

**Scissor hinge deployable  
membrane structures tensioned by  
pleated pneumatic artificial muscles**

PHILIPPE BLOCK  
TOM VAN MELE





VRIJE UNIVERSITEIT BRUSSEL

FACULTEIT TOEGEPASTE WETENSCHAPPEN  
AFDELING ARCHITECTUUR

**Scissor hinge deployable  
membrane structures tensioned by  
pleated pneumatic artificial muscles**

PHILIPPE BLOCK  
TOM VAN MELE

Proefschrift ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Burgerlijk Ingenieur- Architect

Academiejaar 2002-2003

Promotor: Prof. Dr. ir. Marijke Mollaert (Vakgroep Architectuur)  
Copromotor: Dr. ir. Frank Daerden (Vakgroep Werktuigkunde)



Nade 'Golden Sixties' een periode van grote welvaart en vooruitgang, werd de mensheid in de afgelopen eeuw met enkele keiharde feiten geconfronteerd. De oliecrisis in '72-'73 maakte het voor iedereen duidelijk: er is een limiet aan de natuurlijke rijkdommen van onze planeet en aan de prijs die we ervoor willen betalen.

Voor het rijke Westen begon de wereld door heel andere ogen te bekijken en nieuwe prioriteiten traden op de voorgrond.

De begrippen 'zuinig' en 'herbruikbaar' werden aan het economisch woordenboek toegevoegd, terwijl men streefde naar een beter beheer van de beschikbare middelen in het algemeen.

Goedkopere grondstoffen, betere productiemethodes en een design gebaseerd op functionaliteit en efficiëntie waren nieuwe grote uitdagingen.

Nu, 30 jaar later, in 2003, zijn een aantal van deze doelen reeds bereikt en zijn we op het gebied van sociaal-economisch denken sterk geëvolueerd.

We zijn ons meer en beter bewust van wie of wat nog na ons komt en hebben daardoor geleerd investeringen te toetsen aan een concept van duurzaamheid.

De mens geeft meer dan ooit vorm aan zijn toekomst en het middel bij uitstek is de architectuur.

5

*« If architects designed a building like a body, it would have a system of bones and muscles and tendons and a brain that knows how to respond. If a building could change its posture, tighten its muscles and brace itself against the wind, its structural mass could literally be cut in half... »*

Guy Nordenson, Ove Arup and Partners

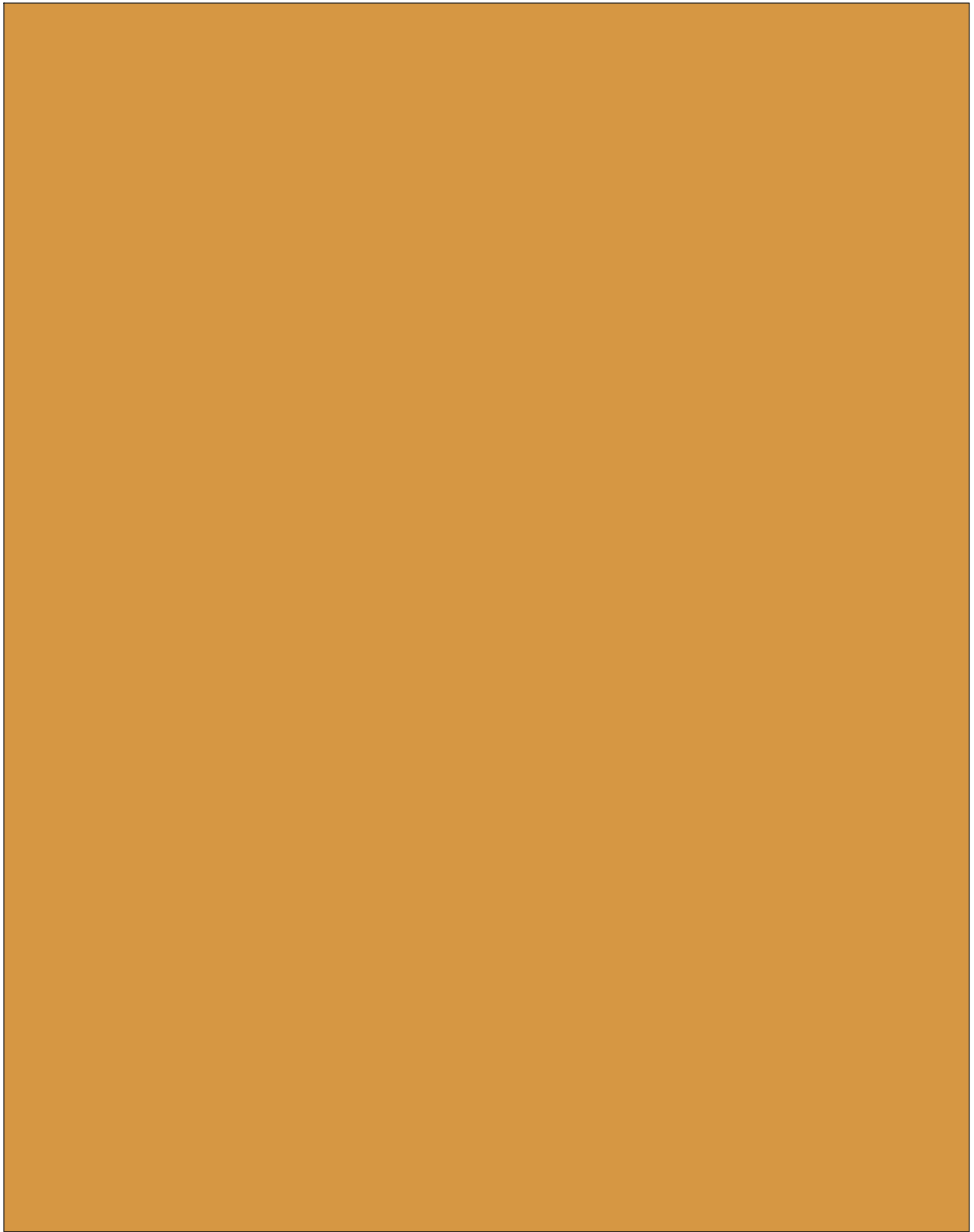
Op deze plaats willen we onze promotoren bedanken voor het interessante onderwerp en de steun, zowel moreel als inhoudelijk, die ons bij de uitwerking ervan verleend hebben.

We zijn de vakgroepen Architectuur, Bouwkunde, Werktuigkunde en Polymeerwetenschappen bovendien zeer erkentelijk voor de middelen die ons ter beschikking werden gesteld en denken in het bijzonder aan de wijze raad en het vakmanschap van het technisch personeel (Frans Boulpaep en Daniël De Bondt).

Voor de materialen van het zeil en de spieren konden we rekenen op de steun van de firma's Ferrari en Sioen.

Zonder het engagement en de inzet van deze personen en instellingen hadden we dit project nooit tot een goede einde kunnen brengen, waarvoor onze dank.

# Inhoudstafel

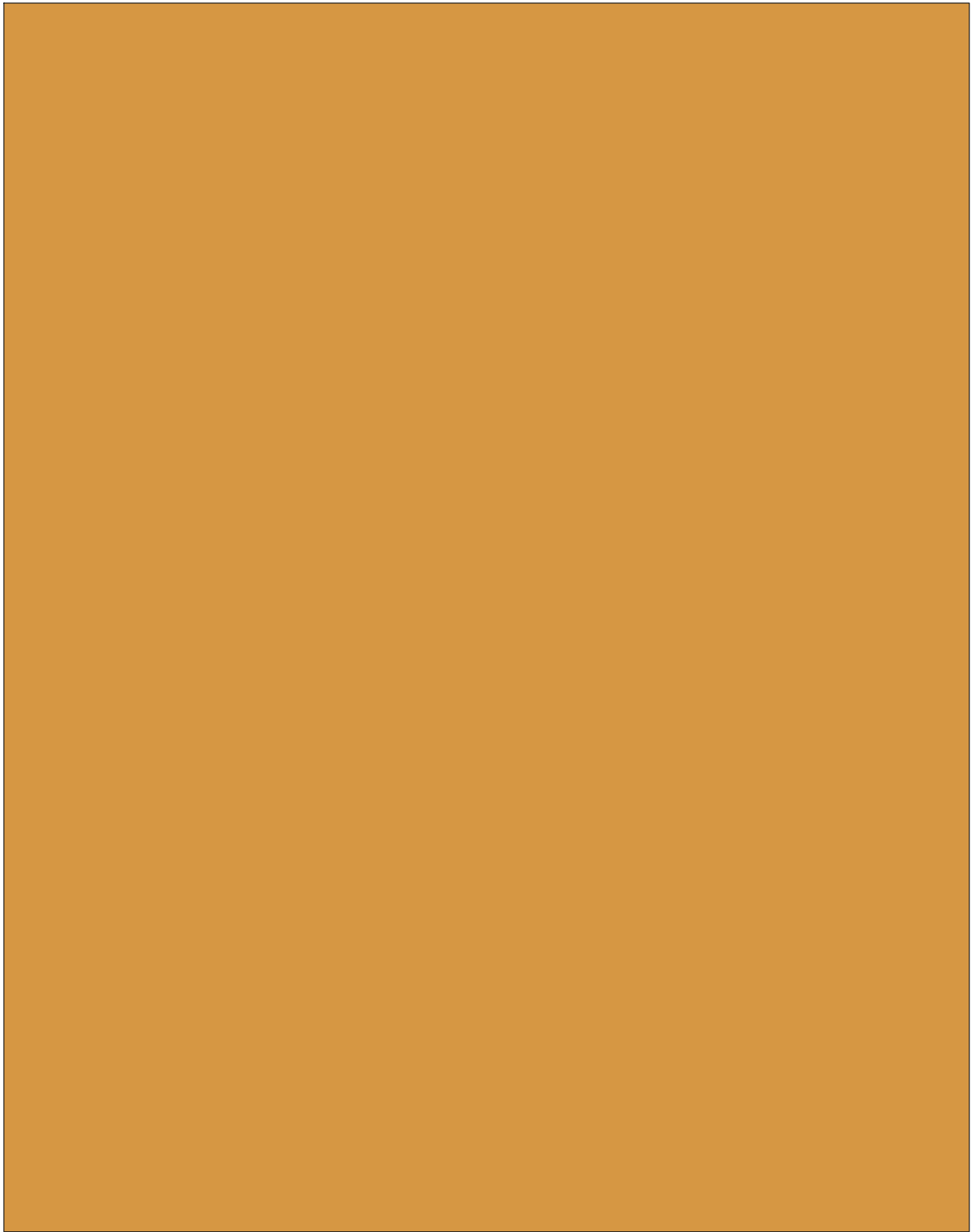




<b>Inleiding, doelstellingen</b>	<b>11</b>
<b>Basismodule</b>	<b>21</b>
<b>Simulaties</b>	<b>27</b>
<b>Correcties</b>	<b>41</b>
<b>Spieren, dimensionering</b>	<b>49</b>
<b>Van 'virtual reality' naar realiteit</b>	<b>57</b>
<b>Spieren, productieproces</b>	<b>65</b>
<b>Knippen en ... Lassen</b>	<b>73</b>
<b>Assemblage</b>	<b>79</b>
<b>Bedenkingen en toekomstperspectief</b>	<b>87</b>
<b>Bibliografie</b>	<b>91</b>



**Inleiding  
doelstellingen**



*“If a building could mediate our needs and the environment outside: Its demand on physical resources could be slashed. If it could transform to facilitate multi-uses: Its function would be optimized. If a building could adapt to our desires: It would shape our experience...”*

Michael A. Fox, kinetic design group, MIT

Constructies met spieren, de gedachte spreekt tot de verbeelding en speelt reeds sinds enkele jaren in de hoofd van prof. Dirk Lefebere en Frank Daerden (Werktuigkunde VUB). Prof. Mollaert (Architectuur VUB) formuleerde ze recent als onderwerp voor een afstudeerwerk, waarin de rol van de spieren bij de ontplooiing van een eenvoudige door scharengedragen vormactieve dakconstructie, onderzocht diende te worden. Onder haar impuls hebben we gestreefd naar de realisatie van een volwaardig eindproduct zonder een deelaspect van het onderzoek te verwaarlozen. Het werd een multidisciplinaire onderneming waarin het ontbreken van precedenten veeleer een bevrijding dan een obstakel bleek omdat we verplicht waren onze intuïties als ontwerp ingenieur te gebruiken.

13

**« Scissor hinge deployable membrane structures tensioned by pleated pneumatic artificial muscles... »**

... De belangrijkste elementen, de 'bouwstenen' van ons onderzoek, zullen in eerste instantie nadertoegeelicht worden.

Deze inleiding zal slechts vermelden wat van belang is voor een goed algemeen begrip. De detaillering van elk onderdeel komt lateraan bod voor de volledige achtergrond verwijzen we naar de bibliografie, in het bijzonder de volgende proefschriften:

- « Frank Daerden. Conception and realization of Pleated Pneumatic Artificial Muscles and their use as compliant actuation elements. »
- « Niels De Temmerman. Ontplooibare structuren, algemeen overzicht en studie in het kader van een ontwerp opdracht. »
- « Anneleen Govaerts. Experimentele verificatie van een ruitvormige membraanunit. »
- « Sven Hebbelinck. Adaptent, a generating system for temporary, adaptable and reusable nets and tensile structures. »

# Scissor hinge deployable

14

Intelligente bewegende systemen zijn nieuw in een omgeving waar objecten meestal statisch zijn en interactie veruimt. Het is een aanpasbaarheid die nog vrijwel onbekend is.

Op de kruising van verschillende vakgebieden bestaat een nog onverkende architectuur, klaar om aan de eisen van de huidige maatschappij te voldoen.

Ze beschouwt de veranderende interactiepatronen tussen het individu en zijn geconstrueerde omgeving en beantwoordt aan de specifieke behoeften van om het even welke menselijke activiteit.

Vanuit de prangende vraag naar flexibiliteit binnen onze technologisch revolutionaire wereld ontstaan een evoluerende nieuwe architecturaal typologieën.

Gebouwen die minder middelen verbruiken en efficiënt reageren op complexe, plaatsgebonden en programmatorische eisen zijn bijzonder interessant voor een industrie, sterk bewust van haar groeiende verantwoordelijkheid ten opzichte van de mens en natuur.

Onderzoek naar objecten die fysiek slechts verschijnen op bepaalde momenten en gewoon verdwijnen of transformeren als ze niet langer functioneel zijn, leidt tot de ontwikkeling van 'deployable structures', aanpasbare structuren die van een gesloten, compacte configuratie naar een vooraf bepaalde vorm kunnen expanderen en zo de dynamiek van de huidige architecturale ruimte benadrukken.

ple

Men bedacht onder meer de schaarstructuren die door de eenvoudige aaneenschakeling van SLE's (scissor-like elements) en mits toepassing van een aantal eenvoudige regels, bijna elke denkbare ruimtelijke constructie mogelijk maken.

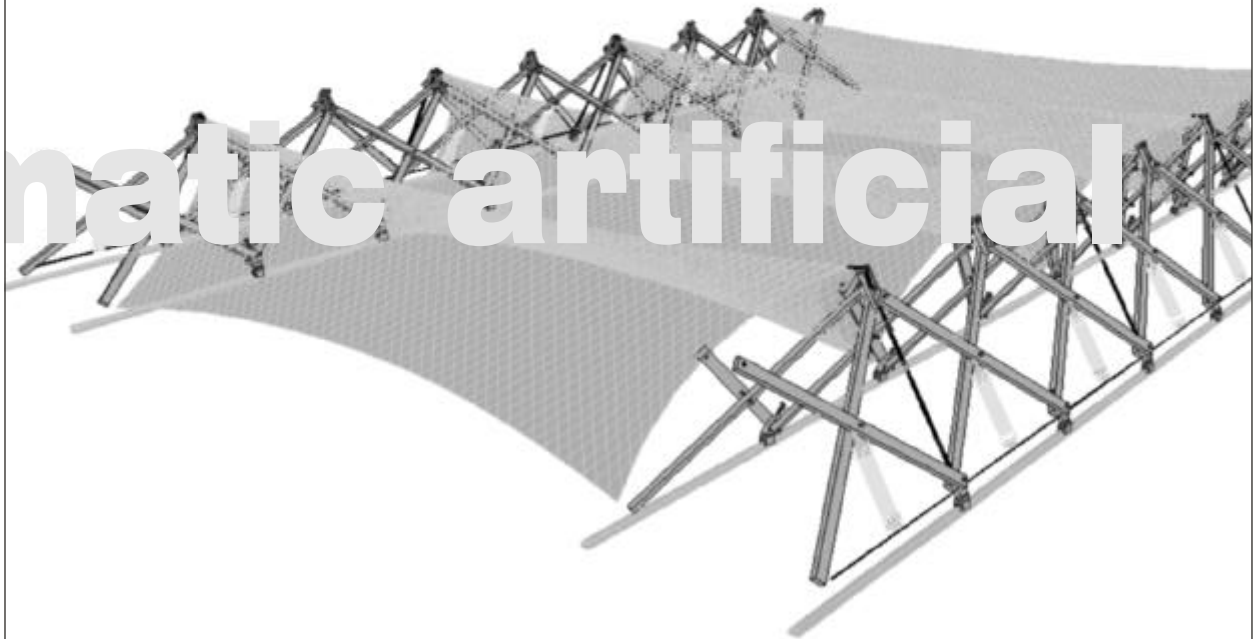
Op het gebied van de 'retractable roofs' (bewegende dakconstructies) bieden ze een beloftevolle toekomstperspectief, maar omwille van hun extreem driedimensionaal herconfigureerbaar karakter, missen ze nog een evenwaardige bedekking en hebben ze nog maar weinig concrete realisaties gevonden.

De combinatie met vormactieve membraansystemen is volgens prof. Marijke Mollaert een interessante denkpiste voor de verdere ontplooiing van deze scharen.

15

structures

natic artificial



Het bereiken van lichtheid is een zware taak die kennis, ervaring en fantasie van een toegewijd ontwerper op de proef stelt.

Lichtgewicht constructies tarten de grenzen van statische en dynamische structurele theorieën, terwijl een extreem gebruik van materialen en de dikwijls ingewikkelde driedimensionale vormgeving moderne technologieën en productietechnieken tot het uiterste drijft. Ze geven uiting aan ingenieuze, efficiënte concepten en dragen bij tot de visualisatie van een dynamische, hedendaagse architectuur.

Soepele textielstructuren uitgevoerd als vormactieve systemen volgen de natuurlijke weg van het krachtenverloop en scheppen duidelijkheid in de voorvelen vaak onbegrijpelijke werking van ingewikkelde constructieve ideeën.

16

# membrane tensioned by

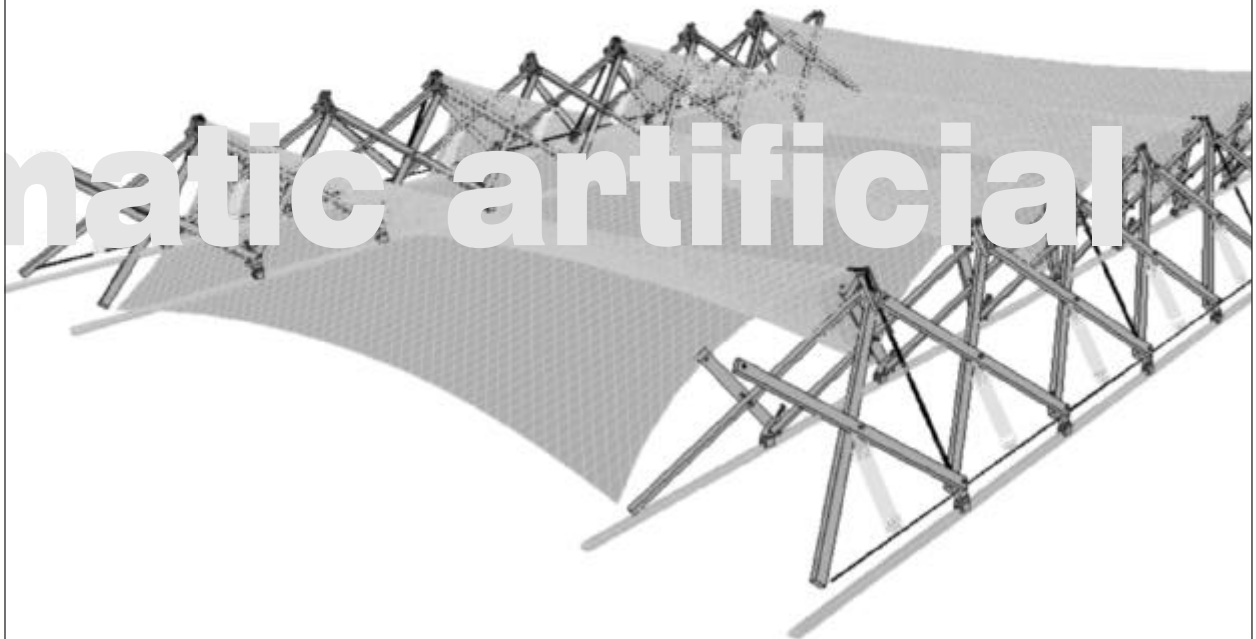
Al dan niet gecoate vezelverstevigde membranen zijn in deze context stilaan courant gebruikt en materialen die door hun specifieke fysische en mechanische eigenschappen het constructief woordenboek vervolledigen en verrijken. Ze hebben een hoge treksterkte, maar bij de minste druklast verschijnen rimpels en verdwijnen alle structurele capaciteiten. De flinterdunne zeilen die nu gestabiliseerd door een voorspanning die het geheel vormgeeft en de weerstand tegen externe belastingen verzekert. Met hun expressieve dubbele krommingschaken zeven aan rigide structuren en in een ontwerp dat streeft naar een uniforme verdeling van de spanning in alle richtingen, behelzen ze een minimaal oppervlak dat optimaal gebruik maakt van materialen voor de gegeven omstandigheden.



Het dient gezegd dat het zo verworven vederlichte uiterlijk van vormactieve membraan-constructies ten koste gaat van grote krachten en dus zware verankeringen die evenwel dikwijls aan het oog onttrokken worden. Dit ambigu karakter van dergelijke systemen stelt de ontwerper voor de moeilijke opdracht zijn concept van lichtheid consequent en opeenerlijk op een manier te vertezetten. Tijdens de uitvoering van dit werk werden we meermaals met deze aspecten geconfronteerd.

17

# structures



Artificiële spieren zijn contractiele elementen werkend op gasdruk.

Ze zijn de pluimgewichten onder de persluchtaandrijvingen en hebben karakteristieken vergelijkbaar met die van de skeletspier.

Aan de basis ligt een eenvoudig concept.

Het centrale deel is een vervormbaar, buigzaam, verstevigd en afgesloten membraan, bevestigd aan twee eindstukken langs waaraan een gas kan worden ingebracht of afgevoerd.

Indien opgeblazen, zal het membraan opbollen en volgens zijn lengterichting samentrekken.

De evenwichtslengte van de actuator blijkt té éénduidig bepaald door de ingestelde druk en de uitwendige belasting, zodat de verandering van het volume met de lengte rechtstreeks bepaald is voor de ontwikkelde kracht.

$$F = -p \frac{dV}{dl}$$

Deze trekkracht neemt af van een zeer grote waarde in de langste toestand tot nul wanneer de maximale contractie bereikt is.

De variant ontwikkeld door Frank Daerden aan de afdeling Werktuigkunde van de VUB, verbetert de mankementen van haar tegenhangers door een ontwerp waarbij het cilindrisch membraan samengepakt is in plooien volgens de lengte-as. Op die manier wordt het membraan tijdens contractie simpelweg ontplooid en bij het weer verlengen terug opgeplooid.

tensioned by

pleated pneun

muscles

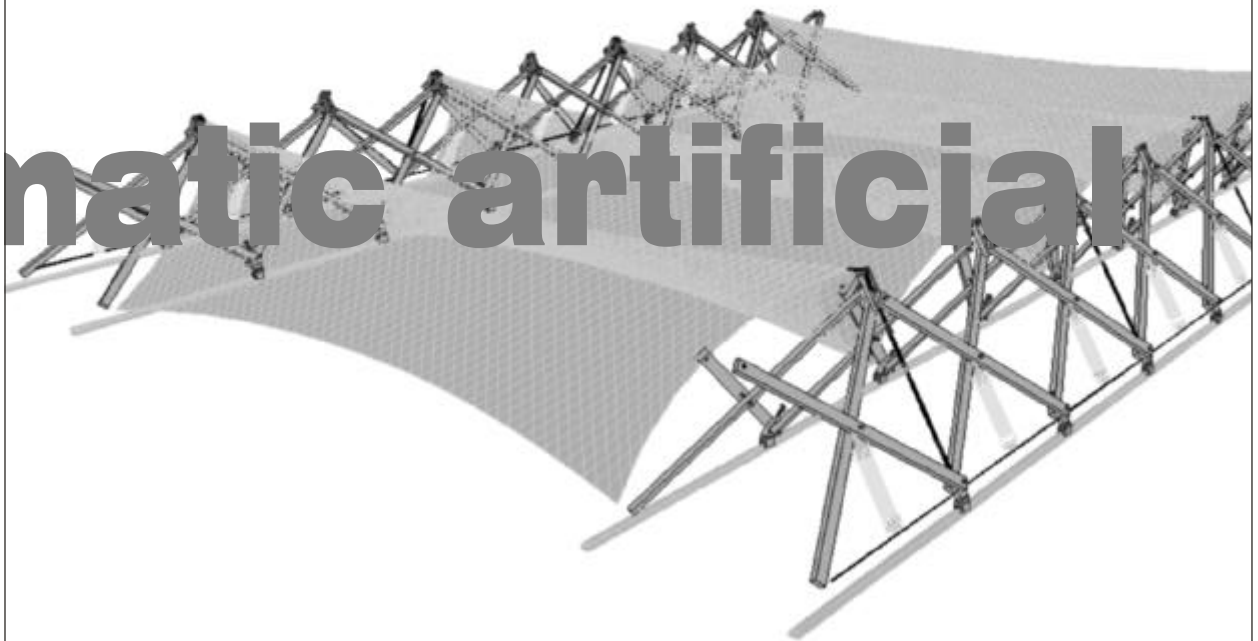
Deze geplooide trekbalgen blijken zeer geschikt om een snelle accurate en betrouwbare positiebesturing uit te voeren en door hun inherente soepelheid leveren ze een bijkomende dempende werking.

Hoewel op zuiver werktuigkundig vlak verscheidene andere pneumatische aandrijvingen over vergelijkbare kwaliteiten beschikken, is er voor een ontwerp dat strenge eisen stelt aan beweging, expressie, lichtheid en soepelheid, slechts één alternatief dat conceptueel op alle vlakken de norm bereikt: de geplooid pneumatische artificiële spier.

Bovendien zal haar visuele gelijkheid met de menselijke spier slechts weinig nontgaan en het hoeft dan ook niet gezegd te worden waarom ze voor de creatieve aanbouw van kunstmatig organische structuren een mogelijkheid is.

structures

natic artificial



Doelstellingen...

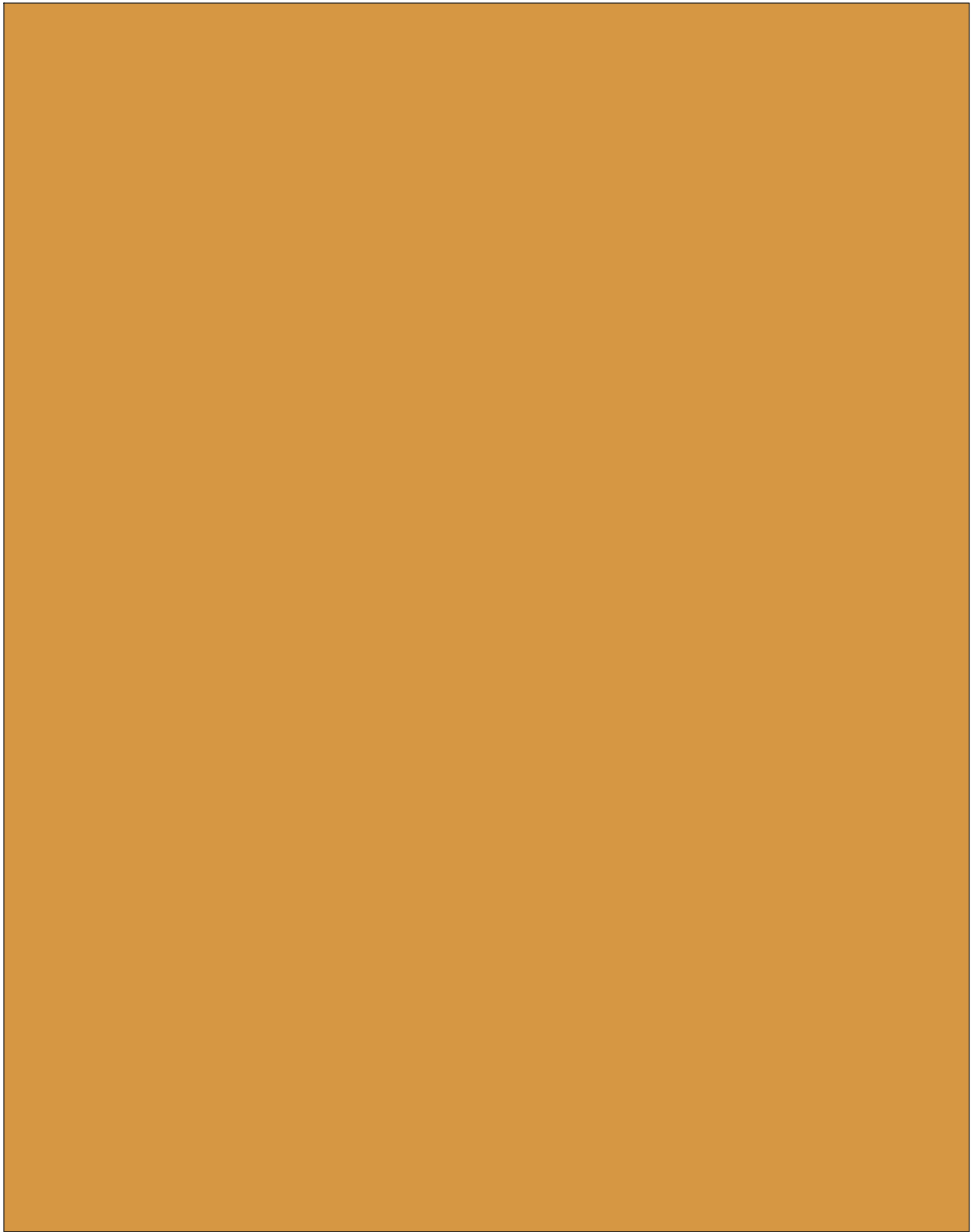
Het is onze bedoeling geweest al deze elementen samen te brengen tot een soort van organisme, een bewegende structuur met een skelet, een huid, spieren, pezen en een intelligente sturing, ontstaande van het mechanisch tintje van haar voorgangers.

In eerste instantie hebben we een theoretisch concept uitgewerkt, dat door het bouwen van een testmodel getoetst kon worden aan de realiteit.

Bovendien werd een spier ontwikkeld, aangepast aan de randvoorwaarden van dit specifieke geval.

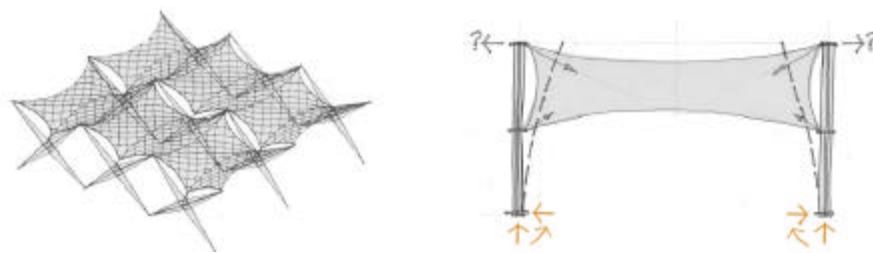
We hebben geprobeerd hieruit een principe af te leiden, dat in al zijn eenvoud richting geeft aan verder onderzoek en een eerste stap is naar de integratie in meer ingewikkelde (schaar) (dak) constructies en in de bouwkunde in het algemeen.

# **Basismodule**



Door de quasi onuitgegeven combinatie van spieren en scharen en het ontbreken van voorgaand onderzoek wareneer geenevidenteaanknopingspunten. Om niet te verdrinken in de zee van mogelijkheden, bepaalden we de randvoorwaarden van ons basismodel aan de hand van een concrete opdracht voor ontwerpmethodiek.

Het overdekken van een buitenruimte of de dakconstructie van een sportterrein waren voor de hand liggende mogelijkheden.



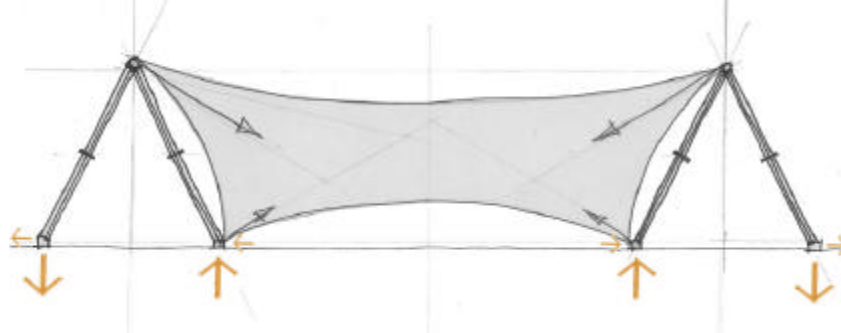
**Figuur 1:** module uit de doelstelling.

Vertrekkende van de module uit de doelstelling (zie Fig. 1) kozen we voor een constructie bestaande uit twee parallelle reeksen van telkens twee geïnclineerde vlakke scharen : de basismodule.

Op deze manier bezaten beide 'balken' een zekere interne stabiliteit en ontplooidestructuur zich op een eenvoudige manier in een eenvoudige translatiebeweging.

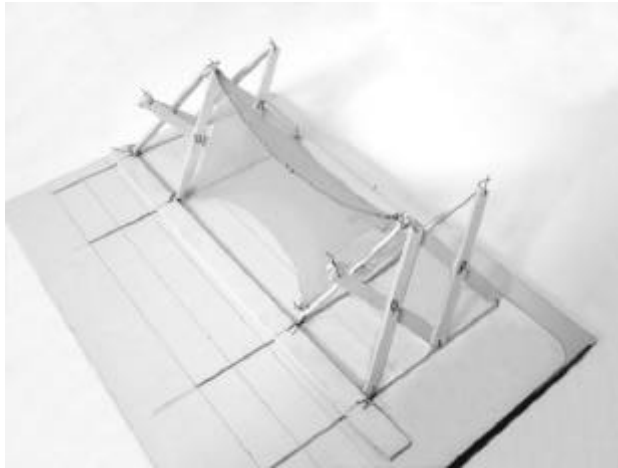
Naar analogie met het bewegend vakwerk, hebben we beslist slechts de eindknop te belasten en de inwendige scharnieren ongemoeid te laten. Het ontstaan van buigmomenten in de schaarbenen zou de beweging van het geheel immers bemoeilijken.

De vorm van het membraan dat tussen de bewegende liggers gespannen moest worden, was dus een logisch gevolg van de configuratie van de scharen (zie Fig. 2).



**Figuur 2:** basismodule.

Omeentastbaarstudieobjectte hebben en de problematiek dus te visualiseren, maakten we een kleine maquette.



**Figuur 3:** maquette.

Geïnspireerd door de nylonkous die we hier gebruiken als zeil (zie Fig. 3) dachten we in eerste instantie voor het materiaal in de realiteit aan een rekbaar stof die door haar elastische eigenschappen in alle posities de gewenste vorm kon aannemen zonder daarbij te grote spanningen te genereren. Een piste die wijlsgevolgd bij de productie van tot de verbeelding sprekend 'speelgoed' (bijvoorbeeld de 'expanding dome' van Hobermann; zie Fig. 4).



**Figuur 4:** expanding dome.

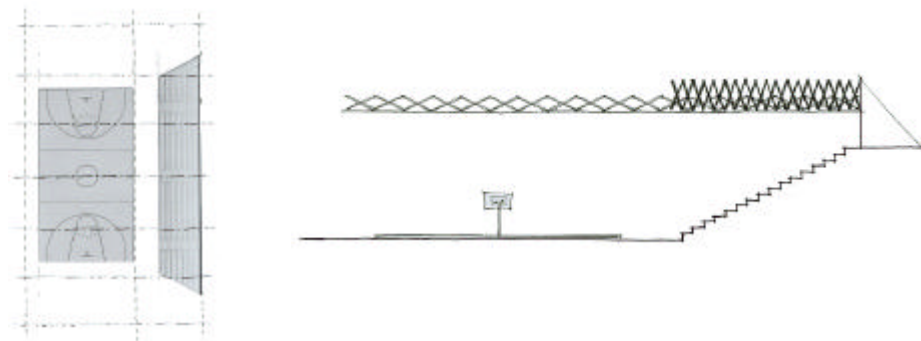
De hierbij gebruikte vliezen kunnen echter (juist door hun rekbaarheid) geen externe belastingen opnemen en zijn in grote mate onderhevig aan kruip zodat regelmatig ontplooiën van de constructie als noodzaak tot onaanvaardbare vervormingen.

We kozen daarom voor een structureel membraan met een veel hoger stijfheidsniveau en vormvastere eigenschappen.



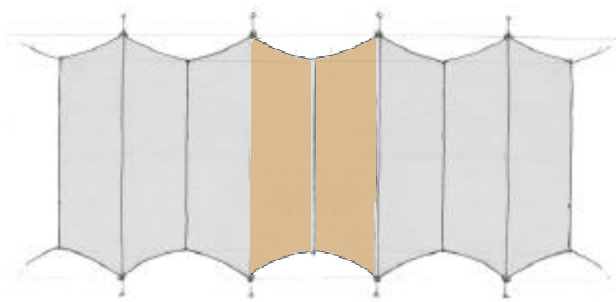
Om uiteindelijk de concrete afmetingen van de module vast te leggen, beschouwden we het dakoppervlak van een kleine sporthal, dat we verdeelden in traveeën van 9 meter over de lengte van het veld.

Het leek ons interessant (naar de toepassing toe) boven de tribunes aan het sportterrein een permanente overdekking te voorzien, die dan indien nodig over de rest van het veld kon uitwaaien (zie Fig. 5).



**Figuur 5 :** toepassingsmogelijkheid.

Voor verdere uitwerking en het bouwen van een prototype hebben we deze traveeën tot een 3-meter-model dat klein genoeg was om binnen een aanvaardbaar budget gebouwd te kunnen worden en groot genoeg om waarheidsgetrouwe resultaten voort te brengen. Omwille van de specifieke vorm van de zeilen noemden we het de 'vlindermodule' (zie Fig. 6).

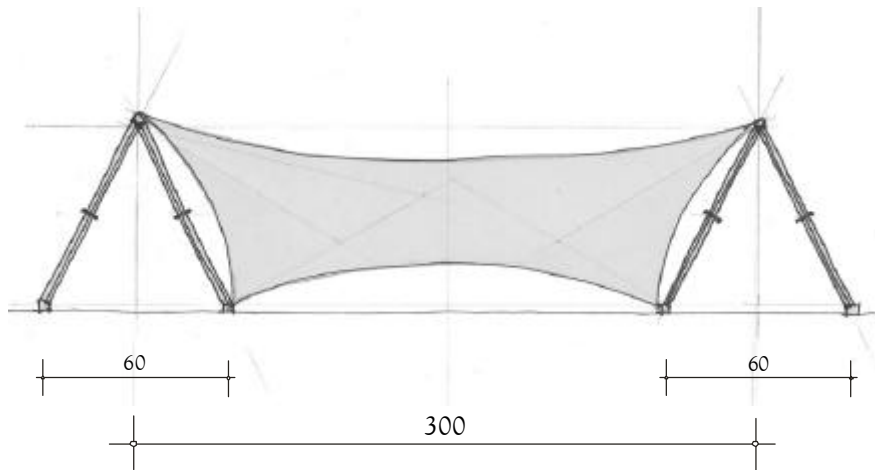


**Figuur 6 :** de vlindermodule.

Door de invoering van dit onderzoeksmodel in EASY, het simulatieprogramma van TECHNET voor de vormgeving en berekening van vormactieve constructies, hoopten we een idee te krijgen van de spanningen die we wilden corrigeren en de krachten die we daarbij in rekening moesten brengen.

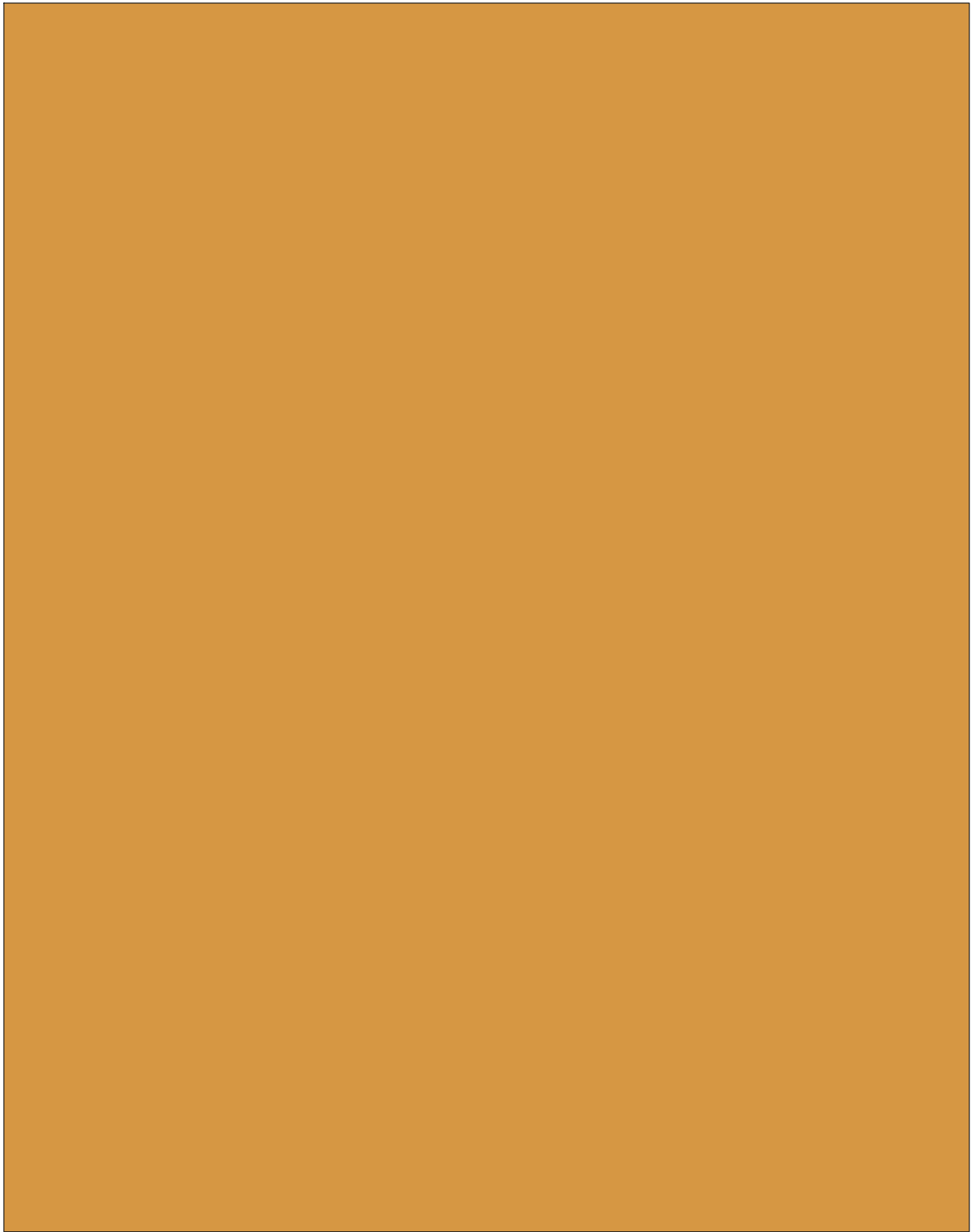
Voor de materialen van het membraan kozen we een zeer licht polyesterweefsel gecoat met polyvinylchloride. We beschouwden de 3-meter-module immers als de kleinste eenheid voor een dergelijke constructie en wilden de verschaling naar grotere modellen dus niet reeds compromiteren door het gebruik van een te zwaar zeil (dat niet in verhouding met de afmetingen van de rest van de module zou zijn; zie Fig. 6  $\frac{1}{2}$ ).

Dezelfde materiaalcombinatie zal bovendien gebruikt worden voor de ontwikkeling van de aangepaste spieren.



**Figuur 6  $\frac{1}{2}$** : maten van de 3-meter-module.

# **Simulaties**



Vormactieve systemen hebben een vorm die de natuurlijke weg van de krachten volgt als functie van specifieke randvoorwaarden. In toepassingen met structurele membranen wordt deze vorm in het zeil vastgelegd door middel van een knippatroon (zie Box 1).

Bij aanpasbare constructies veranderen de randvoorwaarden echter voortdurend. Het membraan kan uiteraard maar voor één welbepaalde configuratie 'op maat' gemaakt worden en zal dus in alle andere posities enkel door correcties toch nog een evenwichtsvorm kunnen krijgen.

EASY is in principe ontworpen voor de ontwikkeling van klassieke 'statische' constructies die gedurende hun volledige bestaan relatief onveranderd blijven.

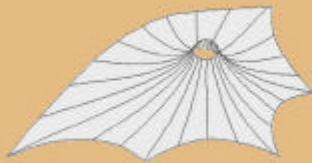
Het programma bestaat uit een aantal afzonderlijke modules met verschillende subprogramma's die elke deel van de berekening voor zich nemen.

In de eerste module - de 'formfinding' - wordt op basis van de ingestelde randvoorwaarden (de verbindingen met de draagstructuur), de ontwerpparameters en een gekozen voorspanning, de optimale vorm bepaald voor de gemodelleerde constructie.

Na het vastleggen van de materiaaleigenschappen van het gekozen zeil kan men de opstelling onderwerpen aan verschillende belastingsgevallen (wind, sneeuw, temperatuur, ...) en haar gedrag controleren in de module van de 'static analysis'.

### Box 1: Wat is een knippatroon ?

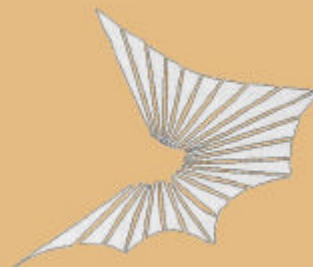
Het met de computer gesimuleerde ontwerp van een vormactieve constructie wordt opgedeeld in segmenten, in een vlak geprojecteerd, getekend op de stof, uitgesneden en stuk voor stuk gereconstrueerd. Dit patchwork van letterlijk aangeplakte stukken zeil heeft nu het gewenste driedimensionale design en bekomt zijn optimale vorm na het aanbrengen van de voorspanning.



driedimensionaal design verdeeld in segmenten met geodetische lijnen.



Segment verdeeld in elementjes voor ontwikkeling naar het vlak.



Te assembleren vlakke segmenten.

Als de vervormingen of de spanningen hierbij bepaalde limietwaarden overschrijden, moet men de formfindingprocedure opnieuw doorlopen met een aangepaste voorspanning totdat de resultaten van de statische stabiliteitsberekeningen aan de vooropgestelde criteria voldoen. Op deze manier bekomt men dan een ideale voorspanning voor de gegeven omstandigheden en de daaraan gekoppelde evenwichtsvorm met een zekere spanningsverdeling.

Via deze gegevens kent men de oplegkrachten en kan de volledige constructie gedimensioneerd worden.

Voor de invoering van onze structuur hebben we haar vloeiende, continue beweging herleidt tot een aantal representatieve 'statische' posities : de twee uiterste configuraties van het dak waartussende volledige beweging zich afspeelt en een positie tussenin voor de bepaling van het knippatroon. Alle ingrepen om de beweging te simuleren (zie Box 2) moesten in ieder geval na de KLSEIL gebeuren - in dit deelprogramma wordt het membraan virtueel geknipt en geassembleerd - zodat we steeds met hetzelfde zeil werkten.

### Box 2: Het simuleren van de ontplooiing

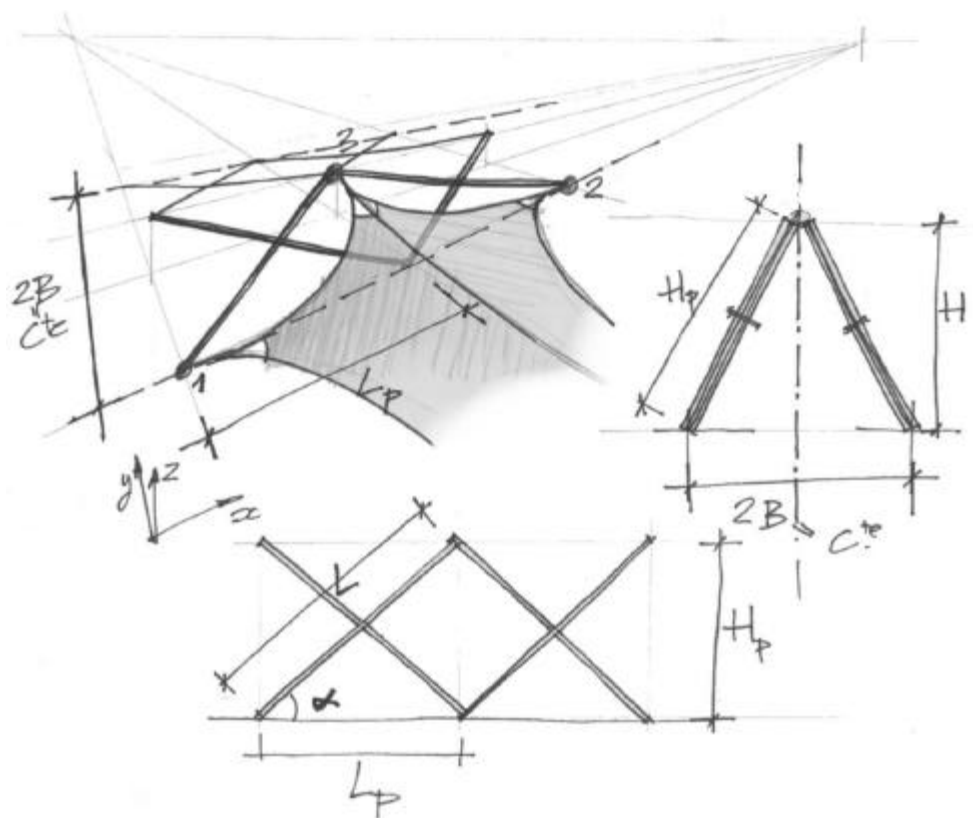
In elke configuratie van het dak is de exacte positie van de verbindingpunten van het zeil met de buitenwereld (= de randvoorwaarden) éénduidig bepaald. De beweging wordt dus zeer eenvoudig nagebootst door in discrete stappen aan de coördinaten van de eindknopen (de hoekpunten van het membraan) de waarden toe te kennen van een volgende 'bevroren' toestand.

Deze nieuwe eindpunten zijn enkel afhankelijk van  $\alpha$ , de hoek die de ontplooiing van de scharen karakteriseert.

We hebben dus bijvoorbeeld als coördinaten voor de volgende punten (zie Fig. 7):

- 1  $(0, 0, 0)$
- 2  $(2 \cdot L_p, 0, 0)$  of  $(2 \cdot L \cdot \cos \alpha, 0, 0)$
- 3  $(L_p, B, H)$  of  $(L \cdot \cos \alpha, B, \sqrt{(L \cdot \sin \alpha)^2 - B^2})$

met  $L$ , de lengte van een staaf in de schaarstructuur, en  $2B$ , de afstand tussen de twee gekantelde pantografen, constant en gekend. ( $\alpha$  is dus de enige variabele...)



**Figuur 7:** coördinaten van de eindknoepen.

Op deze manier konden we dan voor elke positie gaan controleren in hoeverre dit 'beginzeil' gecorrigeerd moest worden om telkens tot een nieuwe evenwichtssituatie te komen met een min of meer constante voorspanning voor alle posities (zie Box 3).

Bij het bepalen van de range van ontplooiing beschouwden we in eerste instantie de beperkingen van de scharen. Scharconfiguraties waarbij de benenvande SLE's een hoek ( $\alpha$ ) van minder dan  $15^\circ$  of meer dan  $75^\circ$  vormden, bleken de beweging van het dak te bemoeilijken of zelfs onmogelijk te maken en leverden visueel een 'overdreven' resultaat.

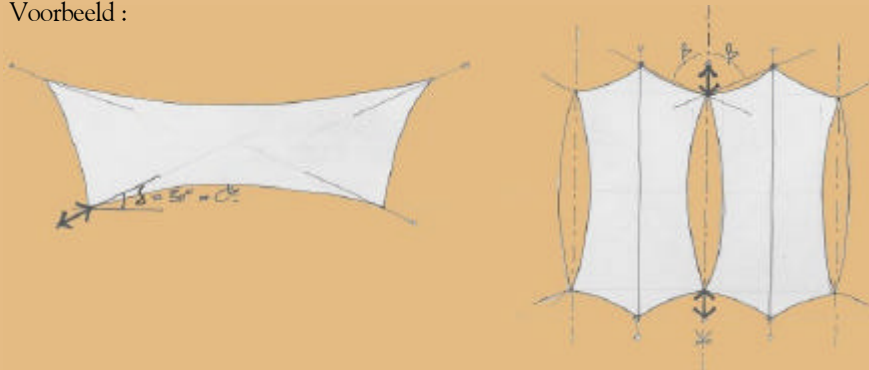
De positie voor de bepaling van het knippatroon associeerden we intuïtief met een scharopening van  $45^\circ$ .

### Box 3 : Uitvoeren van de correcties in Easy

correcties = aantrekken of lossen van de kabels in de verschillende deposities.  
 We kennen hiervoor 2 methoden.

Ten eerste kan men gewoon in elke positie de hoekpunten verplaatsen door ze nieuwe coördinaten te geven. Dit is een goede benadering als de randvoorwaarden voor de beweging van de kabels goed gekend zijn.

Voorbeeld :



De tweede methode is meergeslacht in het geval waar de eindkabels zich volgens de richting van de kracht kunnen en zullen 'zetten'.

Tijdens de formfinding voegen we daarna aan elke hoek van het zeil een extra link toe die eigenlijk de eindkabel voorstelt. Samen zullen ze dan in een evenwichtsvorm vastgelegd worden zodat de links automatisch de krachten volgen.

Door het verkorten of verlengen van deze links zal de correctie dus altijd volgens de juiste richting verlopen.

Voorbeeld :





Opmerking:

De beweging van de kabels is in beide gevallen volledig bepaald door  $\beta$  en  $\delta$ .

Bij het theoretisch model (een module als onderdeel van een aaneengeschakelde band) ligt de kabel steeds op de symmetrieas tussen twee aanliggende modules, terwijl  $\delta$  doorheende beweging constant ongeveer  $30^\circ$  bleek. Daarom gebruikten we hier de eerste methode.

Voor de simulaties van het testmodel waren de hoeken mindergoed gekend omdat we een volledig onafhankelijke module beschouwden. De kabels konden zich dus ongehinderd richten volgens de resultante van de krachten en verschilden dus van positie tot positie. De methode met de 'links' was hier dus duidelijk sneller en efficiënter.

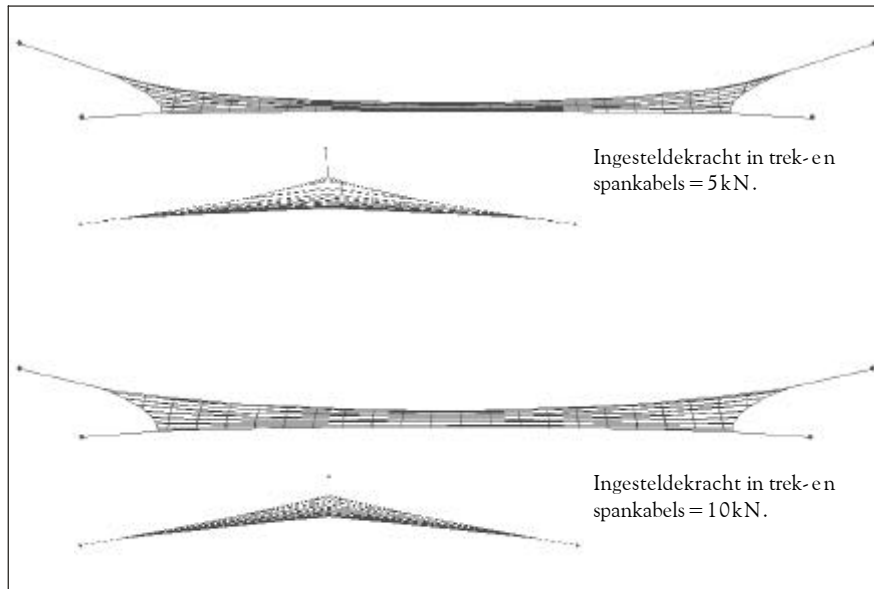
33

Als materiaal kozen we een zeer licht PVC gecoat polyesterweefsel met  $2\text{ kN/m}$  als richtwaarde voor de voorspanning. Een membraan (702 PVDF) met een dikte van  $0.5\text{ mm}$  werd ons geleverd door de textielproducent Ferrari (Frankrijk).

Nadat EASY met de ingestelde randvoorwaarden een optimale vorm voor de  $45^\circ$ -positie gevonden had, moest in eerste instantie de visuele impact van ontplooiing (door behoud van het initiële knippatroon) op deze vorm gecontroleerd worden.

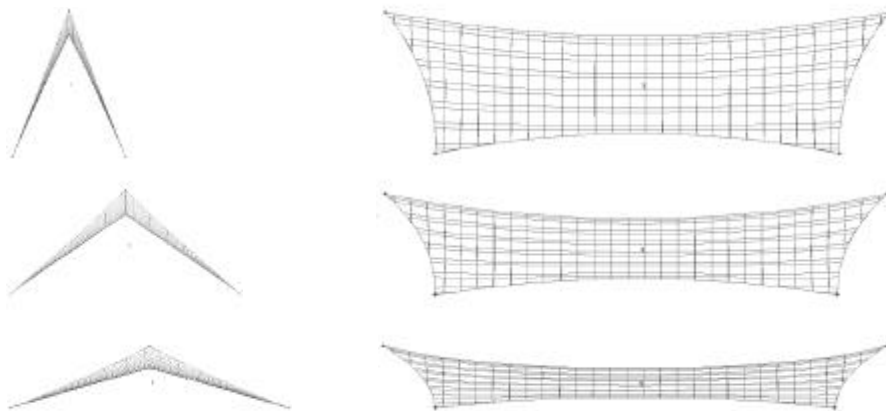
We zijn daarbij iteratief te werk gegaan en hebben de aanpassing van de opgelegde krachten in de randkabels (= de interactiekrachten met de buitenwereld) in een evenwicht gezocht tussen het realiseren van een mooie anticlastische vorm in de middenstanden en het voldoende behoud van de dubbele kromming voor alle andere posities.

De meest opgeplooide configuraties van de structuur bleken hierbij van doorslaggevende aard omdat te grote spanningen het zeil dreigend vlak trekken (zie Fig. 8).



**Figuur 8:** invloed instelparameters.

We kwamen uiteindelijk tot een esthetisch en functioneel verantwoord resultaat door het bewegingsinterval te beperken tot de zone tussen  $30^\circ$  en  $70^\circ$ .

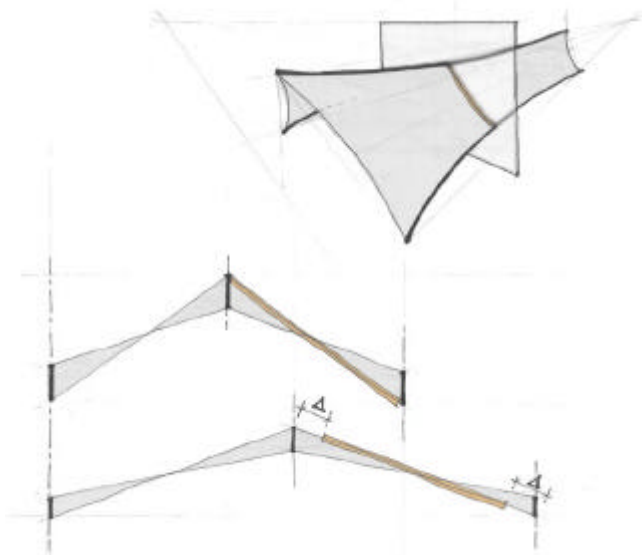


**Figuur 9:** vormelijk resultaat voor verschillende posities (boven naar onder :  $70^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $30^\circ$ ).

Om nu een realistisch beeld te krijgen van de nodige correcties moesten de effectieve spanningen in het PES/PVC zeil en de daaraan gekoppelde reactiekrachten in de kabels nader bekeken worden. Bij het toevoegen van de constructiewaaren er weinig problemen.

Het loshangend PES/PVC doek, dat dus geen structurele eigenschappen meer bezat, kon door een beperkte verkorting van de randkabels opnieuw (vrijwel) uniform gespannen worden tot in de buurt van de vooropgestelde richtwaarde (2 kN/m).

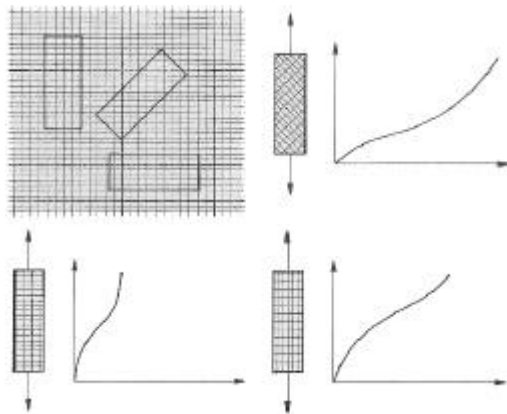
Bij het opschuiven echter, ontstond rond de gemeenschappelijke onderkabel een zone met enorme spanningsconcentraties. Ondanks veel vuldiglossen van het zeil, bleef het niveau van de spanningen loodrecht op de kabel veel te hoog (10x de vooropgestelde waarde), zelfs wanneer de waarde in de lengterichting hier en daar tot onder de limiet van stabiliteit gezakt was (op deze plaatsen, in EASY weergegeven door negatieve waarden voor despanning, werd het zeil dus niet meer in trek belast). In deze configuratie was er duidelijk niet genoeg zeilmateriaal om de volledige overspanning te genereren (zie Fig. 10).



**Figuur 10 :** oorzaak spanningsconcentraties ter hoogte van de onderkabel

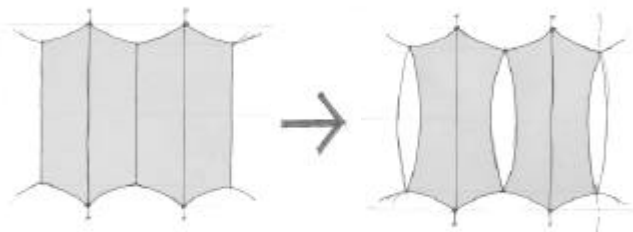
Om hieraan te verhelpen draaiden we het PES weefsel over  $45^\circ$  (de vezelmat was, zoals gebruikelijk bij dergelijke constructies, in eerste instantie evenwijdig aan de hoofdspansingen gelegd) zodat de grootste spanning, die tussen boven- en onderkabel, niet langer in zijn geheel door één vezelrichting gedragen moest worden. Bovendien ontstonden zo vervormbare vierhoeken die zich eerst konden herschikken alvorens de belasting op het polyester over te dragen.

Het membraan was op deze manier in staat grotere rekken te genereren zonder dat daarbij de spanning evenredig verhoogde (zie Fig. 11).  
 Hoewel deze verbetering behoorlijke resultaten opleverde, was dit nog niet voldoende om de voorspanningen der reactiekracht tot bruikbare waarden terug te brengen.



**Figuur 11 :** invloed vezelrichting op mechanische eigenschappen membraan.

De enige afdoende oplossing was een ont-dubbeling van de gemeenschappelijke onderkabel van de verschillende vlintertjes zodat ze als afzonderlijke modules beschouwd konden worden. Zo kon het zeil zich beter schikken en werd de beweging minder gehinderd door de beperkte rekbaarheid van de stof.  
 Om de esthetische en functionele kwaliteiten van de gesloten band in het dakvlakte te behouden of zelfs te verbeteren, kon de verbinding tussen de zeilen vervangen worden door lenzen: soepele vervormbare elementen in PTFE die een nieuw ritme en extra leven in het geheel brachten. We krijgen dus een afwisseling van structurele en niet-structurele delen.

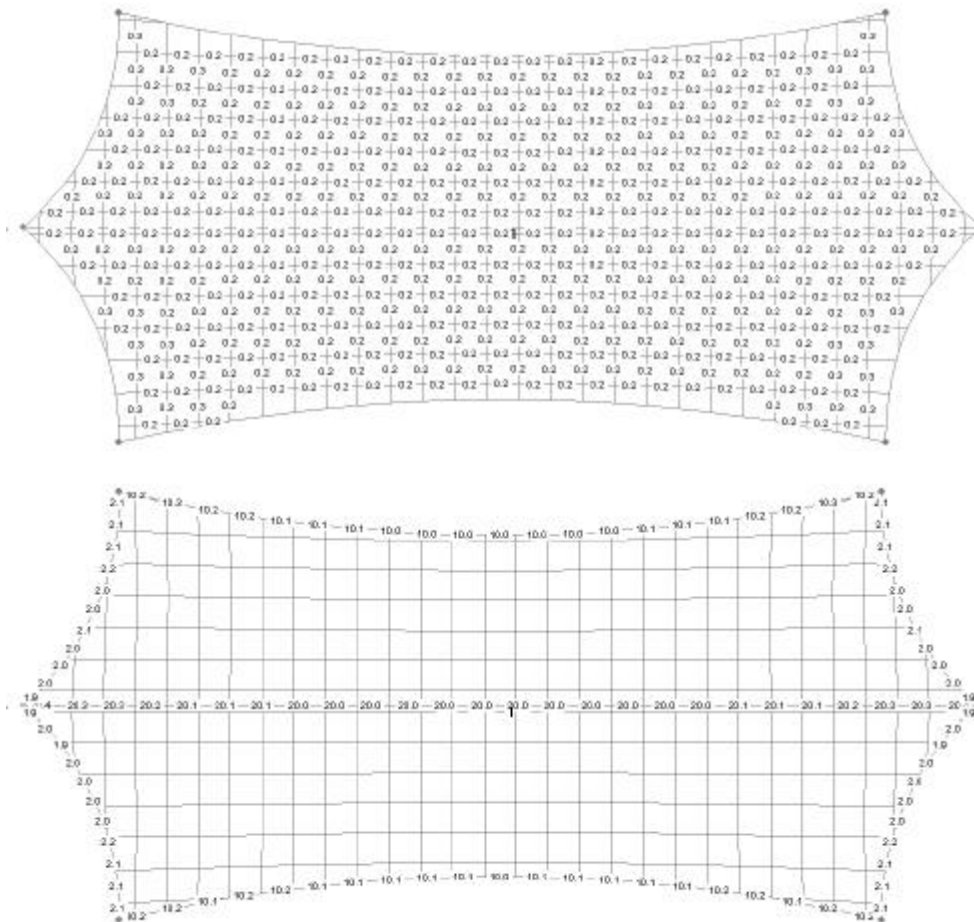


**Figuur 12 :** ont-dubbeling onderkabel

Uiteindelijk kwamen we tot de volgende resultaten en waren de randvoorwaarden voor de correctiesendeintegratievandespierengekend.

Voordeevenwichtspositie  $\alpha = 45^\circ$  waren uiteraard geen correcties nodig.

EASY heeft hier een optimale vorm bepaald als evenwicht tussen de ingestelde voorspanning en de kracht die aan de randkabels werden opgelegd. De domeen vormde een goed resultaat voor de volledige ontplooiing te bekomen, waarbij de spanningen uniform verdeeld werden (0.2 kN/10cm).

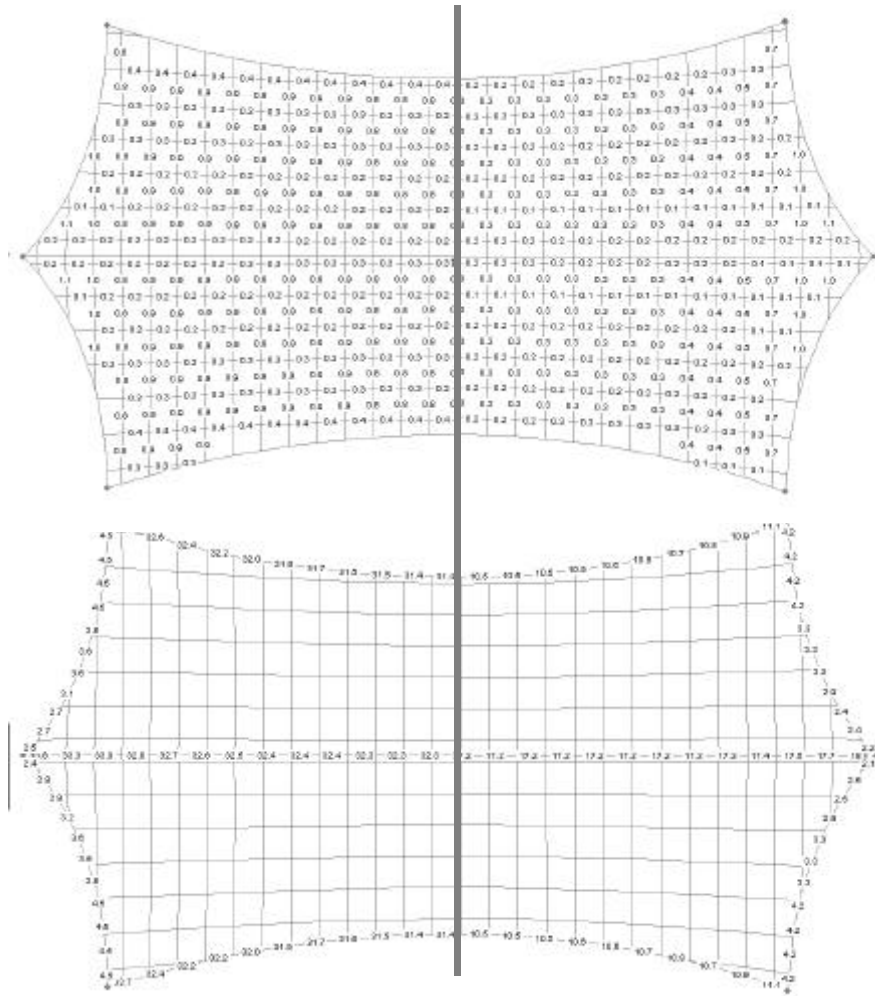


37

Figuur 13 : spanningsverdeling (boven) en krachten in de randkabels (onder) voor  $\alpha = 45^\circ$ .

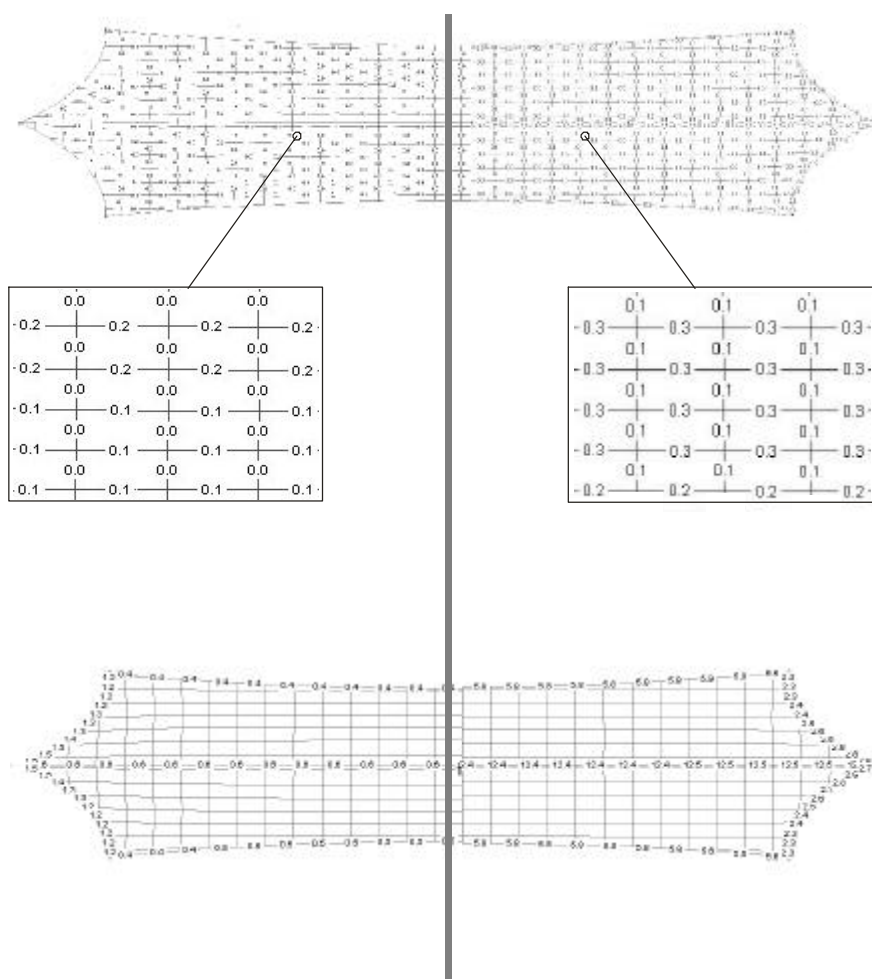
Indemeestuitgeschovenconfiguratie ( $\alpha = 30^\circ$ ) moestende kabels 10mmgelostwordenom despanningenvoldoende tereduceren. Grotere correctieshadden slechtstot gevolg dathet zeil instabiliteiten vertoonde in de lengterichting. Ze droegen bovendien niet bij tot een significante reductievandespanning indedwarsrichting.Merk ook opdatdoordezeingrepen de krachten in de onderkabels teruggebracht worden tot een derde van hun oorspronkelijke waarde.Ditzalvangrootbelang blijkenbijhetdimensioneren vandespiereen.

38



Figuur 14 : spanningsverdeling (boven) en krachten in de randkabels (onder) voor  $\alpha = 30^\circ$ .

Bij het toeschuiven van het dak tot het andere uiterste ( $\alpha = 70^\circ$ ) moesten de onderkabels elk 5mm aangetrokken worden om het zeil terug te stabiliseren en dus opnieuw overal trekspanningen (positieve waarden) te introduceren. Correcties groter dan deze waarden hadden weinig of geen effect.



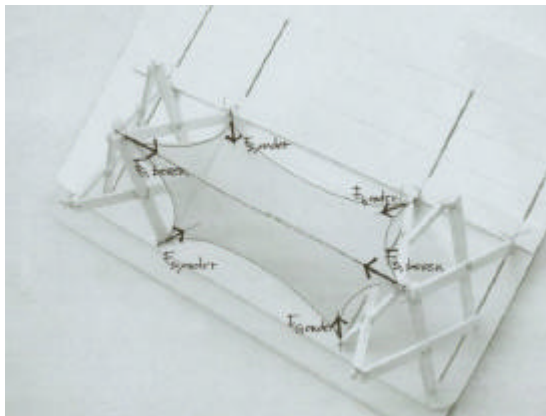
Figuur 15 : spanningsverdeling (boven) en krachten in de randkabels (onder) voor  $\alpha = 70^\circ$ .

De range van correcties loopt dus van -10mm (of 10mm lossen) tot +5mm (of 5mm aantrekken) en vergt dus een totale lengteverandering van de onderkabels van 15mm.

Merk op dat de meest kritische zones, daar waar de corrigerende ingrepen het minste effect hadden, op de hoeken van het zeil liggen. Als we teruggaan naar de evenwichtspositie zien we dat op dezelfde plaats ook hier afwijkingen waren van de volledig uniforme verdeling van de spanning (0,3kN/10cm in plaats van 0,2kN/10cm). In de praktijk hopen we dit probleem op te lossen door de uitwerking van de hoeken, waarbij een deel van het zeil weggesneden wordt om de verbinding tussen de verschillende kabels mogelijk te maken. (Zie Hoofdstuk 'Knippen...lassen')

Samenvattend halen we dus volgende gegevens uit de simulaties:

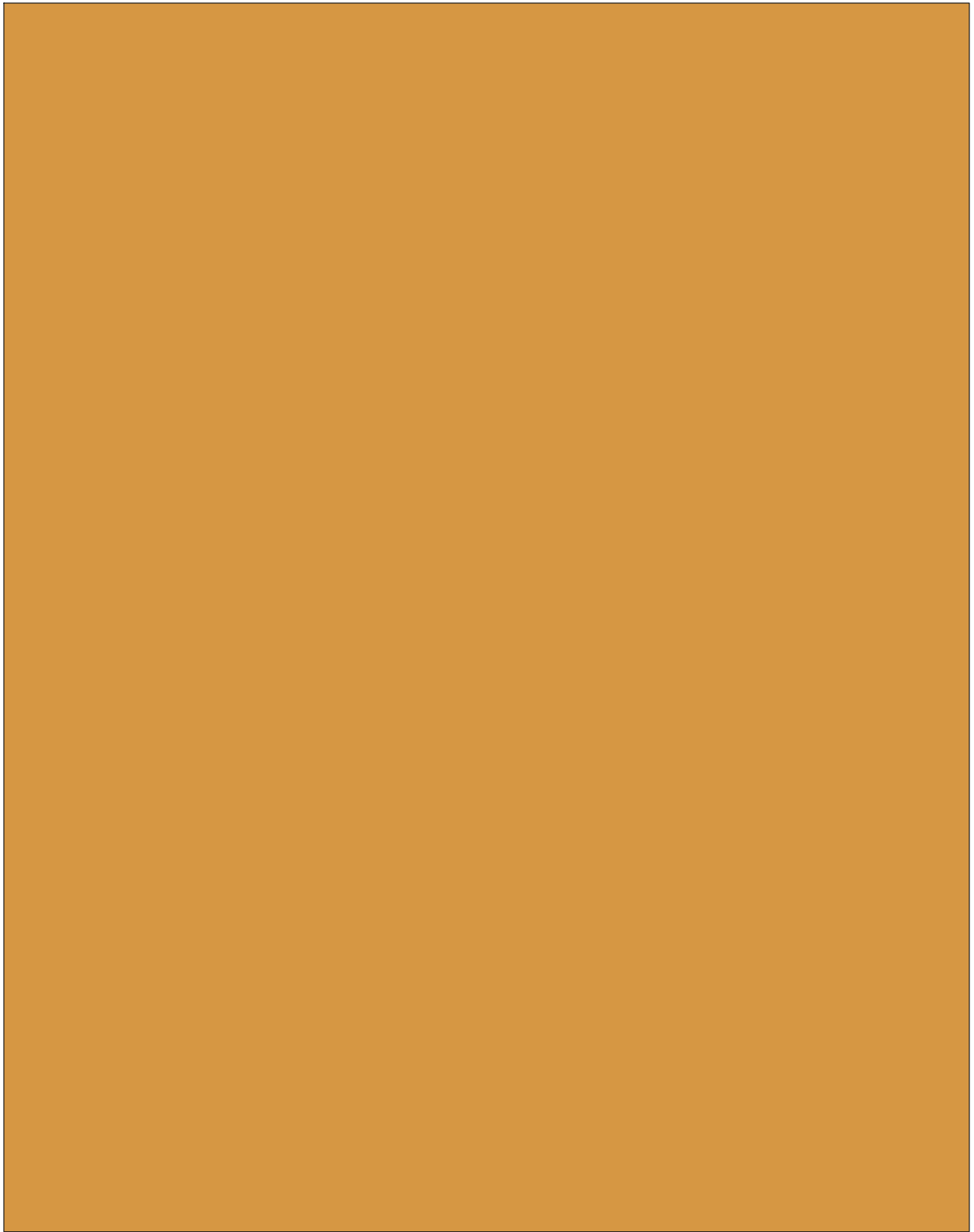
$\alpha$	$L_{\text{corr}}$	$F_{\text{s,onder}}$	$F_{\text{s,boven}}$
30°	+ 10 mm	12,8 kN	19,3 kN
45°	0	11,1 kN	22,9 kN
70°	-5 mm	6,4 kN	17,6 kN



Figuur 16 : definitie  $F_{\text{s,boven}}$  en  $F_{\text{s,onder}}$



## **Correcties**



We hebben eerder al aangehaald dat artificiële persluchtspiere omwille van hun 'levend' karakter een verantwoorde keuze waren voor de creatie van een 'organisme': een bewegende structuur die op een intelligente manier kan interageren met zijn omgeving.

Bovendien zijn ze de verderzetting van een concept van lichtheid, vervat in de zeilen en het driedimensionale geraamte van de scharen.

Om de corrigerende mogelijkheden van de geplooid variant van deze spieren (Pleated Pneumatic Artificial Muscle, PPAM, zie Fig. 17) juist te kunnen inschatten, overlopen we kort hun belangrijkste eigenschappen.



**Figuur 17:** Nieuw (links, 1 tot 3) en oud (rechts) design van de PPAM ontwikkeld aan de VUB als lichtgewicht actuatoren voor robotica doeleinden.

Aan de basis van het ontwerp ligt een ingenieus principe waarbij een cilindrisch membraan wordt samengepakt in plooiën volgens de lengte-as. Bij verhoging van de interne gasdruk kan dit membraan zonder wrijving ontvouwen en wordt de zijdelingse uitzetting van de spier niet gehinderd door materiaalspanningen zodat de contractie optimaal kan verlopen.

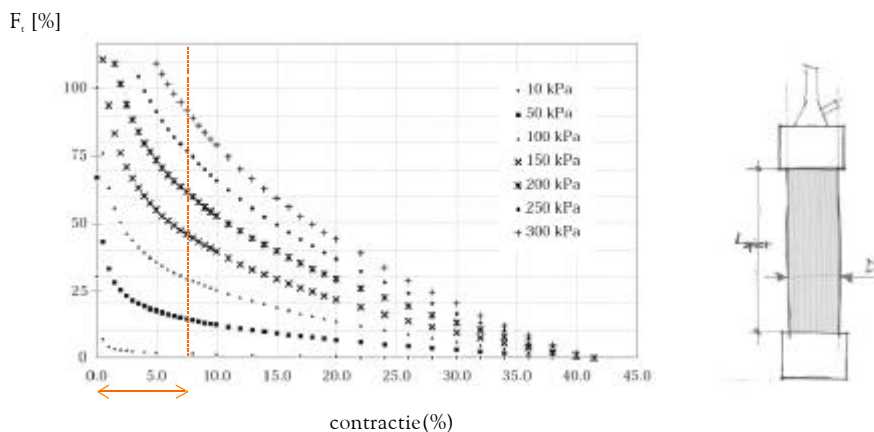
Voor de geometrie, de ontwikkelde kracht (in functie van de lengte) en de maximale verkorting vindt men dat zulk een balg: een sferoïde of pompoenachtige vorm krijgt naarmate hij samentrekt, de trekkracht naar oneindig neigt bij het onder druk zetten op volle lengte en de maximale contractie afhankelijk is van de initiële slankheid (voor het wiskundig limietgeval van een oneindig dunne balg kan ze oplopen tot 54,3%).

Elk van de karakteristieken van dit type van spier kan uitgedrukt worden als het product van een schaalfactor met een dimensieloze functie die enkel afhankelijk is van de samentrekkingen van de slankheid. Voor de kracht is dit bijvoorbeeld:

$$F_t = p l^2 \cdot f(\varepsilon, l/D)$$

met  $D$  de initiële diameter en  $l$  de lengte, en  $\varepsilon$  de dimensieloze contractie (gerefereerd naar  $l$ ). Deze trekkracht is dus evenredig met de opgelegde overdruk  $p$  en  $l^2$  is de schaalfactor.

Uitgaande van deze gegevens hebben we geprobeerd om de spier efficiëntie te integreren door hun mogelijkheden, zowel visueel als 'mechanisch', optimaal te benutten. De sterk dalende kracht (procentueel weergegeven t.o.v. de maximale kracht bij 0% verkorting) als functie van de contractiewaarde is een bepalende factor (zie Fig. 18). Voor een uitgebreid geteste PPAM met  $L = 10\text{ cm}$  en  $D = 2.5\text{ cm}$  (zie Fig. 17, rechts) is de 100% waarde 3 kN.

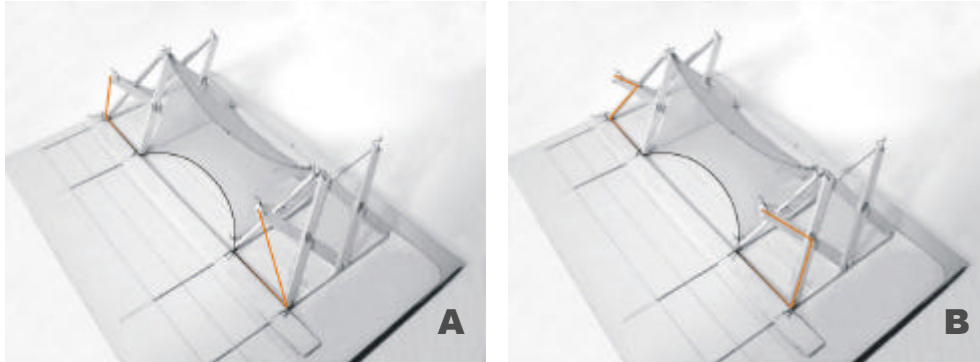


**Figuur 18** : kracht/contractiecurve voor PPAM voor variabele  $p$

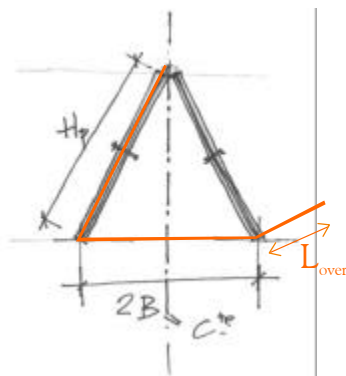
Omdat we slechts zeer kleine correcties nodig hadden (een totale slag van 15mm) leek het plaatsenvan de spieren op de hoeken van het zeil (als verbinding met de draagconstructie) een eenvoudige oplossing. In deze configuratie worden ze echter zeer zwaar belast omdat ze continu de volledige voorspanning moeten dragen. De verkorting zou bovendien nooit meer dan enkele procenten van de volledige lengte bedragen (7% voor een spier van 21cm) en dus altijd in het moeilijk te controleren begininterval van het werkingsgebied van de spier liggen (zie oranje interval Fig. 18), terwijl de expressieve opbolling volledig verloren gaat.

Deze werkwijze gaf dus in alle opzichten slechte resultaten en was ze op het vlak van de veiligheid totaal onverantwoord. Door het falen van een spier zou het zeil immers volledig loskomen tot instabiliteit van de constructie leiden.

Om de correcties van de voorspanning los te koppelen en de grote krachten in de spier te vermijden besloten we de kabels naar de schaarstructuur af te leiden om zed an opeenzodanige manier te manipuleren dat ze ter hoogte van de aansluiting met de zeilen toch nog de juiste slagen (= verkortingen of verlengingen) zouden leveren. We probeerden daarbij de gevolgen van de beweging van de scharen te gebruiken en via de volgende extremen (zie Fig. 19) kwamen we tot een eerste principe.



**Figuur 19 :** De twee extremen: een sterk variërende (A) en een constante (B) lengte tijdens de ontplooiing.



**Figuur 20 :** definitie  $L_{over}$

$$L_{over,A} = L_{kabel} - 2 \cdot B - H_p$$

$$= L_{kabel} - 2 \cdot B - L \cdot \sin \alpha$$

$$L_{over,B} = L_{kabel} - 2 \cdot B - 2 \cdot \frac{L}{2}$$

$$= L_{kabel} - 2 \cdot B - L$$

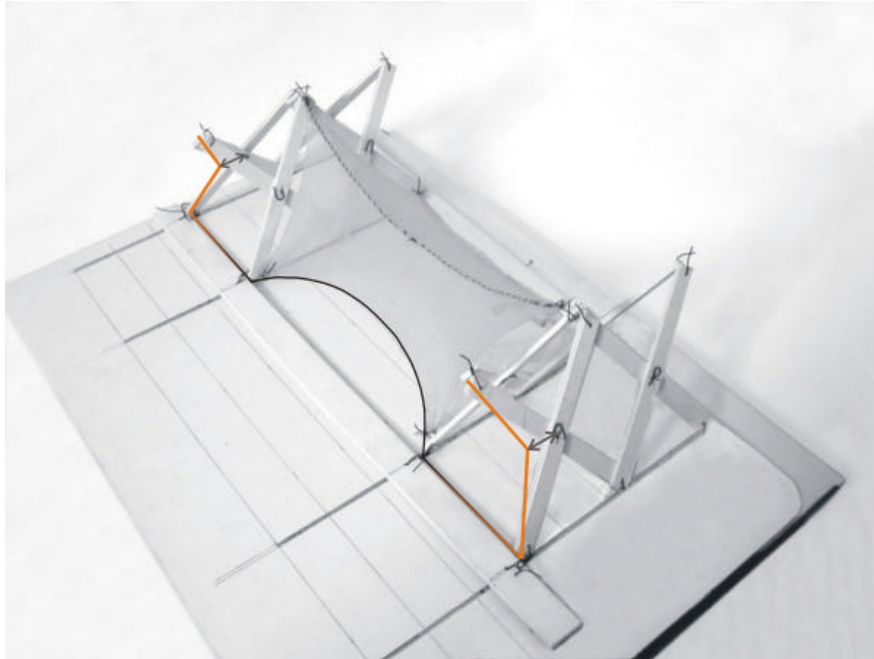
In het eerste geval (A) is  $L_{over}$  afhankelijk van de hoek  $\alpha$  geassocieerd aan de graad van ontplooiing. De beweging van de scharen zal in deze opstelling dus een range van correcties leveren van

$$\Delta L_{over} = L(\sin 70^\circ - \sin 30^\circ) = 41,8\text{cm}$$

Vergeleken met de resultaten uit EASY is deze 'slag' dus veel te groot.

Voor geval B is  $L_{over}$  natuurlijk constant gedurende de volledige ontplooiing. Alle elementen uit de formule zijn immers vaste waarden.

We zullen dus een evenwicht moeten zoeken tussen deze twee methodes. De spier zal hierbij gebruikt worden om de kabel in een hoek te trekken vanuit de middenscharnier.



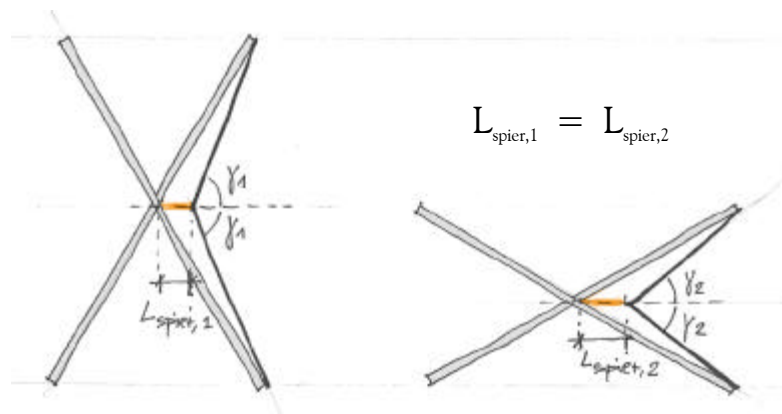
**Figuur 21** : eerste principe.

Een belangrijk gevolg van dergelijke werkwijze is dat de kleine lengteverandering van de kabel die nodig is voor de correcties (enkele millimeters), gerealiseerd wordt door een grote (re) lengteverandering van de spier (enkele centimeters) omdat deze niet meer in het verlengde van de kabel ligt. De correcties zullen dus nauwkeuriger verlopen en het potentieel van de spier zal beter benut worden.

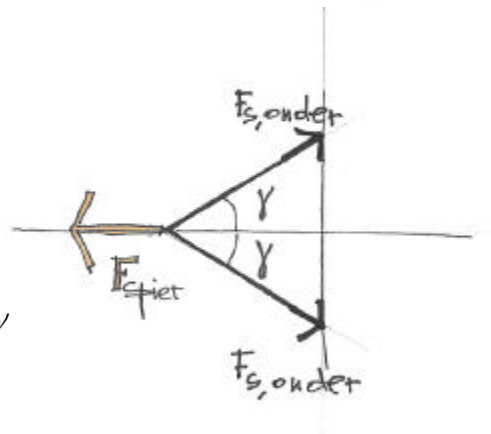
Merk op dat de lengte van de spier bovendien klein genoeg moet zijn (zie Fig. 22, boven). Hoe groter de spier, hoe groter de afwijking van de situatie in geval B (zie Fig. 19), hoe groter de verkorting die ze moet genereren om de invloed van de beweging te beperken. Uit berekeningen bleek dat 10 cm een goede waarde was.

Vervolgens bekijken we de kracht die door de spier moet opgenomen worden.

Deze is afhankelijk van de hoek waarin de kabel trekt, zoals geïllustreerd in figuur 22 (onder). Hoe kleiner de hoek, hoe groter de kracht. In de meest uitgeschoven positie bleek dat een spier waarvan de lengte klein genoeg was om de invloed van de beweging voldoende te beperken ( $L_{\text{spier}} = 10\text{cm}$ ), niet meer volstond om deze kracht op te vangen.



$$L_{\text{spier},1} = L_{\text{spier},2}$$



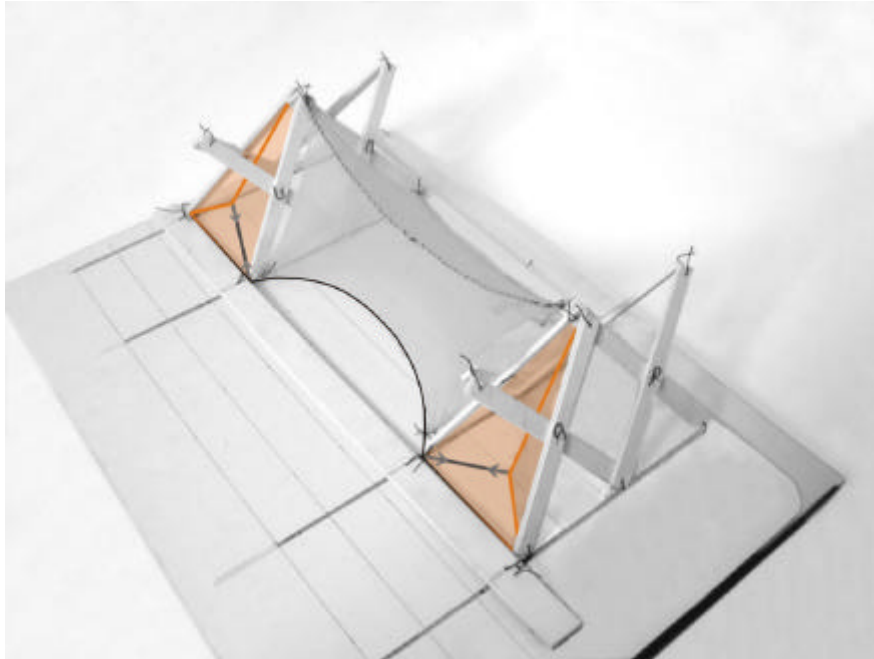
$$F_{\text{spier}} = 2 F_{\text{s,onder}} \cdot \cos \gamma$$

**Figuur 22 :** invloed van de beweging (boven) kracht in de spier (onder).

Het enige obstakel bij dit principe was dus eigenlijk de scherpe hoek waarin de kabel in sommige posities getrokken moest worden en de grote kracht die daardoor in de spier terecht kwam.

Als we dus doorheen de beweging van de schare een vast punt (= bevestigingspunt voor de spier) konden vinden dat op een min of meer constante afstand van een vaste lengte lag (langs waar dus de kabel kon lopen) en als deze lengte bovendien groot genoeg was (zodat de hoek in de kabel niet te scherp werd), dan was dit probleem opgelost.

Uit deze redenering ontstond het tweede principe (zie Fig. 23).

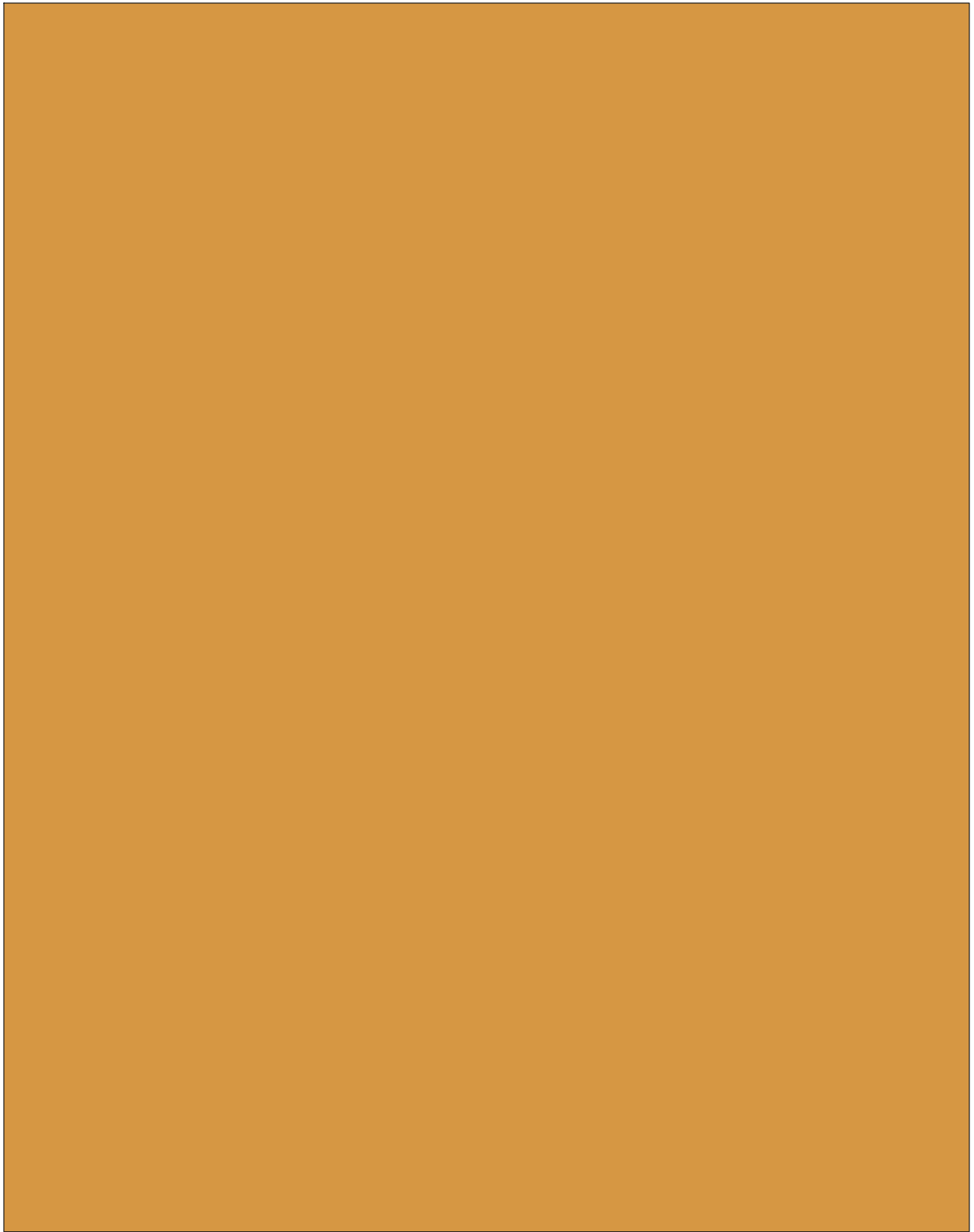


**Figuur 23:** tweede principe.

Het punt A blijft duidelijk op een constante afstand van het tegenoverliggende scharbeen en dit scharbeen heeft uiteraard een vastelengte.  
Een bijkomend voordeel is dat de middenscharniert niet meer belast hoeft te worden.  
Deze voorwaarde hadden we immers al gesteld bij de bepaling van de bevestigingspunten voor het zeil (zie hoofdstuk 'Basismodule')



**Spiereu**  
**dimensionering**



« The function of muscle is to pull and not to push, except in the case of the genitals and the tongue... »

Leonardo da Vinci

Eerst en vooral een belangrijke opmerking wat betreft het 'lossen' van de kabels. De spier kan deze correctie enkel genereren vertrekkende van een reeds samengetrokken toestand : ze wordt immers nooit langer dan haar initiële lengte.

De middenpositie van het membraan komt dus niet overeen met een onbelaste spier. Integendeel, ze zal hier een zodanige opbolling moeten vertonen zodat ten opzichte van deze situatie nog voldoende 'gelost' of bijgetrokken kan worden.

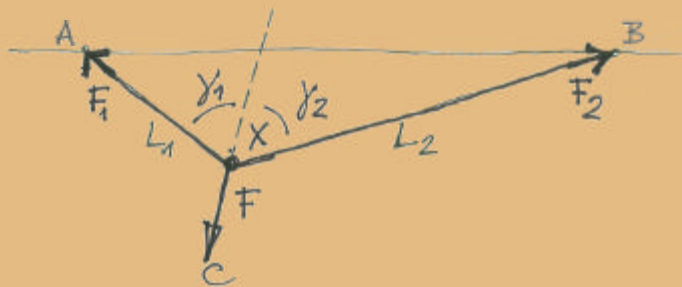
Daarom beschouwen we vanaf nu de meest open geschoven configuratie van het dak ( $\alpha = 30^\circ$ , daar waar de spier de grootste 'verlenging' moet genereren) als het vertrekpunt voor de correcties. De spier is in deze positie ophaar volle lengte en zal van hier uit enkel nog verkorten.

Despieren zijn aan hun eindstukken voorzien van een katrol om te trekken de te corrigeren kabel in een hoek. De krachten in de spieren en de nodige slageng zijn functie van de correcties en de reactiekrachten bekomen uit de simulaties. Hun relatie wordt bepaald door de evenwichtspositie van de katrol (zie Box 4).

51

#### Box 4 : Evenwichtspositie van de katrol.

In het algemeen hebben we de volgende situatie (A, B en C zijn vastpunten):



De positie van de katrol X ligt op een ellips met a en b als brandpunten (want  $L_1 + L_2 = c^w$ ). Dit geeft een verband tussen de x- en y-coördinaten van X.

De evenwichtspositie van de katrol (X) wordt gevonden waar de vectoriële som van de spankrachten in de richting van  $\vec{XC}$  ligt en het krachtenevenwicht geldt.

$$(\vec{F}_1 + \vec{F}_2) \times \vec{XC} = \vec{0}$$

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F} = \vec{0}$$



Een katrol kent (in theorie) geen wrijvingen 'zet' zich steeds zodanig dat :

- de kabelkrachten links en rechts van de katrol dezelfde zijn ( $F_1 = F_2$ ),
- de hoek tussen de kabel en de richting van de kracht in de katrol aan weerskanten gelijk blijft ( $\gamma_1 = \gamma_2$ ).

Dit geeft een niet-lineaire vergelijking in x (of y) waarvan het nulpunt gezocht moet worden. De andere coördinaat van X is dan eenvoudig te vinden via het elliptisch verband ( $px^2 + qy^2 = 1$ ).

Let wel: de evenwichtspunten van de katrol zullen per positie  $\alpha$  op een andere ellips liggendaar  $L = L_1 + L_2 = L_0 + \text{corr}(\alpha)$ , met corr de nodige correctie (afh. van  $\alpha$ ).

Eens de coördinaten van X gekend, vindt men  $|\vec{XC}|$  (de lengte van de spier) en de hoek  $\gamma$ .

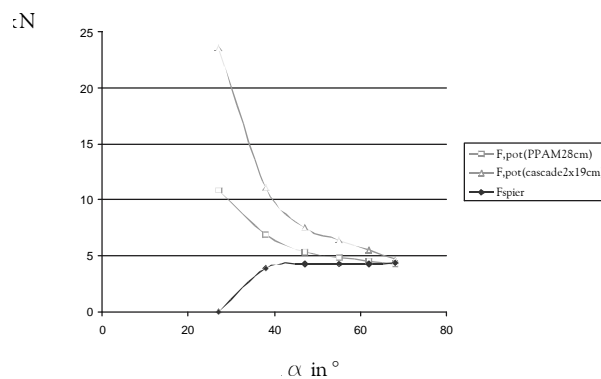
$$\gamma = \text{Bg} \cos \left( \frac{(A - X) \cdot (X - B)}{\|A - X\| \|X - B\|} \right) \quad \text{met } A = (a_x, a_y), B = (b_x, b_y) \dots$$

Uit de volgende betrekking haalt men dan  $F_{\text{spier}}$ , het deel van de voorspanning dataan de spier wordt doorgegeven.

$$F_{\text{spier}} = 2 \cdot F_{\text{spanner}} \cdot \cos \gamma$$

In ons systeem wordt een spier gedimensioneerd in functie van de meest nadelige combinatie van krachtenverkorting. Dit wil zeggen dat ze berekend wordt voor de depositiewaardeverschil tussen de kracht die de spier maximaal kan leveren bij de vereiste verkorting ( $F_{t,pot}$ ), gerelateerd aan de correctie in diepositie, en de component van de voorspankracht ( $F_{spier}$ ) in de spier (zie Box 4), minimaal is.

Voor de beschouwdere range van ontplooiing is de meest toegeschoven positie ( $\alpha = 70^\circ$ ) de nadeligste en dus bepalend voor de lengte van de spier (zie Fig. 24).



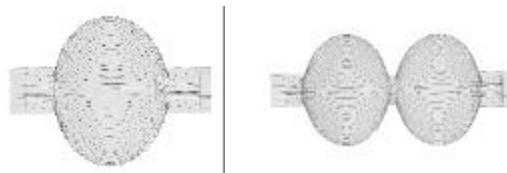
Figuur 24: spierefficiëntie.

53

De berekeningen werden eerst uitgevoerd voor een traditionele 'enkele' PPAM. De bekomen lengte bedroeg 28 cm en in de meest samengetrokken toestand (voor de nodige correctie) had de spier een diameter van ongeveer 22,4 cm.

Het was onmogelijk dergelijk volume op die plaats in de structuur te integreren. Bovendien werd de spier in alle andere configuraties inefficiënt gebruikt. Daarom besloten we over te stappen op een aaneenschakeling van twee kortere, in serie geplaatste spieren die samen dezelfde verkorting genereren als één enkele van 28 cm, maar met een beter benut krachtenpotentieel (zie Fig. 25).

Omdat een eenvoudige aaneenschakeling van de eindstukken in het midden te vermijden de totale lengte van het systeem te beperken, werd het 'cascade'-principe geïntroduceerd voor de PPAM. Door middel van een centralering wordt de opbolling van een lange spier opgedeeld in meerdere kleine delen. Zo kunnen voor redelijk kleine krachten aanzienlijk slaglagen worden bereikt.



Figuur 25: cascadeprincipe.

De berekeningsprocedure verliep via een iteratief proces.  
 We maakten een eerste schatting voor de lengte van de spier.

$$l_{spier} = 18 \text{ cm}$$

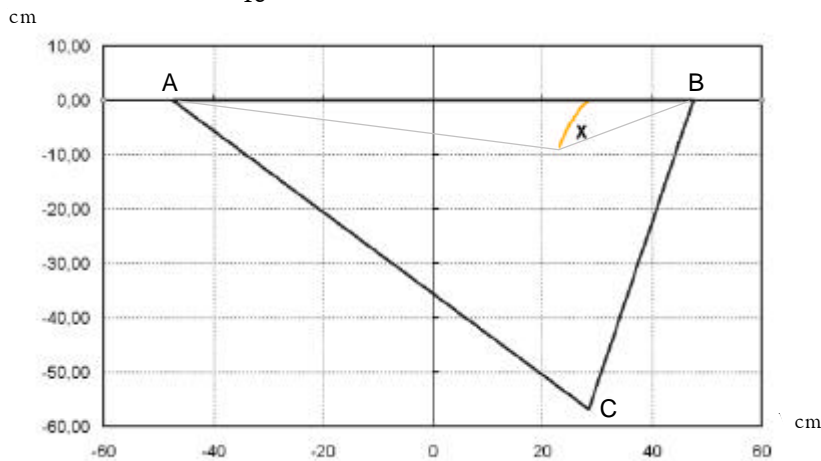
De maximale kracht van de spier (d.i. de kracht bij 0% contractie) in de praktijk werd geschat met een vuistregel, afgeleid uit de goed gekende eigenschappen van een uitvoerig geteste PPAM ( $L = 10 \text{ cm}$ ,  $D = 2,5 \text{ cm}$ , 44 plooien,  $F_{t,max} = 3 \text{ kN}$ ).

$$\begin{aligned} F_{t,max} &= 3 \text{ kN} \cdot \frac{l_{spier}^2}{10^2} \quad \text{met } l_{spier} \text{ in cm} \\ &= 0,03 \cdot 18^2 \text{ kN} \\ &= 9,72 \text{ kN} \end{aligned}$$

54

Op basis van het principe uitgelegd in Box 4, bekwamen we het verloop van de evenwichtspositie van de katrol doorheen de beweging (zie Fig. 26) en daaruit volgde de nodige verkorting van de spier (= 8,31 cm, dus 4,16 cm per deel) in functie van de via EASY berekende correcties. In verhouding tot de lengte geeft dit:

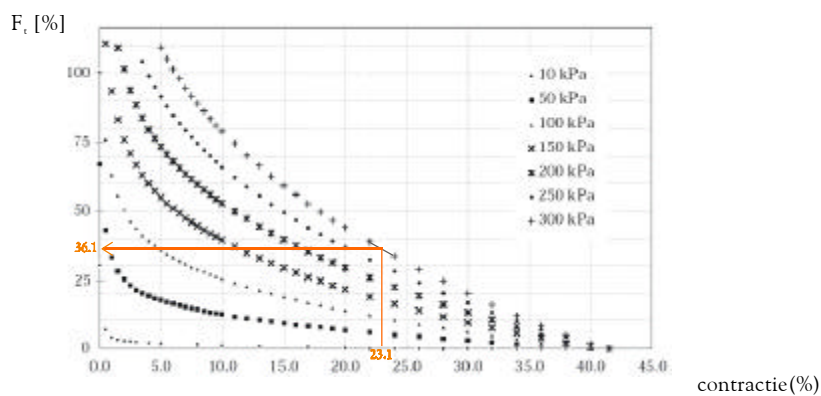
$$\varepsilon = \frac{4,16}{18} = 23,1\%$$



Figuur 26: verloop van de evenwichtspositie van de katrol.

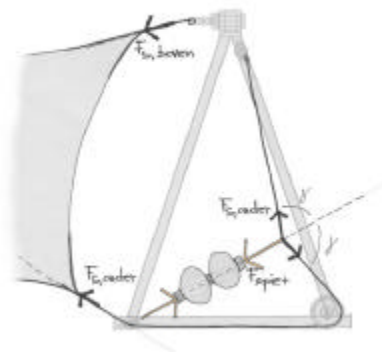
Op de grafiek (Fig. 27) lezen we de fractie van de maximale kracht  $F_{t,max}$  van de spier af die bij deze procentuele verkorting ( $\varepsilon$ ) kan geleverd worden.

$$\begin{aligned} F_{t,pot} &= 36,1\% \cdot F_{t,max} \\ &= 0,361 \cdot 9,72 \text{ kN} \\ &= 3,51 \text{ kN} \end{aligned}$$



**Figuur 27** : bepaling van  $F_{t,av}$  voor  $l_{spier} = 18\text{cm}$  en  $\varepsilon = 23,1\%$ .

We vergelijken nu  $F_{t,pot}$  met  $F_{spier}$  (= de component van de voorspanning in de spier, zie Fig. 28).



**Figuur 28** : krachterevenwicht.

Op  $F_{spier}$  pasten we 2 veiligheidscoëfficiënten toe. Enerzijds  $V_1 = 1,25$  om de onzekerheid van de resultaten berekend door Easy-herinner Box 3 - te compenseren en anderzijds  $V_2 = 1,25$  voor de afwijkingen in de reële constructie ten opzichte van het gesimuleerd theoretisch model.

Zocreëerden wevoordewerkingvandespiereenveiligheidsmarge.

$$F_{spier} = 2 \cdot F_{sonder} \cdot (V_1 \cdot V_2) \cdot \cos \gamma$$

$$F_{spier} = 2 \cdot 6,4 \text{ kN} \cdot (1,25 \cdot 1,25) \cdot \cos(76^\circ, 776)$$

$$F_{spier} = 4,39 \text{ kN}$$

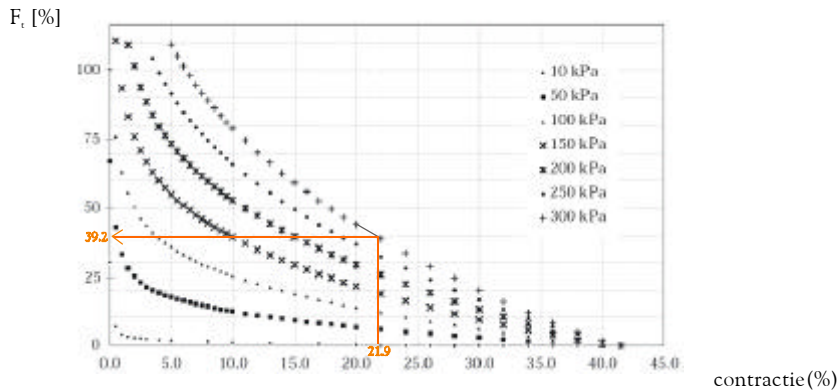
We zien dus dat  $F_{spier} > F_{tpot}$ . Een cascade met tweespieren van 18 cm kands niet voldoende krachtontwikkelen... Volgende iteratie:

$$l_{spier} = 19 \text{ cm} : \quad F_{t, \max} = 0,03 \cdot l_{spier}^2 \text{ kN} \quad \varepsilon = \frac{4,16}{19} = 21,9\%$$

$$= 0,03 \cdot 19^2 \text{ kN}$$

$$= 10,83 \text{ kN}$$

56



**Figuur 29** : bepaling van  $F_{t, \max}$  voor  $l_{spier} = 19 \text{ cm}$  en  $\varepsilon = 21,9\%$ .

Opdegrafiek (Fig. 29) lezen wedandefractie van demaximale kracht  $F_{t, \max}$  vandespierafdie bijdeze procentuele verkorting ( $\varepsilon$ ) kangeleverd worden.

$$F_{tpot} = 39,2\% \cdot F_{t, \max}$$

$$= 0,392 \cdot 10,83 \text{ kN}$$

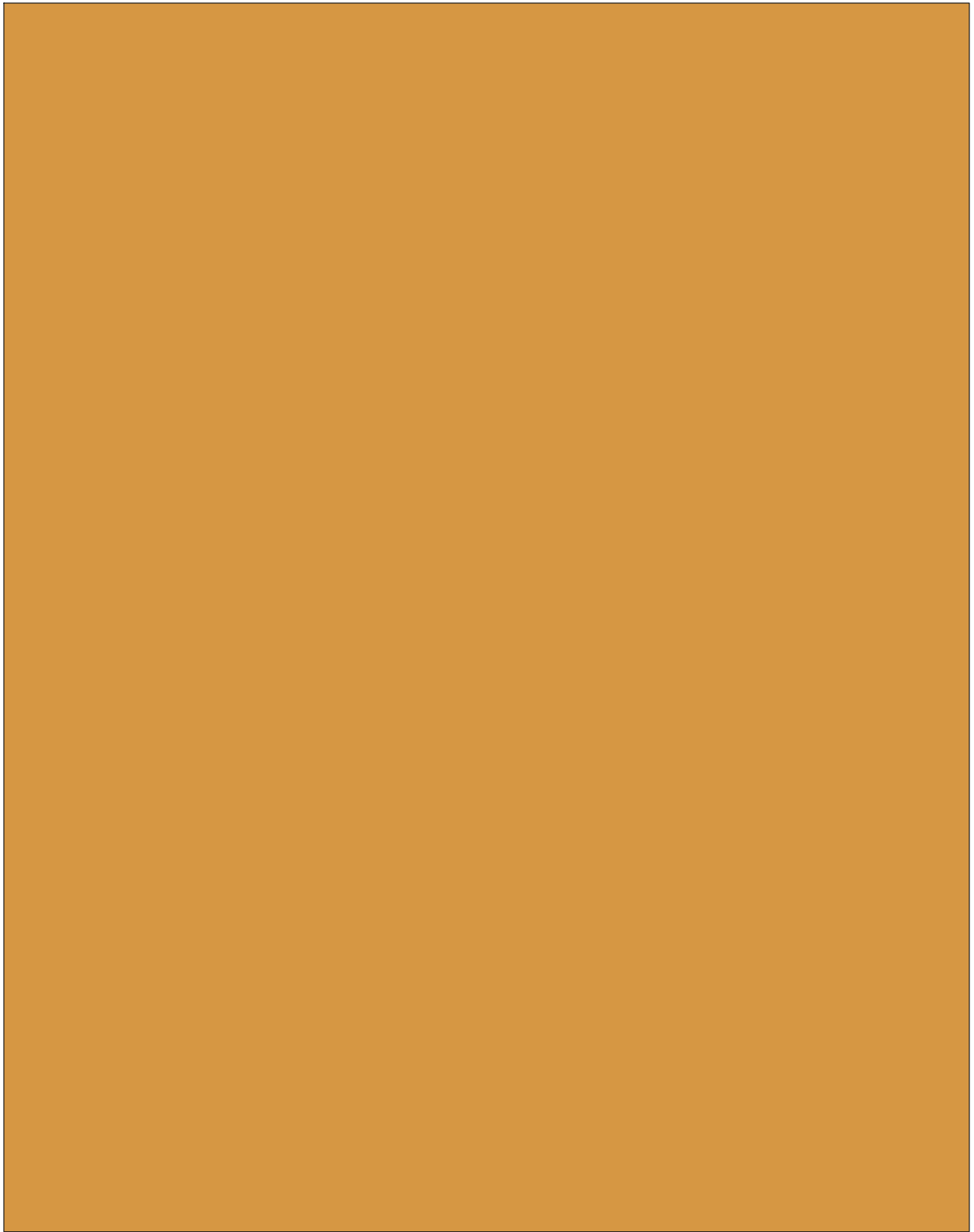
$$= 4,25 \text{ kN}$$

Als we de controle uitvoeren, zien we dat de eis  $F_{spier} < F_{tpot}$  net niet voldaan is... maar door de grote veiligheidsmarge die we zelf voorzien hadden, werd dit resultaat voldoende geacht.

Er worden dus cascade spieren met twee delen van 19 cm gebruikt.



**Van  
'virtual reality'  
naar realiteit**



Op dit punt is de theoretische doelstelling gerealiseerd.

Er werd een voldoende groot interval vastgelegd waarbinnen het dak zich openesthetische en functioneel verantwoordemaniër kon ontplooiën en we hebben een principe bepaald voor de uitvoering van de nodige correcties met behulp van de Pleated Pneumatic Artificial Muscle, zodat de spanningen in het membraan doorheen de beweging binnenaanvaardbare grenzen bleven.

Door het onconventioneel gebruik van de berekeningsprogramma's en de eerste toepassing van het cascadeprincipe op het gebied van de PPAM waren er nog heel wat onzekerheden en zonder een experimentele verificatie van de resultaten konden we dus weinig zeggen over de reële waarde van de correcties.

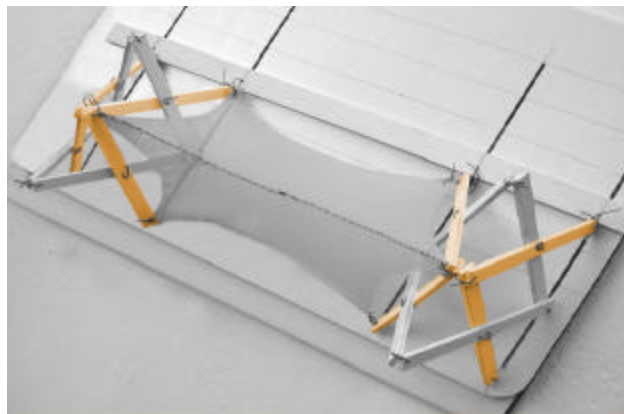
De knopen van een schaarsysteem zijn ingewikkeld elementen die dikwijls rond meer dan 1 as moeten draaien, zodat het dimensioneren en bouwen van een volledig operationeel prototype niethaalbaar leek.

Voor de controle van het principe was dit eigenlijk ook niet nodig.

Daarom zochten we naar een vereenvoudigd model. Doorheen de beweging herkenden we in de constructie een aaneenschakeling van starre driehoeken. Ze hebben als basis de vaste afstand tussen de rails en hun opstaande zijden komen overeen met twee snijdende schaarbenen uit verschillende vlakken (zie Fig. 30).

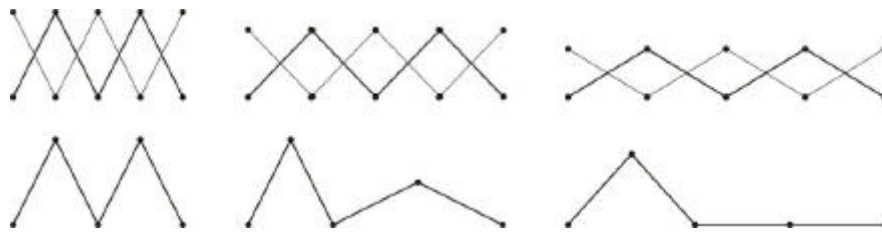
We hebben deze constante afstanden bovendien gebruikt bij de uitwerking van de correcties zodat de schaarstructuur gemakkelijk herleid kon worden tot de volgende 'strikjes'.

59



**Figuur 30** : de strikjes.

Zolang we voor de testen slechts 1 module beschouwden was zulk een systeem representatief voor de beweging van de scharen. Bij de aansluiting van meerdere modules beweegt het echter niet meer als een geheel, maar wordt het deel per deel - driehoek per driehoek - opengeklapt en gaat een belangrijke eigenschap van de scharen verloren (zie Fig. 31).



60

**Figuur 31** : scharbeweging.

In eerste instantie tekenden we een model op rails om de vloeiende ontplooiing van het dak zo goed mogelijk te benaderen. De maatregelen die nodig bleken om een vlotte en gecontroleerde positionering van deze structuur te garanderen waren echter te ingewikkeld (en dus te kostelijk) om binnen een beperkte termijn gerealiseerd te worden terwijl verschillende van de problemen die we daarbij moesten overwinnen eigenlijk nog maar weinig met het bewijzen van de werking van ons principe te maken hadden.

Uiteindelijk hebben we ook hier een oplossing gevonden door een discretisatie.

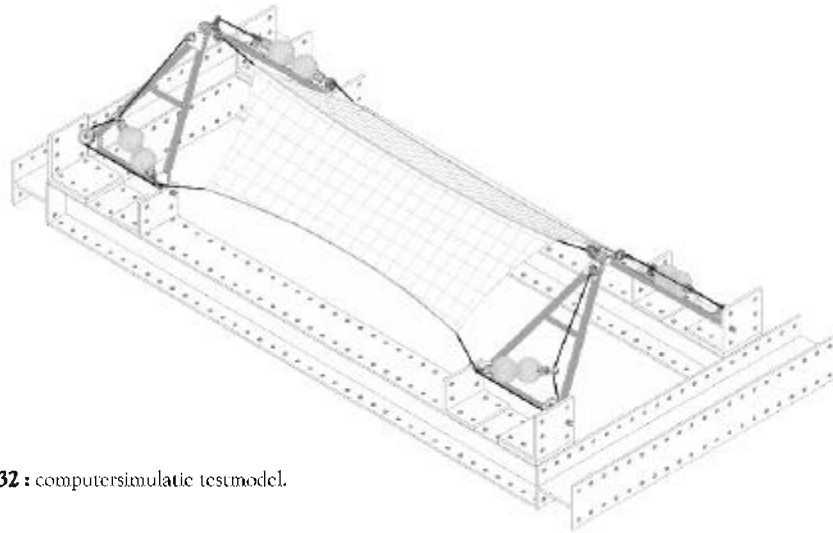
Met de Meccano als onderstel konden we immers de volledige range van ontplooiing doorlopen in stappen van 10 cm, een voldoende benadering.

Er werd een voorlopig ontwerp opgesteld waarvan we de onderdelen na overleg met de praktijkexperten van de bouwkunde en het atelier exact dimensioneerden in Robot van ROBOBAT.

We maakten daarbij de veronderstelling dat we elk strikje en de daarop werkende krachten konden opsplitsen en herleiden naar het vlak van één van de driehoeken (zie Fig. 34). De berekeningen werden uitgevoerd aan de hand van de Eurocode 3, een behoorlijk conservatieve methode die dus voldoende veilige resultaten moest leveren.

We hebben in deze fase voortdurend gezocht naar een evenwicht tussen het gebruik van standaardelementen (omdat die reeds voorhanden of makkelijk te verkrijgen waren) en een beperking van de complicaties bij de uitvoering. Standaardelementen (of toch diegenen waar wij over konden beschikken) hebben immers de vervelende gewoonte nogal groot te zijn en wij hadden spijt dat we niet te veel plaats overlieten. Despijten waren groter dan nodig door de veiligheid die we hadden ingebouwd, de langstemaat op de meccano was maar net voldoende voor de volledige 3-meter-module, de integratie van meetelementen...

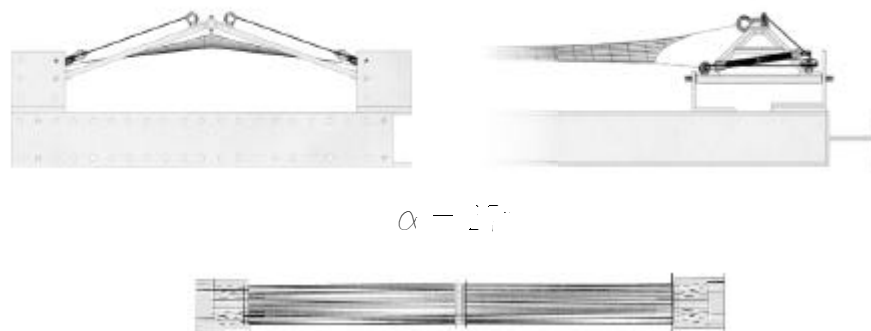
Naveeltussenstopzaghetafinaaltestmodel eruitalsvolgt:



61

**Figuur 32** : computersimulatie testmodel.

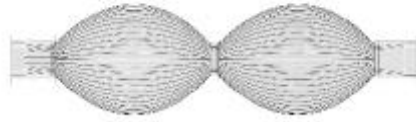
Op basis van dit model konden we een nauwkeurige schatting maken van de beweging, vertrekkende vanuit de meest opengeschoven positie met nulcontractie van de spier. Aan de hand van de positioneringsmogelijkheden van de Meccano (afstand tussen de boutgaten) definieerden we een aantal nieuwe tussenstappen (zie Fig 33).



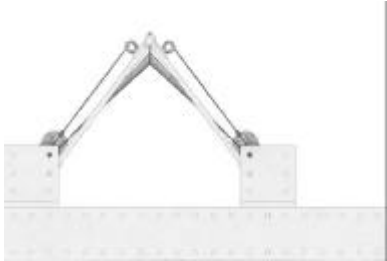
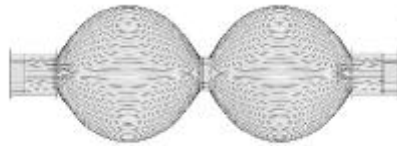
**Figuur 33** : computersimulatie beweging (vervolg zie volgende bladzijde).



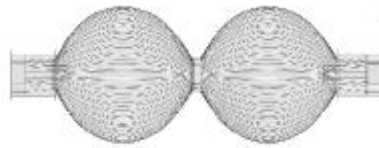
$\alpha = 38^\circ$



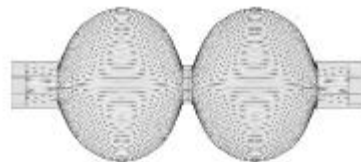
$\alpha = 47^\circ$



$\alpha = 55^\circ$

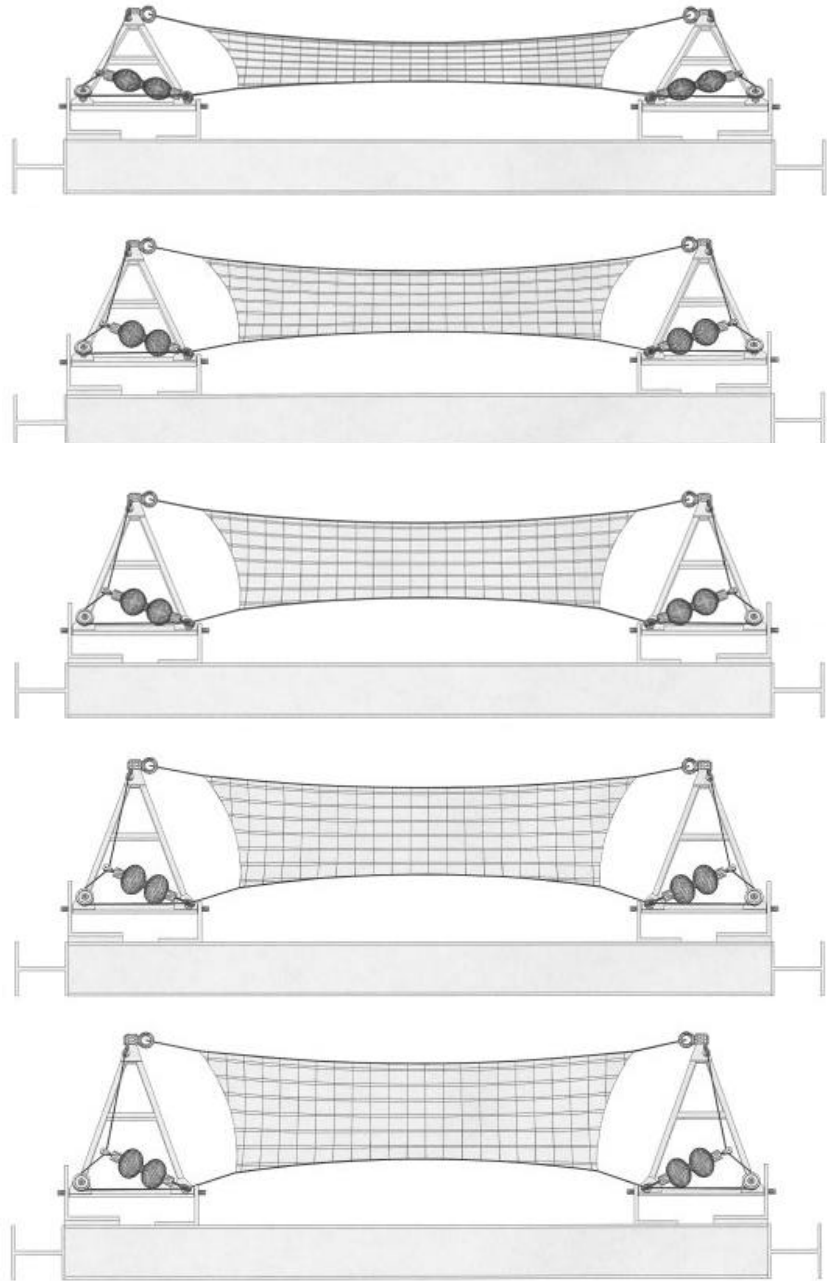


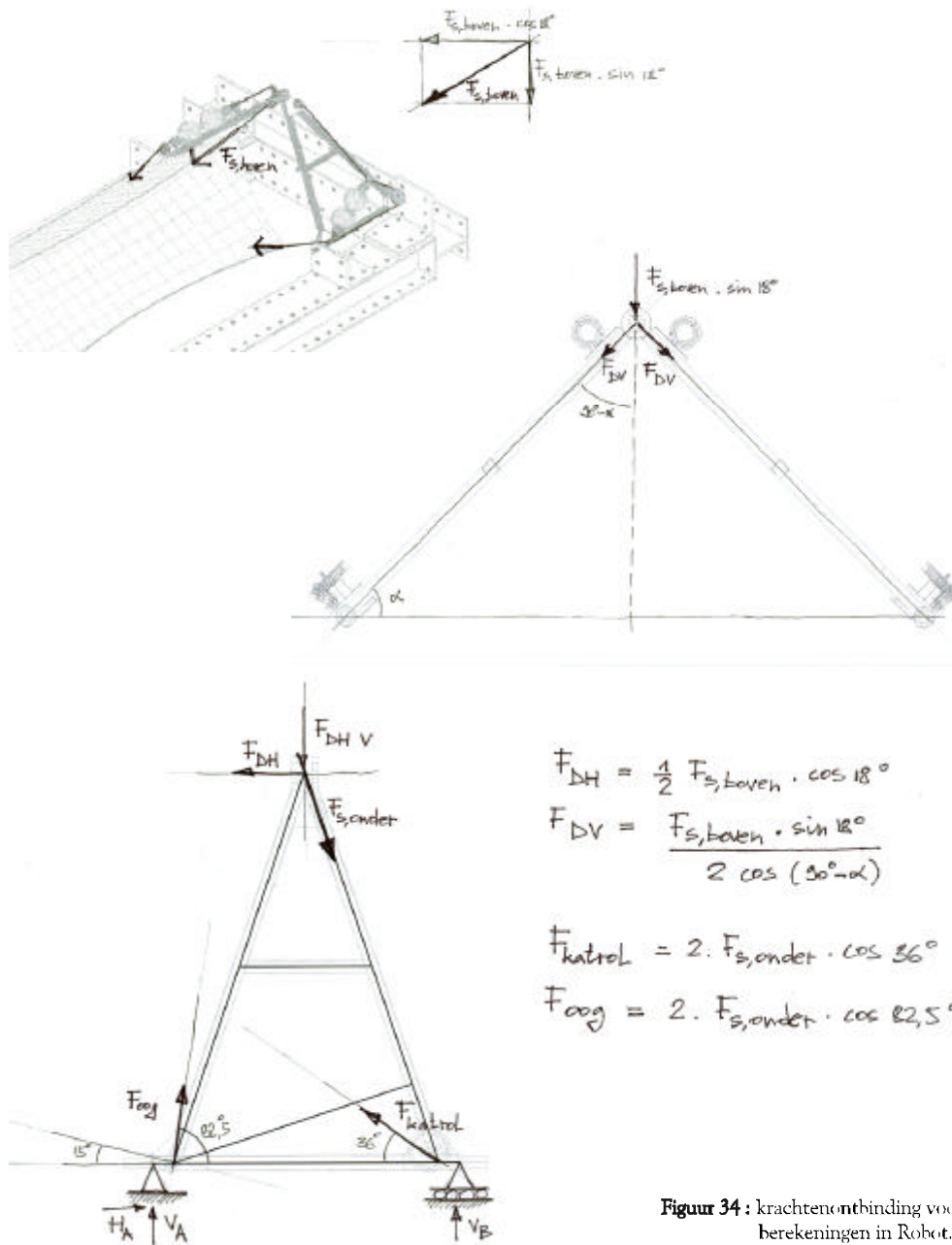
$\alpha = 62^\circ$



$\alpha = 68^\circ$



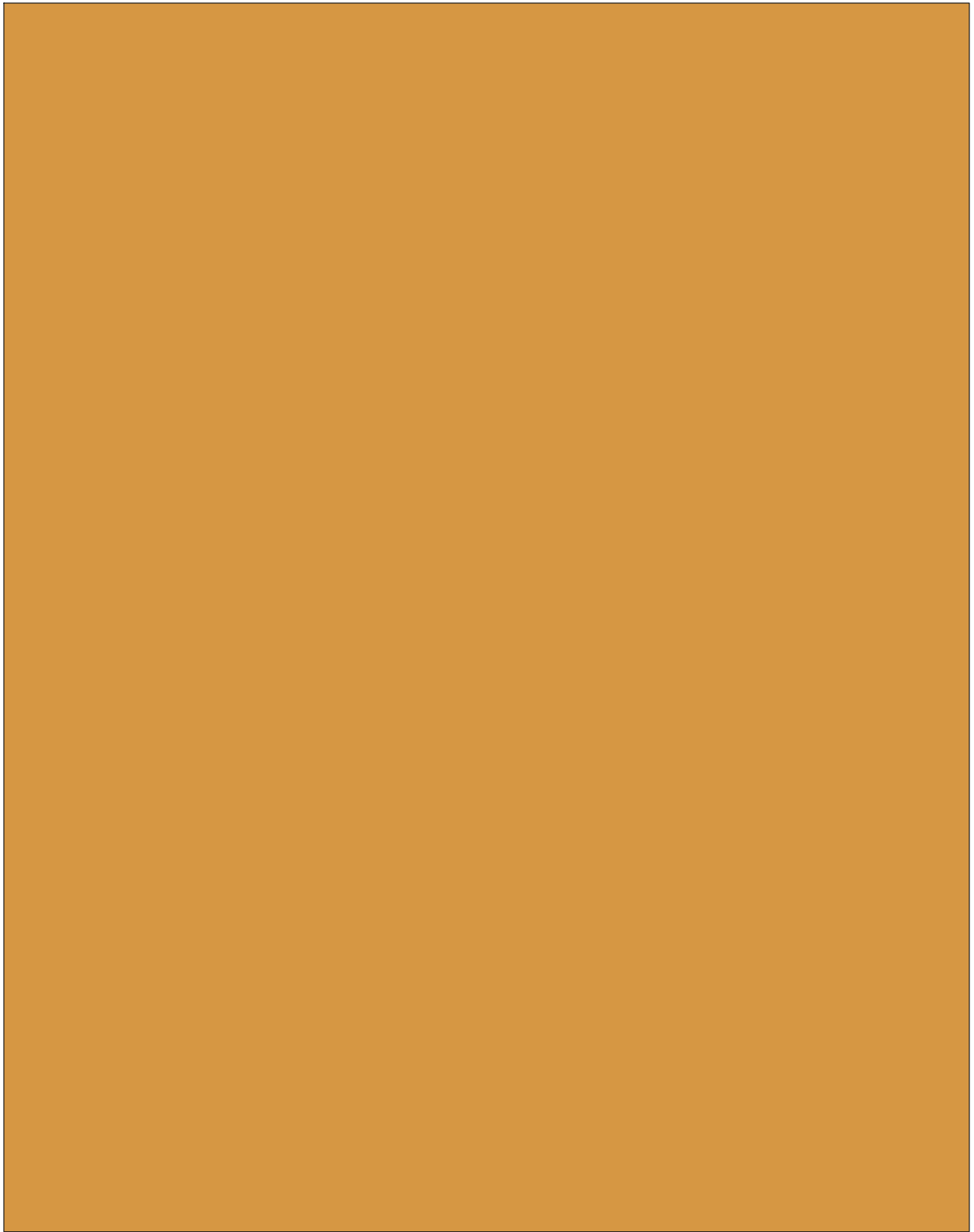




**Figuur 34:** krachtenontbinding voor berekeningen in Robot.



**Spiere**  
**productieproces**



De PPAM bestaat traditioneel uit een luchtdicht membraan versterkt met kevlarvezels en ingebed in aluminium eindstukken door middel van een snel uithardende thermoharder met hoge glasovergangstemperatuur. Voor de toepassing in dit werk besloten wij despijts echter uit een PVC gecoat polyester weefsel te vervaardigen, hetzelfde materiaal als dat van de zeilen. Frank Daerden had in zijn doctoraatsthesis aangetoond dat de eigenschappen van de geplooid trekbalg in theorie eenkelafhankelijk waren van de slankheid en de contractie, en dus niet van het gekozen materiaal op voorwaarde dat er geen te grote rekken optreden. (Herinner:  $F_i = \rho l^2 \cdot f(\epsilon, l/D)$ ). Bovendien was bij dit nieuwe membraan de versterking van polyestervezel mat reeds luchtdicht verpakt en konden we door de hoge wrijving tussen PVC en aluminium de brosse verlijming van de gladde kevlarvezels uit het originele model vermijden (zie Box 5). Op de interface tussen membraan en brosse thermoharder ontstonden immers spanningsconcentraties. De gekende productiemethode bleek echter niet geschikt voor het maken van grote spieren en zware zeker niet bedoeld voor de manipulatie van zulke stug materiaal. We bedachten een aangepast procédé en uiteindelijk verliep de fabricage als volgt.

Omdat de theoretische eigenschappen van de spier zodicht mogelijk te benaderen moethet aantal plooiën in het membraan voldoende groot zijn. Voor een spier van 10 cm lengte en een diameter van 2,5 cm, kreeg men reeds goede resultaten vanaf 44 plooiën. Rekening houdend met het verschil in grootte ten opzichte van dit model verhoogden we het aantal tot 50 (meer was door de beperkte manipuleerbaarheid van het materiaal niet mogelijk).

In de meest opgebolde positie heeft een spier een diameter die min of meer gelijk is aan zijn initiële lengte. De maximale omtrek bedraagt dus in ons geval  $\pi \cdot 19 = 59,7$  cm zodat we per spier een membraan van ongeveer 60 cm nodig hadden oftewel 1,2 cm per plooi.

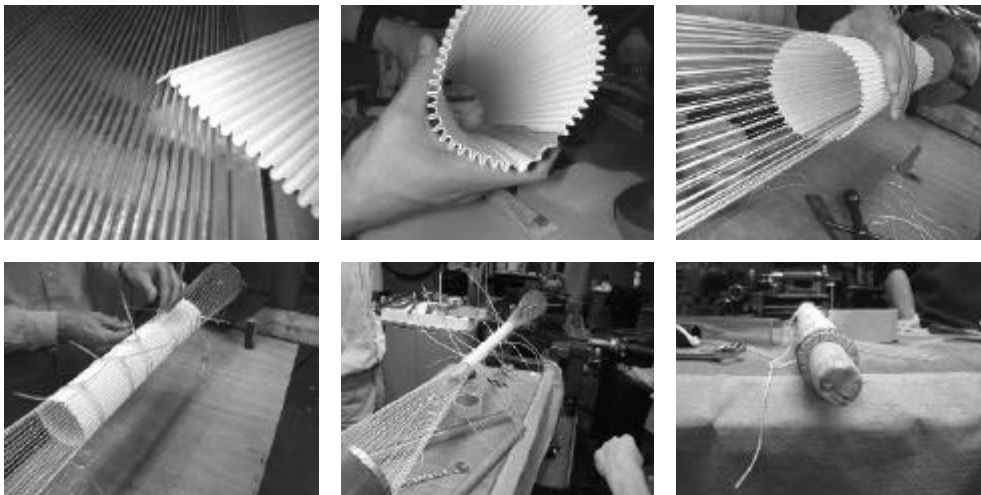
Deze plooiën moesten in het moeilijk vervormbare membraan, met dikte 0,5 mm, gefixeerd blijven. Geïnspireerd door de hulpstukken waarmee Frank Daerden de eerste prototypes fabriceerde, maakten we een mal met 52 (50+2) groefjes. Het membraan werd met een plamuurmes in de mal gedrukt bij 60°C in de oven gezet. Zo kon de PVC coating (met een glasovergangstemperatuur van 80°C) net voldoende verweken om de gewenste vorm in het membraan te fixeren zonder dat het beschadigd werd (zie Fig. 34).



**Figuur 34** : fixatie plooiën in PES/PVC folie.

Na dit thermomechanisch proces werd het membraan tot een koker aaneengezet door 2 plooiën (vandaar de 2 extra) te verlijmen. Om de luchtdichtheid van de naad te garanderen werd deze aan de binnenkant bijkomend afgedicht met een biaxiaal georiënteerde polypropyleenfilm met een drukgevoeliger rubberachtigelijm.

De diameter van deze geplooidecilinder werd vervolgens op het 'weefgetouw' gehalveerd tot 3,5 cm en kreeg zo zijn gewenste slankheid (zie Fig. 35).



**Figuur 35** : afdichting naad en halvering diameter op weefgetouw..

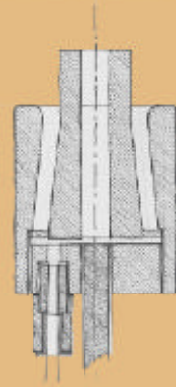
De materiaalkarakteristieken van PES/PVC folies worden samengevat in Tabel 2. De gebruikte folie in dit werk (702 PVDF van Ferrari) is van het type I, met een dikte van 0.5 mm.

PVC-COATED POLYESTER FABRIC PES/PVC					
Quality/type	I	II	II	IV	V
Total weight (g/m <sup>2</sup> )	700-800	900	1050	1300	1450
Tensile strength (N/5 cm), warp	3000	4200	5700	7300	9800
fill	2900	4000	5200	6300	8300
Tear resistance (N) (Trapezoidal method), warp/fill	300 310	520 510	880 900	1150 1300	600 1800
Elongation at rupture (%)	15 - 20	15 - 20	15 - 25	15 - 25	15 - 25
Translucency at 550 nm, colour white	13	9.5	8	5	3.5

**Tabel 2:** Fysische eigenschappen van PES/PVC membranen.

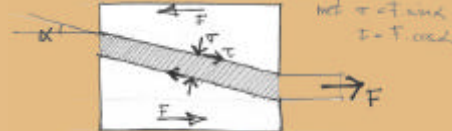
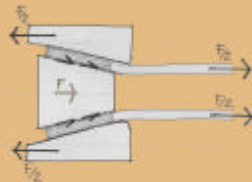
Omdat het principe van een zelfklemmende conische sluitring (zie Box 5) tekunntoepassen moest de ruimte in de eindstukken nog opgevuld worden, zodat de spier effectief luchtdicht werd en de plooien niet verloren gingen of platgedrukt werden bij belasting. Hiervoor ontwikkelden we in samenwerking met de vakgroep fysicochemie en polymeerwetenschappen (FYSC-POSC) van de VUB een thermoharder (zie Box 6) die bij kamertemperatuur nog voldoende ductiele eigenschappen bezat om het probleem van de spanningsconcentratie te vermijden.

### Box 5 : De conische sluiting



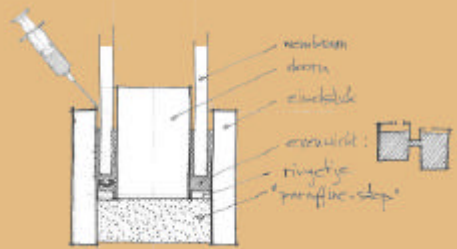
De bedoeling van een conische sluiting is dat het membraan bij belasting door een trekkracht altijd maar vaster komt te zitten. Heel het principe berust eigenlijk op wrijving. De PVC coating van het weefsel interageert voldoende sterk met het aluminium van het eindstukken sleurt de doorn mee naar buiten, zodat de opening waarin het zeil geklemd zit steeds kleiner wordt.

De drukkracht die daarbij ontstaat (loodrecht op het doek) is eerder klein, het epoxy-amine moet dus vooral dienen om de plooien te fixeren en het geheel luchtdicht te maken. Aminelijmen worden trouwens dikwijls gebruikt voor de hechting van aluminium waardoor de werking van de sluiting nog verbetert.



Voor de impregnatie van het membraan en het vullen van de plooiën gebruikten we heteindstuk als verlorenmal: de ruimte tussen het buitenstuk en de doornsloten werd af met een ring en de onderkant van het zo bekomen 'potje' werd verzegeld met een stop van paraffine.

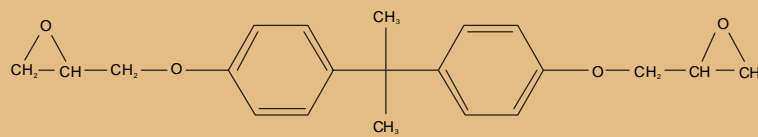
Door een kleine opening te laten onderaan in de mal, tussende bodem en het membraan, werden de plooiën niet van elkaar afgesloten en kon het reactieve hars zich verspreiden (principe van communicerende vaten).



#### Box 6 : Fixatie van de spier met een epoxy thermoharder

De gebruikte epoxy/amine formulering en de gekozen reactiecondities moeten toelaten de geplooid poly(ester)vezel/poly(vinylchloride) folie zonder verlies van materiaaleigenschappen aan beide uiteinden hermetisch in een aluminium conische koppeling te fixeren.

Het gebruikte epoxyhars was Epikote 828 LVEL (Shell), een diglycidyl ether van bisphenol A (DGEBA) met een epoxyequivalentgewicht van  $180 \text{ g} \cdot \text{eq}^{-1}$ :



De gebruikte hardener was Jeffamine 400 (Aldrich), een poly(propyleneglycol) bis(2-aminopropylether) met een gemiddeld moleculair gewicht  $M_n = 400 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ :



Het bifunctioneel epoxy en het tetrafunctioneel amine werden bij kamertemperatuur gemengd in een stechiometrische mengverhouding: 0.542g Jeffamine 400 per 1g DGEBA.

Het restvolume tussen de plooiën van de poly(ester)vezel/poly(vinylchloride) folie ( $\pm 10$  ml) werd geïmpregneerd met vers bereid stechiometrisch epoxy/amine mengsel. De initiële viscositeit van het versmengsel is voldoende laag om impregnering te laten plaatsvinden.

De reactiviteit van het mengsel laat toe om de uitharding bij lage temperaturen uit te voeren, zonder verweking van de folie. De volgende uithardingscyclus werd toegepast:

24 bij kamertemperatuur; 18 bij  $50^{\circ}\text{C}$ ; 6 bij  $60^{\circ}\text{C}$ .

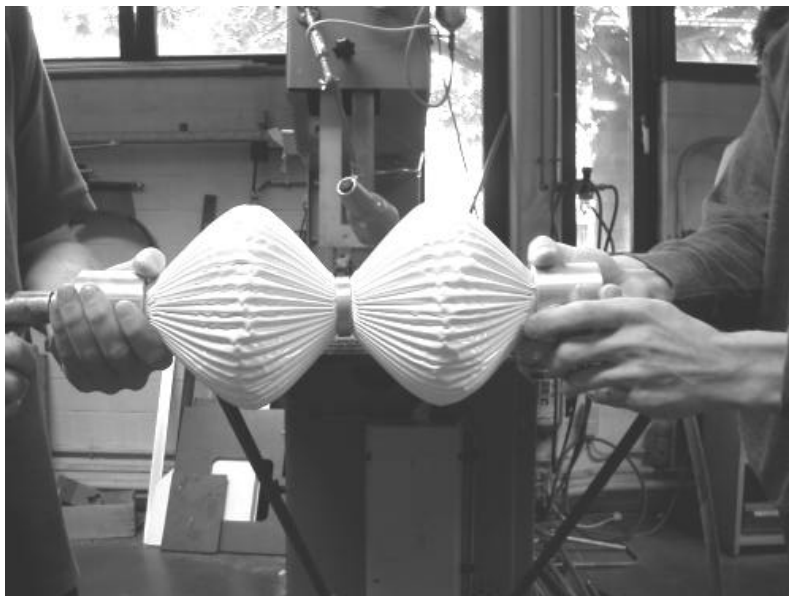
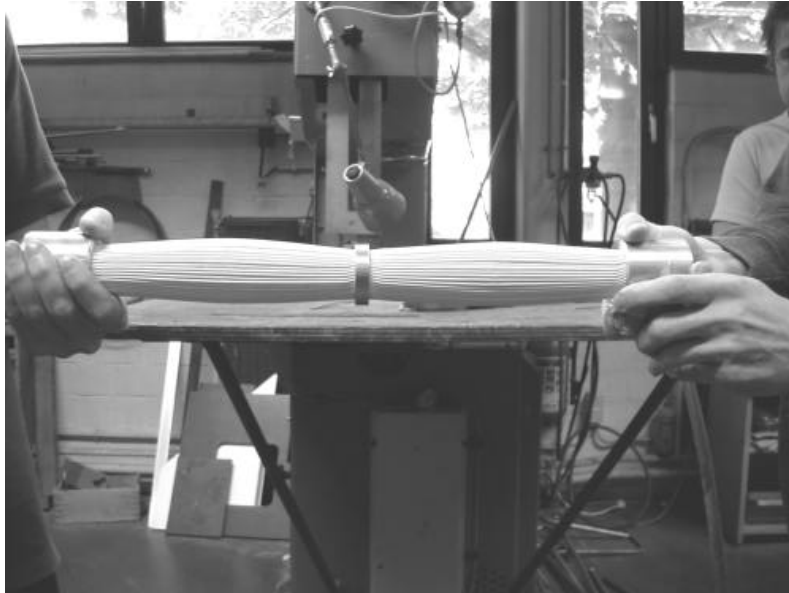
Door deze uithardingscyclus is de glasovergangstemperatuur ( $T_g$ ) gestegen van  $-40^{\circ}\text{C}$  tot  $+50^{\circ}\text{C}$  en is het mengsel bijna volledig uitgehard (de overblijvende reactiewaarde bedraagt minder dan 5%, gemeten met de differentiële scanning calorimetrie (DSC)). De maximumwaarde van  $T_g$  na volledige uitharding bedraagt  $+55^{\circ}\text{C}$ .

Door de keuze van Jeffamine 400 als harder blijft de crosslink dichtheid en dus ook de eindwaarde van  $T_g$  ( $50-55^{\circ}\text{C}$ ) van het chemisch netwerk laag. Op deze wijze wordt een voldoende ductiel thermoharder bij gebruikskondities bereikt.



Het volume van de berekende hoeveelheid epoxy/amine langs de buitenkant in een aantal plooiën te injecteren en de mal voldoende te verwarmen tot dat zich een evenwicht heeft ingesteld. (Niet boven de  $40^{\circ}\text{C}$ , anders liepen we het risico dat het mengsel al begon te reageren en dus veel te visceus werd). Na de uitharding werden de eindstukken nog voorzien van de nodige aansluitingen (de katrol, een haak en een connectiestuk voor de perslucht) zodat na het vastlijmen van de middenring de spierenvolledig gebruiksklaar waren (zie Fig. 36).

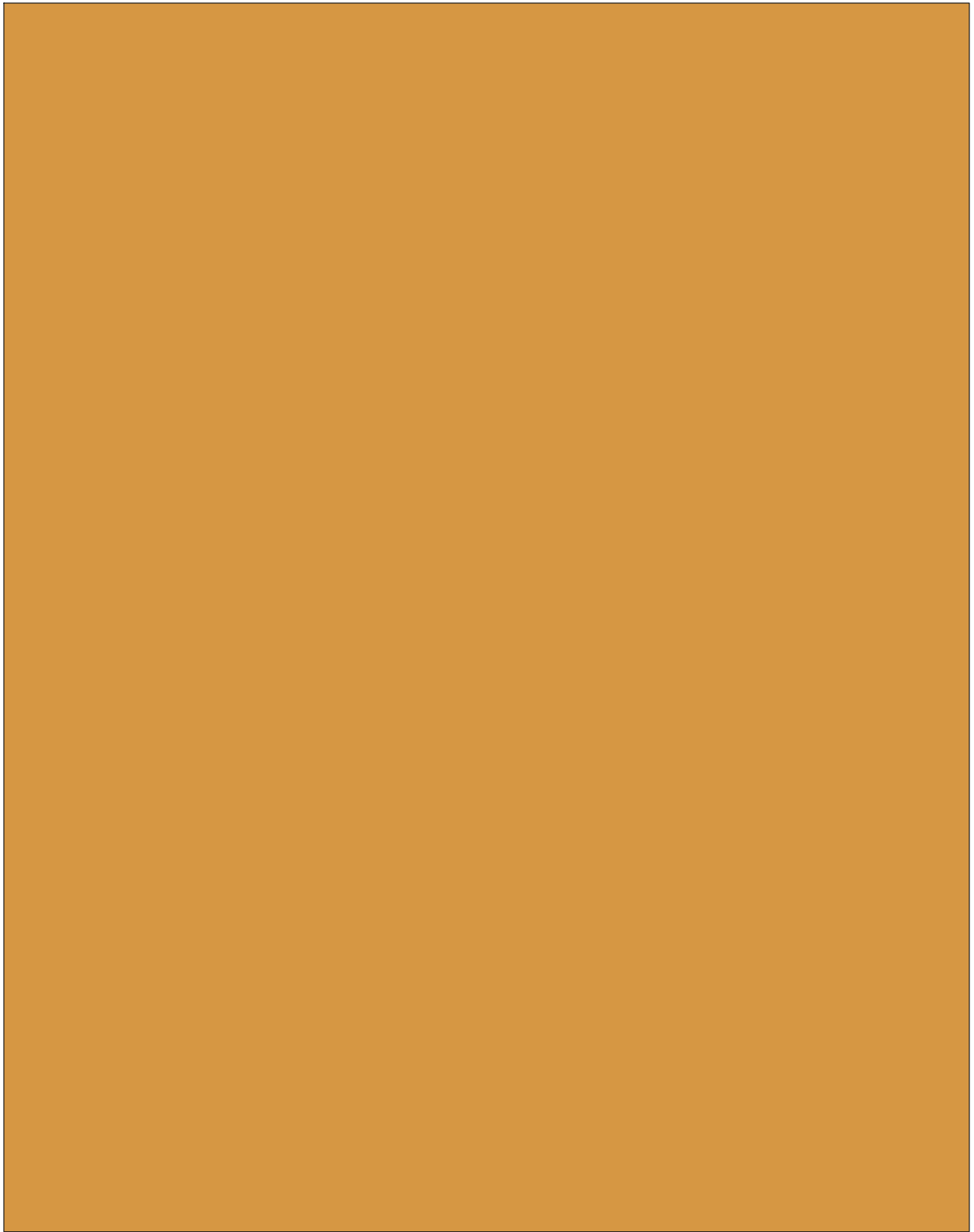
72



**Figuur 36 :** eerste opbolling van de spier.



**Knippen en ... lassen**

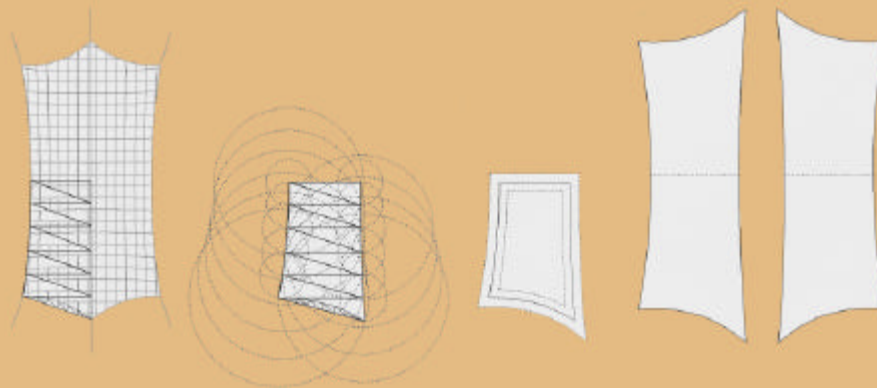


Lastbutnot least was er de omzetting van de virtuele evenwichtsvorm van het membraan, door EASY bepaald als een optimum voor de 45° (midden) positie, tot een tastbaar zeil met dezelfde dimensies. Zoals reeds eerder beschreven (zie Box 1) gebeurt dit door middel van een knippatroon. Men ontwikkelt het computermodel in afzonderlijke segmenten naar het vlak zodat het deel per deel op een stof getekend en uitgeknipt kan worden. Het daarna geassembleerd patchwork draagt vanaf dan de specifieke driedimensionale vorm in zijn 'geheugen' mee.

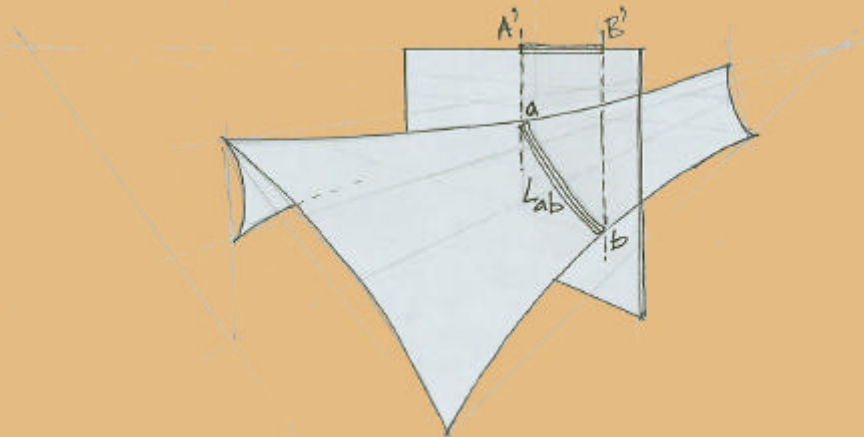
Meestal (voor grote constructies) zal men de breedte van de segmenten bepalen aan de hand van de afmetingen van de rol waarop gecoat weefsels doorgaans geleverd worden, maar omdat onze module klein genoeg was konden beide vleugeltjes in hun geheel uitgevoerd worden. De ontwikkeling naar het vlak verliep als geïllustreerd in Box 7.

#### **Box 7 : Manuele methode voor de berekening van een knippatroon.**

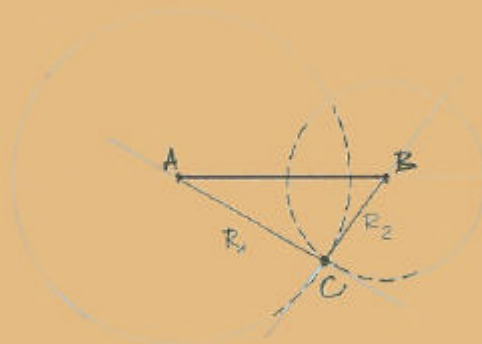
In AutoCAD tekenden we boven het in EASY bekomen zeileenvlak rooster van driehoeken, die het doek in bovenaanzicht onderverdelen. Dit moeten driehoeken zijn om de eviderendendat in de ruimte twee punten op een rechte lijn de de punt steeds in een vlak liggen (coplanair). Willekeurig in de ruimte gevormde vierhoeken zou men niet altijd kunnen neerslaan in een vlak omdat ze dus niet steeds coplanair zullen zijn.



Elke zijde van de driehoek in bovenaanzicht stelt een verticaal vlak voor. Deze zal dus het driedimensionaal doek snijden.



De booglengte  $l_{ac}$  van de zo bekomen snijlijn (gekromd in de ruimte) bepaalt de lengte  $|AB|$  van de equivalente zijde van de driehoek in het knippatroon. Met de booglengten  $|AC|$  en  $|BC|$  is de meetkundige plaats gekend van het overstaande hoekpunt C van de driehoek. De grafische methode om deze te bepalen is de eenvoudigste. Men trekt vanuit A een cirkel met straal  $R_1 = |AC|$  en vanuit B één met  $R_2 = |BC|$ . Het snijpunt van de twee cirkels is dan het punt C.

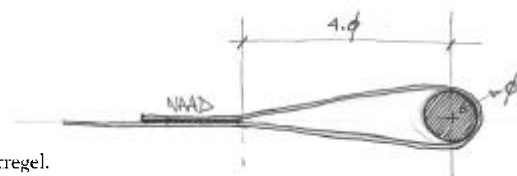


Aangezien membranen bij belasting onder invloed van voorspanning, externe lasten of temperatuur behoorlijk vervormen en omdat deze vervorming een niet te onderschatten verlies aan spanning betekent, moet het bekomen oppervlak tot een percentage van zijn oorspronkelijke afmetingen herleid worden. Dit wordt de 'compensatie' genoemd.

De elementen om deze plastische vervormingen in te schatten haalt men uit de gegevens van een biaxiale trekproef op de stof. Leveranciers van zeilen verstrekken of hebben deze informatie niet en daardoor is men meestal aangewezen op eigen proeven, de literatuur of de ervaring en vakkennis van VAC-specialisten. Uitgaande van de expertise van professionelen, gebruikten we een eerderkleine schaal factor (99% was zelfs een veilige overschatting). Het PVC gecoat polyester weefsel werd bij fabricant Ferrarireeds voorgerokken, zodat de onmiddellijke rek bij belasting reeds uit was en nog slechts kruipen relaxatie diende te worden gecompenseerd te worden.

We voegden daarin het midden een extra band toe om de twee helften aan elkaar te kunnen zetten en gaven aan de randen de nodige omslag voor het maken van een zoom voor de randkabel. Bij de dimensionering van deze kabel lushianteerden we volgend de vuistregel.

77



**Figuur 37 :** vuistregel.

Om de zoom volgens de kromming van de onderrand te kunnen omslaan werd hij onderverdeeld in segmenten van 20cm (zie Fig.38).

De puntige inkepingen vormden daarbij een risico voor de vorming van scheuren en daarom gaven we een grotere kromtestraal.

Als men in de praktijk verschillende stukken van PES/PVC membranen aan elkaar zet, worden ze eerst gelijmd en aangestikt. Hoewel dit ook voor ons de meest eenvoudige methode leek, vereiste ze het maken van een grote mal, waarin de middenrand gefixeerd en aangedrukt kon worden om dan in de juiste vorm te drogen. Praktisch was dit natuurlijk niet haalbaar en daarom hebben we eerst de twee helften van het zeil op de middellijn van de naad aan elkaar gestikt, zodat de exacte kromming reeds vast lag en de overlappingsen aan weerszijden van het stikse eenvoudig gehecht konden worden.



**Figuur 38 :** helft van het membraan met omslag onderverdeeld in segmentjes.

We gebruikten hiervoor een lasapparaat met hetelucht, waarmee we de PVC lagen van de te hechten oppervlakken dusdanig verwekten, zodat ze na het uitoefenen van een zekere druk, één geheel vormden (zie Fig. 39). De zo bekomen lashadde us in principe dezelfde sterkte als het membraan en was bovendien extra verstevigd door het centrale stiksel. Volgens specialisten moest de temperatuur van de laslucht voor een goed resultaat met dit type materiaal ongeveer 250° C zijn. De duur van verwarming en de uitgeoefende druk werden naar beste vermogen geschat. De zomen aan de randen werden op een gelijkaardige manier segment per segment gelast, maar werdennieteerst met een stiksel gefixeerd. Uiteindelijk werden de hoeken van het membraan nog 'uitgewerkt' om de aansluiting van de verschillende randkabels (metelkaaren met de eindkabel) te vergemakkelijken (zie Fig. 40).

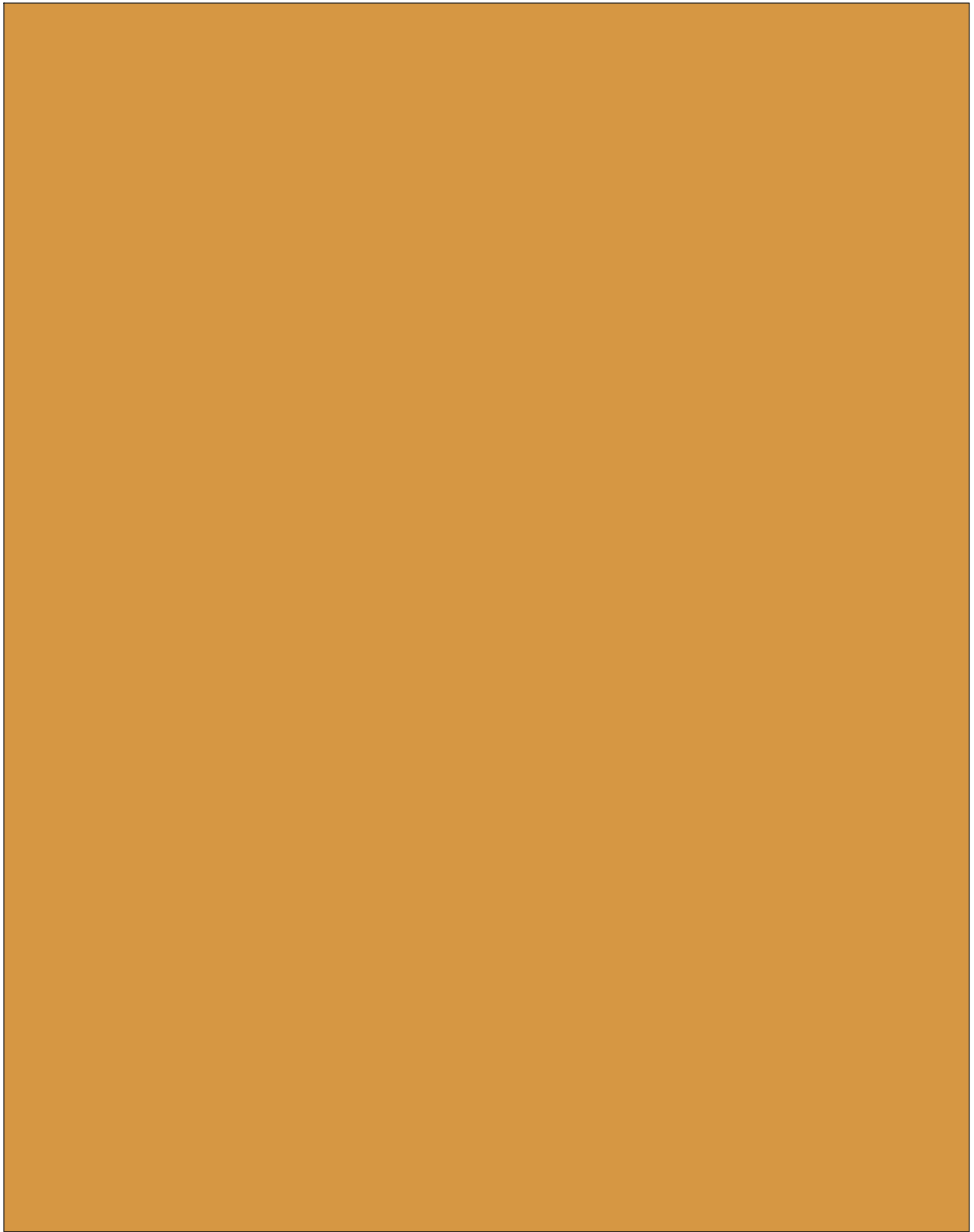


**Figuur 39 :** lassen van het membraan.



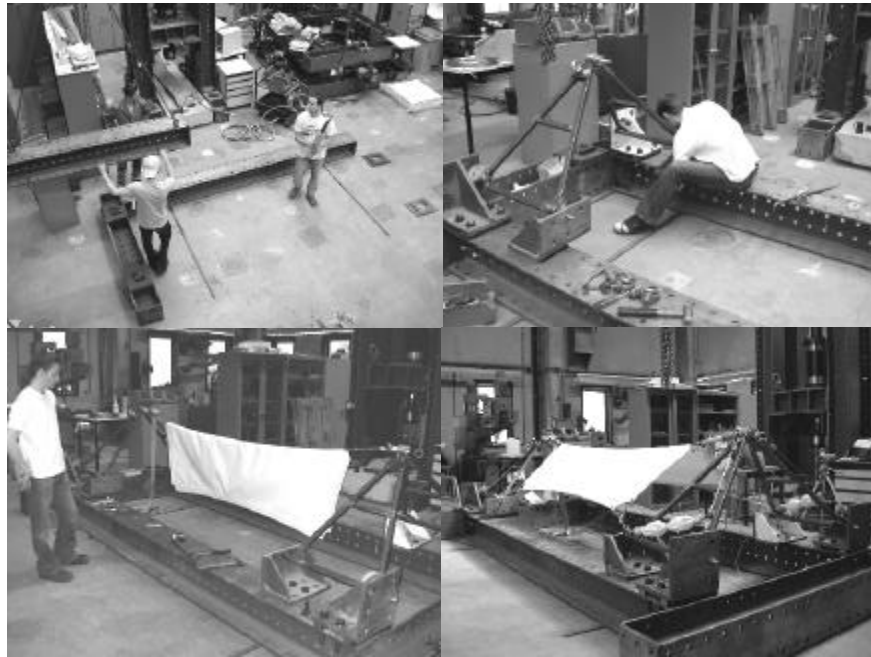
**Figuur 40 :** uitwerking van de hoeken.

# **Assemblage**





Het enig wat nog restte was het samenbrengen van de verschillende elementen (zie Fig. 41).



81

**Figuur 41** : de assemblage.

De opstelling was volledig in drie dimensies op computer-uitgewerkte uitvoeringsplannen voor de strikjes met alle bijbehorende onderdelen waren uit dit virtueel model afgeleid. Voor de draagstructuur werden dan ook weinig problemen verwacht. Bij het aanbrengen van de kabels en het zeil daarentegen, waren er nog verschillende factoren waarmee rekening gehouden moest worden. We hadden in EASY immers vastgesteld dat kleine verplaatsingen van de hoekpunten van het membraan (enkele millimeters) reeds grote gevolgen hadden voor de spanning. Het was dus zeer belangrijk om de randvoorwaarden van de simulaties zo goed mogelijk te benaderen, want elke afwijking zou door de spieren extra gecorrigeerd moeten worden. Alleen al uit de afwerking van de staalkabels, bleek dat dergelijke nauwkeurigheid moeilijk te realiseren zou zijn. De kabellengtes werden bepaald in AutoCAD (in het gesimuleerd model) en het staalafgepast. De verbindingsslussen werden dan gefixeerd rond een kabelkous met telkens twee kabelklemmen (zie Fig. 43).

Door de grote stijfheid van het materiaal verliep deze procedure behoorlijk moeizaam en bood zelden een zekerheid over de exacte afmetingen.

Bovendien werd de staalkabel (met een diameter van 6mm) van de bovenrand vervangend door een stoffen band met een breedte van ongeveer 5cm. Zo konden wederatelspanner (zie Fig. 42) uit de ADAPTENT van Sven Hebbelinck weliswaar recupereren om de bovenrand onder spanning te brengen, maar creëerden we een tweede afwijking ten opzichte van het theoretisch model.



**Figuur 42:** ratelspanner.



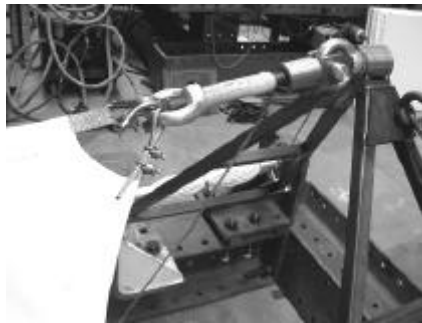
**Figuur 43:** knooppunt randkabels.

Voor de rest hebben we geprobeerd alle overbodige tussenstukken te elimineren. Zo worden kabels in het algemeen met elkaar verbonden via een ring. Deze bemoeilijkt echter het exact samenbrengen van de randen in één punt en werd daarom weggelaten (zie Fig. 43).

Het uiteindelijk onderspanning brengen van het zeil was een iteratief proces.

We zijn vertrokken in de 45° positie omdat het knippatroon voor deze configuratie bepaald werd en het bekomen van de juiste vorm van het zeil hier dus normaal geen probleem mocht geven. Met de ratelspanner stelden we de bovenkabel bij tot dat hij dezelfde lengte had als in het computermodel (gemeten in AutoCAD). Daarna werden de spieren onder druk gezet zodat ze een zekere verkorting genereerden en de rimpels uit het zeil verdwenen. In eerste instantie werd de spanning visueel gecontroleerd. De bedoeling was dan om met een tensiometer de effectieve waarde te meten, zodat de bovenkabel en/of de onderkabels konden bijgesteld worden, totdat een uniforme verdeling van de voorspanning bekomen werd, gelijk aan deze bepaald in EASY (2kN/m) voor de juiste verkorting van de spier in die positie. Omdat we de kracht in de bovenkabel konden via het geïntegreerde meetelement (zie Fig. 44) en de overdruk in de spier nauwkeurig bijgesteld kon worden (zodat via de gemeten verkorting ook de kracht in de spier gekend was) kon het model op die manier afgesteld worden totdat alle parameters overeen kwamen met deze van de simulaties. Daarna wilden we de constructie met deze ingestelde randvoorwaarden verder ontplooiën en terug toevouwen om dan in een aantal discrete punten de spanningen in het zeil, de kracht in de bovenkabel en de toestand van de spieren opnieuw te controleren en te toetsen aan de theoretische waarden.

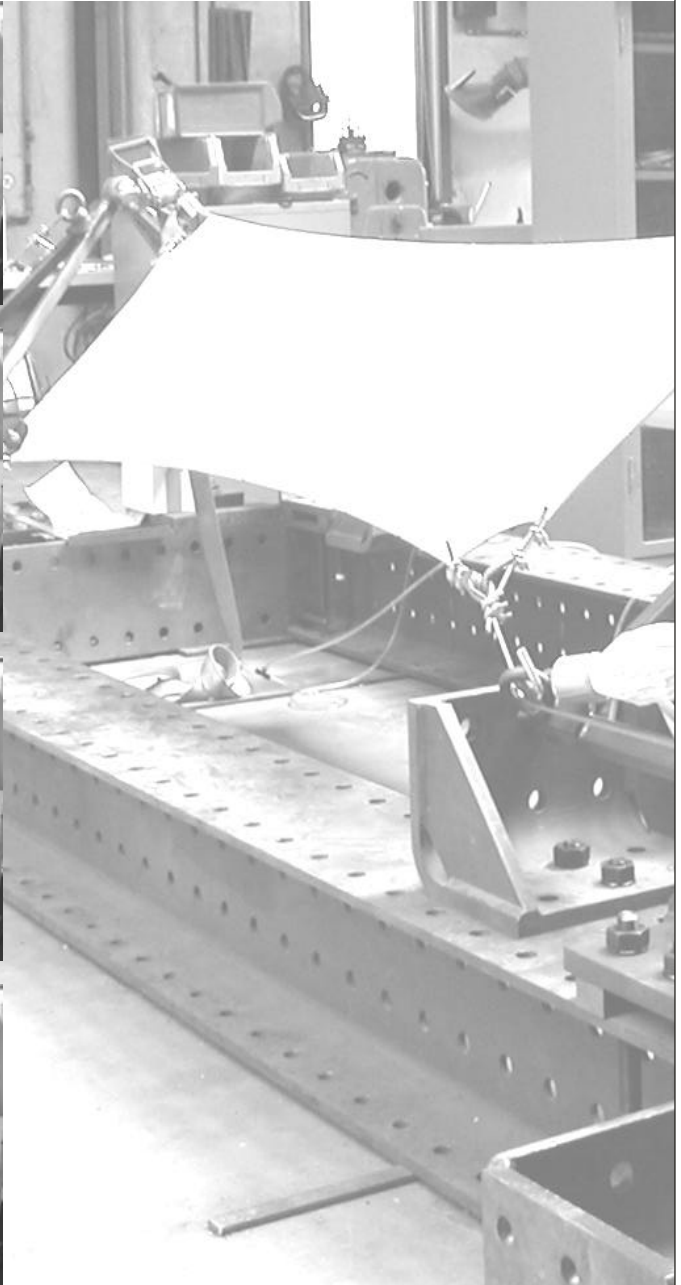
Spijtig genoeg is de tensiometer (voor het meten van despanningen in het zeil) die ons werd toegestuurd door Ferrarino oitaangekomen en is het bij een eerste visuele test gebleven. Het dient wel opgemerkt dat in de praktijk despanning van een membraan constructie meestal op eendergelijke visuele manier gecontroleerd wordt en dat we hier door dustochale een eerste idee hadden over de werking van het principe.



**Figuur 44:** geïntegreerd meetelement.

Wij hebben natuurlijk niet de ervaringen het 'getrainde oog' van een specialist in deze materie en we kunnen dan ook alleen maar zeggen dat het resultaat naar ons aanvoelen zeer bevredigend was. De impuls door het loshangen en de onvolmaaktheid van het lassen verdwenen volledig en het zeil werd dusdanig gespannen dat er op 'geroffeld' kon worden. In de praktijk wordt de voorspanning op deze wijze ingeschat door ervaren 'roffelaars'. Door het ontbreken van de tensiometer konden wij echter niet het verschil duiden tussen (te) veel of (te) weinig voorspanning.

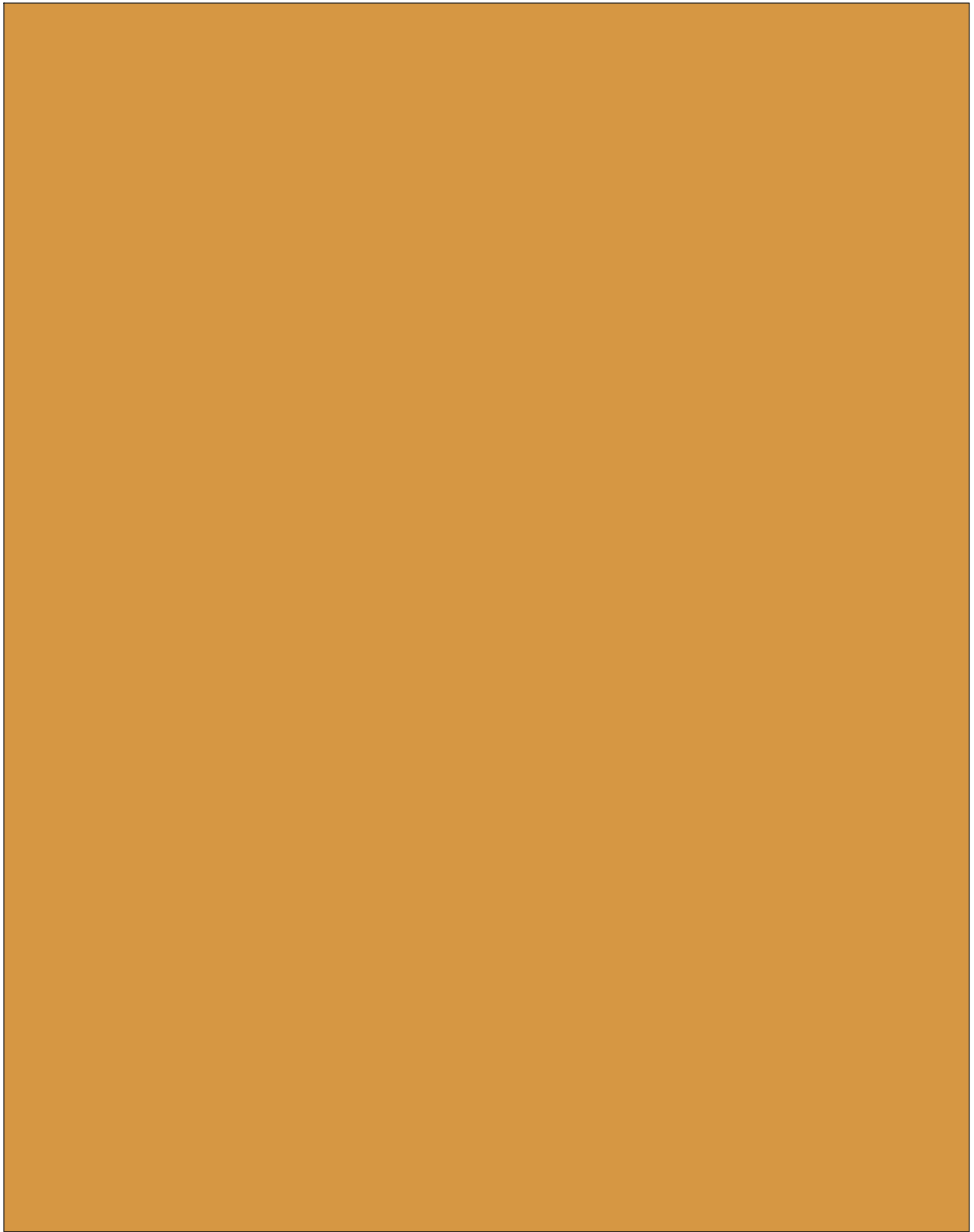
We hopen deze controles in de toekomst alsnog te kunnen uitvoeren. De visuele vaststellingen doen vermoeden dat ook deze nauwkeurigere testen de werking van het principe zullen bevestigen.







**Bedenkingen  
Toekomstperspectieven**





Het ontbreken van een organisme nu alleen nog maar (gezond) verstand, een intelligente sturing die de ontplooiing controleert en zelfstandig aanpast aan de omstandigheden. Met de huidige mogelijkheden op het gebied van sensortechnologie en automatisering, lijkt dit ons maar een klein stap.

Omdat link met de realiteit niet te verliezen en de toepasbaarheid van de structuur tot op het einde te verzekeren, hebben we steeds de randvoorwaarden van een concreet case beschouwd.

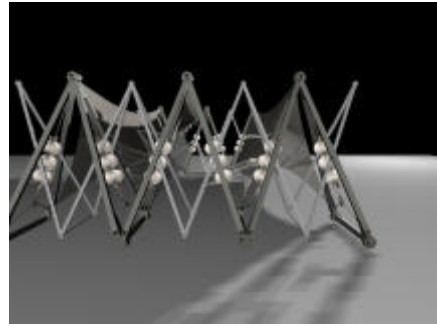
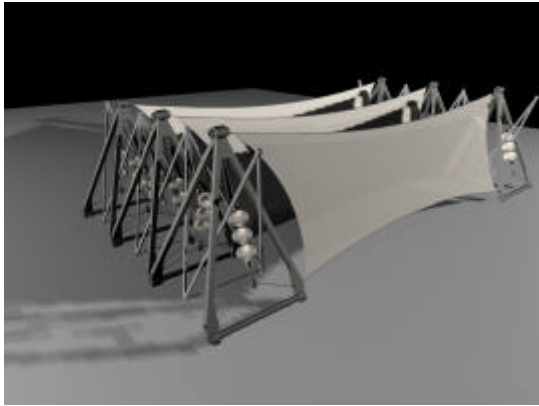
Uit de berekeningen is gebleken dat het oppervlak van de structuur 2,5 keer kan worden vergroot, bij het doorlopen van het volledige bewegingsinterval tussen 30 en 70°. De oorspronkelijke idee om boven de tribune van een sportterrein een permanente overdekking te voorzien die indien nodig over het ganse terrein kon uitwaaiëren, is dus zeker realiseerbaar.

De effectieve integratie van de structuur in een ontwerp oefening en de volledige praktische uitwerking, zal ons bovendien nog bijkomende informatie verschaffen om nieuw onderzoek te helpen sturen.

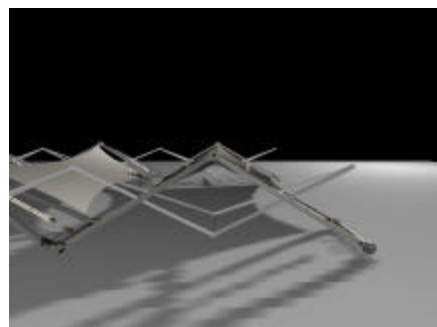
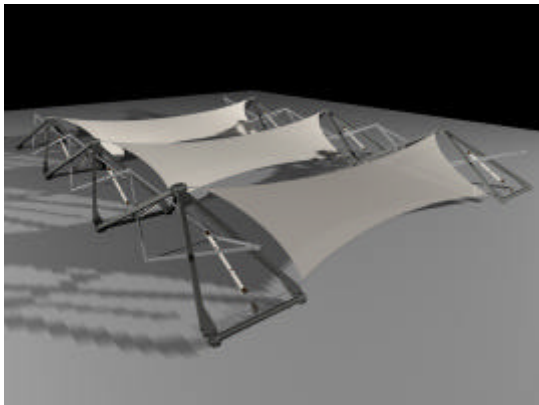
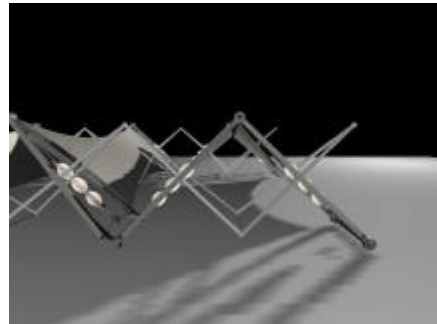
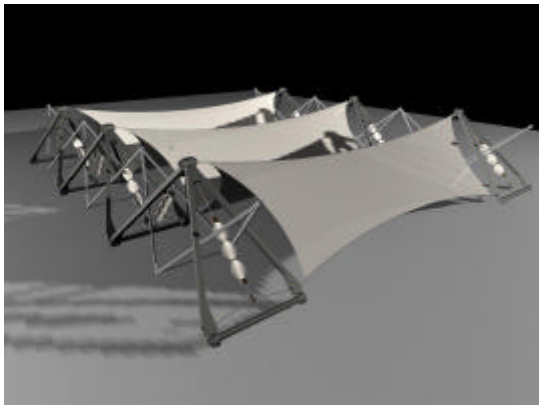
Op basis van de huidige stand van zaken kunnen we in ieder geval al zeggen dat volgende deelfacetten in aanmerking komen voor verder studie.

89

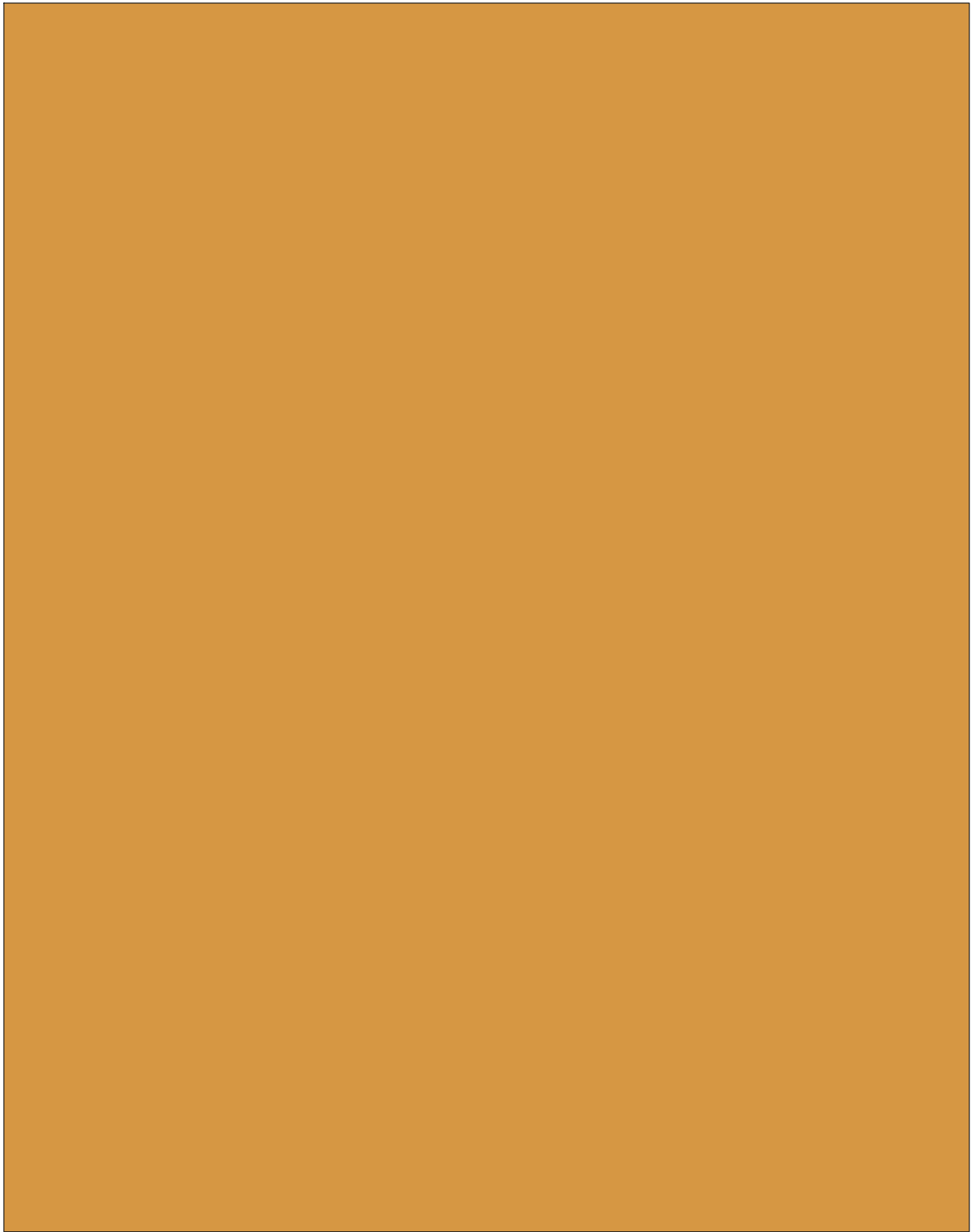
- aftasten van de grenzen van het ontplooiingsinterval door een aanpassing van de materiaaleigenschappen van het zeil, herconfiguratie van de schaarconstructie, ...
- 'verlichten' van de draagstructuur ter vervollediging van het concept van lichtheid, bijvoorbeeld door het gebruik van vezelverstevigde composieten in plaats van staalvoordescharen
- veralgemening van het principe tot een ontwerptool, om de integratie in complexere constructieste vergemakkelijken
- bijsturing van de karakteristieken van de spieren in functie van hun nieuwe toepassing (van robotica naar architectuur)
- invloed van externe belastingen op de werking van het systeem
- exacte uitwerking van de soepele tussenstukken (herinner: delenzen)
- volledige automatisering in functie van een concreet toepassing
- dimensionering en optimalisatie van de knooppunten van een schaarstructuur
- ...



90



## **Bibliografie**



F. Daerden, D. Lefeber, B. Verrelst en R. Van Ham. Pneumatische artificiële spieren: actuatoren met een biologisch trekje. Het Ingenieursblad, april 2001.

F. Daerden, D. Lefeber. The concept and design of pleated pneumatic artificial muscles. International Journal of Fluid Power, 2(3):4150, 2001.

F. Daerden. Conception and realization of pleated pneumatic artificial muscles and their use as compliant actuation elements. PhD dissertation, Vrije Universiteit Brussel, Brussel, 1999.

M. Mollaert. The design of membrane and lightweight structures, proceedings of the symposium. VUB Brussels University Press, Brussel, 2002.

M. A. Fox. Beyond kinetic. Transportable environments, Conference proceedings, 2001.

M. A. Fox, B. Yeh. Intelligent kinetic systems in architecture. 1<sup>st</sup> International conference on Managing Interactions in Smart Environments, Springer-Verlag, London, 1999.

C. J. Gantes. Deployable structures: analysis and design. WIT Press, Southampton, Boston, 2001.

N. De Temmerman. Ontplooibare structuren: algemeen overzicht en studie in het kader van een ontwerpdracht. Proefschrift, Vrije Universiteit Brussel, Brussel, 2002.

A. Goovaerts. Experimentele verificatie van een ruitvormige membraanunit. Proefschrift, Vrije Universiteit Brussel, Brussel, 1999.

S. Hebbelinck. Adaptent, A generating system for temporary, adaptable and reusable nets and tensile structures. PhD dissertation, Vrije Universiteit Brussel, Brussel, 2001.

E. Bubner. Membranstrukturen und Verbindungstechniken. Druckerei Wehlmann GmbH, Essen, 1997.

D. Queffelec. Structures membran textiles tendues. Cahier des règles de l'art. Groupe Arcora, Arcueil, 1984.

G. Doczi. The power of limits. Proportional harmonies in nature, art and architecture. Shambala Publications, Boston and London, 1994.

H. Heynen, A. Loeckx, L. DeCauter en K. VanHerck. *Dat is architectuur. Sleutelteksten uit de twintigste eeuw.* Uitgeverij 010, Rotterdam, 2001.

