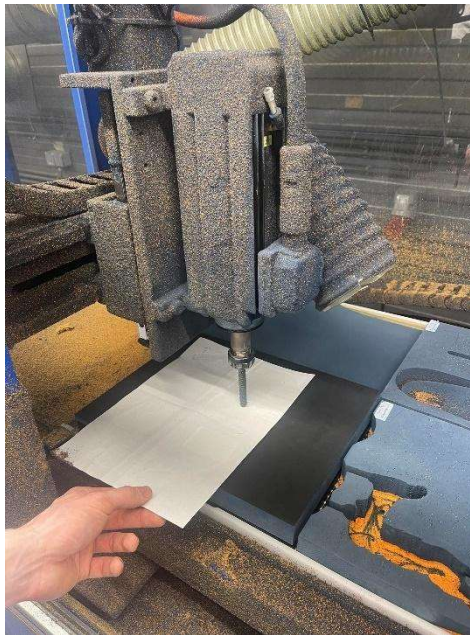
7.4.1. Voorbereiding freestest

Om de steunzool volledig te frezen moet er aan de hand van de zolensoftware de volledige steunzool gemodelleerd worden. Het programma bestaat uit een twee delen: 1^{ste} deel modelleert de bovenkant van de steunzool zoals in de huidige werkwijze geïmplementeerd is, 2^{de} modelleert de onderkant van de steunzool, dit is een feature die verwerkt zit in de software maar nog niet eerder gebruikt is (zie fig. 71). In deze feature kan de leest van de steunzool verder uitgewerkt worden, hierbij kan de diepte, breedte veranderd worden op maat van de klant.



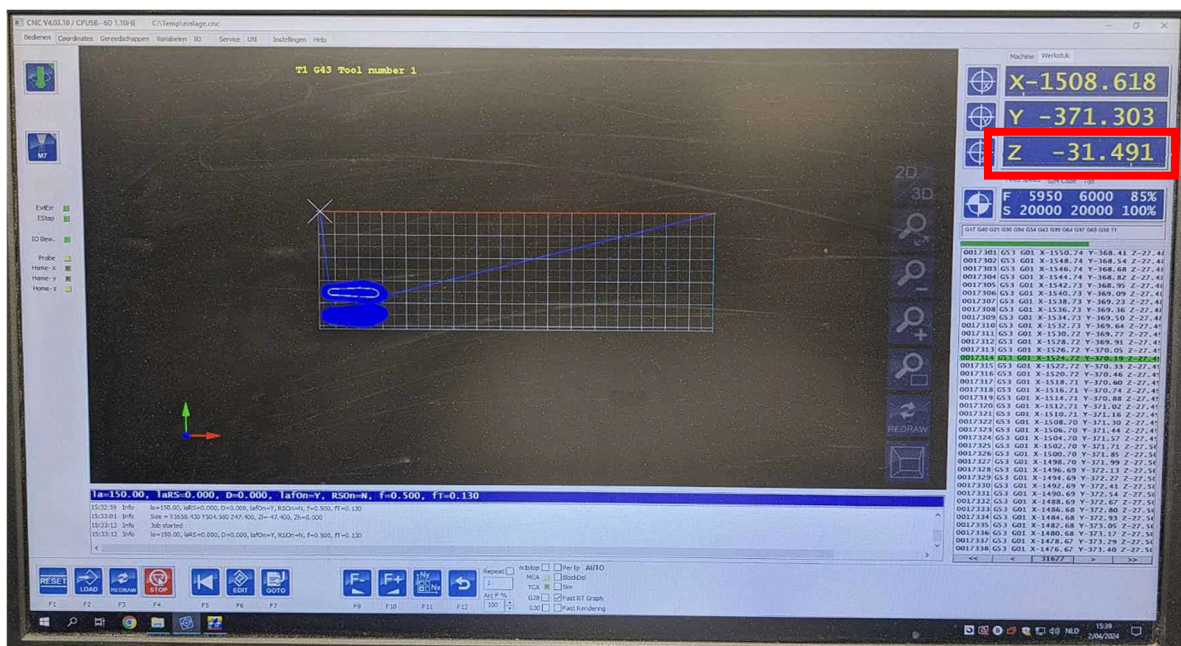
Figuur 71: Modeleren onderkant steunzool

Na het modelleren van de volledige steunzool moet de freesmachine aangepast worden voor het nieuwe prototype. Hierbij moet het nulpunt aangepast worden omdat de freesblokken nu 21 mm verhoogd zijn ten opzichte van de huidige werkwijze. Dit wordt manueel verwezenlijkt door een stuk papier tussen het freesblok en de freeskop te leggen. Indien het stuk papier onder minimale spanning nog bewogen kan worden is het nulpunt correct ingesteld (zie fig. 72).



Figuur 72: herkalibreren freeskop

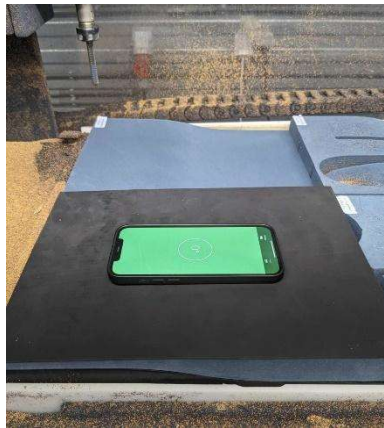
Om veiligheidsredenen is er besloten om voor het testen van de eerste steunzolen de maximale freesdiepte op 5 mm te zetten. Door deze aanpassing kan er gegarandeerd worden dat er niet in het prototype gefreesd wordt (de dikte van het dunste punt in de freesblok is minimaal 9 mm). Om dit te implementeren in de software wordt er 5 mm van het nieuw bepaalde nulpunt afgetrokken. Hierna kan er op de sturing afgelezen worden wat het nulpunt is, dit kan vervolgens geïmplementeerd worden in de code van de sturing (zie fig. 73).



Figuur 73: Aflezing nieuw nulpunt

Tot slot wordt het freesblok omgedraaid op het prototype gelegd in de freesmachine. Hierbij wordt grondig manueel getest door zowel de hoofdoperator als de promotor of de aanzuigkracht voldoende sterk is om de test zo risicovrij mogelijk uit te voeren. De vergrootte gaten ten opzichte van de huidige aanzuigmat bieden aanzienlijk meer aanzuigkracht, desondanks het hogere hoogteverschil dat er nu optreedt. Bijkomend is er ook onderzoek gedaan of het freesblok horizontaal ligt zonder afwijking (zie

fig. 74). Beide onderzoeken zijn succesvol en er kan besloten worden dat het risicovrij en veilig is om aan de test te beginnen.



Figuur 74: Controle oppervlak

7.4.2. Resultaten test

Gedurende de test is er grondig bekeken of de aanzuigkracht voldoende was en of er mogelijke verplaatsingen van het freesblok waren onder de kracht van de freeskop. Bijkomend is er ook een onderzoek gedaan of er door middel van de duwkracht van de freeskop geen vervorming in het prototype zelf ontstaat (zie fig. 75).



Figuur 75: Freetest prototype

7.4.3. Besluit

Op basis van de uitgevoerde tests kan geconcludeerd worden dat het prototype voldoende aanzuigkracht biedt om de freesblokken op hun plaats te houden gedurende het gehele freesproces. Er werd geen vervorming waargenomen in het prototype tijdens het frezen. Er moet enkel verder rekening gehouden worden met een lichte afwijking bij één type blok (zie fig. 58), waarbij een verbeterde optimalisatie van het reliëf moet geïmplementeerd worden door één zijde met 3 mm te verhogen. Het 3D-printproces kan ook worden verbeterd door een ander materiaal te gebruiken dat minder vervormt onder verhoogde temperatuur. Het is van cruciaal belang dat alle zijden recht zijn, omdat eventuele afwijkingen kunnen leiden tot groter lekverlies en daardoor slechtere aanzuiging van de freesblokken. Het testen van de

aanzuigkracht en het controleren van eventuele vervormingen werden succesvol uitgevoerd, waardoor geconcludeerd kan worden dat het prototype geschikt is voor verdere ontwikkeling en implementatie in de productie van steunzolen, mits enkele aanpassingen doorgevoerd worden.

7.5. Tweede prototype

Voor het tweede prototype zijn twee aanpassingen doorgevoerd. Allereerst is het ontwerp aangepast zodat het beter de vorm van de mat volgt. Ten tweede is er gekozen voor een ander materiaal om het prototype te vervaardigen, namelijk Tough-PLA. Dit materiaal staat bekend om zijn sterkte en is tegelijkertijd veel gemakkelijker te printen.

7.5.1. Nieuwe instellingen

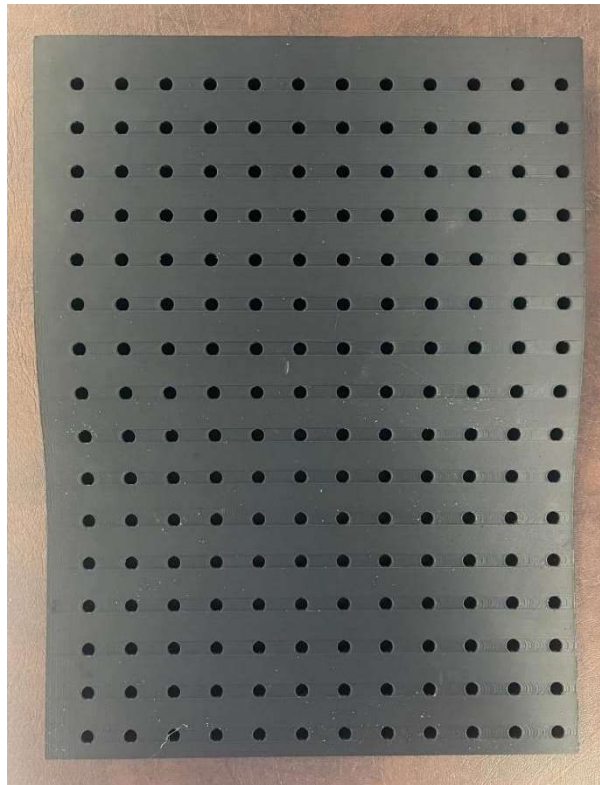
Met de keuze voor een ander materiaal worden ook de instellingen van de printer aangepast. Allereerst wordt de *nozzle* temperatuur verlaagd naar 210 graden Celsius. Daarnaast wordt de temperatuur van het printbed ook verlaagd naar 50 graden Celsius, wat resulteert in een verminderd energieverbruik tijdens het printproces.

De lijndikte, -breedte, *brim* en *infill* blijven gelijk aan de vorige instellingen. Echter, de wandbreedte wordt verlaagd naar 3 mm om minder warmte vast te houden in de onderste laag van de print, waardoor *warping* wordt tegengegaan.

De printsnelheid wordt ook aangepast. Aangezien Tough PLA gemakkelijker te printen is, kan de printsnelheid worden verhoogd naar 50 mm/s. Deze aanpassingen hebben ervoor gezorgd dat het product nu binnen 60 uur kan worden geprint.

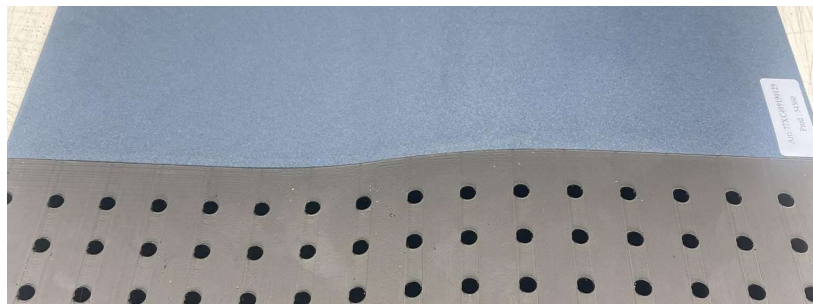
7.5.2. Resultaat

Het tweede prototype wordt weergegeven in figuur 76, en vertoont geen tekenen van *warping*. De aanpassingen die zijn doorgevoerd om *warping* tegen te gaan, omvatten een dunnere wandbreedte en een ander materiaal, wat resulteert in een mogelijk zwakker prototype. Echter, tijdens de latere tests die zullen worden besproken, zijn er geen problemen naar voren gekomen met betrekking tot de sterkte van het tweede prototype.



Figuur 76: Resultaat prototype 2

In figuur 77 is te zien dat het profiel van het freesblok nu perfect wordt gevolgd, wat resulteert in een betere aanzuiging en een vlak werkgebied. Deze verbeteringen zullen later worden besproken tijdens de uitgevoerde tests op dit prototype.



Figuur 77: Hoogteverschil prototype twee t.o.v. freesblok

7.5.3. Besluit

Het tweede prototype demonstreert dat mat 3D-geprint kan worden in 10 kleinere delen. Dit biedt aanzienlijke voordelen voor Spronken Orthopedie. Allereerst stelt dit Spronken in staat om de onderdelen intern te produceren, waardoor er geen contact meer nodig is met externe bedrijven. Dit resulteert in een versnelling van het productieproces. Ten tweede is de kostprijs voor het 3D-printen van alle tien blokken slechts de helft van wat producenten aangeboden voor het vervaardigen van een blok, wat een aanzienlijk financieel voordeel oplevert.

7.6. Test herwerkt prototype

Bij de finale test wordt er onderzocht of het herwerkte prototype verbeterde resultaten oplevert. Door de verbeterde benadering van het reliëf van de freesblokken wordt er verwacht dat de aansluiting en aanzuigkracht verbeterd zijn. Bijkomend door het gebruik van een alternatief materiaal is het kromtrekken verbeterd, wat zorgt voor een betere aaneensluiting van vacuümmatten.

7.6.1. Voorbereiding freestest

Voorafgaand aan de freestest voor het volledig frezen van de steunzolen, dient er gebruik gemaakt te worden van het steunzolenprogramma GpManager. Dit programma maakt het mogelijk zowel de boven- als onderkant van de steunzool te modelleren, wat vervolgens naar de freesmachine kan worden gestuurd. Echter, vanwege een bug in de software en het feit dat nodige updates over het hoofd zijn gezien binnen Spronken, is het momenteel niet mogelijk om de onderkant zolensoftware te gebruiken.

Er moet in de toekomst intern een besluit gevormd worden of er geopteerd wordt om deze betalende updates en bugs op te lossen maar deze beslissing valt buiten het termijn van de masterproef. Om toch een freestest uit te voeren, is een nieuwe scan van een voet gemaakt. Hierbij wordt de onderkant volledig bepaald. Vanuit de bovenkant zolensoftware kan vervolgens de onderkant gemodelleerd worden voor deze test, dit is niet optimaal maar biedt een goed alternatief.

Omdat uit eerdere tests is gebleken dat het vacuüm ruim voldoende was en dit nieuwer prototype beter aansluit en dus beschikt over meer vacuüm (zie fig. 73), is besloten om direct tot de nodige diepte van de uit te frezen leest te gaan. Het nulpunt is daarbij gekozen op het laagste punt van de vacuümmat, met een kleine veiligheidsfactor van 1 mm om de mat niet te beschadigen.

Voor aanvang van de test wordt bijkomend grondig gecontroleerd of de gehele vacuümtafel afgedekt is en of er geen lekken zijn. Tot slot wordt stevig tegen het freesblok op de vacuümmat gedrukt om te garanderen dat het vacuüm sterk genoeg is.

7.6.2. Resultaten freestest

De freestest is succesvol verlopen, met name bij het frezen van de onderkant van de steunzolen. Gedurende de gehele freescyclus was er geen enkel vacuümverlies en geen enkele beweging in de freesblok waar te nemen. Dit resulteerde in een zeer mooie afwerking van de onderkant van de steunzolen (zie fig. 78), waardoor er geconcludeerd kan worden dat deze fase van de test geslaagd is.



Figuur 78: Uitsfrezen onderkant steunzolen

Na het verwijderen van het prototype van de vacuümtafel en het omdraaien van de freesblok, kan de bovenkant van de steunzool worden gefreesd. Tijdens deze tweede fase van de test is er nauwlettend in de gaten gehouden of er beweging in de steunzool optrad. Er kan geconcludeerd worden dat er geen beweging in de steunzool of freesblok plaatsvond gedurende de gehele freescyclus. Hierbij is de tweede fase van de test ook succesvol afgerond (zie fig. 79).



Figuur 79: Uitsfrezen bovenkant steunzolen

7.6.3. Besluit

De freestest voor het vervaardigen van één paar steunzolen is succesvol verlopen. Zowel de onderkant als de bovenkant van de steunzolen zijn met goede resultaten uitgefreesd, zonder enige beweging in de steunzolen of de freesblokken gedurende het proces. Echter, bij de overweging om een hele tafel van 10 freesblokken tegelijkertijd uit te frezen, moet er rekening gehouden worden met een potentieel probleem. Het vacuümverlies gaat aanzienlijk toenemen, omdat bij het frezen van meerdere steunzolen tegelijkertijd een opening ontstaat waardoor vacuüm kan ontsnappen. Dit kan leiden tot verminderde stabiliteit en precisie tijdens het frezen, wat de kwaliteit van de steunzolen drastisch kan beïnvloeden. Daarom kan er geconcludeerd worden dat het niet mogelijk is om een batch van 10 paar steunzolen op deze manier uit te frezen. Er kunnen mogelijks wel kleinere batches van maximaal twee steunzoolparen per freescyclus uitgefreesd worden voor steunzolen met complexe onderzijden dat manueel niet haalbaar is.

8. Finale resultaten

8.1. Inleiding

Voor de finale testen worden gedetailleerde analyses uitgevoerd waarbij de traditionele methode wordt vergeleken met nieuwe werkwijzen. Het doel van deze studie is het vergelijken van de efficiëntie van alle productieprocessen. De stappen in beide processen worden getimed en de tijden worden genoteerd. Dit maakt het mogelijk om te bepalen welke methode sneller is en welke de meeste manuele arbeid vereist.

8.2. Eerste test: Traditionele werkwijze

De eerste test, weergegeven in tabel 6, betreft de traditionele werkwijze. Hieronder volgen de gedetailleerde resultaten van deze test:

Tabel 6: Tijden traditioneel productieproces

Traditioneel productieproces	Tijd [s]
Inladen bestand	10
Frezen	800
Snijden	45
Slijpen	210
Manueel	265
Machinaal	800
Totaal	1065

Analyse

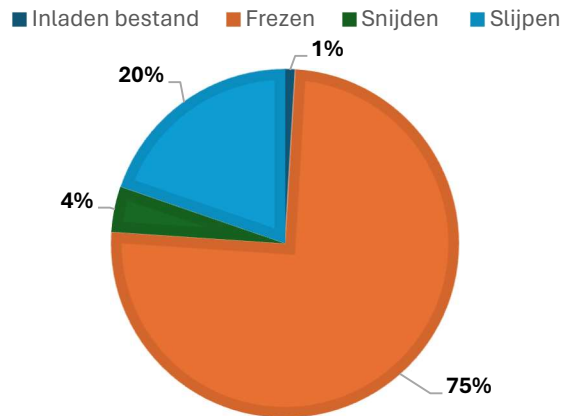
Het totale proces in de traditionele werkwijze neemt 1065 seconden in beslag. Frezen is de meest tijdrovende stap met 800 seconden, goed voor 75% van de totale tijd. Het slijpen neemt 210 seconden in beslag, wat neerkomt op 20% van de totale tijd. Het snijden met een breekmes en het inladen van het freesbestand zijn minder tijdsintensieve stappen, respectievelijk 4% en 1%.

De verdeling tussen manuele en machinale arbeid in de traditionele werkwijze is als volgt:

- Manueel: 265 seconden (25%)
- Machinaal: 800 seconden (75%)

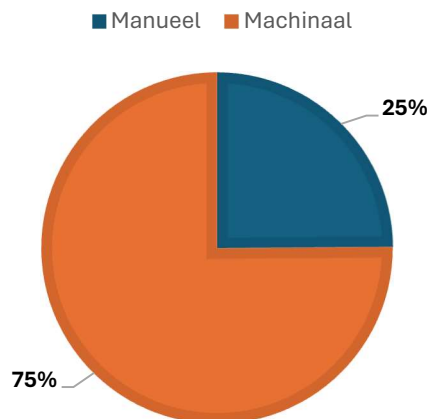
Deze verdeling wordt visueel ondersteund door de bijgevoegde cirkeldiagrammen. Het bovenste cirkeldiagram toont de procentuele verdeling van alle processtappen, uitgevoerd voor het bekomen van de steunzolen (zie fig. 80). Het onderste diagram toont de procentuele manuele arbeid (zie fig. 81).

TRADITIONEEL PRODUCTIEPROCES



Figuur 80: Procentuele verdeling stappen traditioneel productieproces

PROCENTUELE MANUELE ARBEID



Figuur 81: Procentuele manuele arbeid traditioneel productieproces

Deze eerste test biedt een duidelijk beeld van de tijdsverdeling en de verhouding tussen manuele en machinale arbeid in de traditionele werkwijze. Deze gegevens vormen de basis voor verdere vergelijkingen met de nieuwe werkwijzen waarbij de herwerkte vacuümmat wordt gebruikt. Door dezelfde gedetailleerde analyse toe te passen op de nieuwe werkwijzen, kunnen conclusies worden getrokken over de efficiëntie en de arbeidsintensiteit van de verschillende methoden.

8.3. Tweede test: nieuw productieproces

De tweede test evalueert de nieuwe werkwijze waarbij de herwerkte vacuümmat wordt gebruikt. Deze methode maakt het mogelijk om de onderkant van de steunzool machinaal te verwerken. Hieronder volgen de gedetailleerde resultaten van deze test weergegeven in tabel 7:

Tabel 7: Procestijden nieuw productieproces

Nieuw productieproces	Tijd [s]
Inladen bestand	20
Frezen onderkant	280
Omdraaien	10
Frezen bovenkant	800
Snijden	10
Slijpen	130
Manueel	170
Machinaal	1080
Totaal	1250

Analyse

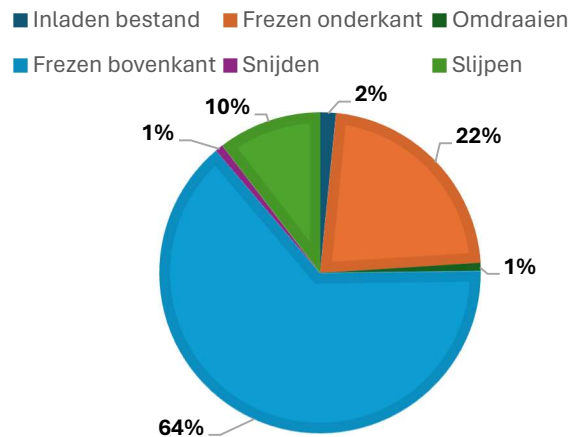
Het totale proces in de nieuwe werkwijze neemt 1250 seconden in beslag. Frezen van de bovenkant is de meest tijdrovende stap met 800 seconden, goed voor 64% van de totale tijd. Het frezen van de onderkant duurt 280 seconden, wat neerkomt op 22% van de totale tijd. Snijden en slijpen nemen respectievelijk 140 seconden (10%) en 2 seconden (2%) in beslag. Het inladen van het bestand en het omdraaien van de steunzool zijn de minst tijdsintensieve stappen, goed voor 2% van de totale tijd.

De verdeling tussen manuele en machinale arbeid in de nieuwe werkwijze is als volgt:

- Manueel: 170 seconden (14%)
- Machinaal: 1080 seconden (86%)

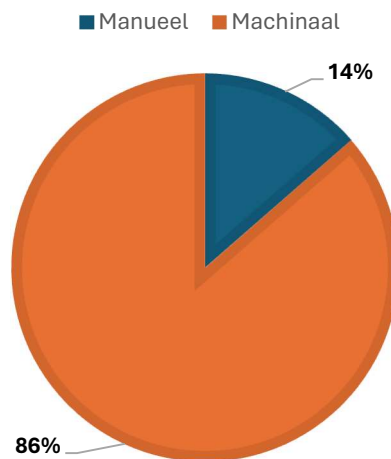
Deze verdeling wordt visueel ondersteund door de bijgevoegde cirkeldiagrammen. Het bovenste cirkeldiagram toont de procentuele verdeling van alle processtappen uitgevoerd voor het bekomen van de steunzolen (zie fig. 82). Het onderste diagram toont de procentuele manuele arbeid (zie fig. 83).

NIEUW PRODUCTIEPROCES



Figuur 82: Procentuele verdeling stappen nieuw productieproces

PROCENTUELE MANUELE ARBEID



Figuur 83: Procentuele manuele arbeid nieuw productieproces

De tweede test waarbij de herwerkte vacuümmat wordt gebruikt, toont aanzienlijke voordelen ten opzichte van de traditionele methode. De nieuwe werkwijze vereist 11% minder manuele arbeid. Door de afname in manuele arbeid vermindert niet alleen de fysieke belasting op de werknemers, maar wordt de efficiëntie van het proces ook verhoogt.

Bijkomend zorgt het frezen van de leest, in plaats van het handmatig slijpen op het oog en op basis van ervaring, voor een aanzienlijke verbetering van de reproduceerbaarheid van het product. De precisie die bereikt wordt door machinale bewerkingen vermindert de kans op fouten aanzienlijk, wat resulteert in een consistente hogere kwaliteit van de eindproducten.

Samengevat biedt de nieuwe werkwijze met de vacuümmat belangrijke voordelen: minder manuele arbeid, verbeterde reproduceerbaarheid en een lagere kans op fouten. Er zijn helaas ook enkele beperkingen. Het frezen van de onderkant van de steunzolen leidt tot een te groot vacuümverlies bij een batchgrootte groter dan twee. Hoewel het mogelijk is dat deze methode werkt voor een gehele freestafel van tien, kan dit niet met zekerheid worden gegarandeerd. Vanwege veiligheidsredenen kan momenteel enkel een batchgrootte van twee worden gegarandeerd.

8.4. Derde test: nieuw productieproces zonder contour

In de derde test wordt geprobeerd om de batchgrootte te vergroten door als laatste stap geen contour te frezen (zie fig. 84). Deze aanpak zorgt ervoor dat er altijd een vacuüm onder de freesblokken blijft, waardoor lekverlies wordt voorkomen. Hieronder volgen de gedetailleerde resultaten van deze test weergegeven in tabel 8:



Figuur 84: Nieuw productieproces zonder contourfrezen

Tabel 8: Procestijden nieuw productieproces zonder contour

Nieuw productieproces zonder contour	Tijd [s]
Inladen bestand	20
Frezen onderkant	280
Omdraaien	10
Frezen bovenkant	700
Snijden	50
Slijpen	210
Manueel	290
Machinaal	980
Totaal	1270

Analyse

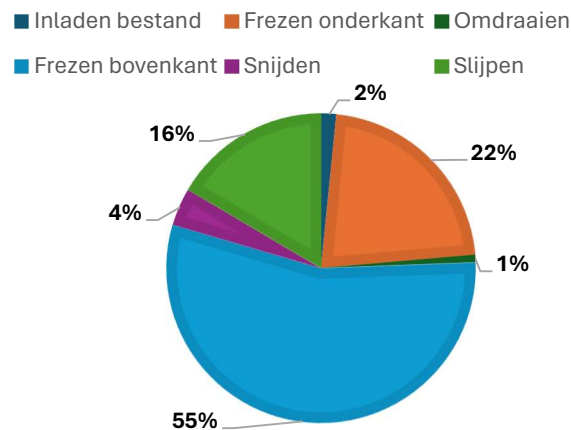
Het totale proces in de nieuwe werkwijze zonder contourfrezen neemt 1270 seconden in beslag. Het frezen van de bovenkant blijft de meest tijdrovende stap met 700 seconden, goed voor 55% van de totale tijd. Het frezen van de onderkant duurt 280 seconden (22%), en snijden en slijpen neemt 260 seconden in beslag (20%). Het inladen van het bestand en het omdraaien van de steunzool blijven de minst tijdsintensieve stappen, slechts 3% van de totale tijd.

De verdeling tussen manuele en machinale arbeid in de nieuwe werkwijze zonder contourfrezen is als volgt:

- Manueel: 290 seconden (20%)
- Machinaal: 980 seconden (80%)

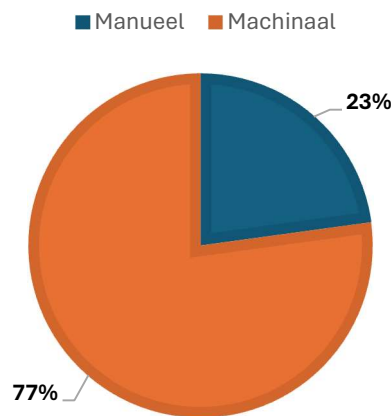
Deze verdeling wordt visueel ondersteund door de bijgevoegde cirkeldiagrammen. Het bovenste cirkeldiagram toont de procentuele verdeling van alle processtappen uitgevoerd voor het bekomen van de steunzolen (zie fig. 85). Het onderste diagram toont de procentuele manuele arbeid (zie fig. 86).

NIEUW PRODUCTIEPROCES ZONDER CONTOUR



Figuur 85: Procentuele verdeling stappen nieuw productieproces zonder contour

PROCENTUELE MANUELE ARBEID



Figuur 86: Procentuele manuele arbeid nieuw productieproces zonder contour

De derde test laat zien dat het niet frezen van de contour als laatste stap effectief is in het voorkomen van vacuümverlies, waardoor een grotere batchgrootte mogelijk wordt. Echter, resulteren deze aanpassingen ook in een lichte toename van de manuele arbeid, die nu 23% van de totale tijd inneemt. Ondanks deze toename in manuele arbeid, blijft de nieuwe werkwijze zonder contourfrezen een efficiënte methode om grotere batchgroottes veilig te verwerken zonder risico op vacuümverlies.

8.5. Besluit

Uit de uitgevoerde testen blijkt dat beide nieuwe methoden een significante afname in manuele arbeid laten zien in vergelijking met de traditionele werkwijze. De nieuwe methoden bieden aanzienlijke voordelen:

1. Eerste test: traditionele werkwijze

In de traditionele methode neemt het gehele productieproces 1065 seconden in beslag, met 265 seconden (25%) manuele arbeid en 800 seconden (75%) machinale arbeid. Het frezen is hierbij de meest tijdrovende stap.

2. Tweede test: nieuwe werkwijze met vacuümmat

De nieuwe werkwijze, waarbij een vacuümmat wordt gebruikt, toont aan dat het totale proces 1250 seconden duurt. Hierbij is slechts 170 seconden (14%) manuele arbeid nodig en 1080 seconden (86%) machinale arbeid. Hoewel deze methode minder manuele arbeid vereist en een verbeterde reproduceerbaarheid biedt, blijkt dat het vacuümverlies na twee paar steunzolen te groot is, waardoor de batchgrootte beperkt blijft.

3. Derde test: nieuwe Werkwijze zonder contourfrezes

In de derde test, waarbij er geen contour wordt gefreesd, neemt het totale proces 1270 seconden in beslag. De verdeling is 290 seconden (20%) manuele arbeid en 980 seconden (80%) machinale arbeid. Deze methode maakt het mogelijk om tien paar steunzolen te frezen zonder vacuümverlies, wat een groot voordeel is voor grotere batchgroottes.

8.5.1. Aanbevelingen en opmerkingen

1. Manuele arbeidstijden: De tijden van de manuele arbeid bij de nieuwe testen kunnen verbeterd worden, aangezien dit de eerste keer was dat de arbeider deze handelingen uitvoerde. Verdere training kan de efficiëntie verhogen.
2. Ervaring arbeider: De testen zijn uitgevoerd door de meest ervaren arbeider. Indien minder ervaren arbeiders worden ingezet, kunnen de manuele arbeidstijden aanzienlijk toenemen.

8.5.2. Conclusie

Samengevat bieden beide nieuwe methoden duidelijke voordelen in termen van verminderde manuele arbeid en verbeterde reproduceerbaarheid. De methode zonder contourfrezes biedt daarnaast de mogelijkheid om grotere batchgroottes te verwerken zonder vacuümverlies, wat bijdraagt aan de efficiëntie van het productieproces. Echter, de keuze tussen de methoden hangt af van de specifieke vereisten van de productie, zoals batchgrootte en de beschikbare vaardigheidsniveaus van de arbeiders.

8. Besluit

Deze masterproef heeft zich gericht op het verbeteren van het freesproces voor het vervaardigen van steunzolen bij Spronken Orthopedie. Door middel van grondig onderzoek, testen en evaluaties zijn verschillende aspecten van het proces geanalyseerd en geoptimaliseerd.

Er zijn twee concepten voorgesteld waaruit Spronken Orthopedie een keuze heeft gemaakt. Dit concept is gericht op het realiseren van een nieuwe vacuümmat die het inverse reliëf van de freesblokken benadert. Dit biedt een efficiënte aanpak om de huidige vacuümtafelproblemen te verhelpen en het elimineert de noodzaak om het beginproduct van de freesblokken aan te passen. Dankzij de eenvoudige hanteerbaarheid en verwisselbaarheid kan dit concept snel worden geïmplementeerd zonder aanzienlijke verstoring van het bestaande productieproces.

Vervolgens is er een onderzoek uitgevoerd naar het meest geschikte materiaal voor de nieuwe vacuümmat te realiseren. De parameters van dit onderzoek zijn meermaals veranderd waardoor het selectieproces opnieuw uitgevoerd is. Dit resulteerde in een verandering van het totaalconcept waarbij een vacuümmat herwerkt is tot een opgesplitste versie van de mat, gemaakt uit een harder materiaal. Dit resulteerde in de selectie van PP als het meest geschikte materiaal. PP biedt een uitstekende combinatie van stijfheid, prijs, lage dichtheid, verwerkbaarheid en recyclebaarheid, waardoor het ideaal is voor de huidige toepassing.

Door het herwerkte freesproces zijn er testen uitgevoerd of de bolfrees de leest van de steunzool kan frezen. Hierbij moet de freesblok omgedraaid liggen en moet er door een harder materiaal gefreesd worden (duralux). Uit de testen blijkt dat het mogelijk is om de leest te frezen. Een inloopbewerking is essentieel voor efficiëntie en een toerental van minstens 15.000 toeren per minuut is noodzakelijk voor een goede afwerking.

Uit het besluit van voorgaande testen, die concludeerde dat het mogelijk is om door de duralux te frezen en het materiaal bepaald is, is er een prototype ontworpen. De afwijkingen op dezelfde batch van freesblokken zijn bepaald en er blijkt dat een hoogteverschil van ± 21 mm ideaal is voor het benaderen van de freesblokken. Doorheen het ontwerp zijn er drie verschillende iteraties van het ontwerp uitgevoerd, dit is een gevolg van problemen bij de leveranciers. Bij de laatste iteratie is gebleken dat het machineren zeer kostelijk is en om deze reden is er overgegaan naar 3D-printen.

Door de keuze naar de overstap van 3D-printen is het mogelijk de mat te produceren binnen Spronken Orthopedie, dit biedt aanzienlijk meer voordelen. Er is een eerste prototype ontwikkeld waaruit is gebleken dat PP een moeilijk materiaal is om te printen. Het prototype is op meerdere punten kromgetrokken, hierbij is er geadviseerd om een ander materiaal te gebruiken, namelijk Tough-PLA. Tough-PLA heeft gelijkaardige eigenschappen in sterkte, stijfheid en massadichtheid terwijl het over betere printereigenschappen beschikt.

Tot slot zijn de finale freestesten met het herwerkte prototype succesvol verlopen, waarbij zowel de onderkant als de bovenkant van de steunzolen met goede resultaten zijn uitgefreesd. Er is voldoende vacuümaanzuiging en er is geen enkele beweging in de steunzolen of freesblokken gedurende het proces. Echter, bij het overwegen van het frezen van batches groter als twee moet er rekening gehouden worden met potentieel vacuümverlies, wat de stabiliteit en precisie kan verminderen. Bijkomend zijn er ook nog

testen uitgevoerd naar een andere freesstrategie, waarbij de steunzool één geheel blijft vormen met de freesblok. Hierdoor ontstaat geen vacuümverlies en is een batchgrootte van tien mogelijk.

Indien er gekeken wordt naar de vooraf opgestelde doelstelling dan kan er geconcludeerd worden dat de freesstrategie enkel geschikt voor batches kleiner of gelijk aan twee paar steunzolen volgende waardes heeft bereikt:

- manuele arbeid is afgenomen met 35,85% (van 265 s naar 170 s),
- reproduceerbaarheid is verhoogt en consistent,
- kans op fouten is afgenomen,
- productietijd is gestegen met 14,8% (van 1065 s naar 1250 s),
- mogelijkheid voor ontwikkeling complexe steunzolen.

Indien er gekeken wordt naar de vooraf opgestelde doelstelling dan kan er geconcludeerd worden dat de freesstrategie geschikt voor grote batches volgende waardes heeft bereikt:

- manuele arbeid is gestegen met 8,6% (van 265 s naar 290 s),
- reproduceerbaarheid is verhoogt en consistent,
- kans op fouten is afgenomen,
- productietijd is gestegen met 16,1% (van 1065 s naar 1270 s),
- mogelijkheid voor ontwikkeling complexe steunzolen.

Al met al heeft de masterproef geleid tot verbeteringen in het freesproces van steunzolen bij Spronken Orthopedie, met als resultaat een hogere productiekwaliteit, efficiëntie en reproduceerbaarheid. Het ontwikkelde prototype biedt een solide basis voor verdere ontwikkeling en implementatie in de praktijk.

Een opvolgend onderzoek kan gedaan worden naar het aanpassen van de vacuümtafel zodat er minder lekverlies ontstaat voor de eerste freesstrategie. Een mogelijk tot verbetering is het aanpassen van de vacuümtafel zodat deze opgesplitst kan worden in tien individuele compartimenten. Elk van deze compartimenten zou individueel aangestuurd kunnen worden naargelang de positie van de frees. Een andere optie is het praktisch uitwerken van de herwerkte vlakke vacuümmat die theoretisch ontworpen is binnen deze masterproef.

Naar de toekomst toe is het volledig 3D-printen van de steunzolen een betere optie waar de industrie zelf naartoe aan het evolueren is. Spronken Orthopedie is al een productie gestart met deze technologie en zal een groot deel van de freesproductie overnemen. Het 3D-printen zorgt ervoor dat er zo goed als geen manuele arbeid meer nodig is voor het ontwikkelen van steunzolen.

Referentielijst

- [1] S. Projects, “Spronken Orthopedie | Bandagisten - Leverancier Hulpmiddelen | Over ons | Spronken Orthopedie”, 22 januari 2024. <https://www.spronken.com/nl-be/over-ons> (geraadpleegd 4 oktober 2023).
- [2] S. Boons, „Project automatisatie freesmachine - steunzolen,” 19 09 2023. [Online]. (Geopend 2 10 2023).
- [3] Vigo Group, “Orthopedische steunzolen - Vigo Group”, *Vigo Group*. <https://www.vigogroup.eu/steunzolen> (geraadpleegd 8 maart 2024).
- [4] Matton Orthomedi, “Steunzolen op maat zonder afspraak - Matton OrthoMedi”, *Matton Orthomedi*, 17 oktober 2023. <https://www.orthomatton.be/steunzolen/> (geraadpleegd 8 maart 2024).
- [5] Goed, “Welke steunzolen op maat kies ik? I Goed”, *Goed*. <https://www.goed.be/nl/advies/steunzolen/steunzolen-op-maat> (geraadpleegd 8 maart 2024).
- [6] Orthovandewiele, “Steunzolen op maat | Orthovandewiele | Uw specialist in orthopedie”, *Orthovandewiele*, 8 februari 2023. <https://orthovandewiele.be/steunzolen/> (geraadpleegd 8 maart 2024).
- [7] Runners’ lab, “Steunzolen - Runners’ lab”, *Runners’ Lab*, 5 januari 2024. <https://runnerslab.be/services/steunzolen/> (geraadpleegd 8 maart 2024).
- [8] Goed thuiszorgwinkel, “Steunzolen Phits”, *Goed Thuiszorgwinkel*. <https://www.thuiszorgwinkel.be/nl/shop/op-gezonde-voet/steunzolen/bestellen/steunzolen-phits> (geraadpleegd 8 maart 2024).
- [9] Manutan, “Machineveiligheid: regelgeving en praktische tips - Manutan blog”, *Manutan Blog*, 8 maart 2024. <https://www.manutan.be/blog/nl-be/veiligheid-en-hygiene-op-de-werkvloer/machineveiligheid-regelgeving-en-praktische-tips/> (geraadpleegd 8 maart 2024).
- [10] “Frezen voor kunststof, nonferro- en composiet materialen - Hagro”. <https://www.hagro.nl/frezen-voor-kunststof-nonferro-en-composiet-materialen> (geraadpleegd 8 maart 2024).
- [11] Dennie, “Kunststof frezen maakindustrie | De laser frezer”, *De Laser Frezer*, 20 oktober 2022. <https://www.delaserfrezer.com/kunststof-frezen-maakindustrie/> (geraadpleegd 8 maart 2024).
- [12] Novaplast, “Kunststof frezen - Novoplast”, *Novoplast*, 17 oktober 2019. <https://novoplast.nl/product/kunststof-frezen/> (geraadpleegd 8 maart 2024).
- [13] J. Bijmens, in *Basis CNC*, Diepenbeek, KU leuven, 2008, pp. 21,23,74.

- [14] K. Dwivedi, “Tool Life, Taylor’s Tool Life Equation, Calculation, Factor”, *Mechical*, 15 oktober 2023. <https://www.mechical.com/2022/01/tool-life-taylors-tool-life-equation.html> (geraadpleegd 8 maart 2024).
- [15] Ing. ŠIDLOVSKÁ Ľuboslava, I. T. (2014). *Analysis of flow rates in the design of effector for unilateral gripping*. Trans Tech Publications.
- [16] Jure Hudoklin, S. S. (2022). Vacuum Suction Cup Modeling for Evaluation of. *ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS*
- [17] *PIAB Vacuum Products Product Catalog*. (2006). Penton Media.
- [18] A. Chen, “Eigenschappen en toepassingen van siliconenrubber,” *Hongju*, Aug. 17, 2023. <https://nl.hongjusilicone.com/silicone-rubber-properties-and-applications/> (accessed Mar. 15, 2024).
- [19] N. Duckmanton, “What is Nitrile / NBR Rubber?,” *J-Flex Rubber Products*, Dec. 13, 2022. <https://www.j-flex.com/nl/what-is-nitrile-nbr-rubber/> (accessed Mar. 15, 2024).
- [20] PCC Group, “Polyvinylchloride: toepassingen en eigenschappen,” *PCC Group Product Portal*, May 10, 2022. <https://www.products.pcc.eu/nl/blog/polyvinylchloride-toepassingen-en-eigenschappen/> (accessed Mar. 15, 2024).
- [21] G. Vondriska, “How to use a drag knife with a CNC router”, 28 juli 2023. <https://info.lagunatools.com/how-to-use-a-drag-knife-with-a-cnc-router> (geraadpleegd 14 november 2023).
- [22] “Drag Knife for CNC router”, *Donek Tools*, 12 februari 2022. <https://donektools.com/> (geraadpleegd 14 november 2023).
- [23] M. Mensley, “3D Printer Extruder – All You Need to Know”, *All3DP*, 27 juli 2023. <https://all3dp.com/2/3d-printer-extruder-guide/> (geraadpleegd 10 februari 2024).
- [24] W. Staff, “What is Resin 3D printing?,” *Weerg*, 8 januari 2024. <https://www.weerg.com/guides/what-is-resin-3d-printing> (geraadpleegd 10 februari 2024).
- [25] “Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing”, *Formlabs*. <https://formlabs.com/eu/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/> (geraadpleegd 10 februari 2024).
- [26] “What is 3D Printer Resin? | HATCHBOX”, *HATCHBOX 3D*. <https://www.hatchbox3d.com/pages/photopolymer-resin> (geraadpleegd 10 februari 2024).
- [27] “3D printen? Dit is Selective Laser Sintering - Oceanz 3D Printing”, *Oceanz 3D Printing*. <https://www.oceanz.eu/technieken/selective-laser-sintering/> (geraadpleegd 10 februari 2024).

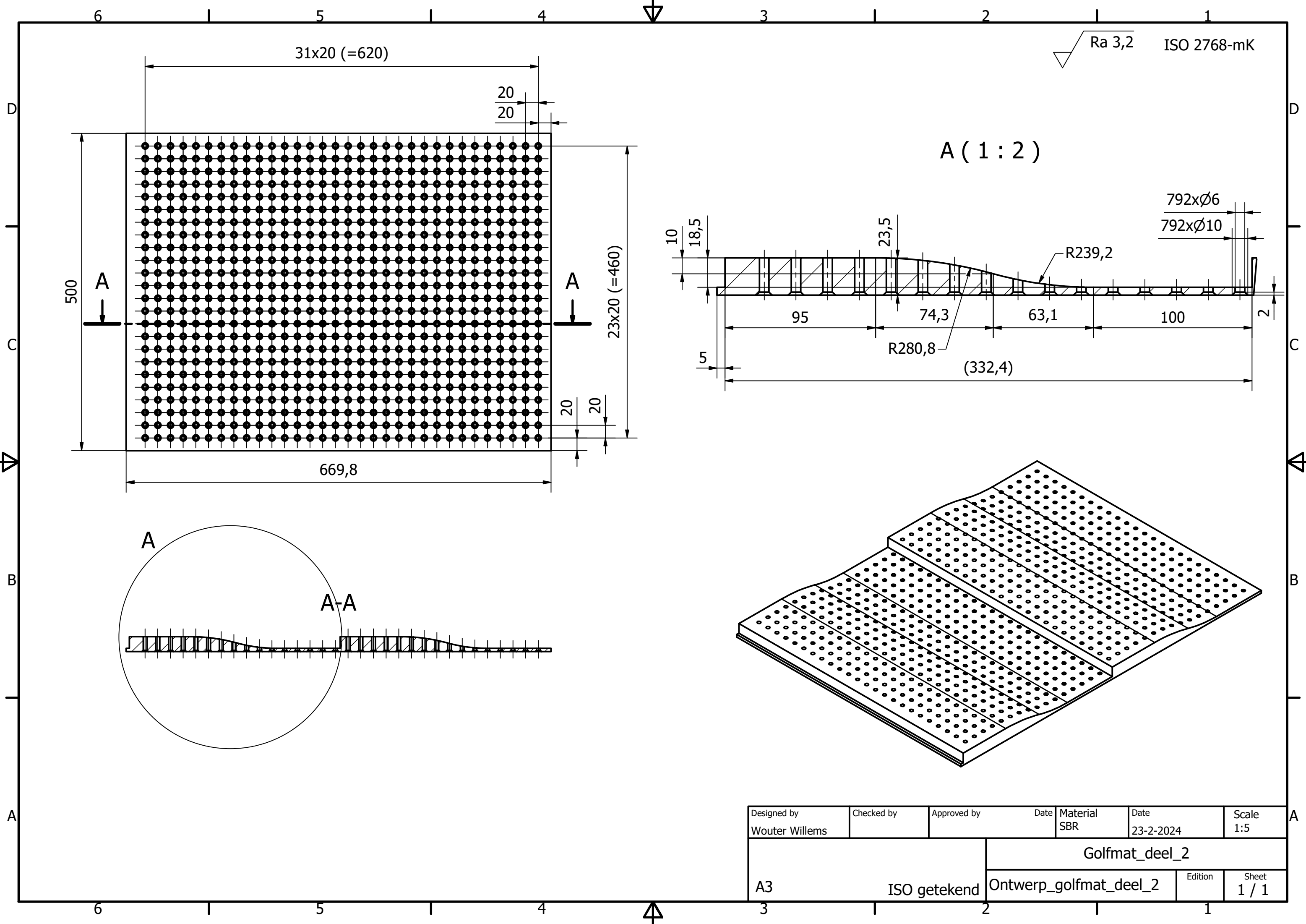
- [28] “How Does Powder-Based 3D Printing Work? | Help Center | i.materialise”.
<https://imaterialise.helpjuice.com/design-printing/powder-based-3d-printing>
(geraadpleegd 10 februari 2024).

Bijlagenlijst

Bijlage A: 2D tekening van de volledige mat	110
Bijlage B: 2D tekeningen van de opgesplitste mat.....	111
Bijlage C: 2D tekening van eerste blok.....	112
Bijlage D: Wekelijkse checklist freesmachine	113
Bijlage E: Handleiding vervangen en kalibreren frees.....	114
Bijlage F: Excel document bijhorend tot de handleiding	120

Bijlage A: 2D tekening van de volledige mat

Bijlage B: 2D tekeningen van de opgesplitste mat



Designed by Wouter Willems	Checked by	Approved by	Date	Material SBR	Date 23-2-2024	Scale 1:5
A3		Golfmat_deel_2				
		ISO getekend	Ontwerp_golfmat_deel_2	Edition	Sheet 1 / 1	

Bijlage C: 2D tekening van eerste blok

Bijlage D: Wekelijkse checklist freesmachine

Wekelijkse checklist frees

Ingevuld door:

Datum: __/__/____

Rechtse frees

Laatste vervanging van de frees: __/__/____

Aantal stuks gefreesd:

Zet een kruisje als de criteria van toepassing is

Criteria	X
Is er meer braamvorming?	
Maakt de frees een piepend of schurend geluid?	
Is de afwerking naar norm?	
Heeft de frees fysieke schade?	
Zijn er verbrande plekken op de steunzolen?	

Andere opmerking:

Linker frees

Laatste vervanging van de frees: __/__/____

Aantal stuks gefreesd:

Zet een kruisje als de criteria van toepassing is

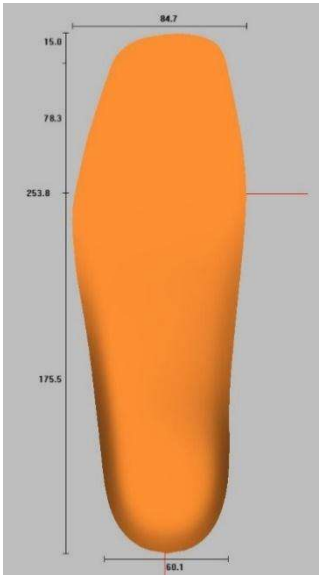
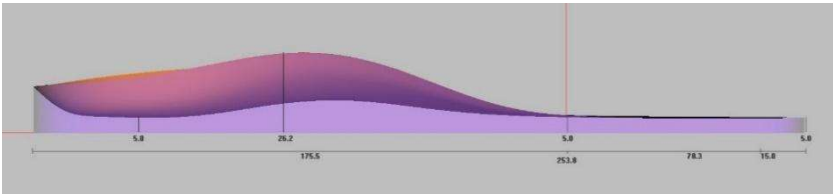
Criteria	X
Is er meer braamvorming?	
Maakt de frees een piepend of schurend geluid?	
Is de afwerking naar norm?	
Heeft de frees fysieke schade?	
Zijn er verbrande plekken op de steunzolen?	

Andere opmerking:

Bijlage E: Handleiding vervangen en kalibreren frees

Kalibratie bestand GpManager:

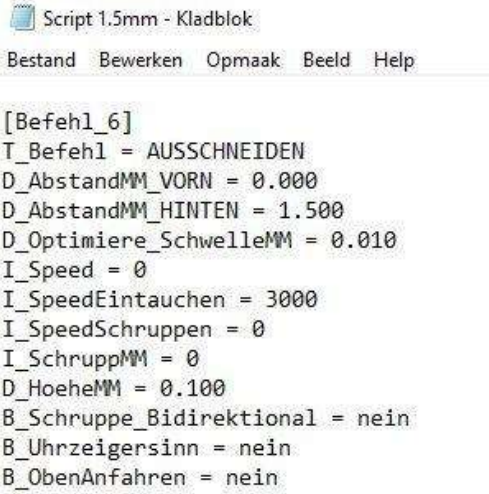
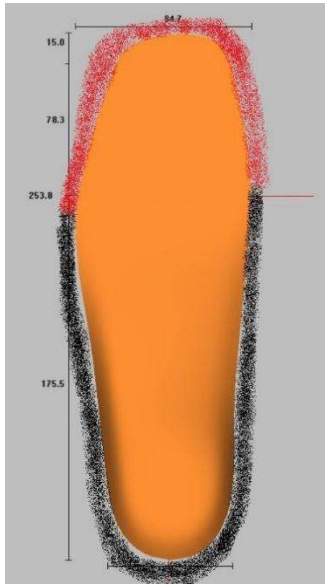
- Klantnummer = Spronken_59659
- Naam = Kalibratie freesmachine

Bovenaanzicht (breedte en lengte)	Zijaanzicht (dikte)
	

Het bestand (steunzool) werd ontworpen in de zoolsoftware ‘GpManager’.

Bij elke kalibratie zal hetzelfde bestand gebruikt worden.

Script CNC-freesmachine:

Script bestand	Verduidelijking script
 <pre> [Befehl_6] T_Befehl = AUSSCHNEIDEN D_AbstandMM_VORN = 0.000 D_AbstandMM_HINTEN = 1.500 D_Optimiere_SchwelleMM = 0.010 I_Speed = 0 I_SpeedEintauchen = 3000 I_SpeedSchruppen = 0 I_SchruppMM = 0 D_HoeheMM = 0.100 B_Schruppe_Bidirektional = nein B_Uhrzeigersinn = nein B_ObenAnfahren = nein </pre>	

Het script is zodanig geschreven dat de freeskop de steunzool achteraan (zwart) 1,5mm breder uitfreest. Dit is gedaan om de steunzool achteraan steviger te maken. Vooraan (rood) wordt de steunzool exact op de gemodelleerde breedte uitgefreesd. Er wordt een geleidelijke overgang gecreëerd tussen de achterkant en voorkant van de steunzool (overgang zwart naar rood).

De lengte van de gefreesde steunzool zal 1,5mm langer zijn het zoolbestand omwille van het script. Er wordt 1mm afwijking getolereerd. Een grotere afwijking wordt niet aanvaard.

De breedte van de gefreesde steunzool zal t.h.v. de hielcup dus telkens 3mm breder zijn dan het zoolbestand omwille van het script. Er wordt 1mm afwijking getolereerd. Een grotere afwijking wordt niet aanvaard.

Nulpunt CNC-freesmachine – vervanging freeskop:

Het nulpunt van de z-as wordt manueel bepaalt en dit wordt in het script ingegeven. Bij het vervangen van de freeskop moet dit dus opnieuw gedaan worden. Het nulpunt van de freesmachine zal invloed hebben op de dikte van de gefreesde steunzool.

Gedetailleerde uitleg:

De freeskop wordt manueel door de operator uit de freesmachine losgemaakt en vervolgens wordt de nieuwe freeskop in de freesmachine geplaatst. Bij het vervangen van de freeskop kan het zijn dat de freeskop x-aantal mm dieper (of minder diep) in de freesmachine geplaatst wordt. Daarom is het belangrijk dat het nulpunt gecontroleerd wordt. Via een bepaald protocol wordt het nieuwe nulpunt bepaald. De positie van dit nulpunt iets hoger liggen dan de tafel. Deze waarde wordt ingegeven in de GpRemote software. Bij het maken van een nieuw cnc-bestand zullen de steunzolen aan dit nieuwe nulpunt van het script gekoppeld worden.

De freesmachine werkt via een vacuümsysteem waarbij de freesblok vacuüm getrokken wordt tegen de freestafel. Om te voorkomen dat de freesblok loskomt tijdens het frezen, zal er een afwijking in de hoogte getolereerd worden van 2mm. Een grotere afwijking wordt niet aanvaard en dan zal het nulpunt aangepast worden.

Om de 3 maand wordt de freeskop vervangen. Dit omwille van slijtage van de freeskop. Als de freeskop bijvoorbeeld 5-6 maanden zou gebruikt worden dan wordt de freeskop minder scherp. Dit zou ervoor zorgen dat de steunzool minder mooi uitgefreesd worden waardoor overgangen van verschillende materialen veel groffer aanvoelen. Een vervanging van de freeskop na 3 maanden zal het beste resultaat geeft in de productie m.b.t. de kwaliteit.

Na de vervanging van de freeskop wordt een nieuwe kalibratie uitgevoerd. Dus dit zal om de 3 maanden op vaste momenten gebeuren.

Legende afwijking :	Afwijking aanvaard	Afwijking niet aanvaard
Afwijking breedte :	$\leq 1\text{mm}$	$> 1\text{mm}$
Afwijking lengte :	$\leq 1\text{mm}$	$> 1\text{mm}$
Afwijking hoogte :	$\leq 2\text{mm}$	$> 2\text{mm}$

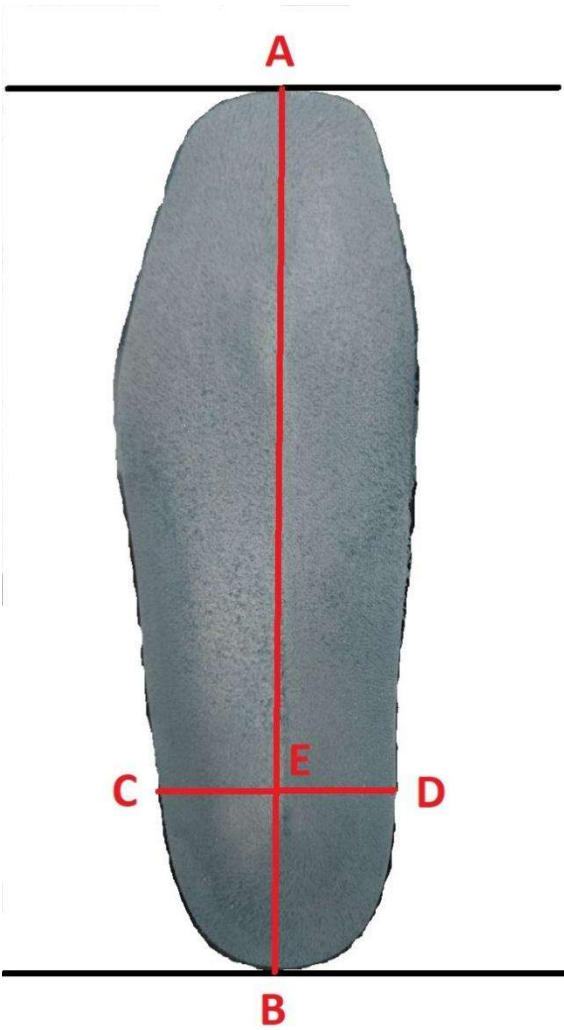
Werkinstructie kalibratie freesmachines

De kalibratie wordt op alle freesmachines uitgevoerd.

Frequentie = Na de vervanging van de freeskop, dus om de 3 maanden.

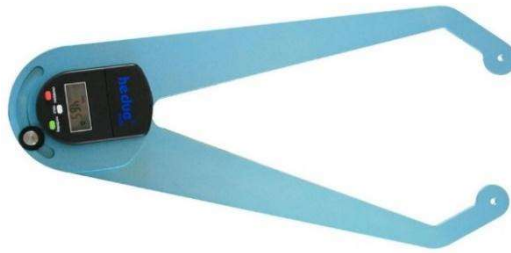
Er worden 3 verschillen type freesblokken gebruikt, namelijk extra-soft, sport en kurk-voor.

- Extra-soft heeft een shorewaarde van 25° = zachte freesblok
- Sport heeft een shorewaarde van 40° = medium freesblok
- Kurk-voor heeft een shorewaarde aan de achtervoet van 55° en de voorvoet is 25° = harde freesblok

Steunzool	Bepaling maten
	Lengte = punt A – punt B Breedte = punt C – punt D <u>Lengte:</u> De 2 zwarte lijnen zijn evenwijdig met elkaar. De lengtelijn (A – B) staat loodrecht op de zwarte lijnen. <u>Breedte:</u> Lijn C – D is evenwijdig met de zwarte lijn. Lijn B – E staat loodrecht op de zwarte lijn. Afstand van punt E naar punt B = 4cm.

Kalibratie schuifmaat S/N S301 (Steunzolen)

Digitale schuifmaat S/N S301:



Nauwkeurigheid van schuifmaat = 0,5mm

Voor dat de kalibratie van de freesmachines mag gebeuren dient de schuifmaat waarmee deze opgemeten wordt gekalibreerd te worden d.m.v. 5 stalen gauge blocks. In de kalibratie set vinden we 11 stalen gauge blocks terug die gemaakt zijn door **HARRIS GAUGES LTD** (certificate number 32907).



Om de schuifmaat te kalibreren dienen de 5 onderstaande gauge blocks opgemeten te worden en ingevuld te worden in het excel-document 'F22 -Kalibratie schuifmaat':

- 19 mm
- 25 mm
- 50 mm
- 75 mm
- 100 mm

De gemiddelde afwijking die hier wordt waargenomen dient men van de gemeten waarde af te trekken of bij te tellen als men de kalibratie uitvoert.

Kalibratie valt buiten de aanvaardbare waarden

Wanneer de z-as (dikte) een afwijking heeft die niet aanvaardbaar is dan wordt het nulpunt opnieuw opgemeten en ingevuld in het script.

Wanneer de X- en/of Y-as een afwijking heeft die niet aanvaardbaar is dan wordt de leverancier van de freesmachine gecontacteerd.

De leverancier van de freesmachine is Fraxeon Technical Solutions.

Bijlage F: Excel document bijhorend tot de handleiding

Document F24 - Kalibratie freesmachine steunzolen											
Departement : Stefan Boons Vlaamse Provincie CNC-freesmachine Serienummer Frees 1 : SN/15-2216 Serienummer Frees 2 : SN/17-2802/2988 Type calibratie : evaluatie breedte, lengte en hoogte steunzool Kalibratie bestand GpManager : Sponken_59655 'Kalibratie Freesmachine'	Steunzolen										
	Legende afwijking :		Afwijking aanvaard			Afwijking niet aanvaard					
	Afwijking breedte :		≤ 1mm			> 1mm					
	Afwijking lengte :		≤ 1mm			> 1mm					
	Afwijking hoogte :		≤ 2mm			> 2mm					
reesmachine	week	Materiaal	Breedte GpManager	Lengte GpManager	Hoogte GpManager	Breedte steunzool	Lengte steunzool	Hoogte steunzool	Afwijking breedte	Afwijking lengte	Afwijking hoogte
rees 1	week 26 - 2022	EVA 40°	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	63,1 mm	255,3 mm	6 mm	3 mm	1,5 mm	1 mm
rees 2	week 26 - 2022	EVA 40°	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	63,1 mm	255,3 mm	6,5 mm	3 mm	1,5 mm	1,5 mm
rees 1	week 1 - 2023	EVA 40°	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	63,1 mm	255,3 mm	6,1 mm	3 mm	1,5 mm	1,1 mm
rees 2	week 1 - 2023	EVA 40°	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	63,1 mm	255,3 mm	6,3 mm	3 mm	1,5 mm	1,3 mm
rees 1	week 21 - 2023	EVA 40°	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	62,8 mm	254,5 mm	6 mm	2,8 mm	0,7 mm	1 mm
rees 2	week 21 - 2023	EVA 40°	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	63 mm	255 mm	5,5 mm	2,9 mm	1,2 mm	0,5 mm
rees 1	week 1 - 2024	EVA 25°	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	63 mm	255 mm	6,5 mm	0,1 mm	0,3 mm	1,5 mm
rees 2	week 1 - 2024	EVA 40°	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	63 mm	254,5 mm	6,5 mm	0,1 mm	0,8 mm	1,5 mm
rees 1	week 1 - 2024	EVA kurk	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	63 mm	254,5 mm	6,5 mm	0,1 mm	0,8 mm	1,5 mm
rees 2	week 1 - 2024	EVA 25°	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	62,5 mm	254,5 mm	6 mm	0,6 mm	0,8 mm	1 mm
rees 1	week 1 - 2024	EVA 40°	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	63 mm	254,5 mm	6 mm	0,1 mm	0,8 mm	1 mm
rees 2	week 1 - 2024	EVA kurk	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	63 mm	254,5 mm	6 mm	0,1 mm	0,8 mm	1 mm
rees 1	week 16 - 2024	EVA 25°	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	63 mm	254,5 mm	6 mm	0,1 mm	0,8 mm	1 mm
rees 2	week 16 - 2024	EVA 40°	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	62,5 mm	254,5 mm	6 mm	0,6 mm	0,8 mm	1 mm
rees 1	week 16 - 2024	EVA kurk	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	63 mm	254,5 mm	5,5 mm	0,1 mm	0,8 mm	0,5 mm
rees 2	week 16 - 2024	EVA 25°	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	63 mm	255 mm	6,5 mm	0,1 mm	0,3 mm	1,5 mm
rees 1	week 16 - 2024	EVA 40°	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	63 mm	255 mm	6 mm	0,1 mm	0,3 mm	1,5 mm
rees 2	week 16 - 2024	EVA kurk	60,1 mm	253,8 mm	5 mm	63 mm	254,5 mm	6,5 mm	0,1 mm	0,8 mm	1,5 mm