



FLEX_LINK

Eindrapportage Afstuderen

Niels van Valburg

2396084

Industrieel Product Ontwerpen



color**Fabb**



"Challenges are what make life interesting; overcoming them is what makes life beautiful"

- Ralph Waldo Emerson

FLEX_link

Eindrapportage afstuderen

Naam: Niels van Valburg
Studentnummer: 2396084
Opleiding: Industrieel Product Ontwerpen

Bedrijf: colorFabb
Adres: Bremweg 7
Postcode: 5951DK
Plaats: Belfeld

Stageperiode: Februari 2017 - Juli 2017
Bedrijfsbegeleider: Gijs Houdijk
Docentbegeleider: Sandra Verheem
Examinator: Duncan Hepburn

Datum van inlevering: 13 Juni 2017

Bij dit rapportage hoort een bijlage

Dit is het eindverslag voor mijn afstudeerproject, waarin terug te lezen is wat ik als afstudeerder bij colorFabb in de afgelopen periode heb gedaan.

Dit project heeft als doelstelling om een stoel te ontwerpen met behulp van 3D printen, en fungeert als eindproject voor het behalen van mijn Bachelor of Science. De periode waarin dit project plaatsvindt is het collegejaar 2016-2017.

Hierbij wordt ik begeleid door de heer Gijs Houdijk, technisch manager bij colorFabb, en mevrouw Sandra Verheem, docent Industrieel Product Ontwerpen op de Fontys te Venlo. Bij deze wil ik beide bedanken voor hun hulp. Daarnaast wil ik ook de andere collega's bij colorFabb bedanken voor de afgelopen periode.

Het verslag is zo opgebouwd dat het complete proces doorlopen wordt, vanaf het begin tot het eindproduct.

Ik wens je veel plezier met lezen!



Samenvatting (NL)

3D printen is een techniek die al een tijd mee gaat. Hoewel veel mensen het beeld hebben dat 3D printen een techniek is die nog niet industrieklaar is, laten de huidige ontwikkelingen in het veld zien dat dit gaat veranderen. Doordat de technologie zich steeds verder ontwikkeld is het vanzelfsprekend dat de materialen waarmee je kan printen ook steeds geavanceerder worden.

Dat is waar colorFabb aansluit in dit verhaal. Een bedrijf dat filamenten produceert, ontwikkelt en test voor Fused Deposition Modeling 3D printers. Met deze materialen wordt het mogelijk om sterke en functionele producten te maken, en zelfs ook producten die eruit zien als metaal of hout. Het nieuwste materiaal van colorFabb heet nGen_FLEX, een semi flexibele ecopolyester met uitzonderlijke eigenschappen.

NGEN_FLEX is een sterk en flexibel materiaal dat op de meeste Fused Deposition Modeling printers geprint kan worden zonder speciale gereedschappen. Dit in combinatie met de eigenschappen maakt het een engineering grade materiaal. Nu blijft er alleen nog de vraag over; waar gaan we het voor gebruiken? Deze vraag resulteerde in een afstudeerproject, waarbij de student nGen_FLEX verder gaat verkennen en er uiteindelijk een product mee ontwerpt en maakt.

Deze opdrachtschrijving resulteerde in de beslissing om een stoel te gaan ontwikkelen met het materiaal dat door iedereen te maken is met een 3D printer en een aantal spoelen filament. Hierdoor gaan mensen zelf zien en ervaren wat de mogelijkheden van 3D printen zijn. Stel je eens voor hoe het zou zijn als je de onderdelen die je nodig hebt zelf kan printen, en vervolgens combineert met materiaal dat in de winkel te krijgen is om zo

een functioneel object te realiseren.

In de aankomende pagina's is het complete proces van de afgelopen maanden in detail beschreven. Het start met een korte introductie van colorFabb als bedrijf, en duikt dan dieper in nGen_FLEX en de eigenschappen hiervan. Dit wordt opgevolgd door een conceptontwikkelingsfase en de aansluitende technische uitwerking, waarin wordt beschreven hoe het allemaal gaat werken en gemaakt gaat worden. Het laatste deel van het verslag laat het eindproduct zien, en sluit af met een evaluatie van het complete proces.

Abstract (EN)

3D printing has been around for a while now. While most people still see 3D printing as a technique that is not ready for industrial applications, the current developments in the field are going to turn the tide. And with the technology getting more and more advanced, it is only natural that the materials that can be printed with are getting more advanced as well.

That is where colorFabb comes in. A company that produces, develops and tests new filaments for Fused Deposition Modeling 3D printers. With these materials, it becomes possible to print strong and functional products, or even products that look like metal or wood. Their latest filament is called nGen_FLEX, which is a semi flexible copolyester with extraordinary properties.

NGEN_FLEX is an exceptionally tough and flexible material that can be printed on most FDM printers without any special tools. This combined with the properties makes it an engineering-grade material. Now only one question remains; what are we going to use it for? This question resulted in a bachelor thesis project, in which the student will use nGen_FLEX to further explore the material, and design and make a product with it.

This design brief resulted in the decision to develop a chair with the material that can be made by anyone with a 3D printer and some spools of filament. By doing this, people will see and experience for themselves the possibilities of 3D printing. Imagine how it would be like if you could 3D print the parts you need, and combine them with standard materials you can buy at a hardware store to make a finished and functional object.

In the upcoming pages the entire process of the past months has been described in

detail. It starts off with a short introduction on colorFabb as a company, and then dives into nGen_FLEX and its properties. This is followed by a concept development phase, which is followed by a technical explanation of how it is all going to work and produced. The last part of the report shows the final product, and ends with an evaluation of the entire process.

Figurenlijst	VIII
Begrippenlijst	X
1. Inleiding	1
1.1 Context	3
1.2 Bedrijfsbeschrijving	4
1.3 Opdracht	5
1.4 Planning	6
2. 3D printen	7
2.1 Verschillende technieken	9
2.1.1 Fused Deposition Modeling	9
2.1.2 Stereolithografie	9
2.1.3 Selective Laser Sintering	9
2.2 3D printers	11
2.2.1 Desktop printers	11
2.2.2 Industriële printers	11
2.3 Materialen	13
3. Materiaalonderzoek	15
3.1 nGen_FLEX	17
3.1.1 Technische gegevens	17
3.1.2 Toepassingen voor nGen_FLEX	17
3.2 Sterkte	19
3.2.1 Opzet	19
3.2.2 Resultaten	21
3.2.3 Conclusie	23
3.3 Printcondities	24
3.3.1 Snelheid	24
3.3.2 Brim of Skirt	24
3.3.3 Bedtemperatuur	24
3.3.4 Bedadhesie	25
3.3.5 Retractions	25
3.4 Ontwerprichtlijnen	26
3.4.1 Overhang	26
3.4.2 Infill types	26
3.4.3 Dual extrusion	27
3.4.5 Efficiënt printtraject	27
4. Concepten	29
4.1 Conceptvorming	31
4.1.1 Context	31
4.1.2 Algemene inspiratie	31
4.1.3 Doelgroep	33
4.2 Programma van eisen en wensen	34

4.3 Conceptrichtingen	35
4.3.1 Eerste schetsen	35
4.3.2 Conceptrichting 1	37
4.3.3 Conceptrichting 2	37
4.3.4 Richtingskeuze	38
4.4 Concepten	39
4.4.1 Concept 1	39
4.4.2 Concept 2	39
4.4.3 Concept 3	39
4.4.4 Conceptkeuze	41
5. Technische uitwerking	43
5.1 Koppeldelen	45
5.1.1 Verbindingen	45
5.1.2 Verbindingskeuze	46
5.1.3 Tussenmateriaal	47
5.1.4 Ontwerp koppeldelen	48
5.2 CAD modellering	49
5.2.1 Dimensionering	49
5.2.2 FEM Analyse	50
6. Productie	53
6.1 3D printen van de koppeldelen	55
6.2 Zagen van de tussenpanelen	56
6.3 Assemblage	57
7. Evaluatie	59
7.1 Product	61
7.2 Proces	63
7.3 Aanbevelingen	64
8. Bronnenlijst	65
8.1 Literatuurlijst	65
8.2 Websites	66
8.3 Afbeeldingsverantwoording	67
9. Antiplagiatverklaring	69

Figurenlijst

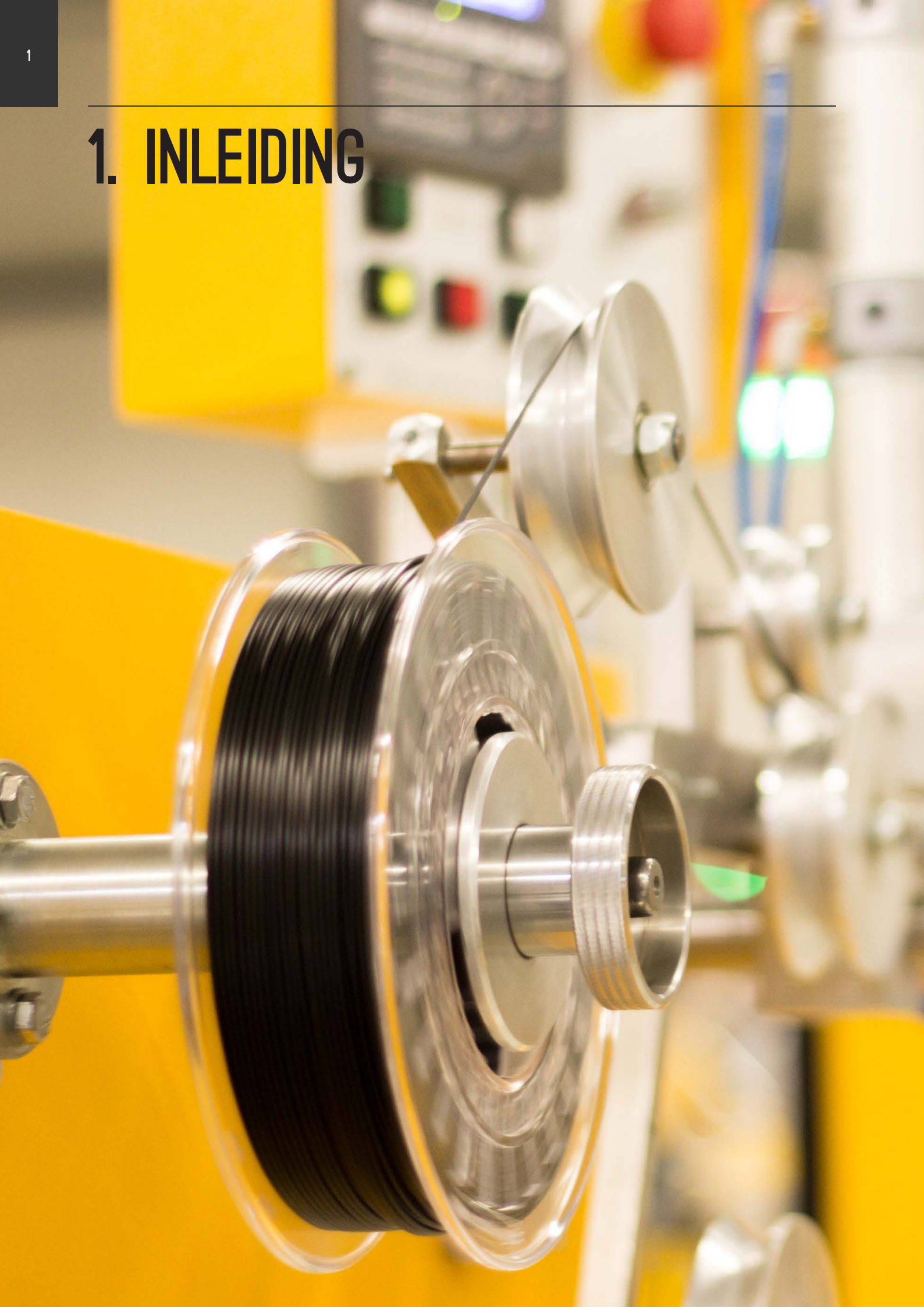
Figuur 1, het wikkelen van een spoel	2
Figuur 2, het colorFabb logo	3
Figuur 3, de zes extrusielijnen waar het filament geproduceerd wordt	4
Figuur 4, een nGen_FLEX filament rol	5
Figuur 5, grafische weergave van de projectplanning	6
Figuur 6, Ultimaker 3D printers	8
Figuur 7, een FDM printer bezig met een object	9
Figuur 8, een stereolithografie printer	10
Figuur 9, verschillende FDM desktop printers in het printlab bij colorFabb	11
Figuur 10, de Stacker S4 en S2, beide FDM printers voor de industrie	12
Figuur 11, verschillende filamenten in allerlei kleuren en materialen	14
Figuur 12, een nieuwe spoel nGen_FLEX	16
Figuur 13, een prothese gemaakt met nGen_FLEX	18
Figuur 14, data van de verschillende copolyesters	19
Figuur 15, de verschillende trekstaven geprint met de copolyesters	20
Figuur 16, resultaten van de trekproeven met de copolyesters	21
Figuur 17, resultaten van de in de lengte geprinte trekstaven	22
Figuur 18, vergelijking van de invloed van de printrichting op nGen_FLEX	22
Figuur 19, BuildTak en Lokbuild aangebracht op de glasplaat	25
Figuur 20, een overhangtest gemaakt in nGen_FLEX	26
Figuur 21, verschillende typen infills	27
Figuur 22, een aantal schetsen tijdens de ideegeneratie	30
Figuur 23, algemene inspiratie	32
Figuur 24, een impressie van de "Prosumer"	33
Figuur 25, grafische weergave van de klanten van colorFabb	34
Figuur 26, een aantal eerste schetsen	35
Figuur 27, verschillende geprinte testontwerpen	36
Figuur 28, impressie van conceptringing 1	37
Figuur 29, impressie van conceptringing 2	38
Figuur 30, inspiratie voor geprinte verbindingdelen	39
Figuur 31, ideatieschetsen met concept 1(boven) en concept 2(onder)	40
Figuur 32, meer ideatieschetsen met hier concept 3	41
Figuur 33, overzicht van de conceptkeuze	42
Figuur 34, het uitwerken van het ontwerp	44
Figuur 35, de geprinte verbindingstests	45
Figuur 36, de verbindingkeuze	46
Figuur 37, keuze van het tussenmateriaal	47
Figuur 38, vormontwikkeling van de geprinte onderdelen	48
Figuur 39, globale afmetingen van de stoel	49
Figuur 40, het eindontwerp	50
Figuur 41, maximale stress van 18 MPa	51
Figuur 42, maximale verplaatsing van 11 millimeter	52
Figuur 43, de maximale spanning bevindt zich in het multiplex	53
Figuur 44, 3D printen van een koppelstuk	53
Figuur 45, 3D printproces van een onderdeel met de infill nog zichtbaar	55
Figuur 46, Aftekenen en zagen van het hout	56

Figuur 47, de stoel na assemblage	57
Figuur 48, detail van een koppelstuk	60
Figuur 49, het eindresultaat	62
Figuur 50, een aantal voorstellen voor iteraties op de stoel	63
Figuur 51, stoel in gebruik	64

3D Lac	Een laklaag die aangebracht wordt met een spuitbus voordat de print gestart wordt.
ABS	Acrylonitril-butadien-styreen, een printmateriaal dat sterker is dan PLA, maar veel gevoeliger is voor kromtrekken.
Brim	Een deel van de eerste laag dat het product afbakent en aansluit op het te printen object.
BuildTak	Een speciale laag die op de glasplaat is aangebracht, met betere aanhechting van de 3D print als resultaat.
colorFabb_HT	Een copolyester met eigenschappen zoals een hoge sterkte en goede weerstand tegen hoge temperaturen.
colorFabb_XT	Een copolyester met hoge sterkte en goede mechanische eigenschappen.
Copolyester	Een polyester waarbij verschillende modificaties zijn aangebracht, waardoor de eigenschappen verschillen met normale polyesters.
Cura	Software voor het instellen van de print-opdracht voor 3D printers.
Dual Extrusion	Het printen met twee materialen of twee kleuren tegelijk.
FEM	Een FEM analyse is een manier om constructies door te laten rekenen in software.
Filament	Kunststof dat als lange draad is geëxtrudeerd, en vervolgens op een spoel is gewikkeld om zo gebruikt te worden voor 3D printen.
Infill	Invulpatroon dat een 3D printer in een object plaatst, dit is qua hoeveelheid en soort patroon in te stellen en beïnvloed zo de sterkte of flexibiliteit van de print.
LokBuild	Een speciale laag die op de glasplaat is aangebracht, met betere aanhechting van de 3D print als resultaat
Metamaterials	Een kunstmatig gemaakte structuur waarvan de eigenschappen bepaald worden door het patroon dat is aangebracht in plaats van de materiaalkeuze
nGen	Een copolyester dat hoogwaardige en duurzame 3D prints als resultaat geeft.
nGen_FLEX	Een flexibele copolyester met een Shore hardheid van 95A.

Nozzle	De printkop van een 3D printer, deze is in verschillende diameters beschikbaar.
Onderextrusie	Het te weinig extruderen van materiaal.
Overhang	Deel van de geometrie van een object dat uitsteekt, zoals een overbrugging.
Perimeter	Een lijn die neergelegd wordt door de printer, meerdere perimeters op elkaar vormen zo een wand, en naast elkaar vormen ze een laag.
PLA/PHA	Een mengsel van PLA en PHA dat een sterker en minder bros materiaal oplevert in vergelijking met normaal PLA.
Retraction	Het materiaal wordt wat teruggetrokken zodat er vrijwel niks uit de nozzle komt tijdens het uitvoeren van onderlinge verplaatsing van de printkop
Simplify3D	Algemene software voor het instellen van de print-opdrachten voor de meeste 3D printers.
Skirt	Een deel van de eerste laag dat het product afbakent, maar niet op het te printen object aansluit.
Support	Ondersteuning die de software voor een te printen object samenstelt, waardoor bepaalde geometrie makkelijker te realiseren is. Dit moet na het printen verwijderd worden.
Toolpath	De weg die de printkop aflegt.
Warping	Het kromtrekken van een 3D print als gevolg van snelle afkoeling of een te laag verwarmd printbed.

1. INLEIDING



In dit hoofdstuk is terug te lezen hoe er vanuit de huidige ontwikkelingen in 3D printen en binnen colorFabb als bedrijf hebben geleid tot een afstudeeropdracht.



Figuur 1, wikkelen van een spoel (Bron: colorFabb)



Figuur 2, het colorFabb logo (Bron: colorFabb)

1.1 Context

Tegenwoordig is 3D printen voor veel mensen geen onbekende term meer. Bijna iedereen weet wat het is, en dat er zo allerlei producten gemaakt kunnen worden. Met behulp van filament, een kunststof die als lange draad is geëxtrudeerd en voor 3D printen gebruikt wordt, kunnen zo objecten gemaakt worden.

De industrie gebruikt 3D printen veel voor het maken van testmodellen of eerste prototypes, hulpstukken voor assemblage of productie of voor zichtmodellen. Echter wordt de techniek steeds vaker toegepast voor functionele producten.

Om ervoor te zorgen dat producten die geprint zijn ook gelijk toe te passen is het nodig om materialen te ontwikkelen die hiervoor geschikt zijn. Materialen die een hoge sterkte hebben, goed tegen slijtage kunnen of

juist flexibel zijn. Deze materialen, ook wel filamenten genoemd, worden geproduceerd bij ColorFabb.



Figuur 3, de zes extrusielijnen waar het filament geproduceerd wordt (Bron: colorFabb)

1.2 Bedrijfsbeschrijving

ColorFabb is een producent van hoogwaardige filamenten voor FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printen. Onder deze filamenten zijn onder andere materialen te vinden die eruit zien als hout of metaal, bestand zijn tegen hoge temperaturen of juist veel sterker zijn dan de standaard filamenten. In 2013 is het bedrijf opgericht door Ruud Rouleaux als onderdeel van Helian Polymers, en na een succesvolle pilot is het in 2014 verder uitgegroeid. Inmiddels heeft het bedrijf een groot aantal filamenten in haar assortiment, welke geproduceerd worden op de 6 extrusielijnen.

Doordat veel van hun klanten een eigen printer hebben, is het belangrijk voor colorFabb om te weten hoe hun materialen functioneren op de vele printers die op de markt zijn. Daarom testen ze hun filamenten voortdurend op

3D printers die momenteel in de markt zijn. Door te kijken naar hoe het materiaal op verschillende printers te gebruiken is, welke instellingen er nodig zijn, en welke resultaten daarmee bereikt worden kunnen ze zo hun klanten voldoende informeren over de mogelijkheden.

Naast het testen, extruderen en op de rol wikkelen van het filament, verkoopt colorFabb deze ook zelf via een webshop. Ook is het bedrijf bezig met het testen van nieuwe materialen om zo 3D printen nog beter op de markt te zetten.



Figuur 4, een nGen_FLEX filament rol

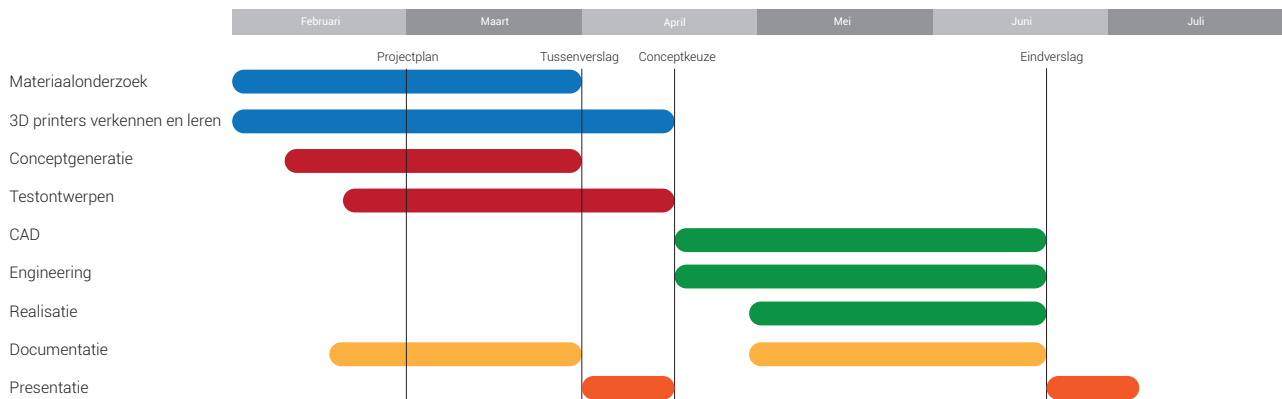
1.3 De opdracht

Doordat de vraag naar sterke en goede materialen toenam, is colorFabb begonnen met het op de markt brengen van verschillende copolyesters, dit zijn materialen waarbij verschillende modificaties zijn aangebracht waardoor ze verschillen met normale polyesters. Een paar maanden geleden heeft colorFabb het materiaal nGen_FLEX, een copolyester met flexibele eigenschappen en een Shore hardheid van 95A, geïntroduceerd. Doordat het een nieuw materiaal is, is het bedrijf altijd op zoek naar producten of modellen waarin de eigenschappen van nGen_FLEX naar buiten kunnen komen.

Hieruit is een opdracht ontstaan, welke in eerste instantie begon met op zoek gaan naar een toepassingsgebieden voor nGen_FLEX. Uiteindelijk is gekozen om met behulp van het materiaal een zitobject te realiseren, welke volledig te maken zal zijn met 3D printtechnieken. Dit product zal de eigenschappen van nGen_FLEX benutten, en zo colorFabb gaan helpen met het

promoten van dit materiaal onder hun klanten. Ook zal het eindproduct als voorbeeld fungeren om te laten zien wat er allemaal mogelijk is met 3D printen.

Het zitobject in kwestie kan een product zijn dat helemaal bestaat uit nGen_FLEX, of juist een combinatie vormen met een ander materiaal met behulp van Dual Extrusion, het printen met twee materialen tegelijk.



Figuur 5, grafische weergave van de projectplanning

1.4 Planning

Gedurende de eerste weken zal er eerst kennis gemaakt worden met de 3D printtechnieken, en hoe deze in zijn werk gaan. Hieronder valt het bekend worden met de software voor de 3D printers, de instellingen en hoe deze het geprinte object beïnvloeden, en hoe er met de verschillende materialen gewerkt wordt.

Tijdens deze eerste weken worden zo een aantal modellen geprint, en zal er begonnen worden met het testen van het materiaal voor de eindopdracht. Hierbij wordt er gekeken naar welke ontwerprichtlijnen van belang zijn, hoe de flexibiliteit een rol kan spelen en welke geometrie interessant kan zijn voor de afstudeeropdracht. Daarnaast zullen eerste ideeën gevormd worden, welke met schetsen gevisualiseerd worden.

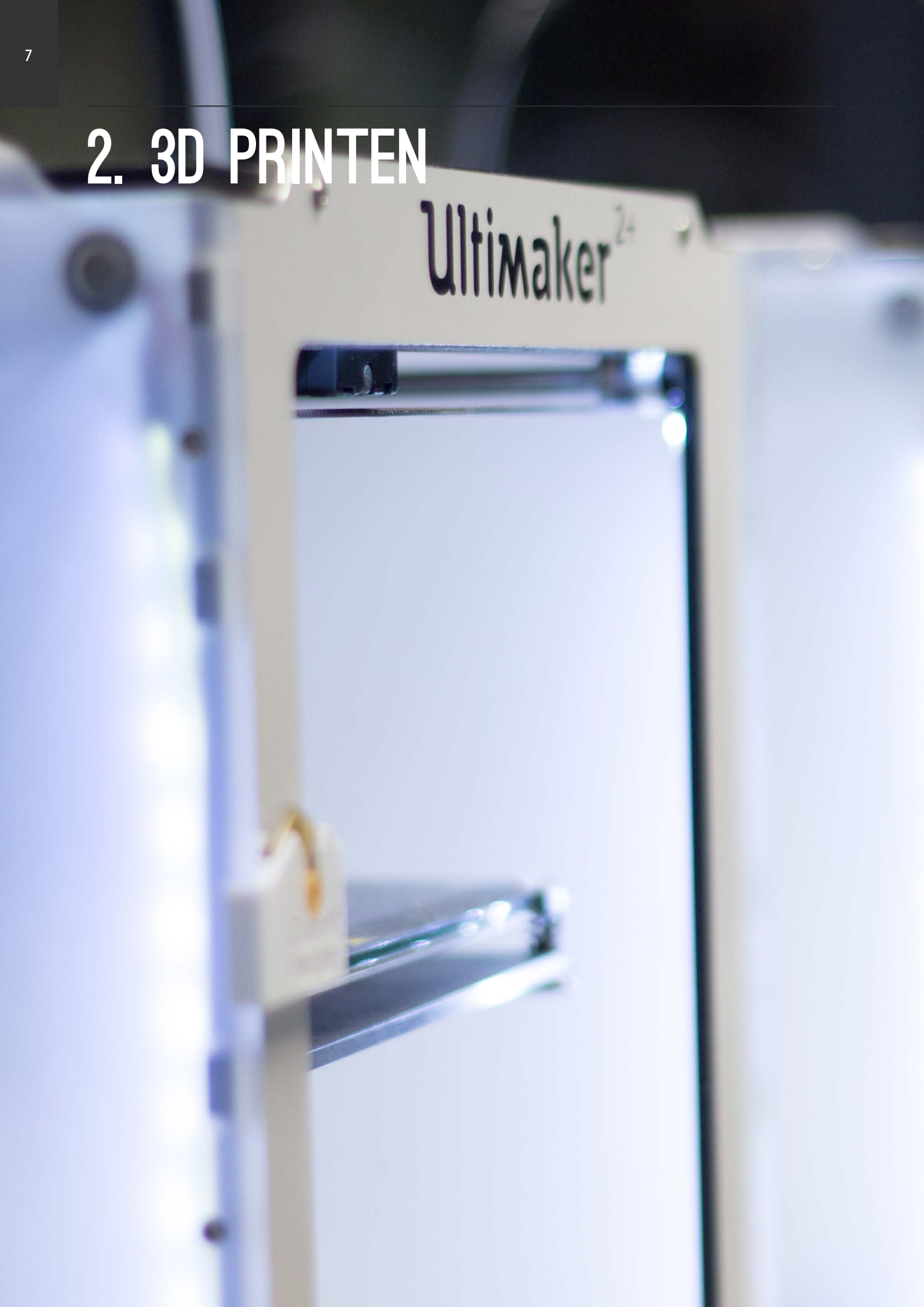
Door uiteindelijk vanuit de eerste ideeën bepaalde principes verder te ontwikkelen, door middel van testontwerpen en korte iteratieprocessen kan er een eindconcept samengesteld worden. Dit

eindconcept wordt vervolgens vertaald naar een CAD model.

Zodra het eindontwerp definitief is gemaakt, zal er begonnen worden met het analyseren van dit ontwerp door middel van FEM, om zo laatste aanpassingen te maken. Vervolgens zal er begonnen worden met het daadwerkelijk realiseren van het zitobject. Hierboven in figuur 5 is een grafische voorstelling te zien van de projectplanning.

2. 3D PRINTEN

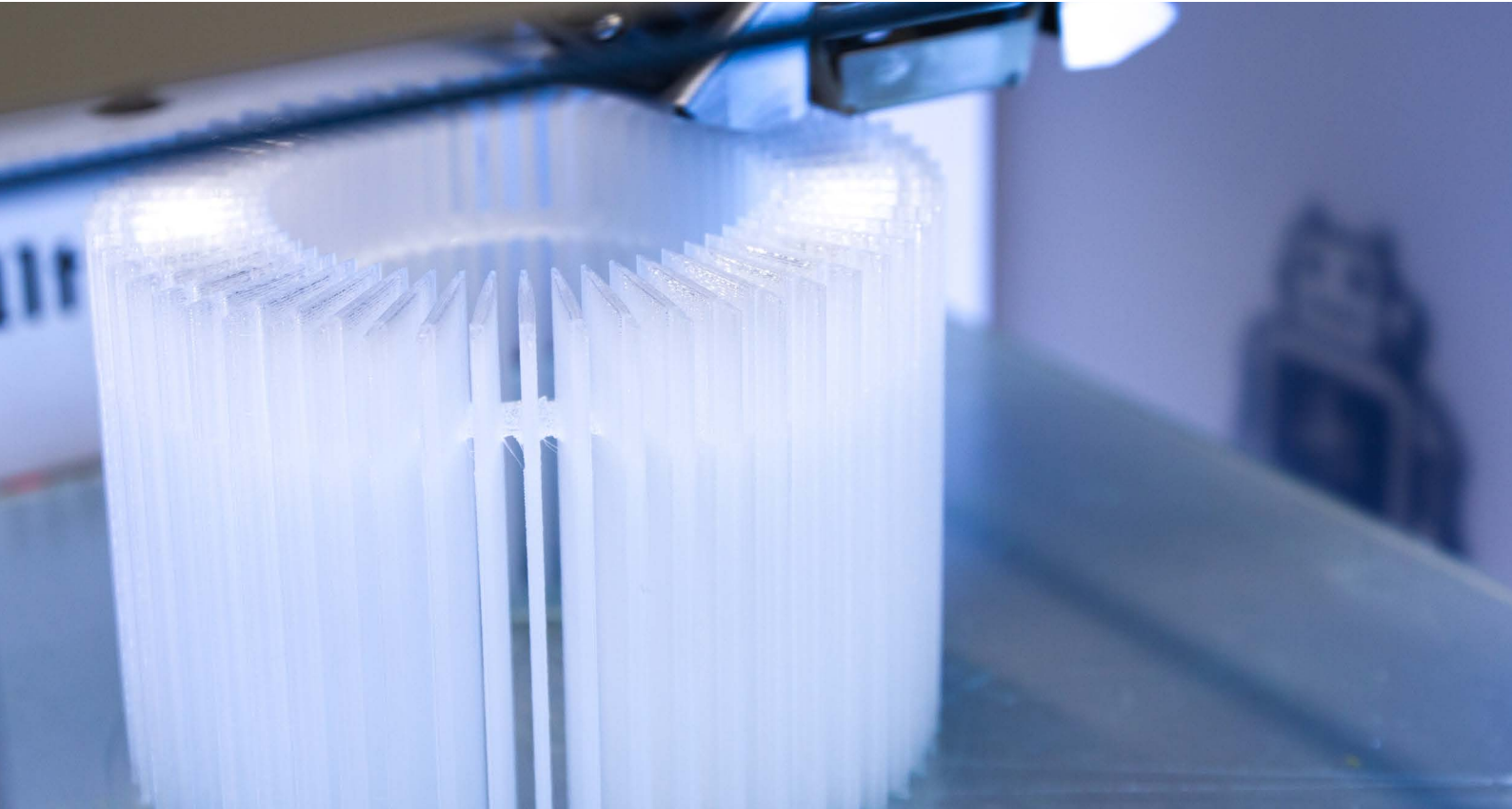
Ultimaker²⁺





In dit hoofdstuk wordt de 3D printtechniek beschreven. Hierin wordt gekeken naar de verschillende technieken om te printen, 3D printers voor zowel thuisgebruik als de industrie, en de materialen waarmee doorgaans gewerkt wordt.

Figuur 6, Ultimaker 3D printers (Bron: colorFabb)



Figuur 7, een FDM printer bezig met een object (Bron: colorFabb)

2.1 Verschillende technieken

Om producten met behulp van 3D print-technieken te realiseren zijn er verschillende technieken ontwikkeld en op de markt gebracht. Deze technieken verschillen onderling doordat ze het product op een andere manier realiseren of doordat ze met een andere vorm van het basismateriaal werken. De technieken zijn hieronder kort weergegeven om zo een beeld te geven van wat er allemaal mogelijk is.

2.1.1 Fused Deposition Modeling

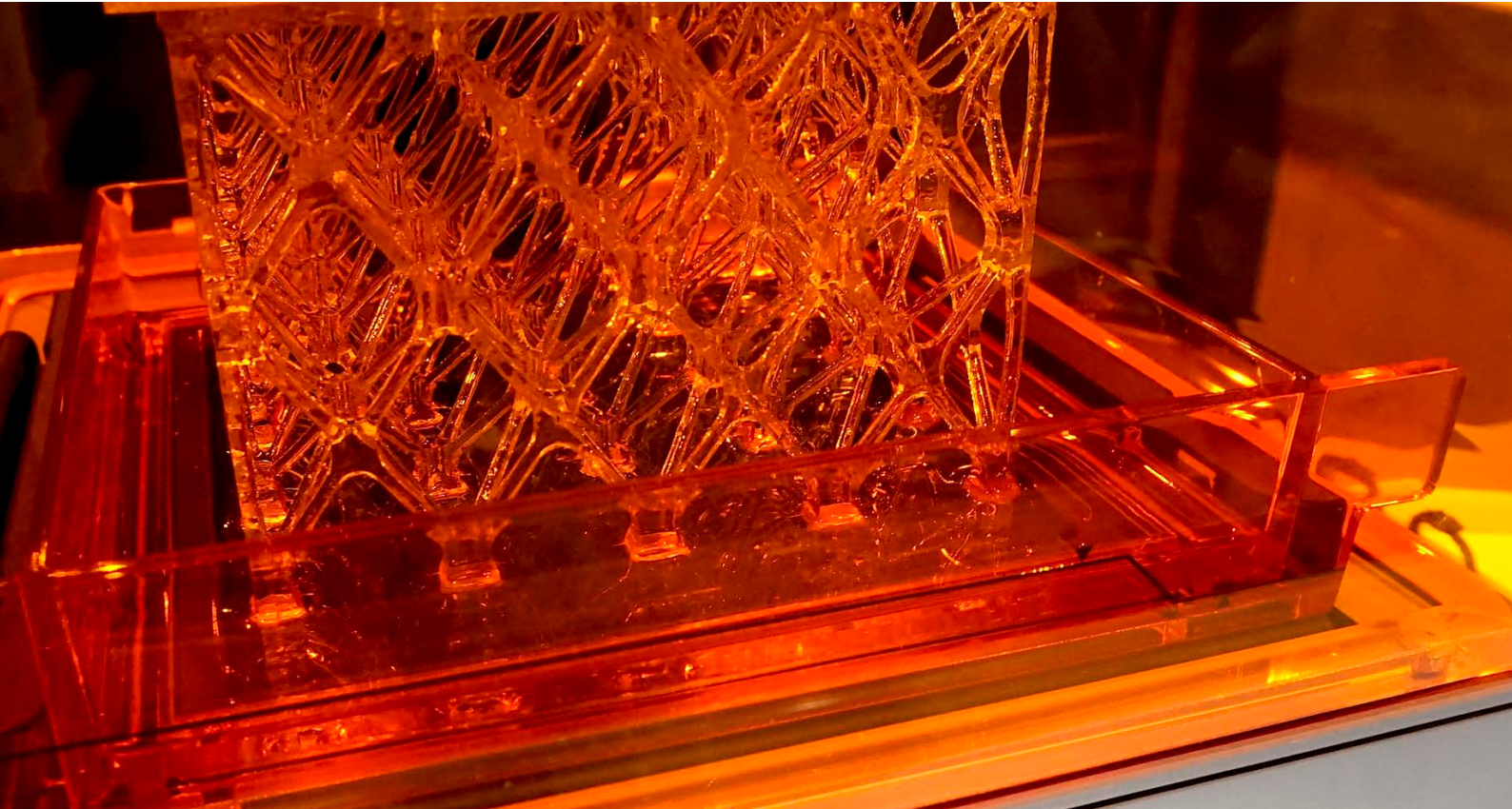
De techniek die bij colorFabb gebruikt wordt is FDM. Deze techniek is gebaseerd op extrusie en werkt door het laag na laag aan elkaar smelten van materiaal. Door het vloeibare materiaal uit een nozzle, de printkop van een 3D printer, op een verwarmd printbed te extruderen kan zo laag voor laag een product

gemaakt worden. Na het printen van elke laag zakt het printbed in de Z-richting. In figuur 7 is te zien hoe een FDM printer bezig is met een product dat bestaat uit meerdere materialen.

2.1.2 Stereolithografie

Stereolithografie, ook wel bekend als SLA, wordt gebruikt om modellen te maken die geschikt zijn voor siliconematrijzen doordat het een hoge nauwkeurigheid heeft en een goede oppervlaktekwaliteit kan garanderen.

Een SLA printer werkt met behulp van een vloeistofbad waarin een UV-gevoelige polymeer in de vloeistof aanwezig is. Het printbed gaat omlaag de vloeistof in, waarna er door selectief met een UV lamp de vloeistof over de productdoorsnede wordt belicht.



Figuur 8, Een stereolithografie printer (Bron: <http://media.bestofmicro.com/3/K/492608/original/form1-SLA.jpg>)

Vervolgens gaat het printbed uit de vloeistof, zodat het kan uitharden, om daarna weer omlaag het bad in te gaan voor de volgende laag. Nadat de print klaar is moet het alleen nog schoongemaakt worden om resterende vloeistof te verwijderen.

stukje omlaag en wordt er een nieuwe laag poeder gelegd. Hierdoor kan na het afkoelen het product uit de poeder gehaald worden. De resterende kunststofpoeder kan daarna weer hergebruikt worden voor een nieuwe print. In figuur 8 is een close up te zien van een SLS printer.

2.1.3 Selective Laser Sintering

Selective Laser Sintering, ook wel SLS genoemd, is een techniek die gebruikt wordt voor het maken van functionele prototypes uit nylon. Op een printbed dat verwarmt is op ongeveer 170° Celsius wordt een laag kunststofpoeder aangebracht en verwarmd. Vervolgens wordt het oppervlak van het product, de productdoorsnede, met een CO₂ laser selectief belicht. Hierdoor wordt het poeder op die plaatsen verlicht, en gaan de korrels met elkaar versmelten wat uiteindelijk het product vormt. Na elke keer dat de laser het poeder belicht, zakt het printbed een



Figuur 9, verschillende desktop FDM printers in het printlab bij colorFabb (Bron: colorFabb)

2.2 3D printers

Bij FDM printers is er nog een onderscheid te maken tussen de applicatie van de machines. Allereerst de desktop printers, welke een redelijke omvang hebben en niet veel ruimte innemen, zijn vooral bedoeld voor kleinschalig gebruik en voor rapid prototyping. En ten tweede zijn er de industriële printers, welke gemaakt zijn voor grote productseries en een hoge kwaliteit en snelheid moeten afleveren.

2.2.1 Desktop printers

Onder de desktopprinters zijn een aantal grote merken terug te vinden. Deze zijn allemaal ingericht op kleinschalig gebruik en hebben veelal een bouwvolume van 200 bij 200 bij 200 millimeter. Daarnaast zijn ze vrijwel allemaal uitgerust met een verwarmd printbed en minstens één printkop. Onder deze categorie printers vallen onder andere

de Ultimakers en de Makerbots, welke beide de meest gebruikte printers onder consumenten zijn.

2.2.2 Industriële printers

Tegenwoordig komen er steeds meer 3D printers op de markt die speciaal voor de industrie zijn gemaakt. Deze printers zijn meer gericht op professioneel gebruik en onderscheiden zich van de desktopprinters door een hoge nauwkeurigheid, groter bouwvolume en het aantal printkoppen. Daarnaast is het noodzakelijk voor deze printers om snel en eenvoudig aangestuurd te worden, en producten herhaaldelijk van dezelfde kwaliteit te maken.

Een goed voorbeeld van een industriële 3D printer is de Stacker S4. Gemaakt door



Figuur 10, de Stacker S4 en S2, beide FDM printers voor de industrie (Bron: colorFabb)

Stacker3D in de Verenigde Staten, deze 3D printer is het resultaat van een succesvolle Kickstarter campagne en wordt door colorFabb binnen Europa verkocht. De Stacker S4 is uitgerust met vier printkoppen, welke synchroon met elkaar vier dezelfde producten tegelijk kunnen printen. Daarnaast beschikt de Stacker S4 over een bouwvolume van 345 bij 520 bij 650 millimeter, en heeft de machine ook een verrijdbaar onderstel zodat deze flexibel ingezet kan worden. In figuur 10 zijn een aantal Stacker printers te zien.

met een printkop, en bieden door hun grote bouwvolume veel mogelijkheden voor grote functionele prototypes en andere producten.

Een andere industriële printer is de Builder Extreme, welke een vergelijkbare grootte heeft van een douchecabine. Gemaakt door Builder 3D, de Extreme printers zijn een reeks machines gemaakt voor de industrie. Variërend in grootte van 700 bij 700 bij 800 millimeter (de Builder Extreme 1000), tot aan 700 bij 700 bij 1820 millimeter (de Builder Extreme 2000). Deze printers zijn elk uitgerust

2. 3D Printen

2.3 Materialen

Voor 3D printen bestaan er allerlei verschillende soorten materialen die als filament gebruikt kunnen worden voor het maken van producten. Materialen zoals PLA (polyactide dat redelijk snel te printen is), en ABS (Acrylonitril-butadiëen-styreen, een printmateriaal dat sterker is dan PLA maar veel gevoeliger is voor kromtrekken) zijn de meest voorkomende filamenten die gebruikt worden.

Bij colorFabb worden een aantal materialen geproduceerd en ontwikkeld die extra functionaliteit hebben of juist voor een specifieke toepassing hebben of een speciaal uiterlijk. De functionele materialen die colorFabb op de markt heeft vallen onder de copolyesters, waar nGen_FLEX onderdeel van is. In hoofdstuk 3 komt dit materiaal uitvoerig aan bod. Deze zijn samen met de

Eastman Chemical Company ontwikkeld. Kenbaar voor de copolyesters is dat ze allemaal goede laaghechting en een hoge sterkte gemeenschappelijk hebben.

Zo is er colorFabb_XT, welke goede mechanische eigenschappen heeft. ColorFabb_HT, dat weer goed bestand is tegen hoge temperaturen, en nGen, een materiaal dat gebruikt wordt voor prints die een hoogwaardig visueel uiterlijk nodig hebben.

Naast de copolyesters en de ABS en PLA zijn er ook materialen op de markt met een speciaal uiterlijk. Voorbeelden hiervan zijn materialen waarin hout of metaalpoeder is verwerkt voor esthetische eigenschappen.



Figuur 17, verschillende filamenten in allerlei kleuren en materialen (Bron: colorFabb)

3. MATERIAALONDERZOEK



Dit hoofdstuk duikt verder in het materiaal nGen_FLEX en de eigenschappen die het heeft. Door middel van het onderzoeken van de sterkte van de copolyester en het materiaal te printen is zo onderzocht hoe nGen_FLEX te gebruiken is.



Figuur 12, een nieuwe spoel nGen_FLEX

3. Materiaalonderzoek

3.1 nGen_FLEX

Het filament waarmee gewerkt wordt voor de opdracht staat bekend als nGen_FLEX, een copolyester met specifieke eigenschappen. Het is een materiaal dat semi-flexibele eigenschappen heeft en is speciaal ontworpen voor standaard 3D printers. Dat wil zeggen dat dit materiaal geen verdere aanpassingen nodig heeft zoals een speciale printkop, dit is bij andere flexibele materialen meestal wel het geval.

3.1.1 Technische gegevens

Amphora™ Flex 3D polymer FL6000¹, door ColorFabb nGen_FLEX genoemd, heeft een aantal materiaalspecifieke eigenschappen. Het heeft een Shore hardheid van 95A, wat maakt dat het te vergelijken valt met een wiel voor een winkelkarretje of een schoenzool. Daarnaast heeft het een temperatuursweerstand tot aan 130° Celsius, en is het met stoom te reinigen. Ook heeft het filament een goede laag tot laag hechting, wat weer resulteert in een hoge sterkte en slagvastheid van de geprinte producten.

NGen_FLEX heeft een vergelijkbare structuur met PP of nylon, welke semikristallijn zijn. Het materiaal wordt tijdens het printen deels amorf door verhitting, waardoor het resultaat meer krimp ondervindt.

Uit de datasheet beschikbaar gesteld door Eastman, de producent van de kunststof, kan gehaald worden dat het materiaal getest is met een ASTM D638 normering². Zo heeft het materiaal een treksterkte van 22 Newton per vierkante millimeter en een reksterkte van ongeveer 14 Newton per vierkante millimeter. Ook is het materiaal tot aan 38% elastisch vervormbaar, maar kan het tot wel 400% aan plastische vervorming hebben voordat het kapotgaat. Echter zijn alle data in dit document gebaseerd op een trekstaaf welke

met spuitgieten geproduceerd is.

3.1.2 Toepassingen voor nGen_FLEX

Op basis van de eigenschappen van nGen_FLEX zijn er al een aantal producten te ontwerpen of te printen welke de sterkte en de flexibiliteit van het materiaal benutten. Bij colorFabb zijn al een aantal mogelijke applicaties verder bekeken.

Zo zijn er met dit materiaal producten te ontwerpen voor medische applicaties, zoals bepaalde instrumenten, doordat deze met stoomgereinigd moeten kunnen worden. Door de resistentie tegen hoge temperaturen biedt nGen_FLEX zo een uitkomst voor producten die nodig zijn bijvoorbeeld laboratoria. Een ander product binnen deze applicatie dat te printen is met dit materiaal zijn protheses. Deze producten moeten tegen dagelijks gebruik bestand zijn en ook te reinigen zijn. Daarnaast hebben deze producten ook de nodige flexibiliteit en slagvastheid nodig die nGen_FLEX kan bieden. In figuur 13 is een geprinte prothese te zien.

Naast speciale applicaties is het materiaal ook toe te passen voor conventionele producten, zoals bepaalde o-ringen of seals. Ook biedt de hoge sterkte de mogelijkheid om producten te printen die vrijwel onverwoestbaar zijn, en dus toepasbaar voor technische applicaties zoals de werktuigbouw.

1. De technische benaming van het materiaal zoals deze gehanteerd wordt door Eastman.

2. ASTM D638 is een gestandaardiseerde normering in de Verenigde Staten voor het testen van de treksterktes van kunststoffen.



Figuur 13, een prothese gemaakt met nGen_FLEX (Bron: colorFabb)

3. Materiaalonderzoek

Naam	Technische benaming ²	Vloeigrens [MPa] ³	Verlenging bij vloeigrens [%]	Treksterkte [MPa] ²	Verlenging bij breuk [%]	Elasticiteits modulus [MPa] ²
nGen_FLEX	Amphora™ Flex 3D polymer FL6000	14	38	22	400	150
XT_colorFabb	Amphora™ 3D polymer AM1800	50	5	28	110	2100
HT_colorFabb	Amphora™ 3D polymer HT5300	43	7	52	210	1575
nGen	Amphora™ 3D polymer AM3300	50	4,5	35	193	1800

Figuur 14, data van de verschillende copolyesters

3.2 Sterkte

Om de sterkte van producten die geprint zijn met nGen_FLEX goed te kunnen bepalen is besloten om een serie trekproeven uit te voeren. Hiervoor was het noodzakelijk om uit te zoeken welke typering¹ van de trekstaaf binnen de ASTM norm is gebruikt door Eastman. De afmetingen van deze trekstaaf zijn in de bijlage op pagina 20 terug te vinden.

Deze trekstaven zijn met twee verschillende infill-richtingen geprint voor het bepalen van de sterkte van het materiaal; De lengterichting van de trekstaaf, om zo de sterkte van de polymeren te bepalen. En de dwarsrichting van de trekstaaf, zodat de onderlinge laagadhesie geanalyseerd kan worden. Figuur 15 laat de trekstaven zien.

Ook is besloten om de andere copolyesters uit het assortiment van colorFabb mee te

testen, zodat deze met elkaar vergeleken kunnen worden. Aan de hand van de verkregen waarden kan zo een vergelijking worden gemaakt tussen de data van de tests en de datasheets. Hieruit kan vervolgens een veiligheidsfactor worden bepaald, welke weer toegepast gaat worden voor verdere analyses tijdens het ontwerpproces.

3.2.1 Opzet

Voor het uitvoeren van de trekproeven is er begonnen met het opzetten van de test. Deze is terug te vinden in de bijlage op pagina 12. De trekproeven zijn uitgevoerd door de Eastman Chemical Company in de Verenigde Staten. Hierboven in figuur 14 zijn de technische data van de copolyesters terug te vinden. Deze data komt uit de datasheets, welke in de bijlage vanaf pagina 4 zijn te vinden.

1. Binnen de ASTM D638 normering zijn 5 verschillende typen trekstaven gespecificeerd, elk met andere afmetingen.

2. De technische benaming van de materialen zoals deze in de datasheets van Eastman gebruikt wordt.

3. 1 MegaPascal (MPa) komt overeen met 1 Newton per vierkante millimeter (N/mm²).



Figuur 15, de verschillende trekstaven geprint met de copolyesters

3. Materiaalonderzoek

Naam	Technische benaming ¹	Vloeigrens [MPa] ²	Verlenging bij vloeigrens [%]	Treksterkte [MPa] ²	Verlenging bij breuk [%]	Elasticiteits modulus [MPa] ²
nGen_FLEX	Amphora™ Flex 3D polymer FL6000	12,383	31,784	15,693	277,994	123,978
XT_colorFabb	Amphora™ 3D polymer AM1800	39,060	-0,987	42,616	5,231	1475,256
HT_colorFabb	Amphora™ 3D polymer HT5300	41,935	5,251	41,935	5,251	2593,163
nGen	Amphora™ 3D polymer AM3300	43,555	4,771	43,555	4,771	1247,458

Figuur 16, resultaten van de trekproeven van de copolyesters

3.2.2 Resultaten

Vanuit Eastman zijn vervolgens de trekproefresultaten doorgestuurd, welke volledig zijn terug te lezen in de bijlage vanaf pagina 16. In deze paragraaf worden alleen de belangrijkste data besproken.

Hierboven in figuur 16 zijn de afzonderlijke resultaten terug te vinden van de verschillende copolyester trekstaven, welke in de lengte geprint zijn. Doordat de trekproefresultaten pas later in het proces zijn ontvangen is de beslissing om alleen met nGen_FLEX te werken al gemaakt. Daarom zijn de resultaten die vanaf nu besproken worden alleen van dit materiaal.

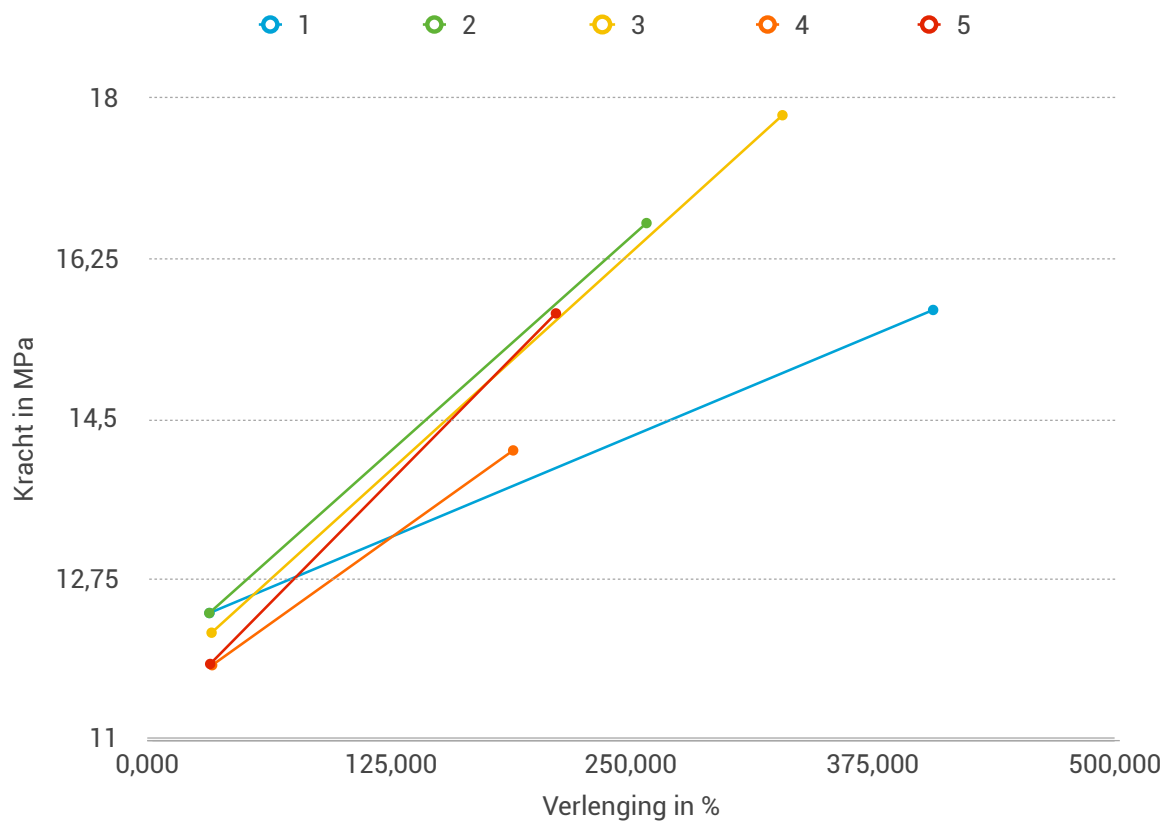
Doordat er van elke staaf alleen de reksterktes en treksterktes en hun respectievelijke verlenging is bepaald, is er geen trekkromme samen te stellen. In de grafiek in figuur

17 is daarom deze sterkte uitgezet ten opzichte van de verlenging bij die sterkte, om zo een duidelijk beeld te krijgen van hoe de verschillende trekstaven zich hebben gedragen. In deze grafiek is ook te zien dat de vloeigrens en de bijbehorende verlengingen onderling tussen de trekstaven redelijk constant blijven. De treksterktes zijn echter ontzettend verschillend per trekstaaf, wat onder andere te maken heeft met de bijbehorende trekkracht en hoe de staaf zich verder heeft gedragen tijdens de proef zelf.

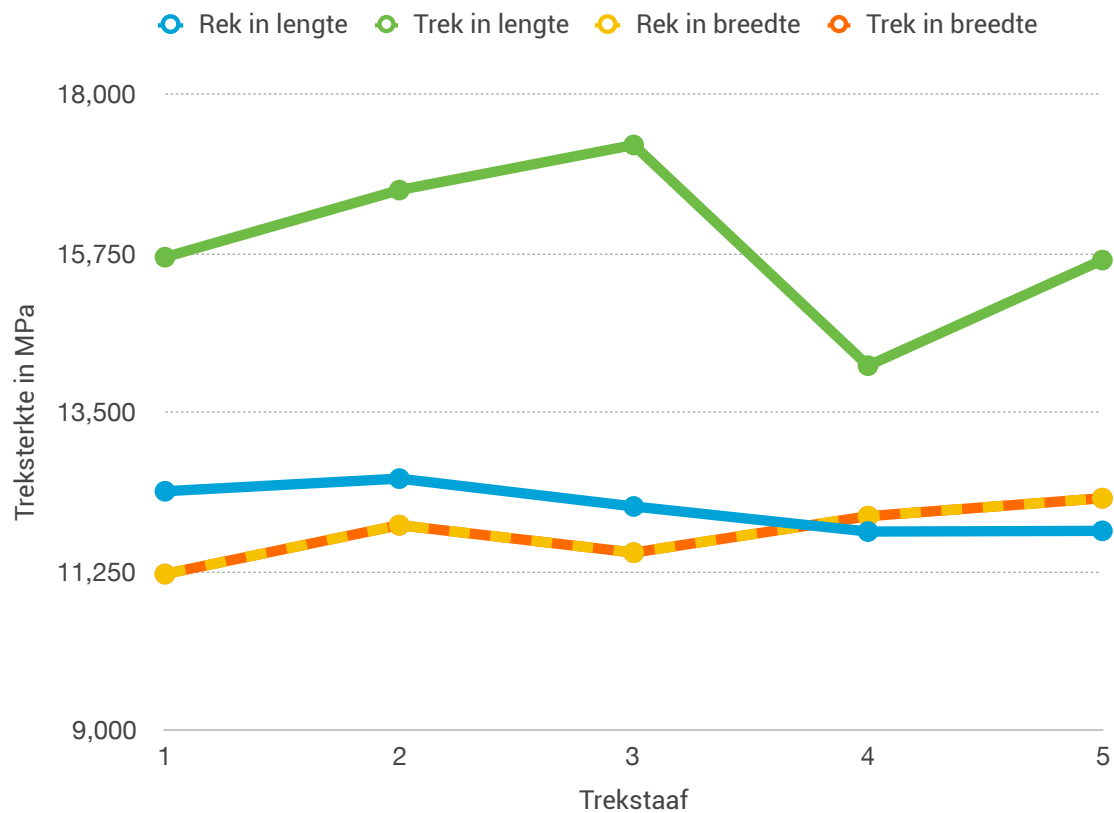
De grafiek in figuur 18 bevat alle data van nGen_FLEX en hoe de printrichting effect heeft op de sterkte van het materiaal. Hierin is te zien dat de trekstaven die in de breedte geprint zijn na de vloeigrens te hebben bereikt kapotgetrokken zijn. Daardoor zijn de treksterktes gelijk aan de reksterktes.

1. De technische benaming van de materialen zoals deze in de datasheets van Eastman gebruikt wordt.

2. 1 MegaPascal (MPa) komt overeen met 1 Newton per vierkante millimeter (N/mm²).



Figuur 17, resultaten van de in de lengte geprinte trekstaven



Figuur 18, vergelijking van de invloed van de printrichting op nGen_FLEX

3. Materiaalonderzoek

3.2.3 Conclusie

Op basis van de resultaten van de trekproeven zijn een aantal conclusies te trekken. Allereerst kan er nu een uitspraak worden gedaan over het elastisch gebied van nGen_FLEX in printvorm. Dit gebied is namelijk over alle trekstaven van het materiaal redelijk constant zonder al teveel variatie. Hierdoor kan er dus gesteld worden dat het elastisch gebied van geprinte producten ongeveer hetzelfde zal blijven.

Ten tweede laat de grafiek zien dat de treksterktes van nGen_FLEX in geprinte vorm behoorlijk uit elkaar liggen en ook veel onderlinge variatie vertonen. Dit komt vooral door de verschillende maximale verlengingen, maar waarschijnlijk ook doordat het materiaal op moleculair niveau amorf is geworden. De treksterktes van het materiaal zijn dus niet bruikbaar in de analyses, doordat deze teveel verschillen.

Ten derde is er duidelijk te zien dat de printrichting effect heeft op de sterkte van het materiaal. Door de printen in de lengte van de polymeren heeft het materiaal zowel een rek als een treksterkte, en een grote haalbare verlenging. Echter is te zien dat het printen in de breedte maakt dat het materiaal na het rekken gelijk breekt. Voor het ontwerpen met nGen_FLEX waarbij de sterkte belangrijk is moet er dus goed gekeken worden naar hoe de perimeters in het product geprint worden. De perimeters zijn lijnen die naast elkaar neergelegd worden, meerdere perimeters op elkaar vormen zo een wand en naast elkaar vormen ze een laag. Zo kan de maximale sterkte met het materiaal behaald worden, doordat de richting van de polymeren benut wordt.

Tot slot zijn er nog een aantal aspecten die relevant zijn betreft de trekproeven. Doordat er nog geen normering is, blijft het de vraag

of de data die verkregen is accuraat genoeg is. Er zijn nog geen eerdere trekproeven op een soortgelijke manier uitgevoerd, waardoor er ook geen informatie beschikbaar is over de reproduceerbaarheid van de data.

Daarnaast zijn deze trekstaven met bepaalde parameters op een Ultimaker 2+ geprint. Wanneer dezelfde staven op een andere printer gemaakt waren, zou de kans groot zijn dat de data veel verschilt, doordat elke printer anders is, en er veel variabelen een rol spelen op hoe het materiaal zich uiteindelijk zal gedragen.

3.3 Printcondities voor nGen_FLEX

Om goed te kunnen printen met nGen_FLEX op FDM printers zijn de instellingen voor de printer natuurlijk belangrijk voor een goed resultaat. Hieronder zijn een aantal regels geformuleerd, die voor de instelling van de printer in kaart zijn gebracht.

3.3.1 Snelheid

nGen_FLEX is een materiaal dat in tegenstelling tot de standaard materialen zoals PLA of ABS niet op hoge snelheden geprint kan worden. Het materiaal heeft door de hoge temperatuur van de nozzle een hoge viscositeit, en kan daardoor door hoge snelheid niet goed printen en afgekoeld worden. Om een model of object te realiseren met een goede uitstraling en oppervlaktekwaliteit is het dus nodig om te printen met lage snelheden. Daarnaast is het ook belangrijk dat infills met een lagere snelheid geprint worden dan gebruikelijk, om ook deze goed geprint te laten worden.

3.3.2 Brim/skirt

Afhankelijk van het oppervlak van de 3D print is het belangrijk om te kiezen tussen een brim of een skirt. Een brim is het deel van de eerste laag dat het product afbakent en aansluit op het te printen object. Een skirt lijkt veel op een brim en verschilt alleen op de aansluiting met het product. Deze twee technieken helpen niet alleen met het analyseren van de bedadhesie, maar laten ook zien of de extrusie van de nozzle correct is en of het materiaal goed vloeit.

Voor nGen_FLEX is het toepassen van een brim of skirt afhankelijk van het productoppervlak. Een brim heeft wel als nadeel dat deze achteraf verwijderd moet worden, wat bij nGen_FLEX lastiger kan zijn door de goede laaghechting.

3.3.3 Bedtemperatuur

De temperatuur van het printbed voor nGen_FLEX ligt voor de meeste prints rond de 85° Celsius. Daarnaast is het ook belangrijk om het oppervlak van het te printen onderdeel te analyseren, om zo eventueel een brim toe te voegen, zoals in de vorige paragraaf is beschreven. Echter wanneer het te printen onderdeel bijvoorbeeld een lang en smal product is, is het nodig om de bedtemperatuur omhoog te laten gaan.

Dooreenlageprintsnelheideneengrotelengte kan een deel van het product meer tijd krijgen om af te koelen. Hierdoor kan het product warping ondervinden, het kromtrekken van de print door snelle afkoeling. Deze warping is te wijten aan de structuur van nGen_FLEX, welke semikristallijn is. Hierdoor treed er snel krimp op als het materiaal geprint is. Door de temperatuur naar ongeveer 100° Celsius te brengen wordt het mogelijk om warping te voorkomen.



Figuur 19, BuildTak en Lokbuild aangebracht op de glasplaat

3.3.4 Bedadhesie

Voor het goed printen met nGen_FLEX is het belangrijk dat naast de correcte bedtemperatuur de glasplaat ook is voorzien van een extra laag. Deze laag, bij colorFabb bestaande uit BuildTak of Lokbuild, is aangebracht op de glasplaat van een 3D printer voor betere adhesie tussen de 3D print en het printbed. Andere adhesiemiddelen zoals 3D Lac, een laklaag die betere aanhechting te weeg brengt, werken bij dit materiaal niet.

zodat het niet uit de nozzle loopt. Voor nGen_FLEX is het niet aan te raden om met retracties te werken, omdat dit kan leiden tot onderextrusie, het te weinig printen van materiaal, waardoor de print kan mislukken.

3.3.5 Retractions

Om ervoor te zorgen dat de 3D print niet al teveel los materiaal bevat dat verwijderd moet worden tijdens het nabewerken, is het mogelijk om retracts in te stellen. Hierdoor wordt het filament tijdens het verplaatsen van de printkop een stukje teruggetrokken,



Figuur 20, een overhangtest geprint in nGen_FLEX

3.4 Ontwerprichtlijnen voor nGen_FLEX

Naast de instellingen van de printer speelt de geometrie ook een grote rol in hoe nGen_FLEX functioneert en hoe het te printen is. Hieronder zijn een aantal richtlijnen geformuleerd die relevant zijn tijdens het ontwerpen voor nGen_FLEX.

3.4.1 Overhangs

In de geometrie van de meeste ontwerpen zijn overhangs terug te vinden. Overhangs zijn delen van de geometrie die bijvoorbeeld een overbrugging vormen, of schuin oplopen. Voor de meeste materialen en ook voor nGen_FLEX geldt dat er een maximale hoekgrootte is die zonder support te printen is. Echter is de kwaliteit van de overhangs ook nog afhankelijk van de oppervlakte waarin deze zich bevindt, en hoeveel tijd dat stuk krijgt om af te koelen. Een overhang in een klein

oppervlak zal minder goed geprint worden dan in een groter oppervlak, doordat deze te weinig tijd krijgt om af te koelen.

In het geval van nGen_FLEX is er door de goede laaghechting nog veel restwarmte in het product aanwezig, waardoor de overhangs die geprint worden minder snel afkoelen en dus minder goed te printen zijn. Ook moet er rekening gehouden worden met de restwarmte van het printbed, welke het materiaal warm houdt en zo de geometrie kan aantasten. Uit een aantal overhangtests is gebleken dat met een lage snelheid hoeken tot en met 50° te realiseren zijn.

3.4.2 Infill

Een product dat geprint wordt heeft meestal een bepaald soort infill, het invulpatroon dat



Figuur 21, verschillende typen infills

een 3D printer in een object plaatst. Dit patroon is qua hoeveelheid in te stellen, en beïnvloed zo de flexibiliteit en de sterkte van een geprint onderdeel. Nu zijn er verschillende soorten infill typen beschikbaar in onder andere Cura en Simplify 3D, software waarmee de code wordt samengesteld voor een 3D printer. Deze typen zijn onderling weer anders, en geven dus ook elk bepaalde eigenschappen aan het product.

3.4.3 Dual Extrusion

Voor dual extrusion is het belangrijk dat wanneer er met twee verschillende materialen gewerkt wordt, deze goed aan elkaar kunnen hechten. Dit kan door twee materialen te gebruiken waarbij er een goede adhesie optreedt, of door de afzonderlijke delen zo vorm te geven dat ze in elkaar verankerd zijn. Voor nGen_FLEX is het belangrijk dat er genoeg verankering in het

object aanwezig is. Doordat het materiaal een hoge oppervlaktekwaliteit heeft, is het lastig voor andere materialen om voldoende hechting te laten plaatsvinden.

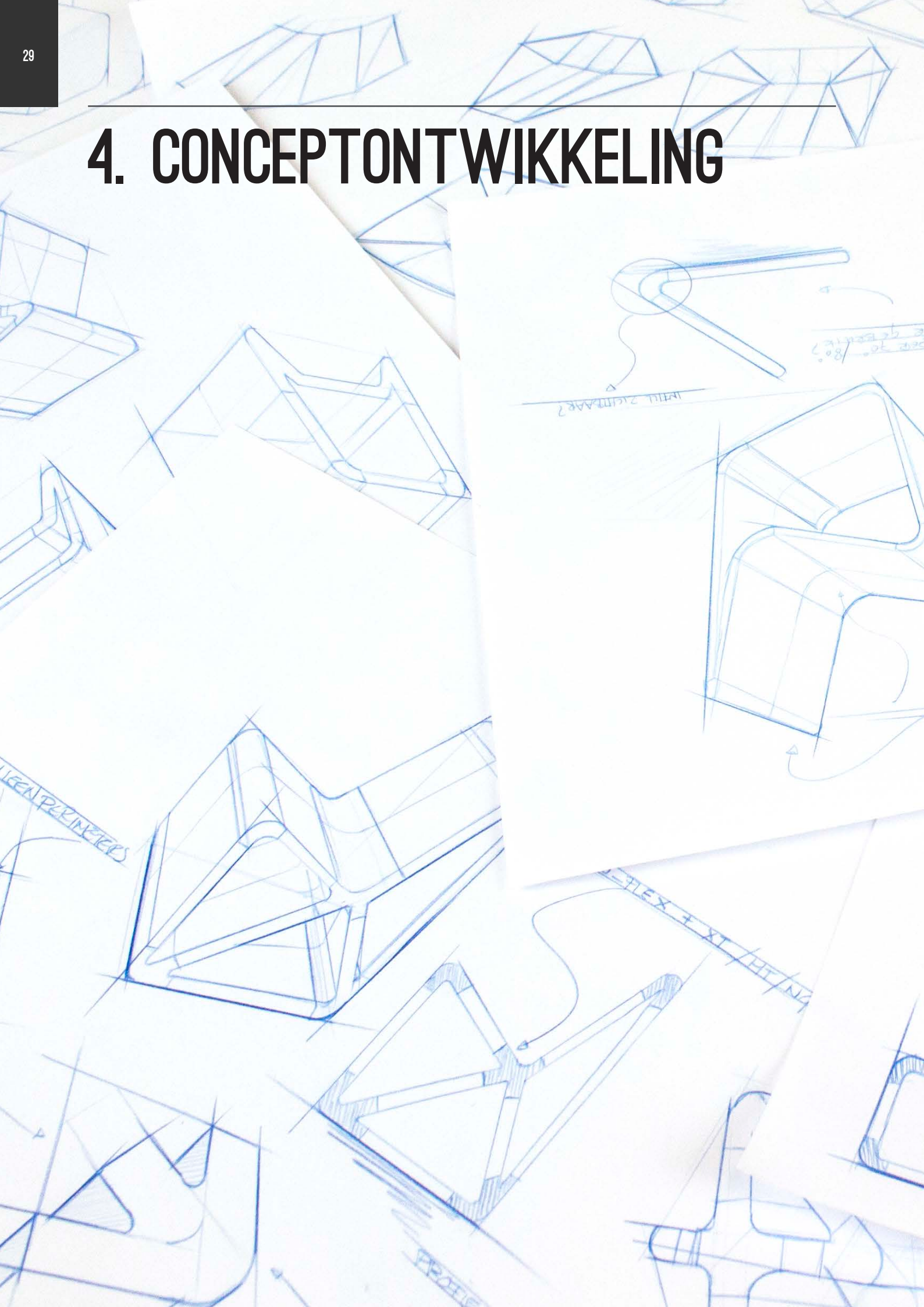
3.4.5 Efficiënt printtraject

Om een strak product uit de printer te krijgen dat ook makkelijk te printen is, is het belangrijk dat de geometrie van een product zo is opgebouwd dat de printkop deze aan een stuk door kan volgen. Dat wil zeggen dat de contourlijnen van een object zo ontworpen zijn dat de printkop deze zonder onderbreking kan printen, waardoor het eindresultaat er ook beter uit ziet.

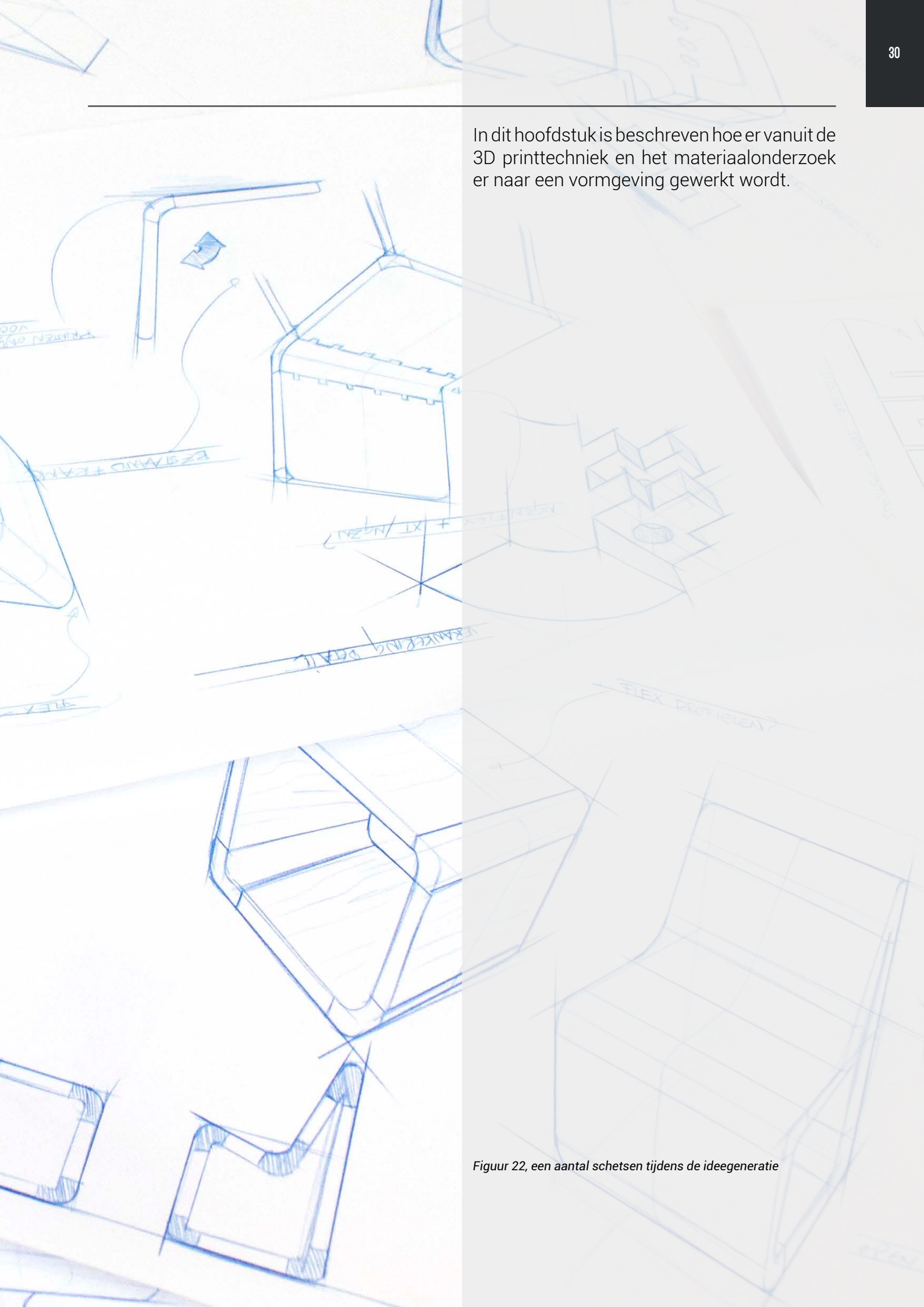
Dit kan worden gedaan door het plaatsen van radii en rondingen, welke maken dat de nozzle een efficiëntere toolpath kan volgen. Een toolpath is de weg die de printkop aflegt. Hierdoor heeft de printer bijna geen

onderbrekingen, zodat er geen oneffenheden in het oppervlak komen en er geen overtollig materiaal achteraf verwijderd moet worden. Er moet alleen wel gelet worden op de hoeveelheid retractions van de print. Zodra een product veel retractions bevat, gaat de efficiëntie van de toolpath omlaag.

4. CONCEPTONTWIKKELING



In dit hoofdstuk is beschreven hoe er vanuit de 3D printtechniek en het materiaalonderzoek er naar een vormgeving gewerkt wordt.



Figuur 22, een aantal schetsen tijdens de ideegeneratie

4. Conceptontwikkeling

4.1 Conceptvorming

Voordat het genereren van concepten kan beginnen is het belangrijk dat er eerst een beeld geschetst wordt van hoe het eindproduct zal functioneren en eruit komt te zien. Hiervoor is er vanuit de context gekeken naar inspiratiebronnen en de uiteindelijke doelgroep.

4.1.1 Context

Om het project te laten divergeren naar een specifiek product is het nodig om een context te formuleren, waarin het zitobject is te plaatsen. Deze context moet duidelijk maken wat voor een soort product ontworpen gaat worden, zodat er niet in de volledige breedte van het veld gekeken wordt en er een concreet doel geformuleerd kan worden waar naar toe gewerkt wordt.

In de opdrachtschrijving is duidelijk terug te vinden dat het eindresultaat van dit proces een zitobject moet zijn, waarbij het materiaal nGen_FLEX is toegepast en de materiaaleigenschappen worden benut. Dit object zal ontworpen worden voor 3D printtechnieken, waarbij de ontwerp regels worden toegepast. Daarnaast zal het de materiaaleigenschappen van nGen_FLEX benutten. Kortom, het eindontwerp is een resultaat van productietechnieken, materiaaleigenschappen en vormgeving.

Na bekend te zijn geraakt met wat wel en niet mogelijk is op een 3D printer en met nGen_FLEX, en welke richtlijnen er gevolgd moeten worden voor deze aspecten is er gekozen om een volledige stoel te gaan maken, met de insteek dat de gebruiker zelf het product kan maken en in elkaar kan zetten.

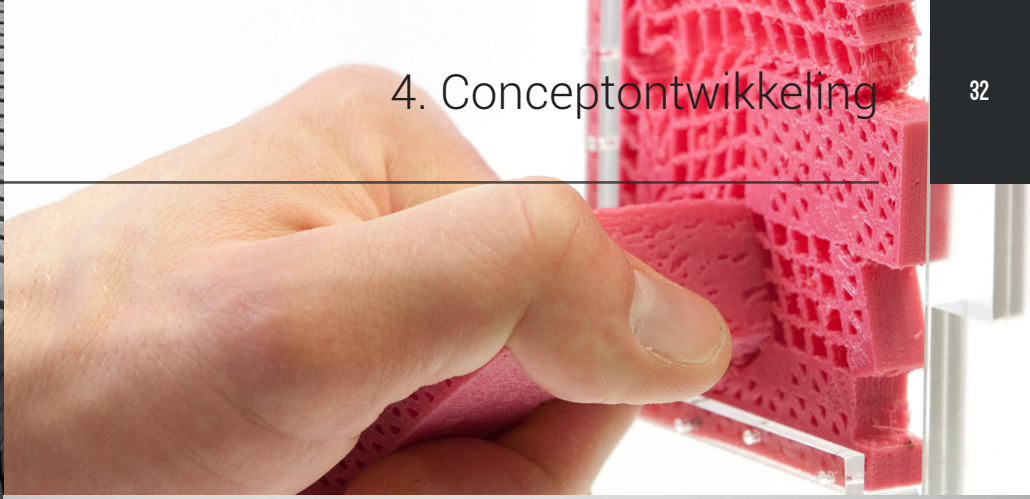
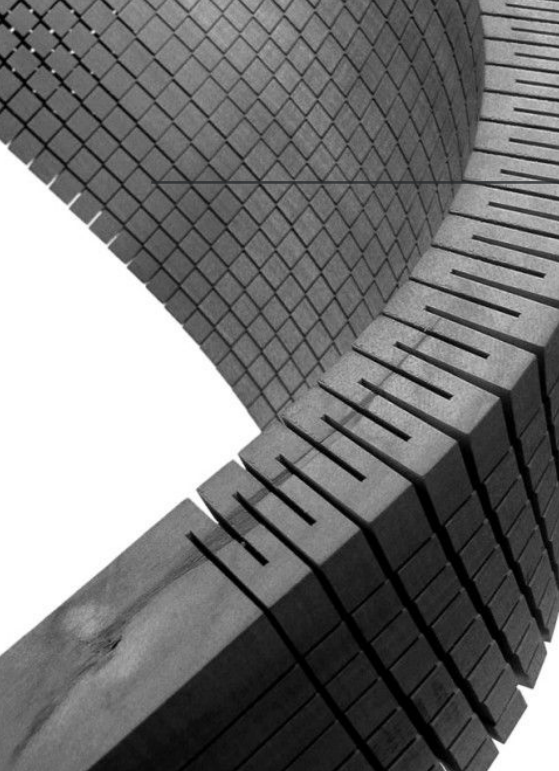
Het idee hierachter is dat de gebruiker meer bekend wordt met wat er allemaal mogelijk is met een 3D printer. Doordat de techniek

momenteel goed beschikbaar is, gaan steeds meer consumenten met een eigen machine aan de slag. Echter blijft dit vaak bij simpele modellen of objecten, zoals een pennenbakje of een telefoonhoesje.

Door deze stoel zo te maken en ontwerpen dat iedereen er een thuis kan realiseren, zullen mensen zien dat er met nGen_FLEX en 3D printen in het algemeen veel meer functionaliteit is te bereiken dan dat ze in eerste instantie dachten.

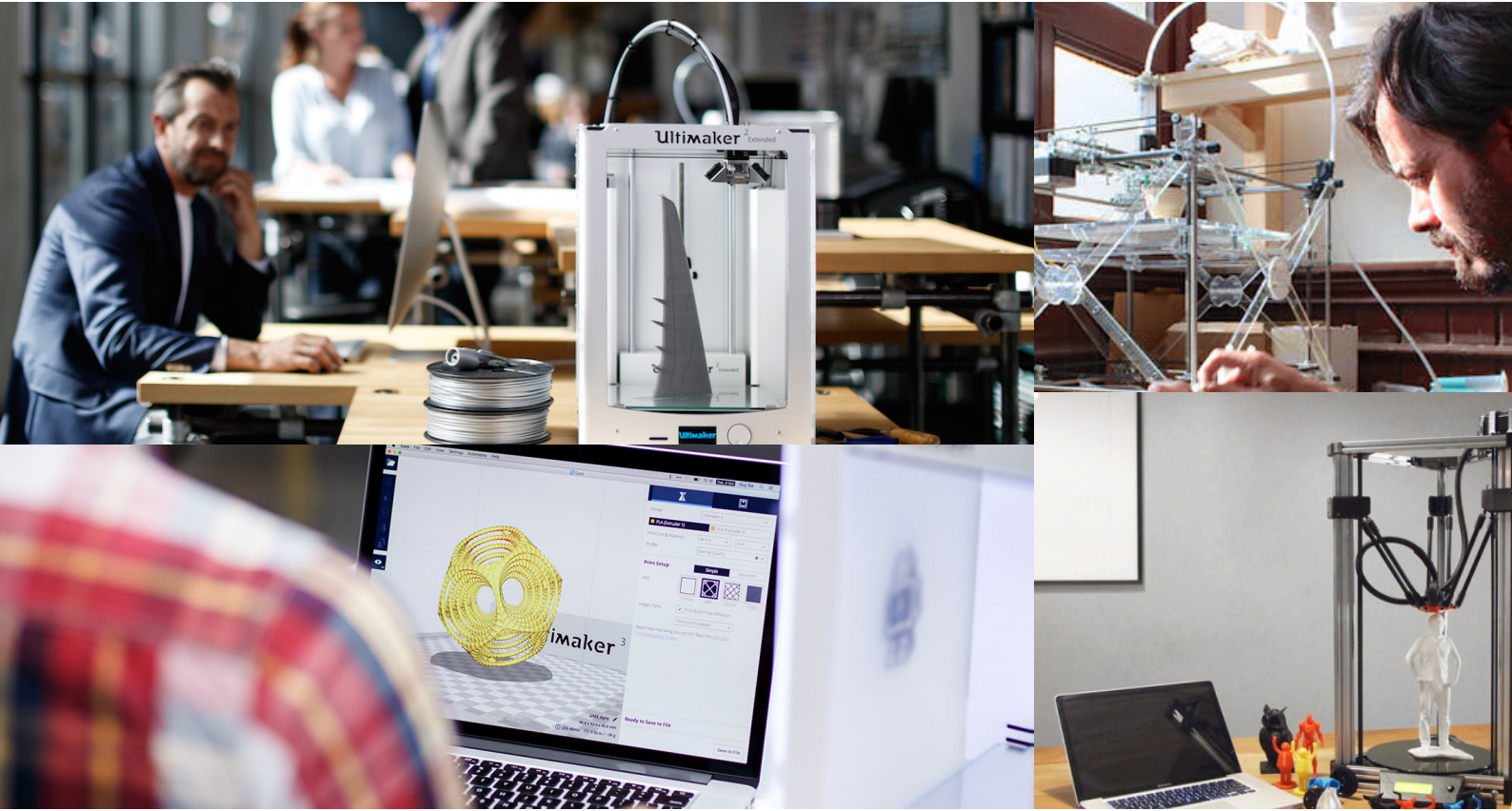
4.1.2 Algemene inspiratie

Vanuit de opgezette context is er vervolgens inspiratie gezocht in de drie hoofdaspecten die in dit project naar voren komen: de vormgeving van de stoel, de 3D printtechniek en flexibele materialen. Deze drie onderdelen spelen een grote rol in het ontwikkelen van concepten, en vormen de basis. Op de rechterpagina in figuur 23 is een collectie aan beeldmateriaal terug te vinden dat als een moodboard is opgezet.



Figuur 23, algemene inspiratie

4. Conceptontwikkeling



Figuur 24, een impressie van de "Prosumer"

4.1.3 Doelgroep

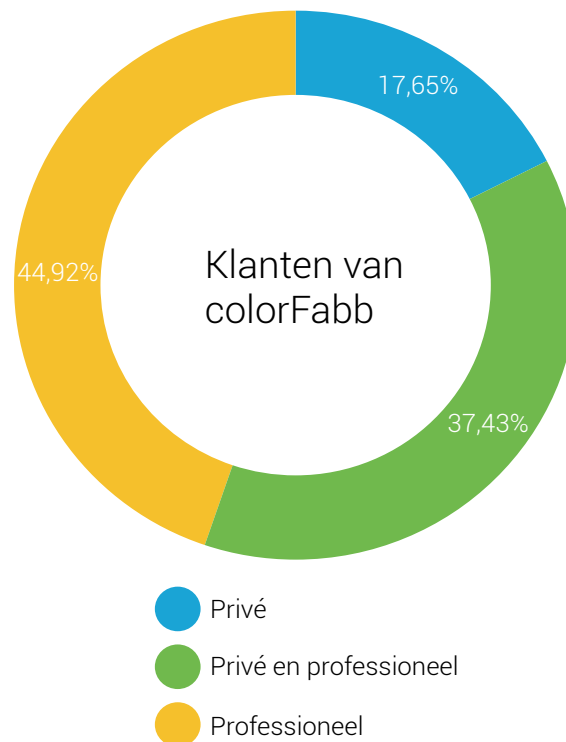
Op basis van de klantgegevens van colorFabb is gekeken naar een passende doelgroep voor de stoel. De klantgegevens bestaan uit drie groepen mensen welke colorFabb filament gebruiken. Deze is in figuur 25 grafisch weergegeven.

Allereerst de professionele markt, waarbij filament gebruikt wordt voor industriële toepassingen. Deze markt is momenteel de snelst groeiende en naar verwachting gaat de industrie steeds meer filament gebruiken.

Ten tweede de professionele en privé markt. Deze groep bestaat uit mensen die het materiaal gebruiken voor eigen projecten, maar ook voor professionele toepassingen. Hieronder vallen ook kleinere bedrijven of start-ups.

Tot slot is er de derde groep, de privé markt. Deze markt bestaat uit mensen die filament kopen voor thuisgebruik.

Aan de hand van deze gegevens is duidelijk dat 55% van de klanten van colorFabb vallen onder de groep "Prosumers". Dit zijn klanten die colorFabb filament aanschaffen voor eigen gebruik, maar dit ook gebruiken voor professionele doeleinden. De prosumer is iemand die vaardig is met een 3D printer en de materialen, en eigen ontwerpen maakt voor thuis of voor anderen. Op de afbeelding in figuur 24 is een impressie terug te vinden van de "prosumer".



Figuur 25, grafische weergave van de klanten van colorFabb

4.2 Programma van Eisen en Wensen

Het programma van eisen en wensen is opgesteld tijdens de conceptontwikkeling. Hierin staan de verschillende eisen en wensen voor de stoel geformuleerd, en is een leidend document voor de conceptvorming en de conceptkeuze. In dit document, dat terug te lezen is op pagina 21 in de bijlage, zijn de eisen opgedeeld in verschillende categorieën. Hieronder zijn de drie belangrijkste categorieën kort samengevat.

Allereerst de vormgeving van het product. Zo is het belangrijk dat er gekeken wordt naar de printbaarheid en het toepassen van de eigenschappen van het materiaal.

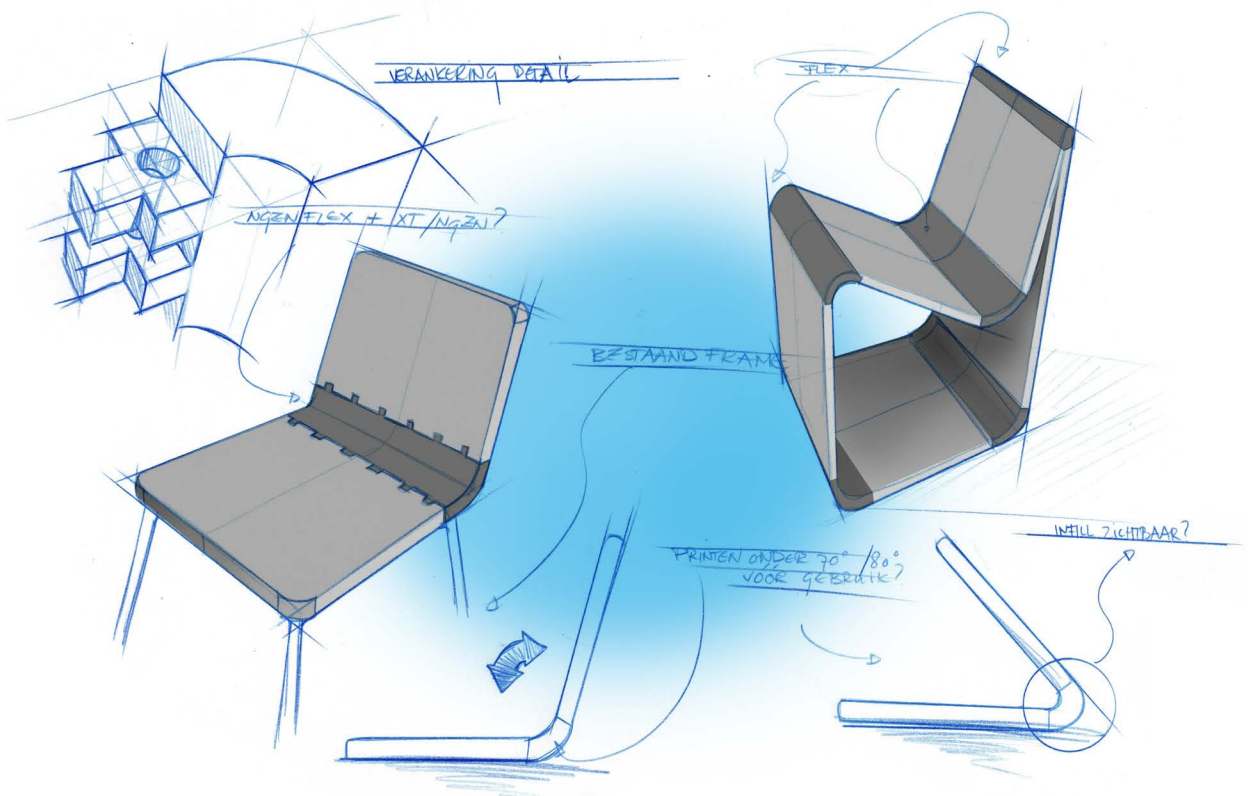
Vervolgens zijn er eisen opgesteld voor de dimensionering van het product. Doordat het een functioneel gebruiksproduct is wordt het belangrijk dat er met antropomorfische

maten rekening wordt gehouden. Ook is hierin de veiligheidsfactor voor het materiaal opgenomen.

De derde categorie bevat de eisen omtrent de productie van de stoel. Hierin wordt dieper ingegaan op hoe de stoel gemaakt wordt, en welke criteria belangrijk zijn voor de 3D printer en het printproces zelf. Daarnaast komen er ook eisen aan bod omtrent de productie van eventueel te gebruiken tussenmateriaal, zoals welke gereedschappen hier voor nodig zijn.

De rest van het document bevat eisen omtrent het materiaal, de kwaliteit van de onderdelen, en de kosten van het materiaal. Ook komen er nog eisen omtrent de gebruiker en de gebruiksomgeving aan bod.

4. Conceptontwikkeling



Figuur 26, een aantal eerste schetsen

4.3 Conceptrichting

De conceptontwikkeling is begonnen met het uitdenken van eerste basisideeën, welke vervolgens hier en daar ondersteund zijn met testontwerpen, of juist ontstonden uit de gemaakte testprints. Zo is het hele proces van conceptontwikkeling opgebouwd uit korte iteraties, waarin er vanuit een schets of vanuit een 3D print weer nieuwe mogelijkheden ontstaan welke vervolgens weer verder uitgewerkt kunnen worden. Door deze iteraties te blijven uitvoeren kan een concept zo verder tot in detail worden ontwikkeld om tot een eindontwerp te komen.

4.3.1 Eerste ideeën

De eerste ideeën die ontstaan zijn waren vooral gebaseerd op een standaard interpretatie van de stoel; een zitvlak met rugsteun met daaronder een frame. Deze

concepten zijn gedurende de eerste paar weken van het project op papier gezet en uitgeschetst. In figuur 26 zijn een aantal van deze schetsen te zien.

Door bezig te zijn met nGen_FLEX en de 3D printers zijn er verschillende richtlijnen opgesteld, zoals eerder genoemd in hoofdstuk 3, paragraaf 3 en 4. Deze richtlijnen hebben inzicht gegeven in hoe de printer werkt en hoe het materiaal reageert op bepaalde instellingen. Op basis van deze richtlijnen is begonnen met het genereren van nieuwe ideeën, welke niet langer het standaard beeld van de stoel in zich hebben, maar juist de focus leggen op de printbaarheid van het geheel. Hierbij is het ook belangrijk dat niet alleen de zitdelen maar ook het frame zelf geprint kan worden.



Figuur 27, verschillende geprinte testontwerpen



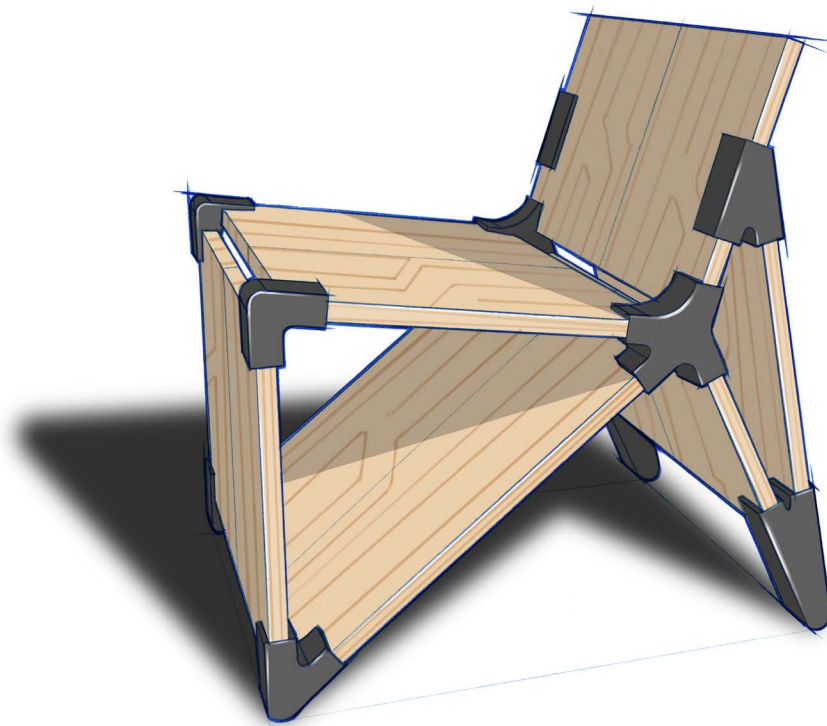
Figuur 28, impressie van conceptrichting 1

4.3.2 Conceptrichting 1

Vanuit de eerste schetsen is er gewerkt naar een realiseerbaar concept. In dit concept is nGen_FLEX gecombineerd met een ander materiaal, zoals colorFabb_XT, hout, of metaal. De verbindingdelen zijn geprint met nGen_FLEX, en opgezet vanuit een profielprincipe. In figuur 28 is een impressie te zien van hoe dit concept eruit zou kunnen zien. Om ervoor te zorgen dat de stoel goed printbaar is, is het ontwerpen van profielachtige onderdelen een goede oplossing. Zo wordt het mogelijk om grote onderdelen zonder al te veel warping te produceren. Daarnaast is het zitvlak en de rugsteun voorzien van het metamaterials principe. Metamaterials zijn kunstmatige materialen waarvan de eigenschappen bepaald worden door het patroon dat is aangebracht in plaats van de materiaalkeuze. Zo wordt het mogelijk om een flexibel en verend zitvlak te maken.

4.3.3 Conceptrichting 2

Doordat de kosten van rollen filament relatief hoog kunnen liggen als er veel materiaal nodig is, zal het voor de doelgroep minder aantrekkelijk zijn om de stoel zelf te gaan maken. Om er toch voor te zorgen dat de consument de stoel gaat printen en maken is er gekozen om vanuit efficiënt materiaalgebruik een concept te realiseren. Een impressie van dit concept is te zien in figuur 29. Dit concept is een stoel die bestaat uit 3D geprinte verbindingdelen, welke gecombineerd zijn met standaard materiaal dat bij de bouwmarkt of houthandel te verkrijgen is. De geprinte koppelstukken zijn te printen met een standaard desktopprinter, zodat een groot deel van de consumenten de stoel zelf thuis kan maken.



Figuur 29, impressie van conceptrichting 2

4.3.4 Richtingskeuze

Deze twee conceptrichtingen zijn voor de keuze bekeken op een aantal hoofdcriteria uit het Programma van Eisen en Wensen. De criteria voor de keuze zijn gekozen uit eisen omtrent de vormgeving, de gebruiker, de productie en het materiaal.

1.1 De vormgeving moet de materiaaleigenschappen benutten of uitstralen

1.7 De vormgeving moet de mogelijkheden van 3D printen benutten

2.7 De gebruiker kan zelf de maatvoering instellen aan de hand van eigen voorkeur of van te voren bepaalde dimensies

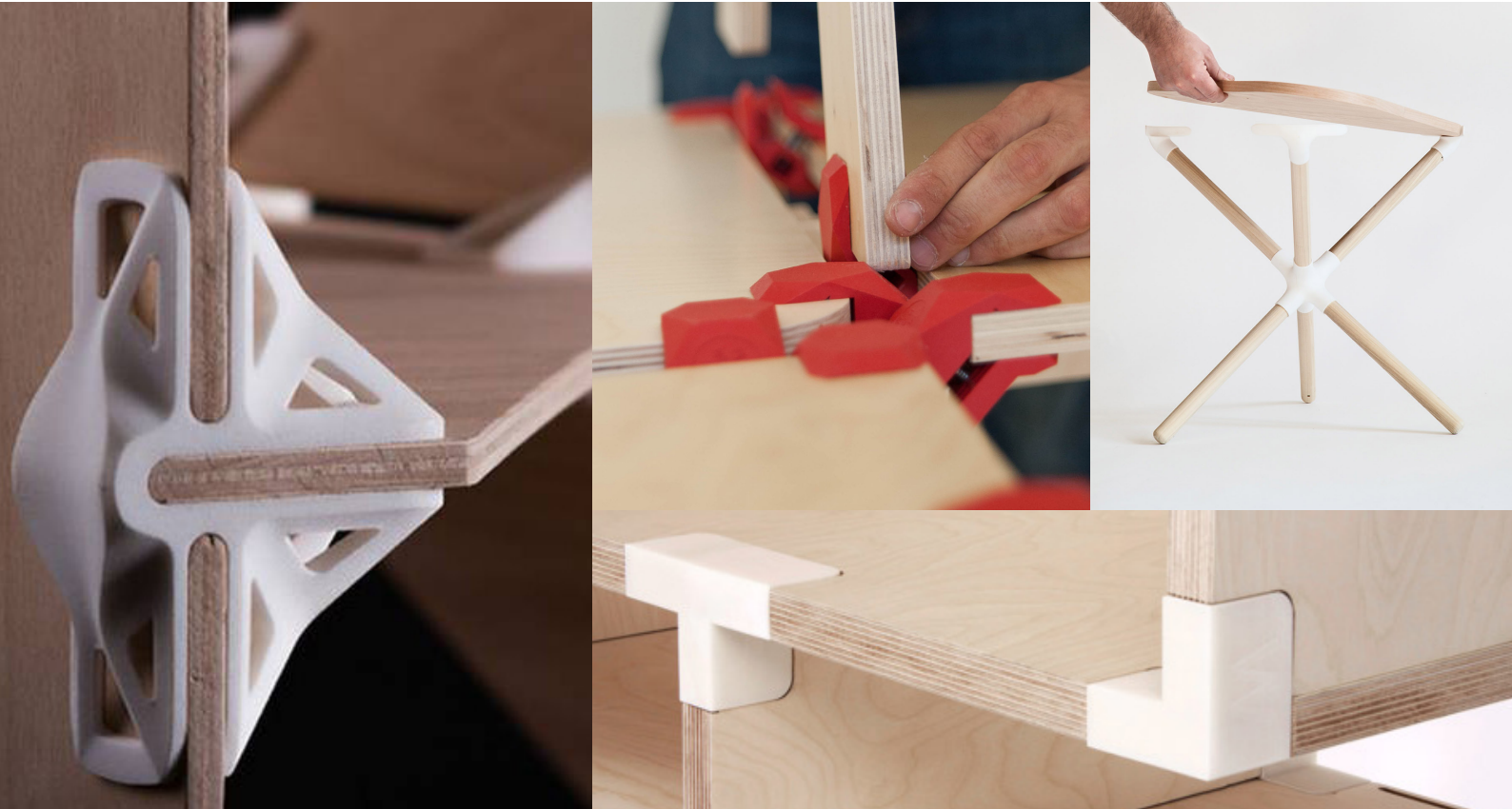
3.2 De onderdelen moeten met een standaard desktopprinter met een bouwoppervlak van

200 bij 200 millimeter en een hoogte van minimaal 150 millimeter te maken zijn

4.4 Het materiaal moet zo efficiënt mogelijk benut worden

Aan de hand van deze vijf criteria zijn de twee richtingen tegenover elkaar gezet, en is er uiteindelijk gekozen voor conceptrichting 2. Op alle vijf de criteria scoort deze namelijk beter dan conceptrichting 1, want deze is niet printbaar op desktopprinters, en is niet efficiënt genoeg in materiaalgebruik. De overige criteria zijn wel terug te vinden in richting 1.

4. Conceptontwikkeling



Figuur 30, inspiratie voor geprinte verbindingdelen

4.4 Concepten

Binnen de conceptring van het combineren van inkoopmateriaal zoals hout of metaal met 3D geprinte koppelstukken zijn een drietal concepten gegenereerd, gebaseerd op bestaande principes aan de hand van inspiratiemateriaal welke te zien is in figuur 29.

Deze drie concepten zijn qua globale richting hetzelfde. Elk concept bevat 3D geprinte onderdelen die met houten onderdelen samengesteld zijn. De onderlinge verschillen zitten in de manier waarop de vormgeving is gedaan, of juist op hoe de assemblage met de houten onderdelen plaatsvindt.

4.4.1 Concept 1

Dit concept is gebaseerd op een simpele lounge chair, zoals in de schetsen in

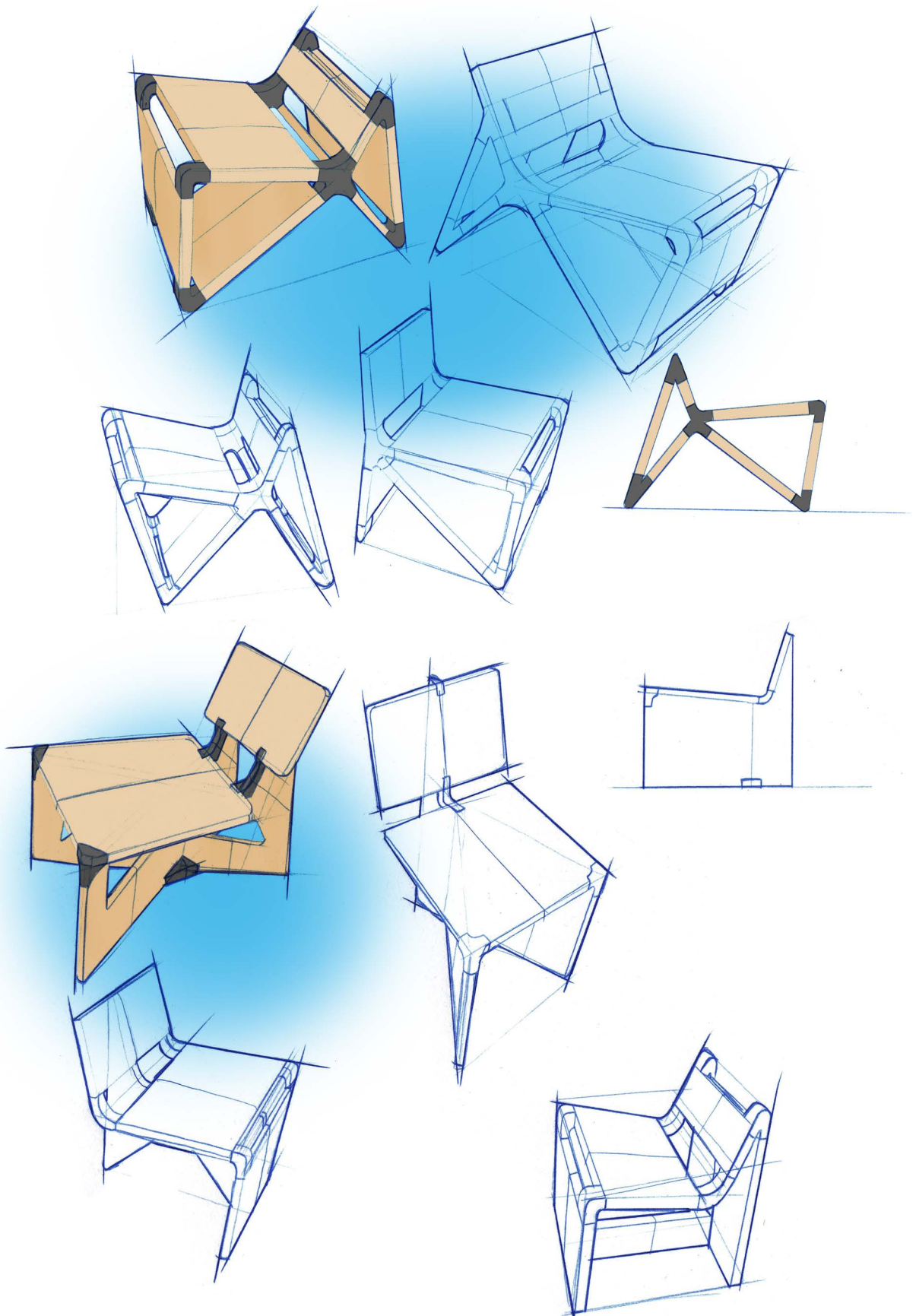
figuur 31 zichtbaar is. Hierbij zijn simpele houten platen gecombineerd met geprinte onderdelen, zodat het zo mogelijk wordt om snel en makkelijk een stoel in elkaar te zetten.

4.4.2 Concept 2

Voor dit concept is er gekeken naar hoe er meer een driedimensionale stoel gemaakt kan worden door de houten tussenplaten op een andere manier te combineren of aan te laten sluiten. Hierbij is nGen_FLEX toegepast als verbindingselementen tussen de afzonderlijke houten platen. In figuur 31 zijn een aantal schetsen hiervan terug te zien.

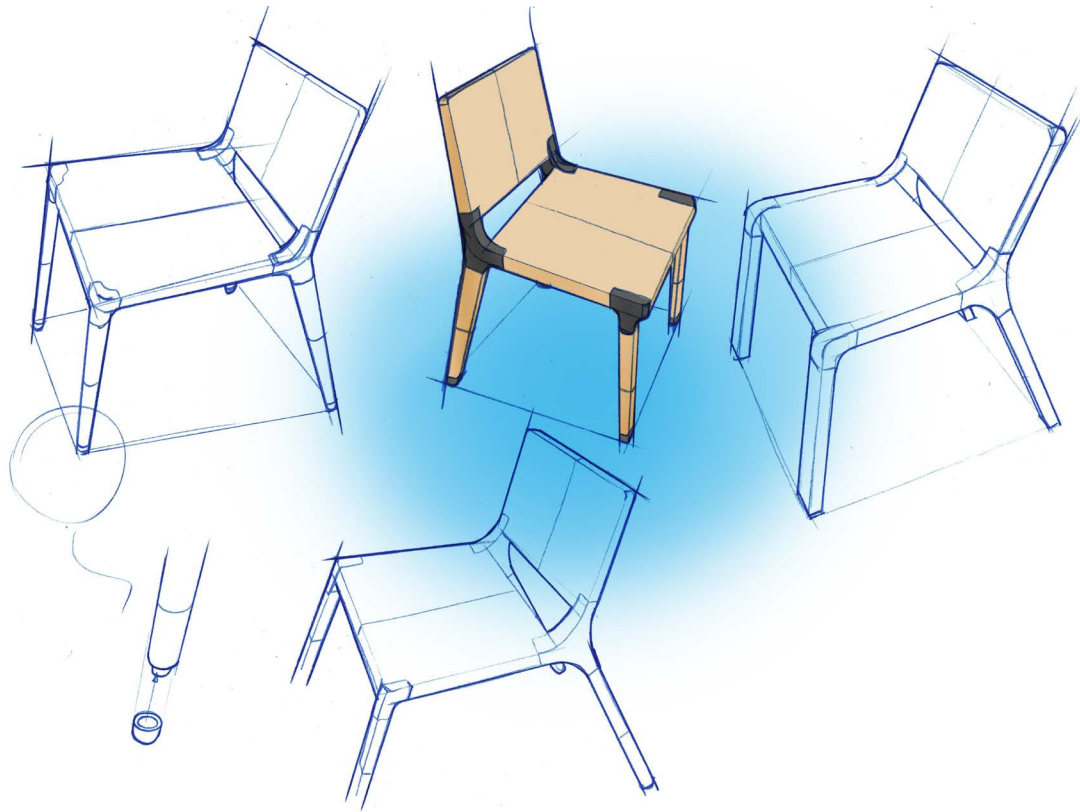
4.4.3 Concept 3

Het derde concept berust zich op de standaard interpretatie van de stoel. Doordat er met



Figuur 31, ideatieschetsen met concept 1 (boven) en concept 2 (onder)

4. Conceptontwikkeling



Figuur 32, meer ideatieschetsen met hier concept 3

nGen_FLEX koppeldelen gewerkt wordt, kan er zo met verschillende inkoopdelen gewerkt worden. In dit geval is er vooral gekeken naar hoe houten plaatmateriaal en balken of staven gebruikt kunnen worden voor het maken van een stoel. Op de afbeelding in figuur 32 zijn hiervan een aantal schetsen te zien.

4.4.4 Conceptkeuze

Voor het maken van een keuze tussen deze drie concepten is het programma van eisen en wensen erbij gehaald en zijn zo een aantal selectiecriteria geformuleerd.

Aan de hand van deze criteria wordt het mogelijk om de afzonderlijke concepten te evalueren, en zo een onderbouwde keuze te maken. De eerder gebruikte eisen voor het maken van een onderbouwde richtingskeuze zijn achterwege gelaten, omdat die allemaal

naar voren komen in de drie concepten. De verschillende concepten zijn per eis beoordeeld door middel van de getallen 1 tot en met 5. Hierbij wil 5 zeggen dat het concept goed aansluit, en 1 dat het niet goed aansluit op de desbetreffende eis.

3.4 De inkoopdelen hoeven niet complex te worden nabewerkt

3.8 Het tussenmateriaal moet met simpele gereedschappen gemaakt worden of the zagen zijn

4.2 De eigenschappen van het materiaal moeten benut worden in de vormgeving

6.1 De assemblage moet simpel en snel verlopen

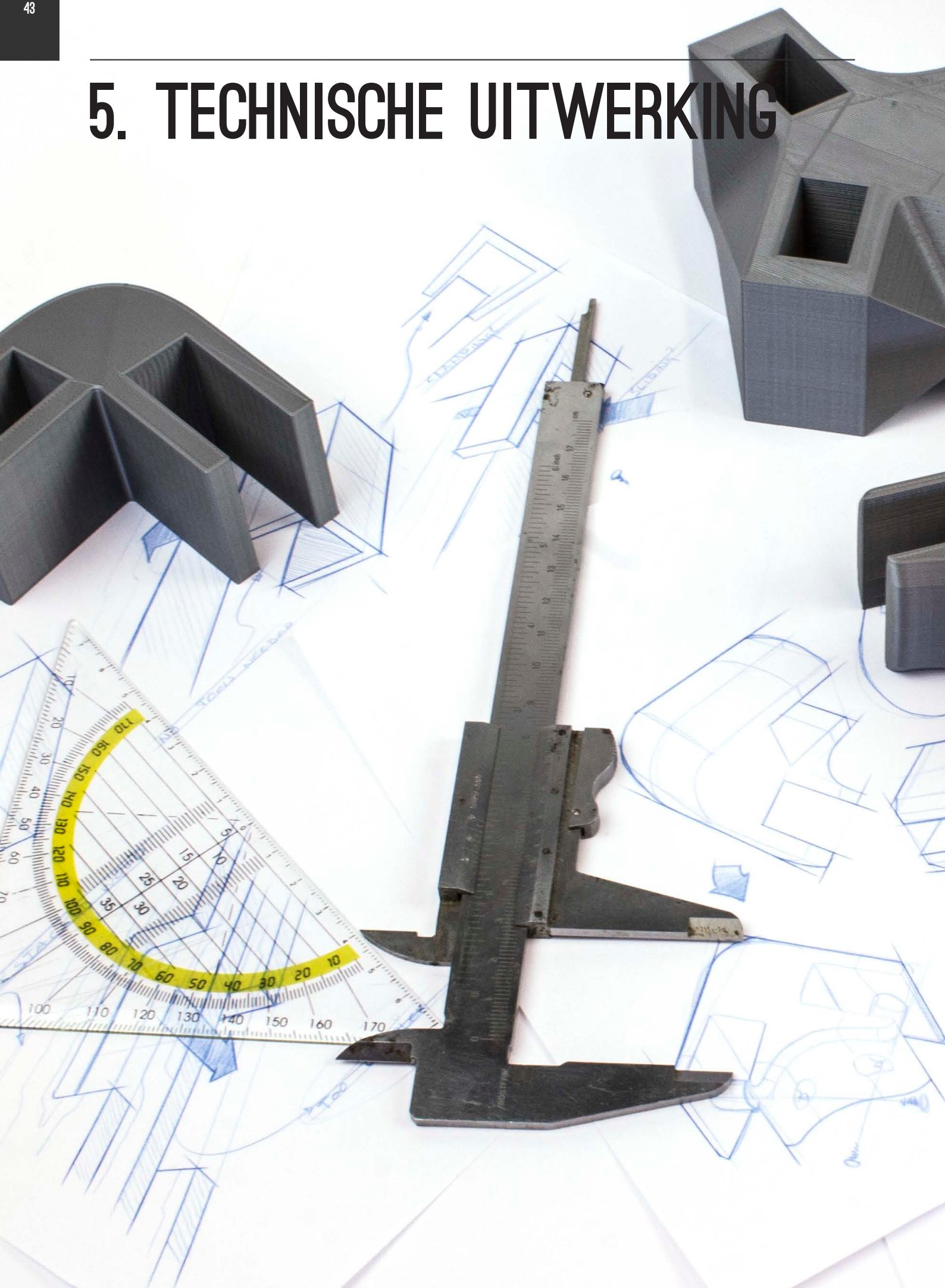
Uit de tabel in figuur 33 te halen dat concept 1 de beste keuze is doordat deze

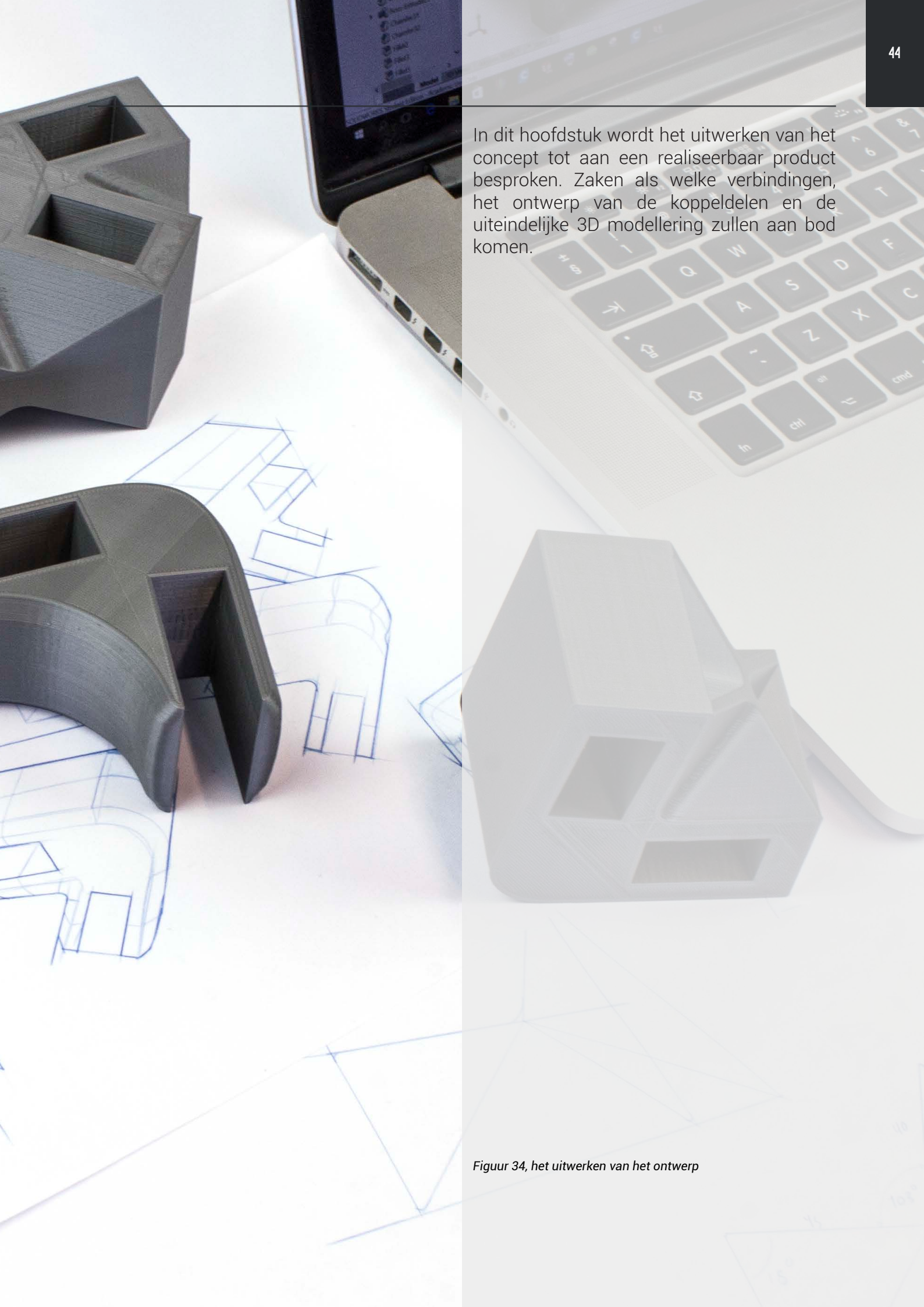
	Concept 1	Concept 2	Concept 3
3.4	5, de houten platen in dit concept zijn simpel te maken met een zaag.	4, door de complexere vorm die het hout moet hebben is het onderdeel ook complexer te maken	5, De houten onderdelen zijn simpel te maken met een zaag.
3.8	5, de complete stoel is te maken met simpele gereedschappen.	5, de complete stoel is te maken met simpele gereedschappen.	5, de complete stoel is te maken met simpele gereedschappen.
4.2	4, de stoel veert mee met de gebruiker, wat alleen mogelijk is met een flexibel materiaal	1, door de complexere houtconstructie wordt het lastig om de flexibiliteit van het materiaal goed toe te passen. Daardoor sluit dit concept niet aan op deze eis en de opdracht in het algemeen.	2, dit concept laat weinig flexibiliteit toe.
6.1	5, de gebruiker kan de stoel snel en simpel assembleren.	5, de gebruiker kan de stoel snel en simpel assembleren.	5, de gebruiker kan de stoel snel en simpel assembleren.
Totaal	19	15	17

Figuur 33, overzicht van de conceptkeuze

het beste overeenkomt met de criteria uit het programma van eisen en wensen. De eis met betrekking tot het toepassen van de materiaaleigenschappen heeft hierin voornamelijk de doorslag gegeven. NGen_FLEX is naast de flexibiliteit ook een goed en sterk materiaal voor het maken van de koppeldelen. Echter moet de uiteindelijke stoel ook de flexibiliteit op een manier kunnen laten zien. Concept 1 zal nu dus verder worden uitgewerkt.

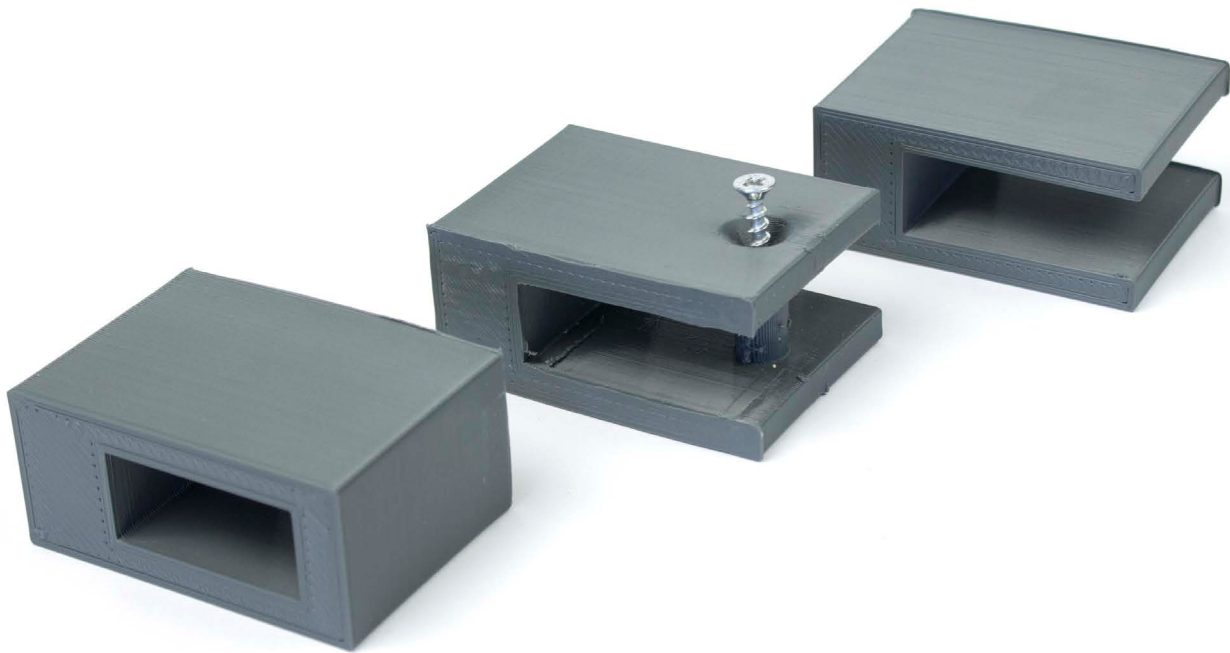
5. TECHNISCHE UITWERKING





In dit hoofdstuk wordt het uitwerken van het concept tot aan een realiseerbaar product besproken. Zaken als welke verbindingen, het ontwerp van de koppeldelen en de uiteindelijke 3D modellering zullen aan bod komen.

Figuur 34, het uitwerken van het ontwerp



Figuur 35, de geprinte verbindingstests

5.1 Koppeldelen

Voordat de koppeldelen vormgegeven kunnen worden is het belangrijk dat er eerst gekeken wordt naar het soort verbinding dat gebruikt wordt, en welk soort hout het tussenmateriaal zal zijn. Hiervoor zijn een serie verbindingen uitgedacht en getest.

5.1.1 Verschillende verbindingen

Voor het maken van de stoel met 3D geprinte onderdelen moet er een connectie worden ontworpen die het hout en de geprinte producten met elkaar verbindt. Deze verbindingen moeten niet alleen sterk zijn, maar ook niet of beperkt losneembaar zodat de onderdelen er niet af vallen tijdens het gebruik van de stoel. Hiervoor is er begonnen met een aantal schetsen om de eerste ideeën voor de verbindingen op papier te krijgen.

Zo is het bijvoorbeeld niet mogelijk om de verbindingen volledig gelijk te laten liggen met de houten platen, omdat hiervoor het hout met een frees zou moeten worden voorbereid. Aangezien niet iedereen beschikking heeft tot dit gereedschap is er al snel gekeken naar klem verbindingen, welke werken met of zonder verbindingselementen.

Via deze weg zijn er zo drie soorten verbindingen opgesteld; Een verbinding met zaagsneden, een verbinding zonder voorbereiding en een verbinding waarbij een gat geboord wordt. Deze zijn in figuur 35 terug te zien.

De verbinding met zaagsnede berust op de flexibiliteit van het materiaal, wat zo een beetje kan oprekken om precies in de zaagsnede te passen. De verbinding zonder

	Elastische verbinding	Losse verbinding	Schroefverbinding
Maakbaarheid	Goed printbaar	Goed printbaar	Support nodig tijdens printen
Maatvoering	Toleranties zijn belangrijk, meenemen in ontwerp	Bijna geen invloed op de verbinding	Toleranties zijn belangrijk, meenemen in ontwerp
Sterkte	Sterke verbinding	Zwakke verbinding	Sterke verbinding
Gebruik tijdens assemblage stoel	Kan lastig te assembleren zijn	Simpel te assembleren	Simpel te assembleren
Losneembaarheid	Niet of lastig los te halen	Makkelijk los te halen	Los te halen na verwijderen schroef
Verbindingselement of middel	Nee	Nee	Ja, houtschroef
Vorbewerking hout	Zaagsnede in het hout	Geen bewerking nodig	Gat boren voor schroef

Figuur 36, de verbindingkeuze

voorbewerking is een simpele u-vormige geometrie, welke om het hout geschoven kan worden. De verbinding met schroef heeft een geïntegreerde schroefnok, welke door het gat in het hout past. Vervolgens kan er een simpele houtschroef met een schroevendraaier erin gedraaid worden.

5.1.2 Verbindingskeuze

Om een goede keuze te maken voor het soort verbinding dat gebruikt wordt zijn de uitgewerkte opties tegenover elkaar gezet op een zevental aspecten:

1. De maakbaarheid van de verbinding
2. De maatvoering van de verbinding
3. De sterkte van de verbinding
4. Het gebruik tijdens assemblage draait

5. De losneembaarheid van de verbinding, dat wil zeggen in hoeverre de stoel nog uit elkaar te halen is na assemblage

6 Per verbinding wordt er gekeken of er een verbindingselement of middel nodig is.

7. De voorbewerking van de houten onderdelen.

Op basis van de tabel uit figuur 36 is vervolgens gekozen om de elastische verbinding te gaan gebruiken in het uiteindelijke ontwerp. Doordat deze oplossing vrijwel aan alle criteria voldoet is het de beste en meest elegante optie, omdat er geen verbindingselementen nodig zijn en de gebruiker de verbinding dus klaar voor gebruik kan printen. Daarnaast maakt deze verbinding ook gebruik van de materiaaleigenschappen van nGen_FLEX.

5. Technische uitwerking

	Multiplex	Vurenhout	Beukenhout
Beschikbaarheid	Te vinden in elke bouwmarkt	Te vinden in elke bouwmarkt	Niet overal beschikbaar
Sterkte	Sterk materiaal door gelaagdheid	Sterk materiaal in de nerfrichting	Sterk materiaal in de nerfrichting
Prijs	Goedkoop	Relatief goedkoop	Duur
Bewerkbaarheid	Goed te verspanen	Goed te verspanen	Goed te verspanen
Maatvoering	Weinig verschil in dikte	Massief hout dus veel kans op werking	Massief hout dus veel kans op werking

Figuur 37, keuze van het tussenmateriaal

5.1.3 Tussenmateriaal

Voor het materiaal van de tussenplaten is het belangrijk om te kiezen welke houtsoort het beste zal werken. Hiervoor zijn drie verschillende houten plaatmateriaal met elkaar vergeleken, welke alle drie goed toepasbaar zijn in constructies; multiplex, vurenhout en beukenhout. Deze zijn vervolgens met elkaar vergeleken op een vijftal criteria om zo een goede keuze te kunnen maken;

1. De beschikbaarheid van het materiaal
2. De sterkte van het hout
3. De kostprijs
4. De bewerkbaarheid
5. De maatvoering

Aan de hand van de vergelijking die terug te zien is in figuur 37 is besloten om multiplex te gaan gebruiken als plaatmateriaal voor de stoel. Doordat het een composietmateriaal is, heeft het geen last van werking zoals de massieve houtsoorten. Daarnaast ligt multiplex qua kosten ook aanzienlijk lager dan vuren of beukenhout, en is het vrijwel in elke bouwmarkt of houthandel te vinden.

5.1.4 Ontwerp koppeldelen

Nu de soort verbinding en het materiaal ertussen bekend zijn, begint het vormgeven van de geprinte koppeldelen. Hierbij is er vooral gekeken naar hoe de verbinding in het ontwerp geïntegreerd kan worden, en welke vormen interessant zijn. De geprinte verbindingstukken hebben een aantal criteria; het efficiënt toepassen van materiaal,

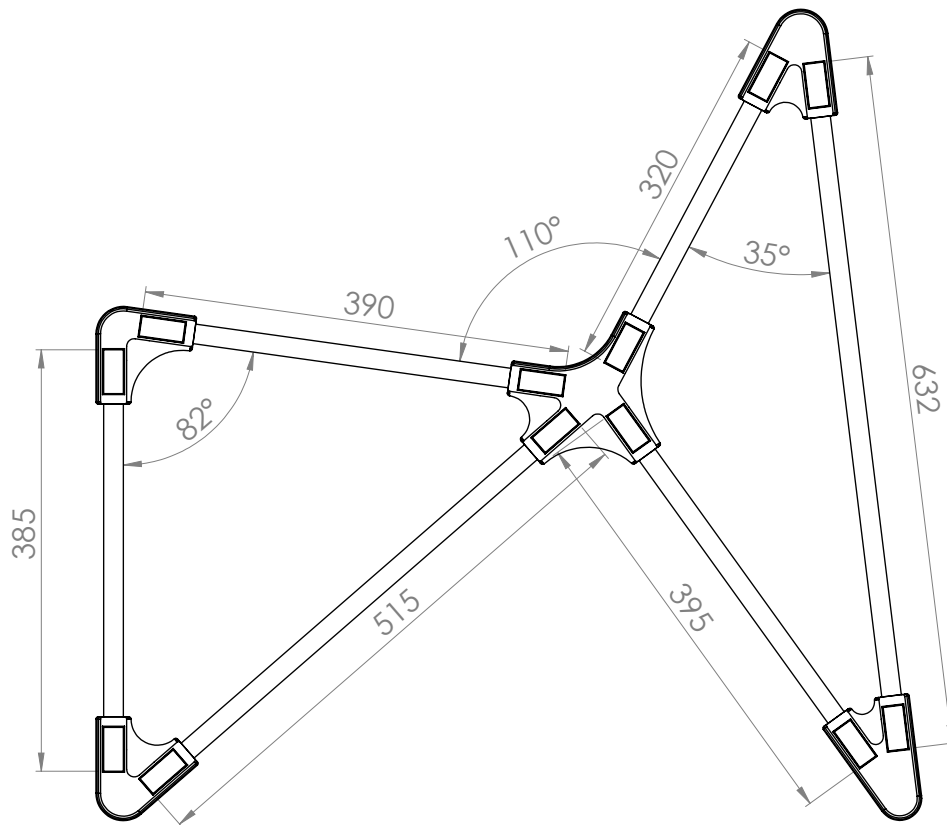


Figuur 38, vormontwikkeling van de geprinte onderdelen

genoeg sterkte bieden voor de constructie, het gebruik maken van de mogelijkheden die 3D printen biedt, en de vormgeving mag het zitcomfort niet negatief beïnvloeden. Ook moeten de richtlijnen uit hoofdstuk 3 paragraaf 3 en 4 in acht worden genomen voor het maken van een goede vormgeving die printbaar is.

Om een goed en strak ontwerp te krijgen zijn er een aantal schetsen gemaakt van hoe het eruit kan zien. Doordat het belangrijk is om zo efficiënt mogelijk met nGen_FLEX om te gaan, is er gelijk gekeken naar waar materiaal weggehaald kan worden om zo een sterk en licht ontwerp te creëren. Aan de hand hiervan zijn een aantal voorstellen verder uitgewerkt en vervolgens geprint in PLA, om zo de vorm en de printbaarheid beter te kunnen beoordelen. Deze voorstellen zijn in figuur 38. terug te zien.

Uiteindelijk is er gekozen om de koppeldelen zo te ontwerpen dat ze een zachte en organische uitstraling hebben. Op deze manier krijgt de complete stoel meer een duidelijk ontwerp, en oogt hij minder technisch. Ook ontstaat er een contrast tussen de rechte houten platen en de complexere geprinte verbindingdelen, doordat oude en nieuwe productietechnieken en hun mogelijkheden met elkaar worden verbonden.



Figuur 39, globale afmetingen van de stoel

5.3 CAD modellering

Voordat er gestart kan worden met de productie is het nodig om een 3D CAD model op te zetten, waarin de verschillende onderdelen uitgetekend zijn. Dit model kan vervolgens gebruikt worden voor krachtenanalyses, waarbij de sterkte van het materiaal en de constructie bekeken wordt. Aan de hand van dit CAD model zijn er uiteindelijk een serie technische tekeningen opgesteld.

5.3.1 Dimensionering

Voor de dimensionering is begonnen met het zoeken naar de bijbehorende antropomorfische afmetingen, zodat de maatvoering rekening kan houden met de ergonomische eisen van de gebruiker. Er is onder andere gekeken naar de database van DINEN, en naar bestaande stoelen om een

idee te krijgen van de globale maten.

Doordat veel ergonomische bronnen gemaakt zijn voor het ontwerpen van een perfect ergonomische stoel waarin de gebruiker kaarsrecht zit, zoals een bureaustoel, is het lastig om te bepalen welke maten uit deze bronnen bruikbaar zijn voor een lounge stoel. Aan de hand van verschillende referentieafbeeldingen (welke terug zijn te vinden in de bijlage vanaf pagina 23) zijn een aantal simpele kartonnen modellen gemaakt op schaal.

Op de afbeelding in figuur 39 is de uiteindelijke maatvoering terug te zien. Hierbij is de zithoogte en de zitdiepte ergonomisch benaderd, en is de rugleuning bepaald door te kijken naar bestaande standaard stoelen, en deze te vergelijken met de data.



Figuur 40, het eindontwerp

Voor de maatvoering van de geprinte onderdelen moet er rekening worden gehouden met de laagbreedte, welke afhankelijk is van de diameter van de nozzle. Doordat het materiaal het sterkst is in de polymeerrichting, wordt er in het ontwerp gewerkt met meerdere perimeters. Om deze perfect op elkaar te laten aansluiten is het belangrijk dat de buitenmaten van de geprinte producten een meervoud zijn van de diameter van de nozzle. De afbeelding in figuur 40 laat het uiteindelijke ontwerp zien.

Op basis van dit uiteindelijke ontwerp zijn een aantal technische tekeningen gemaakt welke in de bijlage vanaf pagina 26 zijn te vinden.

5.3.2 FEM Analyse

Na het vaststellen van het eindontwerp is een 3D CAD model opgezet in SolidWorks. Dit model is vervolgens gebruikt om FEM

analyses uit te voeren. Een FEM analyse is een manier om constructies door te laten rekenen in software.

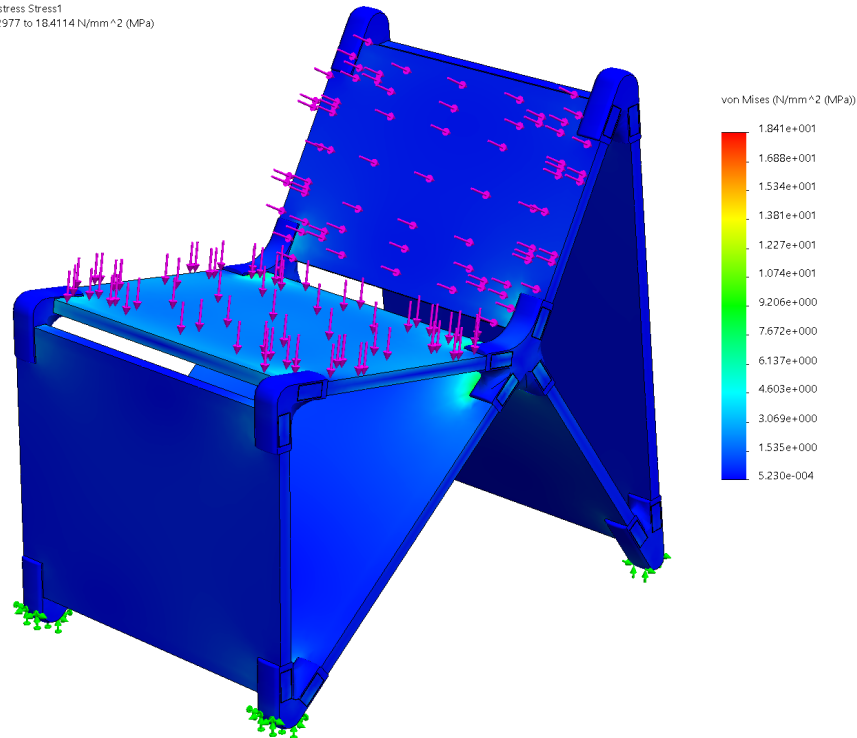
Met behulp van het 3D CAD model kan er zo een simulatie worden gemaakt waarin de constructie en de sterkte van het materiaal bekeken kunnen worden. Hierbij zijn de verschillende onderdelen voorzien van de benodigde materiaalgegevens.

De nGen_FLEX delen maken gebruik van de trekproefresultaten zoals terug te lezen in de bijlage op pagina 14. Het multiplex is ook voorzien van de juiste gegevens, welke zijn gevonden op internet.

Vervolgens is het model gesimuleerd door er een persoon van 150 kilogram op te laten zitten. Dit leidt tot een gewichtsverdeling over de stoel zelf, waarbij 75% van de 150 kilogram op het zitvlak zal komen, en 8%

5. Technische uitwerking

Model name: Chair
 Study name: 150kg Person(-Default-)
 Plot type: Static nodal stress Stress1
 Global value: 0.000522977 to 18.4114 N/mm² (MPa)



Figuur 41, maximale stress van 18 MPa

van 150 kilogram op de rugleuning. Deze gewichtsverdeling is afgeleid uit de afbeelding in de bijlage op pagina 24 en aan de hand van bronnen op het internet.

Op de afbeelding in figuur 41 is de maximale stress in Newton per vierkante millimeter¹ te zien van de complete stoel. De afbeelding in figuur 42 laat de maximale verplaatsing zien.

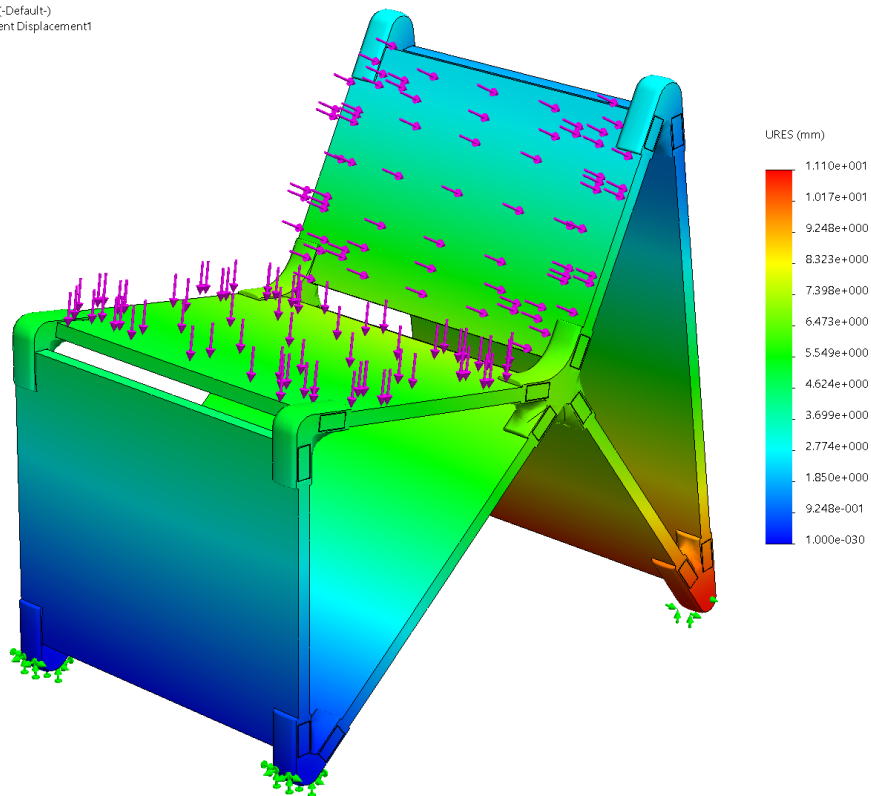
Uit deze resultaten is te concluderen dat de geprinte onderdelen een stress van ongeveer 2 a 3 MPa ondervinden, welke ruim onder het maximum zit. Het multiplex kan ook zonder problemen het gewicht dragen, en vertoont alleen wat meer stress rondom de verbinding met de geprinte delen doordat daar een zaagsnede in het materiaal is gemaakt. In figuur 43 is te zien waar deze spanning zich bevindt. Deze spanning is echter niet meer dan de maximale sterkte van het materiaal, welke op 31 MPa wordt geschat, en dus

toelaatbaar.

In de bijlage vanaf pagina 39 is de complete FEM analyse tot in detail weergegeven. Onder andere de stress in de afzonderlijke onderdelen en de veiligheidsfactor analyse zijn hier terug te vinden.

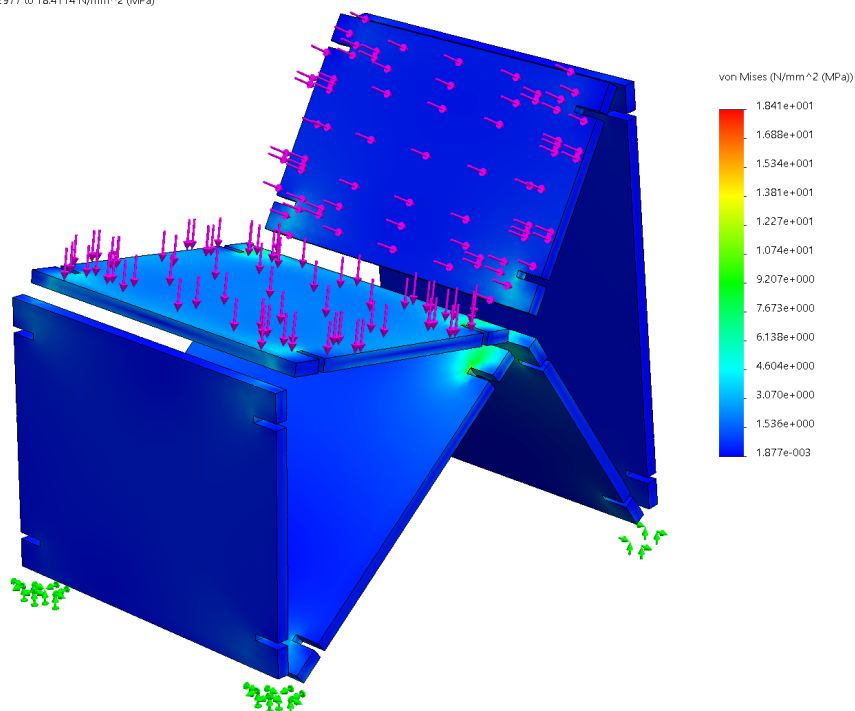
1. 1 MegaPascal (MPa) komt overeen met 1 Newton per vierkante millimeter (N/mm²).

Model name: Chair
Study name: Sitting 150kg(-Default-)
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 1



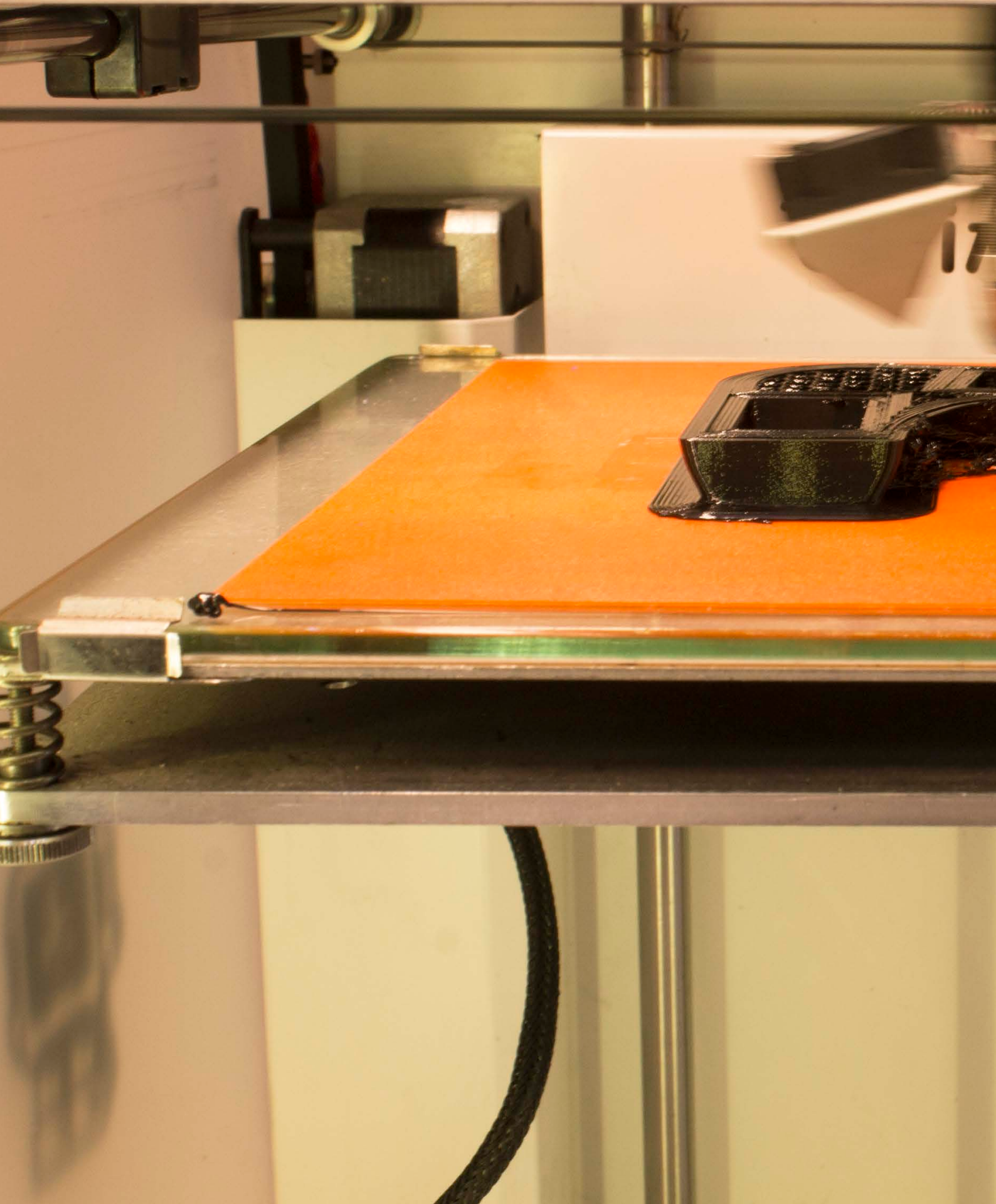
Figuur 42, maximale verplaatsing van 11 millimeter

Model name: Chair
Study name: 150kg Person(-Default-)
Plot type: Static nodal stress Stress1
Global value: 0.000522977 to 18.4114 N/mm² (MPa)

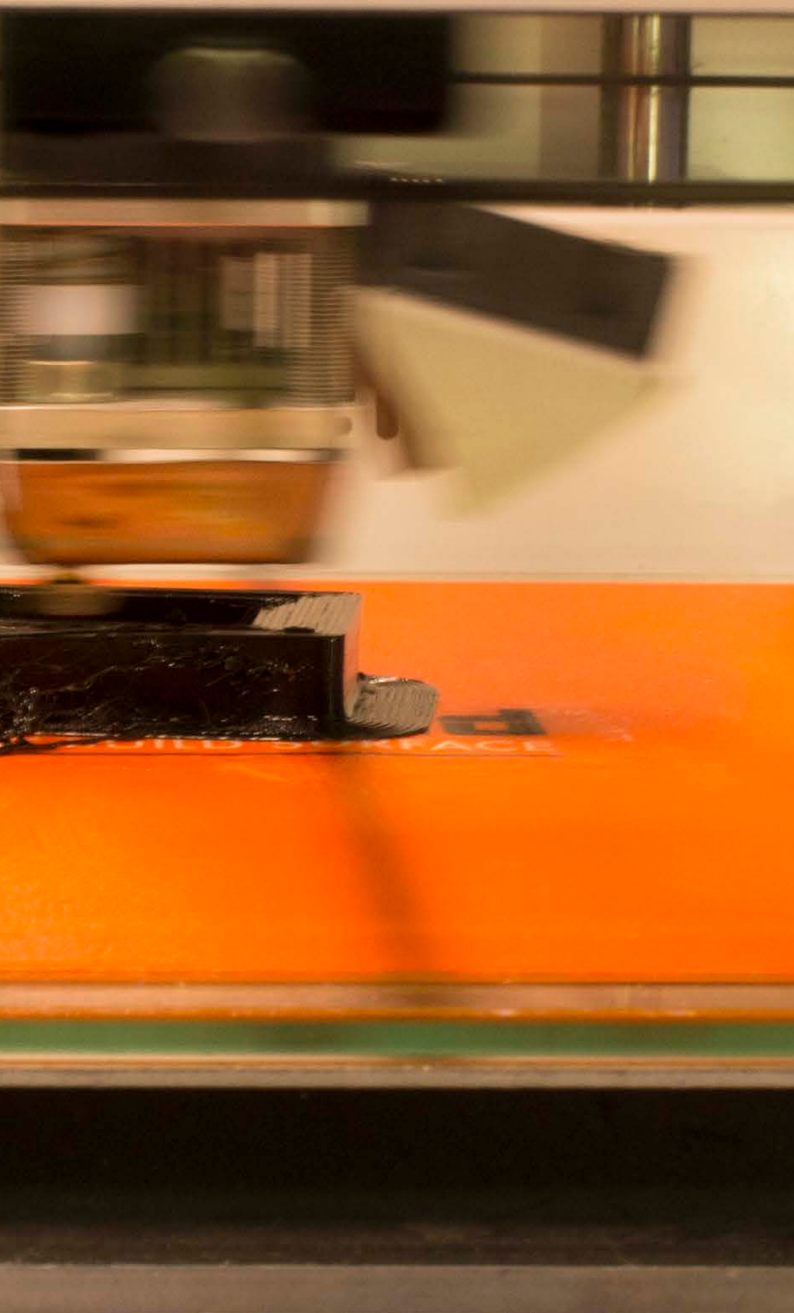


Figuur 43, de maximale spanning bevindt zich in het multiplex

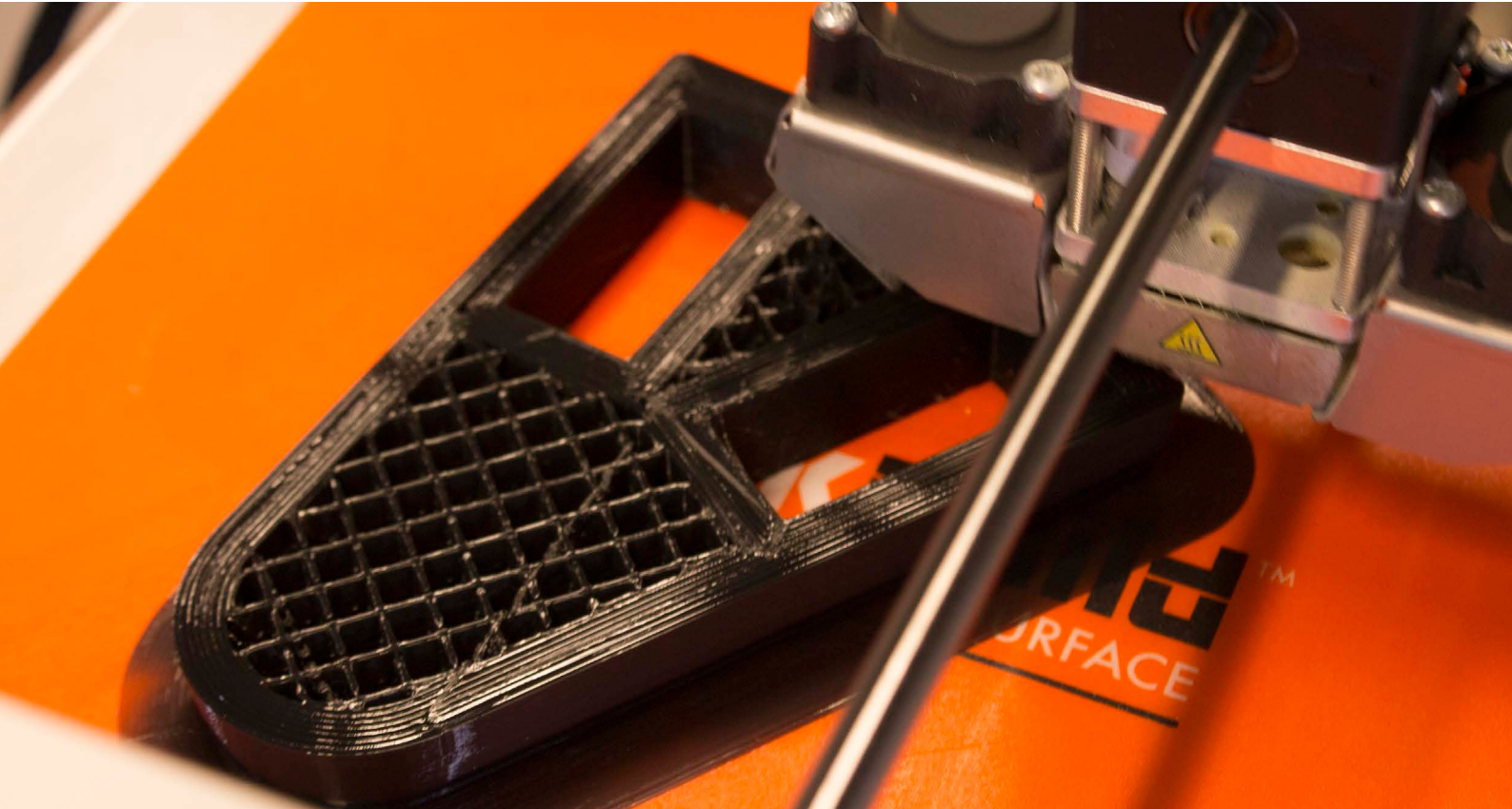
6. PRODUCTIE



In dit hoofdstuk wordt de uiteindelijke productie van de stoel verder besproken. Zo zal er kort worden beschreven hoe het printproces in zijn werk is gegaan, en hoe de uiteindelijke stoel in elkaar gezet is.



Figuur 44, 3D printen van een koppelstuk



Figuur 45, 3D printproces van een onderdeel met de infill nog zichtbaar

6.1 3D printen van de koppeldelen

De ontworpen koppeldelen zijn gerealiseerd met behulp van een tweetal Ultimaker 2+ 3D printers, welke beide voorzien zijn van LokBuild op de glasplaat voor een hoge bedadhesie. De onderdelen zijn vanuit SolidWorks geëxporteerd naar Simplify3D, waar ze met behulp van de software klaargemaakt zijn voor het printproces.

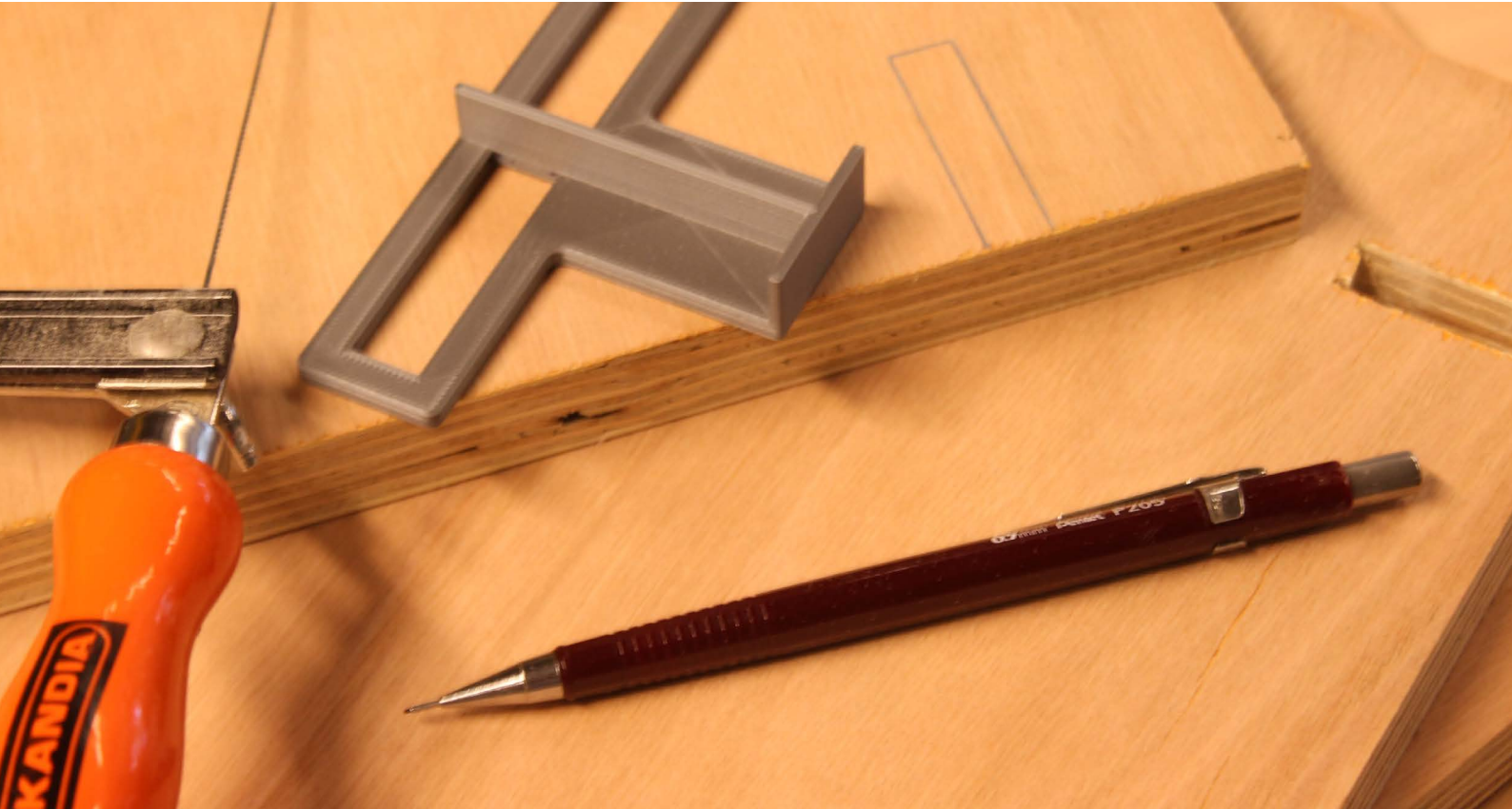
De onderdelen moeten een hoge sterkte hebben, waarom er gekozen is om met zo veel mogelijk perimeters te printen, zodat de polymeren in een lengterichting om het product liggen. Om ook de benodigde tijd per product te verkleinen is er geprint met een nozzle van 0,8 millimeter. Daarnaast hebben de onderdelen een maximale infill van 30%, zodat het materiaal efficiënt gebruikt wordt zonder de sterkte te benadelen. Doordat het nGen_FLEX veel krimp zal veroorzaken zijn

de onderdelengeprint met een bedtemperatuur van 100° Celsius, en de printers afgesloten om zo temperatuurinvloeden van buitenaf geen rol te laten spelen in het kromtrekken van het materiaal.

Na het printen zijn de onderdelen losgehaald van het printbed en nabewerkt. Het nabewerken houdt in dat overtollig materiaal op het product, en de support en brim worden verwijderd. Ook worden de onderdelen beoordeeld op eventuele warping, zodat koppeldelen die te veel zijn kromgetrokken niet gebruikt worden.

6.2 Zagen van de tussenpanelen

De tussenpanelen zijn gemaakt uit 18 millimeter dik Multiplex, wat bij de lokale bouwmarkt met behulp van de zaagservice



Figuur 46, aftekenen en zagen van het hout

op de juiste afmetingen is gezaagd. Elke plaat heeft op specifieke plaatsen inhammen nodig. Met behulp van een speciaal ontwikkelde aftekenhulp zijn de inhammen eerst per plaat gepositioneerd, waarna deze zijn gemaakt met een figuurzaag.

Nadat het zagen is afgerond zijn de houten panelen nabewerkt door met een stuk schuurpapier losse spanen en scherpe randen te verwijderen. Vervolgens zijn de houten panelen met een kleine korrelgrootte schuurpapier licht opgeschuurd, zodat de oppervlakte zachter aanvoelt. Tot slot zijn de houten panelen ingewreven met een standaard houtolie, om ze een donkere kleur te geven en het oppervlak te beschermen.

6.3 Assemblage

Na het maken van de afzonderlijke onderdelen van de stoel is er begonnen met

de assemblage van het product. De geprinte onderdelen passen in de zaagsneden van de houten panelen, en zijn zo ontworpen dat deze met de hand of een hamer op hun plaats gezet kunnen worden. Het materiaal zal door de lichte elasticiteit zichzelf laten vervormen en zo strak om het hout komen te zitten.

Doordat de insteek van het project draait om mensen die de stoel zelf thuis gaan maken met een 3D printer en een aantal spoelen filament is er ook een assemblage handleiding ontwikkeld. Deze zal samen met een beschrijving van de productie van de onderdelen gepubliceerd worden door colorFabb. Deze handleiding is terug te vinden in de bijlage op pagina 42.



Figuur 47, de stoel na het assembleren



7. EVALUATIE



A close-up photograph of a wooden handle, likely for a tool or weapon, featuring a black metal ferrule. The handle is made of light-colored wood with visible grain. The ferrule is a dark, textured metal band that encircles the handle. The background is a soft, out-of-focus gradient of light colors.

Dit hoofdstuk gaat over het complete proces van de afgelopen maanden. Hier wordt het geëvalueerd, om zo te kijken naar wat er goed ging, en waar er leermomenten zijn.

Figuur 48, detail van een koppelstuk

7. Evaluatie

7.1 Product

Aan het begin van het complete proces had ik zelf nog geen idee van hoe een zitobject van nGen_FLEX eruit kwam te zien, en hoe ik dit kon realiseren. Na veel geprint te hebben met het materiaal, en onderzoek te hebben gedaan naar de eigenschappen en sterkte van het materiaal is er uiteindelijk een product uitgekomen waar ik zelf erg tevreden over ben.

Nadat alle onderdelen gemaakt waren en de assemblage was afgerond was het natuurlijk tijd voor de eerste test van de stoel. En de stoel zelf is sterk genoeg. Inmiddels zijn er al een aantal mensen op gaan zitten, en de reacties zijn duidelijk; de stoel zit best wel goed.

Achteraf gezien heeft het veel nut gehad om de maatvoering van de stoel zelf niet zo maar op te stellen, maar met behulp van referentiemateriaal en ergonomische data te beargumenteren. Hierdoor is het eindproduct een stoel die niet alleen zelf te maken is, maar ook nog stevig genoeg is en comfortabel zit.

Natuurlijk zijn er een aantal verbeterpunten te vinden. Zo is nGen_FLEX vrijwel niet te printen zonder dat warping plaatsvindt. Om een perfect en strak resultaat te krijgen is het dus interessant om te kijken naar hoe deze warping tegengegaan kan worden, en of het niet opgenomen kan worden in de vormgeving van de verbindingdelen.

Een ander verbeterpunt is het maken van de inhammen in de houten onderdelen. Voor een perfect resultaat is het hier noodzakelijk dat de snedes aan de maat zijn en ook kaarsrecht zijn uitgevoerd voor een goede passing met de geprinte onderdelen. Daarom is het goed om te kijken naar hoe mensen zelf deze verbinding goed kunnen realiseren zonder eventuele fouten.

7.2 Proces

Het complete proces is grotendeels goed verlopen. Doordat ik aan het begin een duidelijke planning heb kunnen maken was het voor mijzelf mogelijk om het proces te sturen, en zaken op tijd af te ronden.

Vanaf het begin van de opdracht was het al duidelijk dat het een grote uitdaging zal gaan worden om met een vrijwel nieuw materiaal een compleet product te maken. Door te beginnen met het leren van 3D printen en de machines werd het mogelijk om zo het materiaal te leren kennen en te analyseren. Met behulp van verschillende testontwerpen en trekproeven kon zo nGen_FLEX compleet in kaart gebracht worden. Met behulp van deze trekproeven werd het mogelijk om een goede vergelijking op te stellen tussen de aangeleverde data en de gemeten waarden, wat vervolgens heeft geholpen met het doorrekenen van het complete ontwerp.

De tussentijdse feedback van zowel de bedrijfsbegeleider, de docent als de examinator hebben mij geholpen om het complete proces te blijven overzien, waardoor ik het beter kon sturen. Hierdoor werd het voor mij mogelijk om af en toe afstand te nemen van het geheel om zo bepaalde beslissingen of ideeën opnieuw te evalueren.

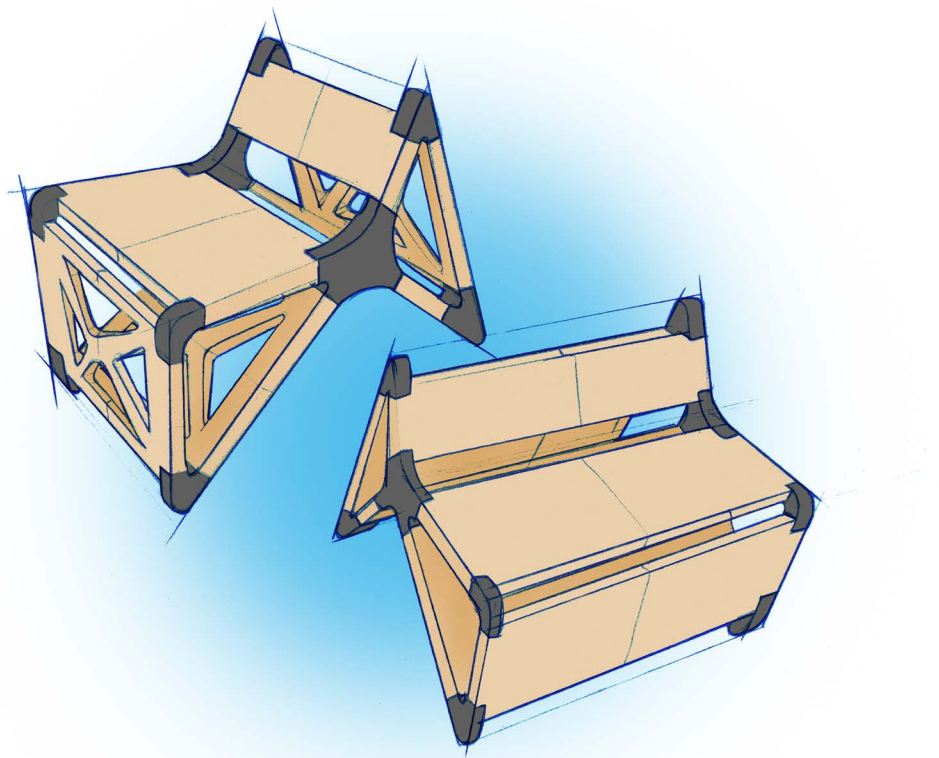
Toch blijven er een aantal aspecten soms nogal lastig voor mijzelf. Hier en daar merk ik dat ik niet altijd volledig achter mijn eigen keuzes sta, en dat eventuele tegenslagen in het proces deze onzekerheid vergroten. Hierdoor heb ik kunnen leren dat het soms beter is om gewoon door te blijven gaan met de plannen die gemaakt zijn, en niet te wachten tot een oplossing zich presenteert.

Kortom, het complete proces is erg leerzaam voor mij geweest. Doordat ik er bewust voor heb gekozen om een afstudeerstage te doen

colorFabb



Figuur 49, het eindresultaat



Figuur 50, een aantal voorstellen voor iteraties op de stoel

waarbij ik een compleet functioneel product van begin tot eind kon ontwerpen, waarbij de focus vooral lag op het daadwerkelijk maken van mijn ontwerpen, heeft het mij veel voldoening gegeven.

7.3 Aanbevelingen

Uit de evaluatie van het product zelf zijn een aantal verbeterpunten naar boven gekomen, welke meegenomen kunnen worden in een vervolgproject. Echter zijn er ook nog een aantal aspecten welke interessant kunnen zijn voor als mensen zelf de stoel maken. Op de schets in figuur 51 zijn een aantal van deze aspecten terug te zien.

Een van belangrijkste verbeterpunten is het ontwikkelen van een parametrisch ontwerp voor de houten tussenpanelen, zodat de gebruiker zelf de maatvoering kan instellen. Zo kan de gebruiker natuurlijk de houten

panelen qua maatvoering aanpassen aan zijn eigen eisen. Op deze manier wordt het mogelijk om de stoel voor elke gebruiker te maken. Hierbij moet er wel rekening gehouden worden met de sterkte van het hout, en hoe de gewichtsverdeling zal plaatsvinden. Ook wordt het mogelijk om de houten panelen anders vorm te geven, om ze zo lichter te maken of juist aan te passen aan persoonlijke voorkeur. Daarnaast is het ook mogelijk dat de houten panelen langer gemaakt worden om zo een bank of een ander soort zitobject te creëren.

Tot slot is het ook mogelijk dat gebruikers besluiten om delen van de stoel te stofferen, zodat het zitcomfort vergroot wordt.



Figuur 51. Stoel in gebruik

8. Bronnenlijst

8.1 Literatuurlijst

ASTM D638 99, *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. (1990), herziene versie van 1999: Gepubliceerd door ASTM International, West Conshohocken

ASTM D638 - 02a, *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. (2002), herziene versie van 2002: Gepubliceerd door ASTM International, West Conshohocken.

Daams B. (2011) *Productergonomie, ontwerpen voor nut, gebruik en beleving, deel 1*. Gepubliceerd door Uitgeverij Undesigning.

Daams B. (2013) *Productergonomie, ontwerpen voor nut, gebruik en beleving, deel 2a*. Gepubliceerd door Uitgeverij Undesigning.

Ion A. Fornhofen J. Wall L. Kovacs R. Alistar M. Lindsay J. (2016) *Metamaterial Mechanisms*. Gepubliceerd door Hassno Plattner Institute, Potsdam.

Lawson S. (2013) *Furniture Design, an introduction to development, materials and manufacturing*. Gepubliceerd door Laurence King Publishing, Londen.

8.2 Websites

<http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/>

<http://builder3dprinters.com/product-category/3d-printers/industrial-3d-printers/>

<http://colorfabb.com>

<http://colorfabb.com/Materials/>

<http://dined.io.tudelft.nl>

<http://learn.colorfabb.com/talk-talk-co-polyesters/>

<http://stacker3d.com/product/stacker-s4-industrial-3d-printer/>

<http://www.eastman.com/Products/Pages/ProductHome.aspx?Product=71100831&list=products>

<http://www.eastman.com/Products/Pages/ProductHome.aspx?Product=71104518&list=products>

<http://www.eastman.com/Products/Pages/ProductHome.aspx?Product=71104597&list=products>

<http://www.eastman.com/Products/Pages/ProductHome.aspx?Product=71107028&list=products>

<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=bd6620450973496ea2578c283e9fb807&ckck=1>

<http://www.rapidprototyping.nl/3d-printen/technieken/>

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3400220/>

8. Bronnenlijst

8.3 Afbeeldingsverantwoording

Figuur 1	Foto aangeleverd door colorFabb
Figuur 2	Logo beschikbaar gesteld door colorFabb
Figuur 3	Foto aangeleverd door colorFabb
Figuur 4	Foto gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 5	Visualisatie gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 6	Foto aangeleverd door colorFabb
Figuur 7	Foto aangeleverd door colorFabb
Figuur 8	http://media.bestofmicro.com/3/K/492608/original/form1-SLA.jpg
Figuur 9	Foto aangeleverd door colorFabb
Figuur 10	Foto aangeleverd door colorFabb
Figuur 11	Foto aangeleverd door colorFabb
Figuur 12	Foto gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 13	Foto aangeleverd door colorFabb
Figuur 14	Tabel gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 15	Foto gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 16	Tabel gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 17	Grafiek gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 18	Grafiek gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 19	Foto gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 20	Foto gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 21	Foto gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 22	Foto gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 23	https://lemanooosh.com/publication/httpdukta-com/ http://www.thingiverse.com/thing:2082638 http://lilianvandaal.com/wp-content/uploads/2012/03/bio01.jpg https://www.behance.net/gallery/8440379/JET-PACK https://twitter.com/STACKER_3D/status/826244742816157700/photo/1 https://www.behance.net/mariacichy http://www.alegredesign.es/tnk/
Figuur 24	https://ultimaker.com/photo/category/0x0/559e8b99ccff8/3d-printing-aerospace-application-plane-wing-ultimaker-2-extended.jpg http://unfold.be/assets/images/000/114/164/large-stratigraphicmanufactoryist-8.jpg http://3dprintingdatabase.org/sites/default/files/productos/alt-design-atom-02.jpg https://d2py9w124w2itd.cloudfront.net/img/software/Cura-Software-3D-Printing@2x.jpg
Figuur 25	Visualisatie gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 26	Schets gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 27	Foto gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 28	Schets gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 29	Schets gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 30	https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/5a/fc/69/5afc69f50af952288aa2ee2216428340.jpg

<https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/ec/43/3c/ec433c76df90efc5de19a67ce0ccc053.jpg>
<http://www.yankodesign.com/2016/12/19/diy-for-designers/>
<http://www.leolane.com/wp-content/uploads/2015/08/Tobias-Lugmeier-flush-3D-printed-connectors-detail.jpg>

- Figuur 31 Schets gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 32 Schets gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 33 Tabel gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 34 Foto gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 35 Foto gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 36 Tabel gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 37 Tabel gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 38 Foto gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 39 Technische tekening gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 40 Screenshot gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 41 Screenshot gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 42 Screenshot gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 43 Screenshot gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 44 Foto gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 45 Foto gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 46 Foto gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 47 Foto gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 48 Foto gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 49 Foto gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 50 Schets gemaakt door Niels van Valburg
Figuur 51 Foto gemaakt door Gijs Houdijk

9. Antiplagiaatverklaring



Verklaring m.b.t. originaliteit / antiplagiaatverklaring

Hierbij verklaar ik dat dit door mij ingeleverde rapport mijn eigen originele werk is en ik het zelfstandig en zonder gebruik van andere dan de toegestane en door mij aangegeven bronnen en hulpmiddelen heb gemaakt.

Het rapport is niet, geheel of gedeeltelijk, geschreven door een ander dan wel geheel of gedeeltelijk overgenomen uit andermans werk.

Alle passages in het rapport die ik letterlijk of inhoudelijk uit gepubliceerde en niet gepubliceerde teksten heb overgenomen, zijn kenbaar gemaakt door middel van bronvermeldingen in de tekst en in de literatuurlijst.

Ik ben mij ervan bewust dat plagiaat zal leiden tot het ongeldig zijn van de beoordeling van dit afstudeerverslag en dat, indien er sprake is van plagiaat, er maatregelen/sancties zullen volgen¹.

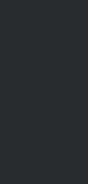
Naam: **Niels van Valburg**

Handtekening:

Plaats /datum /jaar: **Belfeld / 13 Juni / 2017:**

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Niels van Valburg", written over a horizontal line.

¹ Zie ook het fraudebeleid onder https://portal.fontys.nl/instituten/tbm/students/examination_board/Beleidsdocumenten/FHTenL%20Fraudebeleid.pdf



AMPHORA
by Eastman

