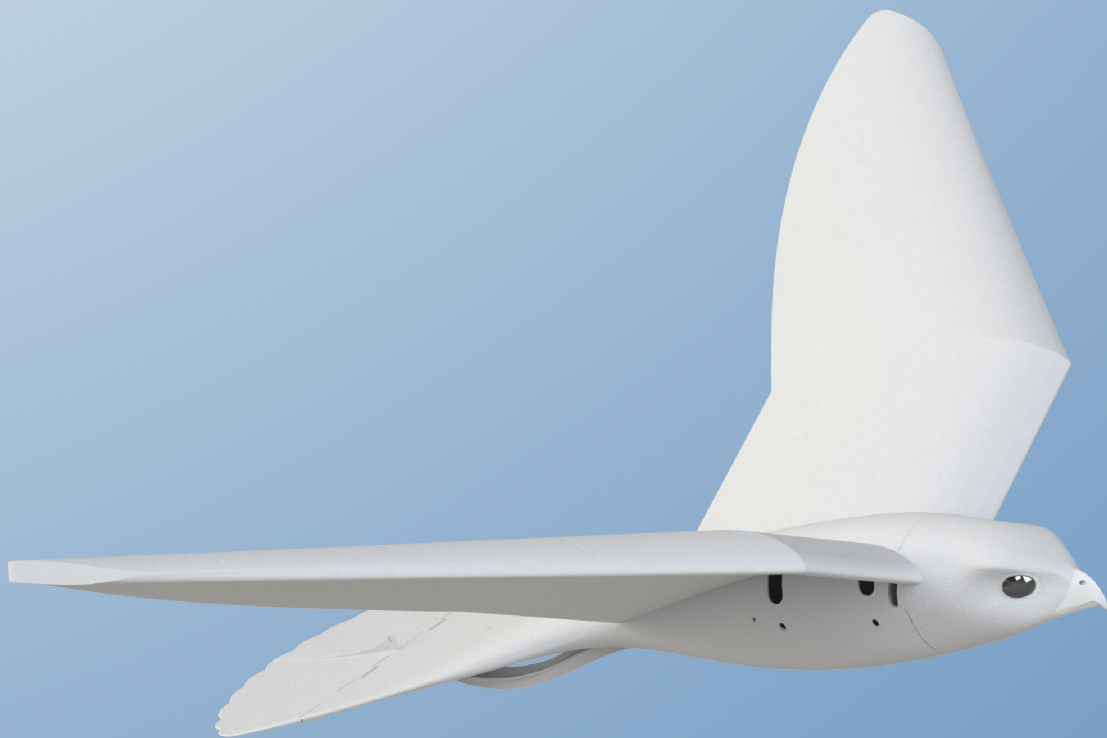


Het ontwerpen en
optimaliseren van de
Robird Peregrine Falcon
productie romp



ROBBERT DE VRIES

Opdracht: Het ontwerpen en optimaliseren van de Robird Peregrine Falcon productie romp

Student: *Robbert de Vries, s0203661*

Opleiding: *Industrieel Ontwerpen*

Examendatum: *12-07-13*

Examencommissie: *Nico Nijenhuis, Tom Vaneker, Bert Geijselaers*

Inleiding

Op bepaalde plekken in de wereld is veel overlast van vogels. Denk bijvoorbeeld aan viskwekerijen waar vogels de vissen uit het water vissen. Gelukkig hebben deze vogels een natuurlijke vijand: de roofvogel. De roofvogel staat boven aan de voedselketen en zorgt voor een goede balans. Deze natuurlijke vijand is een reden dat vogels vluchten. Dit feit valt goed te gebruiken bij overlast.

De oplossing voor de overlast is een op afstand bestuurbare vogel. Een robot die er niet alleen uit ziet als een vogel, maar ook dezelfde vliegtechniek gebruikt. Door het realisme van deze robot roofvogel vluchten andere vogels en daarmee verdwijnt de overlast. Deze 'Robotic Bird', genaamd de Robird, wordt ontwikkelt door Clear Flight Solutions.

Wat de Robird uniek maakt, is de manier van vliegen. Door gebruik te maken van een slagvlucht weet de Robird een snelheid van wel 80 km/u te behalen. De manier van vliegen en het silhouet zorgen ervoor dat andere vogels voor de Robird vluchten.

Dit verslag beschrijft de ontwikkeling van een produceerbaar product van de Robird Peregrine Falcon, met een analyse van het huidige model; een onderzoek naar de eigenschappen van 3D geprinte materialen; een volledig in 3D gemodelleerd detail herontwerp en de daadwerkelijke productie van een nieuwe Robird.

Inhoudsopgave

Samenvatting	5	DETAILLERING	
Clear Flight Solutions	6	Crash	36
Robird	7	Koppelstuk: kop en body	38
		Koppelstuk: body en staart	40
		Koppelstuk: staartscharnier	41
VOORONDERZOEK		Limitaties 3D printen	44
Prototype	8	Lichtgewicht 3D printen	45
Stakeholders	10	Lichtgewicht staart	46
Gebruiksgemak	11	Ribben	48
Probleem- & Doelstelling	12		
Opdracht kader	13	MODELLERING	
Deelvragen	15	Model #1	50
Programma van Eisen	16	Model #2	53
3D Printen	17	Sealing	55
		Staartservo	56
MATERIAALONDERZOEK		Bedrading in ruggenmerg	57
Materialen	18	Aerodynamisch voordeel	58
Materiaalonderzoek	19	Model #3	59
Trekproef opzet	20		
Trekproefresultaten	21	EVALUATIE	
Breukproef opzet	25	Levensduuranalyse	62
Breukproefresultaten	26	Conclusie	64
Materiaalresultaten	29	Aanbevelingen	65
VORMONDERZOEK			
Vormstudie	30		
Modellering basisvorm	32		
Indeling	33		
Stroomschema	34		
Opdeling	35		

Samenvatting

De Robird romp moet produceerbaar worden door middel van 3D printen. De printmethode en het te printen materiaal zijn echter onbekend. De romp lijkt niet op die van een echte slechtvalk. Handelingen als assemblage en onderhoud zijn bij het prototype zeer tijdrovend.

Het doel is om de romp produceerbaar te maken. Hiervoor is gekeken naar de meest geschikte 3D print techniek. Aan de hand van een materiaalonderzoek is een materiaal gekozen waarbij de verhouding tussen licht, sterk en stugheid het best is. Om een zo'n realistisch mogelijke, dunwandige, romp te printen, is de romp volledig geparametriseerd in SolidWorks. Voor het vereenvoudigen van zowel de assemblage als het onderhoud is gekeken naar de onderdelen in de romp en de mogelijke opdeling van de romp. Er is geanalyseerd hoe de Robird kan crashen om hier de juiste constructie op af te stemmen en het gebruiksgemak te verbeteren door een schroefloze verbinding. Door optimalisatie van het algehele realisme en daarmee de aerodynamische vorm genereert de romp meer lift dan het prototype en zo zijn ook de vlieg prestaties van de Robird verbeterd.

De romp is drie maal iteratief geprint om tot het gewenste resultaat te komen: een 3D geprinte romp.

Clear Flight Solutions

Clear Flight Solutions is het bedrijf achter de Robird en richt zich op de ontwikkeling en toepassing hiervan. De Robird dient in eerste instantie als oplossing bij overlast van vogels zoals op vliegvelden, maar gaandeweg komen steeds meer toepassingen boven water, zoals afvalverwerking, viskwekerijen en de agrarische sector.

Clear Flight Solutions wil de Robird commercieel op de markt zetten. Tot op heden zijn er enkel handgemaakte prototypes; dit is een tijdrovend proces. Het is noodzakelijk om te kijken hoe deze op grotere schaal geproduceerd kunnen worden.

Het bedrijf werkt op dit moment nauw samen met bedrijven als de Universiteit Twente, 3D Print Company, Ten Heggeler en Tegema om tot een concreet product te komen. Hierbij zijn verschillende investeerders en subsidies aangetrokken om het geheel financieel te ondersteunen.



Robird

De Robird is een robot vogel die dezelfde vliegtechniek gebruikt als echte vogels. Deze techniek is door jaren van 'trial-and-error' uitgevonden. De kracht van het ontwerp zit hem in de eenvoud: geen onnodige scharnieren die de perfecte slagvlucht van een vogel zou nabootsen (Festo SmartBird¹); het gaat om de vliegperformance. Het allereerste model leek op een vliegtuig met bewegende vleugels, maar door de jaren heen is dit steeds meer geoptimaliseerd tot de Robird van nu (figuur 1).



figuur 1

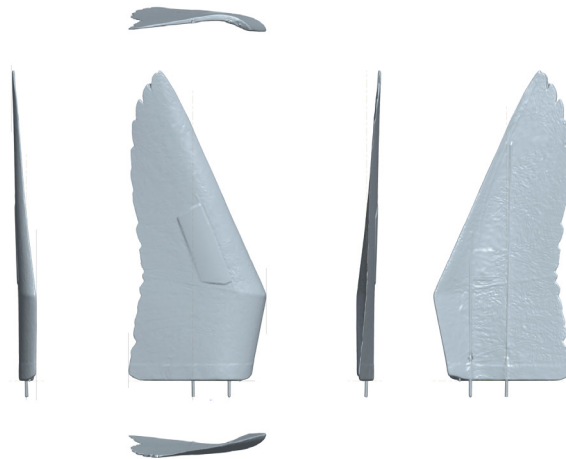
1 - http://www.festo.com/cms/en_corp/11369.htm

Prototype

Het huidige prototype (figuur 1) bestaat uit een groot aantal onderdelen waarbij de Robird is op te delen in twee segmenten, een statisch en een dynamisch segment.

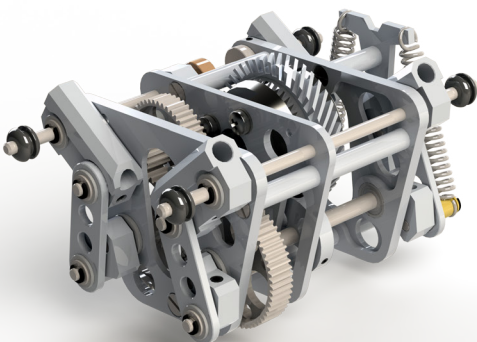
Dynamisch Segment

Het 'Dynamisch Segment' bestaat uit het mechaniek (figuur 3) met daaraan de vleugels (figuur 2). Dit is het deel dat daadwerkelijk vliegt, waarbij de onderdelen in beweging zijn. De romp doet dit niet. Het mechaniek hangt met 2 assen aan 4 punten binnen de romp. Dit is de verbinding tussen de twee segmenten.



figuur 2

De vleugels hangen zelf elk met twee pinnen in het mechaniek. Er worden twee pinnen gebruikt om een graden fase verschil te realiseren in de vleugel. De vleugel is gemaakt van EPP (Expanded Polypropylene). Dit materiaal is zeer licht en flexibel. In combinatie met het faseverschil zorgt dit voor de haalbare slagvlucht. In de vleugel zit een lichtgewicht servomotor (4.7 gram) die het scharnierende rolroer open en dicht kan doen dat weerstand genereerd, ter draaiing om de lang-as, ter sturing.



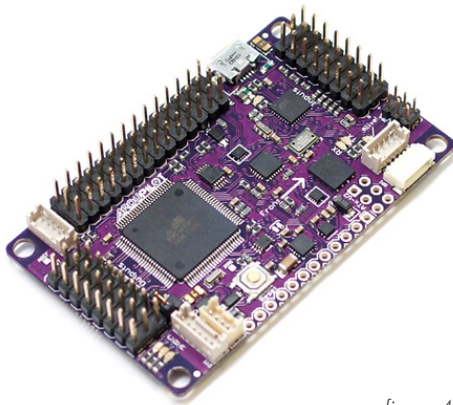
figuur 3

Het mechaniek levert door middel van een compacte maar krachtige handgemaakte elektromotor een naderende sinusoïde beweging ten opzichte van de schouders (hier worden de vleugelpinnen in bevestigd). Deze beweging is geen exacte sinusoïde, omdat een versnelling gewenst is in de neerwaartse richting. Dit wordt mede gerealiseerd door het gebruik van veren die energie opslaan bij de opwaartse slag.

Statisch Segment

Het 'Statisch Segment' omvat de romp (figuur 5) met de elektronica. De romp zorgt voor stabilisatie tijdens de vlucht door een relatief groot staartvlak. Dit staartvlak, deels het hoogteroer, wordt aangestuurd door een servomotor.

De elektronica wordt steeds belangrijker. Eerst was de voornaamste functie van de Robird vliegen. Dit is steeds meer voor de hand liggend en nu wordt gekeken naar de toepassingen en de daarbij behorende randapparatuur van de Robird. Zo wordt er gebruik gemaakt van een Ardupilot (figuur 4), met ingebouwde 3-assige accelerometer, gyroscoop, kompas en een directe ingang heeft voor een GPS-systeem.



figuur 4



figuur 5

Door middel van een radioverbinding wordt de Robird aangestuurd. Om al deze elektronica van stroom te voorzien, zit een 3-cellen LiPo (Lithium Polymeer) batterij in de kop van de Robird.

Stakeholders

Producent

De Robird romp wordt 3D geprint door een 3D print bedrijf. Hierbij ziet een 3D print bedrijf graag dat het te printen model niet veel ruimte in zal nemen in de print bak, door bijvoorbeeld het in elkaar plaatsen van onderdelen.

Assemblage

Het model wordt door Clear Flight Solutions geassembleerd. Dit zal snel en gemakkelijk moeten worden.

Gebruikers

De groep gebruikers is een grote en uiteenlopende groep, van defensie tot vliegvelden tot afvalverwerkers en mogelijk hobbyisten. Hierbij is het ook nog eens mogelijk dat Clear Flight Solutions een piloot met de vogel mee levert. Gebruikers zien graag een realistische vogel, waarbij de vorm de romp zal bijdragen aan het algehele silhouet van de Robird ter afschrikking van andere vogels.

Onderhoud

Clear Flight Solutions zal onderhoud in eigen huis doen, door een eigen monteur. De monteur wil hierbij de mogelijkheid snel en gemakkelijk elk onderdeel te kunnen vervangen.

Gebruiksgemak

Het gemak in gebruik is deelbaar in drie groepen. In eerste instantie zal het model geassembleerd moeten worden. Vervolgens moet het mogelijk blijven om onderhoud uit te kunnen voeren. Daarnaast is de eindgebruiker de daadwerkelijke persoon die het gemak in gebruik zal moeten ervaren.

Assemblage

De romp bestaat uit een groot aantal onderdelen. Het assembleren van het prototype kost veel tijd. Clear Flight Solutions wil de romp laten printen, om zo ook de assemblage te verbeteren.

Onderhoud

Het onderhoud wordt door Clear Flight Solutions zelfs uitgevoerd. In het prototype moet bij vervanging van een onderdeel alles uit elkaar geschroefd worden. Dit is een tijdrovend proces dat verbeterd moet worden.

Eindgebruiker

Bij gebruik zal de gebruiker de batterij regelmatig vervangen. Dit proces moet dan ook eenvoudig verlopen.

Opdracht kader

Deze opdracht focust zich op de romp van de Robird. De romp is bij het huidige prototype nog met de hand gemaakt door middel van een mal en glasvezelmatjes. Dit proces kost veel tijd en Clear Flight Solutions zou graag zien dat dit geautomatiseerd wordt.

De vleugels worden nu ook nog met de hand gemaakt, maar vanwege het ontbreken van kennis van de reden waarom de Robird kan vliegen (met behulp van slagvlucht), is het niet verstandig om meerdere factoren tegelijkertijd te veranderen.

In eerste instantie zal de Robird slechts op kleine schaal geproduceerd gaan worden. Voor het produceren van een spuitgietmal is nu nog geen geld. Voor de automatisering is daarom gekozen voor 3D printen. 3D printtechnieken geven de mogelijkheid tot een optimalisatie van het ontwerp.

Ten eerste al om de romp realistischer te laten lijken. De kop kan realistisch geprint worden en ook de staart kan vloeiend uit de romp gevormd worden. Dit is vooral commercieel-technisch belangrijk. Clear Flight Solutions wil het op de markt brengen en hoe realistischer de vogel lijkt, des te beter deze verkoopt.

Daarnaast geeft het printen natuurlijk ook andere mogelijkheden. De romp kan nu met een groot scala aan materialen geprint worden. Het is dan ook nodig om te kijken welk materiaal het meest geschikt is voor het printen van een zo licht en sterk mogelijke romp. Hier zullen constructie-technische oplossingen aan bijdragen ter realisatie.

Vervolgens geeft het 3D printen mogelijkheden tot een optimalisatie van het assemblageproces. Nu moeten alle elektronica en het mechaniek via de kop geplaatst worden. Bij een elektronisch defect moet dan dus eerst alles verwijderd worden, wat veel tijd kost.

Tijdens het ontwerp moet goed rekening gehouden worden met de techniek die in de romp geplaatst wordt. Parallel aan het herontwerp van de romp vinden er op andere gebieden ook veranderingen plaats.

Probleem- & Doelstelling

Probleemstelling

De romp moet geproduceerd worden door middel van 3D printen. De printmethode en het te printen materiaal zijn onbekend. De vorm van de romp lijkt niet op een slechtvalk. Assemblage en onderhoud zijn bij het prototype zeer tijdrovend.

Doelstelling

Het doel is om de romp van de Robird produceerbaar te maken. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de meest geschikte 3D printtechniek; een materiaal waarbij de verhouding tussen licht, sterk en stugheid het best is; een zo'n realistisch mogelijke romp die ook de vliegperformance verbetert door het genereren van lift; het reduceren van schade bij een crash door het analyseren van de crashmogelijkheden; vereenvoudiging van assemblage en onderhoud door opdeling van de romp; verbeteren van het gebruiksgemak.

Deelvragen

Welke printtechniek is het meest geschikt voor de romp?

Welke printtechnieken zijn er?

Welke eisen en wensen worden er aan de romp gesteld?

Welk materiaal is geschikt voor de romp?

Welke eisen worden er aan het materiaal gesteld?

Welke materialen zijn beschikbaar om te printen?

Welke vorm moet de romp krijgen?

Hoe ziet een slechtvalk eruit?

Hoe ziet het prototype eruit?

Welke onderdelen zitten in de romp?

Hoe kan de romp zo licht en sterk mogelijk gemaakt worden?

Welke constructies zijn licht en sterk?

Hoe kan schade beperkt worden bij een crash?

Hoe zal de Robird crashen?

Hoe kan het gebruiksgemak van de Robird verbeterd worden?

Hoe wordt het prototype gebruikt?

Hoe kan de assemblage van de romp verbeterd worden?

Hoe wordt het prototype geassembleerd?

Welke onderdelen worden er assembleerd?

Hoe kan het onderhoud bij de romp vereenvoudigd worden?

Welke onderdelen vragen om onderhoud?

Programma van Eisen

Clear Flight Solutions heeft een aantal belangrijke eisen aan de nieuwe romp, met daarbij een factor voor hoe belangrijk deze is. Deze factor is bepaald in overleg met Clear Flight Solutions. Zo is een harde eis dat de Robird licht genoeg blijft om te kunnen vliegen.

EISEN	#
De romp moet produceerbaar zijn m.b.h. 3D printen.	5
De romp moet ten minste 1000 vliegreizen kunnen doorstaan.	3
De romp moet crashbestendig zijn.	4
Assemblage moet makkelijker worden dan bij het prototype.	4
De vogel in totaal mag niet meer dan 750 gram wegen. (De romp niet meer dan 150 gram.)	5
Onderhoud moet makkelijker worden dan bij het prototype.	3
Algemeen gebruik (vervanging batterij) moet makkelijker worden dan bij het prototype.	3
De romp moet van een licht maar sterk materiaal gemaakt worden.	4

WENSEN	#
De romp moet zo realistisch mogelijk zijn.	4
De romp mag niet teveel afwijken van het prototype.	3
De romp verbetert de vlieg performance.	4

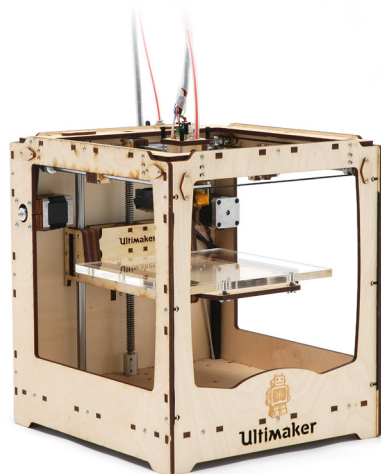
De waarderingen zijn bepaald a.d.h.v. gesprekken met Clear Flight Solutions.

3D printen

Om de romp te maken is gekozen voor de 3D printen. Dit is niet de enige methode, maar het valt wel binnen de filosofie en het budget van Clear Flight Solutions. Printen geeft meer vormgevingsvrijheid dan bij bijvoorbeeld spuitgieten. De romp hoeft namelijk niet lossend te zijn en deze kan dus in zijn geheel geprint worden. Binnen het 3D printen zijn een aantal vooraanstaande technieken voor kunststoffen:

1. *Fused Deposition Modeling*

Een veel gebruikte techniek is fused deposition modeling² (FDM). Hierbij wordt draad aan elkaar gesmolten. In principe kan elke thermoplast gebruikt worden, maar een veel voorkomend materiaal bij FDM is acrylonitril-butadien-styreen (ABS). FDM is een sterke methode waarbij de nauwkeurigheid afhangt van de draaddikte. Er zijn wel vormtechnische restricties; door de stapelende versmeltingstechniek van draad bij FDM vermindert de sterkte van de onderlinge lagen, afhankelijk van de hoek. De techniek wordt vooral gebruikt voor prototyping, kleine producties en thuisgebruik. Verschillende instanties (o.a. RepRap en Ultimaker, figuur 6) hebben deze techniek al naar de particuliere markt gebracht in de vorm van een zelfbouw 3D printer.



figuur 6

2. *Selective Laser Sintering*

Bij selective laser sintering³ (SLS) wordt gebruikt van een poeder. Dit poeder wordt versmolten met een laser (gestuurd door een prisma) waardoor (afhankelijk van het te sinteren materiaal) een theoretische dichtheid van 100% kan worden behaald (dit uit zich in waterdicht printen). Hierbij is ook een zeer hoge nauwkeurigheid mogelijk,

afhankelijk van het detail van de laser, de grote van de poeder korrels en verplaatsing in de hoogte. SLS wordt gebruikt voor functionele onderdelen en prototyping. Het enige echte nadeel van SLS zijn de kosten. Machines voor laser sinteren (figuur 7) kosten al snel 100.000 euro. Hierdoor liggen de productiekosten hoog en is SLS nog niet geschikt voor particulier gebruik.



figuur 7

3. Binder Jetting

Tot slot is er nog een methode waarbij een fijn poeder wordt gebruikt om te printen. Hierbij worden er telkens lagen op elkaar gelijmd. Het voordeel van deze methode is dat het proces snel gaat. Elke laagje dat geprint wordt is als een velletje papier bij een inkjetprinter. Het nadeel is echter dat deze methode alleen geschikt is voor zichtmodellen. Het model wordt minder sterk dan bij de andere methoden.

Het is pas achteraf duidelijk hoe sterk de Robird daadwerkelijk moet zijn, dus is er gekozen voor SLS. Dit geeft tevens de hoogste nauwkeurigheid en kwaliteit en er zijn meer meerdere materialen mogelijk dan bij FDM.

2 - http://nl.wikipedia.org/wiki/fused_deposition_modeling

3 - http://nl.wikipedia.org/wiki/selective_laser_sintering

Materialen

Er is gekozen voor Selective Laser Sintering (SLS) om de Robird 3D printen. Deze techniek heeft als voordeel dat er veel meer ontwerpmogelijkheden en materialen mogelijk zijn. Er is echter weinig bruikbare informatie bekend over de materialen die hierbij gebruikt worden. Op dit moment wordt 3D printen voor een overgroot deel gebruikt om proefmodellen te maken.

De Robird daarentegen, stelt hoge eisen aan het materiaal. Zo mag de Robird niet stuk gaan bij een (slechte) landing, maar moet de Robird wel licht genoeg blijven om inclusief alle elektromechanica binnen de 750 gram te blijven. Dit gewicht is bepaald door middel van testvluchten met de Robird, waarbij gewicht toegevoegd is tot deze niet meer goed vloog.

De onderstaande materialen zijn het meest geschikt om de Robird in te printen. Anderen worden al snel te zwaar of hebben naar verwachting niet voldoende sterkte. De benodigde sterkte is nog niet bekend.

- PA2200 (Nylon, datasheet in bijlage A)
- PA3200 (Nylon met glasvezel, datasheet in bijlage B)
- Duraform EX (datasheet in bijlage C)

	PA2200	PA3200	Duraform EX
<i>weight (kg/m³)</i>	930	1220	1010
<i>tensile modulus (MPa)</i>	1700	2500-3200	1517
<i>tensile strength (MPa)</i>	48	47-51	48
<i>strain (%)</i>	24	9	47
<i>flexural modulus (MPa)</i>	1500	2900	1310

tabel 1

In tabel 1 staat een overzicht van een aantal belangrijke materiaaleigenschappen. Elk materiaal heeft zijn eigen 'kwaliteit'. PA2200 is licht, PA3200 is sterk en Duraform EX valt in de tabel het meest op met zijn strain van wel 47%. PA3200 is dan wel zwaarder dan PA2200, maar de verhouding tussen gewicht en sterkte is in het voordeel van PA3200.

Materiaal onderzoek

Om meer te weten te komen over de materialen waarmee geprint gaat worden, zijn hier testen voor uitgevoerd. Vanwege het tijdsbestek is gekozen voor twee testen die iets kunnen zeggen over de variabele eigenschappen van het materiaal. Bij SLS wordt geprint door middel van lagen poeder. Dit wordt versmolten. Er is te verwachten dat de materiaaleigenschappen zeer verschillend zijn, afhankelijk van de print richting en printlocatie⁴. Door de inhomogene verdeling van temperatuur⁵ bij SLS is dit te verklaren.

Bij het printen van de proefstukken is direct al rekening gehouden met waar in de bak de geprinte stukken geplaatst moesten worden. In principe is de directe locatie in eerste instantie minder relevant, maar wel dat alle onderdelen zo dicht mogelijk bij elkaar geplaatst zijn om een zo klein mogelijke foutmarge te creëren.

Om wat meer te kunnen zeggen over het materiaal is besloten om een trekproef en een breukproef uit te voeren.

Trekproef

De trekproef is opgezet om te kijken in hoeverre het materiaal verschilt van eigenschappen, afhankelijk van de printrichting en printlocatie. Daarnaast is het goed om deze waarden te vergelijken met de gegeven datasheet. Een relatief grote afwijking in deze waarden kan duiden op grote verschillen bij anderen, maar ook verschillen binnen positie in de bak.

Breukproef

De breukproef is opgezet om te onderzoeken in hoeverre en bij welke omstandigheden een klein scheurtje groter kan worden. Het is wenselijk om te weten wanneer hier grote verschillen of afwijkingen in zitten.

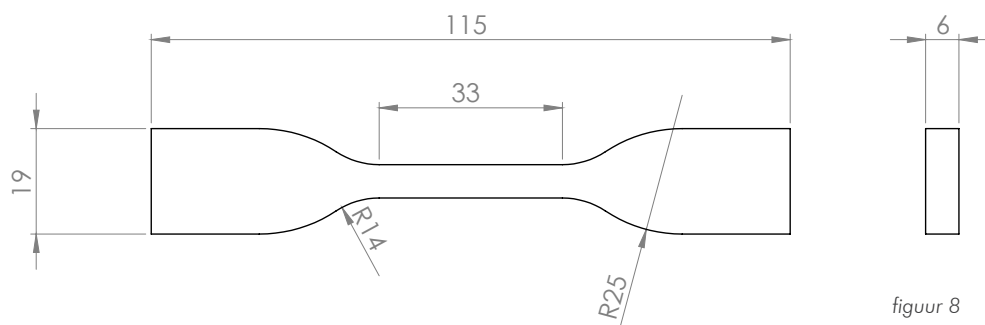
Aan de hand van deze twee testen is er meer duidelijk over hoe materialen die met SLS geprint worden, reageren aan de hand van de printrichting en -locatie.

4 - utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsArchive/pubs/Manuscripts/2011/2011-30-Wegner.pdf

5 - utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsArchive/pubs/Manuscripts/2000/2000-37-Shen.pdf

Trekproef opzet

De trekproeven zijn uitgevoerd op de Universiteit Twente in het materiaalonderzoeklab, onder de norm D 638 - 03. Hierbij is gebruik gemaakt van het geometrische type IV (figuur 8). Bij het printen is rekening gehouden met de printrichting. De verwachting is dat hier grote verschillen zullen opkomen.



figuur 8

Om de metingen uit te voeren, is gebruik gemaakt van een Zwicki-line model (figuur 9), met krachtsensoren van 5kN. Het proefstuk (figuur 10) wordt ingeklemd in het systeem waarna de uitrekking met een snelheid van 2mm per minuut uitgevoerd wordt. De krachtsensoren meten de kracht op het proefstuk.



figuur 10

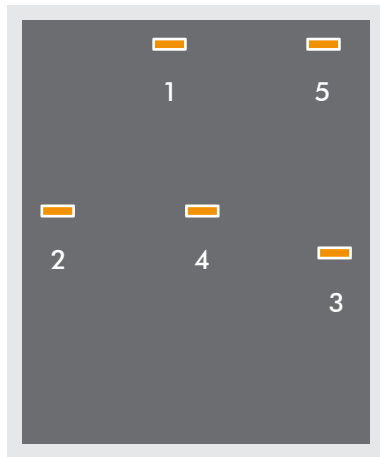
De proef is uitgevoerd met tien proefstukken van PA2200. Hierbij zijn vijf liggend geprint en vijf staand. Dit verschil is waarschijnlijk heel groot door de printmethode, waarbij de laser beter in staat is een vlak aan elkaar te smelten ten opzichte van lagen. Vanwege hoge printkosten en de lange levertijd bij de andere materialen is de proef enkel uitgevoerd met PA2200.



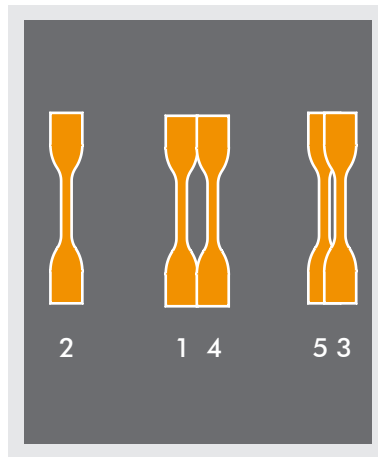
figuur 9

Trekproefresultaten

Uit de trekproef is gebleken dat het materiaal PA2200 zeer groot verschilt in de sterkte, afhankelijk van de printrichting. De materiaalwaarden die in eerste instantie aangegeven zijn, komen dan ook meer overeen met de beste waarden uit de trekproefresultaten.

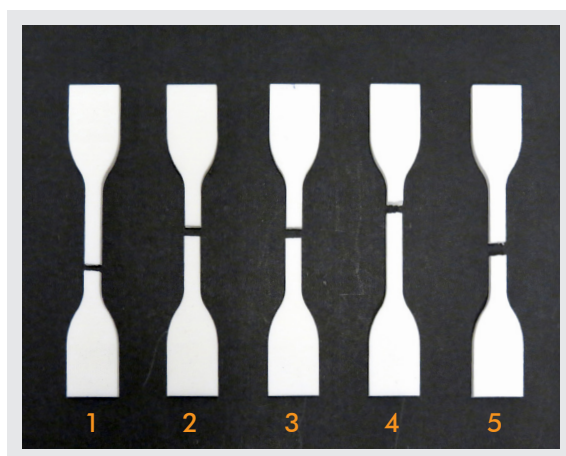


bovenaanzicht, figuur 11

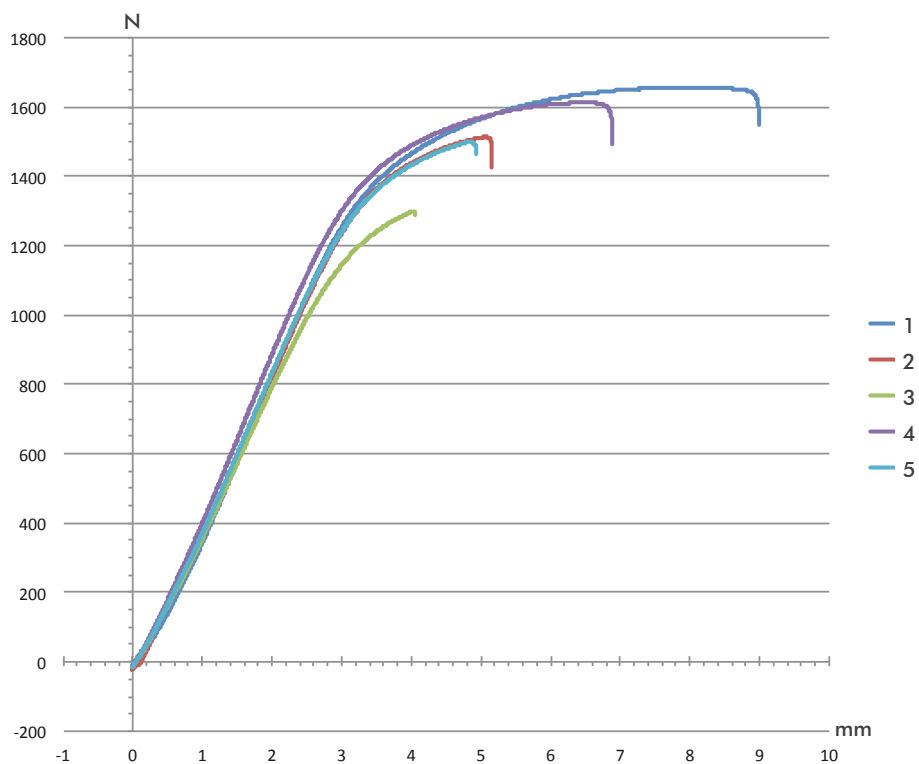


zijaaanzicht, figuur 12

De trekproef is eerst uitgevoerd met teststukken die in de hoogte-richting zijn geprint. Dit resulteert in variërende resultaten, in zowel de rek- als de treksterkte (figuur 14). Hier moet wel bij meegenomen worden dat niet alle trekstukken dicht bij elkaar geprint zijn (bovenaanzicht, figuur 11 en zijaaanzicht, figuur 12). Dus dit zal ook zeker mee hebben geholpen met de resultaten.

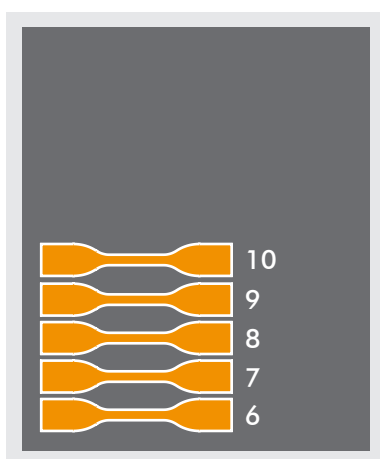


figuur 13

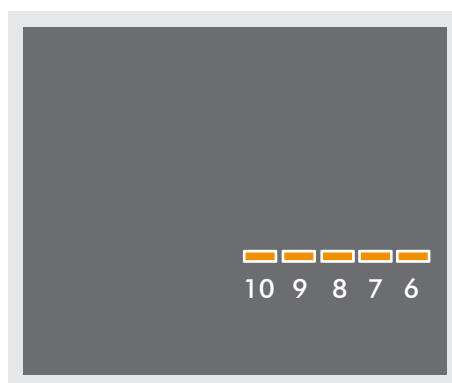


figuur 14

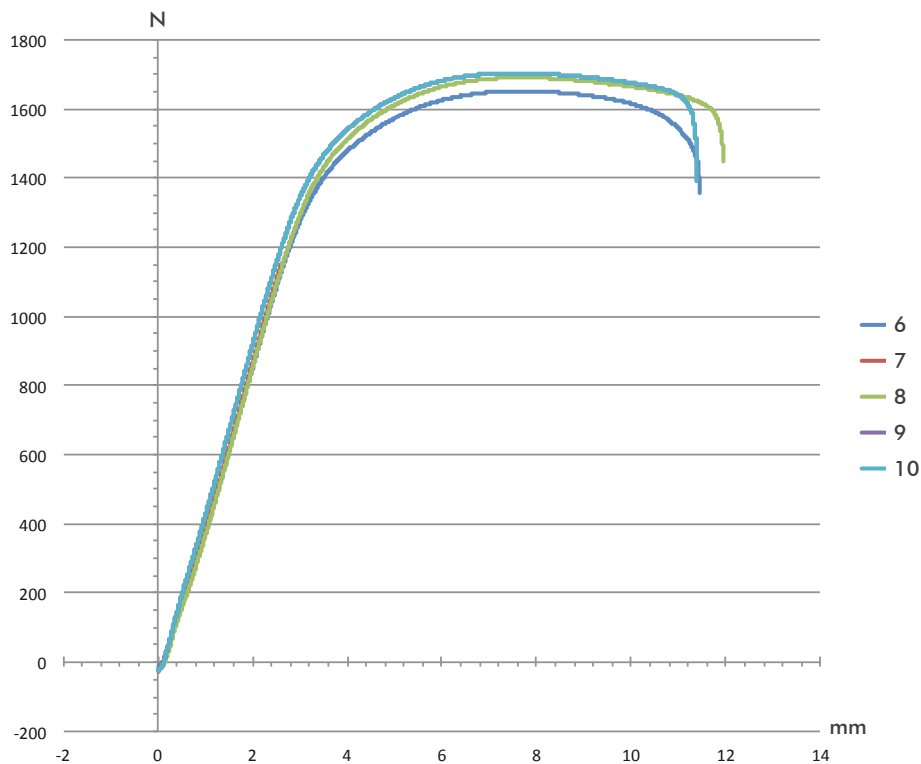
Bij de allereerste meetwaarde is een treksnelheid van 1mm per minuut aangehouden. Dit was nodig om te bepalen hoe lang het duurt voordat dit materiaal zou breken. Deze langzame snelheid is ook de reden dat deze pas later is gebroken. Dit is ook zichtbaar door de extra vervorming van het materiaal (nummer 1, figuur 13). De overige trekproeven zijn wel met een snelheid van 2mm per minuut uitgevoerd. De grafieken (figuren 14 en 17) zijn uitgezet in maximale kracht (N) en de vervorming van het materiaal (mm).



bovenaanzicht, figuur 15

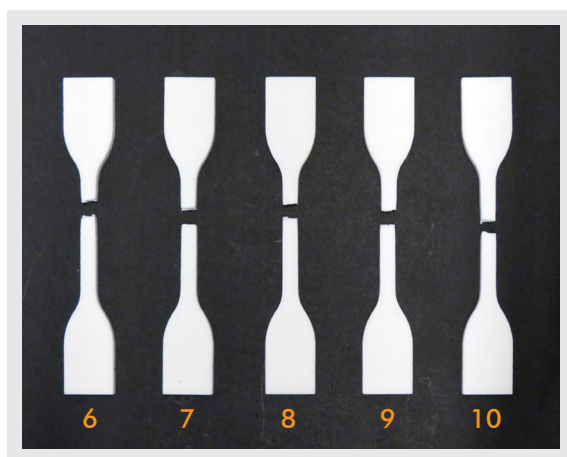


zij aanzicht, figuur 16



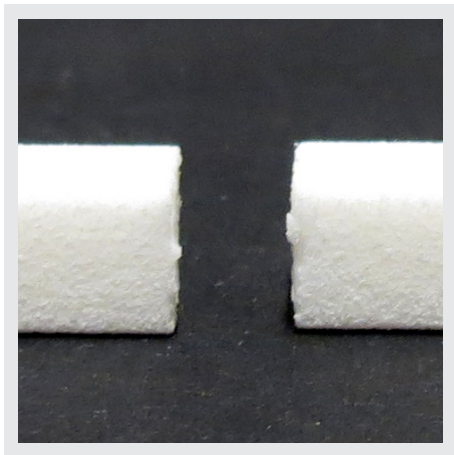
figuur 17

De andere vijf proefstukken zijn in het horizontale vlak geprint. Hierbij zijn de proefstukken wel dicht bij elkaar geprint (figuren 15 en 16). Het printen in het horizontale vlak geeft een veel beter resultaat dan printen in het verticale vlak. Al bij het eerste proefstuk was dit duidelijk zichtbaar. Vervolgens was het ook voorspelbaar dat hoe dichter het proefstuk naar het midden van de bak geprint was, des te sterker het werd. Door het lage aantal proefstukken is dit niet direct bewezen, maar het vermoeden wordt zeker waargemaakt.

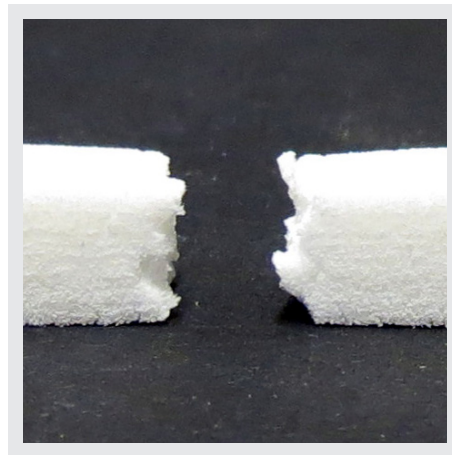


figuur 18

De gemiddelde maximale kracht dat geleverd kon worden op een staand proefstuk tegenover een liggend proefstuk is 1516 N (figuur 14) tegenover 1705 N (figuur 17). Het gaat hier niet om de krachten, maar wel om het onderlinge verschil van 12%.



figuur 19

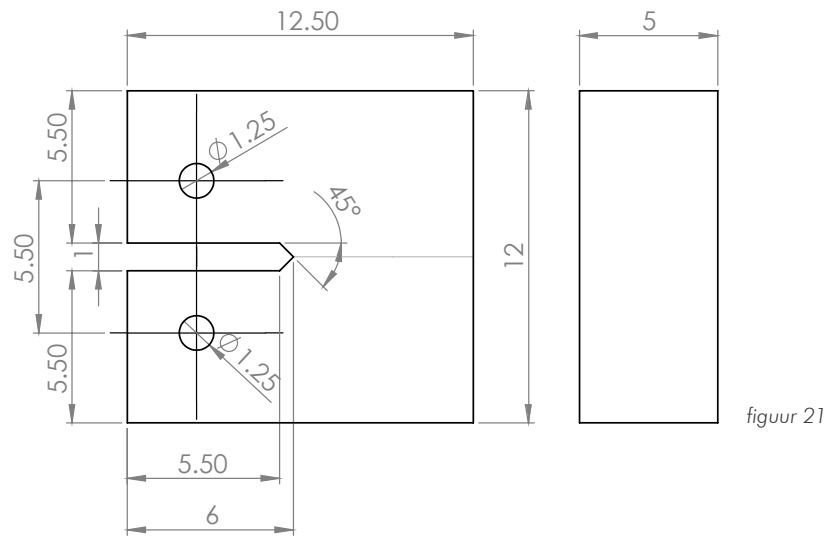


figuur 20

De verklaring hiervoor is goed zichtbaar in de breuk. De proefstukken die staand geprint zijn, zijn allemaal vlak gebroken (figuren 13 en 19). Dit is gebeurd tussen twee printlagen in. Het printen gebeurt in lagen van 0,1mm. De laser kan in deze tussenruimte het materiaal minder goed aan elkaar smelten. Dit in tegenstelling tot het horizontale vlak, waar alle delen goed aan elkaar gesmolten worden. De liggende proefstukken hebben dan ook allemaal een grove breuk (figuren 18 en 20).

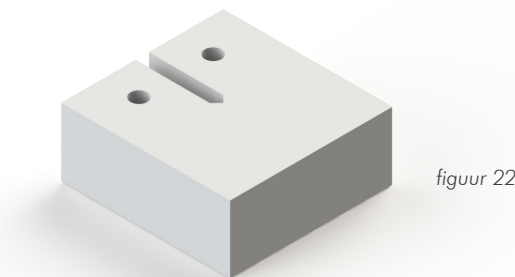
Breukproef opzet

De breukproeven zijn ook op de Universiteit Twente uitgevoerd in het materiaalonderzoeklab. Deze proef is uitgevoerd onder de ISO 13586 standaard (figuur 21). Hierbij is ook rekening gehouden met de printtriching.



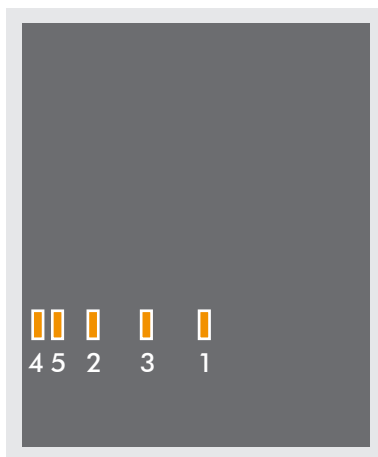
Om metingen uit te voeren, is weer gebruik gemaakt van het Zwicky-line model. Dit maal is het proefstuk met een snelheid van 10mm / minuut uit elkaar getrokken. In het proefstuk is telkens een snede gemaakt, wat zorgt voor een scheur in het proefstuk wanneer hier kracht op gezet wordt.

Deze proef is ook uitgevoerd met tien proefstukken van PA2200 (figuur 22). Hierbij zijn vijf liggend geprint en vijf staand. Vanwege hoge printkosten is de proef enkel uitgevoerd met PA2200.

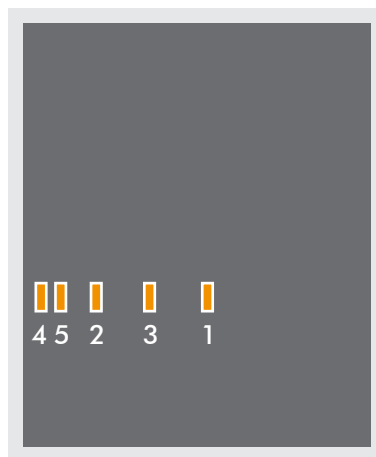


Breukproefresultaten

Bij de breukproef zat weinig tot geen verschil in de gemiddelde sterkte van het materiaal. De verklaring hiervoor is de printrichting. De voorafgaand gespecificeerde printrichting is bij de staande proefstukken verkeerd geïnterpreteerd waardoor beide proefstukken te benaderen zijn als liggende proefstukken. De grafieken (figuren 27 en 30) zijn uitgezet in maximale kracht (N) en de vervorming van het materiaal (mm).

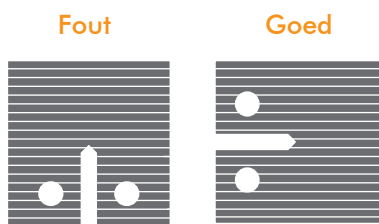


bovenaanzicht, figuur 23

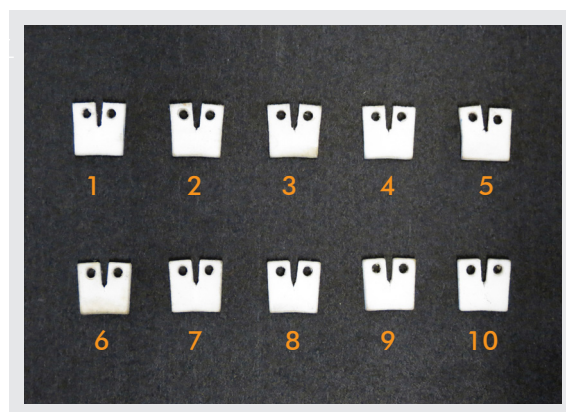


zijaanzicht, figuur 24

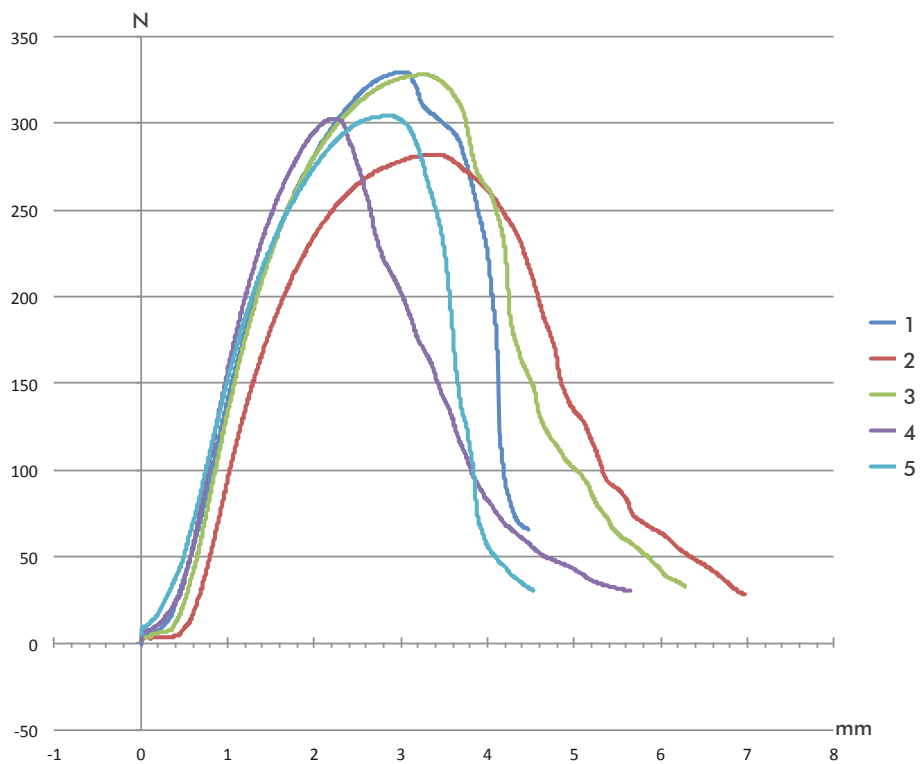
De breukproef is allereerst uitgevoerd met stukken die in de hoogte zijn geprint (figuren 23, 24 en 26). Deze proefstukken zijn een kwartslag verkeerd geprint (figuur 25). Hierdoor kan niet getest worden wat het effect is van de breukproef wanneer de tussenliggende lagen uit elkaar getrokken worden.



figuur 25



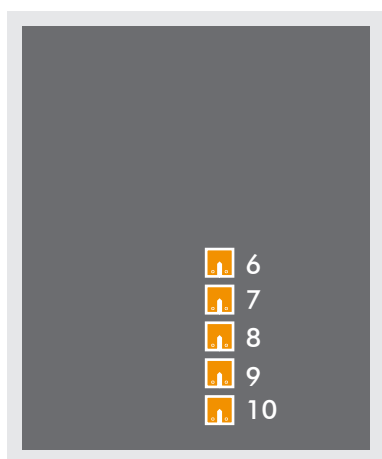
figuur 26



figuur 27

De resultaten van de staande proefstukken liggen echter ver uit elkaar (figuur 27). Zowel het moment van scheuren, als de maximale kracht op het proefstuk lopen ver uiteen.

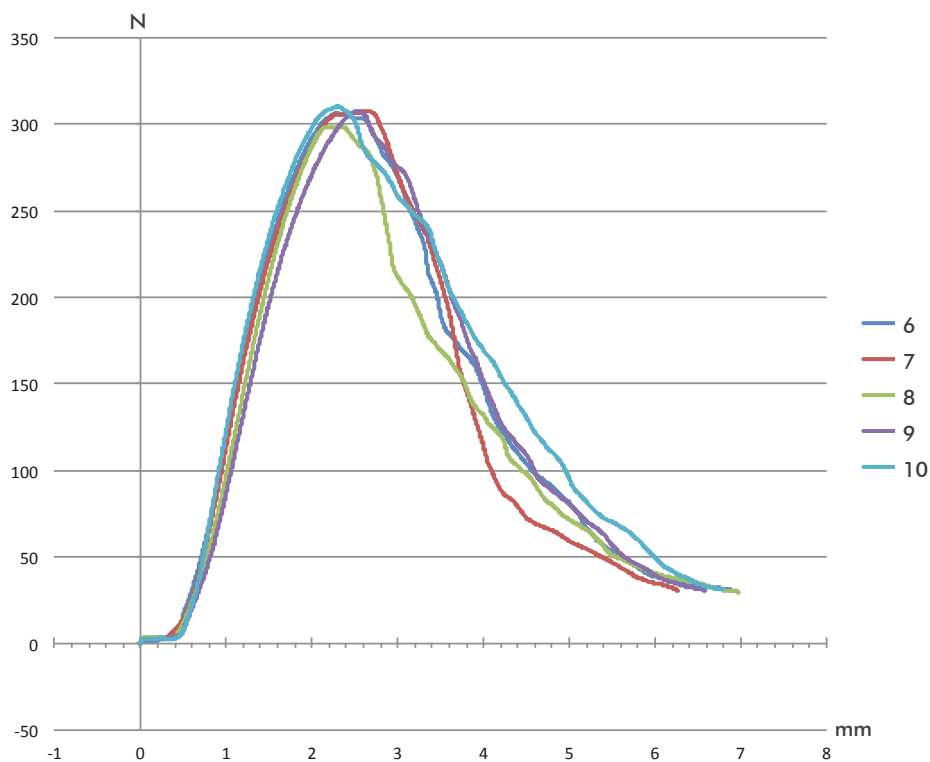
Vervolgens zijn de liggende proefstukken getest (figuren 26, 28 en 29). Hierbij is goed te zien dat het materiaal veel stabiel(er) lijkt te zijn (figuur 30). De maximale krachten en het moment van breuk liggen allemaal dicht bij elkaar.



bovenaanzicht, figuur 28

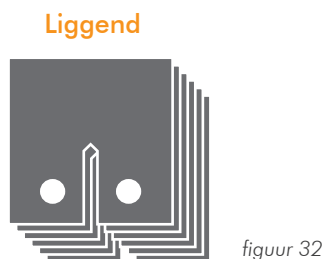
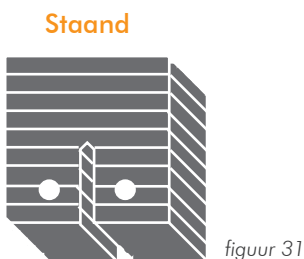


zij aanzicht, figuur 29



figuur 30

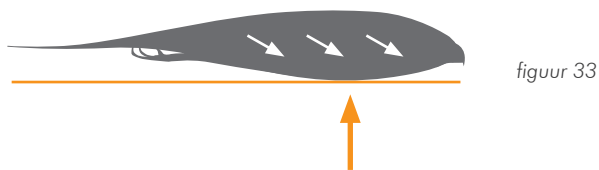
De verklaring voor deze verschillen zit hem in ieder geval in de printrichting. Het verschil in printen zorgt ervoor dat bij de liggende stukken elke geprinte laag de vorm van het proefstuk heeft (figuur 32). Dit is niet het geval bij het staande proefstuk (figuur 31). Dit brengt ook een printafwijking met zich mee.



De proef is slechts met 5 proefstukken per richting uitgevoerd, maar het valt wel op dat de gemiddelde maximale krachten van beiden overeenkomen; staand 309 N tegenover liggend 306 N. Dit kan er op duiden dat, ondanks het verschil in opbouw van het proefstuk en verschil in accuratie dat hierbij komt, de gemiddelde sterkte gelijk blijft.

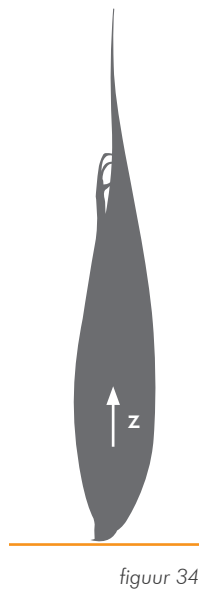
Materiaalresultaten

Uit het materiaalonderzoek blijkt dat er grote verschillen zijn in de kwaliteit van het materiaal, afhankelijk van de printrichting. De laser kan tussen de lagen het materiaal niet versmelten, wat resulteert in zwaktes, afhankelijk van de laagdikte. Dit probleem kan beperkt worden door de printrichting met de producent van de romp af te spreken.



Wanneer de Robird plat geprint wordt, zal de vogel zwak zijn. De Robird heeft een dunne wanddikte, met een cilindrische vorm. In de meeste gevallen dient de Robird op zijn buik te landen (figuur 33). De cilindrische vorm moet dus sterk genoeg zijn om deze klappen op te kunnen vangen. Het is noodzakelijk dat de Robird in ieder geval in de hoogte (figuur 34) geprint wordt.

Om een optimaal resultaat te behalen zou het goed zijn om de Robird diagonaal, in alle richtingen (figuren 35 en 36), te printen. Dit levert het grootste raakvlak tussen de tussenliggende lagen van de cilindrische vorm.



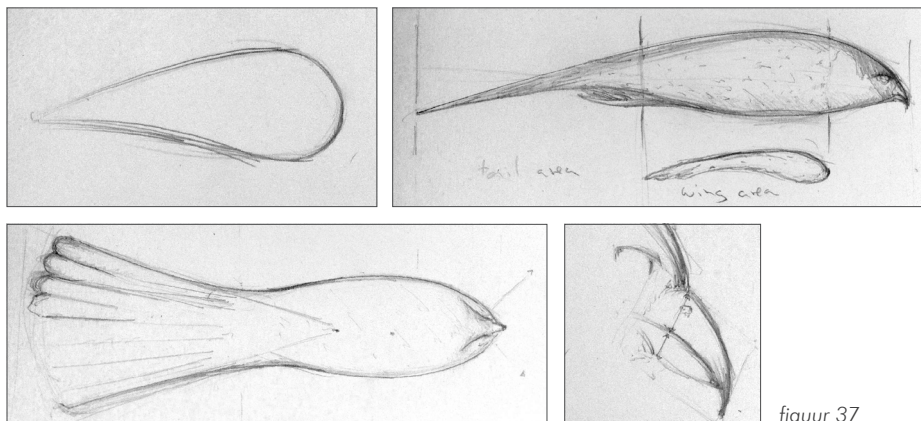
Vormstudie

Bij het ontwerpen van de slechtvalk is het goed om eerst uit te zoomen. Uit onderzoek van Daniel T. Blumstein in zijn stuk *Developing an evolutionary ecology of fear: how life history and natural history traits affect disturbance tolerance in birds*⁶ blijkt hoe vogels reageren op verstoringen. Zo reageren vogels vooral op het silhouet en de manier van vliegen van andere vogels. Kleur en detail kunnen ze echter moeilijk onderscheiden. De kern voor het verjagen van vogels ligt dus bij het silhouet van de Robird.

Naast het creëren van een zo realistisch mogelijk silhouet is het natuurlijk ook belangrijk dat de vorm grotendeels gelijk blijft aan het prototype. Het prototype is ontwikkeld door middel van trial and error. Het is met huidige kennis van aerodynamica nog onverklaarbaar hoe de Robird kan vliegen; dus de vorm mag niet veel van het origineel afwijken.

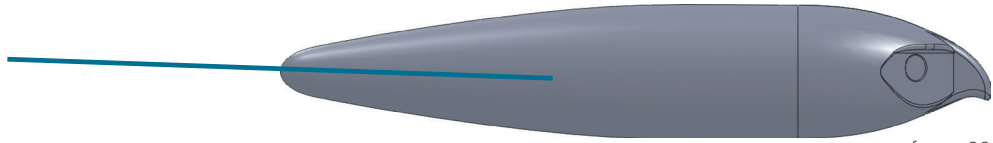
Het probleem zit hem vooral in de staart. De staart staat onder een hoek van 2 graden omhoog (zie de blauwe lijn in het prototype, figuur 38). De staart staat van nature juist iets omlaag en is ook nog eens veel korter dan in het prototype.

Door veel te kijken naar afbeeldingen van slechtvalken en deze eerst te schetsen (figuur 37) is een globaal idee gekregen van de vorm van de slechtvalk. Vervolgens is dit digitaal verder uitgewerkt (figuren 39, 40, 41 en 42). De figuren 41 en 42 zijn het resultaat.

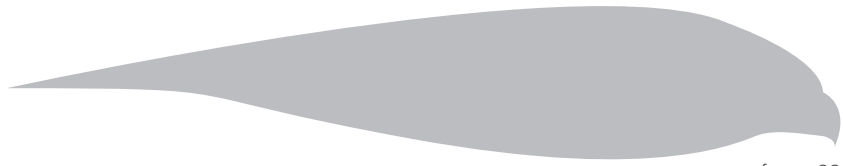


figuur 37

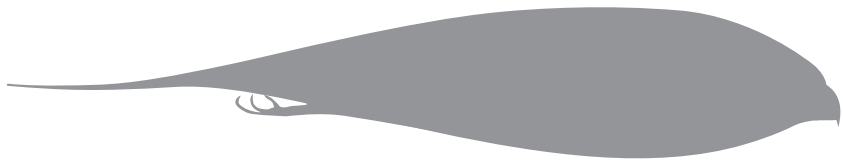
6 - <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003347205003829>



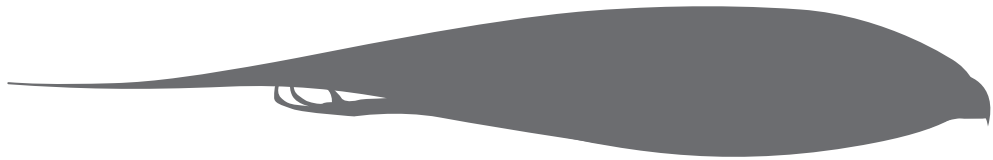
figuur 38



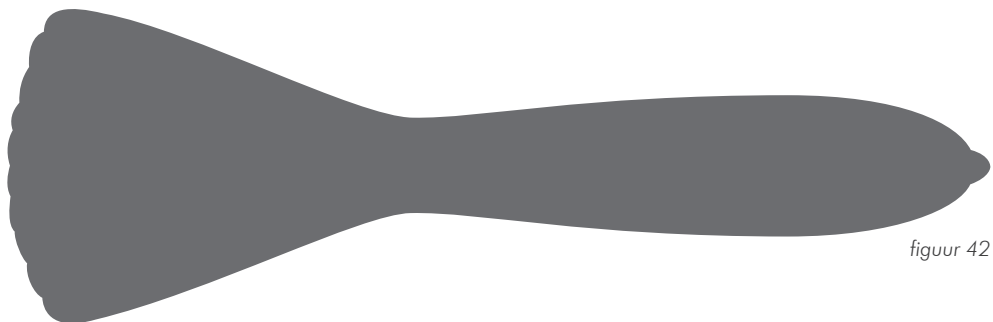
figuur 39



figuur 40



figuur 41



figuur 42

Modellering basisvorm

Bij het modelleren van de basisvorm is allereerst gekeken naar de vormstudies, met silhouetten als resultaat. Het is globaal mogelijk de silhouetten (figuur 41 en 42) te verwerken in het model (figuur 43 en 44) door deze achter het model te plaatsen en de lijnen te volgen. Door parallel de top en side view te gebruiken zijn doorsnedes gemaakt.

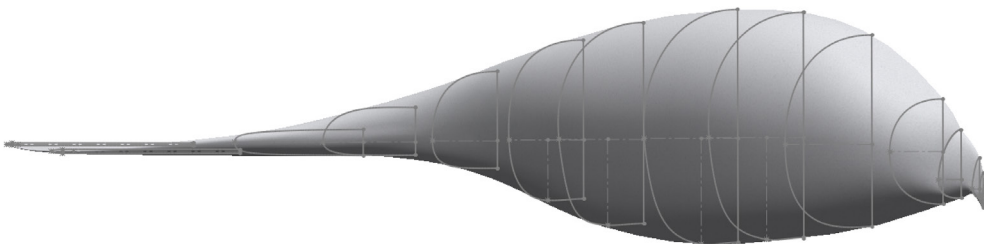
Uiteindelijk zijn de doorsnedes (figuur 45) aan elkaar gemaakt door middel van de loft functie (figuur 46). In dit stadium is nog niet veel rekening gehouden met detail.



figuur 43



figuur 44



figuur 45



figuur 46

Indeling

Om op de juiste plek en op de juiste manier de Robird op te delen, moet een inventarisatie (tabel 2) worden gemaakt over wat er nu precies in de Robird zit. Waarna dit allemaal verdeeld moet worden over de onderdelen (figuur 47).

ONDERDEEL	POSITIE
1 Batterij	kop
2 Mechaniek	body
3 Motor Controller	body
4 Ardupilot	body
5 Receiver + 2 antennes	body
6 GPS (optioneel)	body
7 Staartservo	staart

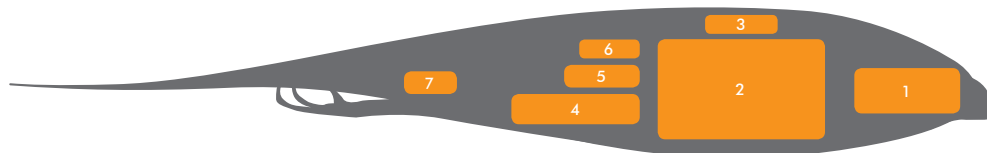
tabel 2

Evenwicht

Voor de veiligheid van de Robird bij crashes kan het misschien wel beter zijn om de batterij niet helemaal voor in de vogel te stoppen. Toch is het belangrijk dat het zwaartepunt tussen de twee pinnen van de vleugel zit (het exacte punt is nog onduidelijk en zelfs afhankelijk van de te gebruiken vleugels). De staart is een groot oppervlak en daardoor ligt het zwaartepunt al snel ver naar achter en dus is ballast in de kop noodzakelijk.

Afschermen

Vanwege de commerciële insteek van Clear Flight Solutions zal elektronica niet bij de kop in kunnen, consumenten mogen niet bij de elektronica kunnen. De kop blijft afneembaar; in tegenstelling tot de body en staart. Dit is dan ook de reden dat de motor controller naar achter is verplaatst (in tegenstelling tot het huidige prototype, waarbij deze zich nog in de kop bevindt). Een schot aan de voorkant van de body is dan ook gewenst.



figuur 47

Stroomschema

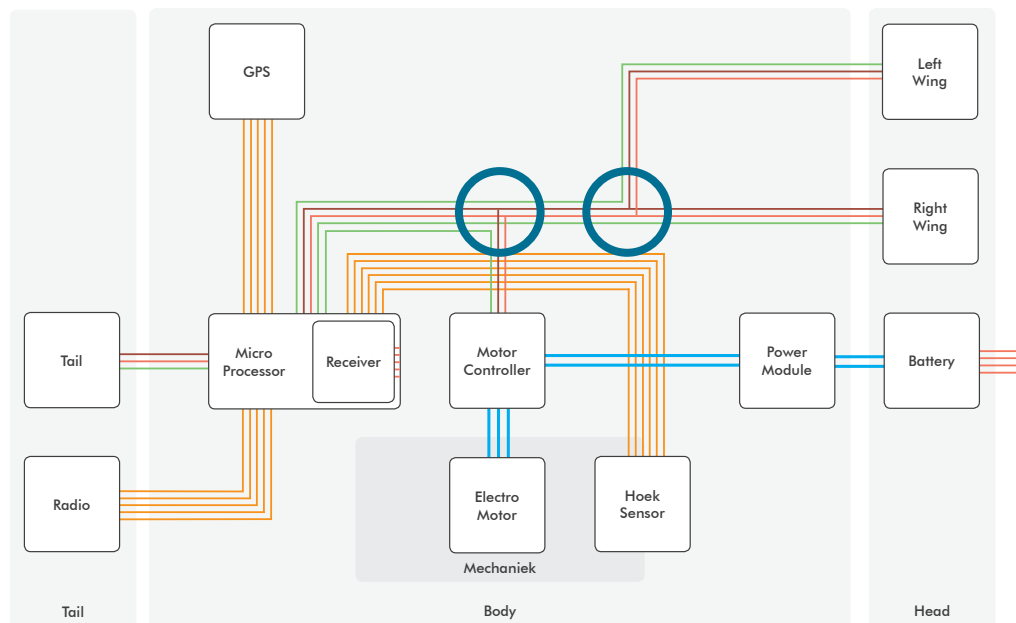
Om de Robird goed te kunnen ontwerpen, is het goed om te weten welke bedrading er door de Robird moet lopen. In tabel 3 staat een overzicht van de extra onderdelen die zich ook in de Robird bevinden; waartussen bedrading loopt.

ONDERDEEL	POSITIE
Vleugelservo links	vleugel links
Vleugelservo rechts	vleugel rechts
Electromotor	mechaniek
Hoeksensor	mechaniek
Radio (optioneel)	staart
Power module (optioneel)	body (tussen motor controller en batterij)

tabel 3

Combineren

In een schema (figuur 48) is weergegeven hoe de bedrading onderling loopt. Dit geeft ook weer dat bepaalde bedrading gecombineerd kan worden (blauwe cirkel). Zo hebben de linker- en rechtervleugel servo en de motorcontroller een positief, negatief en een signaal draad nodig. Hierbij is alleen het signaal draad nodig en kan de rest gecombineerd worden.



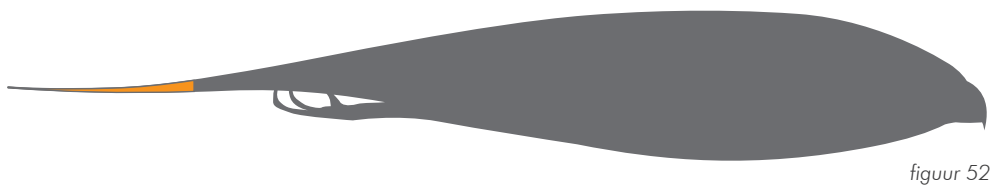
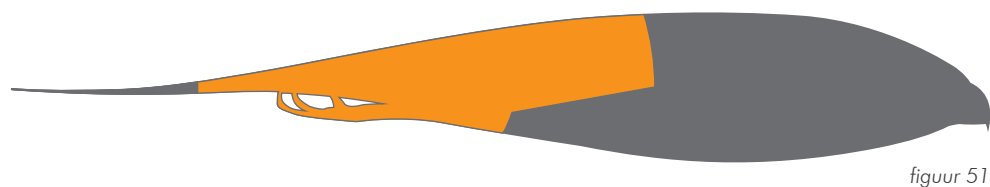
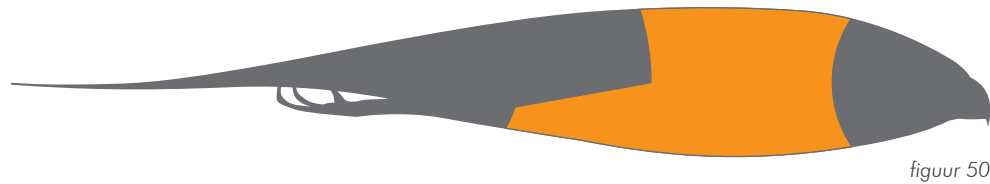
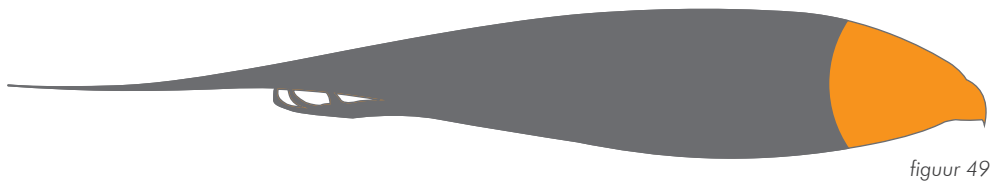
figuur 48

Opdeling

In het huidige prototype kan alleen de kop losgekoppeld worden. Bij algemeen vlieggebruik (het vervangen van de batterij) is dit ook wenselijk. De batterij bevindt zich in de kop en daar moet men ook makkelijk bij kunnen.

Één van de eisen van Clear Flight Solutions is het verbeteren van de assemblage en mogelijkheden tot onderhoud. Nu, wanneer de programmatuur een update moet krijgen, zal alles (vleugels, mechaniek, bedrading en elektronica) uit de Robird gehaald moeten worden om dit te realiseren.

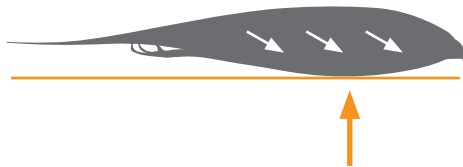
Extra opdeling van de Robird lost dit probleem op. Het zal nog steeds mogelijk zijn de Robird bij de kop te openen, maar nu ook van achter het mechaniek om directe toegang tot de elektronica te krijgen. De romp wordt nu opgedeeld in 4 delen (oranje gekleurd): kop (figuur 49), body (figuur 50), staart (figuur 51), staartpunt (figuur 52). Verder in dit verslag wordt de keuze van opdeling verder onderbouwd.



Crash

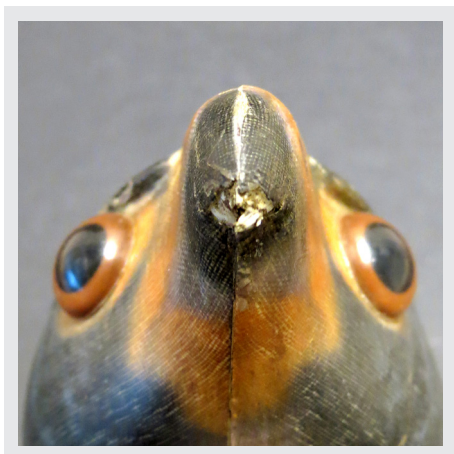
Een van de belangrijkste eisen van de Robird is dat deze solide en crashbestendig moet zijn. Deze eis zal beperkt moeten worden met een aantal randvoorwaarden. Zo zou de Robird van titanium gemaakt moeten worden wil deze heel blijven na een frontale botsing met een stenen muur. Toch is het mogelijk om door middel van kunststof materialen op de juiste manier te construeren dat deze een crash tot op een bepaald niveau kunnen incasseren. Om dit op de juiste manier te doen is het goed om te weten hoe de Robird zal gaan crashen.

In de meest ideale situatie (geen crash) wordt de snelheid geminderd en zal de Robird vlak op een zachte ondergrond landen (figuur 53). In deze situatie zal de kracht vooral op de buik komen. Het is dus goed om hier ruimte te houden en bedrading daar weg te houden zodat bij een crash er geen bedrading bekneld raakt of het mechaniek beschadigt.

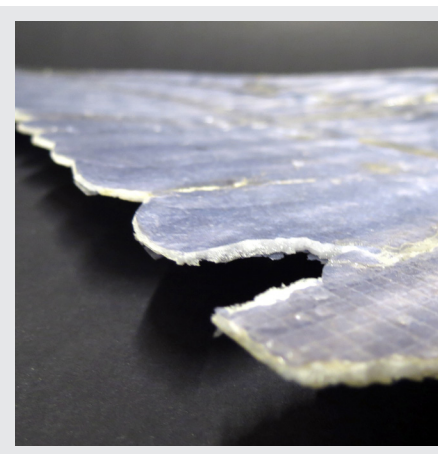


figuur 53

Het prototype laat echter zien dat deze situatie niet altijd voorkomt: beschadigingen aan de kop (figuur 54), buik maar ook staart en vleugels (figuur 55).



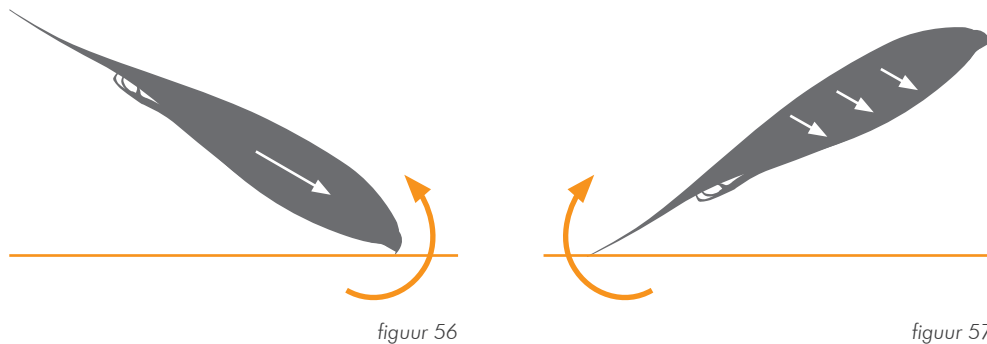
figuur 54



figuur 55

Landingen

Wanneer de Robird op zijn kop landt, zal de kop tenopzichte van de romp tegen de klok in willen draaien (figuur 56). Deze zelfde draaiing (maar dan met de klok mee) zal ontstaan wanneer de Robird op zijn staart landt (figuur 57).



De Robird zal op een manier gaan crashen. Hiervoor zijn twee methoden om de schade te beperken:

Buigen

Het maken van een buigbare Robird heeft als voordeel dat een onderdeel niet direct breekt maar eerst zal doorbuigen. Het nadeel is dat dit voor de klant niet veilig aan kan voelen. Voor Clear Flight Solutions is dit niet wenselijk. Toekomstige klanten als defensie zien graag dat de Robird robuust aandoet.

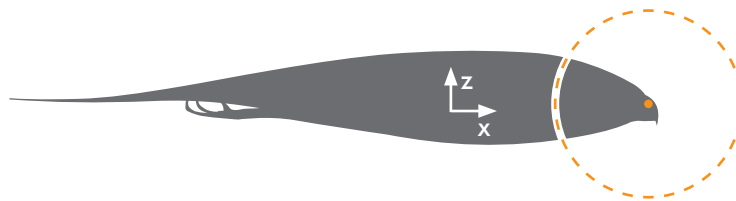
Robuust

De andere methode is een robuuste vogel maken. Dit kan gerealiseerd worden door de juiste constructiemethoden te gebruiken, de juiste koppelingen, maar ook het juiste materiaal. Het huidige prototype is gemaakt van glasvezelmatten. Dit is zeer sterk en het zal ook goed zijn de romp te printen van PA3200 (Nylon met glasvezel).

Rubber

Een geheel andere oplossing is bepaalde onderdelen van de vogel van rubber te printen, zoals de snavel. Dit zal de klap tot op zekere hoogte opvangen. Dit moet echter nog wel in combinatie met een materiaal als PA3200 gedaan worden om indeuking tegen te gaan in bepaalde delen van de romp.

Een landing op de kop zal er ook nog eens voor zorgen dat de kop een draaiende beweging maakt (figuur 56). In de tegengestelde richting is dit echter niet een vereiste. Dit is dan ook de reden dat er voor een koppeling is gekozen waarbij die as als enige vrij is. Dit vraagt om een cilindrische beweging om de snavel van de Robird (figuur 62).



figuur 62

Tegen de klok in zorgt ervoor dat de kop dicht en vast zit (figuur 63). Wanneer de kop met de klok mee gedraaid wordt, zal deze open gaan.

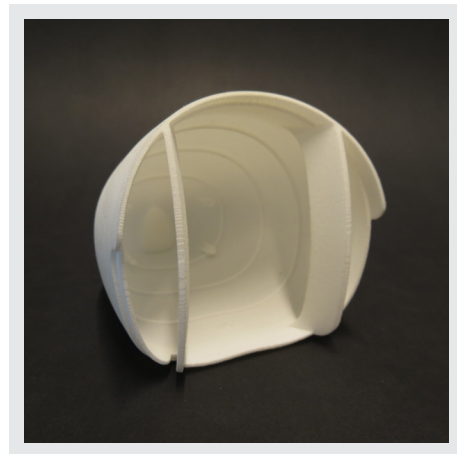


figuur 63

Een dubbelgekromde rails (figuren 64 en 65) zorgt ervoor dat de kop gefixeerd blijft.



figuur 64



figuur 65

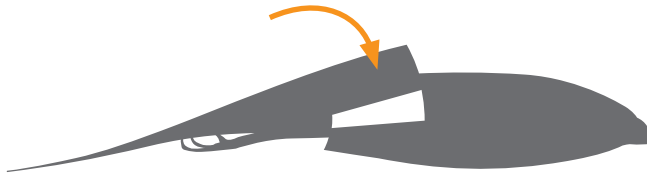
Koppelstuk: body en staart

De koppeling tussen de body en de staart zorgt ervoor dat bij assemblage alles van achter in de Robird kan en bij onderhoud niet alles eruit gehaald hoeft te worden. Daarnaast mogen gebruikers niet bij dit deel van de Robird kunnen. Voor assemblage en onderhoud zou het goed zijn als er achterin veel werkruimte is. Dit is dan ook de reden dat aan de body een groot werkoppervlak is gerealiseerd (figuur 66).



figuur 66

In de eerste instantie was het doel de koppeling tussen de body en de staart hetzelfde te maken als bij de kop, met een cilindrische beweging (figuur 67). Dit heeft als nadeel dat er een extra onderdeel ingeschroefd moet worden nadat het mechaniek in de body geplaatst is. Dit onderdeel moest dienen als rails en als ophanging voor het mechaniek.



figuur 67

Vervolgens is gekeken naar een methode om de staart beter te koppelen aan de body, zonder gebruik te maken van een extra onderdeel, zonder extra gewicht. Hierbij zal de staart net als de body het mechaniek gaan dragen. De twee delen worden op elkaar geschoven (figuur 68). Vervolgens wordt dit gefixeerd door middel van schroeven.



figuur 68

Deze laatste methode heeft als voordeel dat er geen extra gemodelleerde onderdelen nodig zijn voor fixatie van het model. Vanwege de eenvoud is hier dan ook voor gekozen.

Koppelstuk: staartscharnier

Om een goed koppelstuk voor de staart te ontwikkelen, is eerst gekeken naar welke krachten hier nu daadwerkelijk op komen te staan. Allereerst is uitgerekend welke kracht de wind (turbulente stroming) op het staartvlak uitoefent (figuur 69). Hiervoor is de volgende weerstandsformule⁷ gebruikt:

$$F_{\text{lucht}} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot C_w \cdot \rho \cdot v^2$$



figuur 69

Hierbij is de oppervlakte (A) het staartoppervlak onder een hoek van 25 graden.

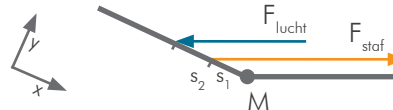
$$A = \sin(25^\circ) \cdot (0,08 \cdot 0,15) = 0,012 \text{ m}^2$$

De dichtheid (ρ) van lucht is $1,293 \text{ kg/m}^3$ en de (maximale) snelheid (v) van de vogel is $22,2 \text{ m/s}$ (80 km/u). Als weerstandscoefficiënt⁸ is 1 gekozen (vergelijkbaar met een kubus), omdat de daadwerkelijke coëfficiënt niet bekend is.

$$F_{\text{lucht}} = 1,62 \text{ N}$$

Deze kracht grijpt aan op het midden van het staartvlak. Nu is het goed om te weten welke kracht er op de servo-staf komt te staan (figuur 70).

$$\Sigma M = s_1 \cdot F_{\text{staf}_y} + s_2 \cdot F_{\text{lucht}_y}$$



figuur 70

Voor het aangrijppunt van F_{staf} met als afstand s_1 is $0,01 \text{ m}$ gebruikt. Voor het aangrijppunt van F_{lucht} met als afstand s_2 is $0,04 \text{ m}$ gebruikt.

$$F_{\text{staf}_y} = (-s_2 \cdot F_{\text{lucht}_y}) / s_1$$

$$F_{\text{staf}} = F_{\text{staf}_y} \cdot \cos(65^\circ) = -2,74 \text{ N}$$

Deze kracht op de huidige stalen staf is verwaarloosbaar. Het zou goed zijn deze van een ander, lichter materiaal te maken, zoals carbon.

7 - <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/drageq.html>

8 - <http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/q0231.shtml>

Voor het staartscharnier zijn verschillende concepten bedacht:

Verdunning

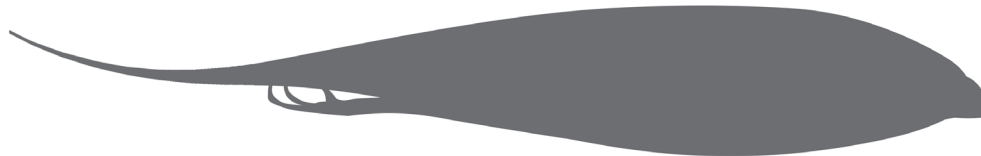
Door verdunning in het materiaal te gebruiken is er geen extra onderdeel nodig (figuur 71). De verdunning zorgt voor een scharnierende werking. In theorie zal deze techniek goed kunnen werken, maar een test in PA2200 scheurde direct. Een materiaal als Duraform EX met een veel grotere strain zou hier meer geschikt voor zijn.



figuur 71

Flexibiliteit

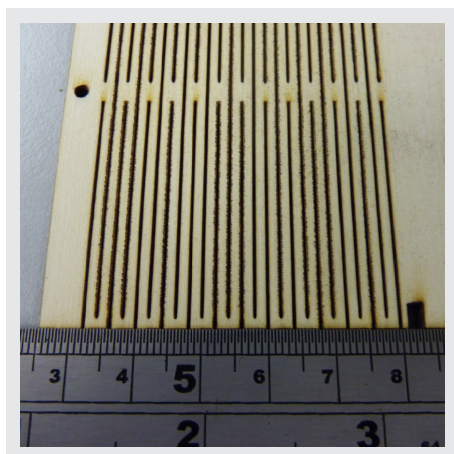
Een voortborduring op het concept van verdunning, met een materiaal als Duraform EX, is een algehele verdunning van de staart. Hierbij is niet één deel scharnierend, maar de gehele staart een beetje (figuur 72). Dit vergt minder van het materiaal.



figuur 72

Perforatie

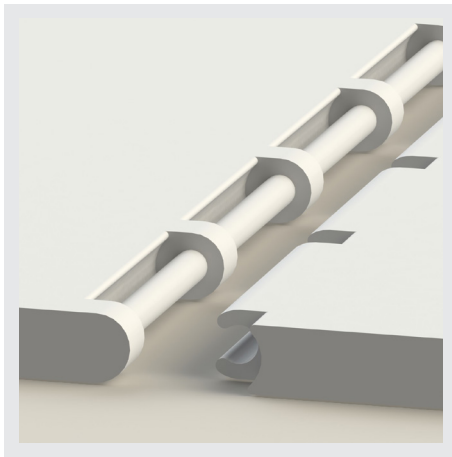
Omdat het materiaal van nature niet flexibel is en dit ook in de rest van de romp niet gewenst is, is een andere methode om toch flexibiliteit te creëren perforatie in het materiaal. Dit wordt al veel gedaan in hout (figuur 73), om hout buigbaar te maken.



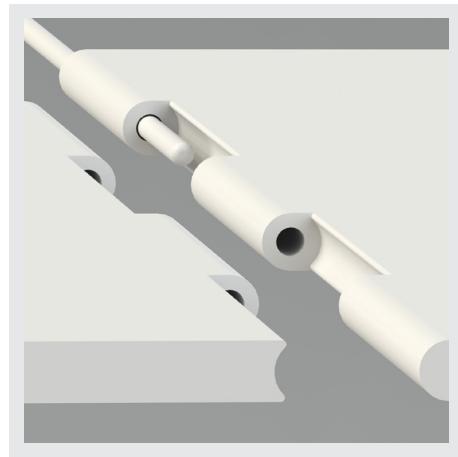
figuur 73

Klikscharnier

Bij een klikscharnier wordt de staartpunt aan de staart vast geklikt (figuur 74). Hierbij wordt gebruik gemaakt van een kortdurende vervorming. De kortdurende vervorming kan ook in de andere richting plaatsvinden waardoor het scharnier onverwachts kan losschieten. Het voordeel is hierbij wel dat wanneer de staart stuk is, dit onderdeel wel eenvoudig vervangbaar is. Dit is te realiseren door het zwakste onderdeel (het onderdeel met de aangrijp punten) te gebruiken als het hoogteroer.



figuur 74



figuur 75

Penscharnier

Een penscharnier (figuur 75) wordt ook gebruikt in het prototype. Het is een relatief eenvoudige, maar sterke verbinding. Het materiaal wordt hierbij niet overbelast en de as kan van een ander, sterker, lichter, materiaal gemaakt worden, zoals carbon.

Uiteindelijk is gekozen voor de penverbinding. Deze verbinding is sterk, eenvoudig implementeerbaar en voelt betrouwbaar aan.

Ontwerpen voor 3D printen

Het gebruik van 3D printen brengt veel nieuwe mogelijkheden binnen de manufacturing. De beperkingen, die al snel opkomen, bij de (spier)arbeid vallen weg bij het 3D printen. Het printen heeft echter wel enkele beperkingen:

- tijdsduur
- nauwkeurigheid
- lossendheid van het restmateriaal

Tijdsduur

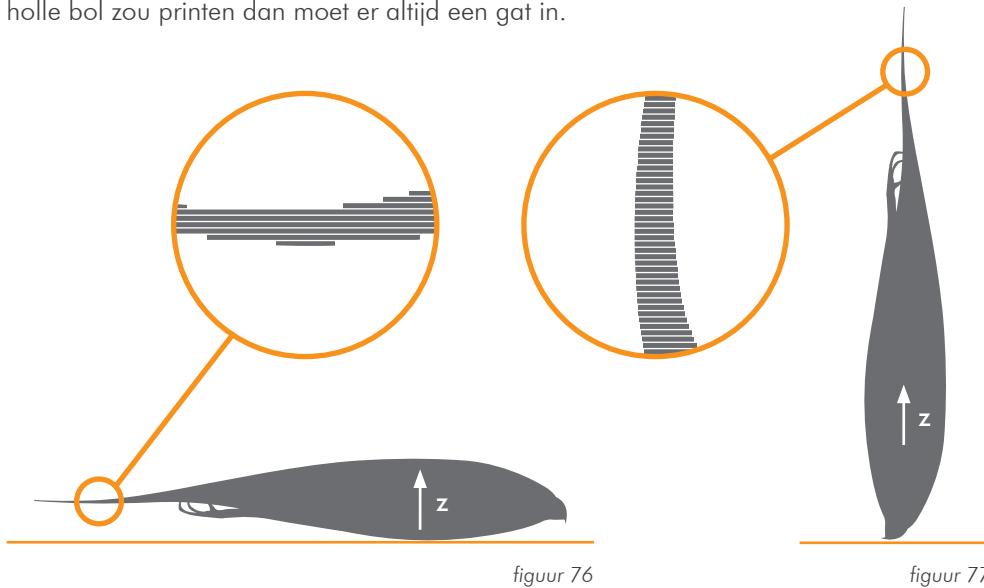
Op dit moment duurt het zo'n 10 uur om een bak van slechts 0,0225 m³ te printen. Het maakt hierbij niet uit hoeveel onderdelen er in zitten; het proces print laagje voor laagje.

Nauwkeurigheid

Door het printen in lagen zal dit altijd de bepalende factor zijn. Zo wordt de Robird geprint met een onnauwkeurigheid van 0,1 mm in de Z richting (figuur 76). Dit probleem is op te lossen door de printrichting vooraf te definiëren en de lengterichting van de Robird als Z (hoogte) richting (figuur 77) aan te geven.

Lossendheid

Bij het printen door middel van SLS (maar ook andere 3D print technieken) is het altijd belangrijk dat het poeder wat gebruikt wordt weer uit het printstuk kan. Wanneer men een holle bol zou printen dan moet er altijd een gat in.

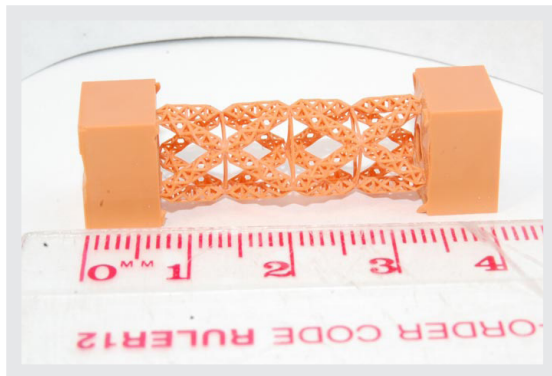


Lichtgewicht 3D printen

Het 3D printen geeft de mogelijkheid tot unieke vormen. Met unieke vormen komen direct ook zeer lichtgewicht constructies naar voor. 3D printen geeft de mogelijkheid tot dit soort constructies.

Fractals

In goed voorbeeld van nieuwe mogelijkheden met 3D printen zijn fractals. *Daniel Rayneau-Kirkhope* schrijft in zijn stuk *Ultralight Fractal Structures from Hollow Tubes*⁹ over de toepassing van fractals binnen het 3D printen (figuur 78). Het hiërarchisch patroon zorgt voor een grote sterkte bij een laag gewicht. De Eiffeltoren is hier een goed voorbeeld van, maar geen perfecte uitvoering. Fractals kunnen zorgen voor een theoretische gewichtsvermindering van 10,000 maal ten opzichte van een dicht materiaal. Een groot nadeel aan fractals is dat deze perfect geprint moeten worden. Elke fout in het print proces zorgt voor een groot verschil in de kwaliteit.



figuur 78



figuur 79

Honingraat

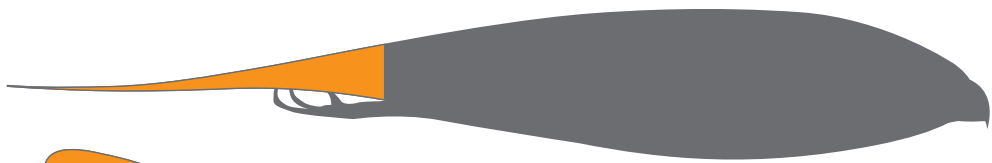
Een ander goed voorbeeld uit de natuur, dat geschikt is voor 3D printen, is de honingraat (figuur 79). Dit wordt al veel gebruikt met andere technieken en materialen zoals bij karton en aluminium¹⁰. Het grote voordeel van de honingraat structuur is dat deze relatief eenvoudig te produceren is en snel de structuur versterkt zonder veel extra gewicht.

9 - <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v109/i20/e204301>

10 - <http://www.alurvs.nl/aluminium/artikelen/842/>

Lichtgewicht staart

De staart (figuren 80 en 81, oranje vlak) is in het prototype van een licht schuim gemaakt. Dit is niet sterk, maar zeer licht. Alles wordt geprint aan het nieuwe model en het is noodzakelijk om ook de staart naar verwachting voldoende sterk voor een crash te maken. Het nadeel van de staart is dat het oppervlak relatief groot is. Het oppervlak zal een minimale wanddikte moeten hebben en dit brengt het gewicht snel omhoog. Om het gewicht in de staart nog enigszins te beperken is het goed om te kijken naar toepassingen van lichtgewicht structuren.



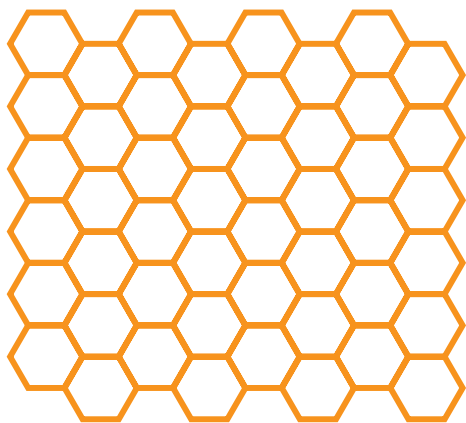
figuur 80



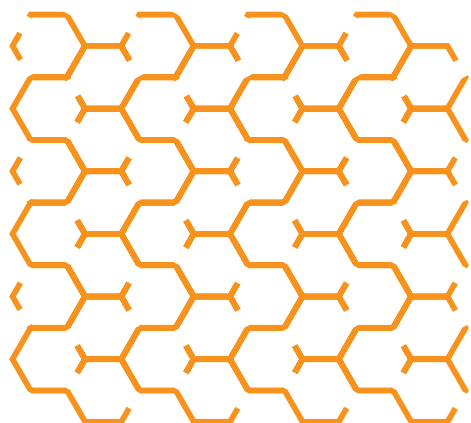
figuur 81

Honingraat

In theorie zouden fractals het beste zijn, maar vanwege de printkwaliteit is dit geen optie. Een honingraat daarentegen wel. Het nadeel bij 3D printen is alleen wel dat het restmateriaal altijd weg moet kunnen.



figuur 82



figuur 83

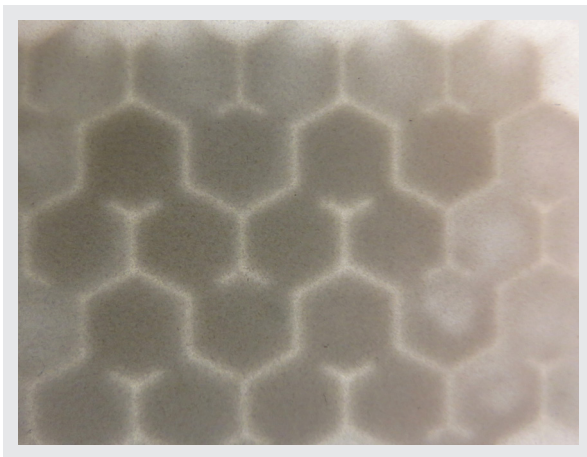
Het is dus niet mogelijk om tussen twee platen een honingraat structuur te plaatsen (figuur 82), het poeder kan dan niet weg. Als oplossing hiervoor zijn tussenwanden weggehaald (figuur 83). De overige wanden zullen ervoor zorgen dat de sterkte van de honingraat vergroot wordt en het poeder wel weg kan.

Printproef

Om te kijken of deze techniek geschikt blijkt te zijn voor de Robird, is een printproef gemaakt van de techniek (figuur 84). Hieruit is gebleken dat het poeder bij een dunne wanddikte er niet uit kan (figuur 85, donkere vlakken laten het poeder zien). Dit, mede met het bijkomende gewicht en modelleerbaarheid, zorgt niet voor het gewenste resultaat.



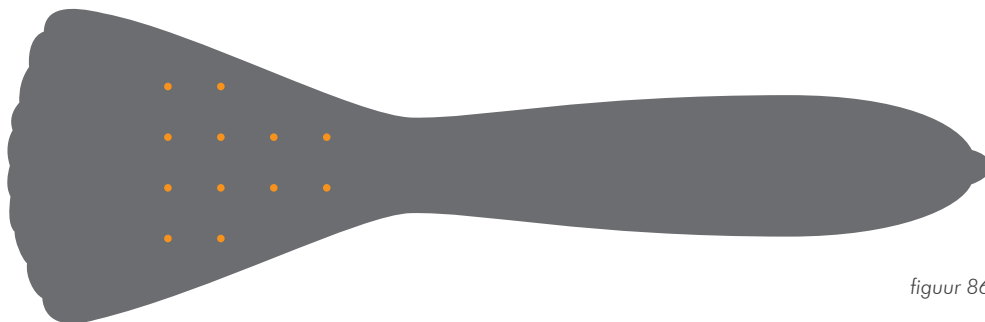
figuur 84



figuur 85

Pilaren

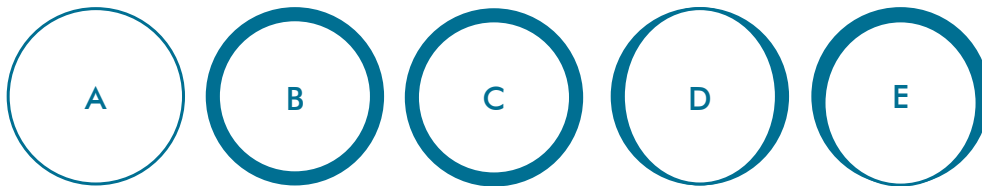
Om het gewicht minimaal te houden, maar toch sterkte te geven aan de staart van het model, is ervoor gekozen om pilaren (met een diameter van 2mm) verdeeld te plaatsen (figuur 86). Dit geeft een holle staart met een wanddikte die naar verwachting voldoende sterkte aan de staart geeft.



figuur 86

Ribben

De Robird wordt geprint met een zeer kleine wanddikte. Om de Robird extra sterkte te geven op plekken als de body en de kop is gekeken naar methoden van ribben. De vorm van de rib (figuur 87) geeft een bepaalde eigenschappen aan de romp.



figuur 87

Drop test

Om te kijken welke vorm van ribben het meest geschikt is zijn deze gemodelleerd. Alle modellen hebben een buiten diameter van 100mm en een lengte van 100mm, alle modellen krijgen een wanddikte van 1mm. De modellen worden van een hoogte van 10m los gelaten voor een drop test. In dit onderzoek is ook de modelleerbaarheid meegenomen. De romp heeft een dubbelgekromd oppervlak, dus niet elke rib is eenvoudig te modelleren (bij kleine aanpassingen veranderen de relaties en referenties).

Model A Dit model heeft geen ribben.

Model B Dit model heeft ribben met een onderlinge afstand 20mm en hoogte van 4mm; zonder afrondingen.

Model C Dit model is gelijk aan model B met extra ribben in de lengterichting.

Model D Dit model heeft ribben waarbij links en rechts de hoogte 4mm is en boven en onder 2mm. Dit moet een verende functie hebben.

Model E Dit model heeft boven ribben met een verloop van 4mm boven en 2mm onder. Dit model heeft verende eigenschappen.

	VOLUME	STERKTE	RESULTAAT	MODELLEERBAARHEID
A	1,00	1,00	1,00	Goed
B	1,19	1,54	1,04	Goed
C	1,21	1,82	1,11	Goed
D	1,14	1,43	1,05	Matig
E	1,14	1,33	1,01	Matig

tabel 4

Alle waarden voor volume en sterkte uit de test (tabel 4) zijn relatief genomen met model A. Voor zowel het volume als de sterkte is het gunstig een zo hoog mogelijke factor te hebben. Het volume gaat puur om het gewicht van het model. De sterkte is een gemiddelde factor die geschat is aan de hand van de resultaten uit de droptest. Om een goede verhouding tussen het volume en de sterkte te bepalen, is hier een norm voor toegepast uit CES. Hiervoor is een plat paneel gekozen waarop in het midden een kracht gezet wordt, wat een buiging zal veroorzaken. Bij cilindrische vormen wordt de kracht verdeeld over het gehele oppervlak. Het resultaat is het volume gedeeld door de wortel van de sterkte.

De modellen D en E komen het best uit de test in de categorie van volume. Qua sterkte zijn ze echter veel minder dan C. Deze ribben zouden beter zijn voor een meeverende body. Om een algehele stijfheid van het model te garanderen, is het echter goed om te gaan voor een model C. Dit model is zwaarder, maar veel stijver en sterker.

Mede door modeleerbaarheid is gekozen voor een methode waarbij alle ribben even hoog zijn. Dit geeft een betere verdeling van de kracht over de gehele romp. In de lengte zijn ook twee ribben geplaatst die extra sterkte geven in deze richting (figuur 88).



figuur 88

Model #1



figuur 89



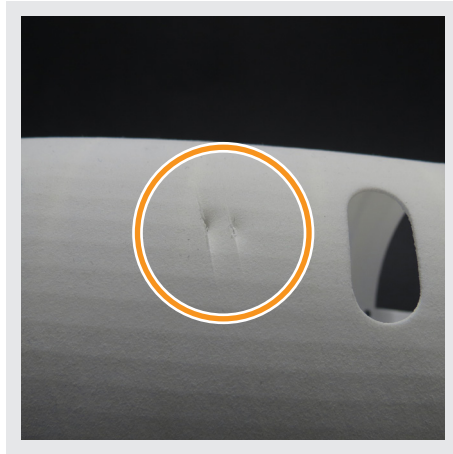
figuur 90

Materiaal	PA2200
Materiaaldichtheid	0,93 gram / cm ³
Gemodelleerd volume	125,15 cm ³
Verwacht gewicht	116,39 gram
Gewogen gewicht	104 gram
Wanddikte	1,0mm

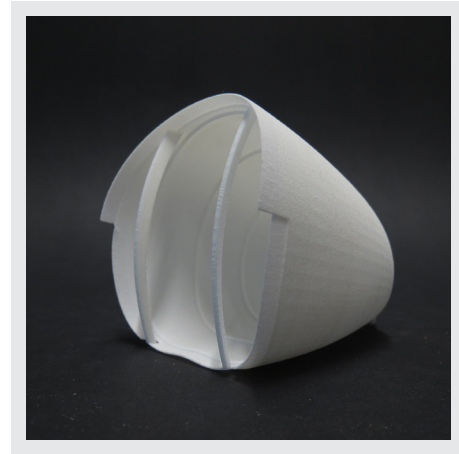
Het doel van het eerste model was het bekend raken met het materiaal, het 3D printen en de gemodelleerde vorm. De eerste print (figuren 89 en 90) is zeer bruikbaar, maar wel mislukt. Hier zijn een aantal redenen voor:

Wanddikte

Als algehele wanddikte van het model is 1 mm gekozen om het gewicht laag te houden. Dit viel uit tot een wanddikte van 0,8mm door de inaccuraatheid van het printen en het opschuren van het oppervlak. In eerdere testsamples bleek het mogelijk om tot wel 0,5 mm een wand te printen, maar in dit model bleek dat niet het gewenste resultaat te leveren. Bij kleine wanddiktes ontstaan namelijk soms printfouten wat resulteert in gaten in het model (figuur 91). Dit komt door de benadering die de printer moet maken bij cilindrische vormen. De lagen moeten dan op elkaar geprint worden, met een klein raakvlak per laag. De oplossing hiervoor is de vogel in de hoogte printen, waardoor dit minder zal voorkomen (pagina 44).



figuur 91



figuur 92

Kopsluiting

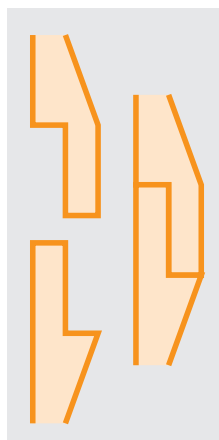
De sluiting van de kop is gemodelleerd met een dubbel gekromde rails (figuur 92). Het systeem blijkt goed te werken, maar er is te veel materiaal weg gelaten waardoor deze sluiting niet optimaal is.

Koppelingen

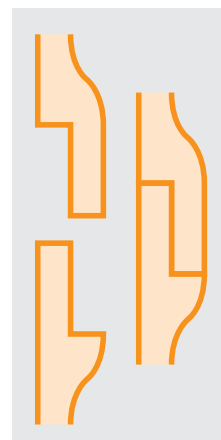
Zowel de koppeling tussen de kop en de body als de body en de staart hebben last van materiaalzwaktes. Dit komt door een verdunning van het materiaal aan beide kanten (figuur 93). Hierdoor blijft het model licht; echter de sterkte gaat te sterk achteruit. Als oplossing hiervoor geldt een plaatselijke verdubbeling (figuren 94 en 95) van de wanddikte om hier zo extra stevigheid te creëren.



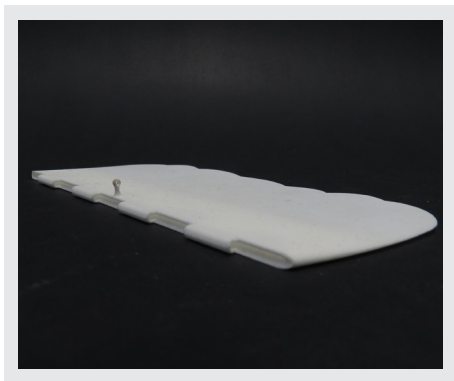
figuur 93



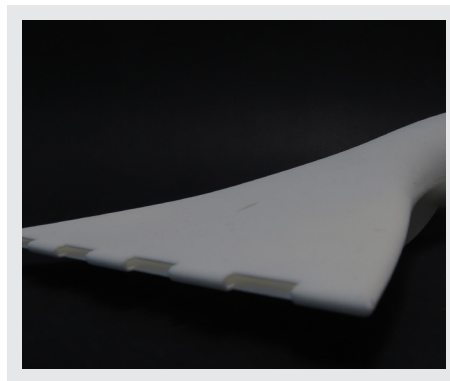
figuur 94



figuur 95



figuur 96



figuur 97

Staart

Het scharnier werkt goed. Bij het model is materiaal weggelaten voor het gewicht (figuren 96 en 97). Dit heeft geen nadelig effect voor het scharnier. Wel blijkt het poeder vast te zitten in de staartpunt. Het weglaten van materiaal kan tot een dikte van 0,5mm, anders blijft het poeder achter. Dit moet dus anders vormgegeven worden (figuur 98, oranje vlak).



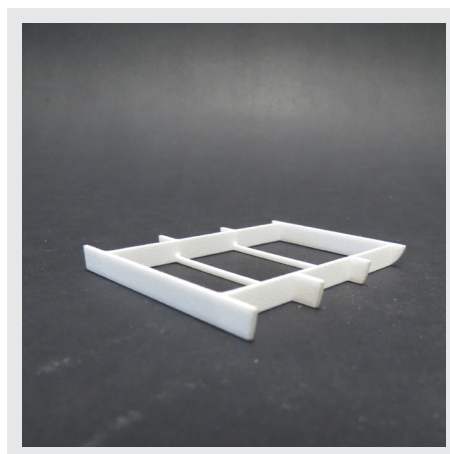
figuur 98

Inserts

Om zaken als bedrading goed te geleiden is bedacht dit op te lossen door een insert die op het mechaniek geplaatst kan worden (figuur 99). Het nadeel hierbij is dat dit onnodig gewicht kost en een fragiel onderdeel van de Robird wordt. Het zelfde geldt voor een insert voor de plaatsing van de Ardupilot (figuur 100). Hier moet een andere oplossing voor worden bedacht.



figuur 99



figuur 100

Model #2



figuur 101



figuur 102

Materiaal	PA2200
Materiaaldichtheid	0,93 gram / cm ³
Gemodelleerd volume	177,39 cm ³
Verwacht gewicht	164,97 gram
Gewogen gewicht	150 gram
Wanddikte	1,2mm

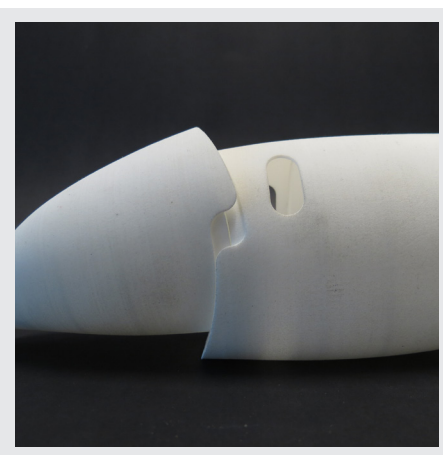
Het doel bij het tweede model (figuren 101 en 102) is het oplossen van de problemen bij model #1. Hierbij is vooral rekening gehouden met de sterkte die het model moet krijgen. Dit is dan ook de reden dat de wanddikte met 20% is verdikt naar 1,2mm. Hieruit is gebleken dat dit een groot verschil leverde. Ook de printrichting heeft bijgedragen aan een beter resultaat. Het model is een grote verbetering ten opzichte van het eerste model. Alle problemen zijn opgelost met een positief resultaat.

Kopsluiting

De sluiting van de kop is verbeterd. Dit kost meer materiaal, maar de sluiting fixeert de kop in alle belangrijke richtingen (figuren 103 en 104). In dit model is het alleen nog niet mogelijk om de bekabeling van de vleugelservo's langs de kop te krijgen. Hier zal aan beide kanten een opening voor gemodelleerd moeten worden.



figuur 103



figuur 104

Staartpunt

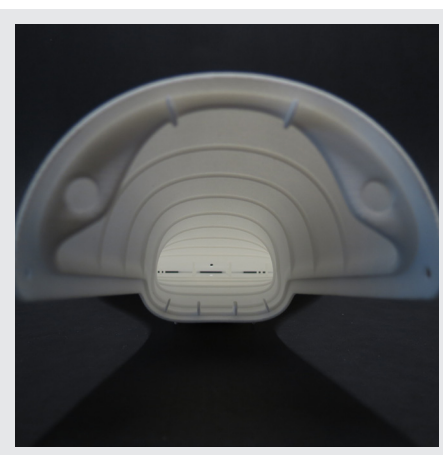
Om de staart lichter te maken is hier veel materiaal weg gehaald (figuur 105). Enkel de fixatie van de scharnieras is aanwezig. Het nadeel van het weghalen van zo'n grote hoeveel materiaal is dat het roer krom gaat staan na afkoeling van de print. De as trekt dit tot op zekere hoogte bij, maar het model is niet optimaal.

Staart

De koppeling tussen de staart en de body is nu met een dubbele wanddikte uitgevoerd. Dit zorgt voor een goede stevigheid. Om indrukken tegen te gaan zijn tanden (figuur 106) toegevoegd. Pilaren zijn toegevoegd tegen het indrukken in het grote achterdeel.



figuur 105



figuur 106

Tamper Seal

Vanwege de commerciële insteek van Clear Flight Solutions, is één van de eisen voor het nieuwe model de mogelijkheid om de elektronica en het mechaniek af te kunnen schermen zodat de eindgebruiker hier niet (eenvoudig) bij kan. Natuurlijk is het onmogelijk om het compleet af te sluiten, maar gebruikers zullen hun garantie verliezen na het breken van de sealing.

In het algemeen gebruik zal de gebruiker alleen de kop er af halen om de batterij te vervangen of op te laden. De rest van het model blijft dicht. De staart is enkel afneembaar voor assemblage en onderhoud. Dit deel zal dus geseald moeten worden. Er zijn verschillende methoden om een sealing te realiseren:

Was

Met behulp van was kan een schroefkop opgevuld worden.

Breeksticker

Een breeksticker heeft de eigenschappen dat deze zal breken bij het open maken van de vogel. Hierdoor is direct duidelijk dat het achterlijf open is geweest.

Breekpen

Een breekpen in de romp. Bij het openmaken zal deze breken. Het nadeel hierbij is dat dit een extra onderdeel zal zijn wat gemonteerd moet worden aan het eind van de assemblage.

Torx (met pin)

Torx is niet een heel gangbare schroefkop. Toch zie je het steeds vaker. Als oplossing hiervoor is een torx schroefkop met pin. Dit vraagt om een heel ander gereedschap.

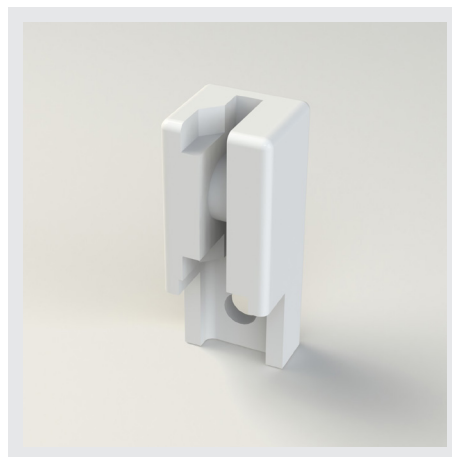
Er is gekozen voor een eenvoudige torx schroef (zonder pin) ter afsluiting van de mechanica en elektronica. Een torx met pin wordt gelijk een stuk groter en zwaarder. De torx schroeven in combinatie met wat was zullen ervoor zorgen dat de gebruiker de staart er niet zo maar af zal halen. Tevens is het optioneel om nog een breeksticker te plaatsen met waarschuwende teksten.

Staartservo

De Robird maakt gebruik van drie servo's. Twee hiervan bevinden zich op de vleugels, de derde wordt gebruikt als hoogteroer. Deze laatste servo moet zich dan ook in de staart bevinden. In het prototype zit de staatservo achter in het model. Deze moet vanuit de kop eruit gehaald worden; dit is een zeer lastig proces en is niet geoptimaliseerd voor assemblage en onderhoud. Voor de staatservo wordt gebruik gemaakt van de Dymond d60 servo. Standaard worden servo's meegeleverd met bevestigingselementen (figuur 107). Van deze onderdelen kan gebruik worden gemaakt, maar 3D Printen is uitermate geschikt om zelf de bevestigingselementen te modelleren en dit zo te integreren in het model (figuur 108). Dit is gedaan door de servo aan twee punten op te hangen (figuur 109) en vervolgens te vergrendelen met een insert (figuur 108, figuur 110: nummer 2). Deze insert wordt vervolgens vast geschroefd met een torx schroef (figuur 110, oranje pijl).



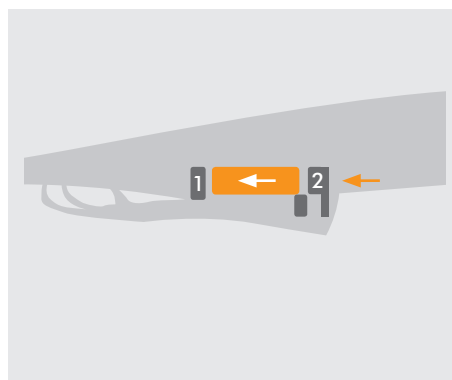
figuur 107



figuur 108



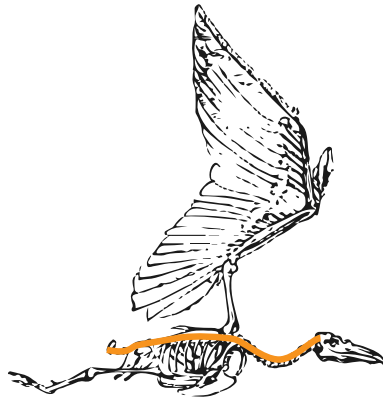
figuur 109



figuur 110

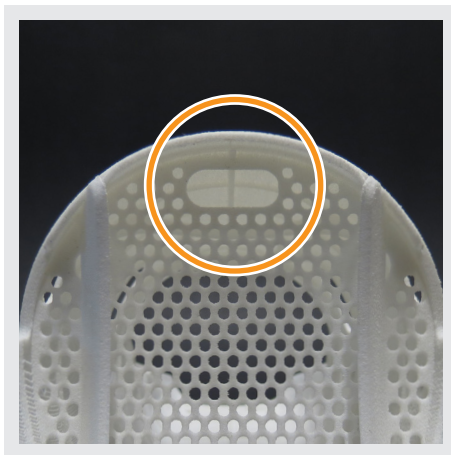
Bedrading in ruggenmerg

Vogels hebben net als mensen een ruggenmerg (figuur 111, oranje lijn). Dit is het belangrijkste deel van het centraal zenuwstelsel¹¹ en het enige contact tussen de kop de romp voor het versturen van signalen.

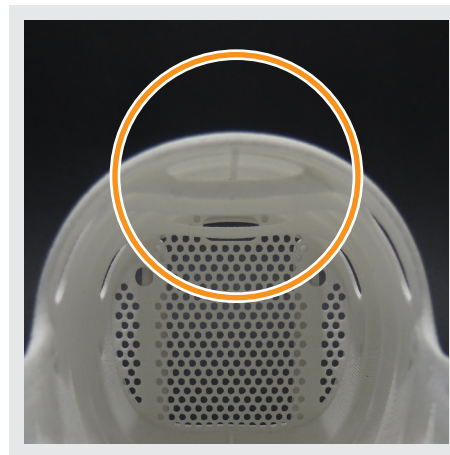


figuur 111

Aan de hand van deze evolutionaire ontwikkeling is ook de bedrading voor de Robird ontworpen. Het is belangrijk dat de bedrading niet beschadigt. Voor de mechanica is ruimte in de buik vrijgehouden voor lichtelijke indeuking. Voor de bedrading is het goed om deze langs de wervelkolom (figuren 112 en 113) van de Robird te laten lopen. Dit is de kortste route van de kop naar het achterlijf en zal het mechaniek niet in de weg zitten.



figuur 112

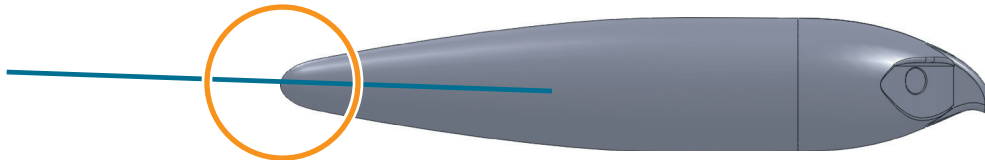


figuur 113

11 - <http://faculty.washington.edu/chudler/spinal.html>

Aerodynamisch voordeel

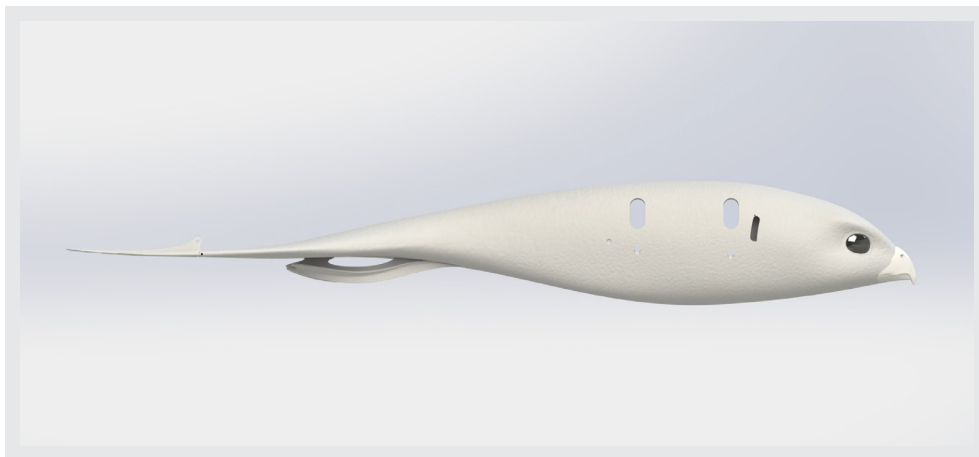
Bij het prototype is het maximale gewicht waar nog mee gevlogen kan worden 750 gram. Door de grote hoeveelheid aan toegevoegde elektronica is het limiet van de Robird bereikt. Terwijl het wenselijk is meer toe te voegen.



figuur 114

Verwacht wordt dat het verschil in de aerodynamische vorm van het model een extra boost in lift en performance kan geven aan de Robird. Het prototype genereert turbulentie (figuur 114, oranje cirkel) en door de symetrische vorm genereert deze weinig tot geen lift.

Het nieuwe model (figuur 115) daarentegen heeft een algehele verbetering van vorm wat zich uit in een betere geleiding van de lucht en een beter generering van lift¹². Door het vloeiende verloop van body naar staart zal hier minder turbulentie ontstaan. Het model heeft net als een echte valk de vorm van een vleugel.



figuur 115

12 - <http://www.allstar.fiu.edu/aero/wing31.htm>

Model #3



figuur 116



figuur 117

Materiaal	PA3200
Materiaal dichtheid	1,22 gram / cm ³
Gemodelleerd volume	178,13 cm ³
Verwacht gewicht	217,31 gram
Gewogen gewicht	234 gram
Wanddikte	1,2mm

Het doel van het derde model (figuren 116 en 117) was het creëren van een functioneel prototype. Hier is dan ook rekening gehouden met alle aspecten die nodig zijn voor het assembleren van de vogel, maar ook het detail.

Gewicht

De vogel is geprint in PA3200, wat voor een gewichtsverhoging van 30% zorgt. Dit is dan ook de reden dat er extra materiaal bespaard is. Parallel aan de ontwikkeling van de romp is ook het mechaniek lichter geworden, wat extra ruimte geeft voor extra gewicht. Het gewicht blijft een groot probleem bij het 3D printen van de romp. Het prototype is licht door het gebruik van de juiste materialen bij de juiste functie, terwijl de romp in zijn geheel in één materiaal geprint wordt. Dit is dan ook de reden dat de staart relatief zwaar is. Dit is een groot oppervlak en door de inaccuratheid van de printer en de daarbij komende fouten bij dunne wanddiktes zit er een limiet aan de huidige mogelijkheden. Het zou dan ook goed zijn om te kijken naar een nieuwe generatie printers die tot dunnere wanddiktes

accuraat kunnen printen, zodat de romp weer naar wanddikte van 1-1,1mm kan gaan. Zeker in de staart scheelt dit snel veel gewicht. Nu zal de romp tot een dunnere wand geschuurd moeten worden om het gewenste gewicht te behalen.

Klauwen

De klauwen (figuur 118) van het model zijn niet groot. De reden hiervoor is het gewicht. Het model is al aan de zware kant (grotendeels door de staart) en een hoog detail in klauwen helpt hier niet bij mee.



figuur 118



figuur 119

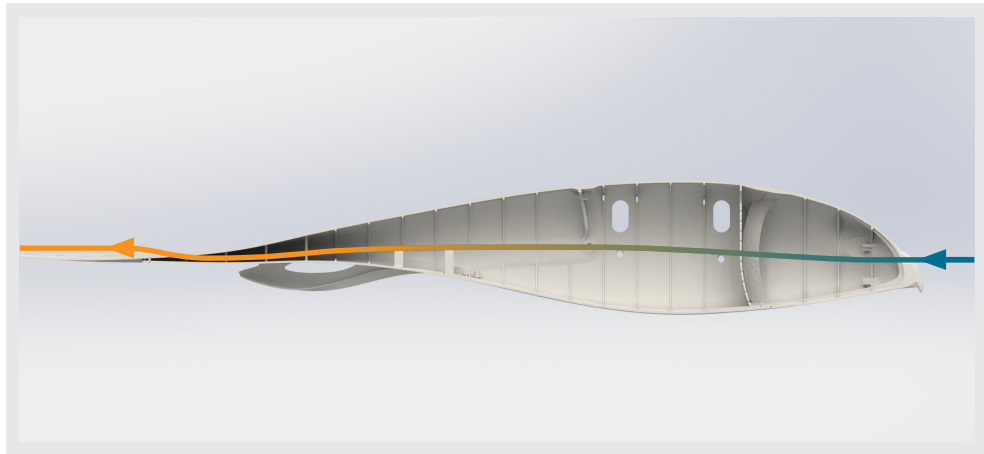
Ardupilot

Bij de Ardupilot kan gewicht bespaard worden door de casing (14 gram) er af te halen. Dit geeft als extra voordeel dat de Ardupilot beter te implementeren valt. Door fixatie op twee punten zit de Ardupilot vast, achter het mechaniek in de body (figuur 119).

Koeling

De Robird wordt na intensief gebruik warm. De onderdelen die het warmst worden zijn de batterij en de motorcontroller. De lucht komt door de neusgaten van de Robird naar binnen en deze kan weer weg vlak voor het staart scharnier (figuur 120). Optimaal zou het zijn als hier een vortex gecreëerd kan worden. De versnelling van de lucht zorgt voor een betere koeling. Het drukverschil dat ontstaat bij een vortex¹³, zorgt ervoor dat extra lucht de Robird ingezogen wordt.

13 - http://maxwell.ucdavis.edu/~cole/phy9b/notes/fluids_ch3.pdf



figuur 120

Kop

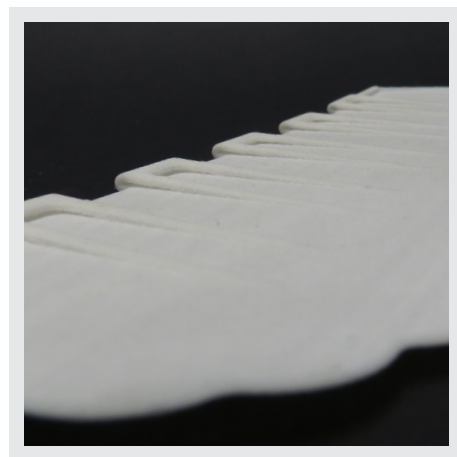
De kop is volledig geparametriseerd in SolidWorks (figuur 121). Het probleem bij SolidWorks is dat free-forming praktisch niet mogelijk is. De enige optie was dus het parametriseren van de kop. Hiervoor is de kop opgedeeld in 4 delen: ogen, snavel boven, snavel onder en de overige kop vorm.

Staart

Voor extra besparing van gewicht is het staartvlak nog meer geoptimaliseerd door meer materiaal weg te laten (figuur 122). Er is wel extra materiaal toegevoegd aan de rand om zo vervorming na afkoeling tegen te gaan.



figuur 121



figuur 122

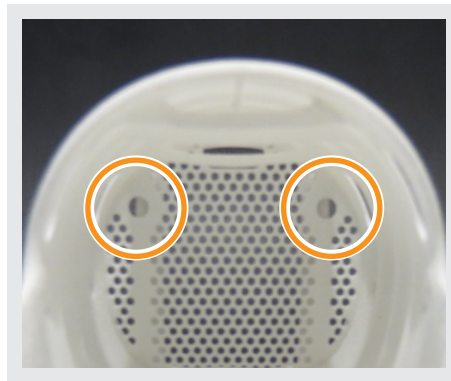
Levensduuranalyse

Clear Flight Solutions stelt als eis dat de Robird 1000 vliegreuren kan meegaan. Vleugels vallen als enige niet onder deze eis, verwacht wordt dat deze vaak vervangen moeten worden door slechte landingen. Om iets te kunnen zeggen over de mogelijke levensduur van de romp moet gekeken worden hoe deze wordt belast.

De romp staat in verbinding met het mechaniek en daarmee de vleugels door middel van vier punten (figuren 123 en 124, oranje cirkel) op twee assen. Dit is het deel van de Robird dat daadwerkelijk de vliegbeweging creëert. De romp zelf zorgt enkel voor de balans in de lucht.



figuur 123



figuur 124

De Robird vliegt met 5 á 6 slagen per seconde. Dit houdt in dat de Robird maximaal 21.600.000 spanningswisselingen doorgaat gedurende deze 1000 uur. Op elk punt komt een kracht van 9 N per slag te staan. Op den duur treedt vermoeiing¹³ op door de oscillerende kracht op de vier punten.

Belangrijk bij vermoeiing is de temperatuur. Bij amorfe materialen als Nylon ontstaat glastransitie. Bij verhoging van de temperatuur zullen de polymeerketens verzachten. De ketens zullen hierdoor kristaliseren, waardoor de stijfheid van het materiaal vermindert en er meer deformatie van het materiaal optreedt. Dit zorgt weer voor hogere spanningsvelden en microscheurtjes¹⁴. De temperatuur waarbij dit gebeurt met Nylon ligt lager dan bij een FRP (Fiber-Reinforced Polymer). Bij een FRP¹⁵ is dit namelijk 40°C-70°C in tegenstelling tot PA12, waarbij dit proces al begint bij 24°C. Wanneer de temperatuur laag gehouden wordt is de levensduur minimaal 100 maal langer dan wanneer dit niet lukt. Het is dus

goed dat gekozen is voor printen met PA3200 om de kans op kristallisatie te reduceren. Wanneer de Robird bij hoge temperaturen vaak en lang gebruikt wordt, dan zal de kwaliteit van de romp sneller achteruit gaan.

In de meest ideale situatie wordt de romp op enkel vier punten belast met een oscillerende kracht dat wordt gegenereerd door de slagvlucht. Dit is echter niet het geval. Er zijn vele factoren die invloed hebben op deze ideale situatie:

<i>Wind</i>	Door wind kunnen er onverwacht verhoogde krachten op het model komen.
<i>Sturing</i>	Door sturing zullen de oscillerende krachten de ophangpunten niet constant zijn.
<i>Slagfrequentie</i>	In vele gevallen zal gevlogen worden met de maximale slagfrequentie van 6 Hz. Het is echter gebleken dat de accuduur hoger ligt wanneer er met een lagere slagfrequentie wordt gevlogen. Dit heeft invloed op de algehele levensduur van de romp.
<i>Crash</i>	Eén van de grootste onbekende en onbepaalde krachten op de romp zullen komen door crashes.

Er is niet een concreet antwoord te geven op de levensduur van de romp. Wel is het waarschijnlijk dat het model niet 21.600.000 spanningswisselingen zal overleven. Ook de temperatuur zal veel invloed hebben op de levensduur. De batterij en het mechaniek worden warm na intensief gebruik van de Robird. Dit zal mogelijk kristallisatie van het materiaal veroorzaken wat zorgt voor een verkorting van de levensduur.

Het enige wat gedaan kan worden voor een maximale levensduur is het model hier naar te ontwerpen. Hiervoor zijn keuzes gemaakt als materialen versterken met glasvezel, maar ook het tussenschot geeft extra stevigheid bij een crash aan de ophangpunten. De eerste groep gebruikers zullen aantonen wat de levensduur van de Robird is.

13 - <http://mail.vssd.nl/hlf/m013h02.pdf>

14 - <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941809002086>

15 - <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29CC.1943-5614.0000260>

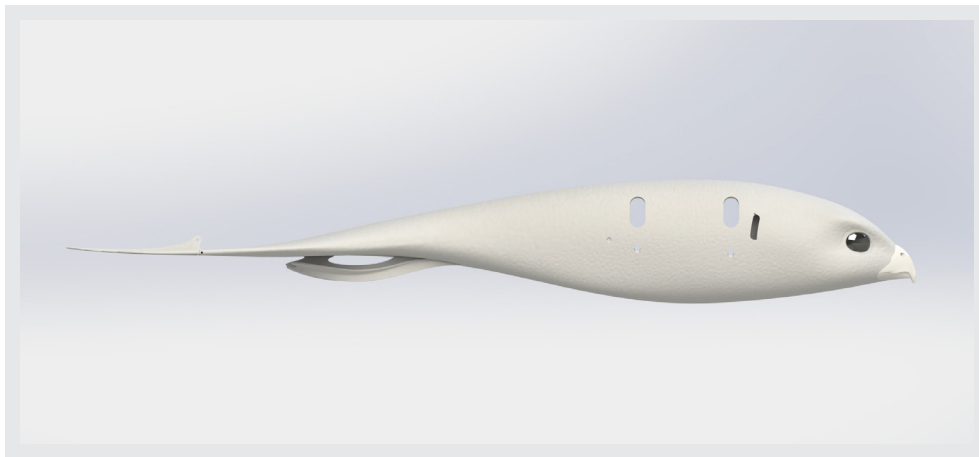
Conclusie

Printen

Het printen door middel van selective laser sintering blijkt de juiste methode te zijn. Door te printen met PA3200 is het model licht en sterk. Het blijkt echter zeer belangrijk om de printrichting te definiëren. Wanneer verschillende delen in andere richtingen geprint worden, zal dit niet meer goed geassembleerd kunnen worden. Ook blijkt de kwaliteit van het materiaal en het uiteindelijke gewicht van het model afhankelijk te zijn van de printrichting.

Model

Het model (figuur 125) is veel realistischer geworden dan het prototype. Uiteindelijk is het model wel zwaarder dan initieel geëist. Het 3D printen heeft als nadeel dat er altijd een minimale wanddikte nodig is. Dit houdt in dat delen als de staart van de romp veel gewicht met zich meebrengen. Dit is ook gelijk een reden waarom vleugels niet van zware materialen als PA3200 geprint kunnen worden. Het mechaniek is tijdens dit project wel lichter geworden, wat meer ruimte gaf in de vormgeving. Ook de aerodynamische vorm verhoogt naar verwachting door middel van extra lift het maximale gewicht. Toch zijn er concessies gedaan wat betreft het realisme. Het opdelen van de vogel heeft ervoor gezorgd dat de assemblage en het onderhoud veel eenvoudiger is dan voorheen. Onderdelen als de staartservo kunnen nu eenvoudig geassembleerd worden.



figuur 125

Aanbevelingen

Printen

De minimale wanddikte blijkt een knelpunt bij 3D printen. Er worden echter steeds betere 3D printers ontwikkeld. Het is goed om de markt in de gaten te houden of de wanddikte dunner kan.

Materialen

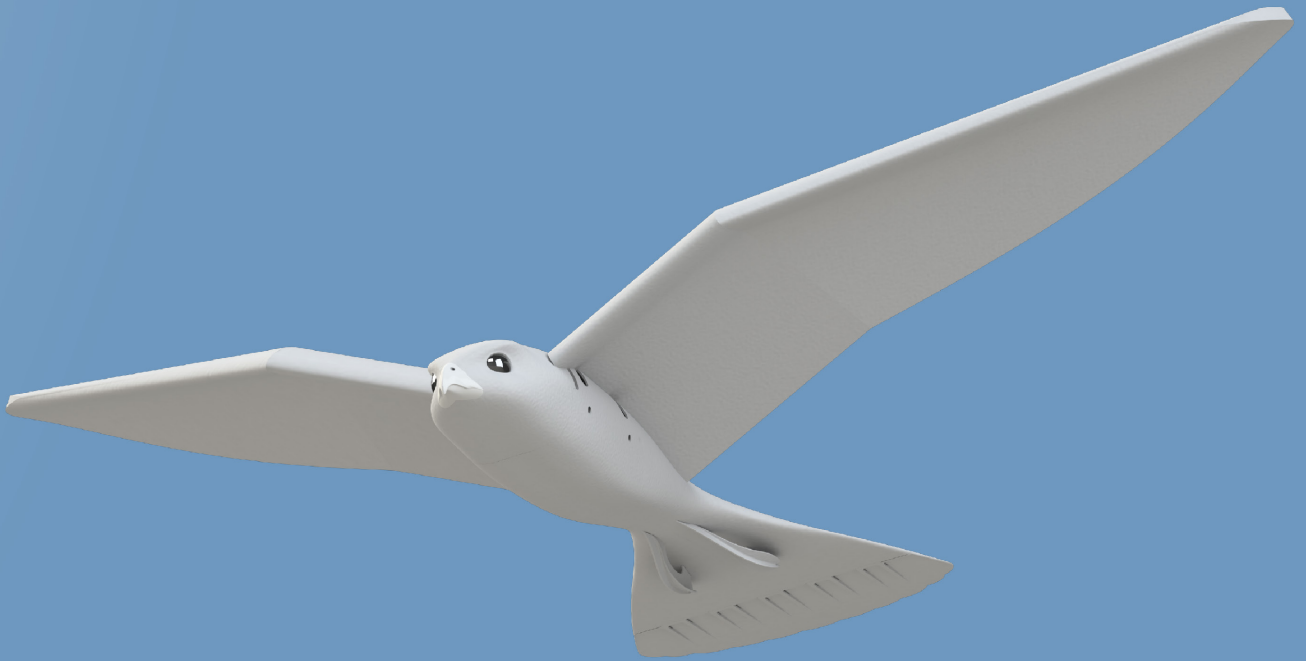
Er is niet één materiaal dat per deel van romp de gewenste eigenschappen heeft. Het zou goed zijn gebruik te maken van meerdere materialen naast PA3200. Zo kan de snavel van rubber geprint worden om de klappen beter op te kunnen vangen. Ook zou er gekeken kunnen worden naar veel meer een ribbenconstructie, waarbij een veel lichter materiaal gebruikt kan worden als huid.

Klauwen

De klauwen zijn op dit moment nog het enige onderdeel van de Robird dat er niet realistisch uit ziet. Het zou goed zijn dit nog te optimaliseren.

Modelleren

SolidWorks is niet het meest geschikte programma voor het parametriseren van free-form objecten. Er zal gebruik gemaakt kunnen worden van een plug-in als Power Surfacing om de efficiëntie van modelleren te verhogen.



ROBIRD PEREGRINE FALCON