



KITE POWER



REINHART PAELINCK

MASTERPROEF

INTEGRATED PRODUCT DESIGN
2MA PO 2009-2010

PROMOTOR: PROF.DR. MORITZ DIEHL



boeiconstructie bij zonsondergang

Inhoudstafel

PRODUCTKANDIDAAT

Inhoudstafel 3, Voorwoord 5, Kitepower 7, Historiek 8, Vliegers 10, Crosswind Kite Power 12

SPECIFICATIES

Energie 17, Productie 18, (Offshore) Windenergie 21, Grootte 22, Quickdesigns 24,

SYSTEEMONTWERP

Systeemontwerp 27, Tensairity 28, Vleugelvorm (1) 29, Ring Wing 30, Krachtverdeling 31, Vleugelvorm (2) 32, Prototype 35, Depower 36, Sturen 38, Stabiliteit 39, Energievoorziening 41, Landing 42, Lancering 43, Beschermen 44, Lijn oprollen 46, Generator 48

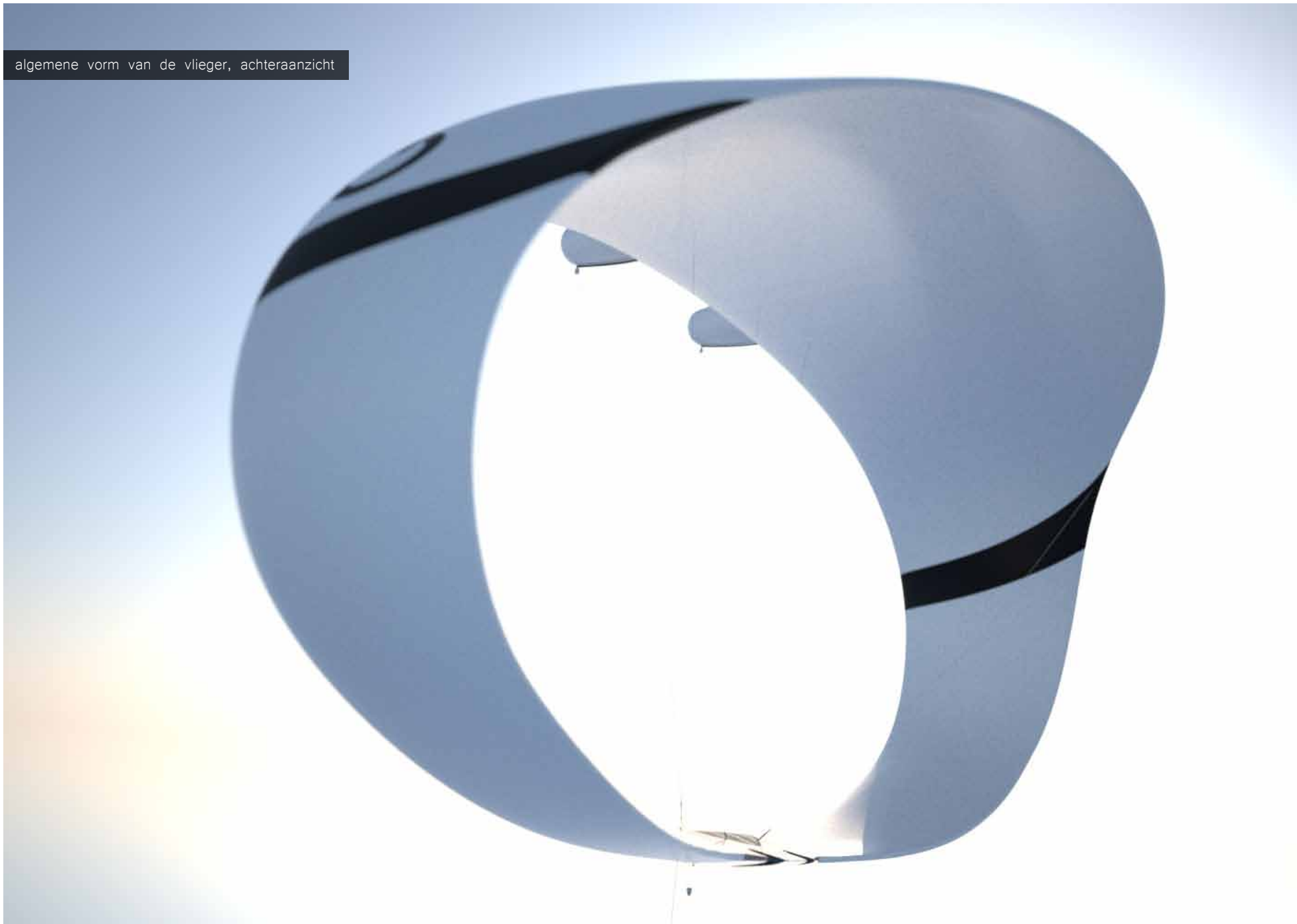
PRODUCTONTWERP

C-Core 50, Vrijheidsgraden 51, Afwerking Generator 53, Overbrenging 54, Controle (1) 56, Ophanging 57, Landingsnet 58, Ondersteuning 60, Vlotters 61, Verankering 62, Stroomvoorziening 63, Landingsscenario 64, Constructie 66, Sturen 69, Depower 70, (De-)Compressie 72, Batterij & Koeling 73, Ram Air Turbine 74, Positionering 76, Controle (2) 77, Assemblage 78

REFERENTIES,

Besluit 81, Bronnen 82, Dankwoord 83

algemene vorm van de vlieger, achteraanzicht



Voorwoord

Beste lezer,

Graag stel ik u in dit dossier het resultaat voor van mijn masterproef-project KitePower. Vanuit een grote persoonlijke interesse in alles wat met 'vliegers' en 'vliegen' te maken heeft, in combinatie met de steeds groter wordende alternatieve energie-problematiek, werd dit project in het voorjaar van 2009 voorgesteld aan een jury en goed bevonden als traject voor de masterproef.

Om meer voeling te krijgen met het wel erg uitgebreide thema werd reeds in de zomer-vakantie gezocht naar relevante artikels, patenten, vergelijkbare trajecten,... om dan begin oktober meteen in actie te kunnen komen.

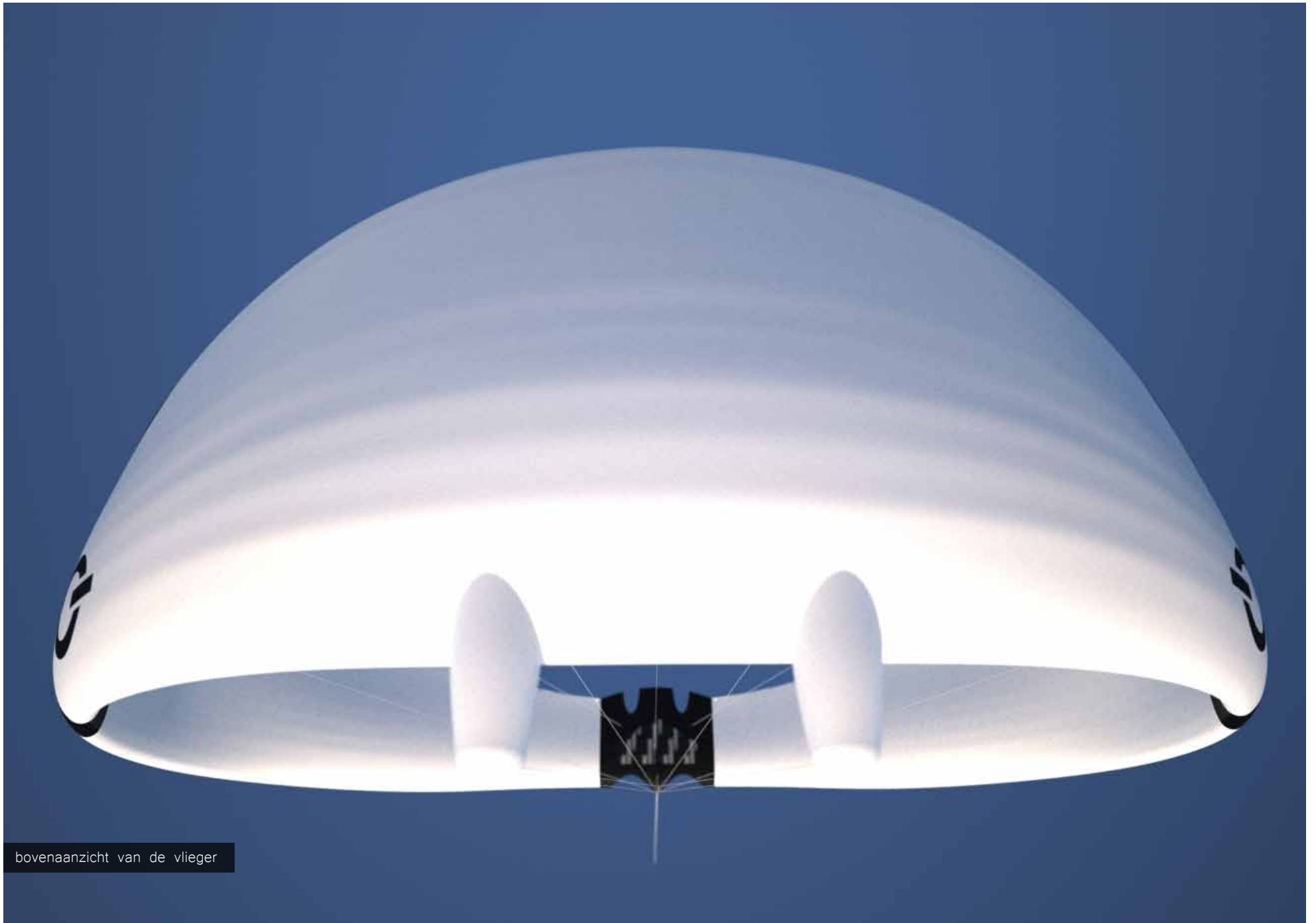
Omdat het een relatief nieuwe technologie betreft, werd in overleg met de mentor reeds snel besloten dat het in het geval van dit traject niet relevant zou zijn om elk productonderdeel tot op detailniveau uit te werken. Belangrijker is dat het een conceptueel ontwerp is met uitstraling, dat de mensen kan overtuigen van het potentieel van kite-energie.

Zo worden in dit ontwerp de mogelijke problematieken omtrent deze energietechnologie vastgelegd, en worden oplossingen voor deze problemen gecombineerd in KitePower. Dit wil niet zeggen dat KitePower de enige 'goede' manier is om windenergie te oogsten met behulp van vliegers, maar wel dat het een mogelijke oplossing is die voldoet aan alle vooropgestelde eisen en specificaties.

Om het traject, dat gevolgd werd om deze oplossing tot stand te doen komen, in detail te volgen, nodig ik u uit om dit dossier door te nemen.

Veel lees- en kijkplezier,

Reinhart Paelinck
Mei 2010



bovenaanzicht van de vlieger

Kite Power

KitePower zal de toekomst van de alternatieve energiemarkt mee helpen bepalen. Door een reeks innovatieve technologieën wordt het mogelijk om op een efficiënte manier energie uit de wind te oogsten.

KitePower reikt een totaal nieuwe manier aan om windenergie op een offshore-locatie te oogsten. Dit doet het product door de trekkracht van bestuurbare vliegers volgens de 'Crosswind Kite Power'-techniek van Miles L. Loyd om te zetten in elektriciteit.

Een vlieger neemt de rol over van de wieken van een windturbine, een kabel neemt de rol over van de toren, en de generator bevindt zich in een drijvende constructie op zee.

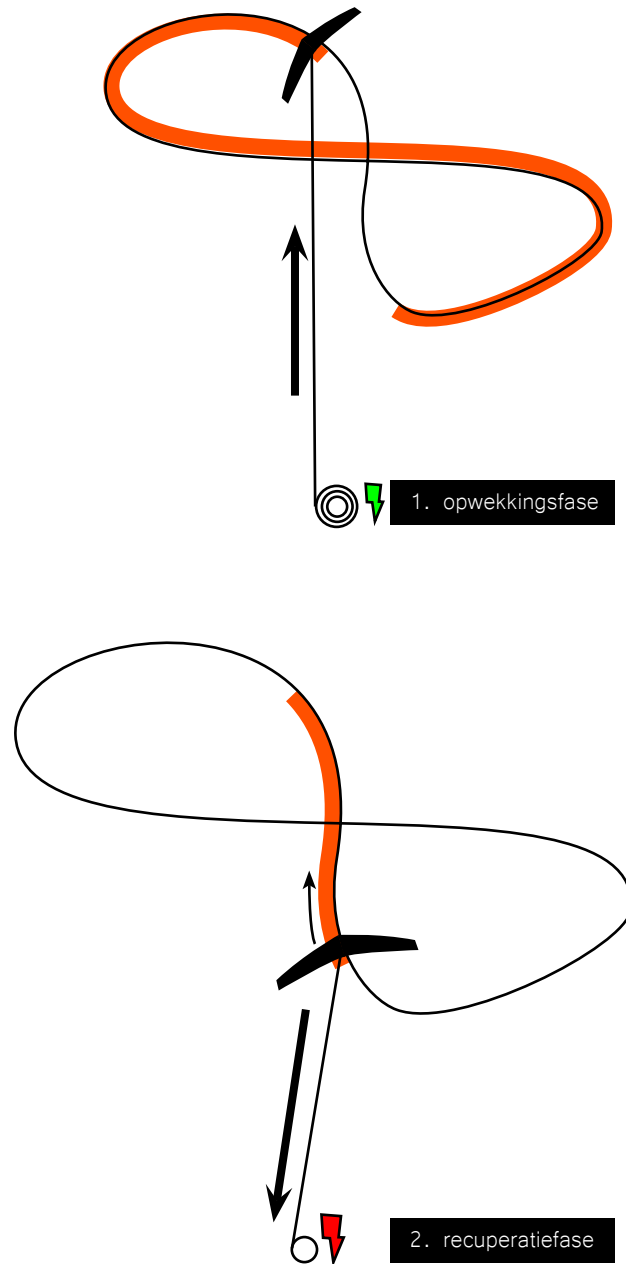
De trekkracht van de vlieger wordt omgezet in elektriciteit door middel van een jojo-systeem in 2 fasen. De kabel waaraan de vlieger bevestigd is, is gewikkeld rond een as, die op zijn beurt de generator aandrijft.

Als de vlieger een trekkracht uitoefent, wordt de kabel rond de as afgewikkeld en wekt de generator door de rotatie van de as stroom op. Dit wordt de opwekkingsfase genoemd, die, afhankelijk van de windsterkte, ongeveer 15 seconden in beslag neemt.

Omdat de kabel echter een beperkte lengte heeft, dient deze wanneer hij volledig afgewikkeld is weer opgerold te worden. Wanneer deze kabel terug rond de as gewikkeld wordt, stopt de vlieger tijdelijk met trekken, om het energieverlies van deze recuperatiefase zo veel mogelijk te beperken. Deze fase neemt ongeveer 5 seconden in beslag.

Om deze afwisseling tussen opwekken en recupereren optimaal te laten verlopen, wordt de vlieger automatisch gestuurd door een computer. Deze laat de vlieger een bepaald '8-vormig' patroon afleggen in de wind. Op het minst efficiënte stuk in dit patroon wordt de recuperatiefase uitgevoerd.

Ook het landen en lanceren van de vlieger, wat nodig kan zijn bij windstilte, storm, onweer of materiaalpech, verloopt volautomatisch. Zo wordt de veiligheid ten allen tijde gegarandeerd.



Historiek

Iedereen die in zijn jeugd jaren naar het strand is geweest kent hem wel... de vlieger. Maar hoe lang gaat deze al mee, en welke evolutie heeft deze doorgemaakt? Door een literatuuronderzoek werd reeds snel veel duidelijk.

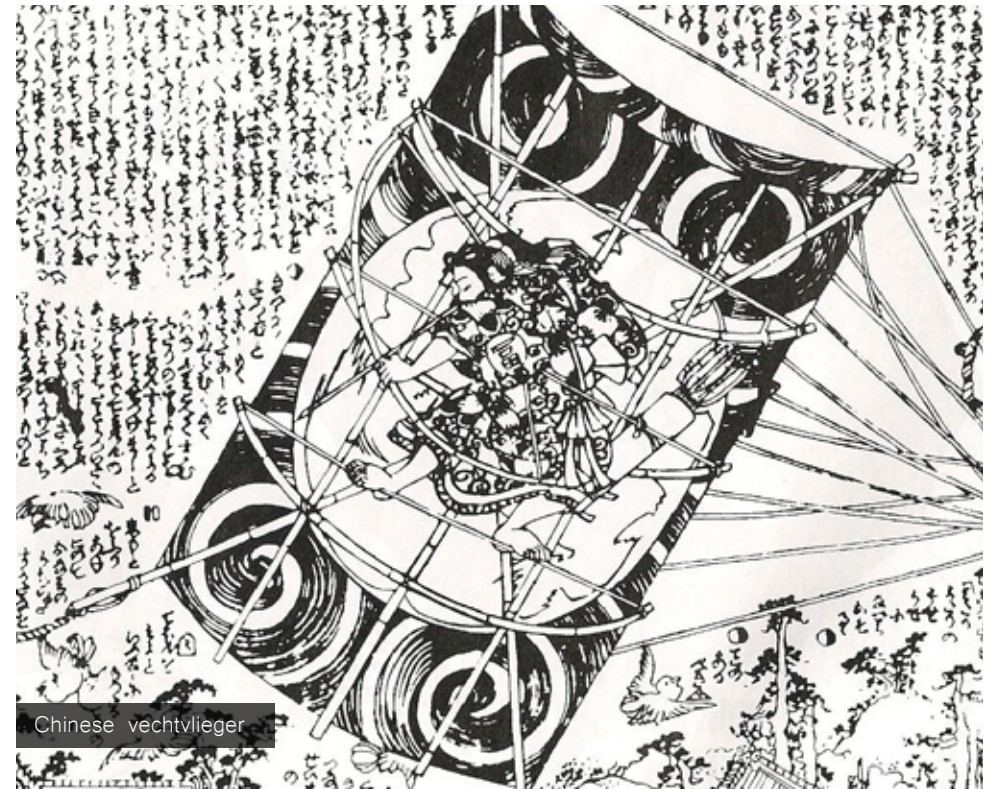
Vliegers bestaan al enkele duizenden jaren, en ontstonden in het Verre Oosten. Vele legendes en volksvertellingen beschrijven de verhalen waarbij de eerste vlieger tot stand zou zijn gekomen, en variëren tussen wegwaaiende tenten, opvliegende bladeren, de zeilvaart,...

De oudst bekende geschreven berichten over vliegers gaan terug tot enkele eeuwen voor het begin van onze jaartallen, en stammen uit China. Daar werden deze vliegers, volgens Clive Hart, gebruikt voor militaire doeleinden.

In Europa bleef de vlieger echter lange tijd onbekend, en zijn intrede en reputatie in Europa wordt geïllustreerd door zijn Latijnse naam: 'Draco', of 'Draco Volans'. Draakvormige vliegers stammen uit China, en zouden aanleiding hebben gegeven tot vele mythen over afschrikwekkende monsters, terwijl het echter 'gewoon' vliegers waren.

Vanaf 1600 begint de vlieger aan zijn grote opmars in West-Europa, en dit in de zeevarende landen. Koopvaarders die naar de Aziatische landen trokken zagen daar de vliegers en probeerden ze thuis na te maken.

Tijdens de 18de eeuw maakten ook wetenschappers gebruik van het dan reeds algemeen verspreide 'kinderspeelgoed'. Zo werd de temperatuur op verschillende hoogten in de atmosfeer onderzocht door thermometers te hangen aan een aantal vliegers, met als 'touw' een pianosnaar.

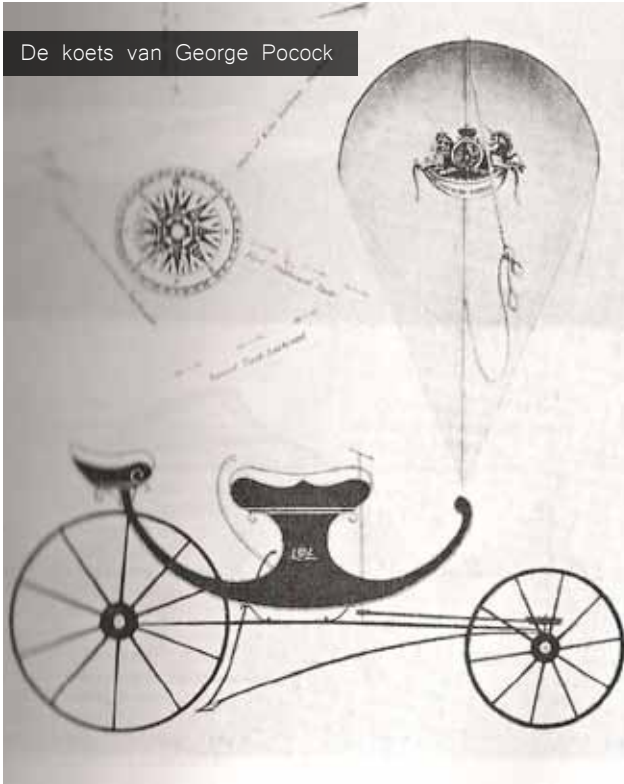


Chinese vechtvlieger

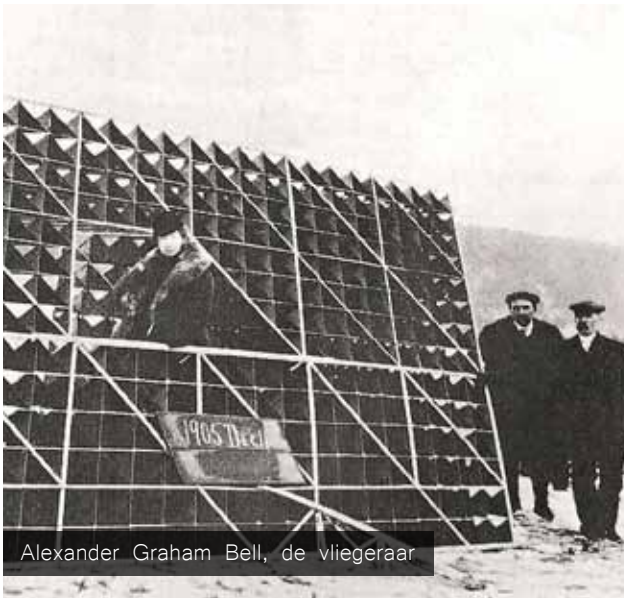
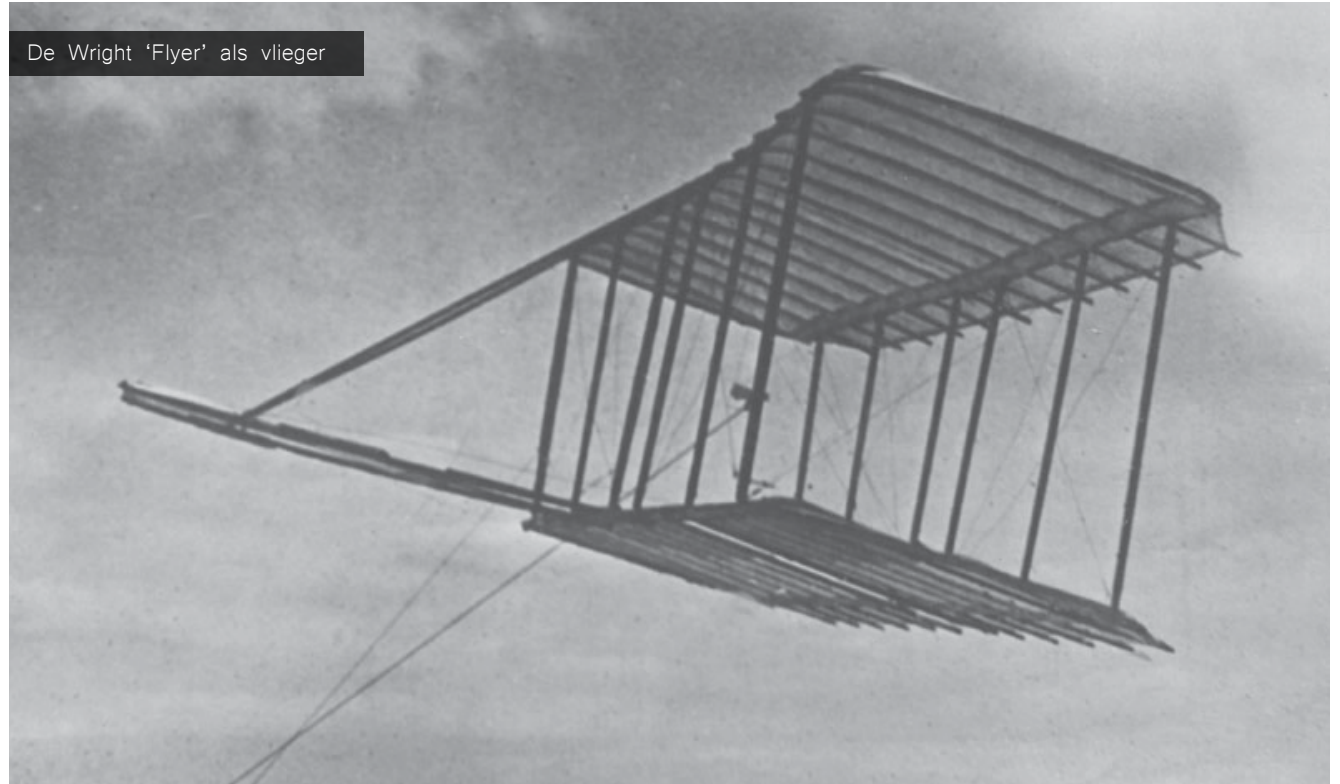


Vliegeren in 1600

De koets van George Pocock



De Wright 'Flyer' als vlieger



Alexander Graham Bell, de vliegeraar



Draco Volans

Eind 18de eeuw rijdt George Pocock rond in een 'koets zonder paarden', aangedreven door een vlieger.

Tijdens de 19de eeuw dient de vlieger als basis voor de hedendaagse luchtvaart. De eerste vliegtuigen van de gebroeders Wright werden steeds eerst als vlieger getest, voor ze er zelf mee het luchtruim kozen.

De meest bekende vliegeraars zijn echter Benjamin Franklin, die in 1752 met een vlieger met geleidende draad zou hebben bewezen dat onweer een elektrisch verschijnsel is, en Alexander Graham Bell, die gigantische modulair opgebouwde vliegers bouwde in een poging om zelf te kunnen vliegen.

Met het succes van de luchtvaart werd de vlieger weer 'gedegradeerd' tot kinderspeelgoed.

Vliegers

Bij het woord 'vlieger' denkt iedereen meteen aan een klassieke kruisvlieger. Er zijn echter vliegers in alle soorten en maten, en om te kijken welke manieren er worden gebruikt om vliegers te construeren, wordt op deze pagina een oplistijng gemaakt van de verschillende types.

Een eerste categorie is de decoratieve eenlijnsvlieger. Deze kan men niet gecontroleerd besturen en blijft stabiel in de lucht hangen dankzij zijn staart.

Ook de tweelijns stuntvlieger wordt regelmatig gezien op menig strand. Deze kan actief bestuurd worden door de twee lijnen van lengte te veranderen.

Een derde categorie, de krachtvliegers, is uitgebreider gecategoriseerd omdat deze relevant is voor de masterproef. De eerste krachtvlieger, de NPW, resulteerde uit een project van de NASA die op zoek ging naar een bestuurbare parachute. Deze is enkel gemaakt uit doek en lijnen.

Begin jaren '80 werd de Flexifoil bedacht door twee studenten. Dit is een vlieger waarbij de lucht opgevangen wordt in een aantal luchtkamers waardoor hij een aerodynamische vorm bekommt. De algemene vorm wordt ook ondersteund door een glasvezel stok aan de voorkant.

Een decennium later maakte Peter Lynn de C-Quad. Deze vlieger bestaat uit een enkele laag stof, die in vorm wordt gehouden door een combinatie van carbon fiber stokken en lijnen.

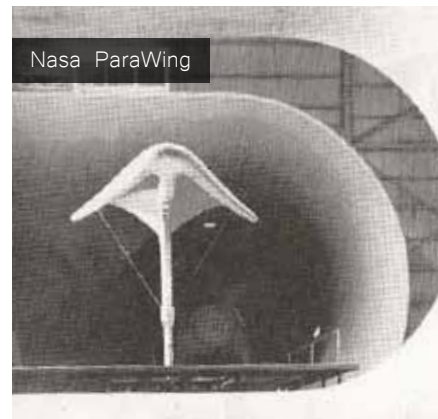
De lijnen die aan het doek van de vlieger vastgemaakt zijn, noemt men de toming.



Waterjuffer van eigen makelij



De stuntvlieger



Nasa ParaWing



De Flexifoil



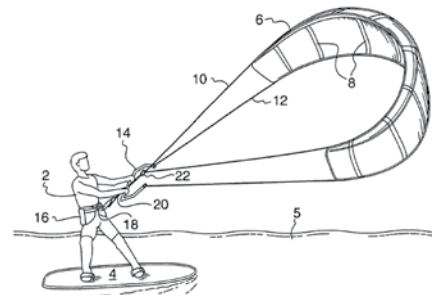
De C-Quad



De depowerbare matrasvlieger



Zweefvliegtuig aan lier



Zelfs 'kitesurfen' werd gepatenteerd

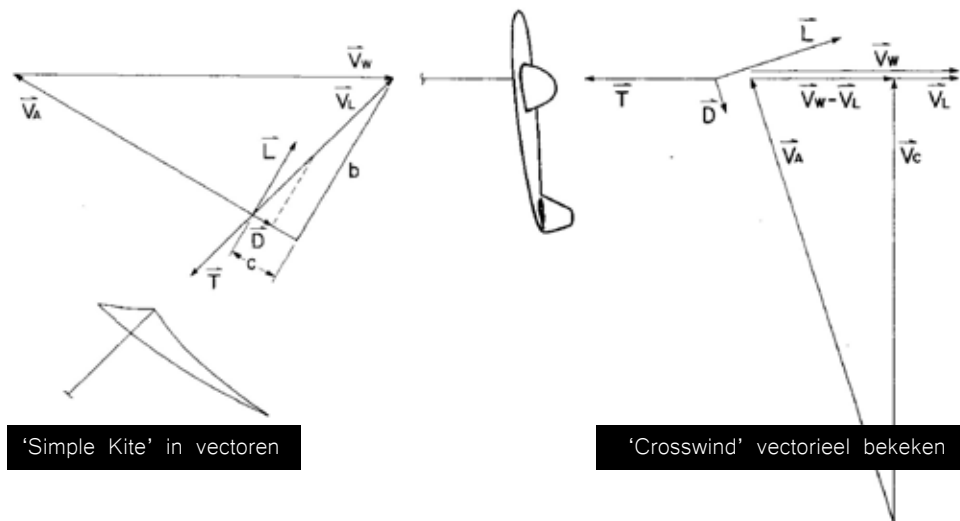
Met de opkomst van het kitesurfen kwam een groot innovatieproces op gang, dat tot op heden nog steeds bezig is. De performantie van deze vliegers kan weergegeven worden met de L/D ratio, de verhouding tussen liftkracht en weerstand. Dit getal dient zo hoog mogelijk te zijn bij KitePower, maar bij het kitesurfen zelf maakt dit getal het verschil tussen 'snel naar beneden komen na een sprong (lage L/D)' of 'zacht zweven (hoge L/D)'.

Zo werd de 'matrasvlieger' ontwikkeld, die zijn aerodynamische vorm krijgt door een combinatie van een toming en luchtkamers. Deze bestaat zowel als 'gewone' vlieger als een 'depower'-vlieger, waarbij de kracht van de vlieger instelbaar is door de verschillende lijnlengtes ten opzichte van mekaar te variëren.

De L/D ratio's schommelen tussen 3,5 en -maximum- 11. Deze begrenzing wordt bereikt omdat de voorzijde van de vlieger 'kreuken' vertoont, wat weerstand veroorzaakt.

Een vlieger die de laatste jaren de meeste evolutie heeft doorgemaakt is de 'tubekite'. Dit is een vlieger die meestal enkel bestaat uit een enkele laag doek en een combinatie van opblaasbare elementen, maar waar eventueel aan de vleugeluiteinden nog extra carbon stokken worden ingebracht om de vorm extra te ondersteunen. Het profiel van de vlieger is echter niet geschikt voor een hoge L/D ratio door de enkele laag stof. De voorzijde van de vlieger is echter wel mooi gevormd door het opblaasonderdeel, wat zorgt voor een L/D tussen 3 en 6.

Het doel van al deze constructiemethoden is om een zo licht mogelijke, en tegelijk zo aerodynamisch performant mogelijke vorm te bekomen. Qua aerodynamisch performante vlieger spant het zweefvliegtuig dat aan een lier wordt opgelaten de kroon, met een L/D ratio van meer dan 20 tot zelfs 35.



'Simple Kite' van 100 m²

Crosswind Kite Power

Reeds in 1980 beschreef Miles L. Loyd hoe vliegers gebruikt kunnen worden voor elektriciteitsgeneratie. In de Journal of Energy werden de drie mogelijke manieren beschreven om dit te doen, elk gebaseerd op een ander aspect van de vlieger.

Een eerste techniek 'Simple Kite' maakt gebruik van de lift-eigenschappen van een statische vlieger. De lijn van deze vlieger wordt gewikkeld om een spoel die gekoppeld is aan de as van een generator. Als de vlieger een liftkracht ontwikkelt, wordt de as van de generator aangedreven, waardoor energie opgewekt wordt. Aangezien de liftkracht bij een vlieger instelbaar is, kan deze kracht lager gemaakt worden om de lijn weer op te rollen, zodat een cyclus van op- en afrollen ontstaat.

De energie die uit de wind gehaald kan worden, is afhankelijk van de snelheid waarmee de lijn op- en afgerold wordt.

Ook bij de tweede techniek 'Crosswind Kite Power' wordt gebruik gemaakt van een op- en afrolsysteem; Echter wordt hier wel gebruik gemaakt van een bestuurbare vlieger, wat vele voordelen met zich meebrengt.

Een bestuurbare vlieger kan namelijk gebruik maken van de schijnbare wind. Door dit verschijnsel vliegt de vlieger sneller dan de wind, en kan hij ook meer kracht genereren. De energie die uit de wind gehaald kan worden stijgt namelijk kwadratisch met een verhoging van de windsnelheid.

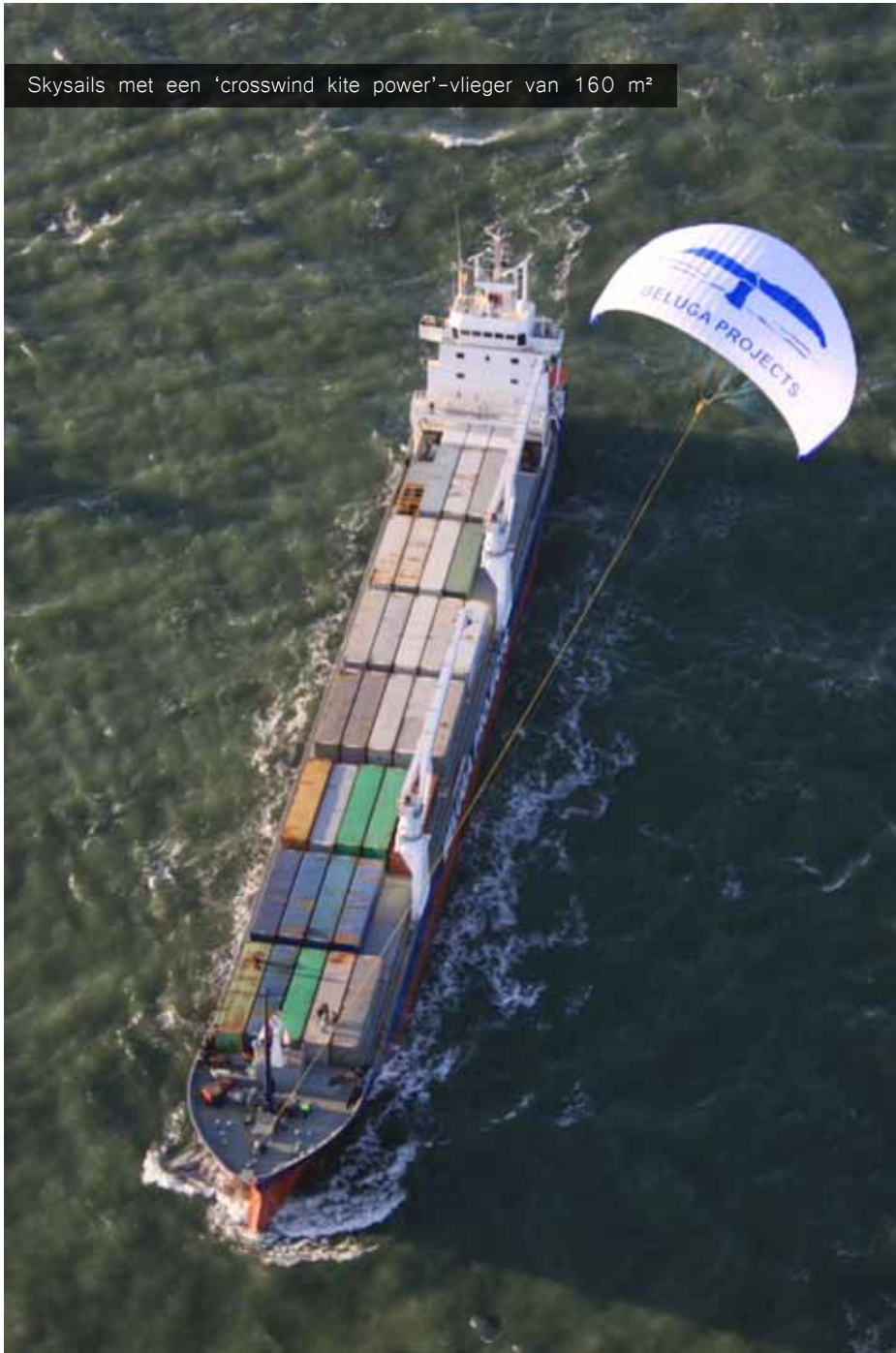
De trekkracht van de vlieger kan als volgt worden berekend:

$$F = (L/D)^2 (V_l/V_w) (1 - V_l/V_w)^2$$

De V_l is de snelheid waarmee de vliegerlijn wordt afgerold, en V_w is de effectieve windsnelheid. De energie die opgewekt kan worden door middel van het hele systeem is dan ook af te leiden uit de trekkracht en deze afrolsnelheid. Bij deze techniek is het de uitdaging om een zo hoog mogelijke liftkracht te bekomen, om tijdens de 'trekfase' een zo hoog mogelijke kracht te ontwikkelen.

Een derde techniek beschrijft 'Drag Power', die de windenergie oogst door middel van een turbine die wordt bevestigd op de vlieger zelf. Deze turbine oogst, in tegenstelling tot een windturbine op de begane grond, niet de effectieve windsnelheid, maar wel de schijnbare windsnelheid. Bij deze techniek is het de uitdaging om een vlieger met zo weinig mogelijk drag te ontwikkelen. Hier is de trekkracht niet belangrijk, en zorgen de turbines reeds voor een grote weerstand.

Skysails met een 'crosswind kite power'-vlieger van 160 m²



Peter Lynn met een vlieger van 1000m².

Sinds de jaren '80 is er echter weinig gebeurd met het werk van Miles L. Loyd. Na het verlopen van zijn patent begin jaren 2000, kwam 'plots' heel wat beweging in dit vakgebied.

Het meest bekende bedrijf dat grote vliegers gebruikt, is zeker en vast het Hamburgse SkySails GmbH. Dit bedrijf zet de trekkracht van een bestuurbare vlieger echter niet rechtstreeks om naar elektriciteit, maar gebruikt de energie van de vlieger om grote schepen mee voort te trekken, wat resulteert in een brandstofbesparing tot 30%.

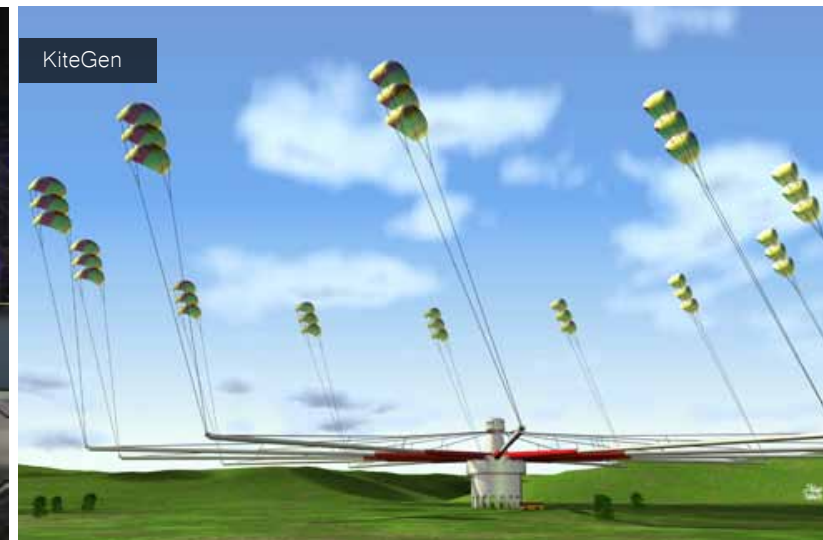
De vliegers van Skysails zijn depowerbare matrasvliegers, die geschaald zijn naar een grootte tot 160m².

Dit zijn echter niet de grootste vliegers die er zijn. Vliegergoeroe Peter Lynn maakte voor enkele landen reeds een 'vlag'-vlieger van meer dan 1000m².

De totale ontwikkelde liftkracht van de vlieger hangt natuurlijk af van de grootte van de vlieger. De bovengenoemde vlieger van 1000m² moest bij een klein briesje reeds in bedwang gehouden worden door 5 bulldozers !

De totale oppervlakte van een bestuurbare vlieger wordt gemeten als hij volledig opgeplooid op de grond ligt, terwijl het de geprojecteerde oppervlakte is die van belang is bij het berekenen van de trekkracht. Deze geprojecteerde oppervlakte is het stuk van de vlieger dat effectief wind vangt bij het vliegeren, en zo dus bijdraagt tot de lift.

Bij de meeste matrasvliegers ligt de geprojecteerde oppervlakte op 80-85% van de totale oppervlakte, waarbij de overige 15-20% bijdraagt tot de zijdelingse stabiliteit van de vlieger.



Skysails is echter niet het enige bedrijf dat actief is in de 'grote' vliegerindustrie. De laatste jaren zijn een groot aantal nieuwe bedrijven gestart met als doel windenergie te oogsten met behulp van vliegers. Zij noemen deze nieuwe bedrijfstak 'Airborne Wind Energy', of ook 'High Altitude Wind Power'. Ook tijdens het jaar waarin deze masterproef werd geschreven startten nog een 5-tal spelers binnen deze markt, dus de opsomming die hierna volgt is niet exhaustief.

Een eerste bedrijf dat kite-energie gebruikt op de eerste manier van Loyd, nl. de 'Simple Kite' is Magenn. Sommige lezers zullen dit product reeds kennen vanuit een reportage op Discovery Channel, waarin de voor- en nadelen van dit systeem uitvoerig worden besproken. Magenn plant het gebruik van grote zeppelins, die op hun dwarse as roteren door het Darrius-effect. Deze rotatie wordt door generatoren in de uiteinden van de zeppelin omgezet in elektriciteit, die via een geleidende kabel naar de begane grond wordt gebracht.

Dit systeem heeft echter nog een aantal te overwinnen problemen vooraleer grootschalige markt-introductie mogelijk is. Het grootste is afhankelijkheid van helium om het systeem in de lucht te houden. Dit kostbare drijfgas maakt van deze alternatieve energiecentrale toch weer een centrale die vertrouwt op fossiele brandstoffen.

Het Italiaanse KiteGen exploreert de mogelijkheden van vlieger-energie op gigawatt-schaal. Zo ontwerpen ze een energiecentrale die kan concurreren met een kerncentrale, door grote aantallen vliegers op een carrousselconstructie te plaatsen die een verticale as aandrijft.

KiteGen heeft reeds een functionerend prototype gebouwd met een opbrengst van 80kW. Dit prototype functioneert volledig autonoom, en toont dus aan dat een kite-energiecentrale volledig automatisch kan opereren.

Gedurende het afgelopen jaar is de samenwerking tussen KiteGen en de universiteit van Turijn stopgezet, en deze beide partijen zetten hun onderzoek naar

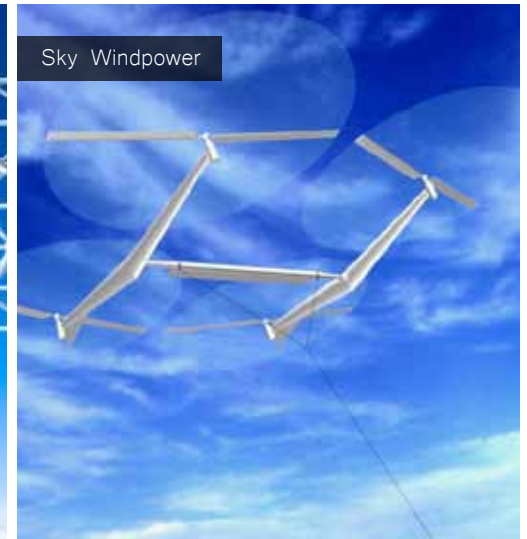
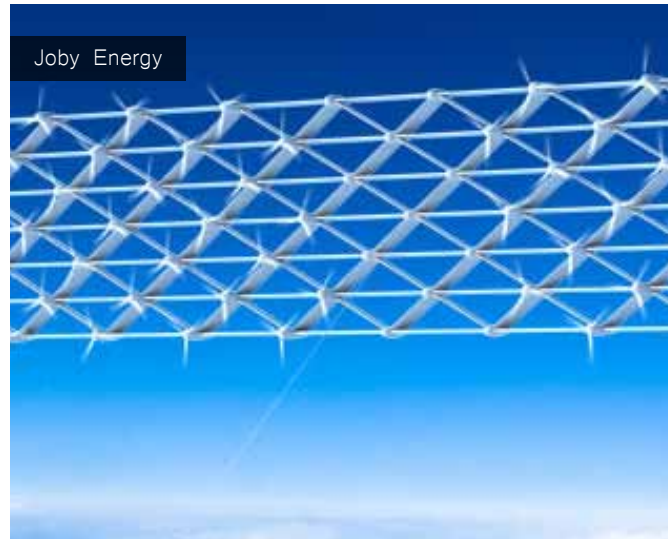
vliegerenergie op gescheiden wegen verder.

In het Californische wordt ook actief gewerkt aan kite-energie. Twee startups, Makani en Joby Energy zijn hier gesitueerd.

Zowel Makani als Joby Energy focussen zich op Drag Power, door turbines te bevestigen op vaste vleugelconstructies. Ze verschillen echter sterk in hun doel : Makani wil de wind in de straalstroom (+/- 8km hoogte) ontginnen met zijn vliegers, terwijl Joby Energy zich vooral focust op een snelle marktintroductie eind 2012.

Makani is erin geslaagd 10 miljoen dollar steun te krijgen van google.org als veelbelovend alternatieve energieproject, maar houdt zich voor de rest op de achtergrond, dus meer is er op dit ogenblik van schrijven niet over gekend.

Joby Energy wordt daarentegen volledig gefinancierd door het privé-kapitaal van de oprichter, en deelt op zijn website <http://www.jobyenergy.com> alle nieuwtjes met het publiek.



Ook een interessante aanpak is Sky WindPower. Deze ontwerpen een –wel erg geavanceerde– ‘Simple Kite’, door het autogiro-effect van helikopterbladen te gebruiken. Deze rotors draaien rond in de wind, en ontwikkelen genoeg lift om de hele constructie in de lucht te houden én energie op te wekken. Dit gebeurt door generatoren te plaatsen in de assen van de rotors.

Joby Energy, Magenn, Makani Power en Sky Windpower hebben begin 2010 het Airborne Wind Energy Consortium opgericht, om met vereende krachten de introductie van kite-energie op de markt sneller en doeltreffender te laten verlopen.

Dit consortium organiseert ook 1x per jaar de AWE Conference, waarop ook dit KitePower project zal worden voorgesteld.

Natuurlijk zijn niet enkel private bedrijven actief bezig met vlieger-energie. Het initiatief werd en wordt vooral actief genomen door verschillende hogescholen en universiteiten over de hele wereld. Zo wordt het voortouw genomen door de TU Delft en de universiteit van Turijn, die elk hun eigen volledige vlieger-energieproject beheren, en alle benodigde systemen ontwikkelen. Zo zal de TU Delft volgend jaar starten met de bouw van hun ‘Laddermill-ship’, een schip waar aan boord vliegers elektriciteit zullen opwekken om de batterijen op te laden.

Vanuit het integrale Laddermill-project is ook reeds een spinoff ontstaan, Ampyx power, die via de ‘crosswind kite power’-techniek elektriciteit zal opwekken met zweefvliegtuig-achtige vliegers.

Een aantal andere universiteiten houdt zich dan weer bezig met het ontwikkelen van deeloplossingen voor de integrale kite-energieproblematiek. Zo houdt de KU Leuven zich bezig met het bepalen van geoptimaliseerde vliegtrajecten voor de vliegers, en het ontwikkelen van een specifiek lanceersysteem. De Zürichse Fachhochschule ontwerpt dan weer een controlebox die bevestigd kan worden aan een vlieger, waarbij de controlebox de vlieger zelf bestuurt. Deze groep werkt ook samen met het EMPA, het Zwitserse centrum voor materiaalkunde en technologie, dat specifieke lichtgewicht-kites ontwerpt. Hierover volgt verder in het dossier meer uitleg.

Op de universiteit van Sussex loopt er dan weer een project waarbij neurocontrollers ontworpen worden die de besturing van de vliegers in de praktijk kunnen overnemen.

Zo ziet u dat kite-energie over de hele wereld meer en meer aanvaard wordt, door zowel de academici als door het bedrijfsleven, als een realistische manier om windenergie te oogsten.

48% van alle elektriciteit wordt in steenkoolcentrales opgewekt (2010)



Energie

Global warming en luchtvervuiling zijn grote bedreigingen voor het welzijn en voortbestaan van fauna en flora in het algemeen, maar hebben ook een grote impact op politieke en economische stabiliteit. Vooral de onzekerheid omtrent de zekerheid van energievoorziening door middel van conventionele, fossiele brandstoffen zorgt voor een relatief directe dreiging.

Er zijn reeds veel alternatieven voor deze energieopwekking m.b.v. fossiele brandstoffen op de markt, maar deze worden belemmerd in hun opmars door de hoge kosten. Bij het ontwikkelen van de KitePower-centrale is het dus een kritische succesfactor dat de opgewekte elektriciteit kan aangeboden worden aan een prijs die competitief is met de conventionele en alternatieve energiebronnen.

Om deze prijs te kunnen bepalen, werd een onderzoek uitgevoerd dat de verschillende soorten energiecentrales met elkaar vergelijkt, om zo op basis van een aantal criteria de effectieve 'prijs' te berekenen. Deze prijs wordt bepaald door middel van 8 criteria: beschikbaarheid, kostprijs, CO₂, inzetbaarheid, watergebruik, ingenomen oppervlakte, kwetsbaarheid en impact op de omgeving.

De grootste energiebronnen zijn op dit moment steenkoolcentrales (48% van de totale elektriciteitsvoorziening), aardgascentrales (22%) en kernenergie (20%). Als eerste alternatieve energiebron staan waterkrachtcentrales (4%) op de vierde plaats. Andere alternatieve energiebronnen als zonne- en windenergie zijn samen slechts goed voor minder dan 3% van de totale elektriciteitsvoorziening op wereldniveau.

Als een alternatieve energiecentrale zoals ze vaak gepromoot worden 'de wereld wil redden', dient er natuurlijk ook genoeg energie geoogst te kunnen worden om de wereld ook effectief van energie te kunnen voorzien.

Zo is alle zonne-energie die door het maximum aantal fotonvoltaïsche cellen en CSP-centrales geoogst zou kunnen worden op jaarbasis, goed voor 25.000 PWh. Alle windenergie m.b.v. het maximum aantal windturbines is goed voor 630 PWh. Dan komt kernenergie op een derde plaats, met 122 PWh. Hier dient natuurlijk rekening gehouden te worden met het feit dat dit een maximumcijfer is dat maar gedurende 300 jaar aangehouden kan worden vooraleer de grondstoffen uitgeput zijn.

De rest van de energiebronnen kan niet 'op zich' instaan voor de volledige elektriciteitsproductie.

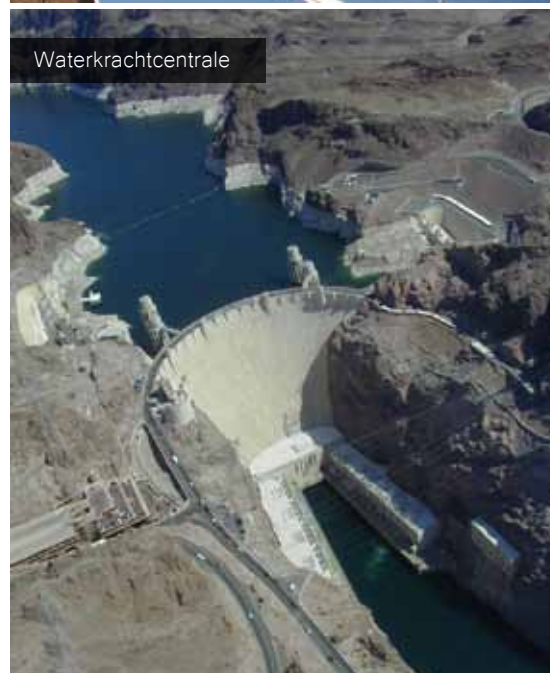


Om een beter inzicht te krijgen in de grootte-orde van de energiesector en het totale energieverbruik, werden ook deze cijfers opgezocht.

Hieruit blijkt dat de totale wereldbevolking per jaar 22.000 TWh (22PWh) aan elektriciteit verbruikt.

Het totale energieplaatje is echter nog veel groter, want ook de transportsector en industrie dienen in rekening te worden gebracht, wat de wereldnood aan energie brengt op 125 PWh per jaar.





Productie

Kolen- en aardgascentrales zijn tot op heden de koploper in productiekostprijs, aan 0,03€/KWh. Waterkracht- en kerncentrales bieden respectievelijk stroom aan, aan 0,04€ en 0,05€/KWh.

Bio-ethanolcentrales hebben dan weer de laagste CO²-uitstoot, aangezien de voor de productie gebruikte planten de bij verbranding uitgestote CO² opslorpen. Windturbines komen op een tweede plaats met 7,5 g CO²/KWh.

De meeste centrales zijn hebben een zeer hoge inzetbaarheidsgraad, hoger dan 98% van de tijd. Enkel golf- (50%), zonne- (80%) en windenergiecentrales (80%) scoren lager, en dit door de afhankelijkheid van de zon of de wind.

Ook het watergebruik wordt naar de toekomst toe steeds belangrijker. Wind-, golf- en getijdencentrales gebruiken tijdens de levensduur praktisch geen water terwijl kolencentrales (1,85l/KWh), kerncentrales (2,72l/KWh), waterkrachtcentrales (14l/KWh) allen relatief hoger scoren.

Hier spant de bio-ethanol (3670l/KWh) wel de kroon!



Fotovoltaïsche cellen



Steenkoolcentrale



Getijden-energie



Kernenergie



Bio-ethanolcentrale

De grondoppervlakte van de energiecentrale dient zo klein mogelijk te zijn voor een zo groot mogelijk geïnstalleerde capaciteit. Getijdencentrales ($288\text{m}^2/\text{MW}$) scoren hier het best, met geothermische installaties ($3400\text{m}^2/\text{MW}$) en kernenergie ($5000\text{m}^2/\text{MW}$) op de respectievelijke tweede en derde plaats.

Een energiecentrale dient ook zo onkwetsbaar mogelijk te zijn. Hiermee wordt de zwakheid t.o.v. terroristische praktijken en natuurrampen bedoeld, maar vooral ook de afhankelijkheid van andere staten voor grondstoffen. Een grote geografische spreiding is dus aan te raden.

Ook de impact op de omgeving dient zo klein mogelijk te zijn. Waterkrachtcentrales toveren hun hele omgeving om tot een gigantisch waterbassin, kerncentrales hebben een no-fly-zone, veiligheidszones,... Kolencentrales beïnvloeden dan weer de luchtkwaliteit, windturbines veroorzaken lawaai en zichthinder,...

De ideale energiecentrale stoot dan ook geen stoffen uit, en bevindt zich in een locatie zonder permanente bewoning.

Vanuit deze kleine vergelijking tussen de verschillende energiecentrales blijkt dat ze elk hun sterke en zwakke punten hebben. Om een economisch succes te worden, zal KitePower even goed of beter moeten scoren dan de bestaande 'sterke punten', terwijl de zwakke punten zo beperkt mogelijk moeten blijven.



(Offshore) Windenergie

Om aan de verschillende vooropgestelde eisen vanuit de voorgaande korte analyse te kunnen voldoen, zal KitePower opteren voor een locatie op zee. Door de aard van de technologie is het namelijk niet mogelijk om slechts een kleine grondoppervlakte te bestrijken, dus moest gezocht worden naar een locatie waar deze grondoppervlakte niet meteen belangrijk is.

Ook is bij verschillende gesprekken met zowel experts in het kite-energievakgebied als met 'gewone' mensen naar boven gekomen dat er ook een sterke psychologische invloed is van de mensen op het KitePower-project. Zo hebben de mensen in het algemeen een bange en onvertrouwde indruk ten opzichte van vliegers, wat ook in het nadeel spreekt van een KitePower-centrale op het vasteland.

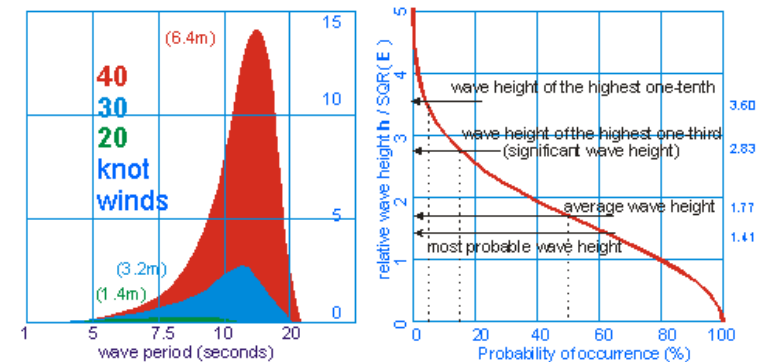
Omdat KitePower door zijn vliegertechnologie de nood aan een grote stalen toren vermijdt, en tegelijkertijd de nood aan een precies gepositioneerde fundering elimineert, kan KitePower ook meteen een grote meerwaarde betekenen in de markt van de offshore windenergie. De huidige technologie bereikt stilaan zijn limieten met turbines op gigantische betonnen funderingen of stalen palen op zee, met als uitzondering de drijvende windturbine. KitePower is ook niet gebonden aan een maximale bodemdiepte omdat deze energiecentrale geen gebruik maakt van een fundering.

Een ander voordeel om op zee te werken is de gemiddeld hogere windsnelheid en de lagere 'boundary layer'. Zo is de windsnelheid op zee gemiddeld 2m/s hoger dan boven land, en zijn er geen obstakels die voor turbulenties kunnen zorgen. De lagere boundary layer heeft vooral zijn consequenties naar het ontwerpen van een automatisch landings- en lanceringssysteem. Dit zorgt er namelijk voor dat de hogere windsnelheid van hoger in de lucht dichter bij de wateroppervlakte komt, waardoor ook dichter bij de grond hogere windsnelheden te vinden zijn.

Zo zal de energieopbrengst op zee groter zijn dan op land.

De keuze om te opteren voor een constructie op zee heeft echter ook een aantal grote ontwerpmatige nadelen. Zo dient rekening gehouden te worden met een erg agressieve omgeving: stormwinden, hoge golven, maar vooral zout water.

Op open zee zijn de golven gemiddeld 6.4 meter hoog in een storm met wind van 40 knopen (als deze een dag aanhoudt), waarbij 1/10 van de golven 12 meter bereikt.



De golflengte neemt echter ook toe met de hoogte van de golven, wat inhoudt dat de steilheid van de golven op open water niet sterk toeneemt.

In het ontwerp dient ook rekening gehouden te worden met de invloed van het zoute water en de zoute lucht op de elektronische componenten. Deze dienen ten allen tijde volledig gescheiden te zijn van elkaar.

Bij stormwind (> 45 knopen), onweer, onvoorspelbare windomstandigheden en windstilte zal de KitePower-vlieger automatisch moeten landen om zich te beschermen tegen schade.

Grootte

De energie-output werd voor de KitePower-centrale vastgelegd op 2,5 MW vanuit een afweging tussen verschillende parameters.

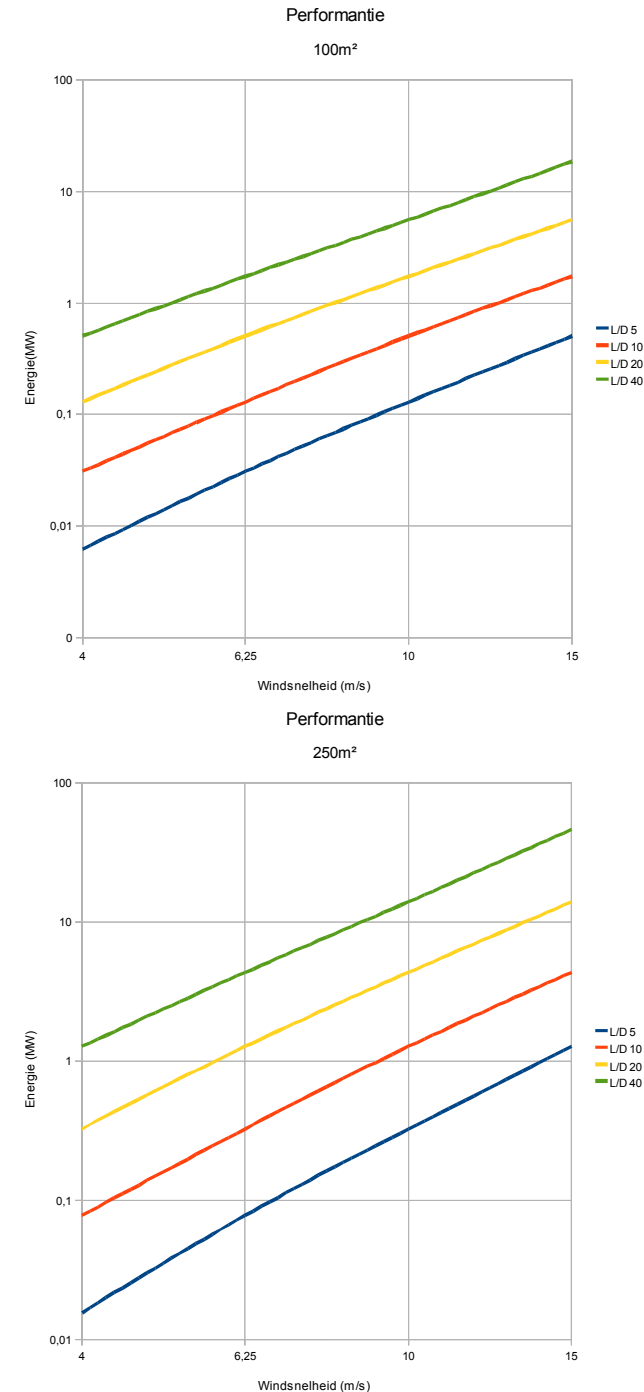
Een eerste parameter is de invloed van de L/D-ratio op de energie-output bij verschillende windsnelheden. Deze werd bekeken bij verschillende formaten van vliegers, om zo een onderbouwde keuze te kunnen maken. Het is namelijk zo dat het vele malen makkelijker is een vlieger met een lage L/D-ratio te maken dan een met een hoge L/D.

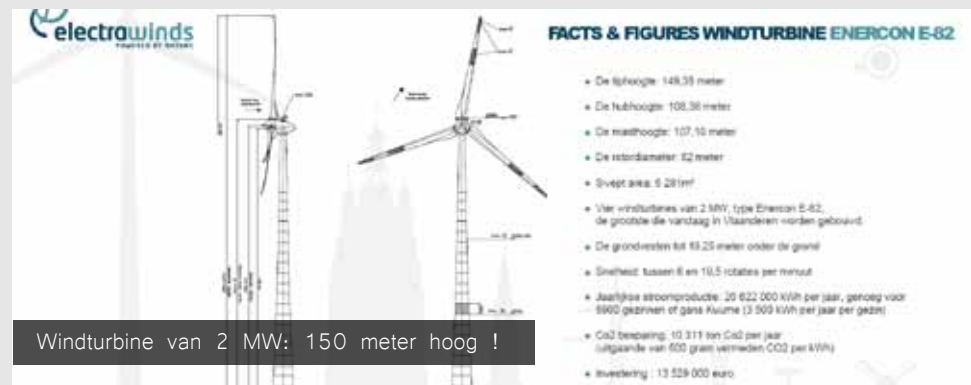
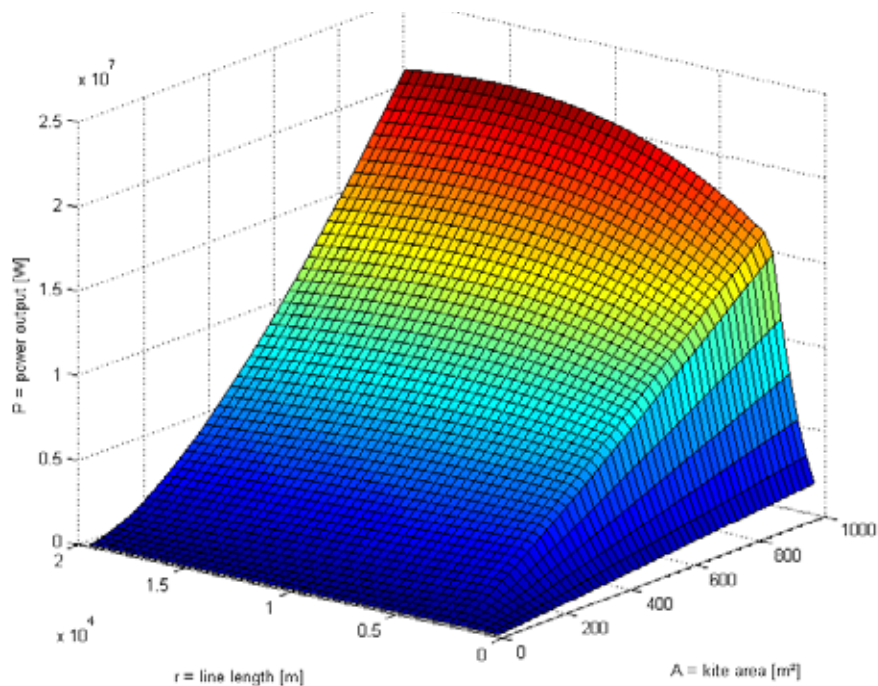
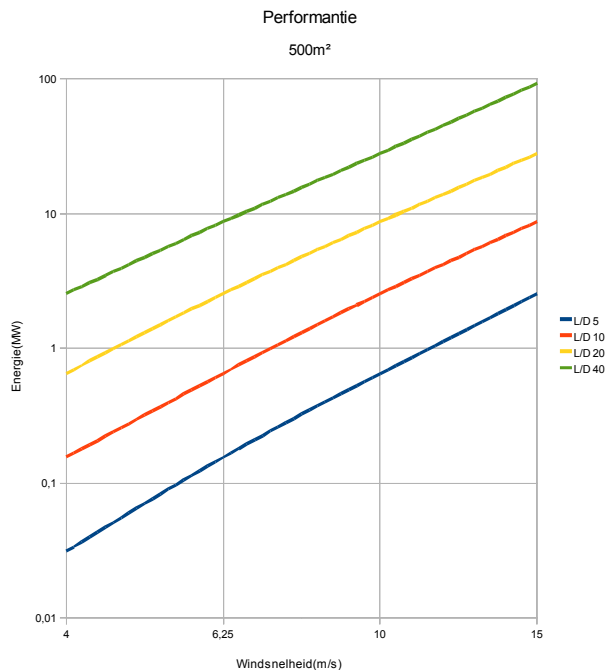
In de grafieken is te zien dat de energie-output kwadratisch stijgt ten opzichte van de verhouding tussen lift en drag. De L/D ratio dient dus zo hoog mogelijk te zijn.

Om te kunnen werken met constructies die gebaseerd zijn op stof, wordt een maximum L/D van 15 als grens bepaald.

De ontwikkelde krachten zijn bij een vlieger van 500m² zo groot en stijgen zeer snel bij een windtoename, waardoor deze grootte als onhandelbaar wordt beschouwd.

Een vlieger van 250m² met een L/D-ratio van 15 bereikt daarentegen bij de gemiddelde windsnelheid op zee (8m/s) reeds een energie-output van 2,5 MW, wat als aanvaardbaar wordt beschouwd aangezien vele windturbines vandaag de dag een vermogen hebben van 2,5 MW.





Een andere parameter die de energie-opbrengst sterk beïnvloedt is de lengte van de lijn. Hoe langer deze is, hoe groter het traject is dat de vlieger kan afleggen en hoe hoger de schijnbare windsnelheid is die de vlieger kan bereiken. Bij een langere kabel kan de vlieger dus meer energie opwekken, maar neemt ook de praktische kant van de zaak af.

De onderstaande afbeelding geeft weer hoe de lijnlengte en de vliegeroppervlakte de energie-output bij een windsnelheid van 10m/s beïnvloeden. Uit deze grafiek wordt duidelijk dat de performantieverbetering ook afneemt wanneer een bepaalde lengte is bereikt, en dit door de toename van het gewicht van de kabel en de toenemende drag.

De kabellengte wordt uit praktische overwegingen zo kort mogelijk gehouden, maar is toch zo lang mogelijk om een hoge performantie te verzekeren. Daarom wordt de lijnlengte gekozen op het 'breekpunt' in de grafiek, en vastgelegd op 1.200m.

Als we deze gegevens invoeren in de formules van de paper van Miles L. Loyd stellen we vast dat een vlieger van 250m² met een L/D van 15 en een windsnelheid van 8m/s een trekkracht van 10 ton uitoefent op de lijn als 2,5MW energie wordt opgewekt.

Een hogere trekkracht dan 10 ton dient in het systeem vermeden te worden omdat deze niet zou bijdragen aan een hogere energieproductie. Dit wordt bekomen door de vlieger depowerbaar te maken. Zodoende dient de constructie afgestemd te worden op deze ontwikkelde kracht.

Quickdesigns

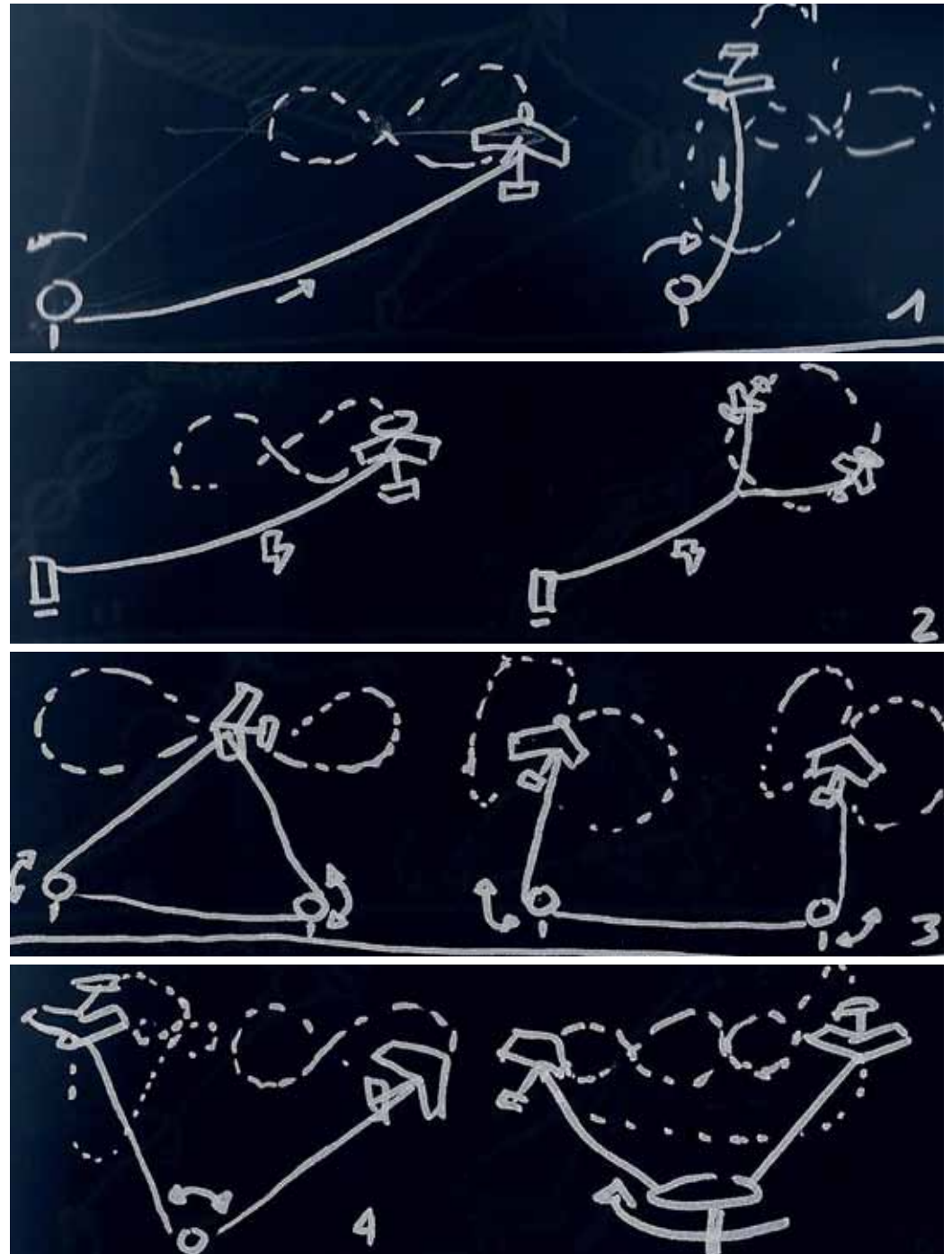
Om de verschillende problematieken rondom KitePower aan te kaarten werd een analytische quickdesignfase uitgevoerd. Door verschillende manieren, om de energie van de vlieger en wind om te zetten naar elektriciteit, te bedenken, kwamen verscheidene problemen aan het licht.

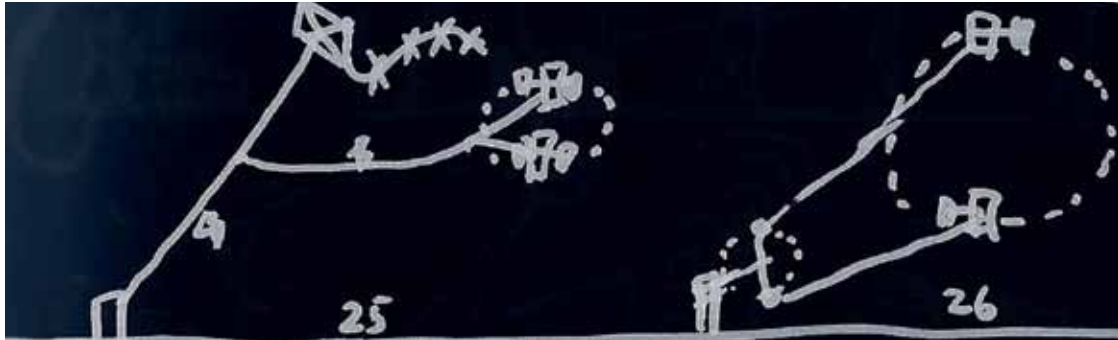
Een eerste probleem werd ontdekt bij een verkennende tekening naar Drag Power; De opgewekte elektriciteit dient naar de grond overgebracht te worden met een geleidende kabel. Hier zou een trade-off (afweging) gemaakt moeten worden tussen een grote diameter voor makkelijke stroomoverdracht en een kleine diameter voor minder drag en lager gewicht. Drag Power brengt nog een aantal veiligheidsrisico's met zich mee omdat grote en zware generatoren zich in de lucht met grote snelheid voortbewegen. Om deze reden werd Drag Power meteen uitgesloten als optie voor het KitePower-project.

Uit de vele quickdesigns over 'crosswind kite power' blijkt dat vele manieren om de beweging en trekkracht van de vlieger om te zetten in elektriciteit mogelijk zijn, maar dat vele van deze oplossingen het niet mogelijk maken om de vliegers te doen landen en/of de lijn op te rollen. Dit dient echter wel mogelijk te zijn in noodsituaties!

Enkele quickdesigns gebruiken ook stabiliserende hulpmiddelen zoals staarten of extra vliegers. Wanneer de besturing zou mislopen dient de vlieger te vermijden dat hij neerstort, en dan is automatische stabilisatie een niet te missen systeem.

Ook moet de verankering zeker zwaar genoeg zijn !

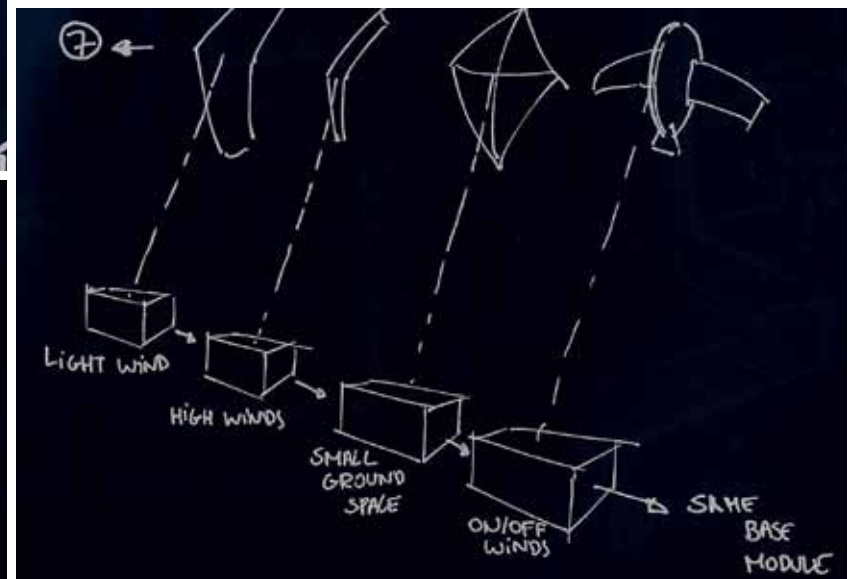
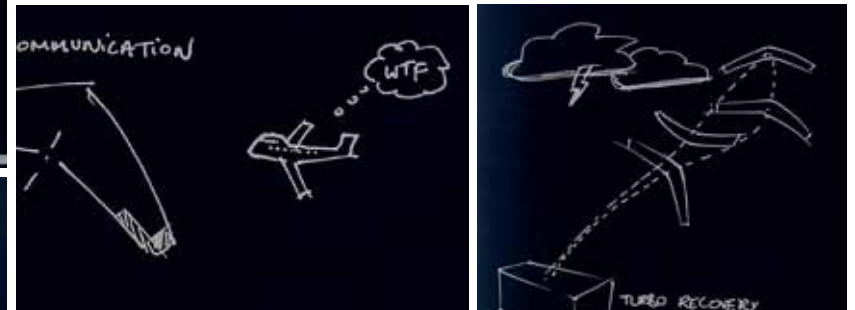


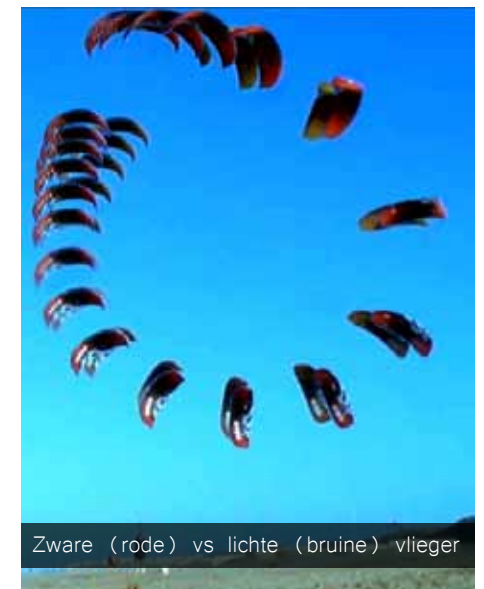
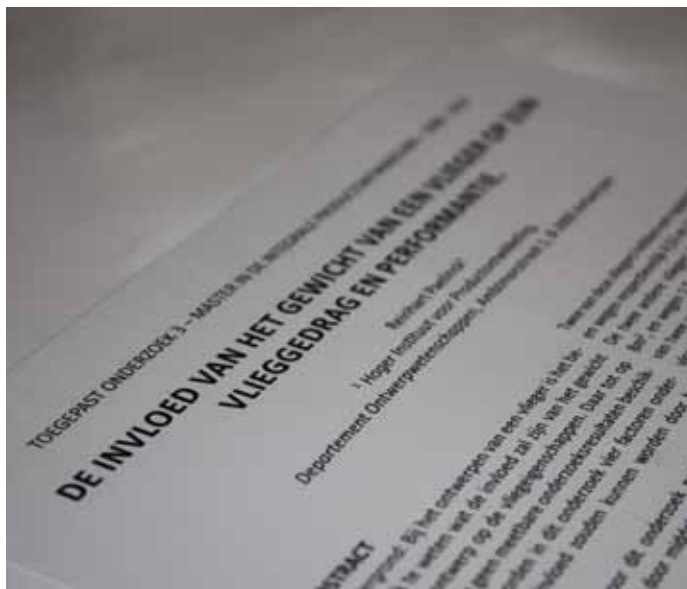
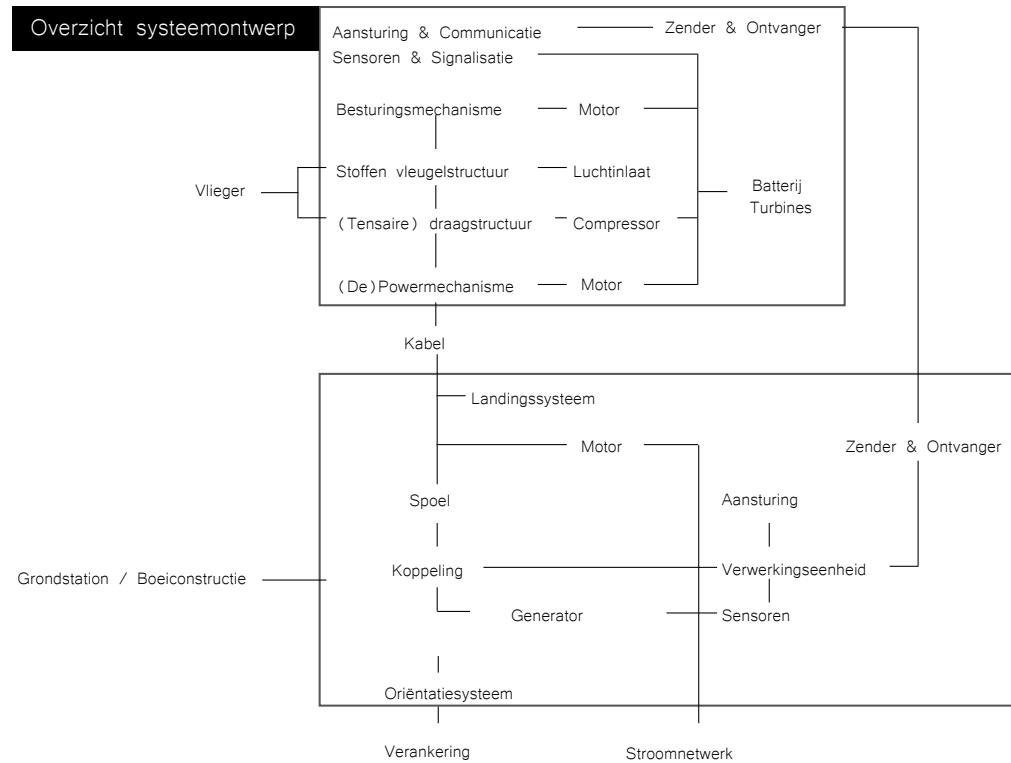
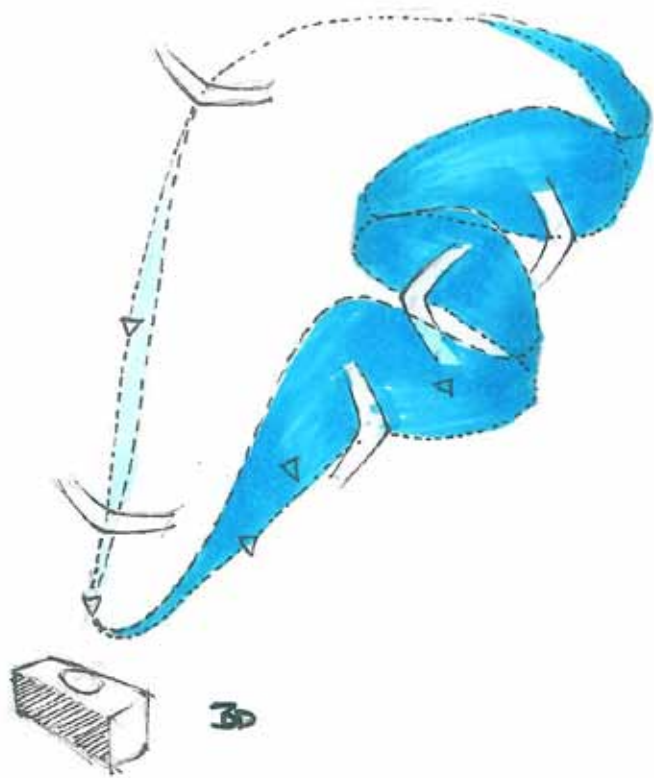


Als de wind plots van richting verandert, moet er ook een systeem zijn dat de vlieger in de juiste richting oriënteert.

De KitePower-energiecentrale zal, om betrouwbaar te functioneren, de besturing en controles uitvoeren met behulp van een externe energiebron.

Ook de nood aan volautomatische controle en signalisatie naar schepen en vliegtuigen werd afgeleid van deze quickdesigns.





Systeemontwerp

Het KitePower-project focust zich op het ontwerp van een stabiele, bestuurbare vlieger met een krachtregelings- en positioneringssysteem, een systeem om de trekkracht om te zetten in elektriciteit, en een systeem om de vlieger automatisch te laten opstijgen en landen.

Het geheel wordt een constructie op zee, die zichzelf steeds oriënteert naar de juiste windrichting.

KitePower genereert een meerwaarde ten opzichte van andere energiecentrales door een hoge return on investment, lage impact op zijn omgeving, makkelijke installatie en minimaal gebruik van materialen.

In eerste instantie werd gezocht naar een constructiemethode die ervoor zorgt dat de vlieger langdurig aan de blootgestelde krachten kan weerstaan. Deze constructie dient zo licht mogelijk te zijn; wat bleek uit het Toegepast Onderzoek 3. Hierna wordt de constructie in een bepaalde aerodynamisch efficiënte vorm gegoten, waardoor de vlieger zijn L/D-ratio van 15 kan halen. Ook dient deze vorm ervoor te zorgen dat de vlieger automatisch stabiel in de lucht blijft hangen bij falen van de besturingssystemen.

Hierna wordt een depowersysteem ontworpen waardoor de trekkracht van de vlieger instelbaar wordt. In samenwerking met dit systeem wordt ook een besturingssysteem uitgewerkt.

Om al deze systemen van elektriciteit te voorzien, wordt ook een krachtbron gekozen die zich aan boord van de vlieger bevindt.

Een laatste kritische succesfactor is het ontwerp van een specifieke generator voor de KitePower-centrale.

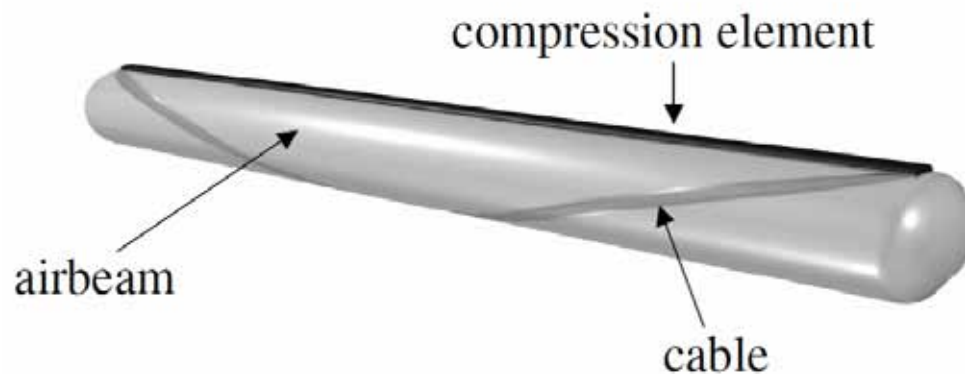
Tensairity

Reeds vroeg in het ontwerpproces werd duidelijk dat een performante vlieger een compressie-element nodig heeft om de geprojecteerde oppervlakte zo groot mogelijk te kunnen maken met een minimum aan toming. Deze toming moet namelijk zo miniem mogelijk zijn om de geïnduceerde drag van de vlieger zo veel mogelijk te beperken.

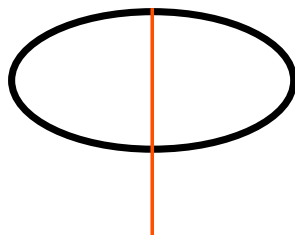
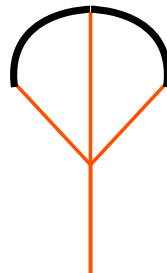
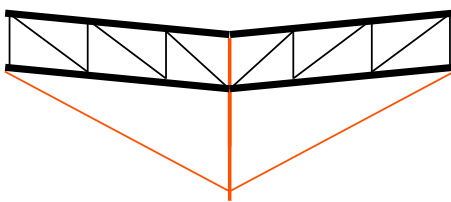
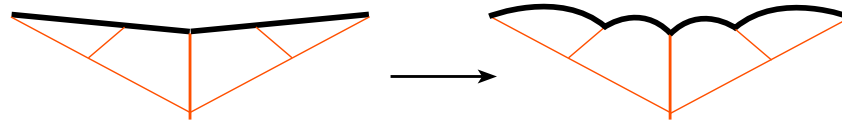
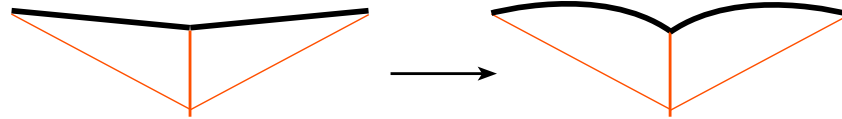
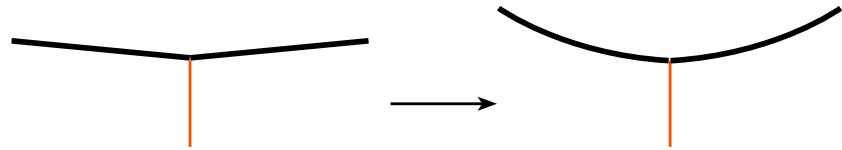
De oplossing voor een zo licht mogelijk compressie-element werd aangereikt via het Zwitserse kite-energie-team. Onder leiding van Rolf Luchsinger ontwikkelden zij de Tensairity-techniek, waarbij een staaf ondersteund wordt met een luchtkussen. Dit luchtkussen verhindert de staaf om door te buigen of te knikken.

In vergelijking met een klassiek massief compressie-element kan het gewicht met factor 12 verminderd worden. Een tensaire structuur kan dus 12 keer meer dragen dan een klassieke stalen balk die even veel weegt dan de tensaire structuur.

Deze techniek wordt vandaag de dag reeds gebruikt bij tijdelijke lichte bruggen, maar ook voor permanente overspanningen. Zo is er bijvoorbeeld reeds een parkeergarage met een tensaire dakconstructie met overspanning van 28 meter. Elke tensaire balk draagt hier 10 ton.



Tensaire structuren en vlieger van Rolf Luchsinger



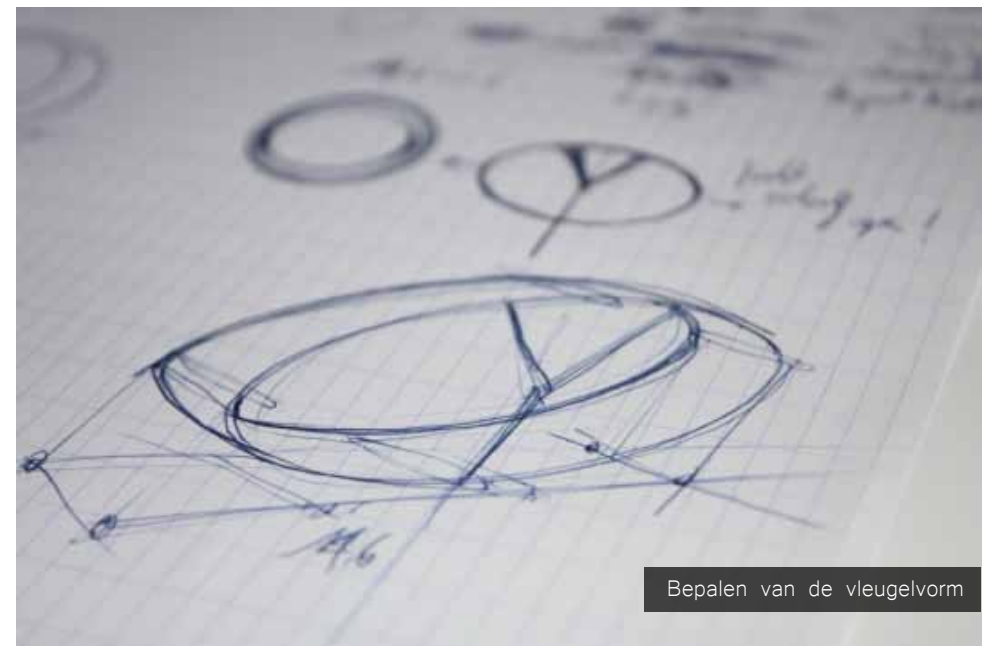
Vleugelvorm (1)

Om de techniek van Tensairity optimaal te benutten dient de vorm van de vlieger aangepast te zijn aan de vereisten. Hiernaast ziet u een korte samenvatting van de evolutie van de onderzochte vormen.

Bij elk van deze ontwerpjes wordt rekening gehouden met de resulterende vervorming en krachtwerking op de vleugel.

De krachten op een 'dubbeldekker'-stijl van vlieger zijn kleiner, omdat de spanwijdte verdeeld wordt over twee lagen. Zo is de totale spanwijdte kleiner en is er minder doorbuiging mogelijk.

Een zogenaamde 'Ring Wing' is aerodynamisch gezien echter efficiënter dan een dubbeldekker, dus deze wordt nog verder onderzocht.



Bepalen van de vleugelvorm

Ring Wing

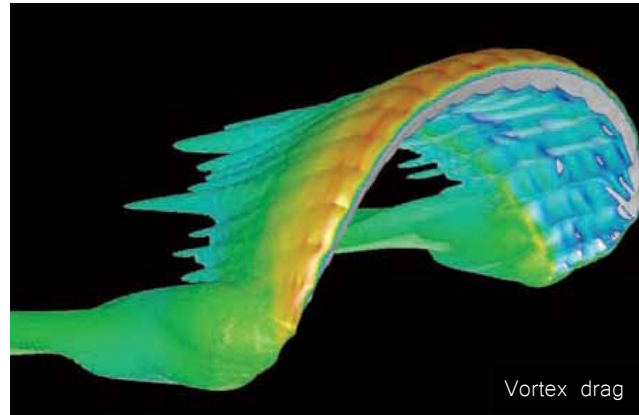
De 'Ring Wing', of annulaire vleugel, heeft als voordeel dat deze een virtueel 'opgerolde' platte vleugel is. De Aspect Ratio blijft dus hetzelfde, maar de spanwijdte van de vleugel is dus beperkter, wat de vleugel op de grond handelbaarder maakt, en wat zorgt voor een lagere doorbuiging en vleugelbelasting aan de vleugeluiteinden.

RingWing-stuntvliegtuig

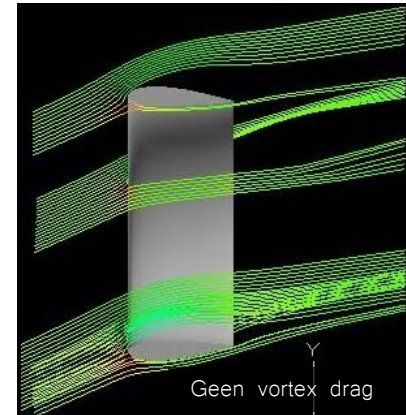


Maar dit is niet het grootste voordeel: Een 'gewone' vleugel heeft last van Vortex Drag: dit is een luchtwerveling die ontstaat aan de vleugeluiteinden, waardoor de vleugel een grotere drag ondervindt. Een Ring Wing heeft geen vleugeluiteinden, en ook geen Vortex Drag.

In het Journal of Aircraft werd de performantie van Ring Wings reeds enkele malen onderzocht (FIG). Het Journal of Aircraft ziet voor de Ring Wing niet meteen een voordeel in de commerciële luchtvaart, maar wel bij omstandigheden waar de Ring Wing gebruikt wordt onder hoge belasting... zoals bij een vlieger dus !



Vortex drag



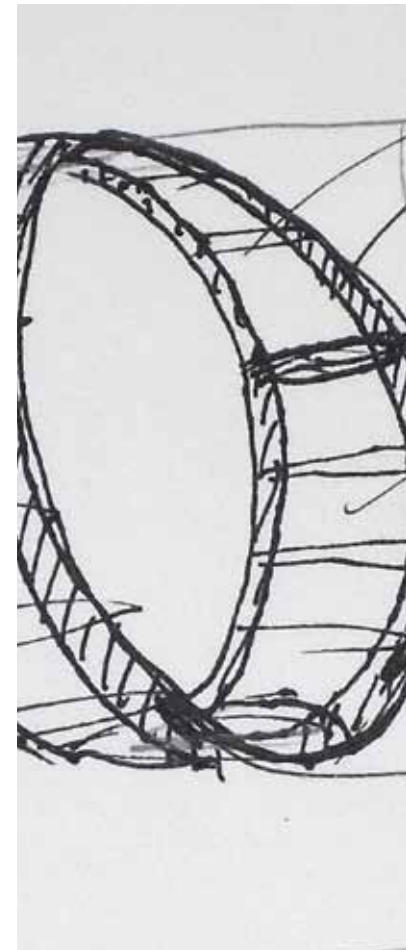
Geen vortex drag

Journal of Aircraft:

"Vortex drag at low speeds typically accounts for 80%-90% of the aircraft's climb drag at take-off conditions."

...

"Analysis of annular wings shows a span efficiency (or Oswald) factor of $e = 2$. For a similar span, height, and required lift coefficient, a box wing has the lowest theoretical inviscid drag coefficient, with a computed value of $e = 2.78$. A biplane under similar conditions has a value of $e = 1.64$ and tends to $e = 2$ with infinite wing spacing. The limited use of these forms of wings may, in part, be due to structural complexity as well as a significant zero-lift drag coefficient penalty caused by the increase in wetted area over the comparative planar wing. A regime in which nonplanarity would be of benefit would be that in which span is limited and flight operation is at high load [i.e., for a loitering unmanned aerial vehicle (UAV) or a micro-UAV-type vehicle]."



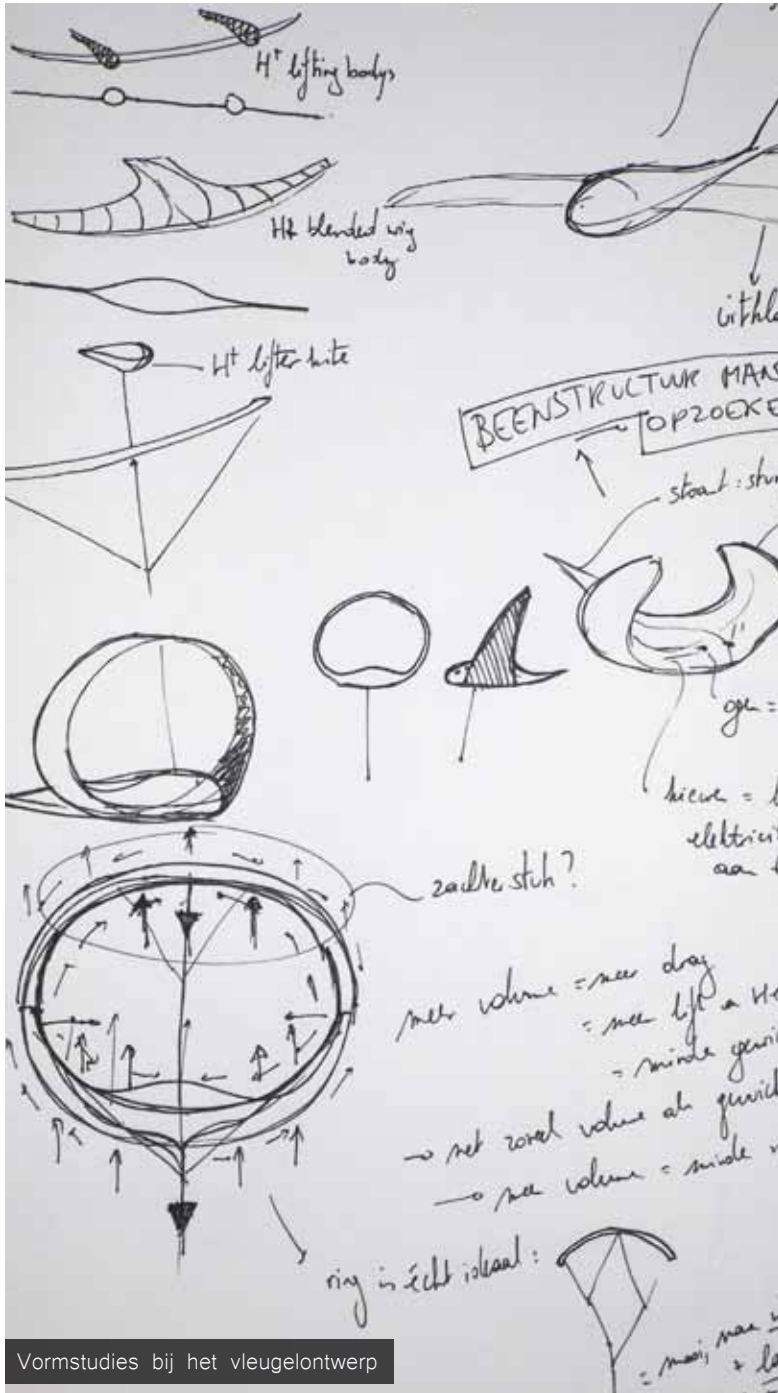
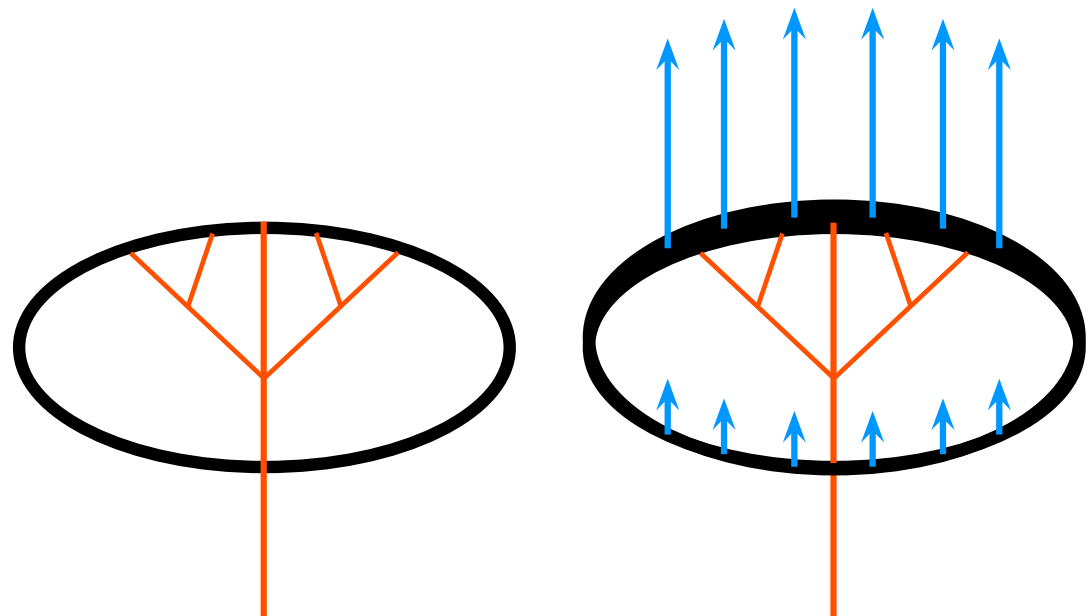
Krachtverdeling

De ringvormige vleugelstructuur brengt nog enkele voordelen met zich mee, namelijk de mogelijkheid om de bovenzijde van de 'ring' te ondersteunen met een beperkte toming, terwijl de onderzijde slechts op 1 punt vasthangt aan de lijn van de vlieger naar het grondstation. Het vrijhouden van de onderzijde is van belang voor het ontwerp van de landingsprocedure.

Omdat de bovenzijde ondersteund kan worden door een meer uitgebreide toming, is het wenselijk dat zich daar ook de grootste oppervlakte bevindt. De door deze oppervlakte ontwikkelde kracht wordt dan verdeeld over een aantal aanhechtingspunten i.p.v. een enkel punt.

Een grotere oppervlakte in het bovenste deel van de Ring Wing heeft nog enkele consequenties. Door het vergroten van dit deel van de vleugel, wordt het profiel van de vlieger ook dikker, waardoor de doorsnede van het opblaasbare gedeelte van de tensaire structuur ook dikker kan zijn, waardoor deze structuur nog sterker wordt.

De grotere oppervlakte bovenaan wordt gecompenseerd door het verkleinen van de oppervlakte onderaan de ring, om een hoge aspect ratio (lengte-breedteverhouding van de vlieger) te behouden.



Vormstudies bij het vleugelontwerp

Vleugelvorm (2)

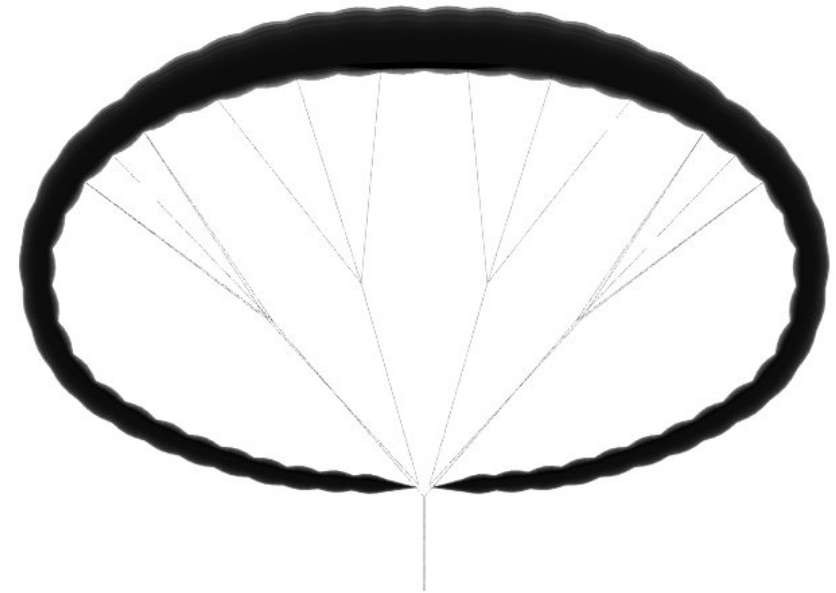
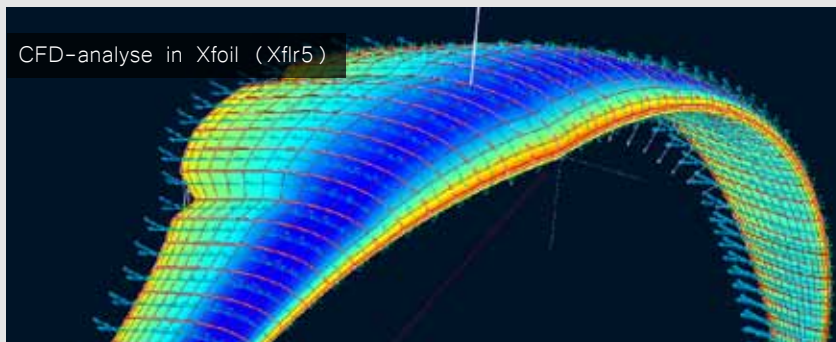
Tijdens het ontwerp van deze vleugelvorm werd gebruik gemaakt van de programma's fwDesign en Xfoil.

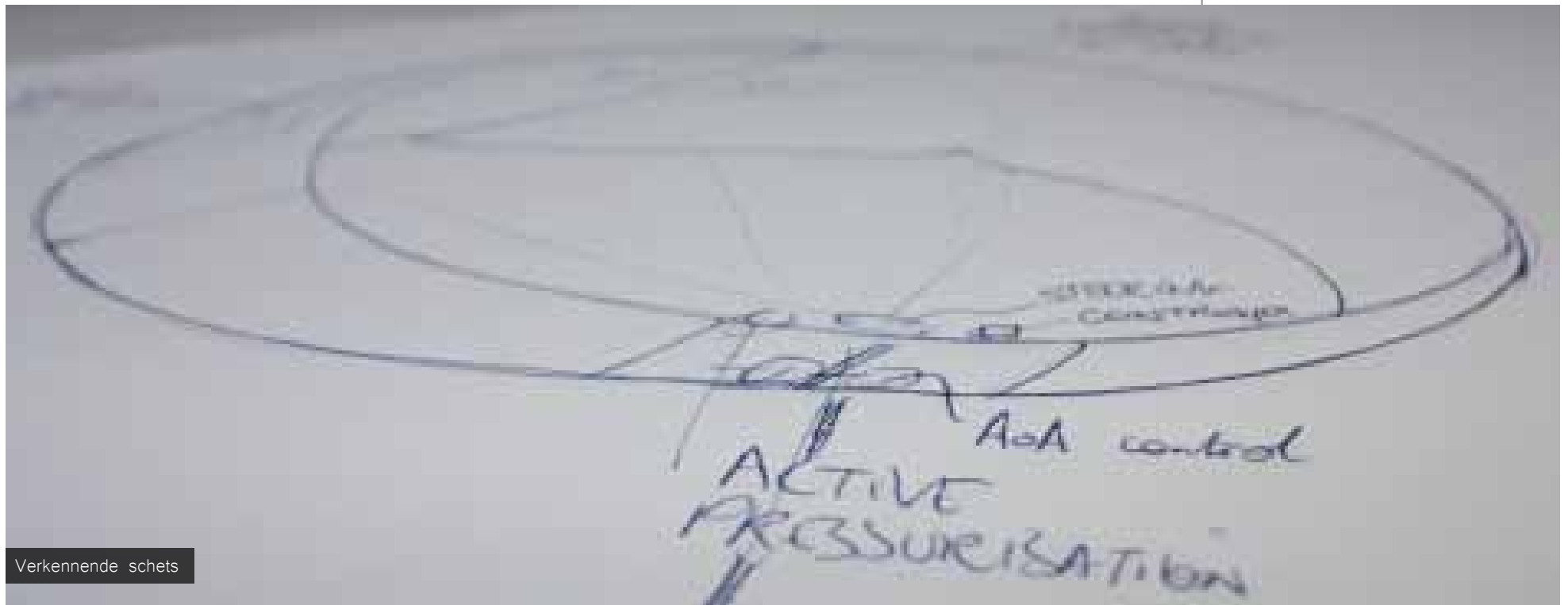
fwDesign wordt algemeen verspreid gebruikt in de paraglider-industrie, en laat de gebruiker toe om makkelijk aanpassingen door te voeren in de vorm van de vlieger, het profiel, de profieldikte, het aantal aanhechtingspunten,... om zo op een relatief efficiënte manier tot een semi-ideaal ontwerp te komen.

Xfoil is een CFD-programma (Computational Fluid Dynamics) dat gebruikt wordt tijdens het ontwerpproces van zowel model- als echte vliegtuigen. Dit door de erg snelle berekening van de cruciale elementen in het vliegtuigdesign.

De drukverdeling en liftcurve, invalshoek en vleugelbelasting zijn de output van de software, en worden visueel weergegeven. De invalshoek van de vlieger ten opzichte van de wind, de windsnelheid, het gewicht van de vleugel,... worden ingevoerd als basis voor de analyse.

Met behulp van deze software werd de ruwe vleugelvorm zo aangepast dat het drukpunt van het vleugelprofiel zich situeert boven de rij aanhechtingspunten, dat de liftcurve evenredig verdeeld is over de vleugel, en dat de geschatte L/D-ratio 15 bedraagt.





Verkennde schets



CNC-gefreesde profielen



PU-schuim draagstructuur



Toming wordt aan de structuur zelf vastgemaakt



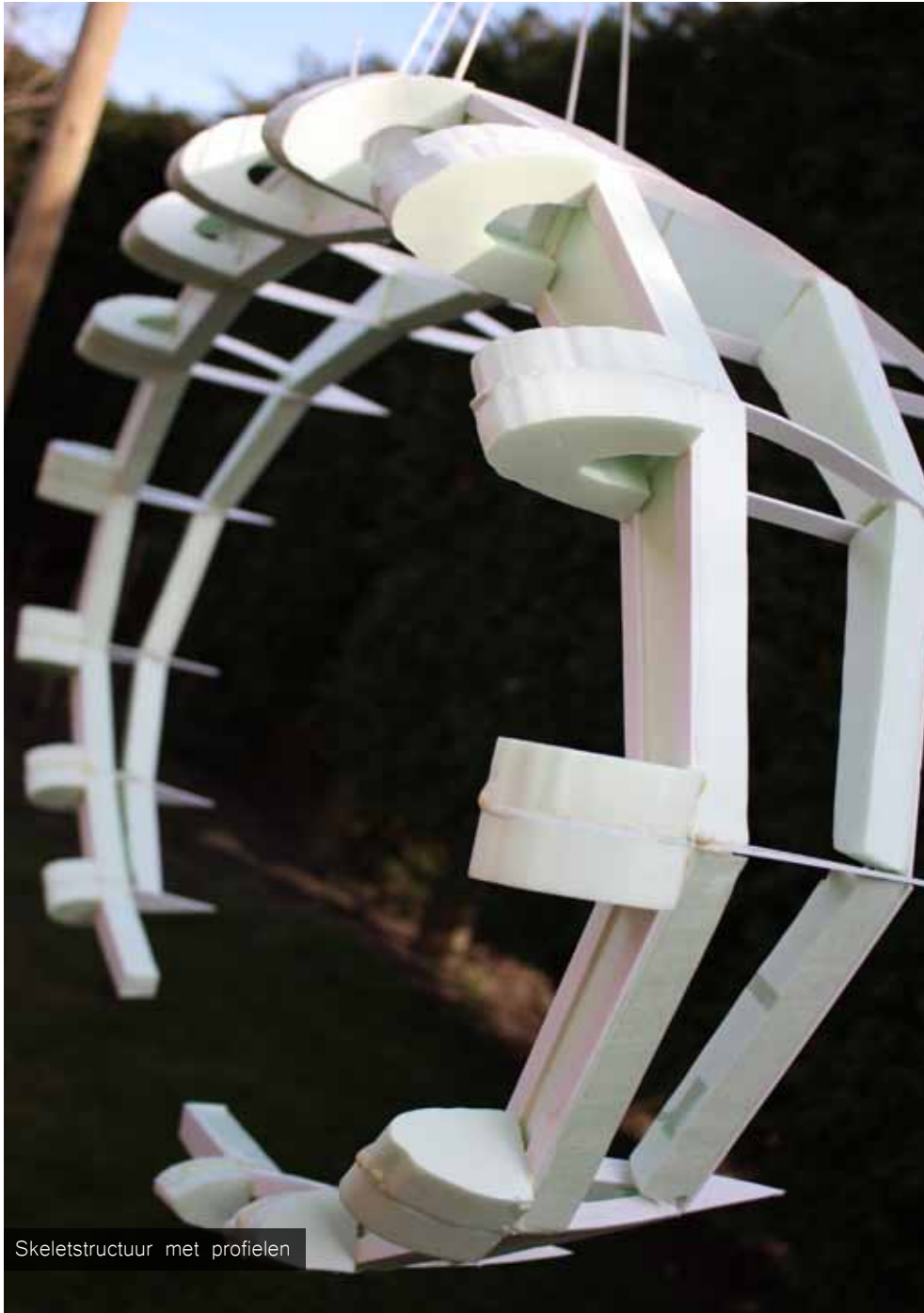
Aaneengestikt doek



Doek opgespeld en gekleefd



Semi-voltooide structuur



Skeletstructuur met profielen

Prototype

Om deze nieuw ontwikkelde vleugelvorm te illustreren en verifiëren werd ook een prototype gemaakt. Deze vlieger, met een spanwijdte van 1 meter, werd gemaakt uit chicara nylon, dat gespannen werd over een compressie-structuur van polyurethaanschuim en polystyreen. Het was namelijk niet mogelijk om de tensaire structuur op zulk een kleine schaal te maken.

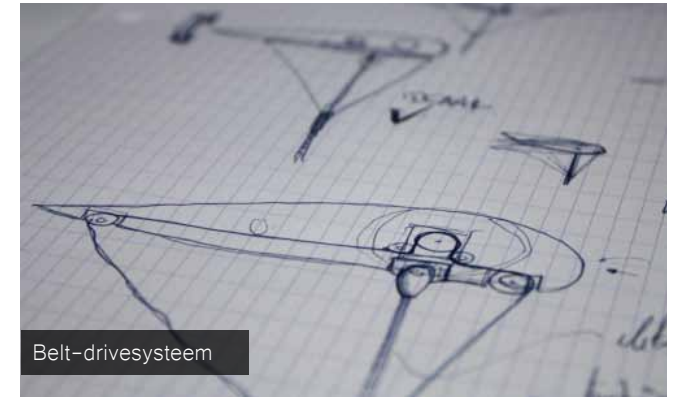
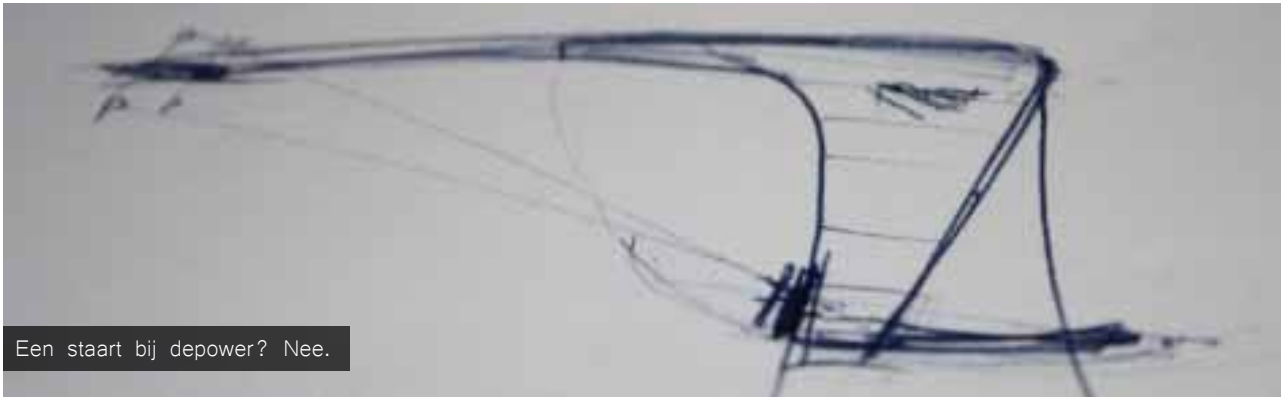
Op het ogenblik van ter perse gaan van dit dossier is de verificatie van de vliegeigenschappen van de vleugel nog niet uitgevoerd, maar op de jury zullen de resultaten van deze test worden meegedeeld.

Deze verificatie zal worden uitgevoerd in de testopstelling van de K.U. Leuven, waar vliegers aan een roterende arm bevestigd kunnen worden, om zo op efficiënte en goedkope wijze de performantie van de vlieger te kunnen meten aan de hand van een aantal parameters.

Deze parameters zijn de horizontale invalshoek van de vliegerlijn ten opzichte van de roterende arm, en de verticale. Deze geven een indicatie naar de trekkracht van de vlieger en de L/D ratio.



Eerste testen in de tuin



Depower

Tijdens de fase van het opwekken van energie, waarbij de vliegerlijn wordt uitgerold, dient de vlieger zo hard mogelijk te trekken. Wanneer de vliegerlijn echter wordt opgerold, dient de vlieger zo zacht mogelijk te trekken om geen overbodige energie te verspillen.

Dit krachtverschil kan bekomen worden door verschillende technieken:

- het veranderen van de invalshoek van het profiel ten opzichte van de wind,
- het veranderen van de geprojecteerde oppervlakte van de vlieger,
- het veranderen van de vorm van het profiel.

Het systeem waarvoor in dit ontwerp werd gekozen is het veranderen van de invalshoek van het profiel ten opzichte van de wind. Bij het veranderen van de geprojecteerde oppervlakte van de vlieger of de profielvorm, wordt geraakt aan de structurele integriteit van de vlieger. Dit komt de stabiliteit niet ten goede.

Uit de CFD-analyse in Xfoil blijkt dat het gebruikte profiel optimaal presteert bij een invalshoek van 5° . Tijdens de opwekkingsfase is dit dan ook de gebruikte invalshoek.

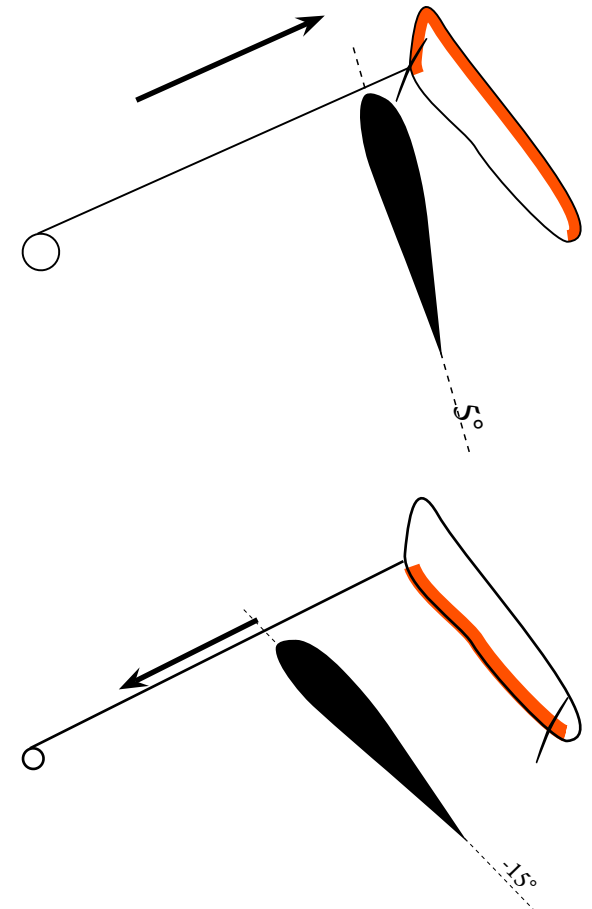
Wanneer de vliegerlijn opgerold wordt, wordt de invalshoek van het profiel herleid naar -15° .

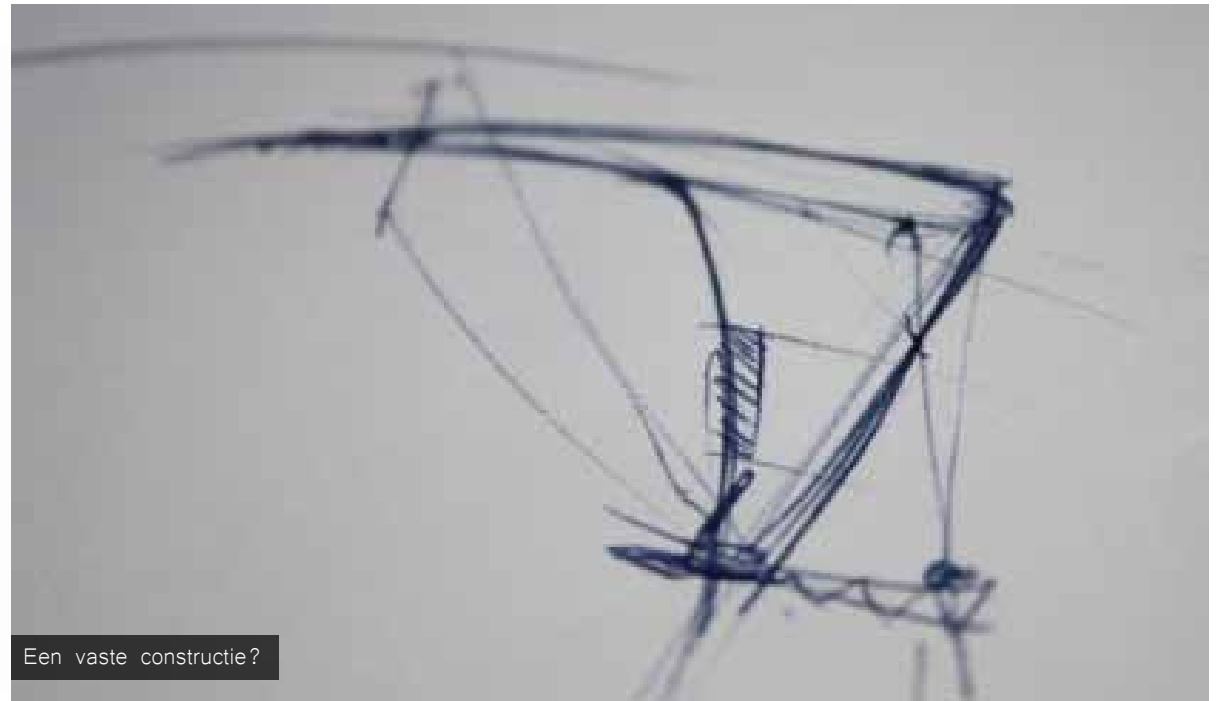
Nog kleiner kan niet, want dan wordt de vlieger instabiel.

Er werd dus een systeem ontworpen dat deze hoekverandering kan verwezenlijken.

Door middel van een quickdesignfase werden verschillende mogelijkheden aangereikt, waarbij het belangrijk was om een zo licht mogelijke constructie te bekomen.

Reeds snel bleek dat de ideale plek om de hoekverandering in te stellen in het midden van het onderste deel van de ringvormige vleugel gesitueerd is.





Aangezien de trekkracht van de vlieger zich vooral situeert op het bovenste deel van de vleugel, is het aan te raden om het depowersysteem op het onderste deel van de vleugel te monteren, aangezien het zo een kleinere kracht zal moeten uitoefenen om de invalshoek te regelen.

Vanuit de verschillende voorgestelde systemen zoals slidermechanismes, belt-drives en katrolsystemen, werd geopteerd voor de oplossing met de minste en lichtste componenten. Een katrolsysteem zorgt ervoor dat de drag van het onderste deel van de vlieger een verlaging van de invalshoek bewerkstelligt. Een enkele motor dient hier slechts een spoel aan te drijven om een verhoging van deze invalshoek te bekomen.

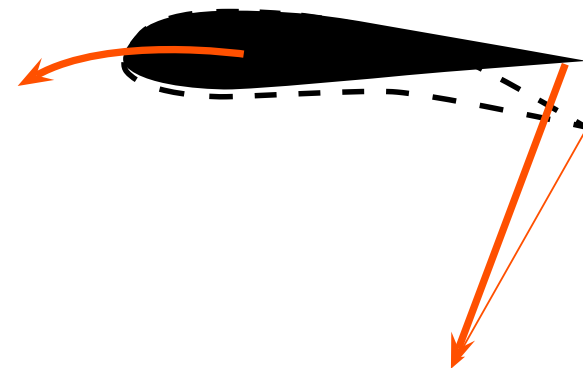
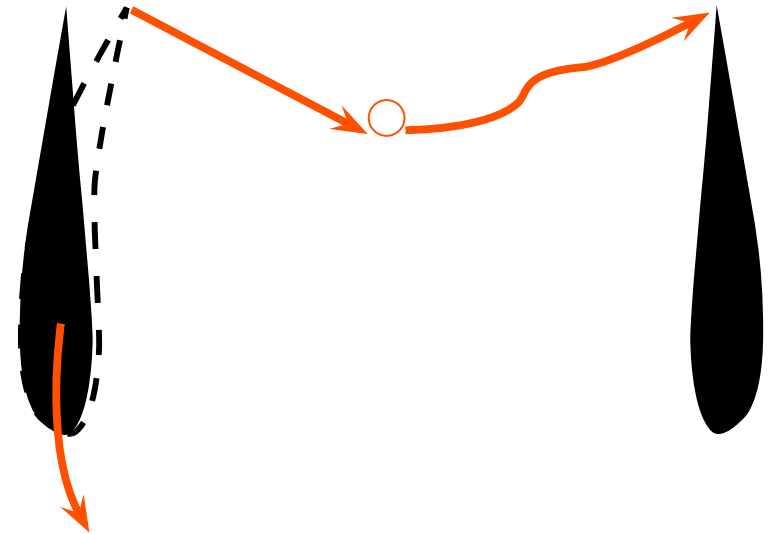
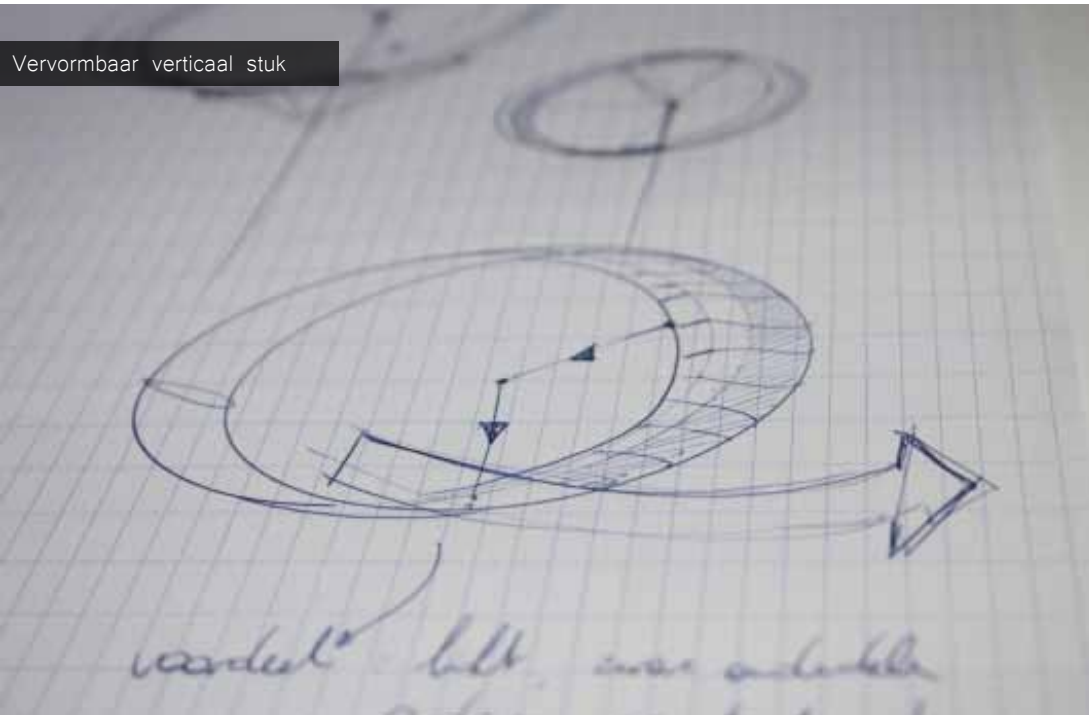
Sturen

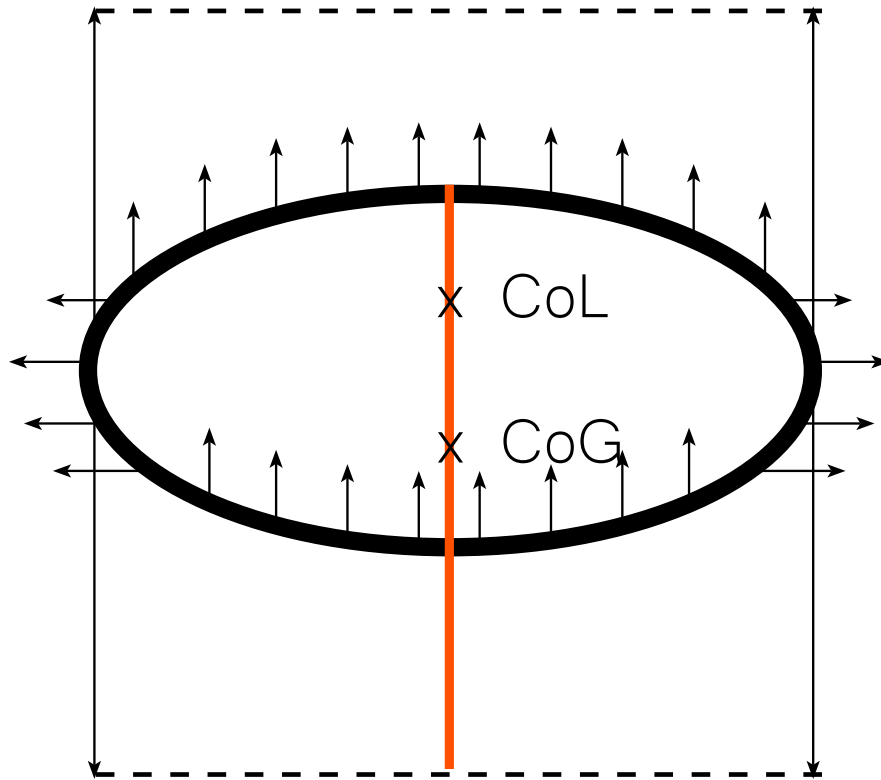
De vlieger dient natuurlijk ook bestuurd te kunnen worden. De effectieve aansturing gebeurt draadloos door gebruik te maken van geavanceerde controlesoftware, maar hier wordt gefocust op het fysieke mechanisme.

Dit mechanisme dient ook zo licht mogelijk te zijn. Via een analyse van bestaande stuursystemen in de vlieger- en vliegtuigindustrie werden een aantal mogelijkheden gedefinieerd. Uiteindelijk werd gekozen voor de simpelste oplossing: in de opblaasbare structuur van de vlieger zelf wordt een zachter stuk in het profiel ingebouwd dat kan plooiën.

Door een touwmechanisme aan dit zachte stuk te bevestigen kan het profiel gecontroleerd omgebogen worden. De aandrijving van dit touwmechanisme kan dan ook in het onderste deel van de ringwing gepositioneerd worden, terwijl de 'zachte profielen' gesitueerd zijn in het verticale stuk van de vlieger.

Vervormbaar verticaal stuk





Stabiliteit komt van pas bij het stuntvliegen.

Stabiliteit

Zoals reeds eerder aangehaald is stabiliteit een niet te missen eigenschap van de vlieger. Om de vlieger, indien er geen stuurinput gegeven wordt, verticaal naar boven te laten hangen in het windvenster zijn verschillende technieken mogelijk.

- een staart: een staartconstructie zorgt ervoor dat de vlieger steeds met zijn voorzijde naar de wind toe gericht staat. Deze werkt echter op basis van drag, en verlaagt de L/D-ratio. Ook is er extra materiaal nodig om de staart uit te maken.
- een kiel: een verticaal stuk aan de vlieger dat ook weer de vlieger steeds naar de wind toe laat kijken.
- een verschil in plaatsing tussen het CoL (center of lift) en het CoG (center of gravity). Als het center of gravity onder het center of lift zit, zal de vlieger steeds met de 'juiste kant' langs boven in de wind willen staan, waardoor hij vanzelf stabiel wordt.

In dit vliegerontwerp wordt een combinatie van beide laatste technieken gebruikt. De verticale delen van de Ringwing dragen dan wel niet bij tot de liftkracht, maar worden wel gebruikt om te sturen én als stabiel richtingsroer. Door alle zware componenten te centraliseren in het laagste punt van de ringvormige vlieger wordt het CoG zo laag mogelijk gehouden ten opzichte van het CoL.



NASA's onbemande 'Helios' op zonne-energie



De 'Solar Impulse', ook op zonne-energie



De 'Gossamer Penguin', op zonne-energie én pedaalkracht



De 'Daedalus', op 'pedaalkracht'



Energievoorziening



Om zowel de compressor, die nodig is om de tensaire structuur in vorm te houden, als de motoren voor het depowermechanisme en het besturen van de vlieger, als de verwerkingseenheid en sensoren van stroom te voorzien, is er een energiebron nodig aan boord van de vlieger. Aangezien de vlieger een generator aandrijft die zich op de begane grond bevindt, is het niet evident om deze energie te benutten. Om een oplossing te bieden voor deze problematiek worden enkele alternatieven afgewogen.

- zonnecellen op de vlieger;

Zonnecellen zijn relatief makkelijk te integreren in dit vliegerconcept. De vlieger heeft een hele grote oppervlakte waarop flexibele cellen geplaatst kunnen worden. Nadeel is dan weer dat een groot deel van deze energie opgeslagen dient te worden om de nachtelijke periode door te komen, wat een gewichtsvermeerdering met zich meebrengt.

- windturbines op de vlieger

De vlieger vliegt met hoge snelheden door de lucht. Hierdoor kunnen hele kleine windturbines reeds veel energie opwekken. Turbines die specifiek voor deze omstandigheden zijn ontworpen zijn zogenaamde Ram Air Turbines, die gebruikt worden voor het opwekken van elektriciteit aan boord van vliegtuigen.

- brandstofcellen of batterijen in de vlieger

Via een intelligent systeem dat weet wanneer de brandstofcellen of batterijen leeg zijn zou de vlieger kunnen landen om deze energiebron te vervangen. De vlieger kan zo relatief eenvoudig gehouden worden, maar de start-stopcyclus en de behandeling op grondniveau wordt complex.

- via de kabel

Stroom naar de vlieger sturen via de kabel is niet evident. De vlieger bevindt zich op 1200 meter van de stroombron, en door de geringe diameter van de vliegerlijn dient rekening gehouden te worden met verliezen tot 75%. De weinige extra dikte van de vliegerlijn om stroom te voorzien wordt als nadelig beschouwd voor de performantie.

In een afweging tussen deze vier alternatieven wordt geopteerd voor de Ram Air Turbines. Deze leveren stroom op constante basis als de vlieger in de lucht hangt, en dit is ook wanneer de vlieger de stroom effectief nodig heeft.

Landing

Bij storm, onweer, sneeuw, hagelbuien en defecten dient de vlieger op een veilige wijze tot op grondniveau gebracht te worden.

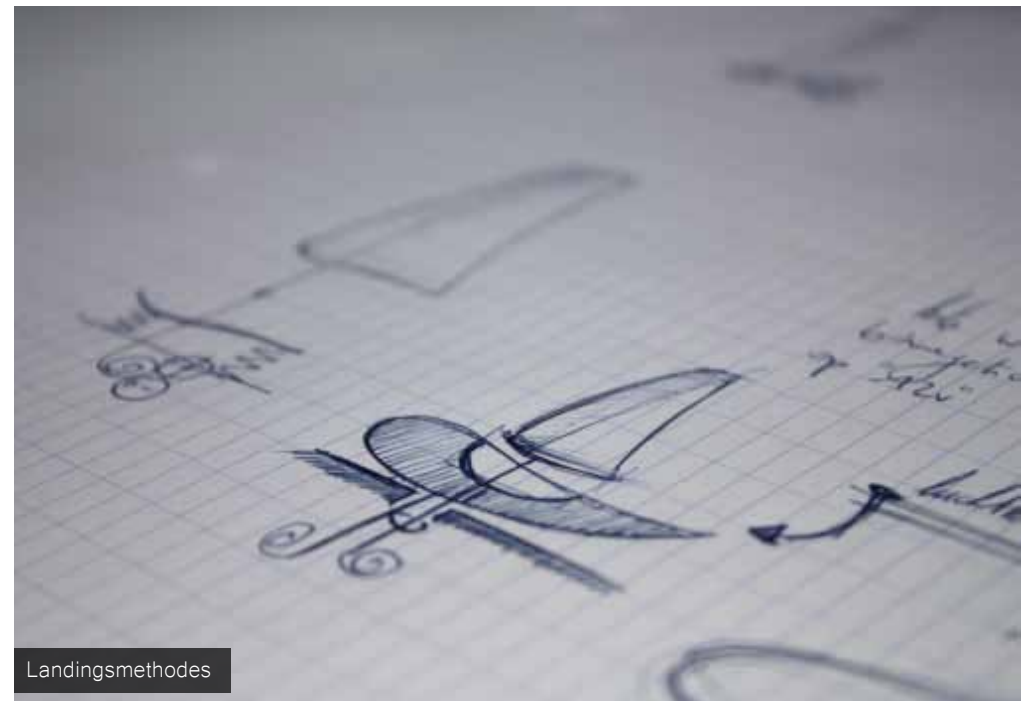
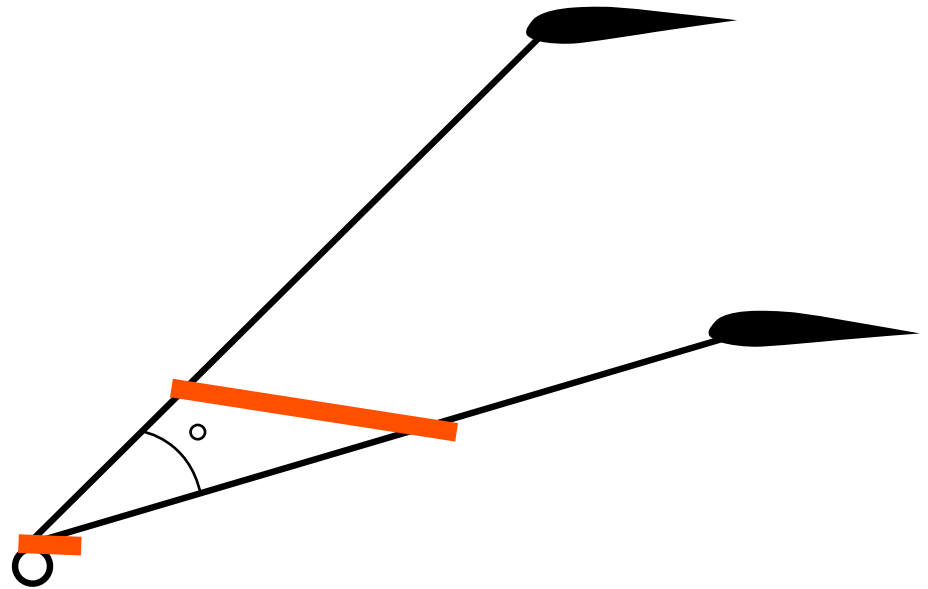
Om het ontwerp van dit systeem zo eenvoudig mogelijk te maken werd een toming aan de onderzijde van de vlieger bewust achterwege gelaten. Dit vermijdt problemen met touwen die in de knoop zouden kunnen geraken etc.

De landingsprocedure verloopt als volgt: de vliegerlijn wordt opgerold, en de vlieger wordt in gedepowerde toestand richting grondstation getrokken met een beheerste snelheid.

Eenmaal de vlieger aan het grondstation aankomt, dient de impact van de vlieger met zijn landingsplek gedempt te worden, en dient de vlieger verankerd te worden.

Oplossingen werden verkend door middel van een quickdesignfase.

Zo werd duidelijk dat door middel van juiste communicatie tussen vlieger en grondstation, de vlieger zelf voor de demping kan zorgen bij de landing, en dit door zijn opblaasbare aard. Wanneer de druk van de kite weggelaten wordt, een fractie voor de landing, reageert de hele vlieger als een dempend luchtkussen.





Lancering

Als de storm geluwd, de wind weer opgekomen, of de reparatie uitgevoerd is, dient de vlieger terug in de lucht te geraken.

In eerste instantie komen lanceerhulpen m.b.v. helium of waterstof in gedachten, maar er zijn er meer.

De vlieger zou ook de lucht in geholpen kunnen worden door middel van een zogenaamde 'pilot kite', een kleiner vliegertje dat zichzelf automatisch lanceert, en zo voldoende trekkracht ontwikkelt om de zwaardere grote vlieger in de lucht te trekken.

Ook een lancering door middel van beweging is een optie. Iedereen kent deze techniek van op het strand... tegen de wind in lopen met de vlieger helpt steeds om deze in de lucht te krijgen ! De KU Leuven ontwikkelt een techniek die hierop gebaseerd is, en die de vliegers laat roteren rond een ophangpunt, om ze zo op snelheid te brengen.

Als de vlieger licht genoeg is, kan de vlieger ook zonder lanceerhulp de lucht inkomen. Daartoe werd een onderzoek uitgevoerd naar de materialisatie van de hele constructie.

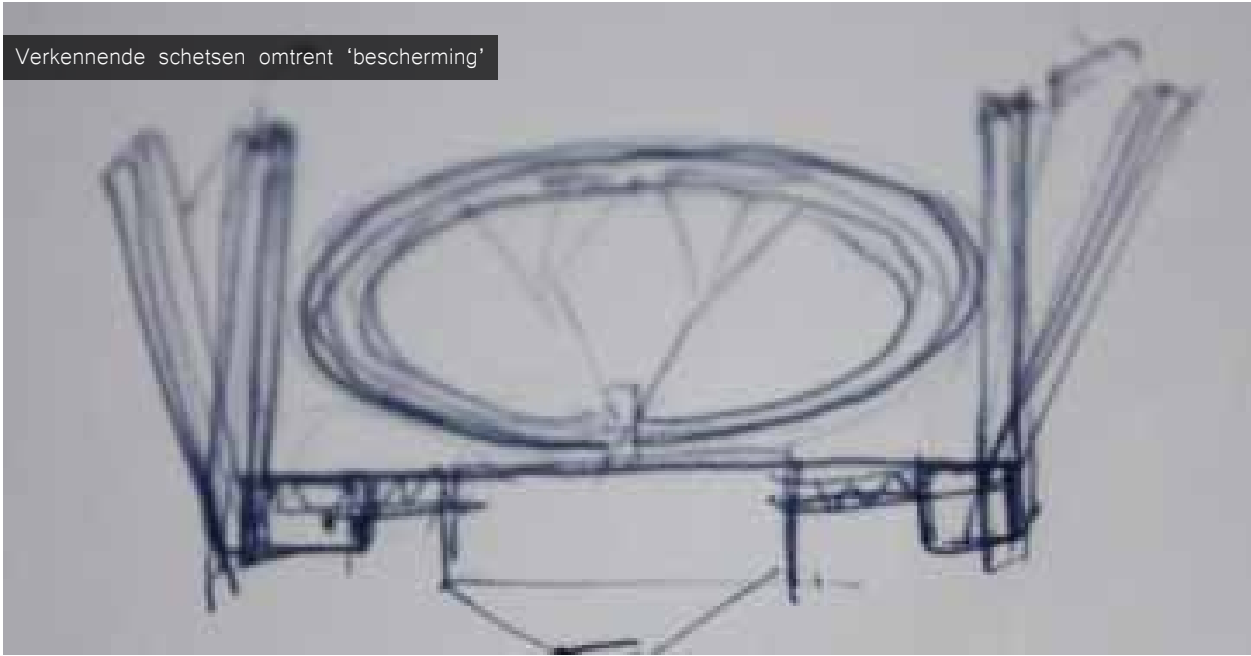
Met een totaalgewicht van 250 kilo heeft de vlieger, zo blijkt uit de CFD-studie, een windsnelheid van 6,5 m/s nodig om dit gewicht vanuit een statische positie te kunnen dragen. Let wel, eenmaal gelanceerd kan de vlieger in de lucht blijven tot een windsnelheid tot 4 m/s.

Om de algemene constructie zo simpel en robuust mogelijk te houden, wordt geopteerd voor een passieve lancering zonder lanceerhulp. Indien in de praktijk zou blijken dat dit geen effectieve manier is, kan het opblaasbare element van de tensaire structuur nog steeds gevuld worden met een drijfgas, wat het gewicht van de vlieger sterk zou doen dalen.

De volledige buitenhoes van de vlieger is in totaal 550 m² groot, en weegt 0,044 kg/m². Dit is dus reeds 24 kilo. Het gewicht van de tensaire structuur kan ingeschat worden door gebruik te maken van de formules van Luchsinger. Deze structuur is berekend voor het bovenste deel van de Ringwing en het onderste deel gescheiden, omdat de belastingsgraad zeer verschillend is. Het bovenste deel van de vlieger krijgt 9 ton te verwerken, en zal 5 kg/m wegen. Het onderste deel 2 ton, en weegt 2.5 kg/m. Dit resulteert in respectievelijke gewichten van 125 en 62,5 kg voor boven- en ondervleugel met een totaalgewicht van 190 kg.

Inclusief buitenhoes en de hardwarecomponenten wordt het gewicht van de vlieger geschat op 250 kg.





Beschermen

Het grondstation zal, wanneer de vlieger geland is, ook een beschermende functie moeten uitvoeren. De zee is namelijk een erg vijandige omgeving, en deze omgeving wordt er tijdens een storm of onweer niet vriendelijker op. En laat dit nu net het ogenblik zijn wanneer de vlieger niet in de lucht hangt.

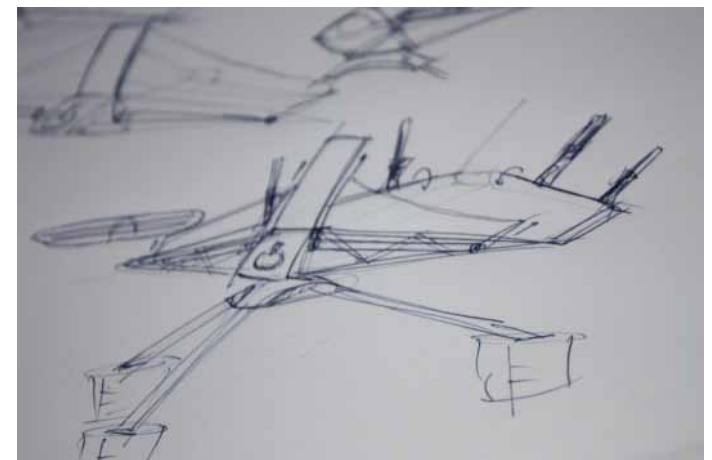
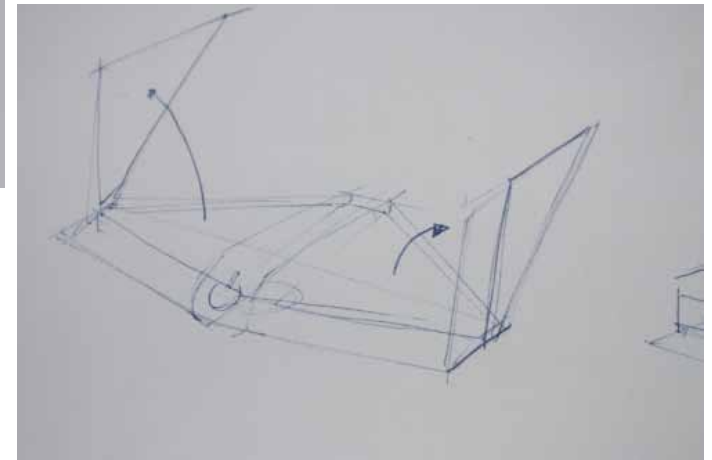
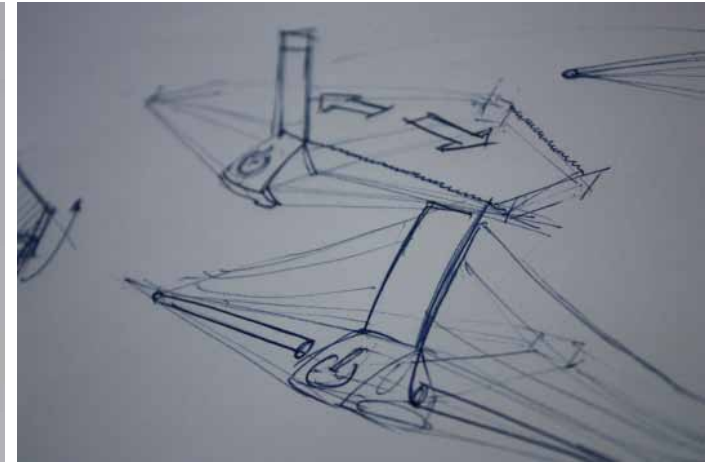
Het grondstation zal er dus voor moeten zorgen dat de vlieger veilig vastgehouden wordt en niet ongecontroleerd kan wegwaaien of wegspoelen met de golven.

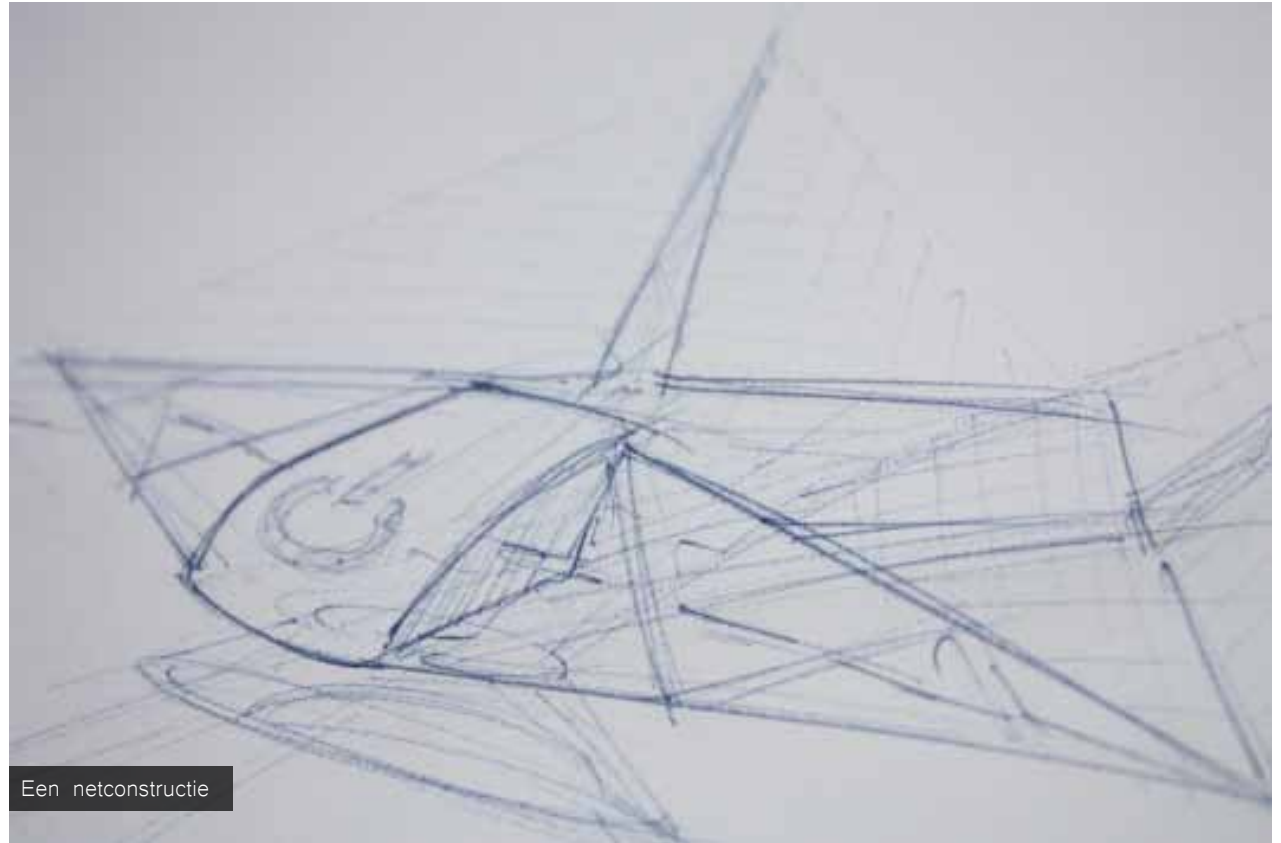
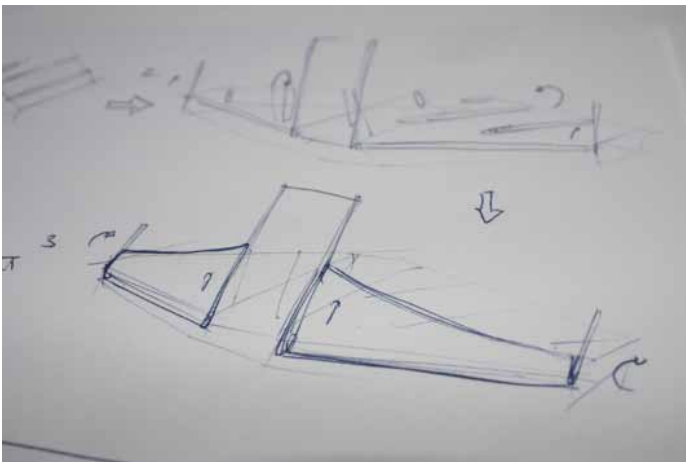
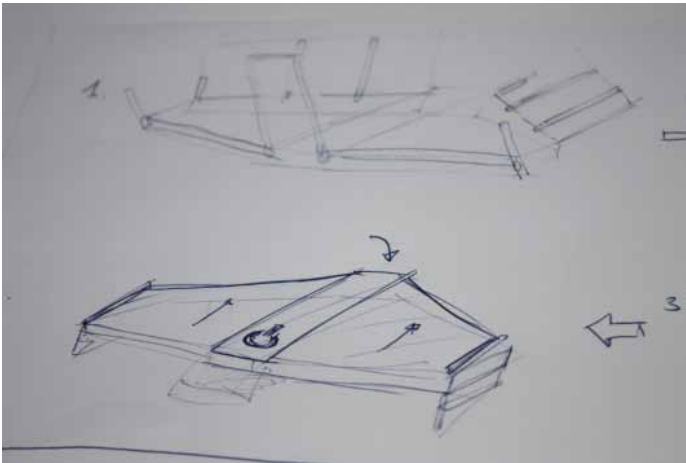
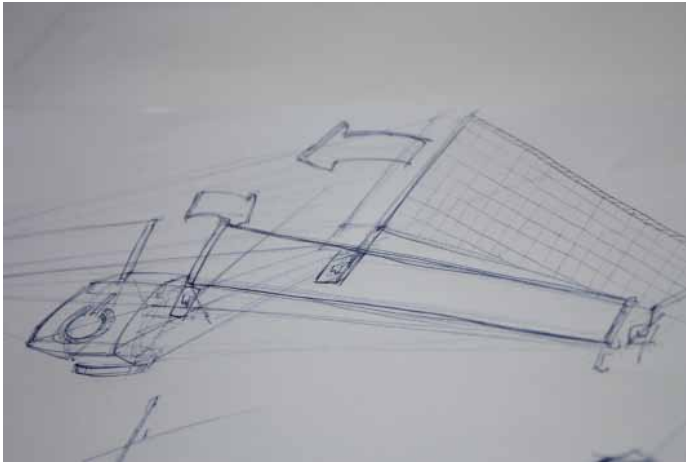
Bij het ontwerpen van het beschermende systeem werd rekening gehouden met de maximale windsnelheden, golfhoogtes en gewichtsverdelingen.

Schetsmatig werd naar oplossingen gezocht die de vlieger in deze omstandigheden konden opvangen. Door de zeer grote afmetingen van de vlieger, platgeduwd een spanwijdte van meer dan 20 meter en een lengte van 10 meter, was dit een sterke uitdaging.

Na een aantal van deze schetsen werd reeds duidelijk dat een gesloten structuur geen optie is. Als een vlieger van dat formaat opgevangen dient te worden in een gesloten 'bak', is de invloed van de wind en golven op het beschermstelsel zo groot dat de algemene prestatie in gevaar komt.

Ook werd getracht om het beschermstelsel een zo intrigerend mogelijke vorm mee te geven, om KitePower een architecturale meerwaarde te geven.

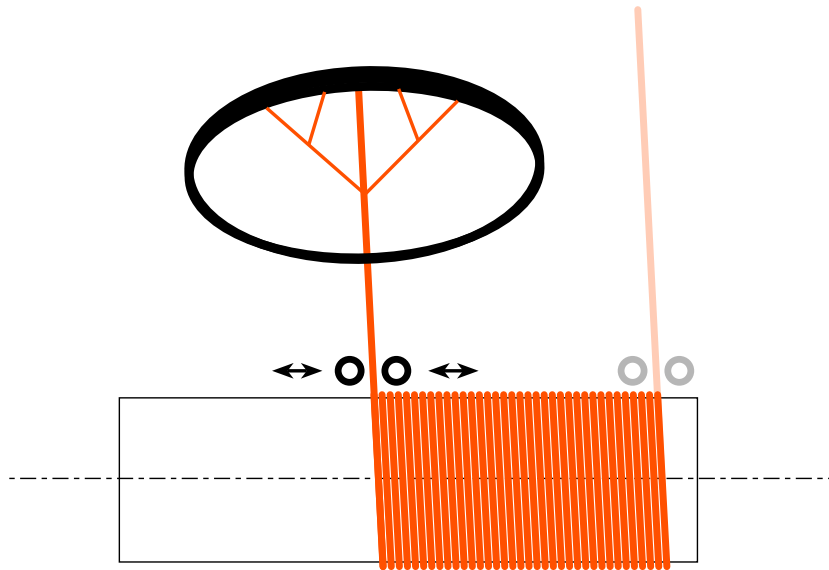




Een netconstructie

Zo werd dus overgegaan naar een constructie met netten, die via een schelpmechanisme de vlieger insluiten. Een schelpconstructie, omdat op deze manier de vlieger gecontroleerd wordt platgeduwd. Vanuit aerodynamisch oogpunt zou een constructie met rolluiken ideaal zijn, maar hierbij is het niet mogelijk om de vlieger plat te drukken, en bestaat het risico dat deze van het lanceerplatform wordt geduwd door deze rolluikconstructie.

De netconstructie is ook in zekere mate elastisch, zodat deze de half-opgeblazen vlieger strak kan omsluiten in elke situatie.



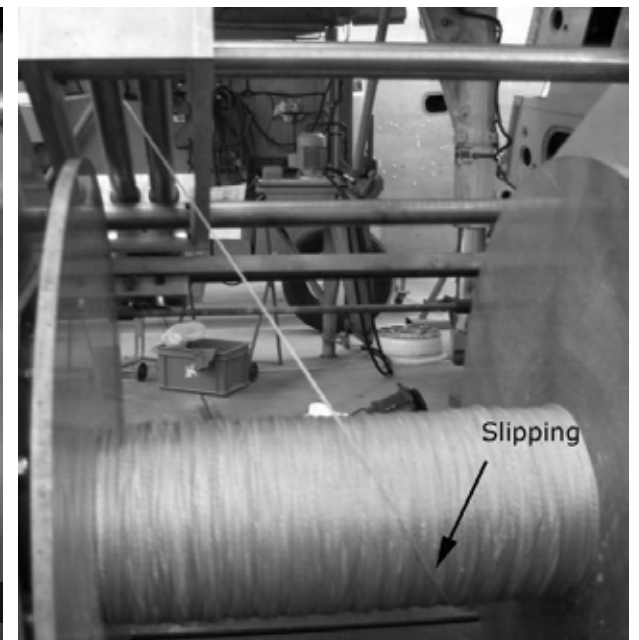
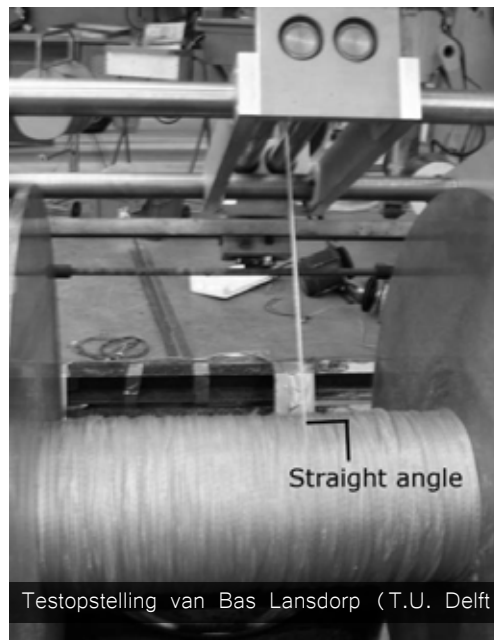
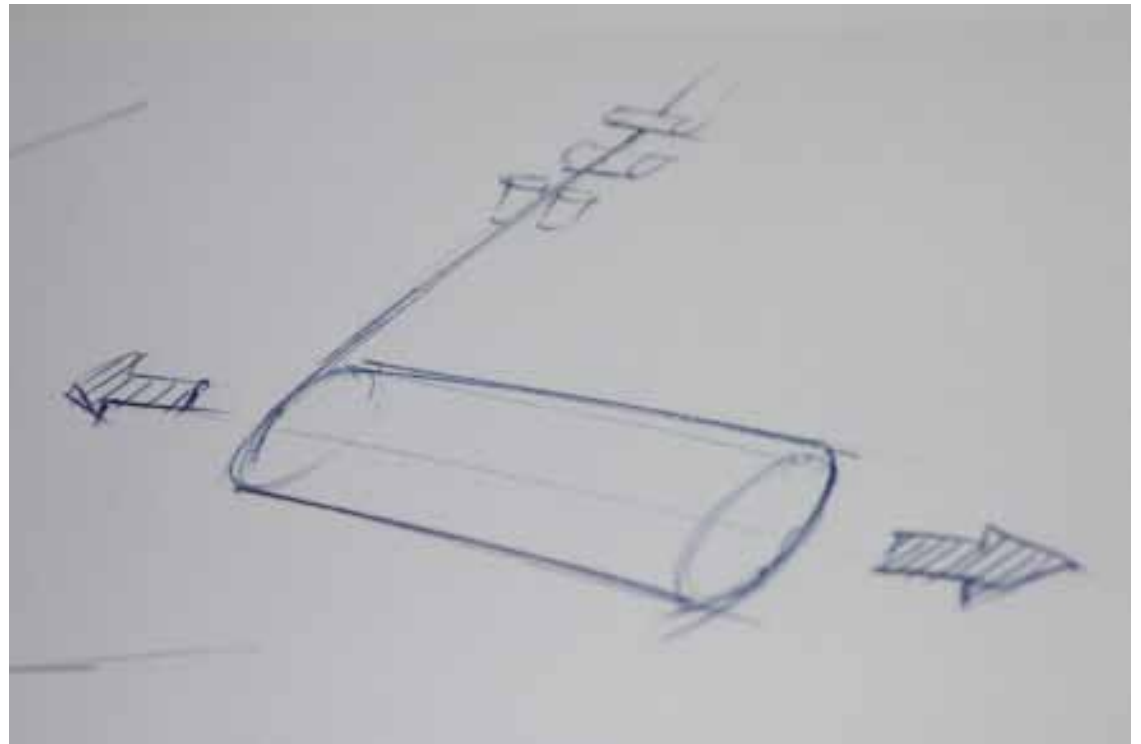
Lijn oprollen

Om de vlieger te laten landen en opstijgen, en om de lineaire kracht van de vlieger om te zetten in een rotatie voor de generator, dient de vliegerlijn op- en afgerold te kunnen worden. Vanuit onderzoek van de TU Delft blijkt dat het niet aangewezen is om een vliegerlijn waar spanning op staat 'over zichzelf' op te rollen.

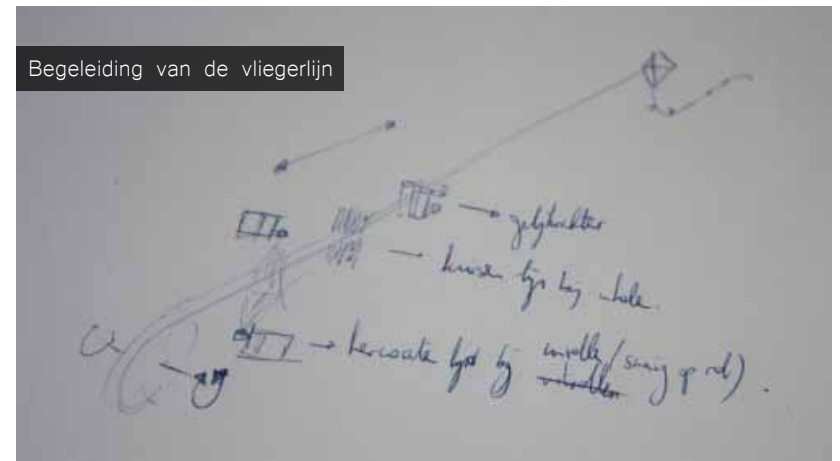
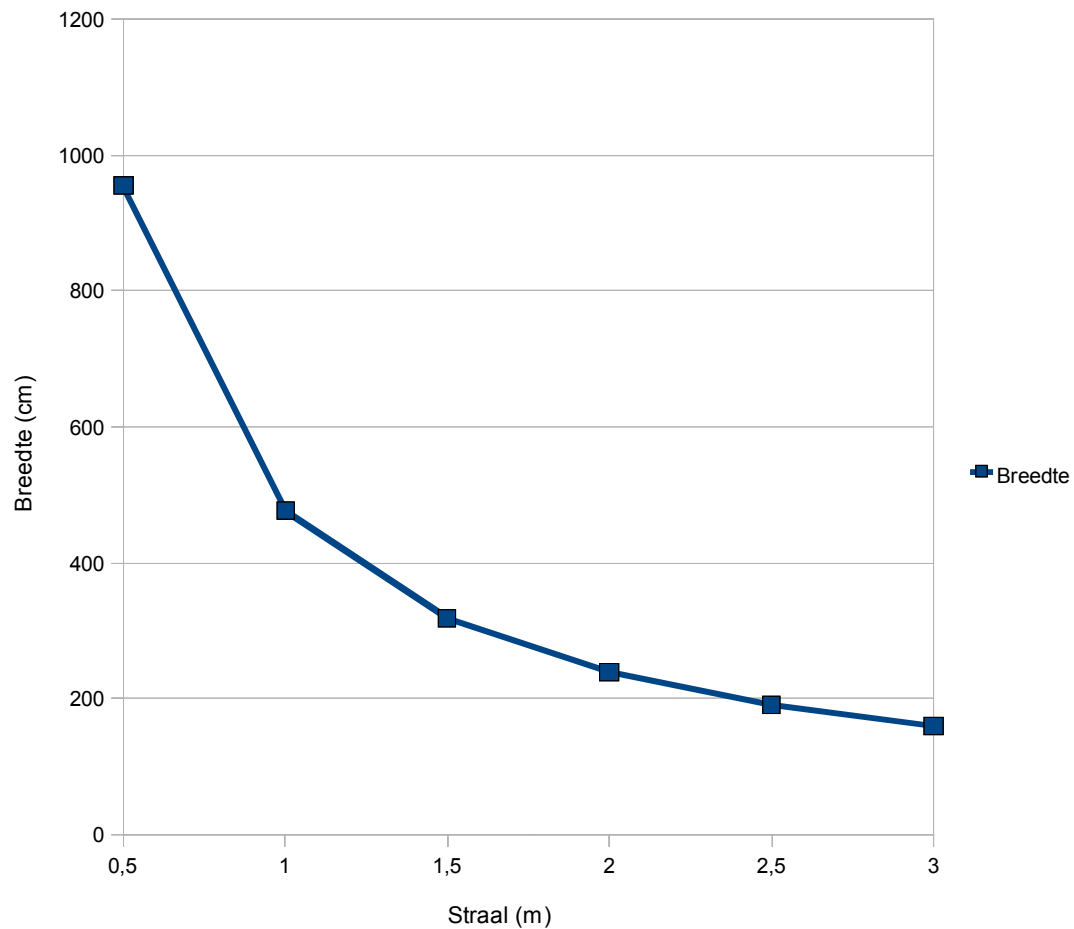
De spoel dient dus breed genoeg te zijn zodat steeds maar een enkele laag vliegerlijn op de spoel ligt. Deze lijn wordt dus 'naast' zichzelf opgerold.

Om dit te verwezenlijken dient de kabel nauwkeurig begeleid te worden, en werd dus een systeem ontworpen om de kabel steeds naar de juiste plaats op de spoel te begeleiden.

Om de grootte van de spoel in te schatten, werd eerst berekend hoe breed de spoel dient te zijn om 1200 meter dyneema-kabel met een diameter van 2,5 cm op te rollen.



Testopstelling van Bas Lansdorp (T.U. Delft)



Vanuit deze grafiek blijkt dat de breedte van de spoel enorm beperkt wordt wanneer de straal groter wordt. Om de afmeting van de straal te kiezen, dient eerst de afmeting van de generator te worden overwogen.

Deze generator bevindt zich namelijk in de spoel zelf, waardoor een hele reeks overbrengingen en/of dubbele onderdelen vermeden wordt.

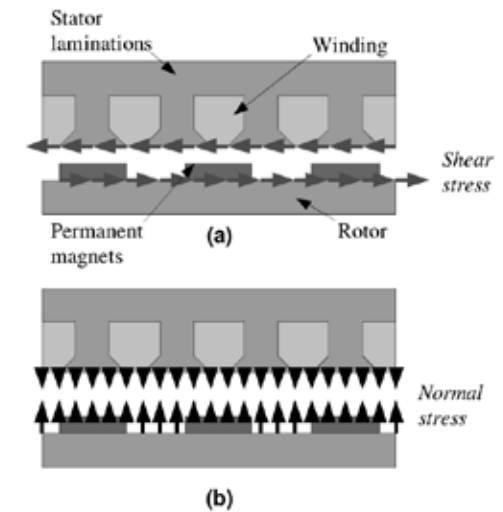
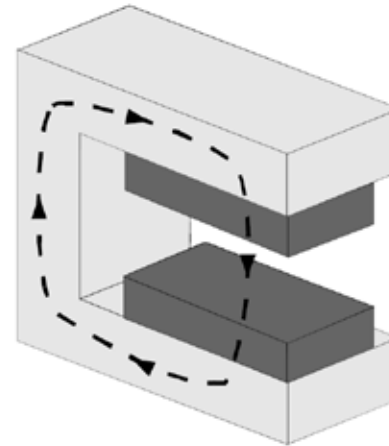
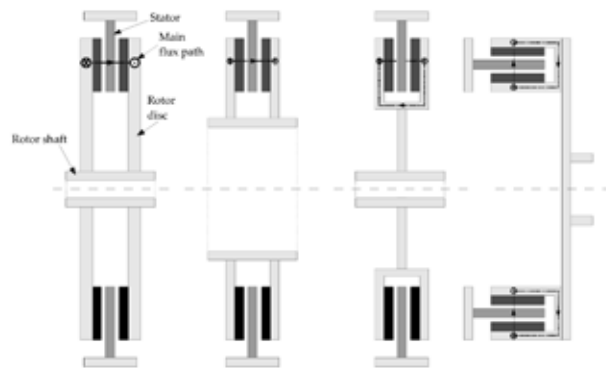


Figure 1: Section of a conventional permanent magnet generator showing (a) Shear stress and (b) Normal component of Maxwell stress

Net zoals bij de offshore-windturbines wordt bij KitePower geopteerd voor een permanente magneet-generator. Dit beperkt het aantal bewegende onderdelen door de versnellende tandwielkast te elimineren.

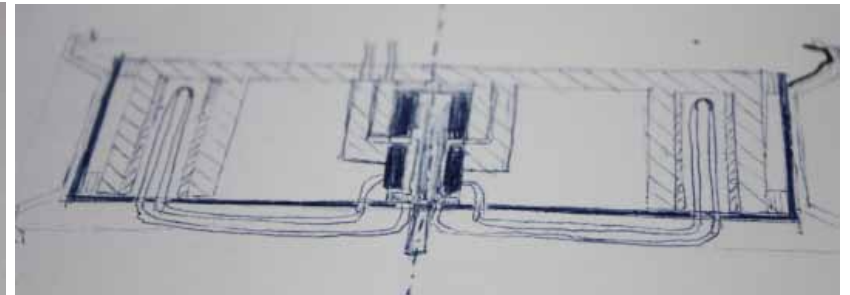
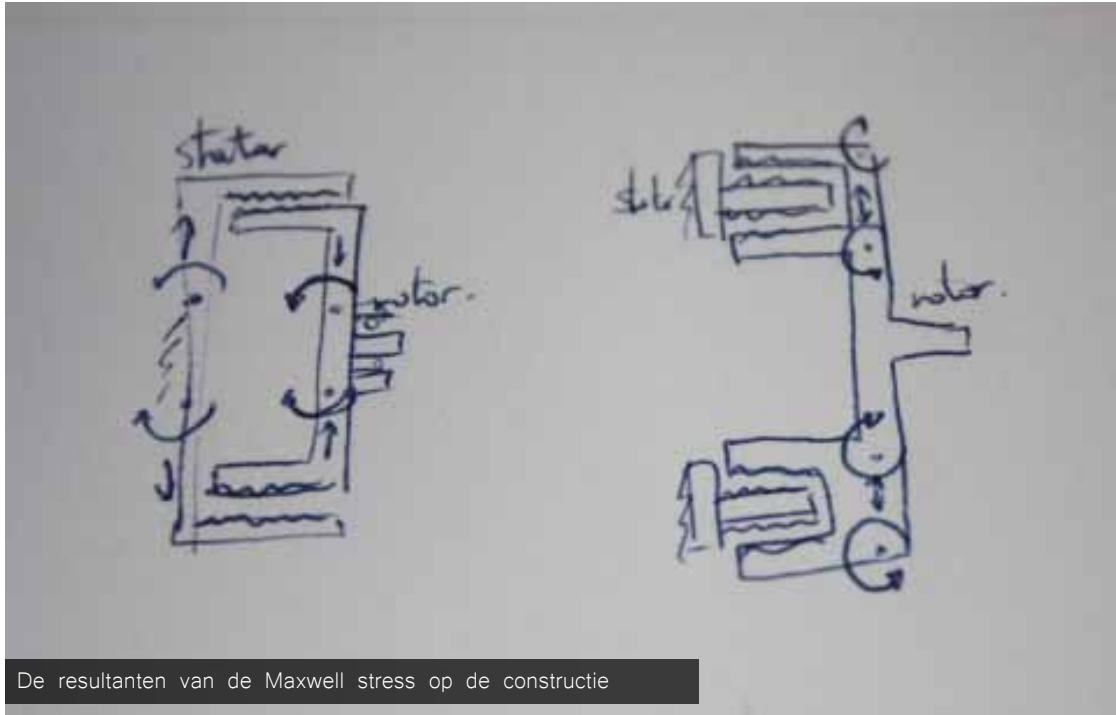
Bij KitePower dient echter de lijn van de vlieger steeds op- en afgerold te worden, wat zorgt voor een niet-constante input op de generator. De kracht van het afrollen dient uitgevoerd te worden op de generator, voor het oprollen is een motor nodig... die eigenlijk ook de generator kan zijn !

Als de generator gebruikt wordt als motor, moet deze echter wel even vaak als de vliegerlijn op- en afgewikkeld wordt, van rotatierichting veranderen. Als een aparte motor gebruikt wordt impliceert dit het gebruik van een slipkoppeling op de generator, en een aantal extra overbrengingen.

Om de algemene simpliciteit van het ontwerp te bewaken, werd geopteerd om de generator ook als motor te gebruiken. Wat dan belangrijk is, is dat de massa van de rotor van de generator (die steeds van richting verandert) zo licht mogelijk is. Hiertoe werd een hele tijd desk research uitgevoerd om voeling te krijgen met de wetenschap rond generatoren.

Vanuit de universiteit van Edinburgh verscheen een wel erg sterke input voor mijn generator...





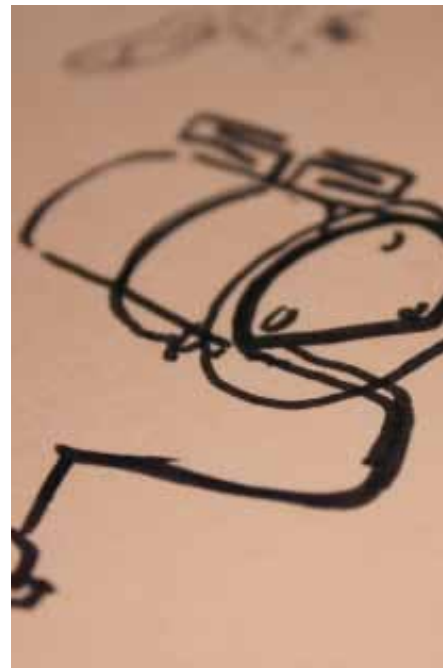
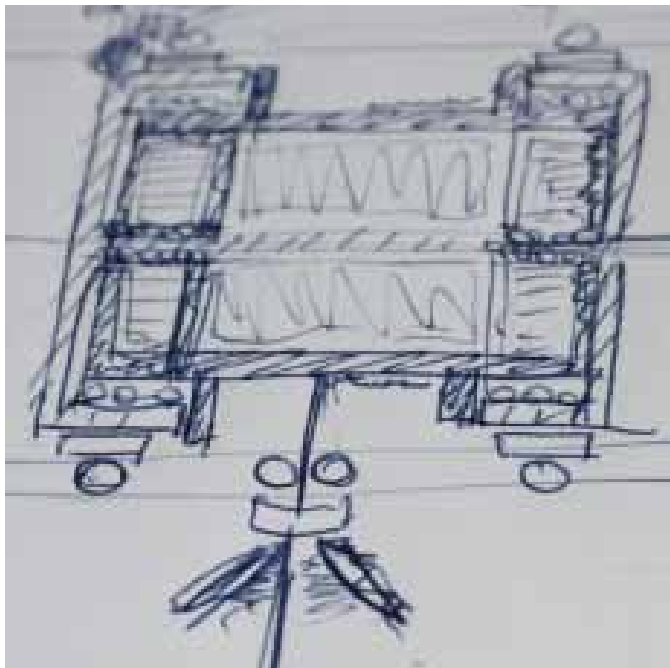
Bij een permanente magneetgenerator zijn een zware ophanging en erg sterke rotor noodzakelijk, om de aantrekkingskracht tussen de rotor en stator te kunnen weerstaan. Twee medewerkers van de universiteit van Edinburgh hebben een manier gevonden om deze aantrekkingskracht uit te schakelen, om zo een 55% lichtere constructie te bekomen.

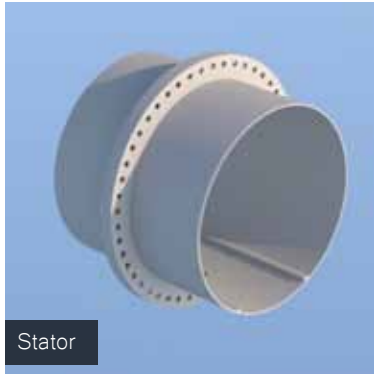
Hun 'C-core' isoleert de belasting door de maxwell-stress in de C-vormige magneet, waardoor deze de algemene sterkte van de rotor niet beïnvloedt.

Dit is de generator-opbouw die tot op heden de lichtste permanente-magneet structuur voorstelt. Deze wordt dan ook gebruikt in het ontwerp van KitePower.

Deze 'C-core-generator' genereert 1250 kW als hij 1,2 meter lang is met een diameter van 2,6 meter. Deze 1,2 meter lengte is een maximum afmeting, want bij een grotere lengte komt de structurele sterkte van de C-vormige constructie in gevaar.

De resulterende lengte van de totale generator (om 2,5 MW op te wekken zijn 2 van deze sub-generatoren nodig) is dus 2,4 meter. De afmetingen van deze gekozen generator zijn ruim voldoende om de spoel (voor de vliegerlijn) rond te bevestigen.





Stator



Stator met rollagers

C-Core

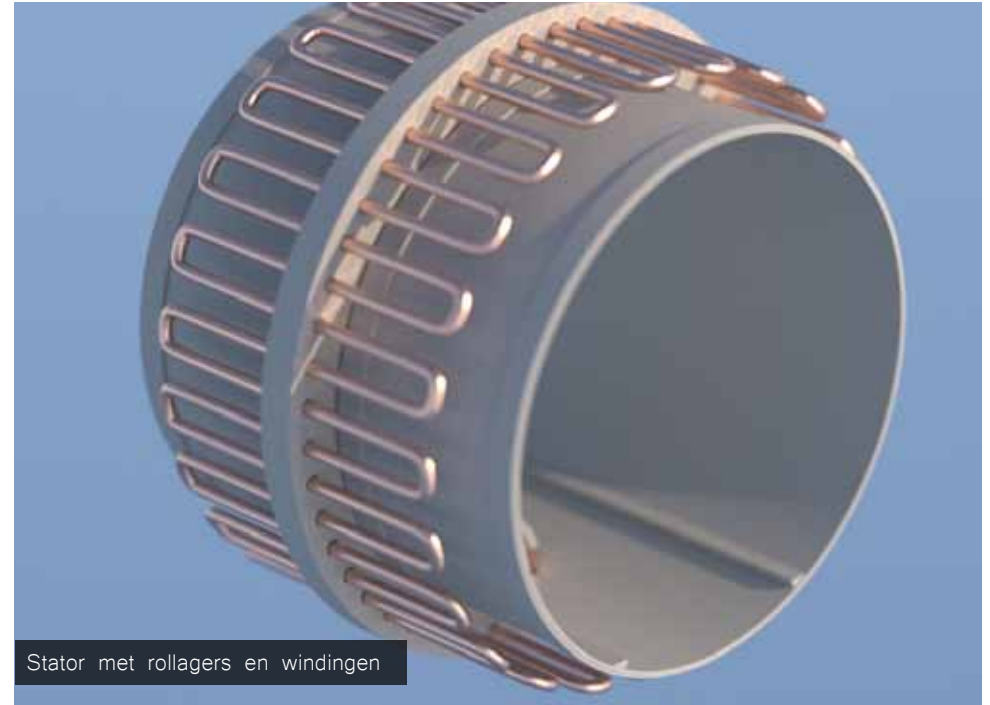
Het definitieve generatorontwerp positioneert de twee sub-generators naast elkaar, waarbij de statoren in het centrum van de generator bij elkaar komen. Dit omdat beide stroomkabels zo de buitenkant van de generator vrijhouden, waardoor de uiteindelijke behuizing kleiner gemaakt kan worden.

De stator is de dragende constructie van de hele generator. Op de stator zijn rollagers voorzien waar de permanente magneten van de rotor op kunnen roteren.

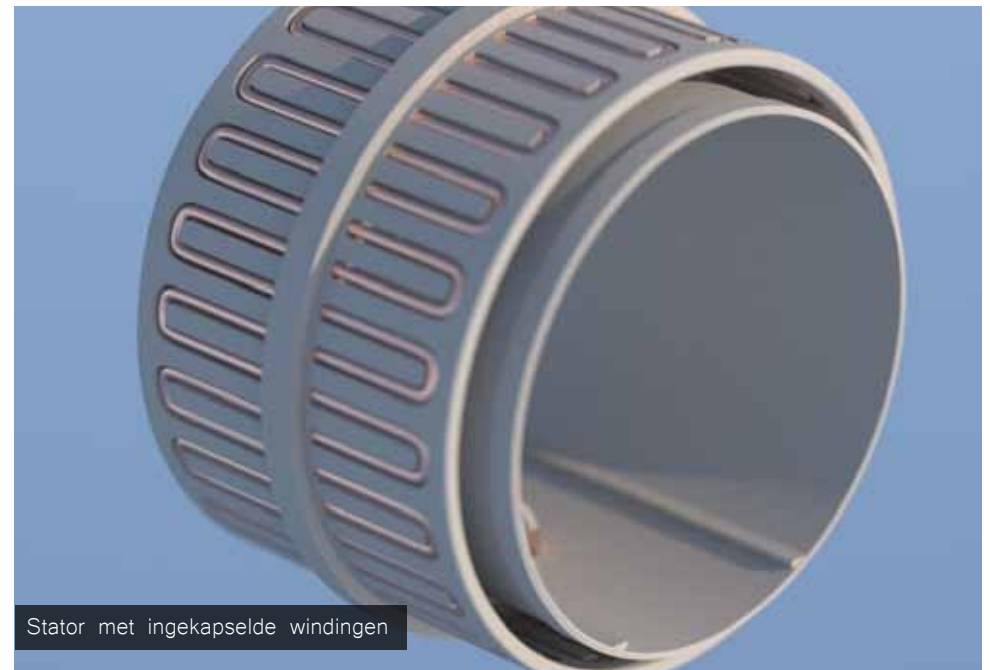
De wikkelingen van de stator worden in een beschermende huls van polyurethaanschuim gegoten, alvorens ze gemonteerd worden op het stalen basisstuk van de stator. Dit schuim beschermt de wikkelingen tegen een kortsluiting als, bij een faling van de constructie, water of een ander medium zich tot in de generator zou begeven.

De rotor is dan weer opgebouwd uit een groot aantal trapeziumvormige permanente magneten, die door een aantal ringen in vorm worden gehouden. Deze constructiemethode vergemakkelijkt de montage en eventuele reparatie enorm, door de modulaire opzet.

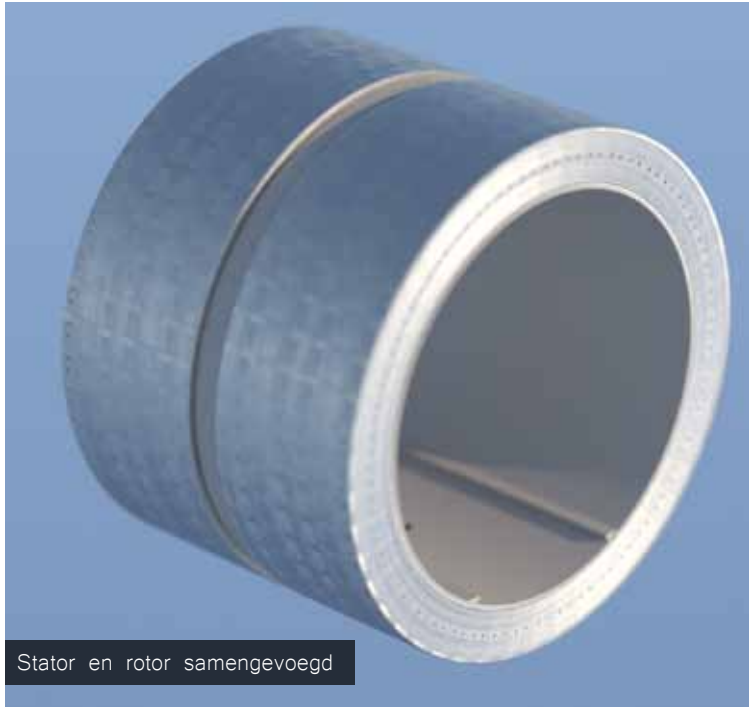
Langs de buitenzijde wordt de rotor vast gemonteerd op de rollagers van de stator, wat een zijdelingse beweging van de rotor verhindert.



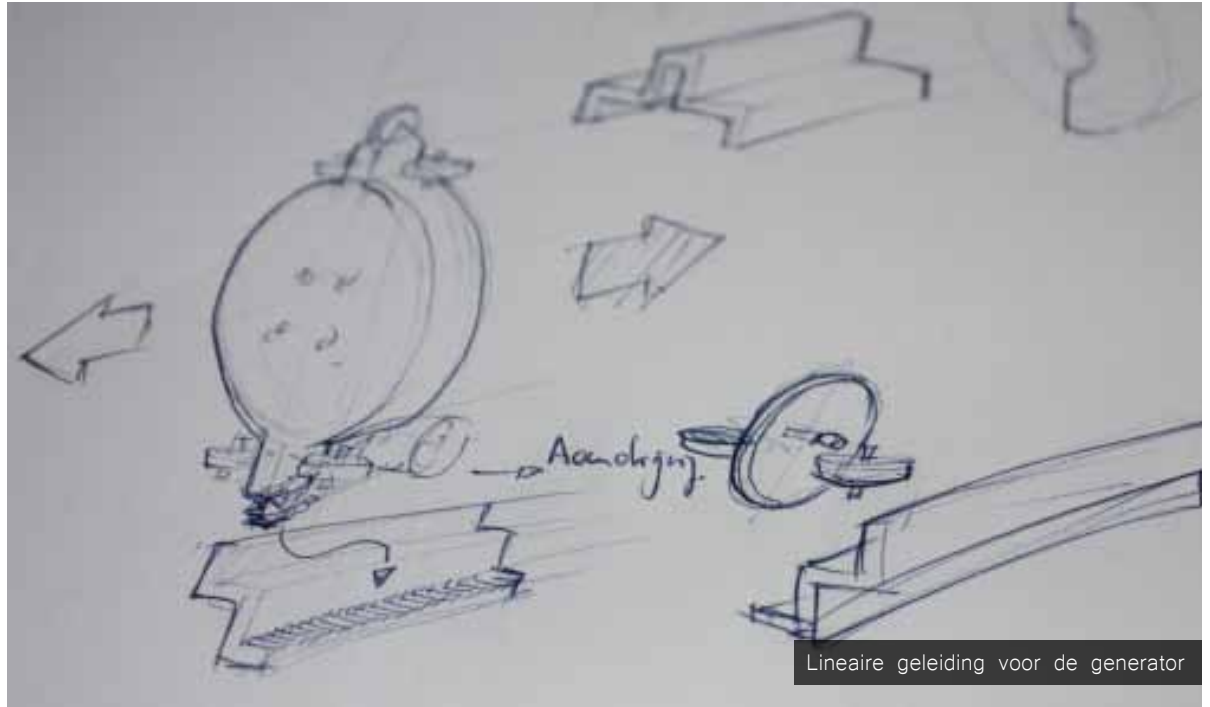
Stator met rollagers en windingen



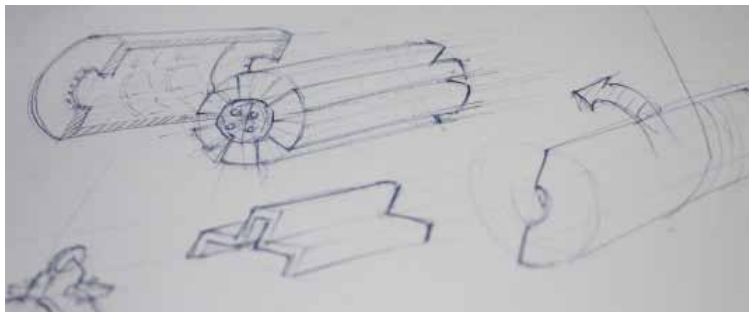
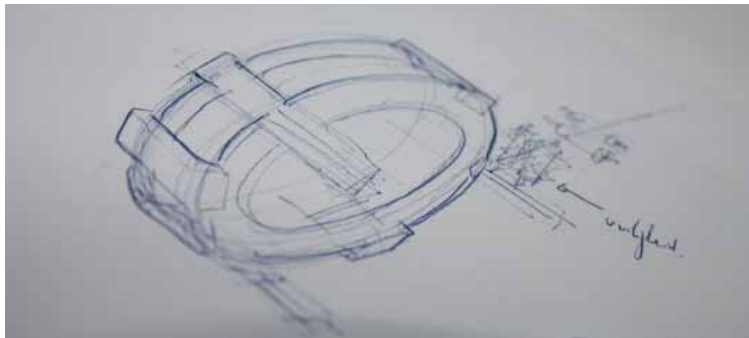
Stator met ingekapselde windingen



Stator en rotor samengevoegd



Lineaire geleiding voor de generator



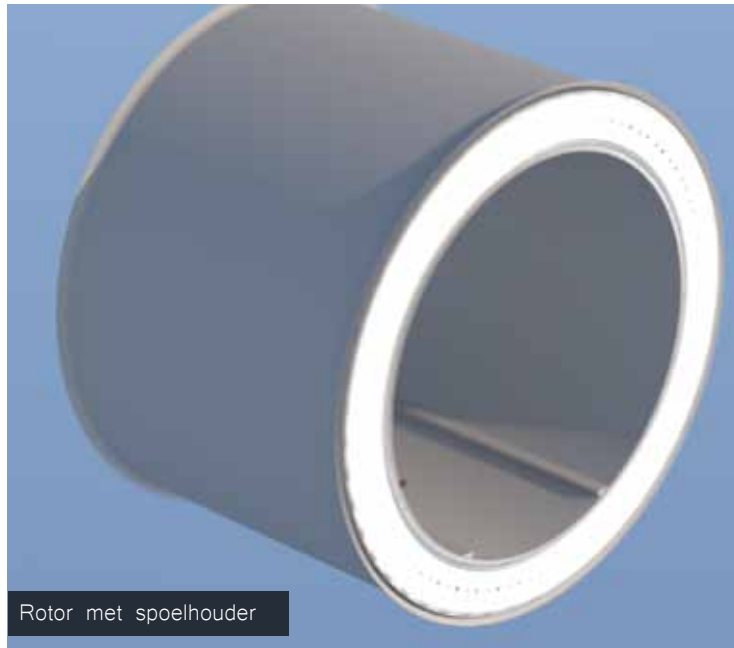
Vrijheidsgraden

Het feit dat de generator als motor wordt gebruikt, die de spoel van de vliegerlijn bedient, heeft een aantal consequenties op de constructie. Zo dient de generator samen met de spoel over de volledige lengte van 2,4 meter van links naar rechts te kunnen bewegen, om de vliegerlijn mooi te kunnen oprollen.

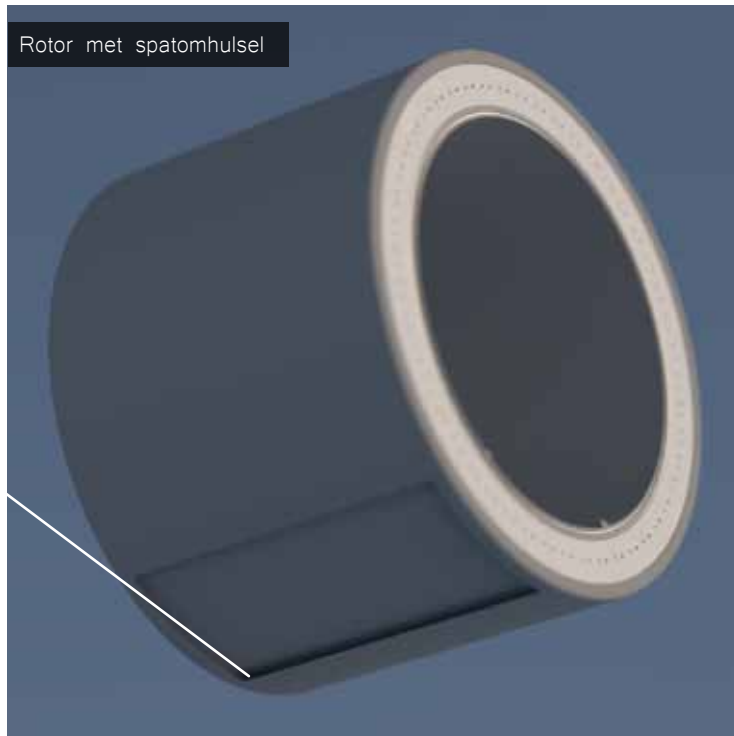
Verder dient de generator ook in beide richtingen te kunnen roteren om zowel de motorfunctie als generatorfunctie te kunnen uitvoeren. Om af te wisselen tussen generator- en motorfunctie wordt de polariteit van de stator omgewisseld via de aansturing van de generator.

Om de uitzwaaiing in dwarsrichting te kunnen uitvoeren werd op de draagconstructie een lineaire geleiding gemonteerd, die samenwerkt met een lineaire geleiding op de stator. Zo zit de generator toch vast op de draagconstructie, en kan hij enkel van links naar rechts bewegen.

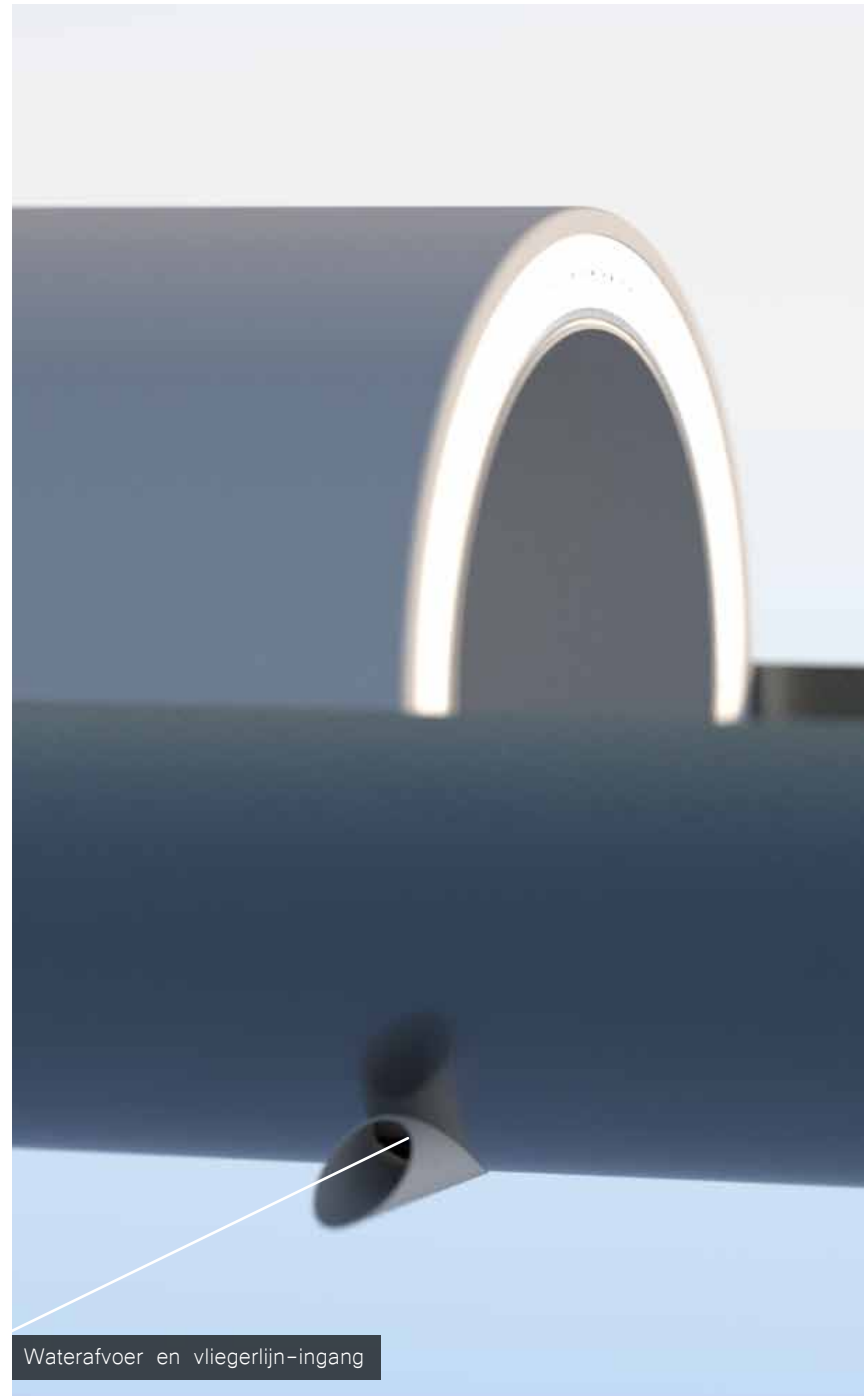
De lineaire beweging wordt uitgevoerd door 2 servomotoren die in het midden van de draagconstructie gemonteerd zijn. Deze drijven de onderste lineaire geleidingen op de stator aan.



Rotor met spoelhouder

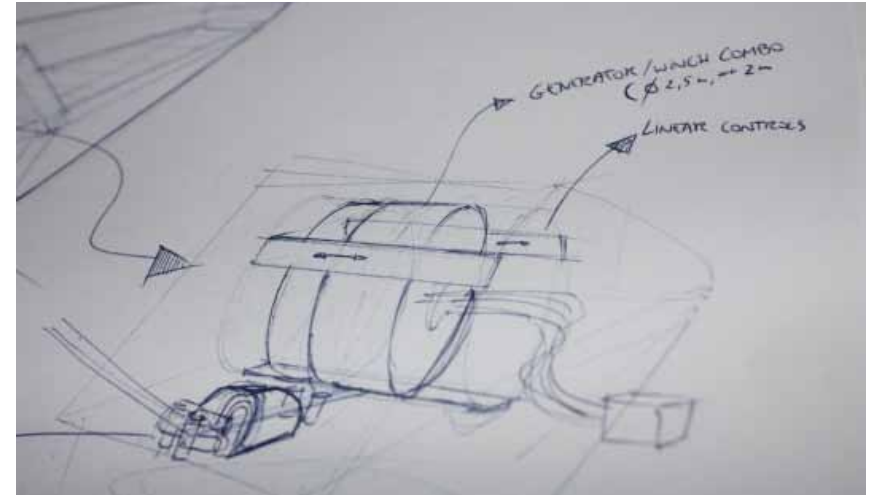
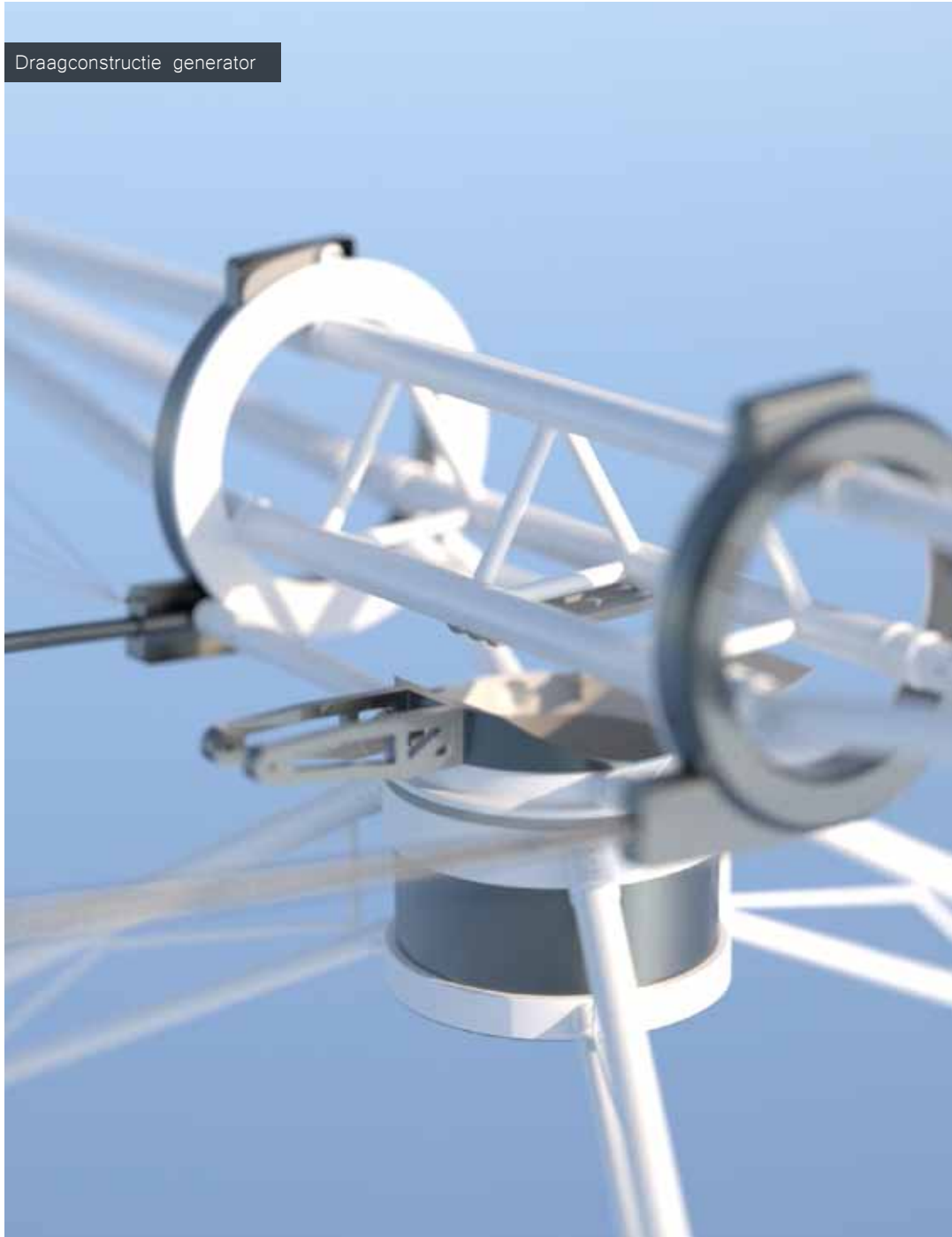


Rotor met spatomhulsel



Waterafvoer en vliegerlijn-ingang

Draagconstructie generator



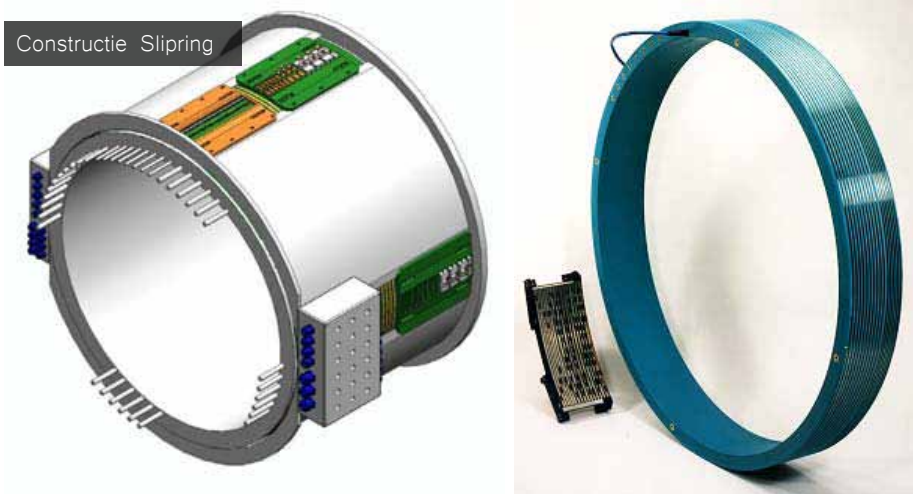
Afwerking Generator

De spoel waarrond de vliegerlijn gewikkeld wordt, zit gemonteerd op de rotoren van de generator. Ook deze spoel weerhoudt de rotoren om een zijdelingse beweging uit te voeren.

Als het regent of er is veel opwaaiend water van de golven, zal de vliegerlijn vochtig zijn. Door het centrifugale effect in de ronddraaiende generator, zal het water dat zich in de vliegerlijn bevindt, weggeslingerd worden van het centrum van de generator. Om ervoor te zorgen dat dit water niet met de gehele constructie, en zeker niet met de elektronische componenten, in contact komt, werd een omringende behuizing ontworpen die dit rondgeslingerde water opvangt.

Door de zwaartekracht valt dit water naar beneden, waar het wordt opgevangen in een gootje dat dit water naar de buitenzijde van het grondstation afvoert.

Door hetzelfde gootje gaat de vliegerlijn naar buiten.

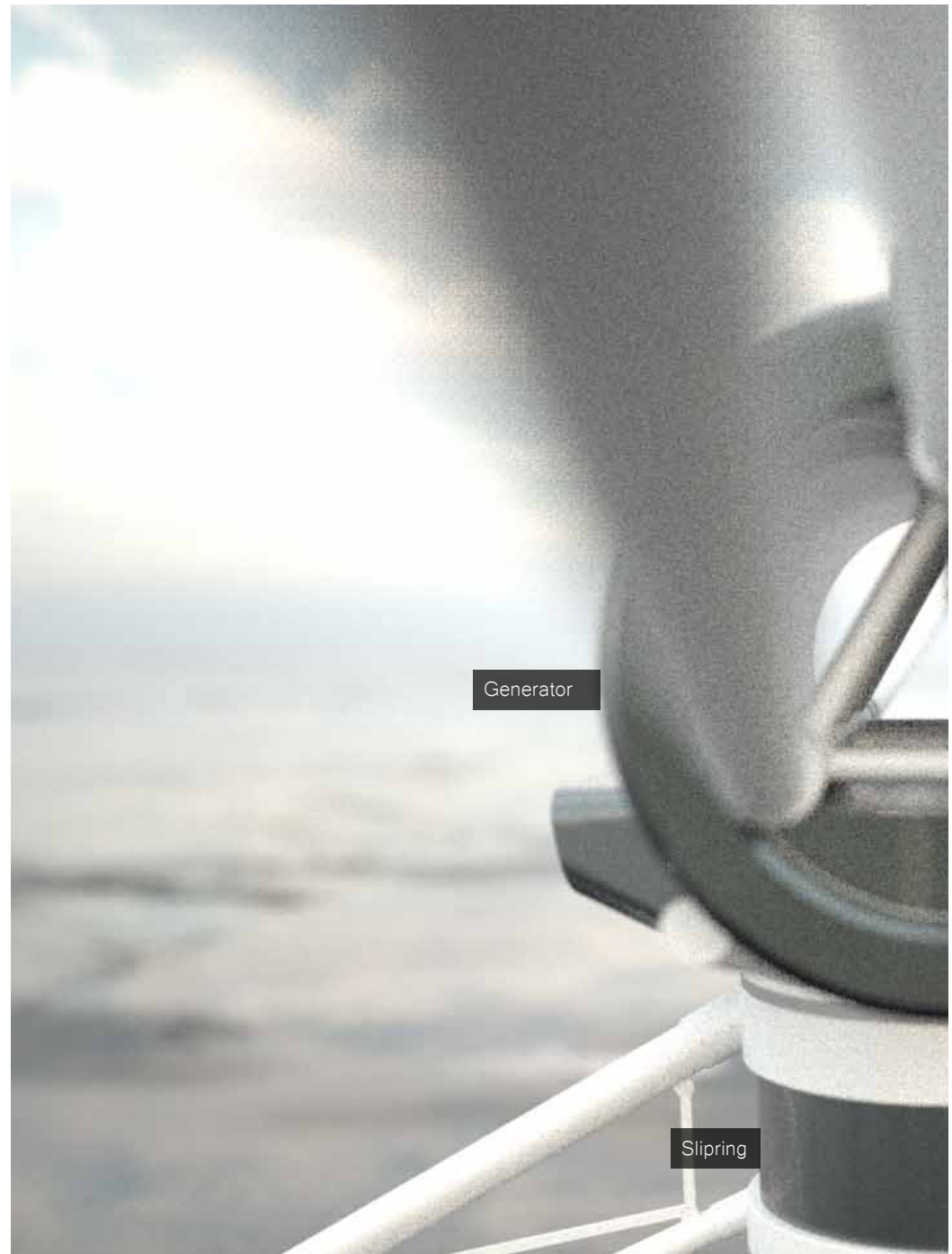


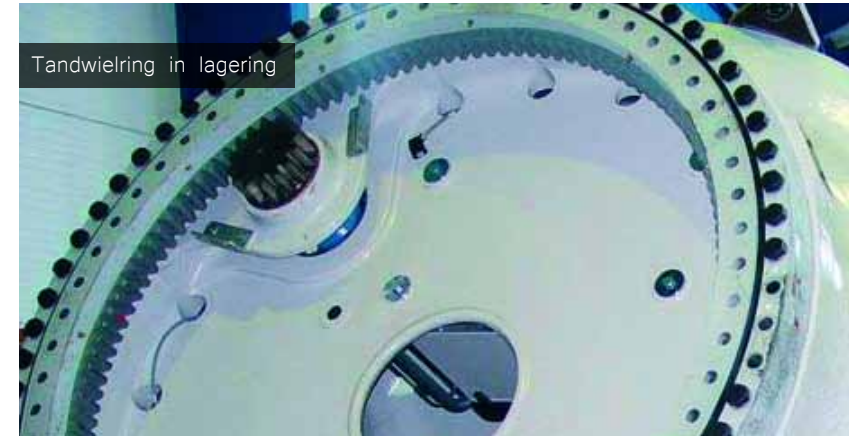
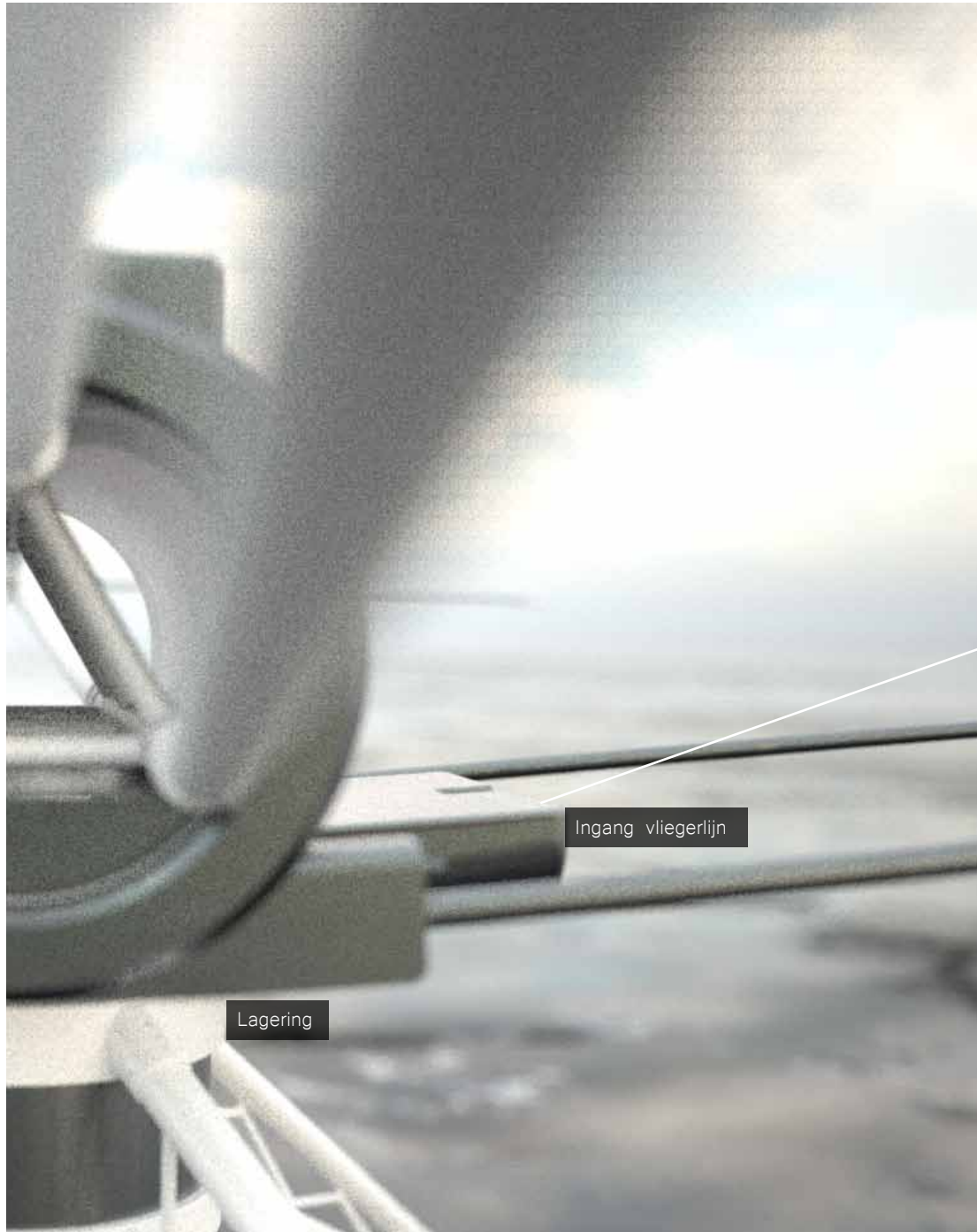
Overbrenging

De vliegerlijn wordt buiten de generator gelineariseerd. Dit omdat deze lijn steeds recht op de generator dient toe te komen. Een simpele katrol zorgt ervoor dat de vliegerlijn van een hoek van 30° wordt omgebogen zodat deze op de generator terecht komt. De afrondingen op de rest van de constructie zorgen ervoor dat deze lijn steeds op de katrol blijft.

Deze vliegerlijn trekt aan de spoel, die deze trekkracht omzet in een rotatie van de rotor van de generator. Door deze rotatie wordt elektriciteit opgewekt. Deze elektriciteit wordt via het centrum van de generator naar een slipring gebracht, die de stroom van het roterende bovenstuk van het grondstation overbrengt naar het statische deel.

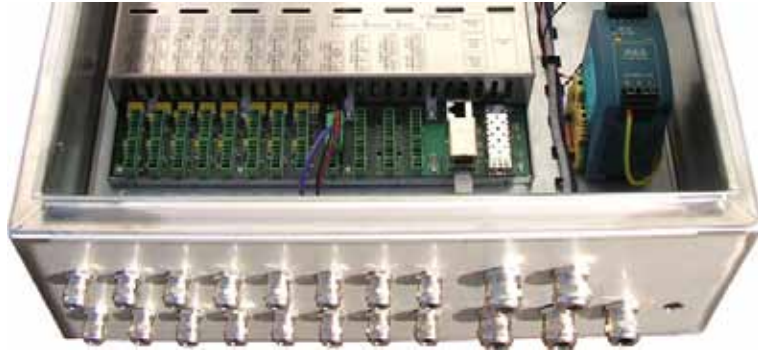
In dit statische deel wordt de gegenereerde stroom overgebracht naar de transportkabel, die de stroom overbrengt naar een externe transformatiekabine, die aangesloten is op het stroomnetwerk.





Het roterende bovendee van het grondstation zorgt ervoor dat de vliegerlijn steeds in de juiste richting staat. Als de wind van richting verandert draait de hele constructie mee. Deze draaibeweging wordt uitgevoerd door een servomotor die ingrijpt op een tandwielring in de lagerconstructie.

Dit heeft zijn invloed op deze lager die het bovenste en onderste deel van de constructie met elkaar verbindt. Deze dient zowel het gewicht van het bovenste deel te dragen, als een deel van de liftkracht van de vlieger te counteren.



OCAS radar



Windmapping met laser



Oriëntatiesensoren

Controle (1)

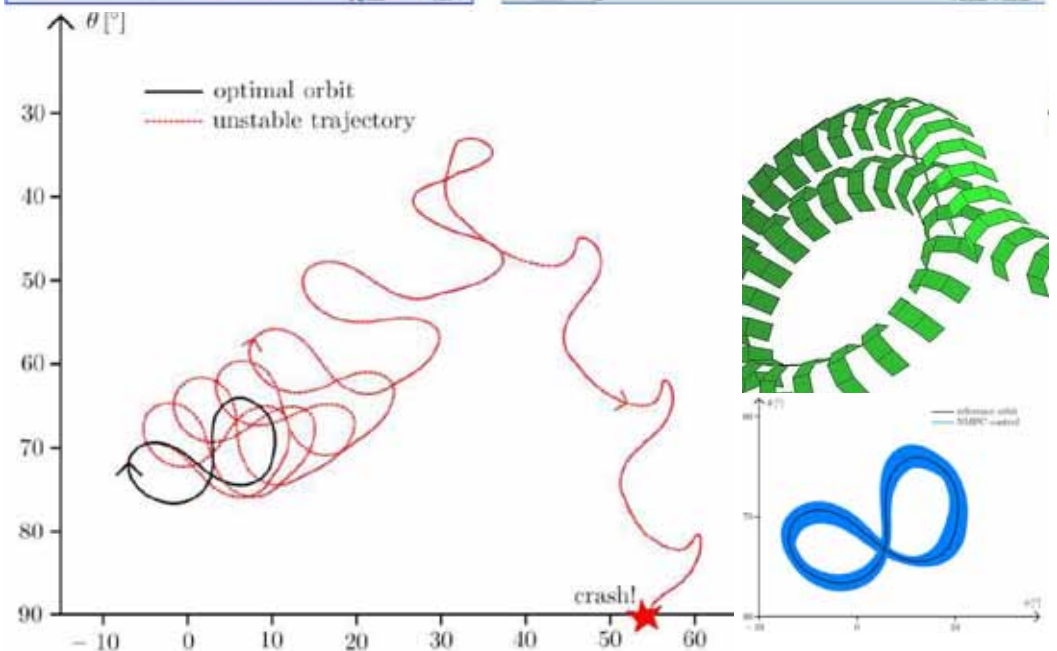
Om deze vliegerlijn steeds de juiste oriëntatie mee te geven, dient een geavanceerde controlesoftware te worden geschreven die verschillende data als input gebruikt.

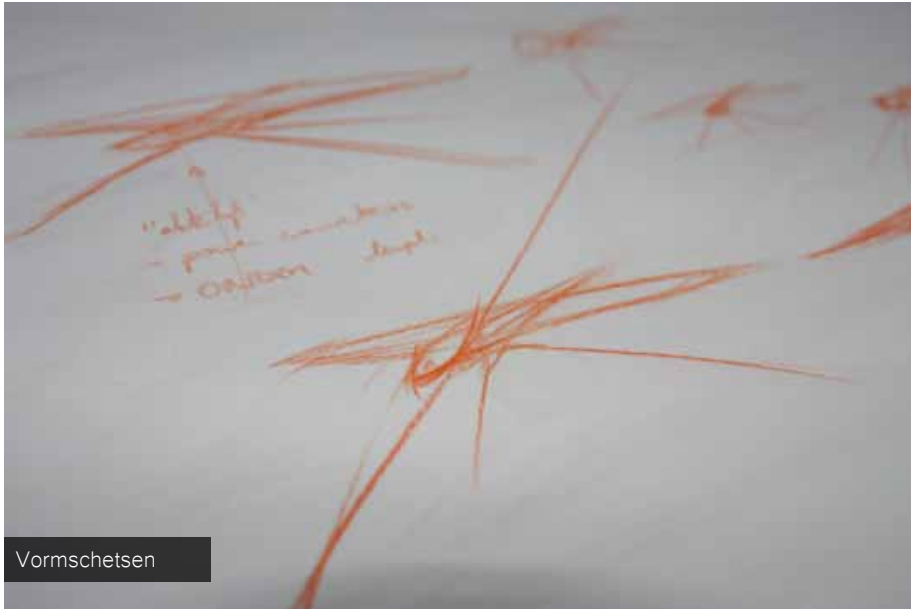
Zo is er in het grondstation een windmappingsapparaat ingewerkt, dat de windvelden tot op een afstand van 2 km en een hoogte van 300 meter in kaart kan brengen. Zo voorspelt KitePower op nauwkeurige wijze de windrichting op een kort tijdsinterval.

Ook zit in het grondstation een GPS-unit, om de exacte locatie van de energiecentrale te bewaken, en een set van gyroscoop en 3-assige accelerometers. Deze laatste worden gebruikt om de invloed van de golven op de beweging van de hele energiecentrale te lezen, en de oriëntatie van het bovenste deel van de constructie, indien nodig, aan te passen.

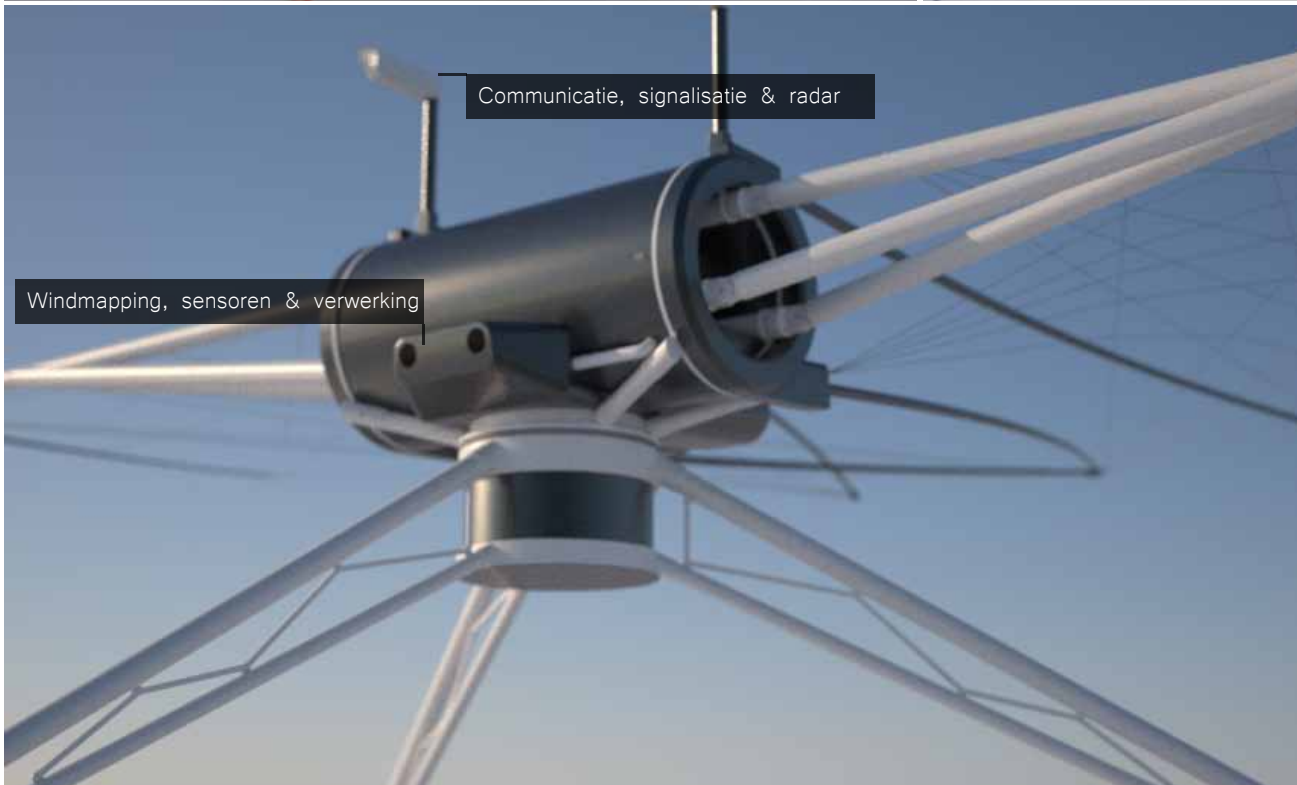
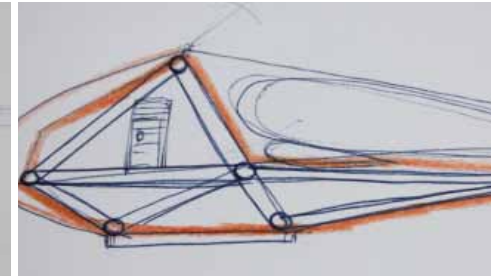
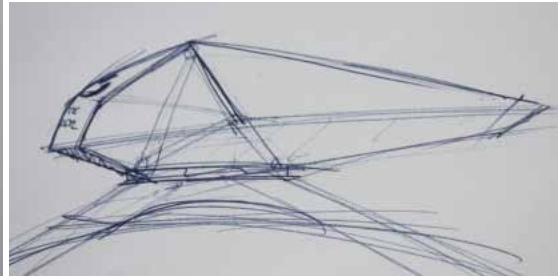
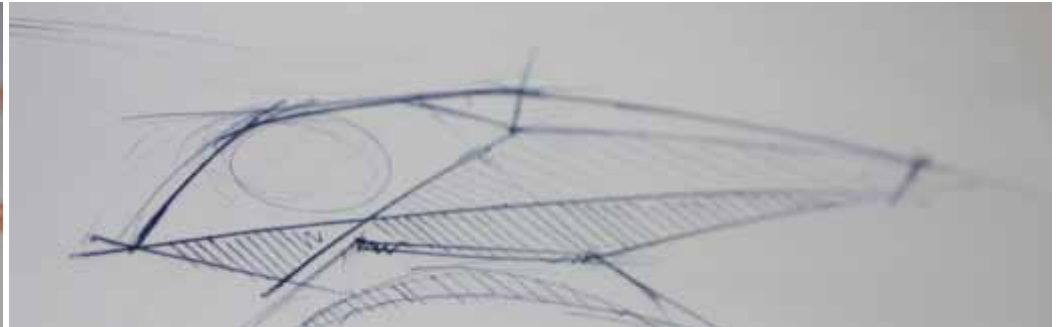
De benodigde verwerkingseenheid communiceert ook met het beheerscentrum van het windpark, om zo de KitePower-centrale voor controles of reparaties vanop afstand te kunnen stilleggen of starten.

Als laatste is de KitePower-centrale ook uitgerust met een aantal radarbakens op zowel de vlieger als het grondstation, om zo aanvaringen met vliegtuigen en schepen te voorkomen.





Vormschetsen

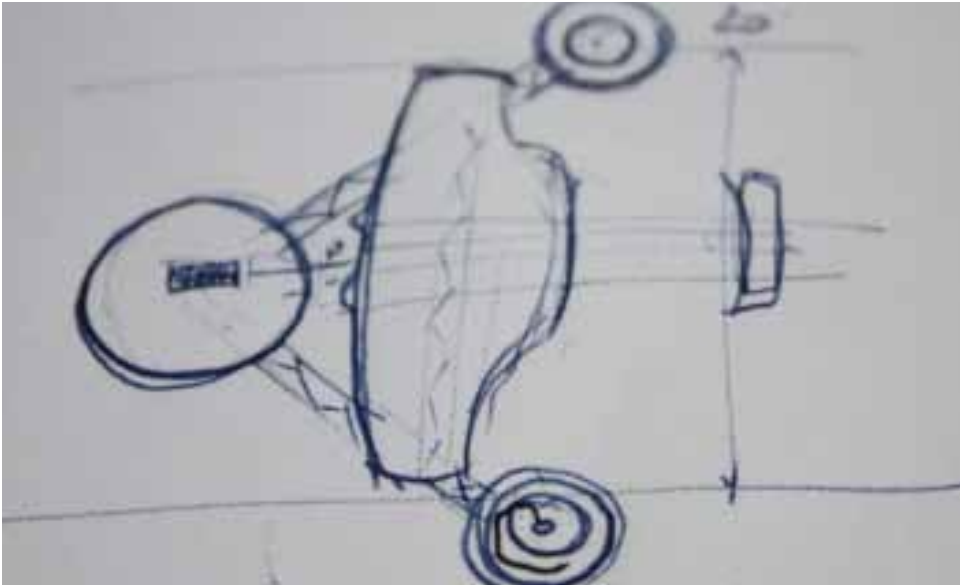


Communicatie, signalisatie & radar

Windmapping, sensoren & verwerking

Ophanging

Na het ontwerp van de basisonderdelen van het bovenste deel van de constructie, werd de behuizing ontworpen die al deze componenten samen ondersteunt en bevestigt op het bovenste deel van de lager-constructie. Drie gietstukken bevestigen de basiscomponenten aan elkaar.

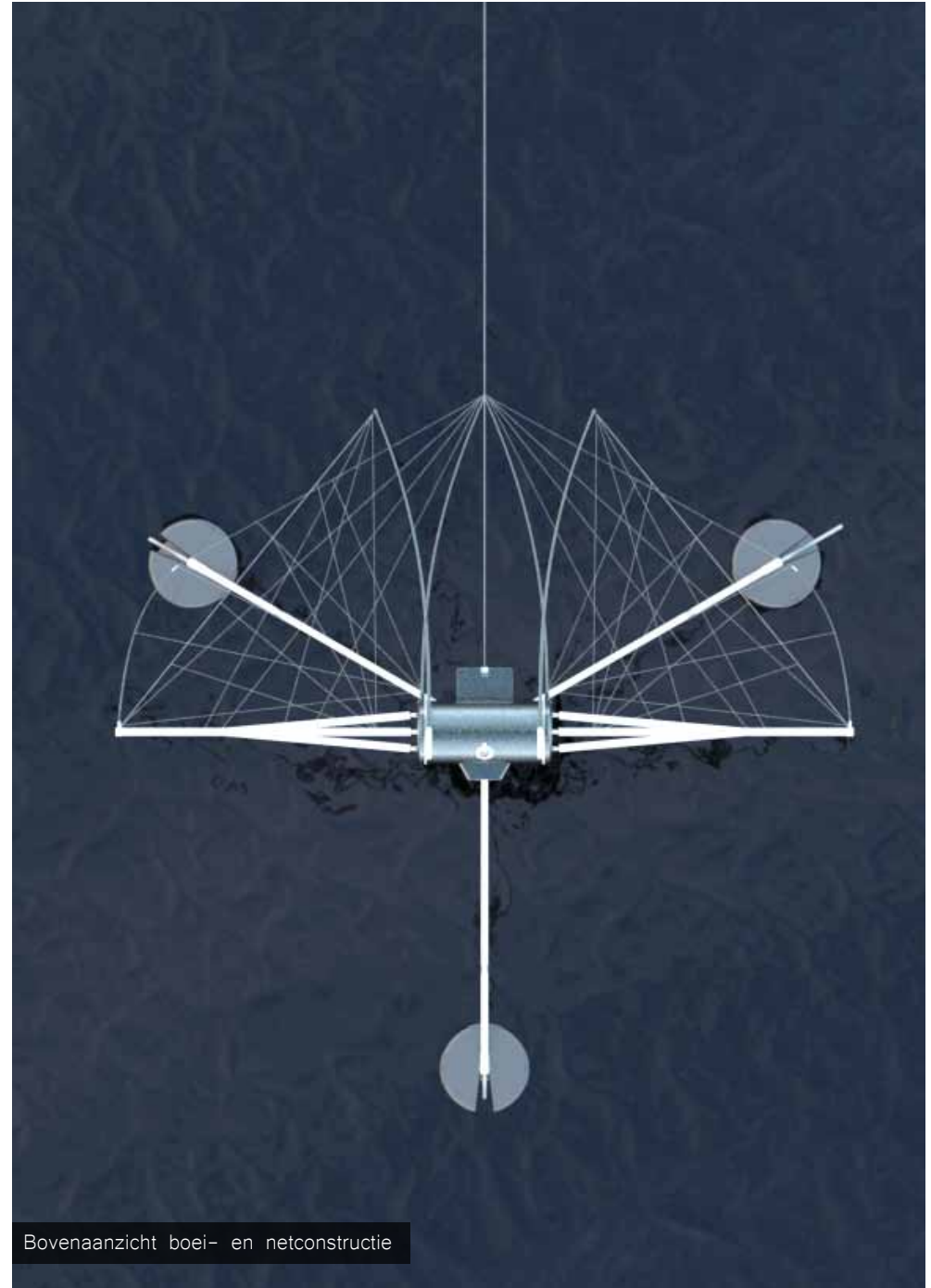


Landingsnet

Wanneer de spoel volledig opgerold is, landt de vlieger op het grondstation. Om de vlieger te borgen op dit grondstation is een landingsnet voorzien. Dit net ondersteunt de vlieger, en houdt hem vast zodat hij niet kan 'gaan vliegen'.

Dit net heeft de dimensies van de vlieger als hij platgedrukt op de grond ligt, met een extra rand rondom van twee meter. Zo hoeft de vlieger niet precies op de juiste plaats te landen.

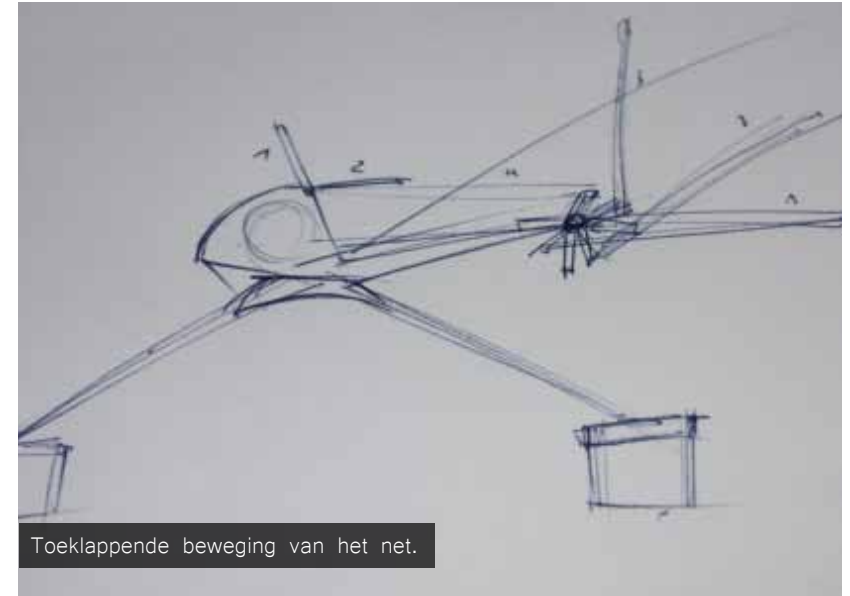
De mazen van het net zijn zeer groot, om zo weinig mogelijk wind en water op te vangen. De grootte van de mazen is ook niet erg van belang bij het ondersteunen van de vlieger, aangezien deze door de geïntegreerde carbon fiber stokken zijn structurele integriteit behoudt.



Bovenaanzicht boei- en netconstructie



Netconstructie met vlieger in landingspositie



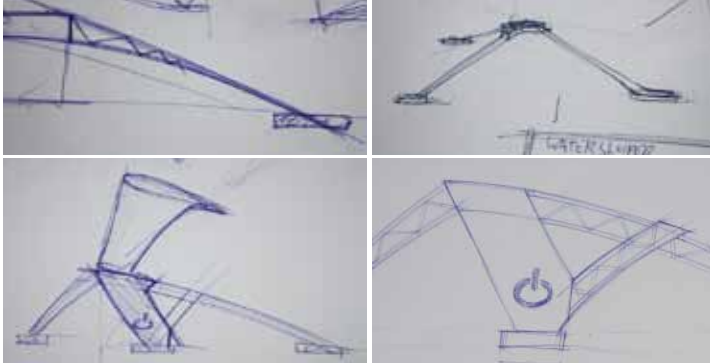
Toeklappende beweging van het net.

Wanneer de vlieger landt en opstijgt, staat het bovenste net in verticale positie. Dit net wordt in vorm gehouden door de twee centrale carbon buizen. Deze buizen worden aangedreven door een motor in het scharnierpunt.

Wanneer de vlieger geland of opgestegen is, wordt het bovenste net toegeklapt langs de voorzijde van de constructie, om het zo weinig mogelijk wind te laten vangen. Indien de vlieger zich op het landingsnet bevindt, oefent het bovenste net een drukkracht uit op de vlieger om deze vast te houden.

De elasticiteit van de lijnen van het net laat toe dat de vlieger heel mooi wordt omspannen.

Als de storm is gaan liggen of de wind terug is opgekomen, klapt het bovenste net weer open, zodat de vlieger weer het luchtruim kan kiezen.

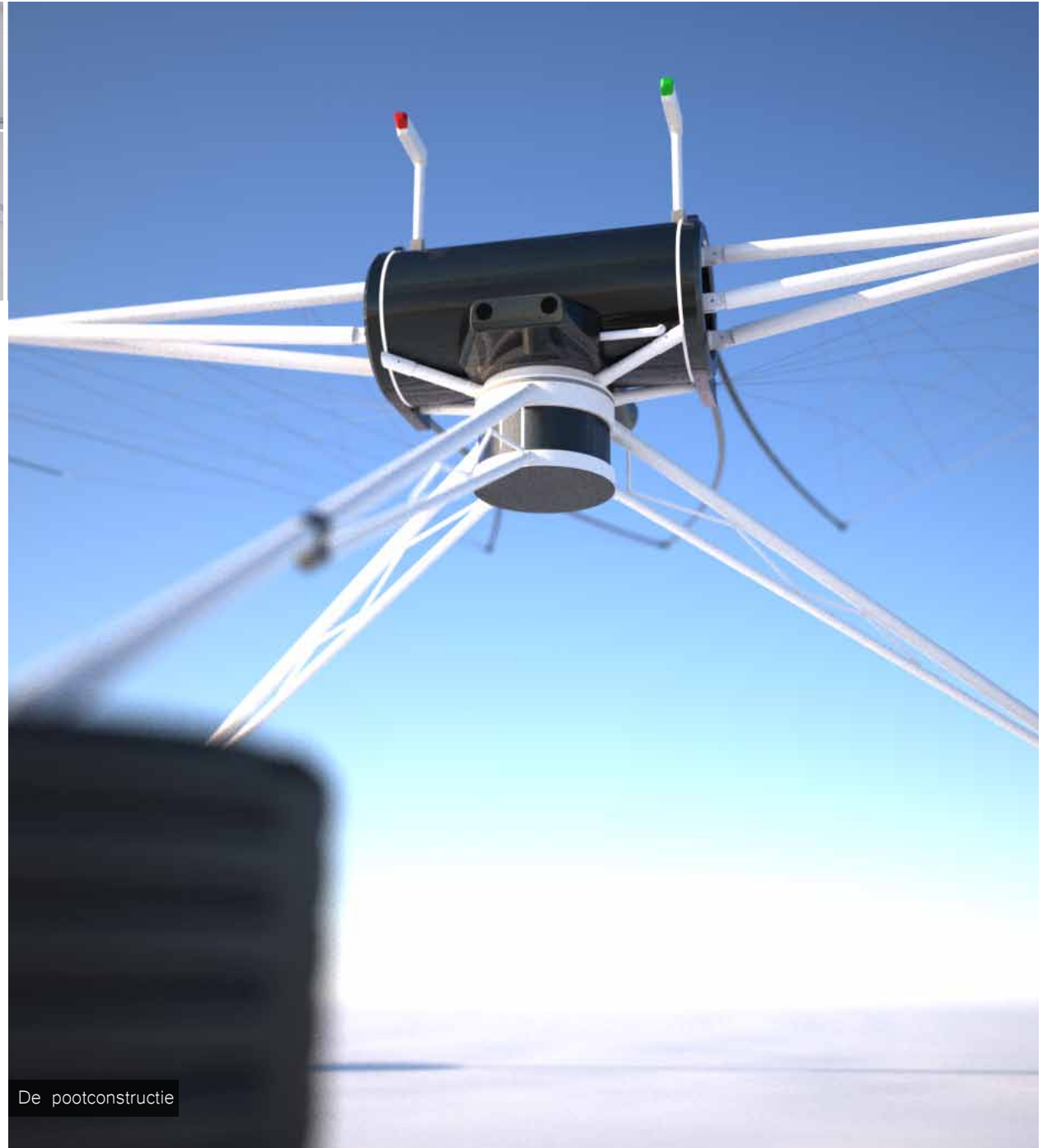


Ondersteuning

Het bovenste deel van het grondstation bevindt zich op 7 meter boven het wateroppervlak. Dit is zo hoog, omdat op deze manier vermeden wordt dat de scherpe oppervlaktegolven contact kunnen maken met zowel de generator als de gelande vlieger. Bij een eventuele uitzonderlijk hoge of scherpe golf, is er nog 7 meter speling boven de vlotters waar de golf over mag slaan.

De ondersteuningsconstructie verbindt de lagering tussen boven- en onderste deel van de boeiconstructie met de vlotters. De 'poten' van de constructie staan onder een hoek van 30° , en zorgen er zo voor dat de vlotters ver genoeg uit elkaar staan om van het geheel een stabiele constructie te maken. Deze lasconstructie is in verschillende delen opgesplitst om het vervoer van de constructie op het land te vergemakkelijken.

Op de uiteinden van deze lasconstructie zijn zowel aanhechtingspunten voor de ankerkettingen als bevestigingen voor de vlotters voorzien.



De pootconstructie

Vlotterconstructie met 40m³ schuim



Vlotters

De functie van de vlotters is natuurlijk het geheel drijvende houden. In de praktijk bestaan de krachten op deze vlotters echter niet enkel uit de zwaartekracht... de vlieger trekt namelijk aan de hele constructie, en zal zo trachten de ankerketting in 1 lijn te trekken met de vliegerlijn. Daarbij komt ook nog dat de oppervlakte van de zee niet vlak is, en de hele constructie met golven zal meedeinen.

De vlotters dienen er dus voor te zorgen dat de constructie in elke situatie boven water blijft.

De massa van de generator wordt geraamd op 6 ton, en het gewicht van de gehele constructie van het grondstation wordt geschat op 20 ton. Dit gewicht wordt echter niet evenredig verdeeld over de drie vlotters, want afhankelijk van de golfslag zal er meer of minder spanning staan op elk van de ankerkettingen. Deze onevenredige verdeling in combinatie met de trekkracht van de vlieger in een niet-constante richting heeft ervoor gezorgd dat ik voor het ontwerp van de vlotters op veilig heb gespeeld, en 40 ton drijfkracht per vlotter heb voorzien.

De drie vlotters zijn elk opgedeeld uit 4 stukken, die aan elkaar bevestigd worden rond de pootconstructie. Deze stukken worden rotatiegegoten en gevuld met polyurethaanschuim.



Verankering

Het grondstation dient natuurlijk ook verankerd te worden. Om de hele constructie min of meer op dezelfde plaats te kunnen houden, terwijl er toch rekening gehouden wordt met de getijdenwerking, werd geopteerd voor 3 ankerkettingen. Deze verankeren de boeiconstructie in elke richting. Zo wordt vermeden dat, wanneer de wind van richting verandert, de hele constructie eerst in de juiste richting van de trekkracht dient te drijven vooraleer er iets met deze trekkracht wordt gedaan.

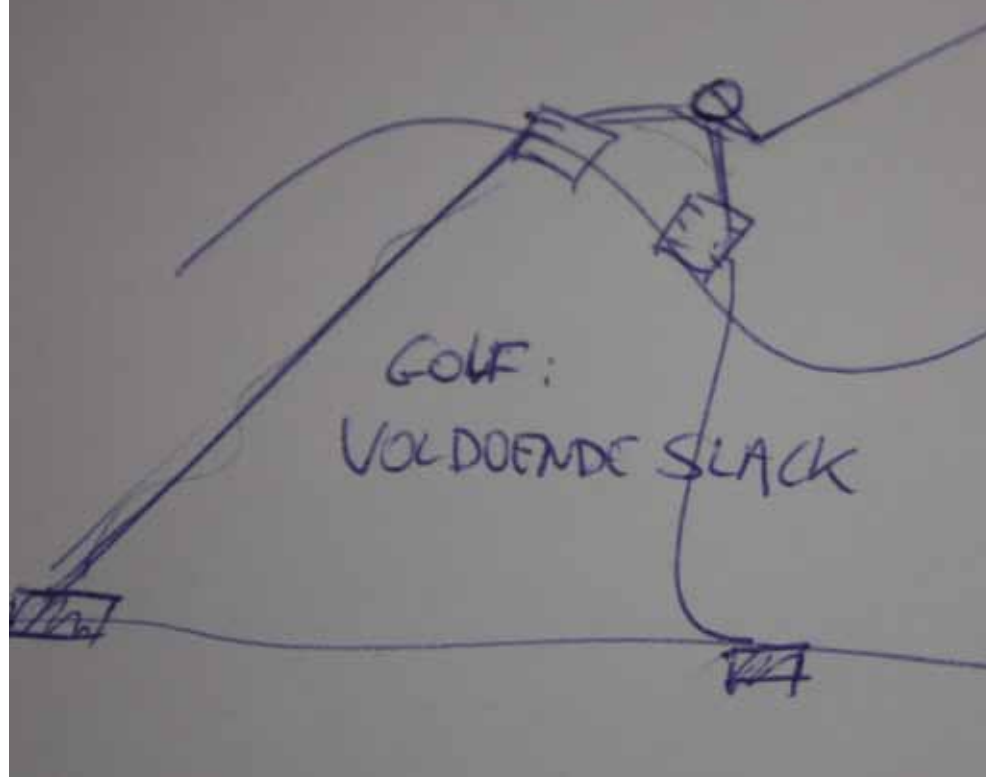
Op elk van deze ankerkettingen zit 50 meter speling. Dit is voldoende om het hoogteverschil bij de verschillende getijden, en vooral om het verschil in golfhoogte op te vangen.

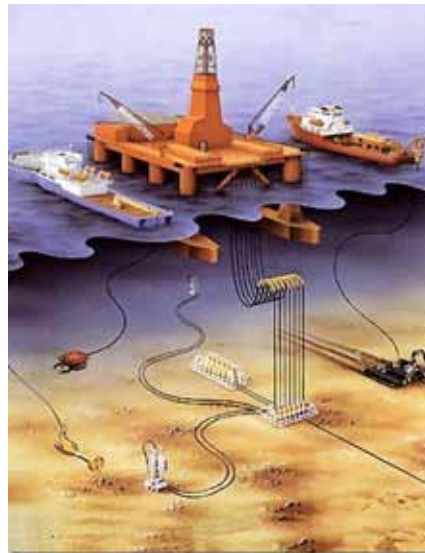
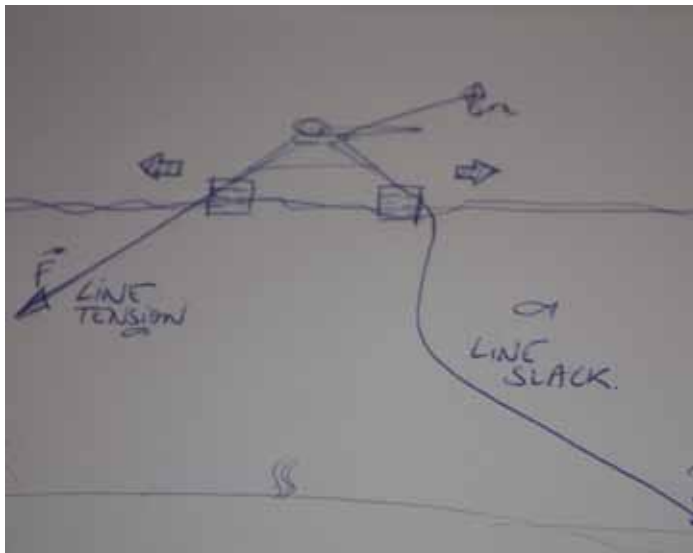
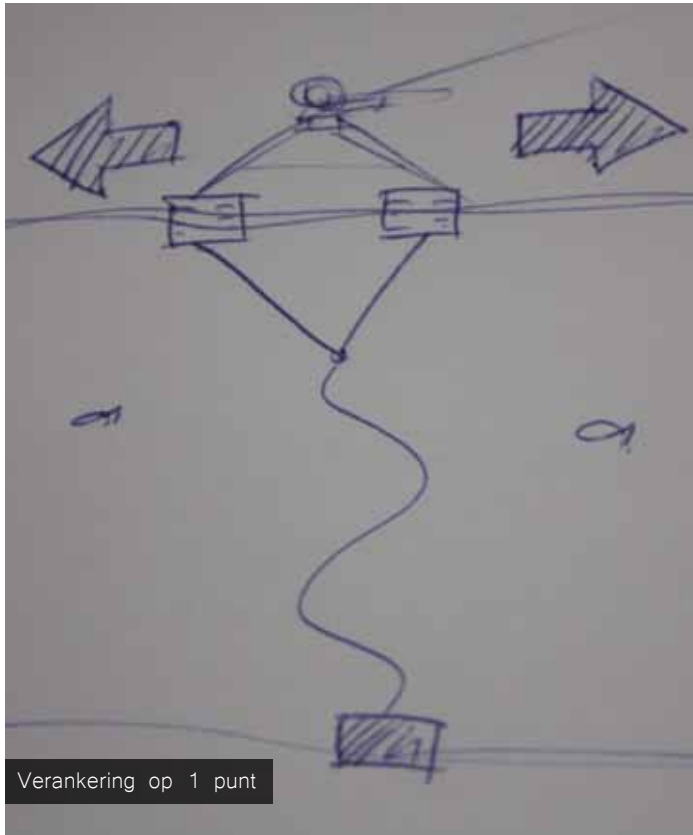
De ankerkettingen zijn, in tegenstelling tot wat de term doet vermoeden, geen ankerkettingen. Het zijn Dyneema-lijnen die aan de bodem bevestigd zijn aan een gestorte betonnen fundering. Er werd voor Dyneema-lijnen gekozen omdat deze drijven in water. Zo is er minder neerwaartse kracht op de vlotters van de constructie.

Aan 1 van deze lijnen wordt ook de stroomkabel naar de transformatiekabine bevestigd.



Beweging van de golven wordt opgevangen met de ankerlijn





Stroomvoorziening

Zoals reeds eerder gezegd loopt de opgewekte stroom via een kabel vanuit de generator doorheen een slipring naar de bodem van de zee om zo naar de transformatiekabine te gaan. In tegengestelde richting loopt echter ook een kabel, die zorgt voor de stroomvoorziening van de vitale componenten.

Zo zorgt deze externe stroombron voor de aandrijving van de generator in motorfunctie, voor de stroom die nodig is om communicatie- en verwerkingseenheden aan te drijven, voor de signalisatie,...

Zo is de installatie dus niet afhankelijk van zijn eigen stroomvoorziening, wat de betrouwbaarheid vergroot.

Landingsscenario

Na eerder reeds de landingsprocedure van de netten te hebben overlopen, volgt nu de procedure die de vlieger dient te doorlopen.

Wanneer het controlecentrum van het windpark een stormwaarschuwing uitvaardigt, of de centrale zelf opmerkt dat de wind te veel is afgenomen, zal een signaal gegeven worden naar de vlieger om de landingsprocedure op te starten.

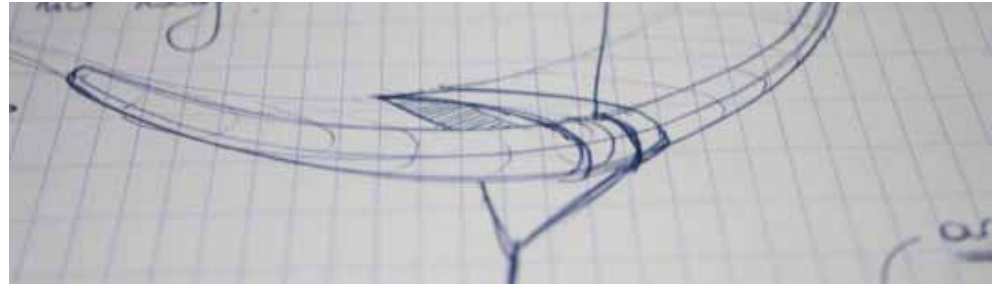
De vlieger zal zichzelf zo veel mogelijk depoweren en zichzelf verticaal oriënteren in het windvenster. Zo oefent hij de minste trekkracht uit en is hij zelfstabiliserend.

Als de vlieger het landingsnet bereikt, wordt de compressor door de aansturing in zuig-modus gezet, en verlaagt deze de interne druk in de vlieger. Zo verliest de vlieger zijn ringvorm en zal hij plat op de grond willen vallen. Om dit platvallen gecontroleerd te laten verlopen is er een lijn voorzien die van het bovenste deel van de vlieger naar een spoel in het midden van het onderste deel van de vlieger loopt. Deze lijn wordt synchroon met de drukverlaging in de vlieger opgerold, waardoor het boven- en onderste deel van de vlieger ten opzichte van mekaar worden uitgelijnd.

Als de vlieger dan omsloten is door de netten, wordt de compressor eventjes terug ingeschakeld om ervoor te zorgen dat de vlieger op alle plekken ondersteund wordt door deze netten. Dit zorgt ervoor dat de vlieger niet ongecontroleerd kan beginnen flapperen.







of:

interne dash
sage van rijoloket! ?

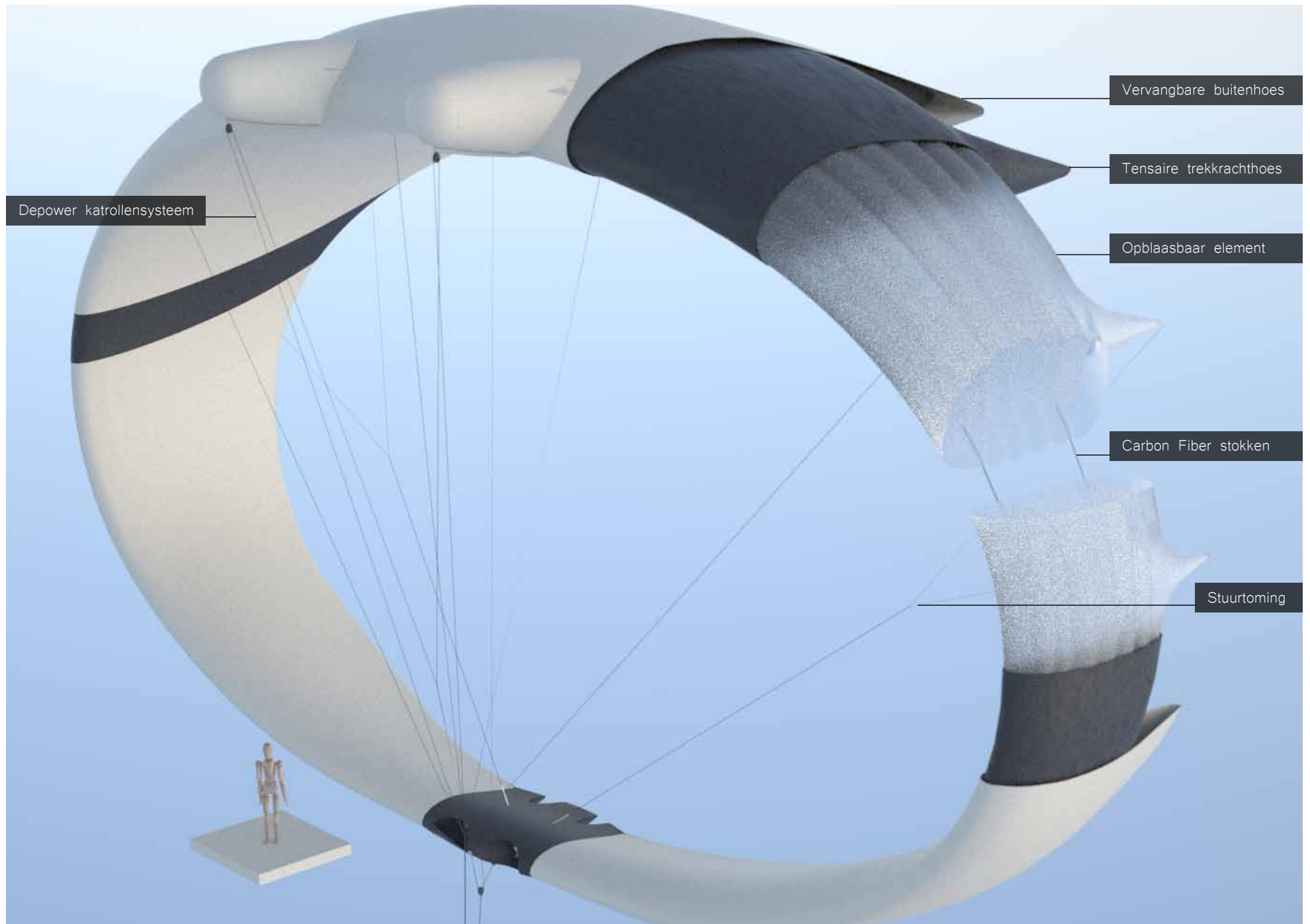
CF mat
fabric
CF mat
kevin

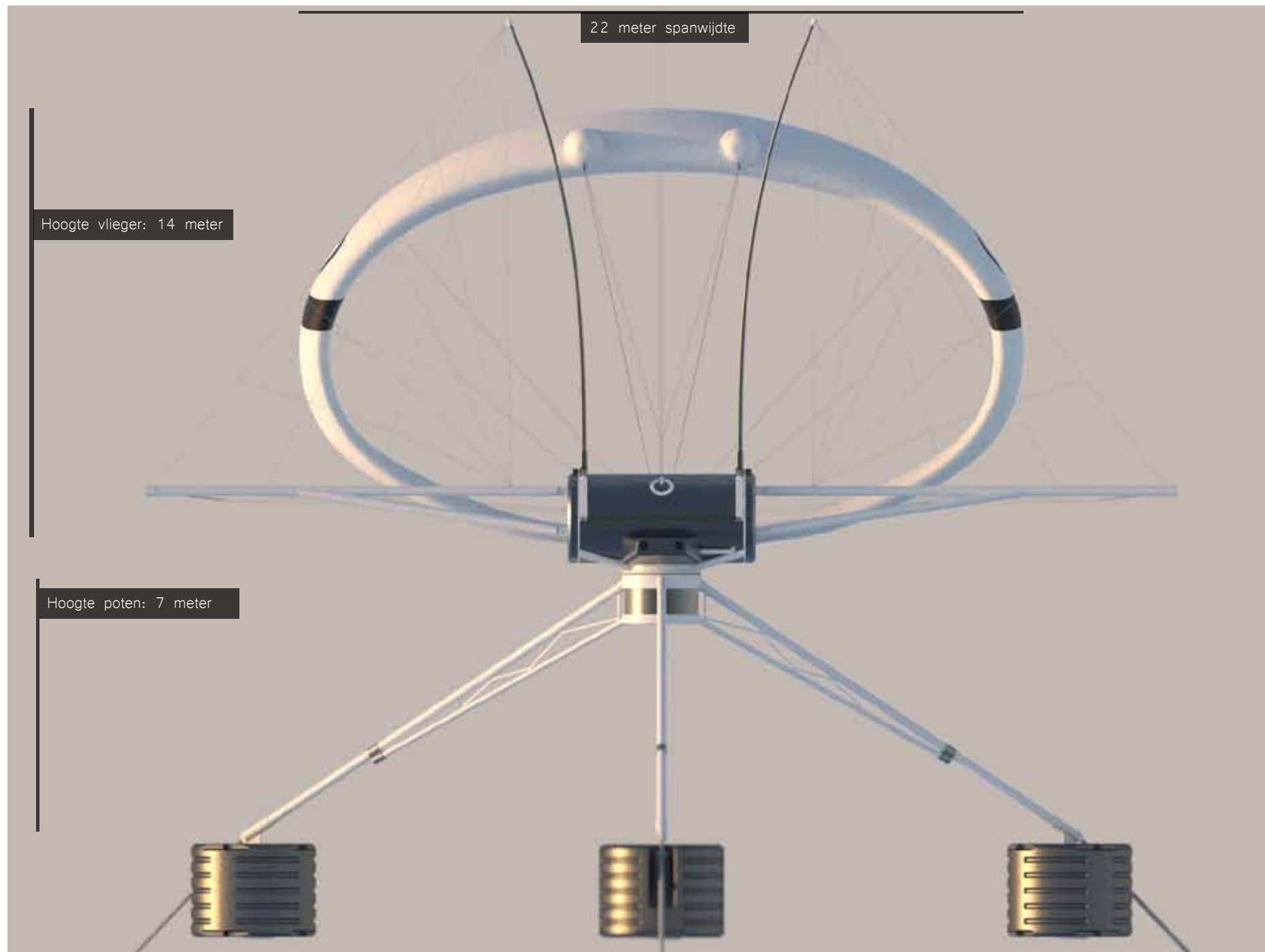
$L = \sum (L_1 + L_2)$

compensé

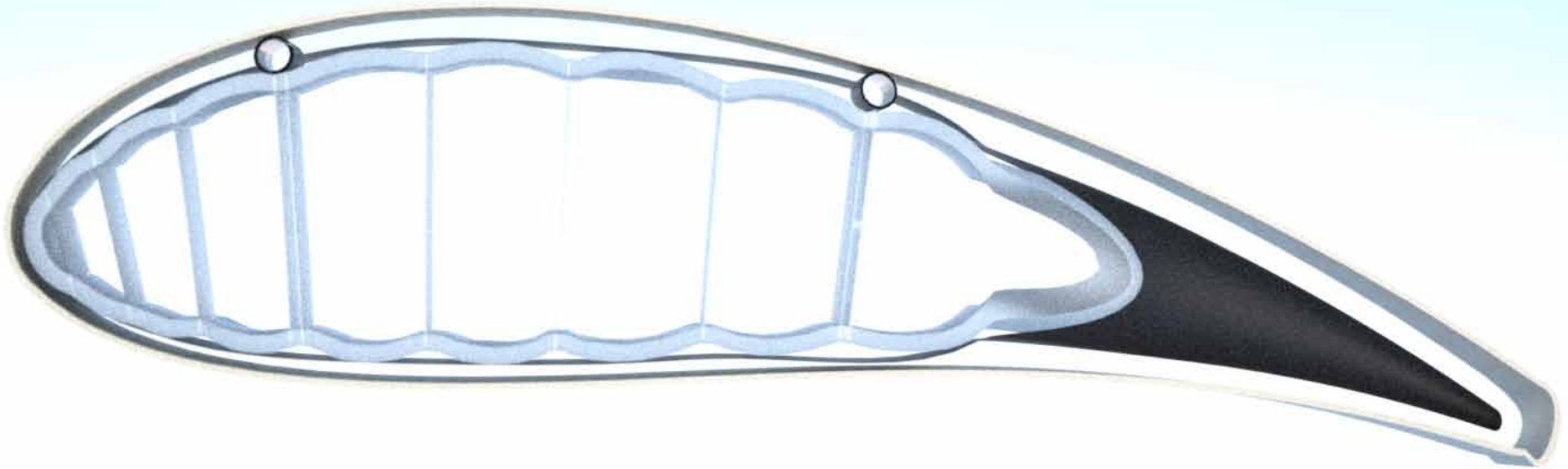
exposé

CF

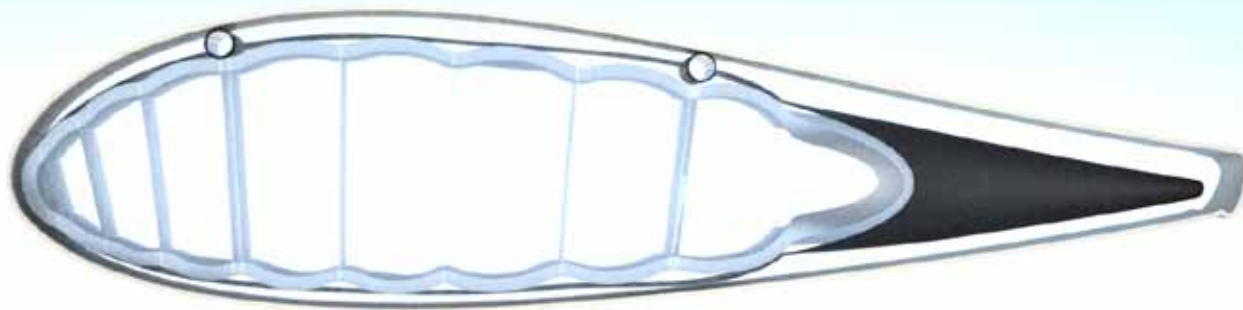




'Gestuurd' profiel



'Normaal' profiel



Sturen

Een zachter stuk in het opblaasbare gedeelte integreren bleek bij het uitwerken makkelijker dan oorspronkelijk gedacht. Het basis-opblaasonderdeel kan worden uitgebreid met een aantal dunnere opblaasonderdelen in de lengterichting van het profiel van de vlieger. Door deze kleinere diameter wordt het opblaasonderdeel daar plooibaar.

Aan dit dunnere stuk is een toming bevestigd die vasthangt aan een belt-drive. Deze belt-drive wordt door een enkele motor bediend en kan de vlieger zowel naar links als rechts doen uitwijken. Vanuit de CFD-studie wordt de kracht die uitgeoefend dient te worden bij het sturen van de vlieger geschat op 300 kg.

Depower

Het depowersysteem dat de invalshoek van de vlieger ten opzichte van de wind regelt, bestaat uit drie componenten:

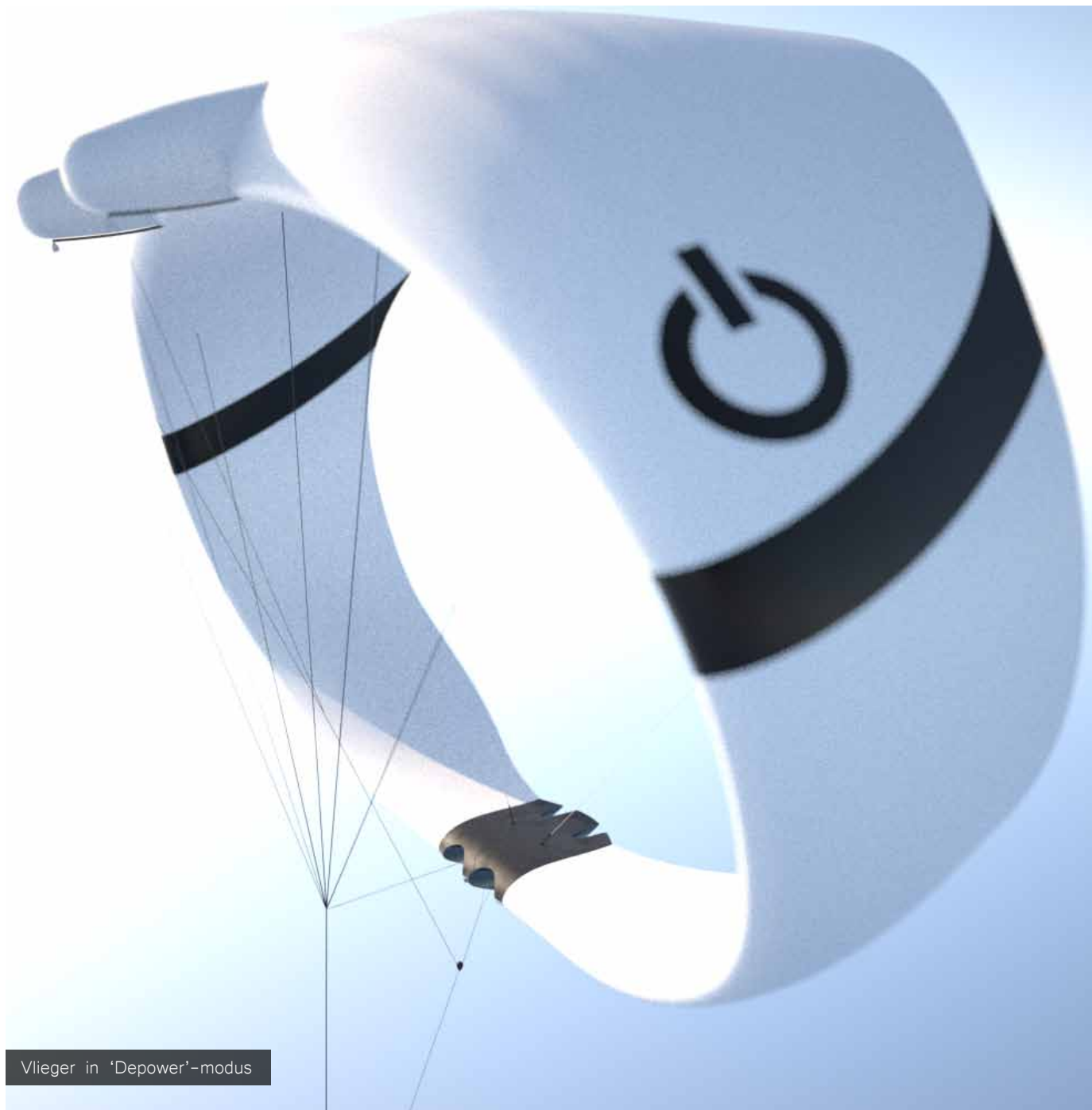
- een intelligent katrollensysteem dat de vorm van de vlieger bewaart en de krachten evenredig verdeelt,
- een spoel met motor die het katrollensysteem instelt op de juiste depowermodus,
- een rem die de depowermodus bewaart.



Katrollensysteem



Vlieger in 'Power'-modus



Vlieger in 'Depower'-modus

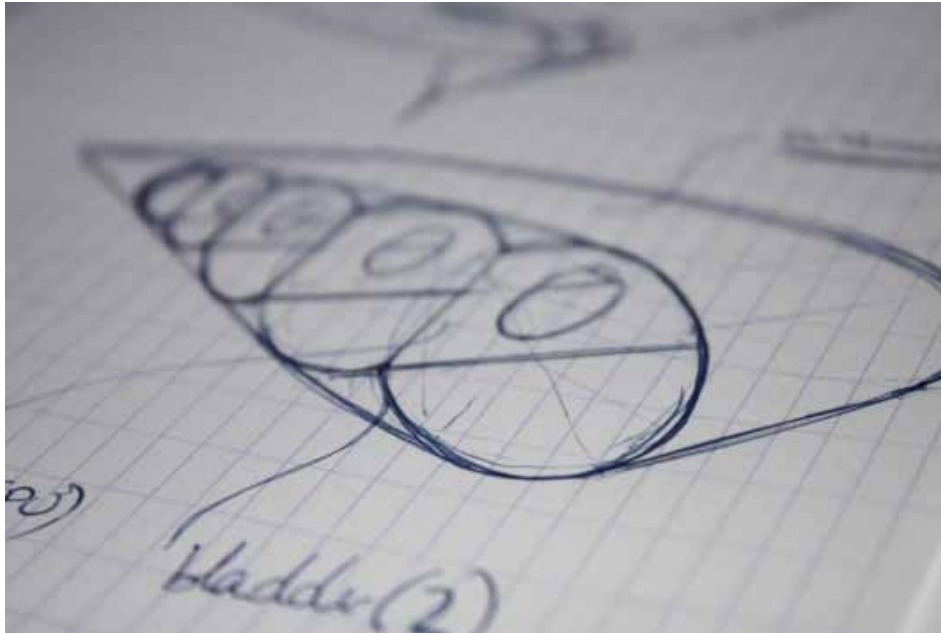
Het katrollensysteem zorgt ervoor dat de trekkracht van het onderste deel van de vleugel wordt overgebracht naar de vliegerlijn, die vasthangt aan het bovenste deel van de vlieger. Hier is een katrollensysteem voor nodig, aangezien de afstand van het onderste deel van de vlieger ten opzichte van de vlieger varieert tussen de verschillende depower-modi.

De drag van het onderste deel van de vlieger is relatief groot door de turbulenties die veroorzaakt worden door de Ram Air turbines. Dit zorgt ervoor dat dit deel wil achterblijven ten opzichte van het bovenste deel van de vlieger. Als de kracht van de vlieger verminderd moet worden, wordt aan deze dragcoëfficiënt toegegeven, en mag het onderste deel van de vlieger achterblijven op het bovenste.

Dit resulteert in een hoekvermindering, waardoor de kracht verminderd wordt.

Deze toegeving wordt veroorzaakt door het lossen van de rem op het katrolsysteem en de spoel af te laten rollen.

Als de vlieger weer meer kracht dient uit te oefenen, zal de motor de spoel weer oprollen, waardoor de hoek tussen de vlieger en de wind weer groter wordt. Als de gewenste hoek bereikt is, treedt de rem in werking, waardoor de motor niet de hele tijd stroom vraagt om de vlieger onder de gewenste hoek te houden.



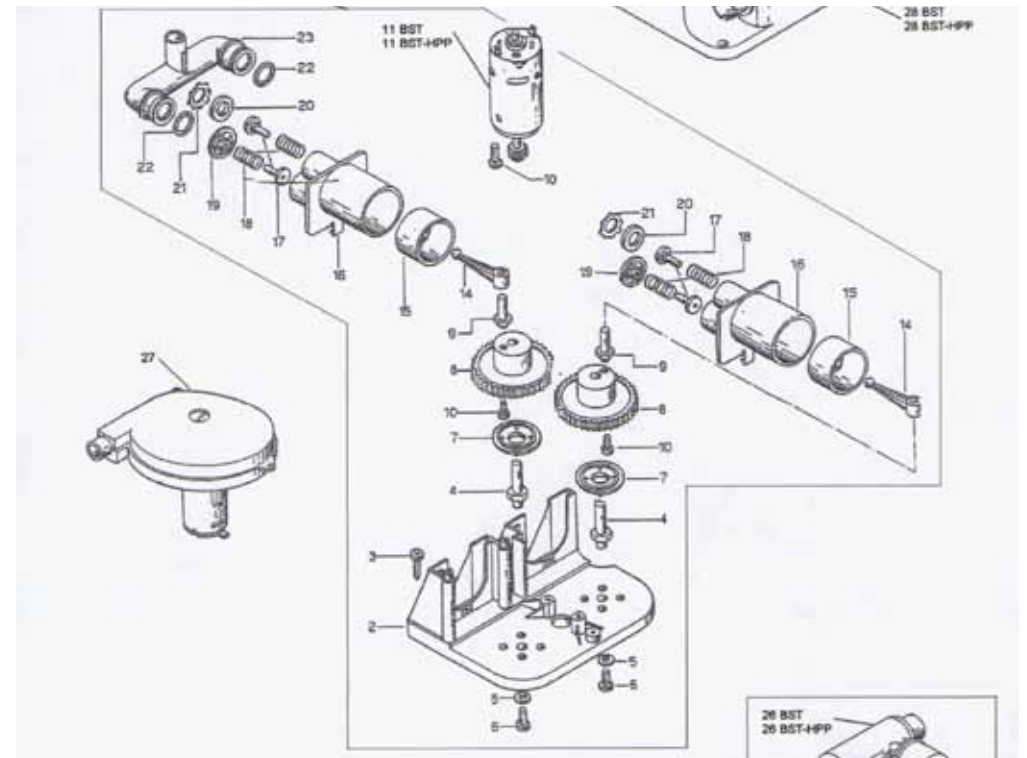
(De-) Compressie

Om de structurele sterkte van de vlieger te behouden is het noodzakelijk dat een compressor de opblaasbare structuur op druk houdt, ook als er een microperforatie van het doek zou plaatsvinden.

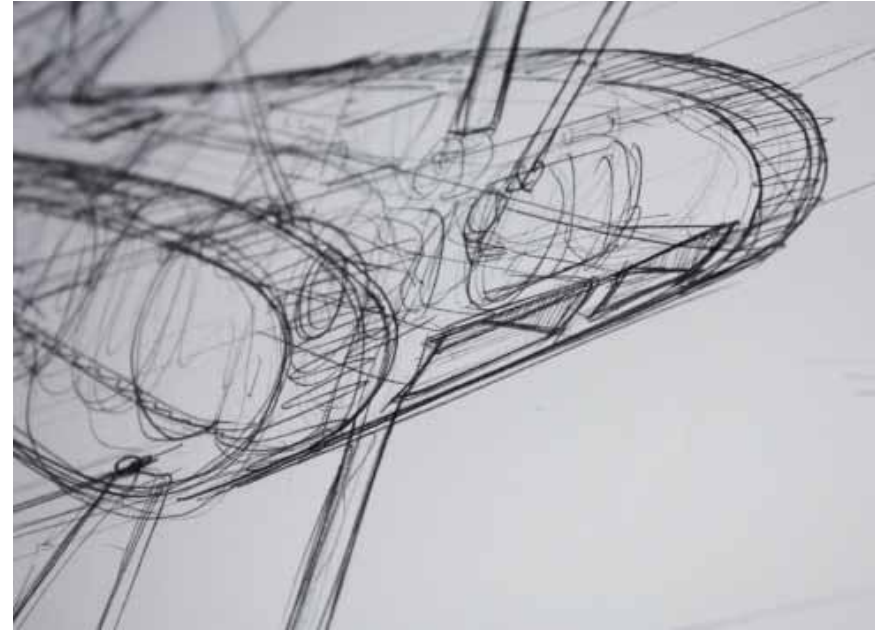
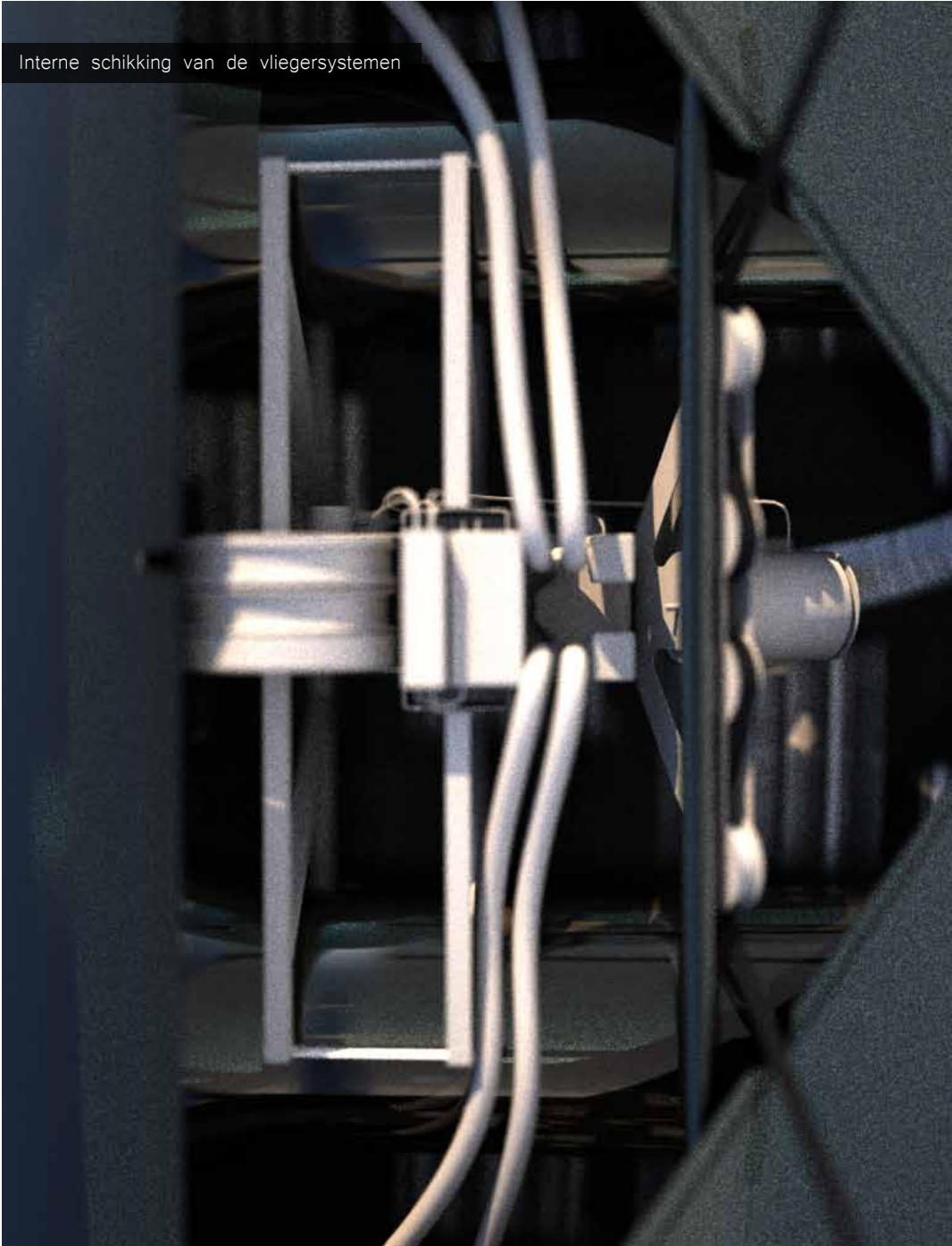
Deze compressor bevindt zich dus ook aan boord van de vlieger. Hij houdt de vlieger op een constante overdruk van 200 millibar, welke noodzakelijk is om de vorm te behouden onder maximale belasting.

De compressor kan zijn lucht-in- en uitlaat omwisselen, zodat de vlieger zowel opgeblazen als leeggezogen kan worden door dezelfde compressor.

Dit doet hij met een snelheid van 450 liter per minuut, zodat de vlieger in twee minuten (wanneer de basisvorm reeds opgeblazen is) zijn vaste vorm aanneemt. Wanneer de vlieger namelijk op het lanceerplatform ligt met de basisvorm opgeblazen, dient enkel nog overdruk toegepast te worden om de vorm te verkrijgen.



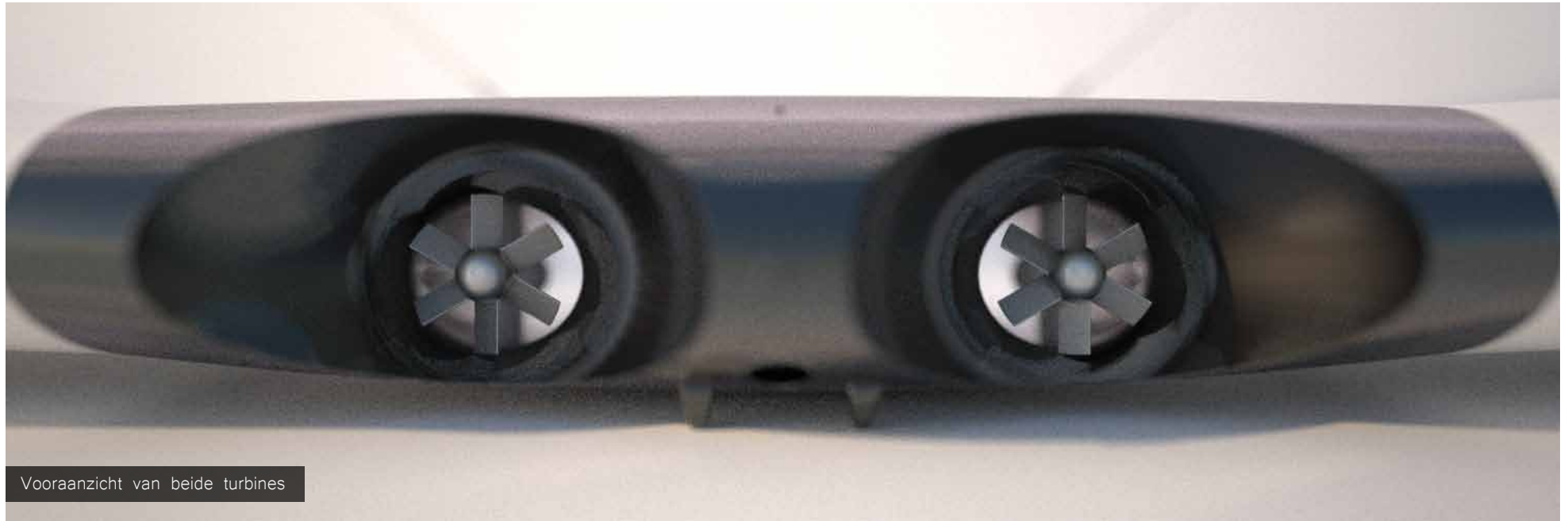
Interne schikking van de vliegersystemen



Batterij & Koeling

De verschillende motoren, de compressor, de sensoren en de aansturing genereren ook een hoop warmte die afgegeven dient te worden. Daarom werd een draagconstructie uit aluminium ontworpen waar de koelelementen van deze verschillende onderdelen op aangesloten worden. Deze draagconstructie is op zijn beurt dan weer verbonden met een aluminium buis die doorheen de behuizing loopt. Deze buis zuigt langs de voorzijde van de vlieger koude lucht aan, en wordt gekoeld door de lucht die met hoge snelheid door de buis zelf loopt. Via de behuizing koelt de buis dus de verschillende subcomponenten.

Om na een landing van de vlieger de verschillende subsystemen te laten functioneren, is een batterij geïntegreerd in de behuizing. Deze Lithium Polymeerbatterij van 2 liter kan de vlieger probleemloos tot in zijn vliegcyclus brengen.



Vooraanzicht van beide turbines

Ram Air Turbine

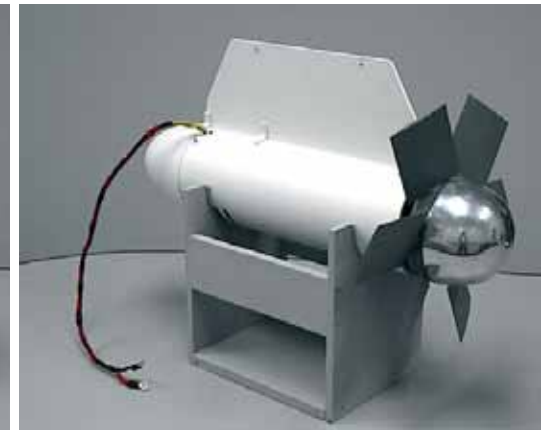
Tijdens de vlucht van de vlieger worden de verschillende motoren, de compressor en de verwerkingseenheid aangedreven door de twee Ram Air Turbines. Ook de batterij wordt hierdoor opgeladen.

Ram Air Turbines zijn windturbines die geoptimaliseerd zijn om te kunnen presteren bij hoge windsnelheden. Bij KitePower haalt de vlieger in een effectieve windsnelheid van 8m/s een schijnbare windsnelheid van 80 m/s. De turbines op de vlieger vangen de schijnbare wind, en opereren dus aan 80m/s.

Als alle componenten tegelijk stroom zouden trekken tijdens de vlucht, zou dit een vermogen vragen van 1.2 KW. Om dit vermogen te kunnen leveren zijn twee van deze Ram Air turbines nodig.

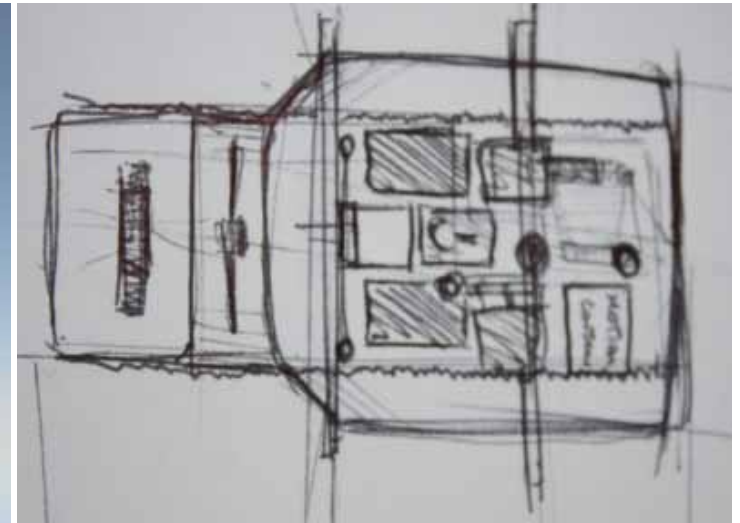
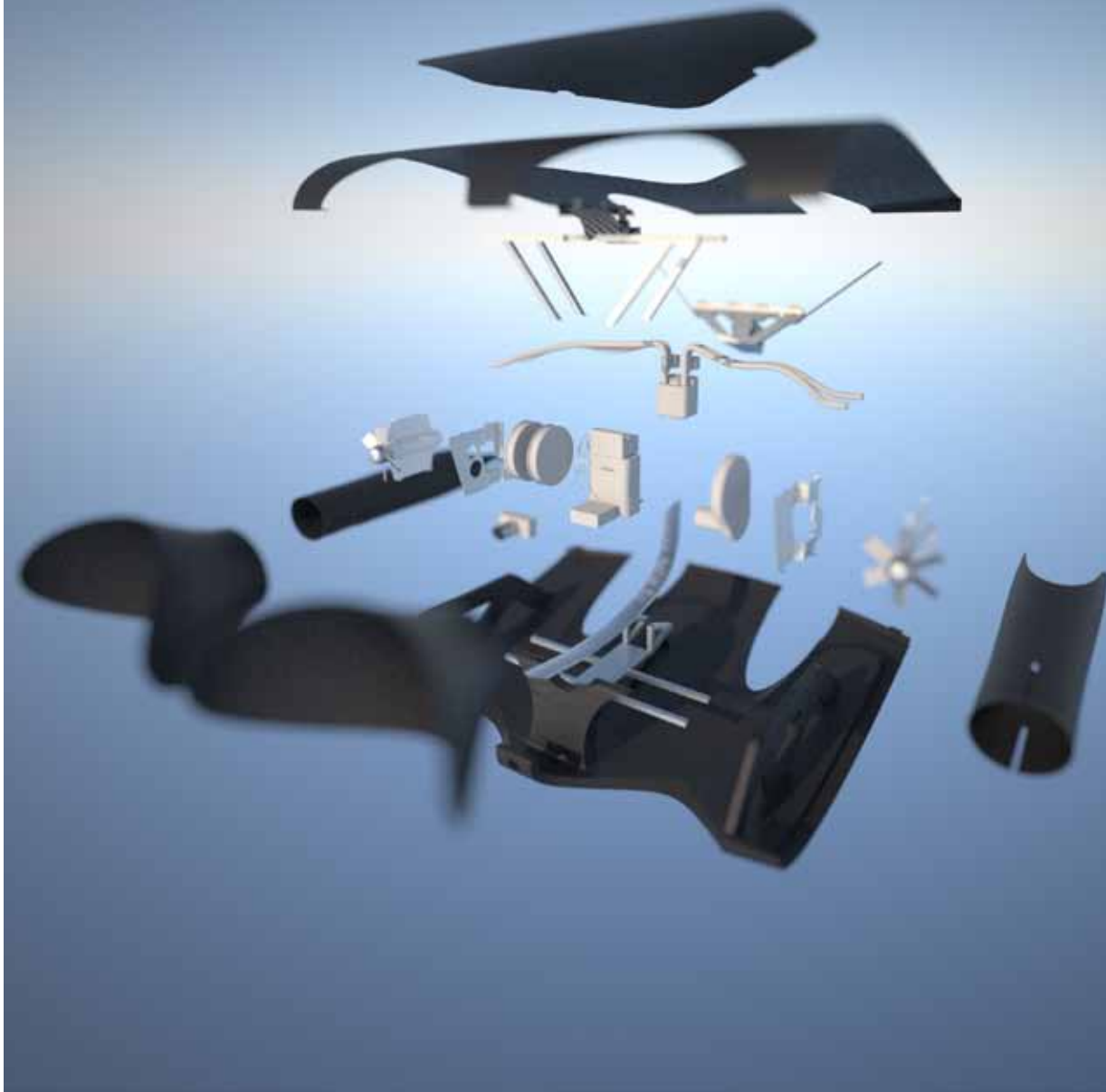


1 KW Ram-Air Turbine



Power Output @ 28 Volts vs Flight Speed @sea level		
Flight Speed (Knots)	Power Output (Watts)	Power Output (Amps)
70	590	21
100	1120 (max)	40
110	1120 (max)	40
120	1120 (max)	40

Exploded view van de verschillende componenten



Alle voorgaande componenten werden gegroepeerd in een carbon fiber behuizing. Dit omdat de behuizing zowel uitzonderlijk sterk als licht moet zijn, om de prestatie van de vlieger niet te beïnvloeden.

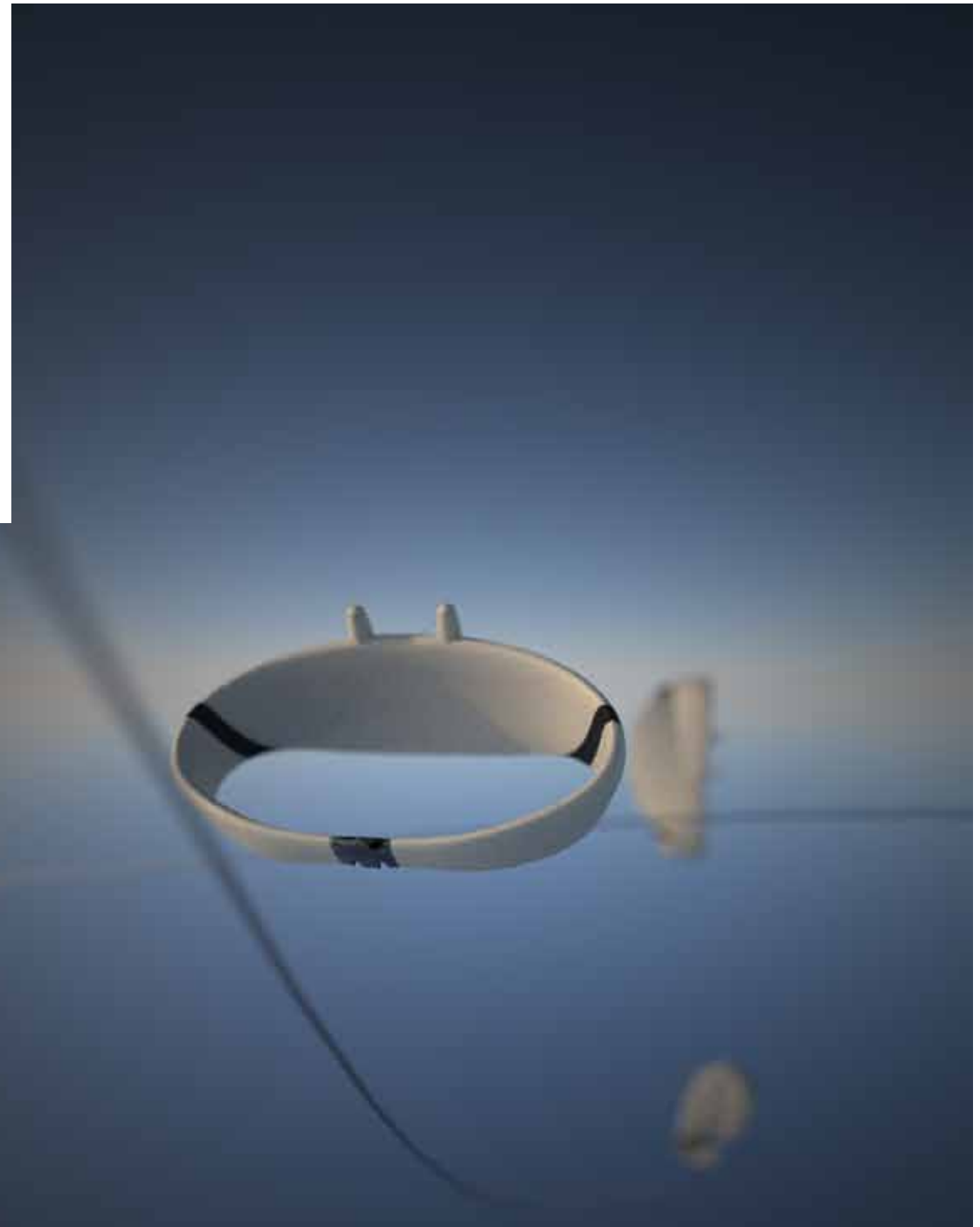
Ze bestaat uit een onderschelp, waarop verstevigingen zijn aangebracht waaraan de vliegerlijn en de carbon fiber stokken van de tensaire structuur worden bevestigd, en een bovenschelp, die vast wordt gemonteerd op de onderschelp, na het monteren van de aluminium draagstructuur van de generatoren.

De bovenschelp bevat een deksel dat afneembaar is met een aantal schroeven. Dit om het onderhoud van slijtagegevoelige componenten, zoals de spoelen, te vergemakkelijken.

Aan de randen van deze behuizing wordt een ritssluiting bevestigd, waaraan de buitenhoes van de vleugelstructuur vast wordt geritst.

Positionering

Een van de grootste moeilijkheden bij de automatische controle van vliegers is de exacte positionering. De vlieger heeft namelijk geen vast assenstelsel op zich waartegenover hij zich positioneert. Daarom dienen ten allen tijde zijn snelheid als positie op zowel de x-, y- en z-as gemonitord te worden om zijn oriëntatievector te bepalen. Dit gebeurt aan de hand van een GPS-sensor in combinatie met een gyroscoop en accelerometers. De combinatie van deze sensoren zorgt ervoor dat de positie en oriëntatie van de vlieger op elk moment gekend is.



Positie van de vlieger tijdens de recuperatiefase



De 'neus' van de behuizing bevat de sensoren



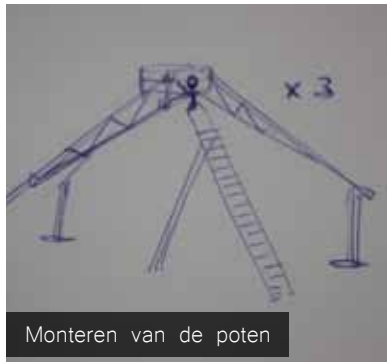
Controle (2)

Zowel de data van de sensoren op de vlieger als de data van de sensoren in de boeiconstructie worden constant verwerkt om de vlieger en de generator aan te sturen. De vlieger en de boeiconstructie communiceren met elkaar via een radioverbinding, zodat er voldoende bandbreedte is om alle data door te geven.

De afstands- en positieverschillen worden geanalyseerd en geprojecteerd op een zogenaamd ideaal kite-traject. Voor elke windsterkte is er een ideaal patroon dat de vlieger moet volgen om op een zo efficiënt mogelijke wijze de energie uit de wind te halen. Dit patroon is vooraf bepaald en zit ingebouwd in de software die de vliegerbesturing op zich neemt. De vlieger wordt dus gedurende de hele tijd actief bestuurd door de software om op zijn ideale traject te blijven in variërende windomstandigheden.

Dezelfde software zorgt er ook voor dat de generator steeds weet welke richting hij uit moet draaien of schuiven op de lineaire geleiders.

Zoals u merkt hangt het succes van KitePower voor een groot deel af van de automatische controle van de vliegers. Daarom is het belangrijk dat in de toekomst betrouwbare controlesystemen ontwikkeld worden die op elke mogelijke situatie kunnen anticiperen.



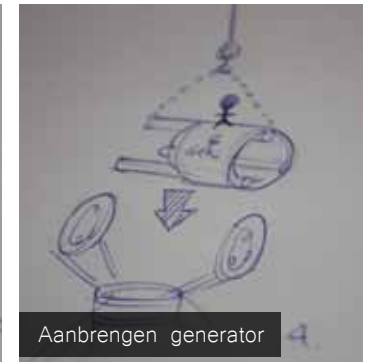
Monteren van de poten



Afwerken boeiconstructie



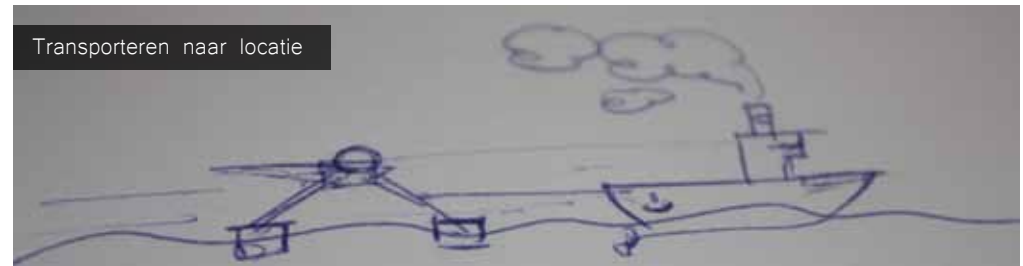
Bevestigen draagconstructie



Aanbrengen generator



Behuizing en netten monteren



Transporteren naar locatie

Assemblage

KitePower creëert ook een grote meerwaarde door de eenvoudige installatie. Alle componenten kunnen apart naar een montageplaats vervoerd worden zonder de nood aan 'uitzonderlijk vervoer'. Om dit te kunnen verwezenlijken werd ervoor gezorgd dat de stokken van de tensaire structuur verwijderbaar zijn, zodat de stof volledig op te plooien is in een pakket van 1,5 x 1,5 x 2 meter.

Ook werd de drijvende constructie zo opgesteld dat alle onderdelen apart vervoerd kunnen worden naar de montageplaats.

In deze montageplaats wordt de pootconstructie geassembleerd, waarna de vlotters hier rond worden geplaatst en vastgezet. Om het onderste deel van de boeiconstructie compleet te maken wordt het onderste behuizingsdeel met slipring en lagering gemonteerd.

Hierna wordt verder gebouwd op de lagerconstructie. De draagconstructie voor het tweede deel van de behuizing en de vliegerlijn-begeleidende constructie worden dan gemonteerd op de lager. Vervolgens worden de verwerkingsmodule en de sensoren geplaatst, waarna de behuizing rond deze laatste onderdelen wordt geplaatst.

Dan is het de beurt aan de draagconstructie voor de generator. Eerst worden de draagstructuren langs de zijkant gemonteerd, waarna de generator met een hijsconstructie op de juiste plek uitgelijnd, op- en vastgehangen wordt.

Als de behuizing rond de generator is geplaatst, is het de beurt aan de landingsconstructie. De stalen draagconstructie wordt gemonteerd op de draagstructuur van de generator, waardoor een star geheel ontstaat.

Vervolgens worden de carbon staven geplaatst die de netten in vorm zullen houden. Als deze geplaatst zijn worden deze netten hieraan bevestigd. Nu is alles klaar om de vlieger te kunnen plaatsen. Eerst wordt hierbij de carbon fiber console van het onderste deel van de vlieger geassembleerd.

Hiervoor wordt op de onderste schelp de koelpijp, de draagconstructie voor de turbines en andere componenten, en de luchtinlaten voor dezelfde turbines gemonteerd. Hierna worden de Ram Air Turbines zelf gemonteerd, samen met de sensoren en het remsysteem voor het depowermechanisme.

Deze componenten worden vastgezet door de bovenste schelp op de onderste te bevestigen. Hierna worden de andere componenten samengevoegd in de aluminium behuizing, die in de console wordt vastgeschroefd.



Locatie componenten



Nu kunnen de carbon fiber stokken in de tensaire structuur worden geschoven en kan de buitenhoes rond deze structuur worden getrokken.

Deze stokken worden dan langs de zijanten in de carbon console geschoven en vastgeschroefd, waarna de leidingen van de compressor aan de tensaire structuur worden bevestigd. Om het montageproces van de vlieger af te sluiten wordt de buitenhoes aan de console vastgeritst, en het deksel op de console geschroefd.

Als laatste wordt de katrollenconstructie aan het doek van de vlieger geknoopt, waarna de vliegerlijn van de boeiconstructie aan deze katrolconstructie wordt bevestigd.

De vlieger wordt hierna op het landingsnet gelegd, waarna het afsluitingsnet wordt gesloten.

Nu het geheel geassembleerd is, dient het nog geïnstalleerd te worden op de locatie van het windpark. Hier creëert KitePower een enorme meerwaarde ten opzichte van de bestaande offshore-toepassingen.

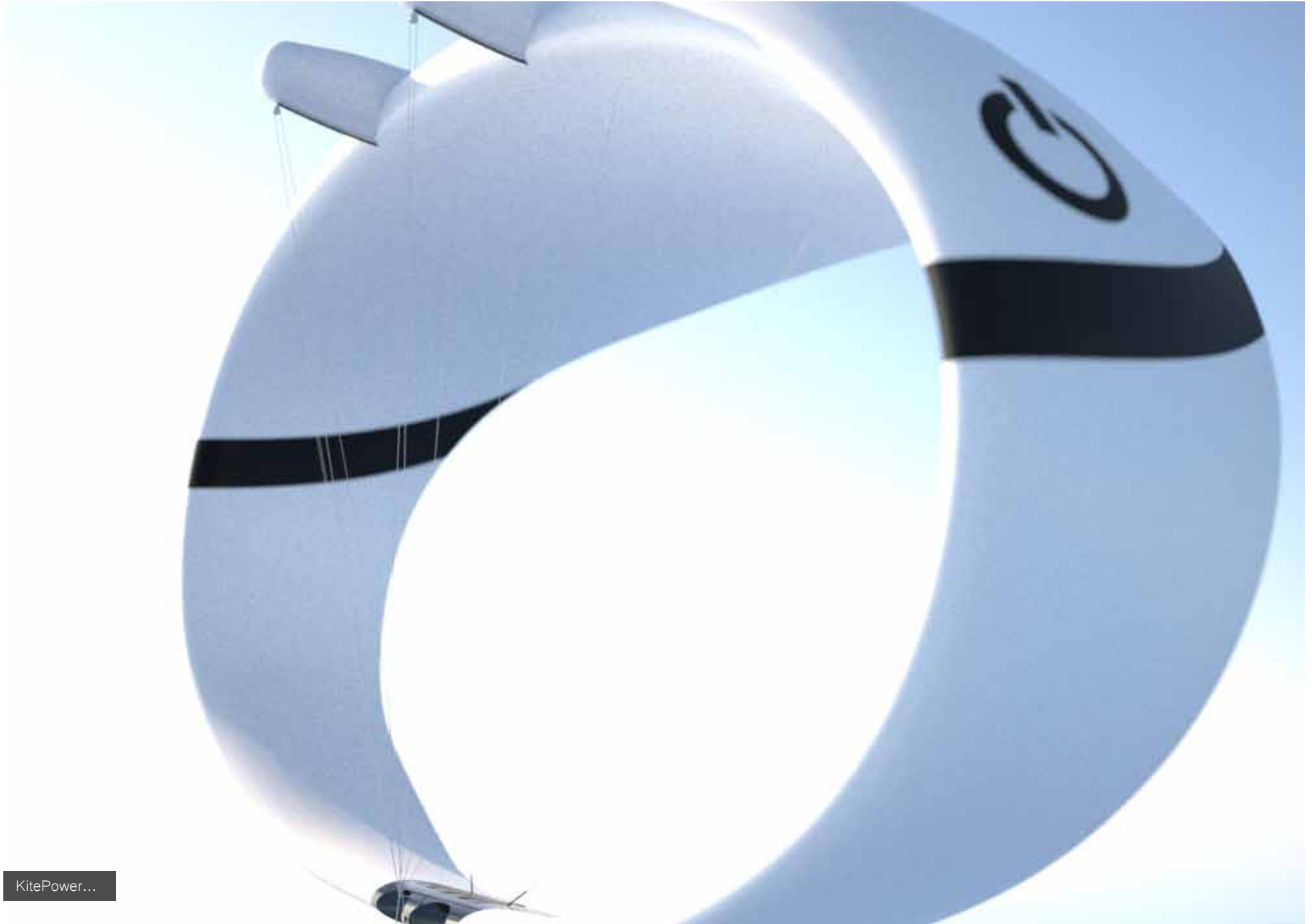
Voor de installatie wordt een onderzeese kabel aangelegd naar de site waar de KitePower-centrale zal komen. Deze loopt naar een transformatiekabine op zee, vanwaar kleinere kabels vertrekken naar de plaatsen waar de KitePower-boeiconstructies komen.

Deze kleinere kabels zijn reeds getrokken, waarbij het uiteinde van de kabel boven wordt gehouden door een boei. Voor de installatie werden ook reeds de betonnen funderingen gestort die de KitePower boeiconstructie op zijn plaats zullen houden. Aan deze funderingen werden ook reeds de Dyneema-ankerkettingen bevestigd, waarvan de uiteinden eveneens zichtbaar worden gemaakt door een boei.

Omdat de site van het windpark reeds is voorbereid, kan de KitePower-centrale op 1 enkele dag geïnstalleerd worden. De gehele constructie wordt in het water getakeld, en kan door zijn geringe diepgang zonder probleem overal naartoe gesleept worden.

Eenmaal aangekomen op de site dienen enkel nog de ankerkettingen en de kabel te worden aangesloten.

Zo kan KitePower zonder probleem in diep of ondiep water geïnstalleerd worden.



KitePower...

Besluit

Nu het ontwerp van de KitePower-centrale is afgelopen, wordt even een terugkoppeling gemaakt naar de vooraf gestelde eisen en wensen. De kostprijs van de KitePower-centrale over de gehele levensduur wordt geschat op 800.000€, wat rekening houdt met de halfjaarlijkse vervanging van de buitenhoes van de vlieger gedurende 20 jaar. De centrale produceert gedurende deze 20 jaar 120 GWh aan elektriciteit, wat neerkomt op een productie-kostprijs van 0,0066 €/KWh. Als we echter rekenen dat de centrale competitief moet zijn met de fossiele energiebronnen, mag de prijs voor de consument niet hoger liggen dan 0,04€/KWh.

Dit wil zeggen dat de KitePower-centrale een Return on Investment van 6 haalt zonder rekening te houden met eventuele steun van de overheden.

Tijdens de levensduur van KitePower wordt ook geen water verbruikt, geen CO² uitgestoten of andere schade toegebracht aan de omgeving. Ook is ervoor gezorgd dat deze omgeving eender waar kan liggen, onafhankelijk van de waterdiepte, door het drijvende karakter van de centrale ... er dient enkel een kabel gelegd te worden die de afstand van de centrale tot de kust uiteindelijk zal bepalen.

De omgeving en waterdiepte rondom de centrale zal een invloed hebben op de speling die gegeven wordt op de ankerkettingen. Is er kans op hoge en steile golven, wordt veel speling gegeven. Is er permanent vlak water, is deze speling kleiner.

Er zijn systemen voorzien die elke falings van het systeem tegengaan en indien nodig schadebeperkend werken, wat de betrouwbaarheid van het product sterk verhoogt.

Om het product effectief op de markt te brengen zijn nog enkele jaren hard labeur nodig. De automatische controlesystemen staan vandaag namelijk nog niet zover dat ze de vlieger in alle omstandigheden correct kunnen besturen. Tijdens deze jaren kan het vliegerontwerp dan ook voldoende getest en onderbouwd worden, zodat deze zeker aan alle eisen voldoet.

Dit mastertraject heeft vooral getracht om een aanzet te geven tot het basisontwerp van een kite-energiecentrale op zee, waarbij de mogelijke problematieken van de technologie werden vastgelegd. Voor deze problematieken wordt in dit ontwerp een integrale oplossing aangereikt om zo het potentieel van KitePower niet enkel theoretisch, maar ook met een effectief ontwerp, aan te tonen.

Ik hoop alvast met jullie dat KitePower in de nabije toekomst mee de hedendaagse energieproblematiek zal aanpakken,

Reinhart

Bronnen

Papers, Patenten en Tijdschriften

ARCHER, Christina and CALDEIRA, Ken, Global assessment of High-Altitude wind power, *Energies* 2009, 2, p. 307-319, 2009

ARGATOV, Ivan and KRENCISZEK, Joachim, Mathematical modeling of the pumping kite wind generator: optimisation of the power output, University of technology Finland, 2008

BROOKS, Michael, To make the most of wind power, go fly a kite, *New Scientist* 2656, p. 38-41, 2008

CANALE, Massimo, Power kites for wind energy generation, *IEEE control systems magazine* p. 25-38, 2007

DIEHL, Moritz and HOUSKA, Boris, Optimal control for power generating kites, KU Leuven, 2006

DIEHL, Moritz and HOUSKA, Boris, Optimal control of Towing kites, Conference of Control and Decision, San Diego, 2006(accepted)

DIEHL, Moritz and ILZHÖFER, A. , Nonlinear MPC of kites under varying wind conditions for a new class of large scale wind power generators, *Int. J. Robust Nonlinear Control*, 00, p. 1-9, 2006

DIEHL, Moritz and HOUSKA, Boris, Windenergienutzung mit schnell fliegenden Flugdrachen: eine herausforderung für die optimierung und regelung, *Automatisierungstechnik* 68, 2008

FUREY, Allister, Evolution of Neural Networks for active control of tethered airfoils, University of Sussex, 2008

JACOBSON, Mark Z., Review of solutions to global warming, air pollution and energy security, *Energy Environ. Sci.*, 2, 148-173, 2009

LANG, David, Using kites to generate electricity: plodding, low tech approach wins, *Drachen foundation journal*, 2004

LANSDORP, Bas, Comparison of concepts for high altitude wind energy generation with ground based generator, TU Delft, 2005

LANSDORP, Bas, The laddermill - innovative wind energy from high altitudes in Holland and Australia, *Windpower06*, 2006

LOYD Miles L , Crosswind Kite Power, *Journal of Energy* Vol. 4, No. 3, p. 106-111, 1980

LUCHSINGER, R. H. , Light weight structures with tensairity, *Airlight.ch*, 2004

LUCHSINGER, R. H. , The new structural concept Tensairity: basic principles, *Airlight.ch*, 2004

LUCHSINGER, R. H. , Pressure induced stability: from pneumatic structures to Tensairity, *Airlight.ch*, 2004

MILANESE, M. and CANALE, M. , KiteGen project: control as key technology for a quantum leap in wind energy generators, *Proc. of American Control Conference*, 2007

MUELLER, M. A. , A lightweight low speed permanent electrical generator for direct-drive wind turbines, University of Edinburgh,

PAYNE, P. and McCUTCHEN Ch., Self-erecting windmill, United States patent 3987987, 1976

PELHAM, David, Kites, *Overlook press*, 2000

TRAUB, Lance W. , Experimental investigation of Annular Wing Aerodynamics, *Journal of Aircraft*, p. 998-998, 2009

VANCE, Erik, High hopes, *Nature*, vol. 460, 2009

Websites, laatst bezocht in mei 2010

<http://www.airlight.ch>, <http://www.catchthewindinc.com>, <http://www.electrawinds.be>, <http://www.energykitesystems.com>, <http://www.festo.com>, <http://www.flysurfer.com>,
<http://www.ghetzleraeropower.com>, <http://www.inhabitat.com>, <http://www.jobyenergy.com>, <http://www.nasa.gov>, <http://www.schleifring.com>, <http://www.skysails.com>,
<http://www.solarimpulse.com>, <http://www.vliegerblad.nl>, <http://www.wwindea.org>.

**KITE
POWER**