

# **Adaptieve draagconstructies**

## **Afstudeerverslag Hugo Mulder**

Dit is een gearchiveerde versie van het rapport. Voor vragen kunt u contact opnemen met Hugo Mulder.

[hugo.mulder@arup.com](mailto:hugo.mulder@arup.com)

2003.04.14

## **. voorwoord**

Al weer enige tijd geleden kwam professor Wagemans bij me met het idee om voor mijn afstuderen 'iets te doen' met adaptieve draagconstructies. Hoewel ik eigenlijk al een afstudeeronderwerp had, sprak het thema me zo aan dat ik besloot daar op in te gaan. Hoe dit dan vorm moest krijgen wist niemand. Al lezend door de materie die uiteindelijk steeds rijkelijker beschikbaar bleek, groeide mijn enthousiasme. Het resultaat van een jaar zoeken, soms tasten in het duister en daar wat van maken, is beschreven in dit rapport. Daarnaast is er een website waarop veel van de informatie ook beschikbaar is, waar gespeeld kan worden met computermodellen en waar de geïnteresseerde door kan zoeken in het onuitputtelijke domein van het www.

Mijn enthousiasme werd gedurende het afstuderen gevoed door meer en meer informatie, door de voortgang, maar ook door de leden van mijn afstudeercommissie. Daarom wil ik prof. Wagemans, voorzitter van de commissie, bedanken voor al zijn ideeën en het openen van vele deuren, Pierre Hoogenboom voor zijn actieve, meedenkende rol waar ik heel veel aan heb te danken. Prof. Kas Oosterhuis voor zijn boeiende kijk-vanuit-de-andere-hoek, die de techniek tenslotte op zijn plaats zet. Dhr. Pieter Huybers voor zijn praktische en kritische benadering die hij ondanks de omstandigheden toch kon en wilde inzetten en tenslotte prof. Blaauwendraad voor het zitting nemen in de commissie.

Naast de commissie ben ik ook aan anderen mijn dank verschuldigd. Katelijne Arts, Sander Hofman en Ivar Woudenberg voor het lezen van het rapport en meer in het algemeen vrienden, collega's van Arup in Amsterdam en mijn ouders, broers en zus met wie ik van gedachten kon wisselen, die steeds maar weer aanboden te helpen of die er gewoon waren.

Speciaal wil ik mijn broer David noemen zonder wie geen enkel project zou zijn wat het is.

Ik hoop dat het lezen van dit verslag vooral een plezierige ervaring is die de lezer enthousiasmeert zich nog meer te verdiepen in de materie van het zichzelf aanpassende.

Hugo Mulder. Rotterdam, maart 2003

## . summary

Adaptability is one of the key features of human life, and life in general. Without it, according to many, life wouldn't even exist. For technology this is different, but as technologists start looking more and more into biology to copy techniques and strategies, adaptability will eventually be woven into our artificial environment as much as in biological nature around us.

Adaption occurs in several ways and with different aims. In nature adaption can take place directly, by long term, or by evolution. As for technology, only the short-term adaption is looked at. Systems can adapt actively, like a sunflower looking towards the sun, or in a passive way; like a dune of sand deformed by the wind.

Architecture becomes adaptive in the way that it meets the changing demands during lifetime. Trans-ports is an interactive architecture project of Oosterhuis.nl. As an conceptual idea, modules of Trans-ports are located in a world wide network. These modules adapt to their environment and in the network they adapt to each other. Trans-ports as a building changes it's shape whenever it likes.

To reduce forces in a (building) structure, one could reduce the external forces or the internal stresses. The first method is achieved by for example changing the external shape of the structure (reduce windloads) and the latter by changing stiffness, strain or geometry. Various systems that adapt on vibrations resulting from windloads and earthquakes, have existed to prove that adaptive systems can make buildings safer. From the results of experiments it is believed that adaptive systems can make structures more efficiënt too.

For active adaption one needs sensors (feel), a control unit (think) and actuators (do). Actuator materials that are common use in microsystems are piezoelectric ceramics and shape memory alloys. For use in building structures special actuators have to be put together while greater forces occur. An actuator that acts like a natural muscle is the Festo Fluidic Muscle. This pneumatic muscle consists of a tube of flexible material that shortens when the internal airpressure is increased. Control units are ideally intelligent and learning. Flock behaviour as a distributed network has proven itself as a form of intelligence. Integration in an adaptive system has to be researched into more depth.

SAM is a flexible, adaptive structure that is designed as part of this research project. S.A.M, which stands for the Smart Adaptable Machine, is built out of purely stressed and pressed members. Furthermore, the structure is designed as several identical units that are repeated on a triangular grid. All stressed members are actuators that can change length, so that the structure can deform in all possible ways. The units are coupled by layers of actuators. These layers prevent instability of the structure as a whole.

The structure is analysed by solving the equations of equilibrium for all the nodes of one unit and also the occuring forces are checked in a Finite Element Method computer program. Through the solving of the equations for different shapes, we could analyse the effects of changing shape on the internal forces.

Modeles of the structure are built using Virtools™. This program was developed for designing games and interactive websites. The benefit of using this program instead of another 3D-modeller or programming language, is the ability to run a 3D-model in a realtime environment and manipulate it's parameters. One can impose restrictions and play around with the. Two stategies of adaptability are modelled in Virtools™. These models can be accessed via the website.

As a conclusion one can say that S.A.M is very well suited for testing different strategies of adaption. This is because of it's flexibility, it's modularity and it's controllability.

## O. inhoudsopgave

. voorwoord	2
. summary	3
<b>0. inhoudsopgave</b>	<b>4</b>
<b>1. inleiding adaptieve draagconstructies</b>	<b>5</b>
1.1 thema	5
1.2 onderwerp	5
1.3 aanpak	5
<b>2. probleemanalyse</b>	<b>6</b>
2.1 ontwerpproces bij een niet gedefinieerde oplossing	6
2.2 probleembeschrijving	6
2.3 probleemdefinitie en doelstelling	6
<b>3. kinetische architectuur</b>	<b>7</b>
3.1 statisch	7
3.2 enkelvoudig bewegen	8
3.3 verplaatsen	8
3.4. dynamisch	8
3.4.1 productie	8
3.5. vrij bewegende architectuur	9
3.5.1 Hyposurface	9
3.5.2 Trans-ports	10
<b>4. draagconstructies</b>	<b>11</b>
4.1. waarom een actief systeem?	11
4.1.1 wind	11
4.1.2 aardbevingen	11
4.1.3 wisselende gebruiksbelasting	11
4.1.4 transport en opslag	11
4.1.5 nieuwe vormen	11
4.2. actieve systemen	11
4.2.1 AMD	11
4.2.2 actief schoren	12
4.2.3 draagluichthallen	12
4.2.4 form adaption	12
4.2.5 tensegrity	13
4.2.6 uitvouwbare constructies	13
4.2.7 knopen	15
4.3 sturing van de actieve constructie	17
4.4. twee voorbeelden van een actief gebouw	18
4.4.1 Festo Airitecture	18
4.4.2 Glasgow Wing Tower	19
<b>5. adaptronica</b>	<b>20</b>
5.1 sensoren	20
5.2. actuatoren	20
5.2.1 piëzoelektrische actuatoren	20
5.2.2 geheugenmetaal actuatoren	21

5.2.3 magnetostrictieve actuatoren	22
5.2.4 electro- en magnetoreologische vloeistof actuatoren	22
5.2.5 chemische acturatoren	23
5.2.6 samengestelde actuatoren: de spier	23
5.2.7 samengestelde actuatoren: pneumatische spieren van Festo	25
<b>6. ontwikkeling adaptief draagsysteem</b>	<b>26</b>
6.1 inleiding	26
6.2 uitgangspunten en randvoorwaarden	26
6.3. S.A.M	27
6.3.1 actuatoren	28
6.3.2 boven- en onderlaag	28
6.3.3 aansluitingen	28
6.3.4 filosofie van de aansturing	29
6.4. alternatieven en ontwikkelingen	30
6.4.1 tensegrity	30
6.4.2 S.A.M v3.0	30
<b>7. analyse draagsysteem</b>	<b>31</b>
7.1 inleiding	31
7.2 evenwichtsvergelijkingen	31
7.3 controle resultaten	32
7.4 gevoeligheid en adaptief gedrag	32
7.4.1 analyse gevoeligheid	32
7.4.2 adaptiviteit	32
<b>8. modellering prototype</b>	<b>34</b>
8.1 Virtools™	34
8.2. modelleren van het systeem	34
8.2.1 uitgangspunten bij het modelleren	34
8.2.2 actief gestuurd passief en actief gestuurd actief gedrag	34
8.3. maken virtuele prototypes	35
<b>9. conclusies en aanbevelingen</b>	<b>36</b>
9.1 inleiding	36
9.2 terugkoppeling naar probleem- en doelstelling	36
9.3. Trans-ports: praktische overwegingen en aanbevelingen	36
9.3.1 actuatoren	36
9.3.2 knopen	38
9.3.3 huid	38
9.3.4 veiligheid	38
9.4 vervolg	38
9.4 samenvatting conclusies	39
9.4 tot slot	39
<b>. Bronnen</b>	<b>40</b>
Literatuur	40
Internet	40

## Bijlagen

## Definities

Gebleken is dat sommige termen verwarring veroorzaken omdat ze in verschillende vakgebieden andere betekenissen dragen, of omdat ze, doordat het vakgebied van de adaptieve systemen nog jong is, niet bij iedereen bekend zijn. Hieronder hun definitie.

Actuator: een uitvoerend element in een actief systeem. Het onderdeel dat 'doet'.

Adaptronica: de kennis omtrent de techniek van het aanpassen, omvattend de sensortechniek, de actuator techniek en de techniek van het sturen en regelen.

Biomimetics/bionics: de studie naar natuurlijke systemen en strategieën met als doel het toepassen hiervan in de techniek.

Pantograaf: constructie waarbij elementen zodanig zijn verbonden dat de verplaatsing van een deel van het systeem een grotere verplaatsing elders tot gevolg heeft.

Smart material: veelal samengesteld materiaal dat meerdere (functionele) eigenschappen heeft. Zo zijn er vormen van coating die op een elektrische spanning reageren met een temperatuurstijging. Ze kunnen dus worden ingezet als bescherming van een materiaal, decoratie van een wand en tegelijk als verwarming van de ruimte.

Stabiliteit: een systeem is stabiel indien de evenwichtssituatie de positie is met de laagste energie. Van een positie uit de evenwichtsstand wil het systeem hier dus naar terugkeren.

Topologische optimalisatie: het optimaliseren met als uitgangspunt oppervlakte. Bij een dragend element dat topologisch wordt geoptimaliseerd, wordt 2D de hoeveelheid benodigde oppervlakte geminimaliseerd.

# 1. Inleiding

## adaptieve draagconstructies

Onderwerp van dit afstuderen zijn draagconstructies van gebouwen die actief reageren. Deze reactie kan volgen op een belasting, maar bijvoorbeeld ook op een vormverandering van het gebouw dat ze dragen. Een vormverandering kan het gevolg zijn van het zich aanpassen van een gebouw aan een bepaalde belasting, maar ook van een (veranderende) behoefte van de gebruiker(s). Tevens zal blijken dat een gebouw ook van vorm kan veranderen uit eigen wil.

Het afstudeerwerk is de afsluiting van de studie civiele techniek in twee afstudeerrichtingen, namelijk 'bouwtechniek en bouwproces' en 'materialen, mechanica en constructies'.

In het nu volgende zal eerst een inleiding worden gegeven op het thema van de zichzelf aanpassende draagconstructie. Hoofdstuk 2 behandelt de probleem- en doelstelling. Hoofdstuk 3, 4 en 5 gaan over kinetische architectuur, draagconstructies en adaptronica. Dit zijn min of meer inleidende hoofdstukken die een aantal thema's uit de verschillende betrokken vakgebieden uiteenzetten. In het hoofdstuk over architectuur wordt besproken waarom architectuur kinetisch kan of moet zijn. Het hoofdstuk over draagconstructies bespreekt verschillende systemen die zijn gebruikt voor beweegbare constructies en hoe deze kunnen worden aangestuurd. Adaptronica, in hoofdstuk 5 is het geheel van actuatoren, sensoren en regelsystemen die nodig zijn om een systeem adaptief te maken.

Hoofdstuk 6 bespreekt de draagconstructie die is ontwikkeld (en eigenlijk nog in ontwikkeling is) voor Trans-ports, een architectuurproject van Kas Oosterhuis. Hoofdstuk 7 doet verslag van de mechanica analyse van het systeem. Hoofdstuk 8 behandelt het computermodel dat is gemaakt om het gedrag van de adaptieve constructie te valideren. In hoofdstuk 9 worden conclusies getrokken uit het werk en worden aanbevelingen gedaan voor een eventueel vervolgonderzoek.

### 1.1 thema

Het afstuderen vindt plaats binnen het thema adaptieve draagconstructies. Deze term is vrij letterlijk vertaald van het Engelse 'adaptive structures' en het Duitse 'adaptive Tragwerke' en zou ook omschreven kunnen worden als zichzelf aanpassende draagconstructies. Het onderzoek dat op dit onderwerp plaatsvindt, heeft zich tot nu toe vooral binnen het veld van de lucht- en ruimtevaart en de werktuigbouw afgespeeld, maar binnen de civiele (constructie) techniek wordt er ook steeds meer onderzoek verricht. Naast mechanica neemt IT een belangrijke plaats in in het onderzoek omdat de optimalisatieprocessen en regeltechnieken erg complex zijn. Door de verbondenheid van het onderwerp met slimme materialen (smart materials) en het nabootsen van natuurlijke processen en strategieën is bovendien de link met vakgebieden als materiaalkunde, biotechnologie en biomimetics aanwezig.

Door professor Werner Sobek [19] wordt gesteld dat adaptieve draagconstructies op te delen zijn in actief en passief reagerende. De passieve systemen reageren op hun omgeving, maar worden niet gestuurd en teruggekoppeld. Dat is wel het geval bij actieve systemen.

Bij de actieve systemen neemt de regeltechniek dan ook een belangrijke plaats in. Globaal bestaan deze systemen uit sensoren voor het waarnemen van de omstandigheden (voelen), actuatoren om bepaalde handelingen uit te voeren (doen) en een regelsysteem dat naast het doorgeven van signalen ook informatie kan opslaan en leert waardoor het systeem intelligent kan reageren (denken).

Voor draagconstructies kan voorts een opdeling worden gemaakt naar systemen die de inwendige spanningsverdeling manipuleren en systemen die de uitwendige krachten beïnvloeden. Doel van deze manipulaties kan zijn het optimaliseren van het systeem naar de optredende spanningen. Op deze manier kan materiaal bespaard worden in een draagconstructie omdat spanningspieken genivelleerd worden.

Toepassingsmogelijkheden liggen in het dempen van trillingen in hoogbouw ten gevolge van wind of aardbevingen, maar ook in het lichter uitvoeren van lichte draagconstructies en bruggen. Maar ook in kinetische architectuur waar gebouwen niet meer statisch zijn, maar dynamisch, reagerend op hun omgeving en op de wensen en behoeften van gebruikers, ligt een interessant toepassingsgebied.

De uitvoerende elementen in de systemen (actuators) kunnen mechanische apparaten zijn, maar een reactie kan ook plaatsvinden door het integreren van slimme materialen. Op het gebied van deze materialen wordt veel onderzoek verricht. Voorbeelden van smart materials zijn bepaalde kunststoffen, piezo-keramische materialen en electro-reologische vloeistoffen. Een slim materiaal wordt gekenmerkt door het feit dat het meerdere functies tegelijk kan vervullen. Naast een constructieve functie zou het bijvoorbeeld kunnen vervormen. Volledige integratie vindt plaats als één materiaal net als een natuurlijk, levend organisme kan waarnemen, denken en reageren.

### 1.2 onderwerp

Het Trans-ports project van architect Kas Oosterhuis (Oosterhuis.nl) draait om een interactief bouwwerk, dat communiceert met gebruikers en omgeving. Het gebouw heeft daartoe een zekere intelligentie en kan daarmee net als andere elementen in het dagelijks leven onvoorspelbaar optreden. [i03], [32] en [35].

De binnenhuid van het bouwwerk is een elektronisch scherm waarmee gegevens uitgewisseld kunnen worden tussen het gebouw en de gebruikers. De draagconstructie is bedacht als een ruimtevakwerk opgebouwd uit elementen die in en uit kunnen schuiven en zo de vorm van het gebouw kunnen veranderen.

Constructieve intelligentie wordt toegevoegd als de constructie constant zoekt naar een vorm waarin de optredende krachten optimaal worden afgevoerd. Dit kan betekenen dat daartoe de vorm moet veranderen. In die zin kan de 'wil' van de constructie dus ook een factor zijn die invloed heeft op het gedrag van het gebouw. Voor de veiligheid zou het bovendien wenselijk zijn als de constructie over bepaalde reflexen beschikt, die zonder dat er over hoeft te worden nagedacht bijvoorbeeld bezwijken van het gebouw voorkomen.

### 1.3 aanpak

In dit afstuderen wordt een draagconstructie ontwikkeld die is geïnspireerd

door een bestaand gebouwontwerp. Een draagconstructie die zichzelf op een slimme manier aanpast. Het gaat om een gebouw dat vervormt, en van de draagconstructie wordt dus verwacht dat het mee vervormt.

In de hoofdstukken 3, 4 en 5 van het rapport wordt aan de hand van een aantal vakgebieden, waaronder de architectuur en de constructietechniek, een filosofie ontwikkeld van waaruit de zichzelf aanpassende constructie tot stand moet komen. Hierin vormt zich eigenlijk de doelstelling. Sommige argumenten zijn daarin niet zuiver technisch van aard, maar architectonisch of onderzoekend. De (technische) consequenties daarvan zijn niet direct te overzien.

Deze filosofie vertaalt zich naar een aantal uitgangspunten van waaruit de constructie ontwikkeld wordt. Deze worden in het begin van hoofdstuk 6 opgesteld en toegelicht. Van daaruit wordt de ontwikkelde constructie uitgewerkt en onderzocht. Hoofdstuk 7 beschrijft de mechanica analyse en de manier waarop de constructie zich kan aanpassen aan veranderende krachten. De computermodellering van het constructiesysteem komt aan bod in hoofdstuk 8. Hoofdstuk 9 behandelt tenslotte de conclusies en aanbevelingen.

## 2. probleemanalyse

### 2.1 ontwerpproces bij een niet gedefinieerde oplossing

(volgens Rittel en Webber, 1973)

Er bestaat een categorie problemen waarbij elke poging een oplossing te vinden het begrip in de problematiek vergroot. Dit soort problemen kan niet op een lineaire wijze worden opgelost, omdat de probleemstelling zich ontwikkelt als nieuwe oplossingen worden overwogen of geïmplementeerd.

Enkele specifieke kenmerken van dit soort problemen zijn dat het probleem niet volledig begrepen wordt totdat er een oplossing is ontwikkeld. Omdat er geen heldere probleemstelling te maken is, is er ook geen duidelijk eindpunt waarbij de oplossing 'af' is. Oplossingen voor dit soort problemen zijn ook niet te kwalificeren als goed of fout, beter passen termen als 'beter', 'slechter', 'goed genoeg' of 'niet goed genoeg'. Het is daarom dat er ook geen afgebakende set met alternatieven bestaat. Er is misschien immers überhaupt geen oplossing, of er worden er een heleboel bedacht, terwijl vele andere nooit zijn overwogen.

Het ontwerpproces verloopt dan ook niet volgens de waterval methode, maar eerder volgens een pad zoals te zien is in de grafiek in figuur 2.1. In deze figuur is te zien wanneer bij doorgaande tijd er sprake is van een probleem en van een oplossing. De waterval methode werkt volgens een vast patroon van probleem naar oplossing, maar de twee andere lijnen geven een proces aan waar oplossing weer gevolgd wordt door probleem. Het aannemen van een oplossing leidt bijvoorbeeld tot beter inzicht in het probleem waardoor dit weer verder onderzocht kan worden.

### 2.2 probleembeschrijving

Het gebied van de zichzelf aanpassende draagsystemen is nog een jong onderzoeksveld. Het complexe eraan is dat het de kennis van veel vakgebieden samen moet brengen om zich van daaruit verder te ontwikkelen. Het bijeenbrengen van al deze kennis vergt een team van mensen, immers de vakgebieden zijn allen zo breed dat niet een mens ze allen kan bevatten. Bovendien is het nog niet duidelijk welke kennis voor de zichzelf aanpassende draagsystemen wel en welke niet relevant is.

Voor dit afstuderen is er in eerste instantie niet een duidelijk probleem. Er is bijvoorbeeld geen behoefte aan een bepaald product, of een ontwerp met strikte randvoorwaarden. Eigenlijk bestond de wens om enkel uit enthousiasme voor het 'zichzelf aanpassende' iets te onderzoeken. In die zin is eigenlijk het hele afstudeerwerk een probleemonderzoek. Of eigenlijk het zoeken naar problemen, want het is nog niet duidelijk wat de problemen zijn. Daarom spelen ook de conclusies en aanbevelingen een belangrijke rol (hoofdstuk 9).

Om het werk in te kaderen is een futuristisch gebouwontwerp gekozen om de resultaten aan te reflecteren. Door de aard van het ontwerp belemmert het echter niet de vrijheid van het onderzoek. De probleemstelling van dit rapport kan echter niet zijn dat voor dit ontwerp een draagconstructie ontworpen dient te worden. Dat probleem speelt wel, maar is binnen dit afstuderen van een andere categorie, namelijk van een geleidende in plaats van een leidende.

Uiteindelijk is het afstuderen dan ook meer een verkenning van een nieuw veld en een onderzoek naar de mogelijkheden. Het zou de aanzet moeten geven tot een uitgebreider onderzoek.

### 2.3 probleemdefinitie en doelstelling

Voor dit afstudeerwerk kunnen we aldus het probleem en het doel als volgt kernachtig formuleren:

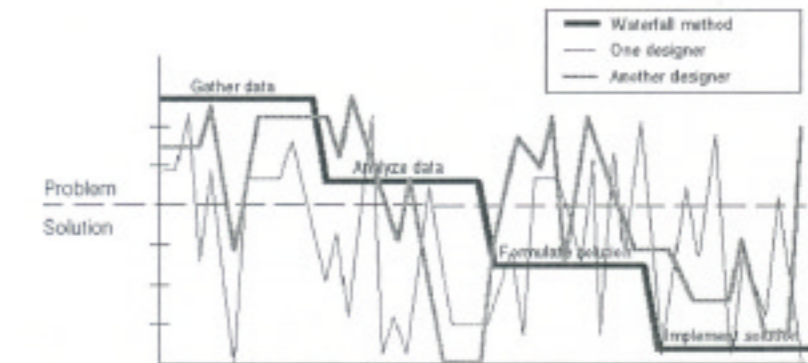
#### Probleemdefinitie

*Door de onbekendheid met het ontwerpen van zichzelf aanpassende draagconstructies is inzicht nodig in de problemen die optreden bij het ontwerpen van dergelijke constructies.*

#### Doelstelling

*Door het ontwerpen van een zichzelf aanpassende draagconstructie moet duidelijk worden wat de problemen zijn waar de ontwerper van een zichzelf aanpassende draagconstructie mee te maken krijgt.*

In het kader van dit afstudeerwerk wordt hiertoe, na literatuuronderzoek, een beweegbare constructie ontworpen, en een virtueel prototype van de constructie gemaakt, om de werking van het adaptieve te kunnen onderzoeken en valideren. De verslaglegging vindt plaats middels een rapport en een website.



Figuur 2.1. Schematisch oplossingsproces

### 3. kinetische architectuur

Architectuur gaat volgens velen over de ordening van ruimte. Het vormgevingsaspect speelt daarin een belangrijke rol, maar ook de maatschappij waarin de architectuur tot stand komt. Ook de functie van het gebouw, het budget en/of de eisen en wensen van de opdrachtgever spelen hun rol in de totstandkoming van architectuur. Er zijn nog veel meer aspecten die een rol kunnen spelen. Behalve zekere behoeftes zijn er ook zaken die mensen op een bepaalde manier 'neigen' te doen. Het kiezen van een rechte lijn voor het lopen van de kortste route bijvoorbeeld. Ook dingen neigen processen op een bepaalde manier te doorlopen, vaak afgeleid van bepaalde natuurwetten.

Om al dit soort aspecten te betrekken in het vormgevingsproces introduceert Christopher Alexander [34] het woord kracht. Deze krachten werken allemaal met een bepaalde intensiteit in op een medium waardoor een vorm ontstaat. 'Forces generate Form'. Hoewel dit voor complexe, door mensen gemaakte vormen meer als metafoor gezien moet worden, kan het letterlijk gelden voor eenvoudige natuurlijke processen. Zelf toont hij het aan met het ontstaan van ribbels op een zandvlakte ten gevolge van wind. De 'krachten' die hierbij een rol spelen zijn (1) het proces dat bij een onregelmatigheid in het oppervlak de loefzijde aangroeit, (2) het feit dat de afstand waarover zandkorrels getransporteerd worden ongeveer constant is, (3) het effect dat de ribbels zich gaan herhalen op vaste afstanden doordat de transportafstand constant is, (4) het effect dat de landende doordat met hun impact kruip veroorzaken en (5) het overblijven van de grotere korrels op de kruin van de ribbels omdat de kleinere worden weggeblazen.

Een belangrijke vraag blijft de relatie tussen de krachten en de uiteindelijke vorm. Voor het voorbeeld van de zandvlakte is deze relatie betrekkelijk eenvoudig, maar de complexiteit van grotere problemen, en de tussenkomst van mensen, maakt de relatie troebel. Ondersteuning van de techniek is vereist.

Het krachtenspel is een dynamisch spel. De meeste krachten zijn immers tijdsafhankelijk. Dit wordt steeds duidelijker zichtbaar doordat veranderingen (sociologisch, technologisch, biologisch) elkaar steeds sneller opvolgen. Afhankelijk van het tijdstip van het bepalen van vorm, zou dus steeds een ander resultaat verkregen worden. Statische architectuur (zoals we de meeste architectuur kennen) wordt daarmee dus een momentopname, 'the permanent expression of an age - the freezing of an era' of 'the recording in stone of an isolated fragment of history'. Interessant in dit verband is dat Calatrava over kracht praat als 'frozen movement'.  $F=ma$  waarbij de versnelling, de beweging, als het ware in de massa wordt opgesloten. De beweging wordt opgesloten of bevroren in de bouwmassa en geeft op die manier vorm aan de kracht. Het gevolg echter kan zijn dat een ontworpen gebouw vervolgens nooit meer helemaal voldoet, of past in zijn omgeving.

Een manier om hiermee om te gaan is om in een gebouw ruimte te laten bestaan voor veranderingen (als onderzocht in Mies van der Rohe's universal space). Andere interpretaties, andere tijdsgeest, andere toepassing. Een gebrek aan dit soort oplossingen is dat het ontwerp wel de ruimte laat voor, maar nooit precies aansluit bij de in het spel zijnde krachten. (Fig. 3.1)

De laatste hier besproken mogelijkheid doet dit wel; door zich tijdens de levensfase aan te passen aan de veranderende krachten. We spreken in dit geval over adaptieve of kinetische architectuur.

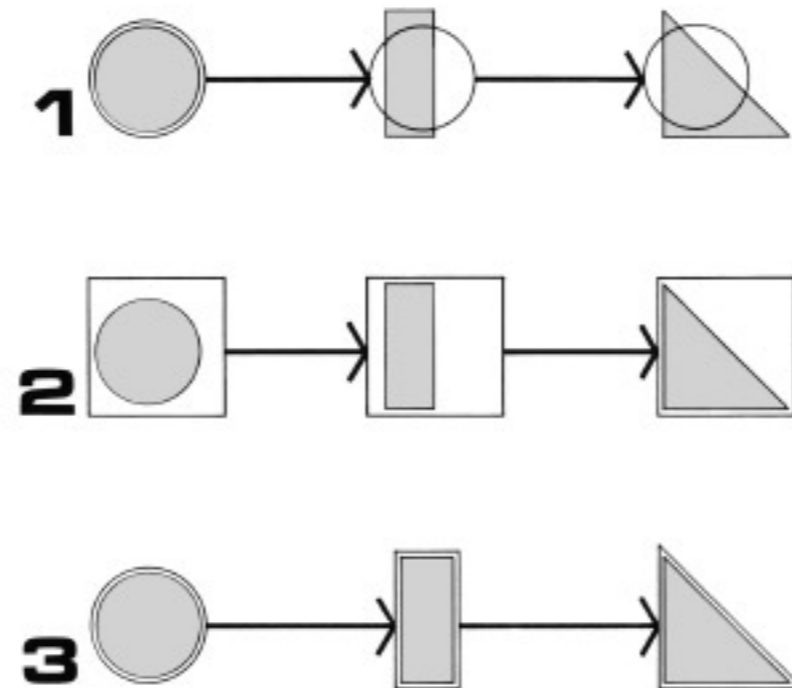
Er zijn met betrekking tot beweging en snelheid in architectuur verschillende indelingen te maken. In het volgende is gebruik gemaakt van 5 categorieën, die uitgaan van uiterlijke- en bewegingsvorm.

#### 3.1. statisch

Een in uitgangspunt statisch gebouw is zoals eerder gesteld een momentopname, en als zodanig onderhevig aan interpretatie. Het gebouw is of wordt opgenomen in een omgeving waarin ook andere al of niet statische gebouwen staan en hoe langer het gebouw er staat, hoe meer het een deel wordt van de gevestigde situatie. De perceptie en de interpretatie van het gebouw is dus niet een statische, maar verandert met de omgeving. Een avant-gardistisch gebouw kan op deze manier veranderen in een historisch interessant object.

Een aspect dat toch vormveranderingen tot gevolg kan hebben, is de functie. Een verandering hiervan kan leiden tot restauratie, verbouwing of uitbreiding van het gebouw. Het betreft echter meestal wel veranderingen die in het oorspronkelijke ontwerp niet zijn meegenomen.

Het degenereringsproces is in sommige gevallen wel een ontwerpaspect. Duurzaam bouwen gaat soms gepaard met het toepassen van materialen die na de gebruikperiode van het gebouw 'op' zijn. Een voorbeeld hiervan is het kantoor van XX architecten in het Delftechpark in Delft. In het gebouw is onder andere karton toegepast, waarvan verwacht wordt dat de gebruiksduur 20 jaar is. Duidelijker zichtbaar is het degenereren bij het gebruik van koper in sommige gebouwen. Het oxideren ervan geeft

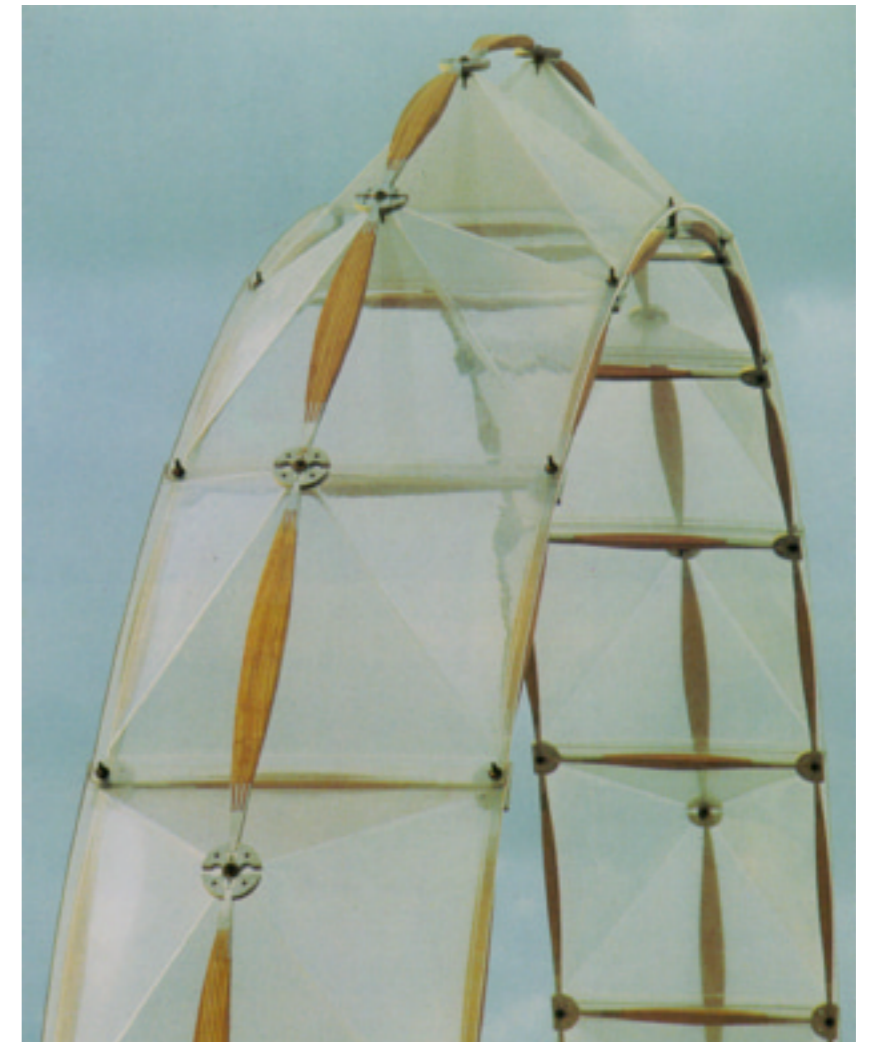


Figuur 3.1. Ruimtelijke oplossingen, schematisch



Figuur 3.2. Futuro House, Matti Suuronen

Figuur 3.3. IBM Tentoonstellingspaviljoen - onderdeel, Renzo Piano



het de gewenste groene kleur.

Door de architecten van het derde rijk werd architectuur gemaakt die mooie ruïnes op moest leveren. Dit was geïnspireerd op de resten van gebouwen uit het Romeinse rijk die nog altijd de glorie uitstraalden van het eens zo machtige imperium. De meeste gebouwen die door het nazi-regime gebouwd werden waren echter van zulke povere kwaliteit dat degeneratie al veel te vroeg intrad en van ruïnes over 1000 jaar weinig te zien zal zijn.

### 3.2. enkelvoudig bewegen

Van gebouwen waarvan het dak open en dicht kan, kijken tegenwoordig niet veel mensen meer op, veel voetbal stadions zijn hier tegenwoordig immers mee uitgerust. Toch kan een enkelvoudige beweging een prachtig schouwspel opleveren. Neem het paviljoen van Koeweit op de expo in Sevilla van Calatrava (weblink03), of het openen en sluiten van een Hoberman constructie (weblink01). Sommige paraplu constructies van Frei Otto kunnen zich openen en sluiten waarbij de beweging een performance is die deel uitmaakt van de architectuur.

De beweging van dergelijke constructies kunnen deel uitmaken van een vaste sequens (ze zijn het gevolg van een bepaalde choreografie), of ze kunnen voortkomen als reactie op een bepaalde omstandigheid. In die zin zijn ze adaptief (het openen van een paraplu, het sluiten van een dak bij regen).

### 3.3. verplaatsen

Een gebouw kan ook als geheel verplaatsen, een verandering van locatie ondergaan. Robert Kronenburg beschrijft in zijn boek 'Houses in Motion' [26] dat dat in verschillende toestanden kan gebeuren.

Als compleet gebouw, in het eerste geval, zoals een caravan of bouwkeet. Ook het Futuro House van de Fin Matti Suuronen (Fig 3.2, weblink06) is ontworpen om gemakkelijk van de ene naar de andere plaats getransporteerd te kunnen worden. Zowel met het materiaal (kunststof, lichtgewicht) als met de verschijningsvorm (een ufo maakt overal een opvallende indruk) is in het ontwerp daarop ingespeeld. Als een dergelijk gebouw zich op eigen kracht verplaatst, vertroebelt het verschil met - en is het misschien beter te spreken van een voertuig.

Een gebouw kan ook zodanig worden ontworpen dat het eenvoudig (de)montabel is. Het kan op die manier makkelijk worden vervoerd waardoor moeilijk te bereiken gebied voorzien kan worden. Ook is een dergelijk concept geschikt voor een reizende tentoonstelling, omdat het gebouw eenvoudig met de tentoonstellingsstukken getransporteerd kan worden. Een voorbeeld hiervan is het IBM tentoonstellingsgebouw van Renzo Piano. (Fig. 3.3)

De derde optie is een gebouw dat gemakkelijk op en af te bouwen is door een opvouwbaar of opblaasbaar draagsysteem. Als beschreven in het hoofdstuk over constructies heeft de Spanjaard Pinero (Fig. 3.4) een opvouwbaar theater ontworpen. Voor het vervoeren van de constructie was een vrachtwagen nodig en met eenvoudige handelingen werd de pantografische constructie uitgevouwen. Opblaasbare toepassingen vind men bijvoorbeeld bij de brandweer, als kleedruimte voor het personeel bij calamiteiten. Ook het reizende gebouw Atilla van Oosterhuis.nl is

opblaasbaar wat het makkelijk te transporteren maakt.

### 3.4. dynamisch

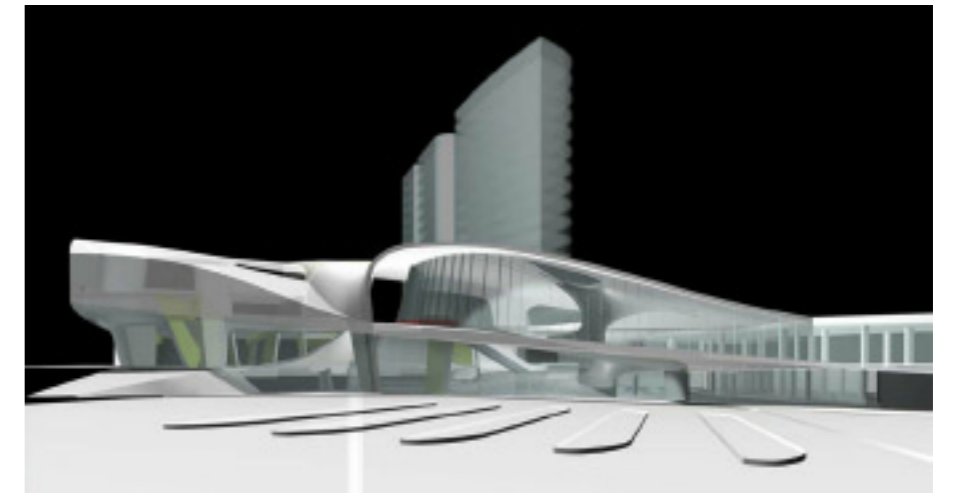
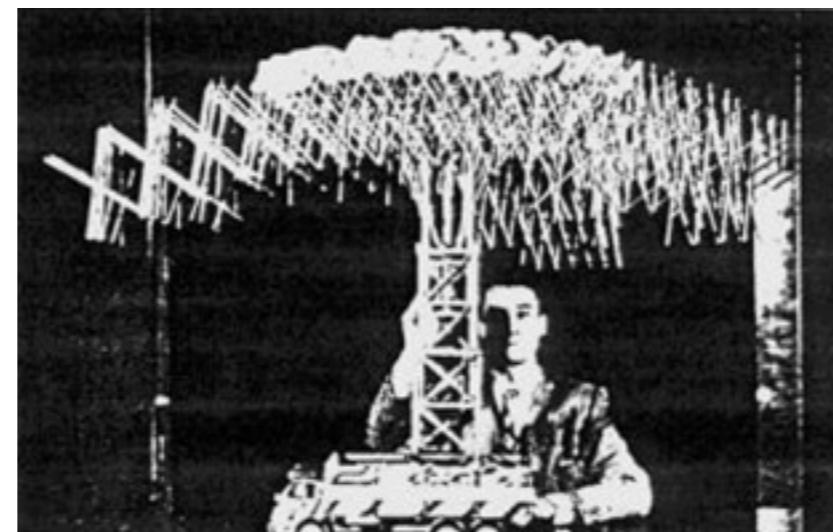
Veel architectuur die tegenwoordig wordt gebouwd en voorgesteld, wordt ontworpen op basis van relaties die worden gelegd. Van belang is dan dat bekend is waartussen relaties worden gelegd en hoe die relaties eruit zien. Een bureau als MVRDV staat erom bekend veel informatie te verzamelen en daarmee vervolgens te 'datascapen', vormgeven aan de data in diagrammen. Tegenwoordig gebruiken veel bureaus deze techniek en onderscheidt men zich vooral door de keuze uit variabelen en gegevens waartussen een relatie wordt uitgebeeld. Interessant is overigens dat deze techniek niet alleen van toepassing hoeft te zijn op architectuur. De denkwijze die voortkomt uit het spelen met gegevens en het op inzichtelijke wijze weergeven hiervan biedt de mogelijkheid een veel breder spectrum aan problemen inzichtelijk te maken.

Sommige relaties en gegevens zijn afkomstig van bewegingen. Verkeersstromen zijn bijvoorbeeld gebruikt als uitgangspunt voor het nieuwe stationsgebouw in Arnhem van UN Studio (Fig 3.5). Deze bewegingen of de gegevens van de bewegingen worden op een bepaald moment in het ontwerpproces gesteld, bevroren. Het resultaat is dus een statisch gebouw, maar het kan wel beweging uitdrukken. Het is dynamisch in de totstandkoming en in de ervarende zin van het woord. Met voorbeelden van bureau's als UN Studio en Zaha Hadid (Fig. 3.6).

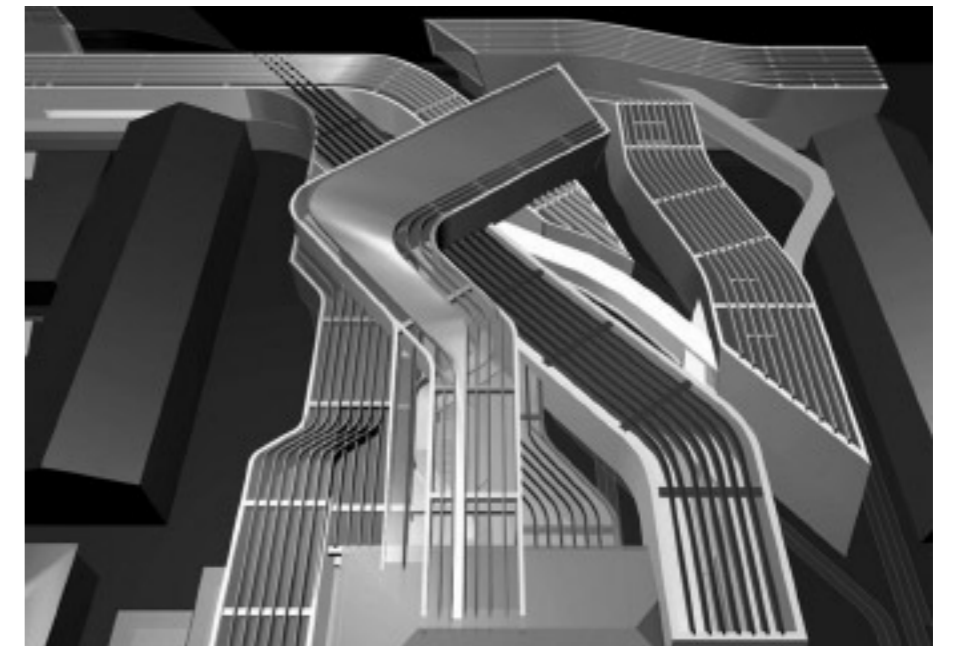
#### 3.4.1. productie

Greg Lynn wordt gezien als een pionier op het gebied van 'mass customisation'. De betekenis van deze term heeft te maken met het produceren van grote aantallen unieke producten. Van grote betekenis hierin was zijn project Embryologic Houses © (Fig. 3.7) waarbij een proces ontwikkeld werd. In dit proces kan op een seriematige manier, door middel van geparametriseerde 'standaard'-elementen een huis worden gemaakt dat anders is dan alle andere. Het vertoont uiteraard gelijkenissen, maar elk product heeft een unieke vorm.

Het interessante van mass customisation is dat de uiteindelijke gebruiker hierin de rol van ontwerper voor een deel kan spelen. Bepaalde ontwerpbeslissingen kunnen door de gebruiker worden genomen en hij



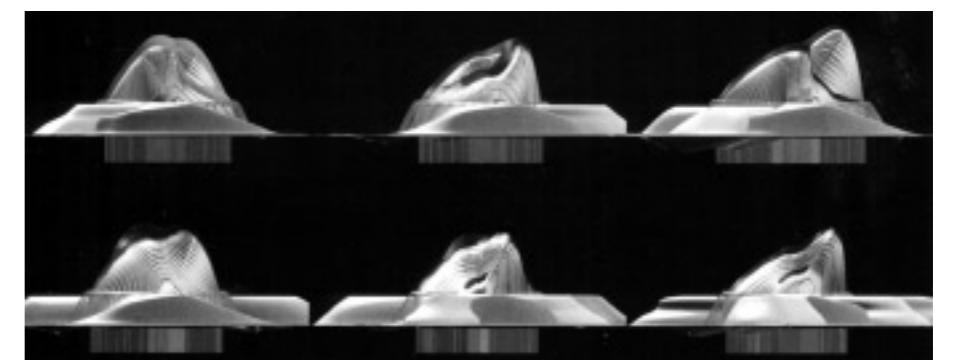
Figuur 3.5. Nieuw stationsgebied Arnhem, UN Studio



Figuur 3.6. Ontwerp voor 'Centro Nazionale per le arti Contemporanee' in Rome, Zaha Hadid

← Figuur 3.4. Uitvouwbare constructie, Emilio Pinero

Figuur 3.7. Embryologic House ©, Greg Lynn Form





communiceert daarbij met het flexibele productieproces. De gebruiker wordt hiermee een 'prosumer', hij produceert en gebruikt het eindproduct. Een voorbeeld hiervan is het Variomatic House van Kas Oosterhuis [i02]. Op de website van Oosterhuis.nl kan een model van het huis bekeken worden en kunnen parameters als hoogte, breedte en kleur worden aangepast. De architect ontwerpt niet meer het eindproduct, maar het proces dat daartoe leidt.

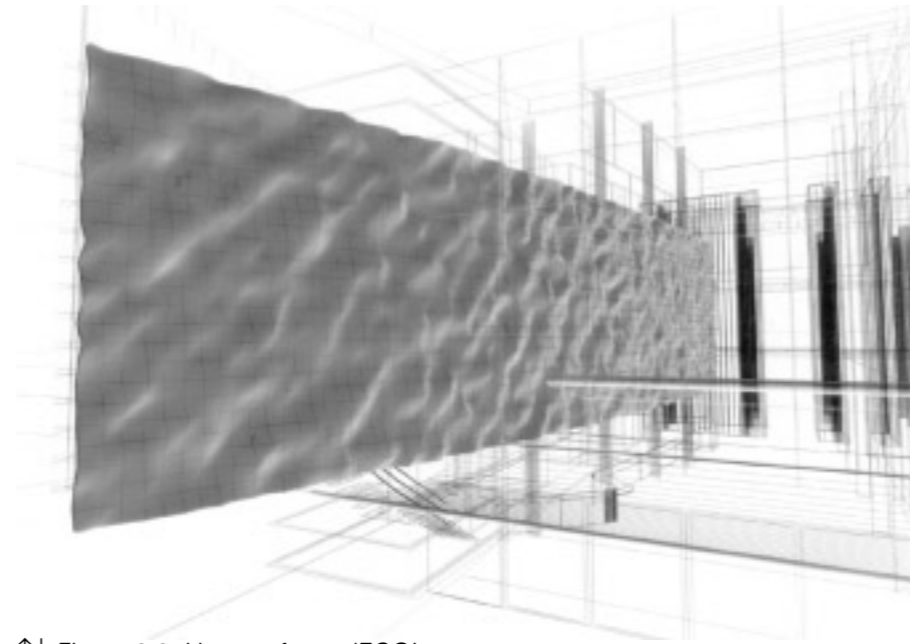
Het idee is dat uiteindelijk de kosten van het produceren van unieke producten die van seriematig gemaakte gelijke producten zal evenaren. De productiemethoden zullen dan moeten veranderen doordat een veel flexibeler proces benodigd is dan de meeste huidige productieprocessen. Ideeën hiervoor zijn onder andere gedaan door Lars Spuybroek voor een flexibele mal waarover de huid van een huis kan worden gemaakt. Door de mal te vervormen ontstaat bij de volgende afdruk een andere (unieke) vorm.

### 3.5. vrij bewegende gebouwen

De laatste categorie gebouwen kent nog geen uitgevoerde voorbeelden. De vormverandering is niet eenduidig en kan op verschillende manieren tot stand komen: als een door de ontwerper geregisseerde beweging, als een reactie op de omgeving of de gebruikers (passief) of uit eigen wil (actief), als ware het een organisme. Voorbeelden die binnen deze categorie vallen zijn er niet veel.

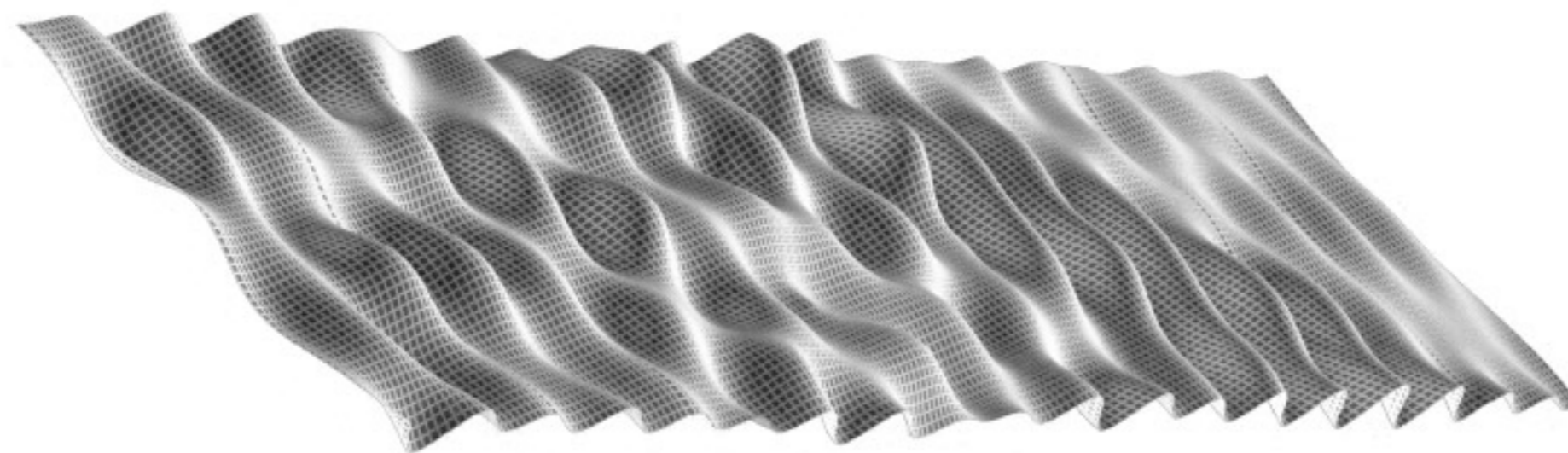
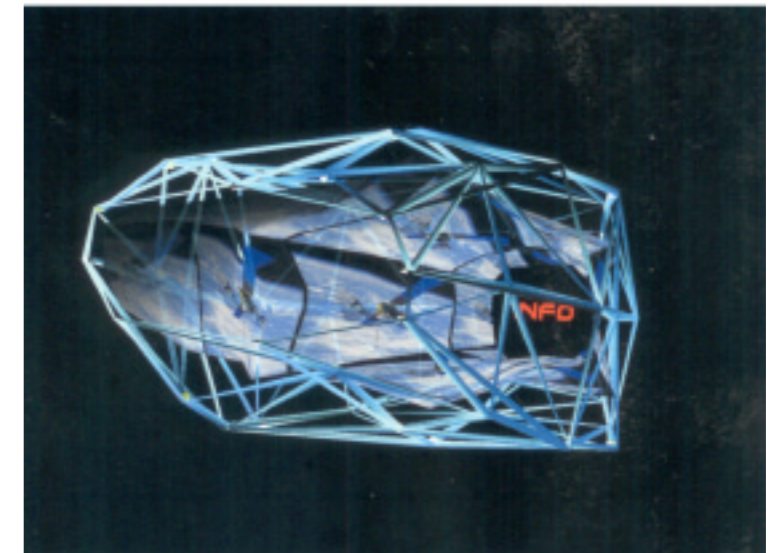
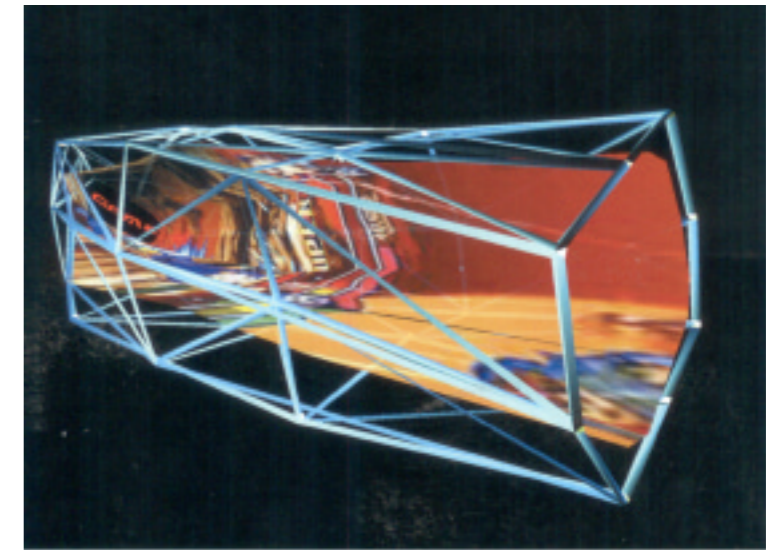
#### 3.5.1. Hyposurface

dECOi, het bureau van Mark Goulthorpe, heeft in samenwerking met allerhande experts een wand ontwikkeld die kan reageren op voorbijgangers. De wand vervormt, kan verschillende poses aannemen, maar er kunnen ook golfpatronen over de wand bewegen. De wand is opgebouwd uit 576 pneumatische pistons die verbonden zijn aan de vlakke elementen die de wand vormen. Door de krachten die zouden optreden was het niet mogelijk de wand van een elastisch materiaal te maken dat over de hele wand zou doorlopen, daarom zijn metalen, driehoekige elementen toegepast. Het in- en uitschuiven van de pistons zorgt voor de vervorming en wordt aangestuurd door een centraal



↑↓ *Figuur 3.8. Hyposurface, dECOi*

→ ↓↓ *Figuur 3.9. Trans-ports, Oosterhuis.nl*



systeem dat golfpatronen ontwikkelt aan de hand van bijvoorbeeld geluid. Het is ook denkbaar dat met sensoren de lichaamswarmte van een voorbijganger wordt gemeten waarop de wand reageert.(Fig. 3.8, weblink04)

### 3.5.2. Trans-ports

Trans-ports van Kas Oosterhuis is een project dat interactie aangaat met de omgeving. Op verschillende plaatsen op de wereld (in havensteden) wordt een ruimte gebouwd die informatie neemt en geeft en daarbij behalve een actieve huid ook een actieve constructie heeft, en kan vervormen. De informatiestroom blijft niet beperkt tot één gebouw, maar de verschillende instanties van Trans-ports communiceren via een datanetwerk. De locale maatschappij van Hong Kong heeft daardoor effect op die van Rotterdam of Sydney.

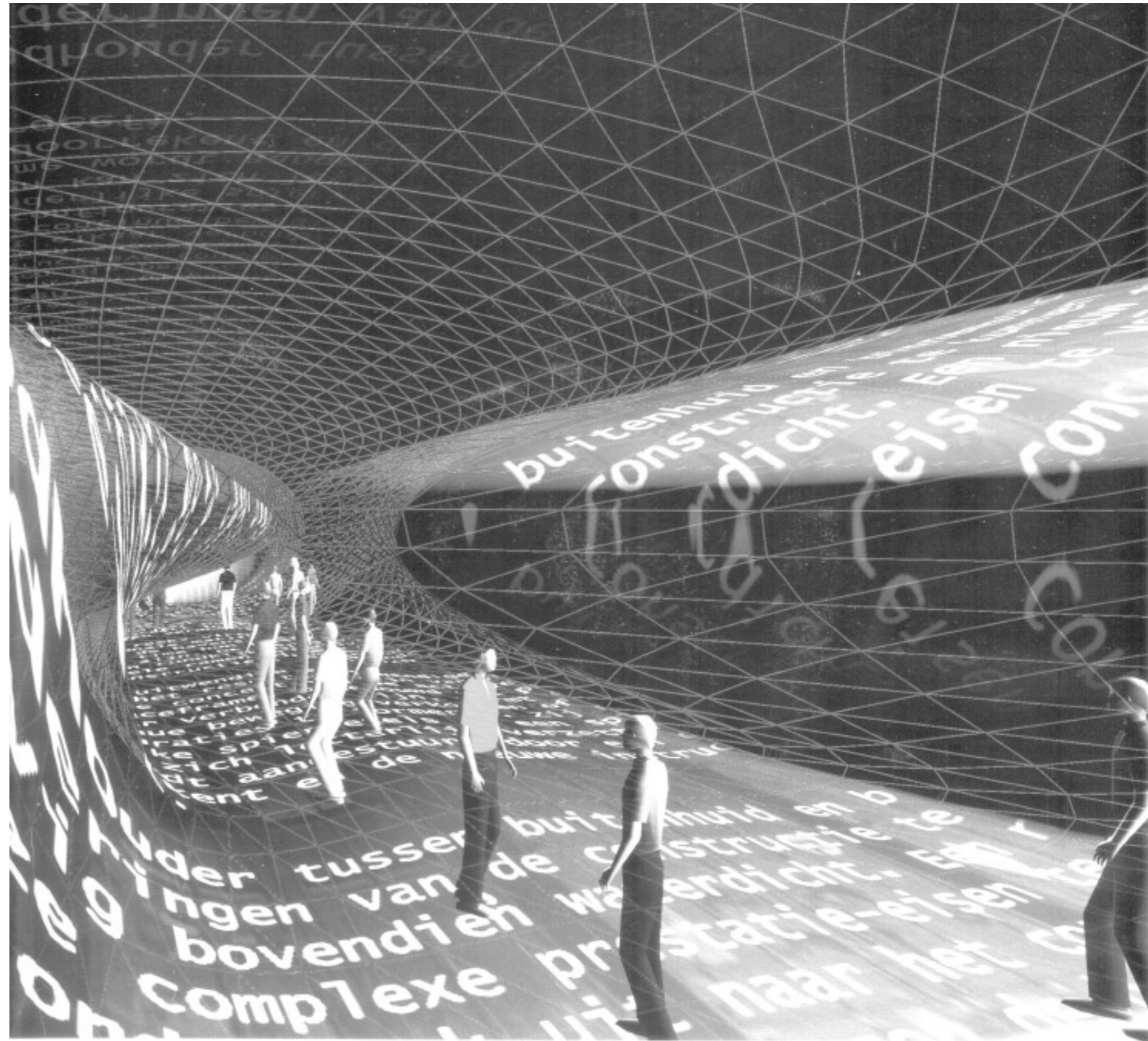
Het project is op de biënnale van Venetië uitgevoerd als interactieve installatie met vier grote schermen, maar in ontwerp heeft Trans-ports een body die transformeert van de ene vorm naar de andere. Daarbij niet alleen reagerend op de omgeving, maar ook zelf input leverend aan die omgeving. Trans-ports neemt actief deel aan zijn omgeving.

Het maken van dit gebouw is alleen goed mogelijk met onconventionele oplossingen. Is het niet helder om voor een gebouw dat acteert als een organisme, ook wat betreft de maakbaarheid te kijken naar organismen? De draagconstructie als een skelet van botten, bijeengehouden en vervormend door spieren. En een actief, adaptief reagerende constructie; de verschillende taken worden immers zo complex dat een verdeling van de taken logisch lijkt. Decentralisatie vereenvoudigt de taken, maar vertroebelt het overzicht. Maar werkt het bij organismen niet ook zo? En is het niet het principe van zwermgedrag? Onderzoek zal aan moeten tonen dat een constructie op basis van zwermtheorie werkt.

In de beschrijving van categorie 5 gebouwen doemt de parallel op met intelligente robots. Misschien zijn dit soort gebouwen, misschien is Trans-ports wel een robot, een intelligente machine. Het doel van de machine is het onderbrengen van mensen. Ze in verwarring brengen, of ze op hun gemak stellen. Interactie met ze aangaan. Misschien is Trans-ports eigenlijk meer een modern kunstwerk. Kinetic art. Als een strandbeest van Theo Jansen (weblink05), een object dat de fascinatie voor beweging probeert bloot te leggen.

De bewegende ruimte van Oosterhuis lijkt weinig te maken te hebben met een bruikbaar gebouw. Daarvan willen we immers dat het geschikt is voor wat wij willen. Een zekere functionaliteit, betrouwbaarheid en voorspelbaarheid. Waarom bouwen we iets waarvan we niet weten wat het gaat doen? Cultuur was toch de tegenhanger van natuur?

Misschien is Trans-ports inderdaad wel meer kunst dan architectuur (waarbij aangemerkt moet worden dat binnen de visie van de auteur kunst een onderdeel van architectuur kan zijn). Een project dat de grenzen verkent tussen reëel en virtueel, lokaal en globaal, mens en machine, functionaliteit en ervaring en tenslotte de grens van het maakbare. Vooral deze laatste is thema van dit afstuderen.



## 4. draagconstructies

De constructie van een object moet er voor zorgen dat het object voldoende sterk, stabiel en stijf is. Dat geldt althans voor de civiele techniek, waar we spreken over bruggen, viaducten, dammen, sluisen, gebouwen en andere, meest grote objecten die de leefomgeving van de mens bepalen. Het is daarom van belang dat de constructies veilig zijn, bij een defect zijn immers mensenlevens in het geding. Daarnaast staan bij het falen of uitvallen van een (deel van de) constructie vaak grote economische belangen op het spel. Een verkeersbrug waarvan per dag duizenden forenzen gebruik maken, of waarover duizenden tonnen vracht worden getransporteerd. Een dam of een dijk die een gebied beschermt waar veel industrie gevestigd is. Of een gebouw waarin duizenden mensen werken.

Van de materialen en de constructiesystemen is in de loop van de jaren steeds meer bekend geworden. Hierdoor werd het mogelijk om steeds preciezer aan de wensen en eisen te voldoen die aan de constructies gesteld werden. Onderzoek in de mechanica, in de materiaalkunde, de opkomst van de computer en economische motieven hebben geleid tot de ontwikkeling van deze kennis. De microstructuur van de grote bulkmaterialen beton en staal is uitgebreid onderzocht zodat hogere betonsterkten en sterkere staalsoorten leidden tot hogere gebouwen en grotere overspanningen. Daarnaast zijn nieuwe materialen opgekomen die wellicht gunstiger eigenschappen hebben dan beton of staal, maar belangrijker nog, die op maat gemaakt kunnen worden voor een specifiek doel. Ook worden nieuwe constructiesystemen bedacht, oude wordt nieuw leven ingeblazen (door bijvoorbeeld toepassing van een ander of nieuw materiaal), of bestaande systemen worden geoptimaliseerd. Het voorgespannen beton maakte beton interessant voor lichte draagsystemen en men heeft glazen en kartonnen schalen gebouwd. Megaconstructies worden hoger en tui- en hangbruggen langer. Een aantal problemen zou misschien echter op een andere manier kunnen worden opgelost. In verband met de scope van het afstuderen, richt dit hoofdstuk zich vooral op gebouwen en voor gebouwen relevante onderwerpen. In het nu volgende wordt eerst een inleiding gegeven op problemen die met actieve systemen kunnen worden opgelost. In het tweede deel van het hoofdstuk wordt specifiek op die oplossingen ingegaan.

### 4.1. waarom een actief systeem?

#### 4.1.1 wind

Hoe hoger gebouwen worden, hoe meer wind ze vangen. Onevenredig meer, omdat het in de hogere luchtlagen harder waait, en omdat het gebouw daar meestal uit de luwte van de andere bebouwing treedt. De belangrijkste windbelasting treedt op uit effecten die stroming gerelateerd zijn. Het loslaten van de wervels stroomafwaarts kan het gebouw in trilling brengen. Het exacte windgedrag is moeilijk te voorspellen, maar middels computersimulaties en modelonderzoek (windtunnel) kan een redelijke schatting gemaakt worden van de optredende effecten. De rekenregels uit de normen lopen veelal achter (en blijken soms onveilig![35]), omdat ze uitgaan van verouderde kennis en van gebouwhoogtes die tegenwoordig overschreden worden.

Toch is het grootste probleem niet zozeer onveiligheid, maar het comfort

van de gebruikers. Te grote trillingen in bepaalde frequentiegebieden maken gebruikers zeeziek en daarmee hun kantoor onwerkbaar of hun woning onleefbaar. In oudere wolkenkrabbers werden dergelijke trillingen vanzelf gedempt door het gewicht van de constructie en de gebruikte materialen (baksteen), maar voor de steeds slanker wordende en lichtere gebouwen moeten andere oplossingen bedacht worden.

Oplossingen in de lijn van stijvere constructies hebben een grens; het leidt tot inefficiënt materiaalgebruik en dus te kostbare constructies. Daarom worden oplossingen bedacht die de trillingen dempen. Dat kan eenvoudig gezien passief of actief gebeuren.

#### 4.1.2 aardbevingen

Aardbevingen kunnen trillingen veroorzaken die behalve het gebruikerscomfort, ook de algehele stabiliteit van het gebouw kunnen ondermijnen. Elk jaar weer kosten de gevolgen van aardbevingen mensen het leven. Soms vele duizenden. Tot op zekere hoogte kan door correcte uitvoering van constructies veel schade voorkomen worden, de opkomst van het gewapend beton heeft het voor een deel te danken aan het goede gedrag tijdens aardbevingen, maar voor hogere gebouwen moeten aanvullende maatregelen getroffen worden. Ook hier bestaan passieve en actieve methoden. Het isoleren van een gebouw van zijn ondergrond is een veel toegepaste passieve oplossing, maar steeds meer gebouwen worden ook met actieve dempers uitgerust.

#### 4.1.3 wisselende gebruiksbelasting

Een vloer in een gebouw wordt zelden tot nooit maximaal belast. Van een vakwerkkligger onder een kraanbaan worden bij het verrijden van de kraan achtereenvolgens sommige staven zwaarder en minder zwaar belast. Hetzelfde geldt voor een zendmast bij wind uit verschillende richtingen. En in iets mindere mate, door het aandeel van het eigengewicht geldt het voor de kolommen in een gebouw, het draagsysteem van de gevel, de tuien of hangers van een brug, enzovoort. Praktisch gezien is het materiaalgebruik wellicht gerechtvaardigd, theoretisch is het inefficiënt.

Het optimaliseren van draagsystemen heeft tot nu toe al bijgedragen aan een enorme reductie in het materiaalgebruik. Hoewel in Westerse landen niet materiaal, maar arbeid het duurste is, kan een reductie in materiaalgebruik wel degelijk leiden tot een kostenbesparing. Niet minder belangrijk is de reductie van het eigengewicht van een constructie.

Met moderne rekenmethoden en computertechnieken is het mogelijk alleen daar waar het echt nodig is materiaal in te zetten. Onderzoek naar topologische optimalisatie is in volle gang [27] en [28], maar het uitgangspunt blijft een maximaal belaste situatie voor alle elementen.

In een actieve adaptieve constructie echter zouden bepaalde elementen elkaar kunnen helpen een belasting af te dragen. Een vakwerkstaaf die minder zwaar belast wordt, terwijl een andere volledig is belast, zou belasting naar zich toe kunnen trekken. De staven worden toch nooit allemaal tegelijk aangesproken.

#### 4.1.4 transport en opslag

Het transporteren van constructies kan veel werk betekenen. Het nieuwe hoofdgebouw van transportfirma Mammoet is bij wijze van stunt in zijn geheel van de fabriek naar Schiedam getransporteerd. Ook is het mogelijk

om ten gunste van nieuwbouw, bestaande gebouwen te verplaatsen. Het is echter een aanzienlijke ingreep, behalve het transporteren moet namelijk nieuwe infrastructuur worden aangelegd, nieuwe toe- en afvoer van NUTS-voorzieningen en vaak een nieuwe fundering.

Een constructie die zich kan aanpassen, kan bijvoorbeeld transformeren naar een transport toestand, of kan zich aanpassen aan een nieuwe ondergrond. Een fundering is wellicht overbodig, omdat zettingen door het gebouw zelf worden opgevangen. Wat betreft aan- en afvoer van voorzieningen: het gebouw is self-supporting, of tankt af en toe even bij. En als het gebouw een tijd lang niet gebruikt wordt, kan het zich transformeren naar een opslag toestand en wordt het ergens bewaard.

#### 4.1.5 nieuwe vormen

Bij het construeren van gebouwen is de constructeur steeds vaker betrokken bij het maken van nieuwe vormen. Door de ontwikkelingen van de modelleer- en tekensoftware is het voor vormgevers en architecten mogelijk geworden ingewikkelde vormen (digitaal) vast te leggen. De vormentaal die hieruit in een aantal gevallen voortkomt wordt door sommigen wel vergeleken met een buitenaardse, vormeloze massa uit een horrorfilm van 1958.

Behalve een betere communicatie tussen verschillende software pakketten, vereist deze nieuwe vormentaal een ontwikkeling van de visie op de draagconstructie. In veel gevallen blijken de voorhanden zijnde middelen niet te voldoen, met teleurstellingen als gevolg van alle partijen. Dit betekent op dit moment vooral dat het vakgebied van de draagconstructies zich verder moet ontwikkelen, om architectuur meer maakbaar te maken. Aan de andere kant kan worden gesteld dat er opnieuw een bepaald evenwicht gevonden moet worden. Niet alles wat in cyberspace mogelijk is, is immers mogelijk in realspace.

Complexer wordt het als de vormen behalve van hun orthogonaliteit, ook van hun statische toestand ontdaan worden. In 1970 werd Kinetic Architecture [7] geschreven, een boek dat een beschrijving geeft van wat onder kinetische architectuur verstaan kan worden en dat (voor een deel) aannemelijk maakt dat dergelijke architectuur een rol gaat spelen in de toekomstige maatschappij. Het boek maakt duidelijk dat voor het maken van kinetische architectuur nieuwe samenwerkingsverbanden tussen verschillende vakdisciplines gevonden moet worden, waarbij vooral de belangrijke positie van werktuigbouwkundig ingenieurs in het bouwproces opvalt. Maken we nog gebouwen, of worden het machines? In elk geval is het duidelijk dat bij het ontwerpen van een draagconstructie andere aspecten komen kijken dan tot dan toe het geval was, want naast de taken die de draagconstructie al had, moet deze nu ook kunnen bewegen.

## 4.2. actieve systemen

Er zijn hoofdzakelijk twee manieren om om te gaan met activiteit in de constructie. Een manier gaat uit van het controleren en manipuleren van de krachten die op de constructie werken. De andere manier gaat uit van het controleren van de gevolgen van de krachten op de constructie, dat wil zeggen, de spanningen en vervormingen.

### 4.2.1 AMD

Active Mass Damping is een systeem om actief de trillingen ten gevolge

van wind of aardbevingen te dempen. Hierbij wordt een massa met behulp van een actuator aangedreven. Dit moet een kracht opleveren die de trilling tengevolge van een aardbeving of wind uitdempt. De voorloper van dit systeem, het passieve massa dempingsysteem gaat uit van een gedempt twee massa veersysteem. Dit kan worden ingesteld op bijvoorbeeld een kritieke frequentie van het gebouw. Het voordeel van een actief systeem is dat een groter frequentiebereik bestreken kan worden. Sommige systemen werken standaard passief, maar gaan over op de actieve modus als de excitaties van het gebouw te groot worden. (figuur 4.1)

In het Hankyu Chayamachi gebouw in Osaka is het helicopterplatform de massa die met behulp van actuatoren aangedreven kan worden om trillingen te dempen. Er zijn hier in twee richtingen actuatoren aangebracht die ook torsietrillingen kunnen dempen. (figuur 4.2)

#### 4.2.2 actief schoren

Actief schoren is een ingewikkelder systeem omdat het de eigenschappen van het gebouw op verschillende manieren kan veranderen. Schoren die in het gebouw zijn aangebracht kunnen aan of uitgezet worden. Dit betekent dat plaatselijk, of in het hele gebouw de stijfheid verandert. Dit heeft vervolgens weer invloed op de optredende trillingen, onder andere omdat de eigentrillingen van het gebouw veranderen. Het systeem is in verschillende gebouwen toegepast en het bleek moeilijk om de trillingen effectief te dempen. Een gebouw waar de schoren aan de buitenkant duidelijk te zien zijn is het laboratorium voor aardbevingsonderzoek van de Kajima Corporation (de firma die het systeem ontwikkelde). (figuur 4.3)

#### 4.2.3 draagluchthallen

Draagluchthallen (of pneu's) zijn constructies van doek die net als een ballon hun stijfheid halen uit de spanningen in het doek. In de hal wordt een overdruk opgebouwd met behulp van ventilatoren. Buitenlucht wordt aangezogen en via een warmtewisselaar de hal ingeblazen. Daarnaast bestaat er meestal een retourstroom die lucht uit de hal aanzuigt, opwarmt en weer de hal in blaast.

De installatie die de luchttoevoer regelt is uitgerust met een windmeter die de windsnelheid registreert. Aan de hand hiervan wordt de druk in de hal al of niet opgevoerd, omdat bij hogere windsnelheden een stijvere constructie vereist is. Bij lagere windsnelheden mag de druk lager zijn waardoor de ventilatoren minder hard hoeven blazen. (figuur 4.4)

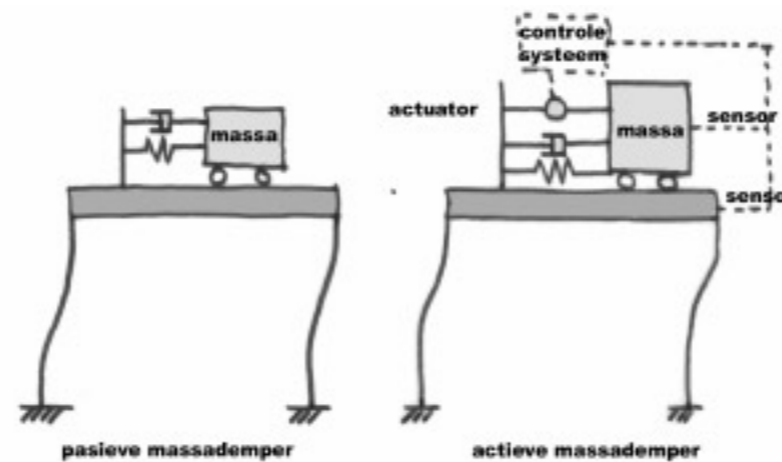
#### 4.2.4 form adaption

Form adaption houdt in dat de uiterlijke vorm van de constructie verandert om bijvoorbeeld de windstroming te beïnvloeden. Omdat de stroming rond de constructie bepalend is voor de erop werkende windkrachten, zijn het in feite de krachten die gemanipuleerd worden. Dit is het principe waarop de flaps van een vliegtuigvleugel werken. Het kan trillingen van het brugdek als vortex shedding, buffetting en flutter voorkomen. Overigens wordt er gedacht dat door het toepassen van microactuatoren in de coating van tuien ook het trillingsgedrag van de tuien kan worden aangepast.

Met het aanpassen van de vorm kan ook een ander effect bereikt worden. In Stuttgart, aan het institut für leichtbau entwerfen und konstruieren

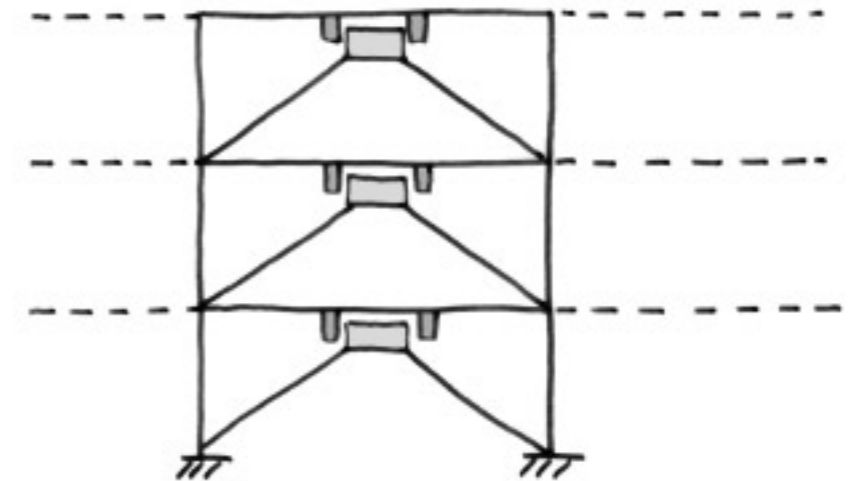
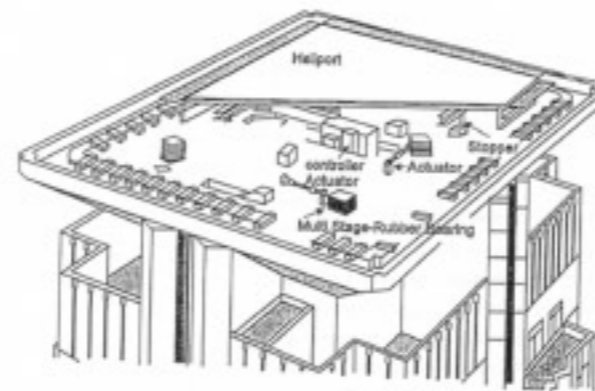
(ILEK), is een ligger ontwikkeld waarover een mobiele verticale last zich kan bewegen zonder dat deze verticaal verplaatst. Het systeem registreert op de twee opleggingen de oplegreacties en bepaalt aan de hand daarvan de locatie van de kracht. Vervolgens kan door het horizontaal bewegen van een van de steunpunten (één actuator) de ligger vervormd worden. De verplaatsing onder de last wordt zo constant gehouden. (figuur 4.5)

Ander onderzoek aan het ILEK heeft geleid tot een model van een vakwerklijger waarvan een aantal staven actief zijn; deze kunnen zich verkorten of verlengen. De ligger kan hierdoor vervormen, wat gevolgen heeft voor de verdeling van de krachten over de staven. Als ergens op de constructie een last aangrijpt, kunnen zwaar belaste staven worden 'geholpen' door lichtbelaste staven. De spanningen worden genivelleerd. Vervolgens kan een optimalisatie naar het minimum aantal actuatoren worden uitgevoerd. (figuur 4.6)



Figuur 4.1. Massademper systemen

Figuur 4.2. Hankyu Chayamachi gebouw met actief massadempingsysteem in helicopterplatform

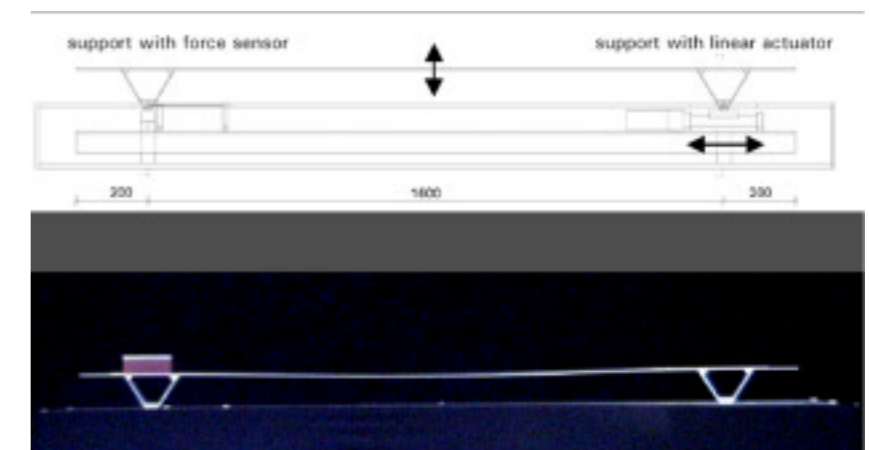


Figuur 4.3. Active bracing



Figuur 4.4. Draagluchthal in Vancouver, Canada, gebouwd voor de Expo in 1986. De plattegrond vormt een ellips met stralen 190m en 231m

Figuur 4.5. Stuttgarter träger



De hierop volgende stap is een actief 3D-ruimtevakwerk met actieve staven. In plaats van langs een lijn, kan een last zich nu over een vlak bewegen zonder dat de last zich verticaal verplaatst. Of de krachten worden genivelleerd en er treedt een vervorming op, dat hangt af van het uitgangspunt. Omdat een vlak is opgelegd op meerdere punten is het hier lastiger de precieze locatie van de belasting te bepalen. De krachten in de staven echter kunnen eenvoudig gemeten worden waardoor 'herverdeling' kan worden geactiveerd.

Ook andere dan 3D-ruimtevakwerkconstructies lijken geschikt te zijn voor uitvoering als actief systeem. In de ruimtevaart wordt veel gebruik gemaakt van uitvouwbare constructies. Hiervoor worden verschillende constructiesystemen toegepast waaronder tensegrity.

#### 4.2.5 tensegrity

Tensegrity is een uitvinding van Richard Buckminster Fuller, het patent dateert van 1962. Het woord is een samentrekking van de woorden tensile integrity. Het systeem houdt in dat de samenhang in een constructie bestaat bij de gratie van trekkrachten, die middels kabels worden overgedragen. De drukkrachten die door het afbuigen van de trekkrachten ontstaan worden opgenomen door drukelementen die elkaar niet mogen raken. Een ander kenmerk is dat de constructie niet verankerd hoeft te zijn aan een ondergrond of oplegging. Er zijn echter meerdere definities die een ruimere interpretatie van het begrip tensegrity mogelijk maken. Overigens was ten tijde van Fuller ook Kenneth Snelson als kunstenaar geïnteresseerd in tensegrity en beweren sommigen dat hij de uitvinder ervan is. Zijn sculpturen zijn beroemd en zijn veelal lineair van aard, de tensegrity wordt steeds in één richting uitgebreid. Het werk van Fuller richt zich meer op ruimtelijke constructies zoals koepels.

Het principe van tensegrity is wel uitgelegd met de ballonanalgie: door de interne overdruk in de ballon wordt de huid naar buiten gedrukt. De spanningen in de huid zorgen voor een tegenkracht die evenwicht maakt met de overdruk. Hoe hoger de interne druk, hoe groter ook de spanningen in de huid en daarmee de stijfheid van de ballon. In tensegrity hebben de drukelementen de rol van de lucht in de ballon, de huid van de ballon representeert de trekelementen. Hoe groter de (voor)spanning in de trekelementen, hoe stijver de tensegrity en dus hoe groter het draagvermogen. De geometrische stijfheid is een belangrijke factor bij tensegrity; door het vervormen van een element wordt het mogelijk grotere krachten op te nemen. Dit is te vergelijken met een horizontaal gespannen kabel: wordt hierop een verticale kracht gezet, dan is de kabel niet in staat deze af te dragen, er is immers geen verticale draagweg voor handen. Zodra de kabel door de kracht echter een klein beetje vervormt, dan is er wel een verticale draagweg mogelijk, de kabel wordt in staat de verticale kracht af te dragen en gedraagt zich 'stijver'. Bij voldoende voorspanning is het mogelijk een tensegrity constructief net zo te behandelen en uit te rekenen als een ruimtelijk vakwerk.

De opbouw van een tensegrity kan tot stand komen uit de opbouw van eenheden. Deze eenheden worden gevormd door twee regelmatige veelhoeken boven elkaar te plaatsen en ze vervolgens ten opzichte van elkaar te verdraaien. De randen van de veelhoeken bestaan uit trekelementen en de verbinding tussen de veelhoeken komt tot stand door trek- en drukelementen. De verdraaiing tussen de veelhoeken

zorgt ervoor dat het mogelijk is de trekelementen voor te spannen. De schakeling van de eenheden tot een ruimtelijke constructie kan vervolgens op verschillende manieren tot stand komen. Zodanig dat de randen van de eenheden worden verbonden, zodanig dat de drukelementen worden gekoppeld of zodanig dat de drukelementen aan de trekelementen van een andere eenheid worden gekoppeld. Alleen bij de laatste is nog sprake van een zuivere tensegrity omdat de drukelementen elkaar niet raken.

Voor grote overspanningen wordt veel gebruik gemaakt van een tensegrity systeem waarbij radiale kabelliggers onderling worden gekoppeld door een ringvormige trekband. Hierdoor kan een deel van de kabels in de oorspronkelijke radiale liggers worden weggelaten. (figuur 4.7) [39]

De meeste theorieën die gaan over het ontwikkelen van tensegrity structuren zijn tot nu toe uitgegaan van regelmatige, convexe polyeders (Fuller, Snelson en Emmerich). De vorm van de tensegrity structuren die hierbij ontstaan, wijkt echter af van deze geometrische figuren. Er is daarom verder onderzoek verricht naar form-finding methodes om tensegrities te ontwikkelen. Deze kunnen worden opgedeeld in kinematische en statische methoden. Bij de kinematische methoden worden de lengtes van de drukelementen constant gehouden en de lengtes van de kabels geminimaliseerd, of andersom: de lengtes van de kabels constant gehouden en die van de drukelementen gemaximaliseerd. Deze aanpak houdt geen rekening met de voorspanning in de kabels en lijkt het meest op hoe de structuren in de praktijk gebouwd worden.

Bij de statische methoden wordt uitgegaan van een gegeven vorm. Vervolgens wordt een relatie gezocht tussen de evenwichtstoestand van de constructie en de optredende krachten in de elementen. Er zijn verschillende methoden voorhanden om deze relatie te analyseren.

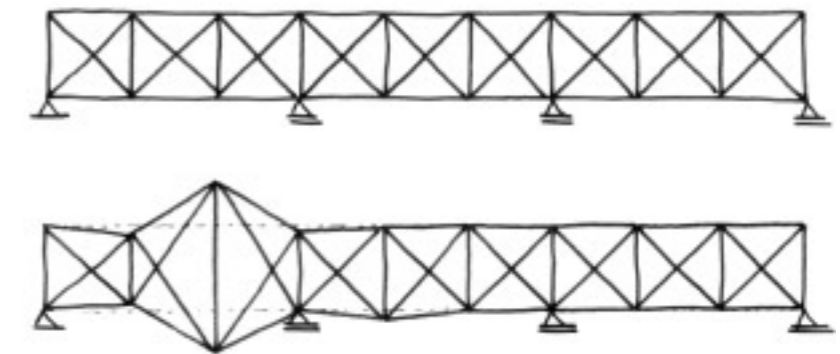
#### 4.2.6 uitvouwbare constructies

Uitvouwbare constructies zijn constructieve systemen die zijn ontworpen om (zelfstandig) grote vervormingen te kunnen ondergaan, veelal van een opgevouwen staat voor transport of opslag naar een uitgevouwen toestand voor gebruik. Het bekendste en misschien ook wel oudste voorbeeld is de paraplu (figuur 4.8).

Veel onderzoek naar opvouwbaar constructies is gedaan met betrekking tot ruimtevaarttoepassingen, omdat daar opslagruimte (en gewicht) een belangrijke rol spelen. Opvouwbaar constructies zijn ontworpen voor schotelantennes, masten en zonnepanelen, objecten die in uitgevouwen toestand relatief veel ruimte innemen. Een niet zo vaak genoemd, maar groot voordeel is dat de objecten tijdens hun opgevouwen toestand minder gevoelig zijn voor de transportbelastingen (versnellingskrachten).

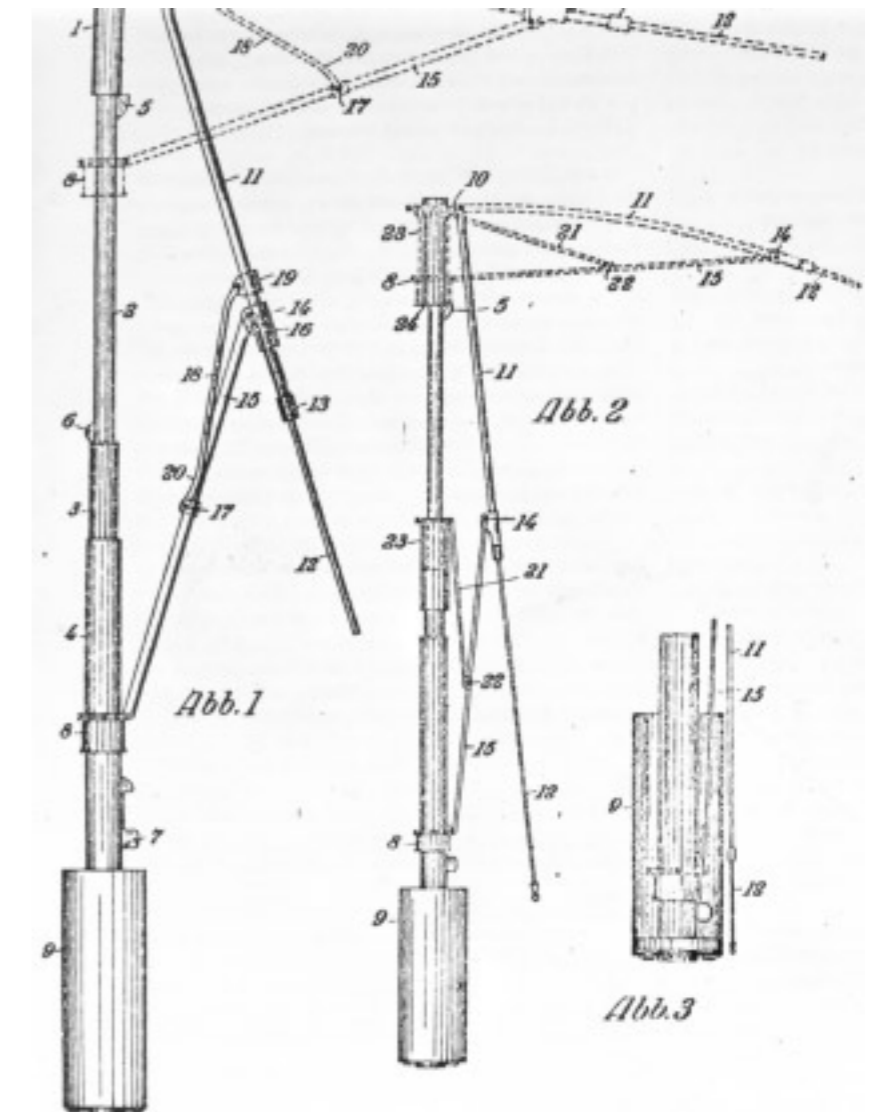
De gebruikte mechanismen zijn velerlei. Zo zijn voor masten vakwerkachtige, pantografische constructies bedacht die bestaan uit stijve en flexibele onderdelen. Door het aan- of ontspannen van de flexibele onderdelen kan de constructie uit- of ingeklapt worden. (figuur 4.9) Een ander systeem om masten te ontplooiën is STEM (Storable Tubular Extendable Member). Buizen worden hierbij gevormd door een wikkel af te rollen. (figuur 4.10)

Voor antennes wordt ook gebruik gemaakt van afrolsystemen (wrapped



Figuur 4.6. Actief vakwerk

Figuur 4.7. Paraplu mechanisme



rib, figuur 4.11) en pantografische systemen, zoals de ringvormige constructie van Pellegrino [i17], (figuur 4.12) om met behulp van lijnvormige elementen de flexibele huid van de antenne te ondersteunen. Er zijn echter ook systemen waarbij stijve vlakdelen tijdens het uitklappen in elkaar vallen. Voorbeelden zijn de sunflower antenna (figuur 4.13) en de Daisy antenna (figuur 4.14). Een derde soort systeem is de opblaasbare constructie. De IAE antenne bestaat volledig uit opgeblazen onderdelen, een ring met daartussen een kussen en afstandhouders voor de meetapparatuur. (figuur 4.15)

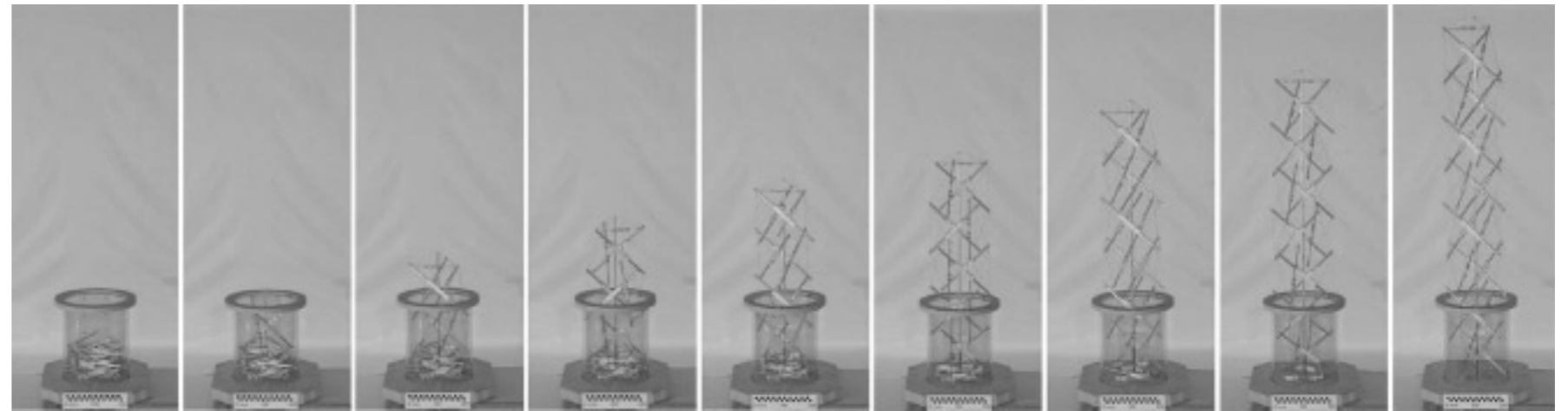
De besproken systemen golden tot nu toe vooral voor ruimtevaart toepassingen. Niet ruimtevaart toepassingen van opvouwbare systemen zijn er echter ook. Een systeem dat van grote invloed is geweest, is de paraplu. Een pantografisch mechanisme. Daarnaast zijn veel opvouwbare systemen gebaseerd op een doek dat opgehangen of opgespannen kan worden. Een van de oudste voorbeelden is het doek over het Colosseum in Rome. Daarnaast bestaan er ook de 'rigid-part' systemen die door rotatie om bepaalde assen open of dicht 'klappen'. Onderzoek naar een rigid-part dakstelsel dat is gebaseerd op een pantografisch staafmechanisme wordt gedaan in Cambridge in het Deployable Structures Lab van professor Pellegrino [i17]. Een prototype hiervan is weergegeven in de figuur 4.16 en weblink08.

In Spanje was het Emilio Pinero die een opvouwbaar theater maakte dat op een vrachtwagen vervoerd kon worden. (figuur 4.17) Het systeem was een pantografisch vouwwerk dat eenvoudig uitgeklaapt kon worden. Na de dood van Pinero was het Felix Pallares die zijn werk voortzette en naam maakte met de opvouwbare systemen. De Japanner Miura maakte faam met onderzoek naar origami vouwstructuren, ondersteund met complexe wiskunde.

Ook Chuck Hoberman ontwikkelde opvouwbare systemen. Behalve een populair speelgoedstelsel (beroemd is de Hoberman Sphere) maakte het bedrijf van Hoberman opvouwbare constructies voor bijvoorbeeld het podium op de Olympische winterspelen in Salt Lake City. De vervormingen die het systeem ondergaat zijn enorm en kunnen bijvoorbeeld worden toegepast voor de overkapping van een grote ruimte die zich kan openen en sluiten. (figuur 4.18, weblink01)

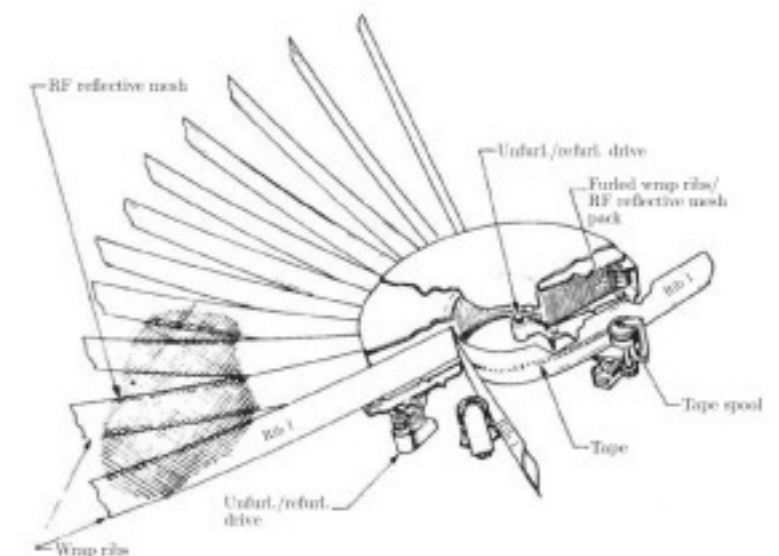
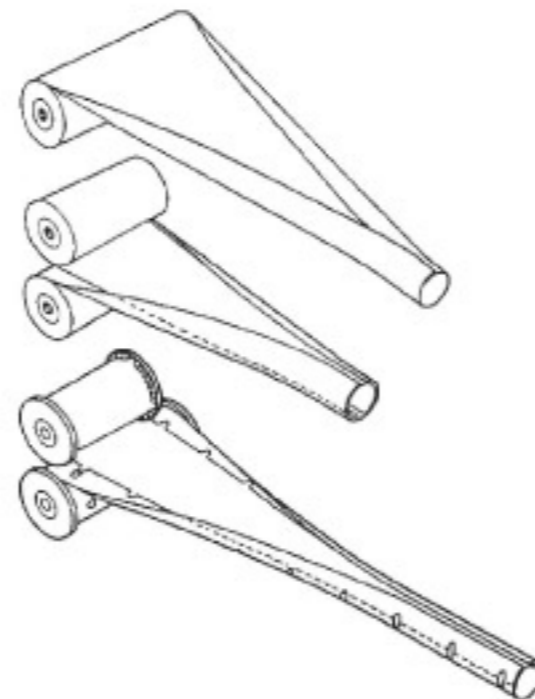
Opblaasbare gebouwdelen worden vooral veel toegepast in tijdelijke gebouwen. Te denken valt aan tentoonstellingsgebouwen, zoals Airtecture van Festo [i10], maar ook voor tijdelijke onderkomens bij rampen of incidenten. Andere opgeblazen gebouwdelen met een meer permanent karakter zijn de luchtkussens die zijn gebruikt in de botanische tuinen van Burgers Bush in Arnhem en het Eden project in Cornwall (Nicholas Grimshaw). Overigens zijn het hier vooral de lichtheid van het materiaal en de isolerende werking ervan die reden gaven voor toepassing. Verder worden opblaasbare systemen gebruikt voor tijdelijke bruggen (figuur 4.19) of waterkeringen zoals de stormvloedkering bij Rampsol.

Om een uitvouwbare constructie te gebruiken als bescherming tegen bepaalde weersinvloeden, moet de constructie dicht gemaakt worden. Soms is het voldoende als alleen het directe zonlicht wordt tegengehouden, maar ook wind en regendichte afsluitingen zijn soms nodig. Ook hiervoor zijn verschillende systemen bedacht. Veel van deze systemen zijn uitgegaan van een doek dat naderhand over de constructie



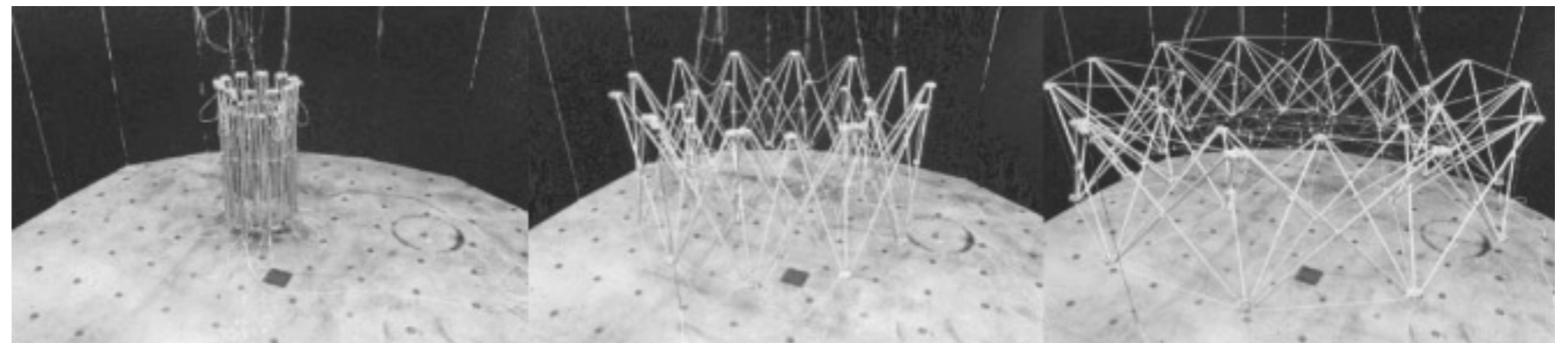
Figuur 4.9. Pantografisch mastsysteem; unfolding sequence

Figuur 4.10. STEM, Storable Tubular Extendable Member



Figuur 4.11. Wrapped rib antenne

Figuur 4.12. Pantografisch antennesysteem in ringvorm, Pellegrino



wordt gespannen, soms beweegt het doek direct mee, en sommige systemen zijn al water- en winddicht (rigid-part). Het grote voordeel van de rigid-part systemen is het nadeel van de andere systemen: een doek dat moet voldoen aan alle eisen met betrekking tot klimaatscheiding, en dat daarnaast ook flexibel moet zijn, is erg kostbaar.

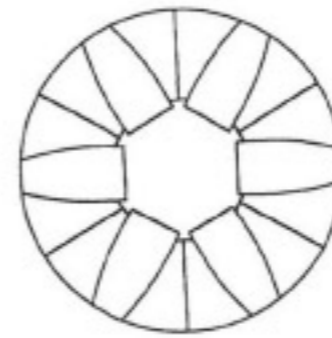
Een samenvatting van veelgebruikte uitvouwbare systemen voor gebouwen wordt gegeven in de figuur 4.20 die is overgenomen uit [37]. Hier en daar is de figuur aangevuld.

#### 4.2.7 knopen

Bij de niet opblaasbare systemen spelen de knooppunten een belangrijke rol. Ze verzorgen zowel de samenhang van de constructie, als het goed functioneren van het mechanisme. In 1989 faalde een uitvouwbare antenne tijdens een ruimtemissie naar Jupiter omdat de knooppunten te veel weerstand ondervonden. Soms wil men ook in statische gebouwen flexibele knopen toepassen. Reden hiervoor kan zijn dat het monteren eenvoudiger is. Ook het standaardiseren van knopen kan een reden zijn. Als een constructie veel knooppunten bevat met steeds net andere randvoorwaarden, dan biedt een flexibel montagesysteem uitkomst. Een dergelijk systeem is ontworpen en uitgevoerd door W.J.J. Huisman van de TU Eindhoven (figuur 4.21). In een koepelconstructie die op de campus van de TUE staat, is de knoop op een aantal plaatsen toegepast. Deze knoop is ringvormig waardoor een aantal aansluitingen richting het middelpunt gemaakt kunnen worden in verschillende radiale richtingen. In de richting hier loodrecht op hebben de aansluitingen een kleine(re) speling. Door het aandraaien van een schroef kan de knoop gefixeerd worden.



Figuur 4.13. Sunflower antenne



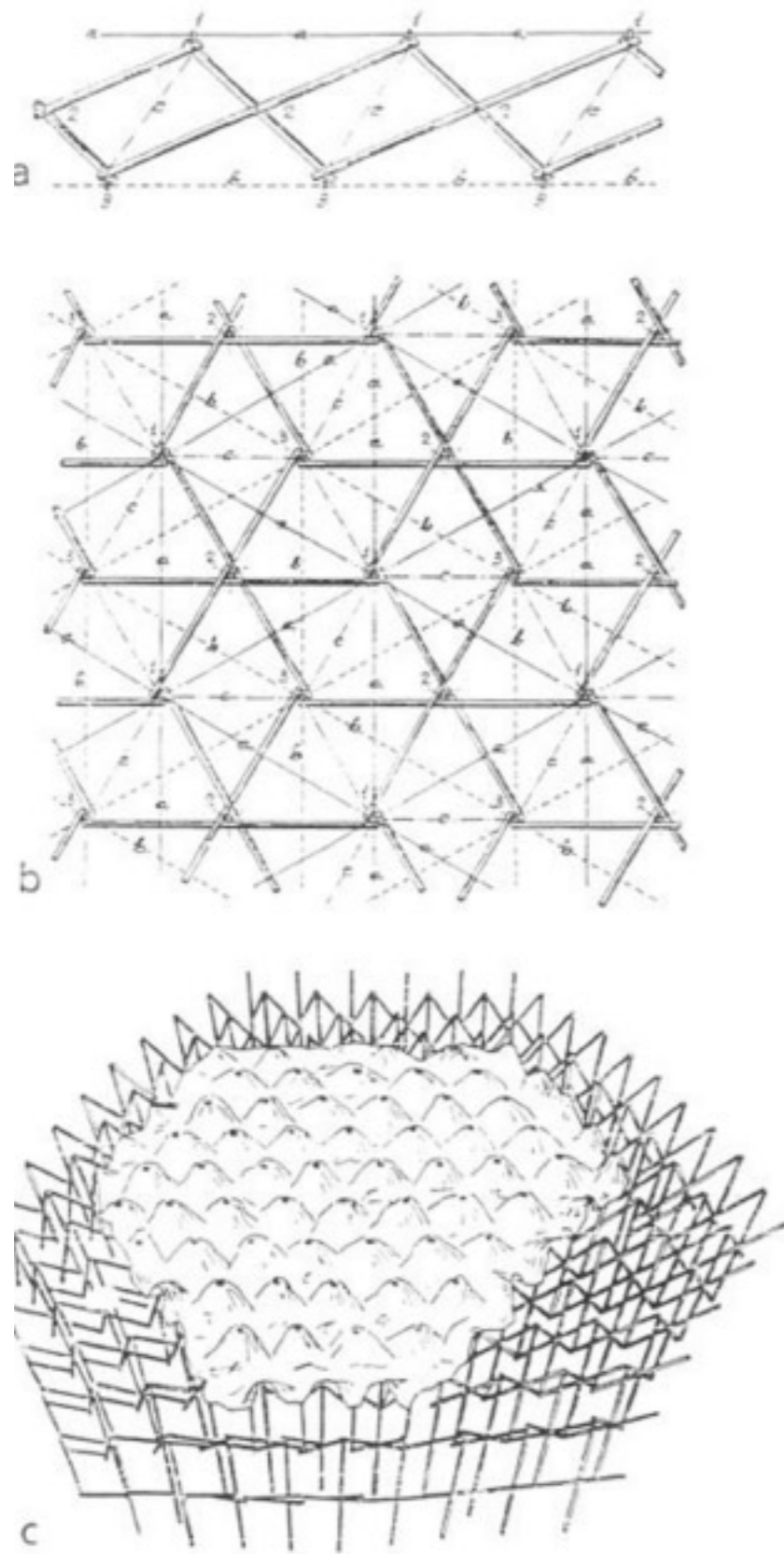
Figuur 4.14. Daisy antenne



Figuur 4.15. Opblaasbare antenne

Figuur 4.16. Rigid-part daksysteem, ontwikkeld in DSL





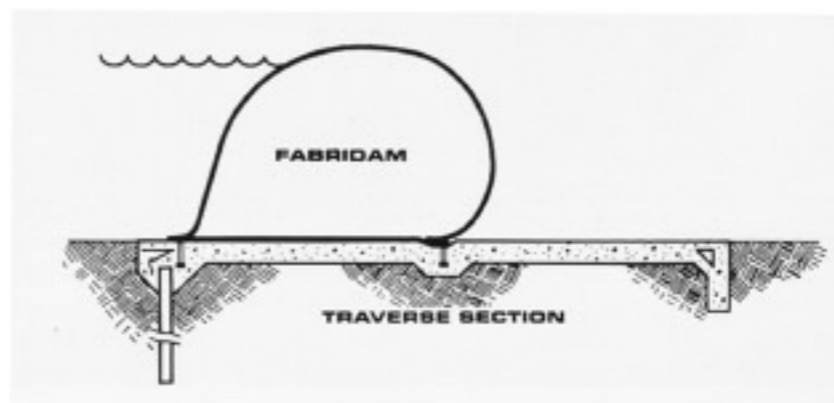
Figuur 4.18. Hoberman sphere

← Figuur 4.17. Opvouwbaar theater, Emilio Pinero

→ Figuur 4.20. Opvouwsystemen daken, overzicht IL

↓ Figuur 4.19. Opblaasbare dam, opblaasbare brug

BAUART/ CONSTRUCTION SYSTEM	ART DER BEWEGUNG/ TYPE OF MOVEMENT	BEWEGUNGSRICHTUNG/DIRECTION OF MOVEMENT			
		PARALLEL/PARALLEL	ZENTRAL/CENTRAL	ZIRKULÄR/CIRCULAR	PÉRIPHER/PERIPHERAL
MEMBRANEN, TRAGKONSTRUKTION FESTSTEHEND/ MEMBRANES, SUPPORTING STRUCTURE STATIONARY	RAFFEN/ BUNCHING				
	ROLLEN/ ROLLING				
MEMBRANEN, TRAGKONSTRUKTION BEWEGLICH/ MEMBRANES, SUPPORTING STRUCTURE MOVABLE	SCHIEBEN/ SLIDING				
	KLAPPEN/ FOLDING				
	DREHEN/ ROTATING				
STEIFE KONSTRUKTIONEN/ RIGID CONSTRUCTIONS	SCHIEBEN/ SLIDING				
	KLAPPEN/ FOLDING				
	DREHEN/ ROTATING				





Het opvouwen van tensegrity kent niet het probleem van de complexe knopen omdat relatief weinig elementen samenkomen en omdat drukstaven niet met elkaar verbonden zijn. Het principe van het ontwerpen van een opvouwbare tensegrity is dat een mechanisme wordt bedacht dat bij voltooiing vormvast is en waarbij voorspanning kan worden aangebracht. Dergelijke systemen zijn ontwikkeld voor onder andere masten en antennes. Hierbij kan het systeem geactiveerd worden door de drukstaven te verlengen of de trekelementen te verkorten. (weblink02)

Het verkorten of verlengen van elementen brengt ons op het spoor van de actieve, adaptieve constructies. Immers van een tensegrity wordt door de voorspanning het draagvermogen bepaald. Wordt nu de voorspanning afhankelijk van een actuator-actie, dan kan het systeem het eigen draagvermogen aanpassen.

#### 4.3 sturing van de actieve constructie

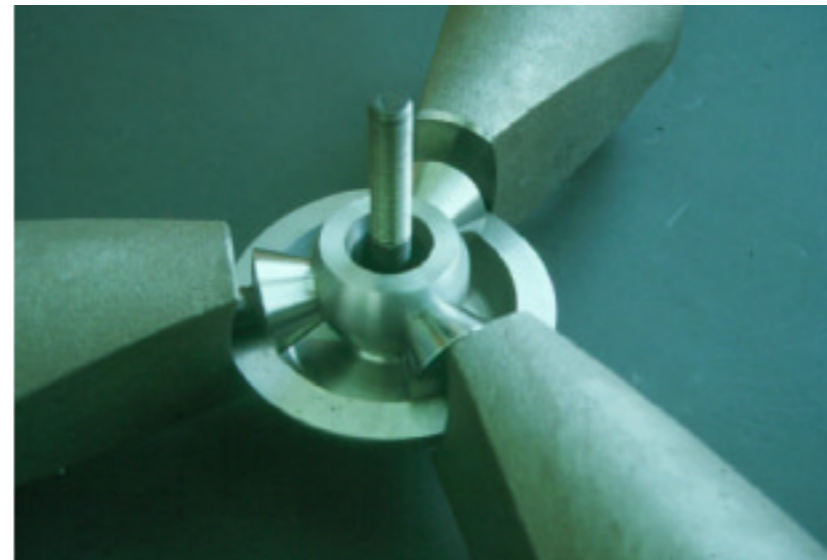
We hebben nu gezien dat er vervormbare 3D-constructies te maken zijn die we kunnen aanpassen, of die zichzelf kunnen aanpassen aan veranderende omstandigheden. Actieve elementen kunnen in de constructie worden opgenomen zoals bijvoorbeeld pneumatische zuigers of spieren. Deze elementen kunnen vervormingsgestuurd of spanningsgestuurd werken, dus actief een bepaalde vorm aannemen of juist een bepaalde spanningstoestand nastreven. De vraag blijft hoe een dergelijk systeem het beste kan worden aangestuurd.

Kelly beschrijft in zijn boek 'Out of Control' [23] de complexiteit van gedecentraliseerde netwerken. Voorbeelden van dit soort netwerken zijn het telefoonnetwerk, het internet of 'de economie'. De processen die plaatsvinden in dergelijke netwerken vertonen opvallende gelijkenissen met natuurlijke processen.

Zodra een centrale aansturing mist, reageren componenten uit een netwerk enkel op hun directe omgeving zonder te weten wat er in de rest van het systeem gebeurt. Toch beschikt het systeem als totaal over bepaalde eigenschappen. De groep, de zwerm vertoont aanwijsbaar ander gedrag dan de afzonderlijke deeltjes. Dit is zwermgedrag. Gedacht wordt dat veel processen in de natuur, ook in ons lichaam (hersenen), op een dergelijke manier werken. Basis van zwermgedrag is dat er veel deeltjes zijn. Al deze deeltjes beschikken over een beperkt vermogen eenvoudige handelingen uit te voeren en eenvoudige beslissingen te nemen. Daarnaast zijn ze in staat te communiceren met hun directe burens. Een voorbeeld van zo'n zwerm is een vlucht vogels, een kolonie mieren of een termietenheuvel.

Maar ook een zwerm bijen. Een zwerm bijen wordt niet centraal gecoördineerd, maar bestaat uit duizenden componenten die slechts in staat zijn tot het uitvoeren van eenvoudige taken. Daarnaast bestaat er communicatie tussen de bijen onderling. De zwerm als geheel is in staat een complexe(re) handeling uit te voeren zoals het vinden van een nieuwe woonplaats. Als ware het één organisme besluit ze waar ze zich vestigt. De koningin heeft maar te volgen.

Voor het maken van intelligente robots is ook het principe gebruikt van het decentraliseren. Het bleek dat eenvoudige robots waarbij het linker been niet wist dat het rechter bestond, sneller in staat waren te lopen dan robots met een centraal brein, omdat over elke stap moest worden



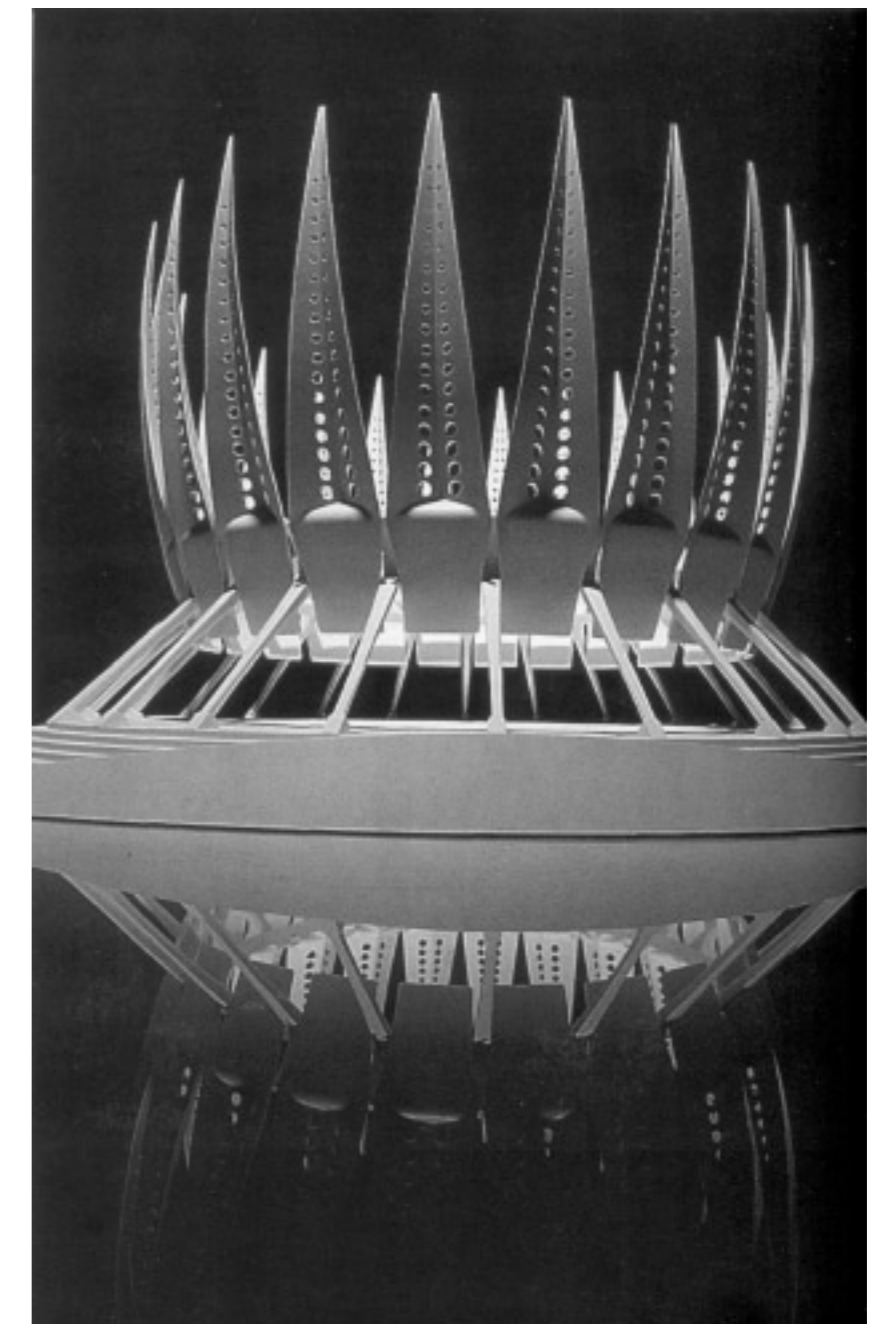
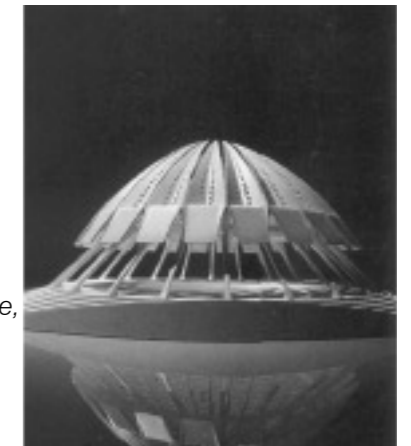
← *Figuur 4.21. Knoop Huisman*

←  
←

← *Figuur 4.22. Zeeanemoon*

←  
←

*Figuur 4.23. Drijvend paviljoen Lucerne, Santiago Calatrava*



nagedacht. NASA heeft onderzoek gedaan naar het uitzetten van een zwerm eenvoudige en goedkope robots op Mars, in plaats van één enkel supergeavanceerd voertuig, om informatie te verzamelen over het oppervlak. Een defect in dat voertuig kan leiden tot een totale mislukking van de missie, terwijl het uitvallen van de taken van enkele robots uit een zwerm gecompenseerd wordt door de rest.

Een staande mens in continu op zoek naar evenwicht. Onbewust wordt door het evenwichtsorgaan geregistreerd wat de huidige positie van het lichaam is. Onderdelen uit het hele lichaam werken gecoördineerd of ongecoördineerd mee om een nieuw evenwicht te vinden. Continu wordt er gecorrigeerd, gezocht naar evenwicht. Het is een continue toestand van bijna-vallen.

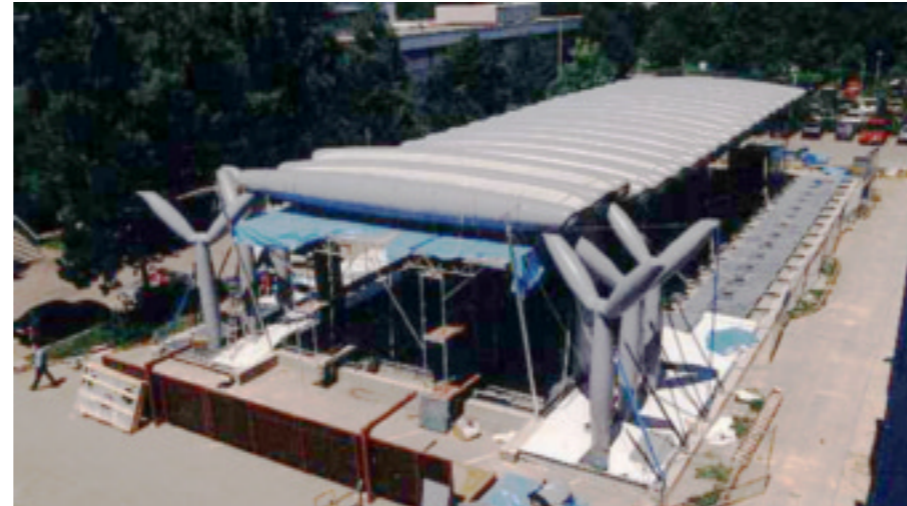
Als een bewegende constructie wordt gezien als een zeeanemoon (figuur 4.22), op een vaste basis en met zwaaiende tentakels, dan kan deze op eenvoudige wijze zodanig gemaakt worden, dat de constructie te allen tijde in evenwicht is. Een dergelijke constructie is bijvoorbeeld het dak dat zich opent of sluit van het drijvend paviljoen in Lucerne van Calatrava (figuur 4.23). Een vorm echter als die van Trans-ports van Oosterhuis.nl verandert continu, onbekend waarheen, en vraagt om een draagsysteem dat net als het menselijk lichaam constant zoekt naar nieuw evenwicht. Een systeem waarin componenten reageren op elkaar, communiceren. Eenvoudige taken bij afzonderlijke actuatoren, decentralisatie. Een netwerk dat zoekt naar evenwicht. Steeds bijna valt.

#### 4.4. twee voorbeelden van een actief gebouw

##### 4.4.1 Festo Airtecture

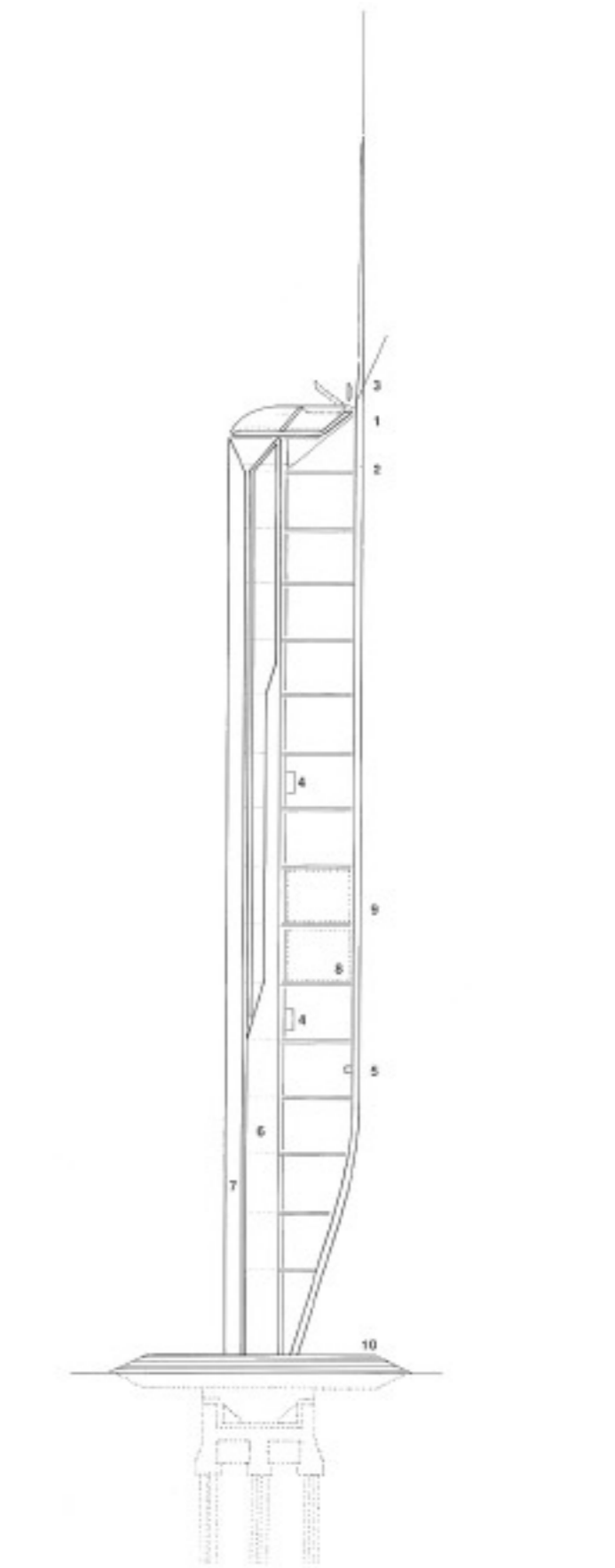
Door Festo is een tentoonstellingsgebouw ontworpen dat een pneumatische constructie heeft (figuur 4.24). Omdat het gebouw voor het grootste gedeelte bestaat uit lucht heeft het de naam Airtecture meegekregen. De hoofdconstructie bestaat uit opgeblazen kolommen waarvan de druk voortdurend wordt gecontroleerd door een computersysteem. Bij veranderende weersomstandigheden kan de druk worden veranderd. Als het gebouw getransporteerd moet worden past het in een standaard 40-ft container.

In totaal ondersteunen 40 Y-vormige kolommen en 20 liggers het gebouw. De kolommen hebben een hoogte van 6m en de liggers hebben een lengte van 12,7m. Doorsnede van de liggers varieert van 0,75m tot 1,25m. De kolommen zijn ten opzichte van elkaar steeds gedraaid waardoor in bovenaanzicht een V-vorm ontstaat. Tussen de kolommen zijn opgeblazen wandelementen geplaatst. Het dak tussen de liggers bestaat uit een dubbel membraan waartussen de lucht is weggezogen. De stabiliteit wordt gewaarborgd door pneumatische spieren die als tuien aan het gebouw bevestigd zijn. Ze zorgen tevens voor een verstijving van de constructie als dit nodig is in verband met windbelasting. De kolommen en liggers zijn gemaakt van polyester. De tussenliggende wandelementen van polyamide. [10]



Figuur 4.24. Festo Airtecture

→↓↓ Figuur 4.25. Glasgow Wingtower

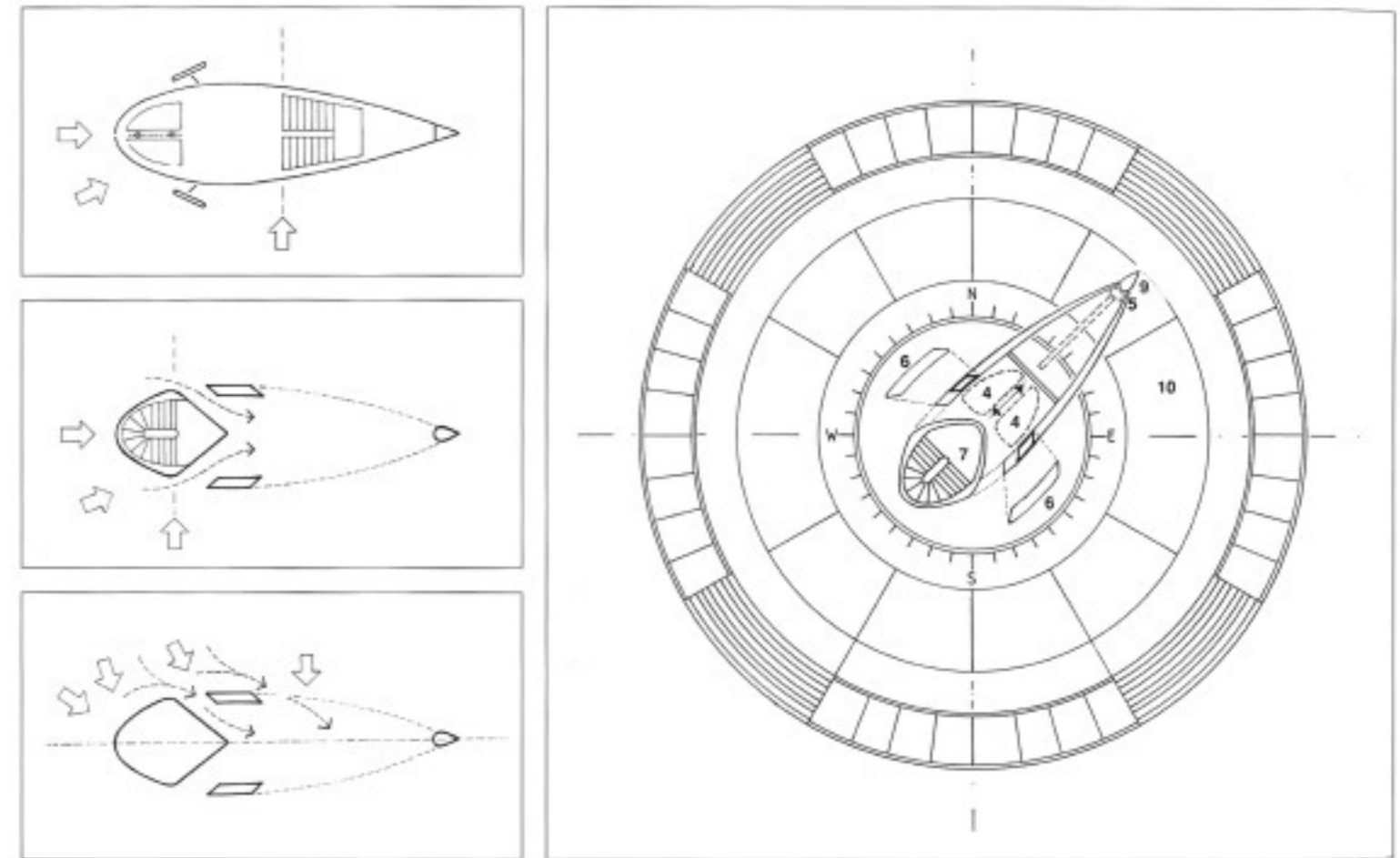
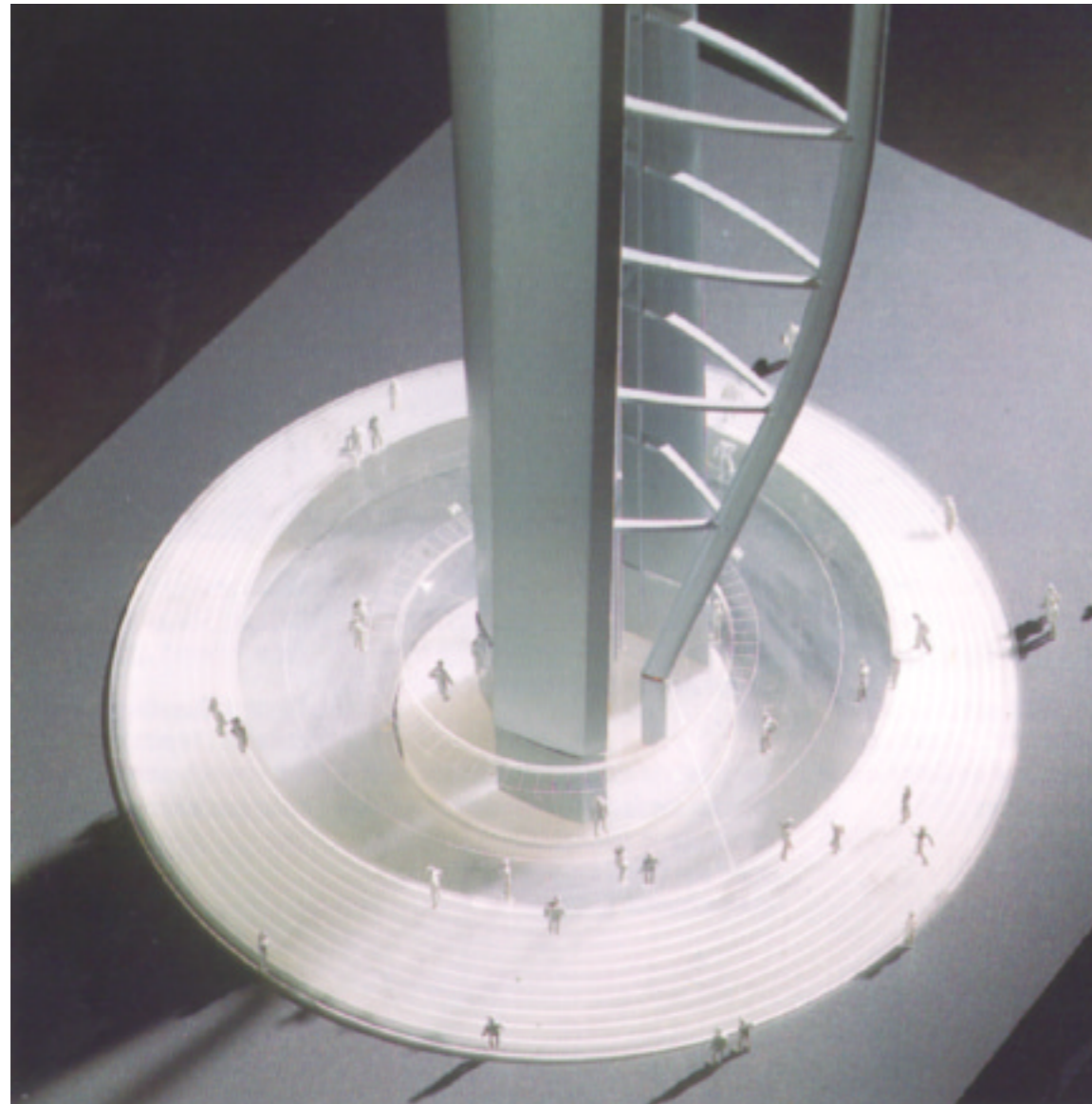


#### 4.4.2 Glasgow Wing Tower

Richard Horden implementeerde in samenwerking met Peter Heppel aërodynamica in architectuur. Zij maakten een ontwerp voor een toren die als een windhaantje met de wind meedraait waardoor de windbelasting enorm wordt gereduceerd (figuur 4.25). De toren kon hierdoor meer dan 50% lichter worden gedimensioneerd dan wanneer deze niet zou kunnen draaien.

De toren is ontworpen om de technische kwaliteiten van de stad Glasgow aan te tonen. Onder aan de 100m hoge toren is plaats voor tentoonstellingen en andere evenementen. De toren zelf draagt meteorologische apparatuur en schotelantennes en de top kan bezocht worden door ongeveer 40 mensen tegelijk.

De toren heeft de vorm van een (helikopter)vleugel. In de basis van de toren zit een draaimechanisme dat de toren eerst iets optilt en vervolgens naar de nieuwe positie draait. Het mechanisme treedt alleen in werking als de windrichting langdurig van richting verandert en als deze meer dan 15% afwijkt van de hoofdrichting.



Figuur 4.25. Glasgow Wingtower



## 5. adaptronica

Adaptronics is de term die in de literatuur wordt gebruikt voor de kennis omtrent het technisch mogelijk maken van adaptiviteit. Hieronder valt vooral de kennis over sensoren, over actuatoren en over de systemen die daartussen het intermediair vormen en de componenten aansturen. We zullen hier de term 'adaptronica' gebruiken. Sensoren registreren, actuatoren voeren uit. De regel- of stuursystemen kunnen verschillend van aard zijn. Van eenvoudig: een signaal van een sensor is direct gekoppeld aan een signaal dat wordt afgegeven aan een actuator, tot heel geavanceerd: continue signalen van verschillende sensoren worden geïnterpreteerd door een intelligent systeem dat een scala aan actuatoren aan kan sturen.

Hieronder volgt eerst een beschrijving over sensoren, vervolgens worden actuatoren besproken. Overigens zijn veel materialen die in de paragraaf over actuatoren worden besproken ook geschikt voor toepassing als sensor, de besproken effecten werken namelijk vaak twee kanten op.

### 5.1 sensoren

Sensoren zijn de voelers in het adaptieve systeem. Er zijn veel ontwikkelingen gaande omtrent sensoren. Waar vroeger aan de hand van de beschikbare sensoren werd besloten welke grootheden men ging meten, wordt tegenwoordig een sensor gemaakt voor datgene wat men wil meten.

De belangrijkste problemen die men tegenkomt bij het ontwerpen van sensoren zijn hun niet-lineairiteit, de gevoeligheid voor meerdere grootheden, de reactietijd en de ruis. Vooral vroeger was de niet-lineairiteit een probleem, omdat het gebruik van de computer niet vanzelfsprekend was. Maar ook tegenwoordig kan het lastig zijn om er een oplossing voor te vinden, omdat de sensor eerst gekalibreerd moet worden. Daartoe moet dus op een andere manier bepaald worden wat men met de sensor wil meten.

Geen enkele sensor is vervolgens slechts voor één grootheid gevoelig. Meestal speelt temperatuur een belangrijke rol, omdat veel eigenschappen afhankelijk zijn van de temperatuur, zo ook de materiaaleigenschappen van de sensor zelf. Voordat begonnen kan worden met meten moet dus eerst die afhankelijkheid in beeld worden gebracht, omdat tijdens het meetproces ook de temperatuur kan veranderen. De gemeten waarden moeten dan worden gecorrigeerd. Complexer wordt het als behalve de temperatuur ook nog andere factoren invloed hebben op de metingen.

Sensoren hebben, afhankelijk van de materiaaleigenschappen, een bepaalde reactietijd. Dit betekent dat indien het gemeten signaal geen perfecte sinus is, de reactie die in een actief systeem op de meting volgt altijd een vertraging heeft.

Tenslotte is ruis ook een factor van betekenis. Er is altijd ruis in de metingen, en de significantie van de gemeten signalen moet dus worden bepaald. Het is duidelijk dat voor het zeer precies meten van een proces een sensor gebruikt moet worden die weinig ruis geeft. Daarbij is overigens ook de rest van het systeem van belang, ruis ontstaat immers niet alleen in de sensor zelf, maar ook in de randapparatuur.

In de literatuur gaat de aandacht sterk uit naar optische vezel sensoren (figuur 5.1). Dit komt omdat de eigenschappen ideaal zijn om toe te passen in samengestelde smart materials. De optische vezels zijn licht, klein, flexibel, ze verbruiken weinig energie, ze hebben een grote bandbreedte om signalen te versturen en ze zijn robuust wat voordelig is bij het produceren van de samengestelde materialen.

Optische vezelsensoren bestaan altijd uit twee delen. De meetunit en een optisch-electrische unit. De eerste bestaat uit de vezel die een meting doet. Het kan ook voorkomen dat de vezel alleen gebruikt wordt voor het datatransport, er moet dan nog een andere sensor in het systeem worden toegepast. De optische unit verzorgt de uitzending en registratie van een lichtsignaal dat door de vezel wordt verstuurd.

Optische vezelsensoren zijn gebruikt voor het meten van bijna alle fysische en ook van veel chemische grootheden. Parameters die namelijk door de te meten grootheid beïnvloed kunnen worden zijn de intensiteit, de golflengte of fase en de polarisatie van het lichtsignaal. Verder kan de tijd gemeten worden die het licht nodig heeft om van de ene kant van de vezel naar de andere te komen, en daarmee kan een verlenging of verkorting van de vezel gemeten worden.

### 5.2. actuatoren

Actuators, of actuatoren, zijn de uitvoerende onderdelen in het adaptieve systeem. Soms is de scheidslijn tussen sensoren en actuatoren niet duidelijk te trekken, een piezoelectrische actuator bijvoorbeeld werkt twee kanten op: onder elektrische spanning vervormt het materiaal, maar bij een gedwongen vervorming ontstaat een elektrische spanning in het materiaal. Op deze manier kunnen ook sensoren en actuatoren worden geïntegreerd, het wordt een 'smart element'.

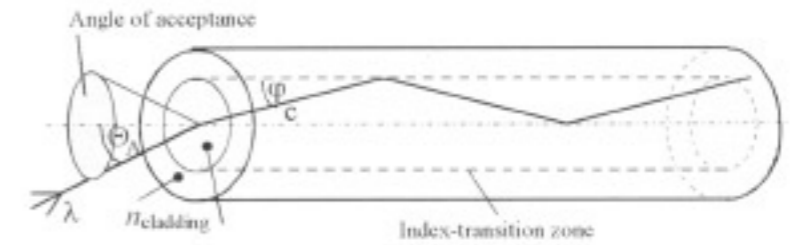
#### 5.2.1 piezoelectrische actuatoren

Het piezoelectrische effect ontstaat doordat zich in het materiaal dipolen vormen die zich in een bepaalde richting oriënteren. Aan de ene kant leidt een vervorming van het materiaal tot een elektrische lading aan de oppervlakte van kristallen in het materiaal. Aan de andere kant leidt het aanbrengen van een spanning tot een verandering van de vorm van het materiaal. Dit maakt piezoelectrische materialen zowel geschikt voor sensoren als actuatoren.

Piezoelectrische actuatoren kunnen over het algemeen 'grote' krachten opwekken (in de orde van kN's) en hebben reactietijden in de grootte orde van enkele milliseconden. Een precisie van enkele nanometers kan worden gehaald. De rek ligt in de orde van grootte van 0,001 tot 0,002.

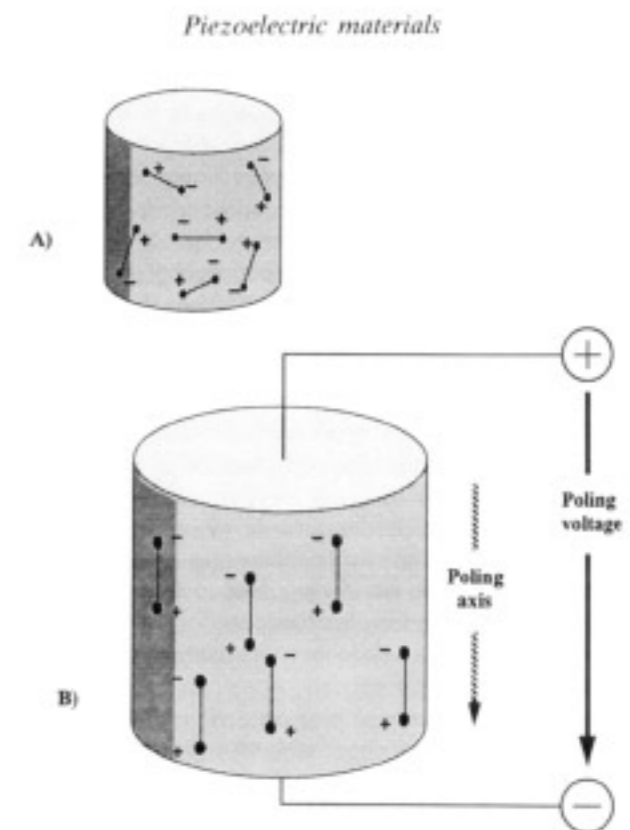
Kwarts is een natuurlijk piezoelectisch materiaal. Hierin hebben alle dipolen dezelfde oriëntatie. Kunstmatige piezoelectrische materialen, veelal keramisch, zijn meestal gebaseerd op lood, zirkonaat en titanaat. Deze materialen zijn polykristallijn en hebben een random oriëntatie van de dipool domeinen. Bij hoge temperaturen worden de dipool domeinen gepolariseerd en afgekoeld. Bij het onder spanning brengen van het materiaal richten de dipolen zich weer en ontstaat een vormverandering. (figuur 5.2)

Naast keramische zijn er ook piezoelectrische polymeren, Polyvinylidene



Figuur 5.1. Werking optische vezel

Figuur 5.2. Principe van vormverandering piezoelectrisch materiaal



fluoride (PVDF). Deze materialen zijn meer geschikt voor sensing, omdat ze een veel wijdere range hebben waar ze met dezelfde gevoeligheid op reageren. Keramiek is veel stijver wat een effectievere omzetting van energie in vervorming tot gevolg heeft. Hierdoor is het geschikter voor actuatie. De polymeren hebben een lager eigengewicht dan de keramische materialen (factor 3) en zijn beter bestand tegen aantasting van vocht, zuur, oplosmiddelen en ultra-violette straling. Ze zijn daarentegen weer erg gevoelig voor electromagnetische straling. Maximum toegelaten temperatuur is voor polymeren meestal zo'n 100°C, terwijl dit bij de keramische ongeveer 200°C is.

Piezoelectrische materialen worden al lange tijd toegepast in bijvoorbeeld pick-up naalden en microfoons. Hierin worden trillingen omgezet in een elektrisch signaal. Ook de menselijke huid en botten hebben piezoelectrische eigenschappen. Het voelen van de Homo Sapiens Sapiens is daarop gebaseerd. Het tasten met de vingertoppen leidt tot een signaal dat via de zenuwen naar de hersenen wordt geleid.

Het gebruik van piezoelectrische materialen in adaptieve systemen ziet men toegepast bij rotorbladen van propellers die actief vervormen. Ook het dempen van trillingen bij gereedschappen hoort bij de toepassingen.

Fundamentele vergelijkingen voor piëzoelectrische materialen hebben betrekking op fluxdichtheid  $D$ , de vervorming  $S$ , de mechanische spanning  $T$  en de elektrische veldsterkte  $E$ . De grootheden zijn gekoppeld middels de matrix van piëzoelectrische constanten  $e$ , de matrix met diëlectrische constanten  $\epsilon^S$  (bij constante vervorming  $S$ ) en de elasticiteitsmatrix  $s^E$  (bij constante veldsterkte  $E$ ).

$$\{D\} = [e]^T \{S\} + [\epsilon^S] \{E\} \quad (1)$$

$$\{T\} = [s^E] \{S\} - [e] \{E\} \quad (2)$$

Aan de vergelijkingen is te zien dat de piëzoelectrische actuator zich in elektrisch opzicht gedraagt als een condensator:

$$\{D\} = [\epsilon^S] \{E\}$$

en in mechanisch opzicht als een stijve veer met massa:

$$\{T\} = [s^E] \{S\}$$

Relaties (1) en (2) gelden voor relatief kleine veldsterkten  $E$  (tot ongeveer 15% van hun maximale waarden). Daarboven wordt de relatie verstoord door een vertraagde oriëntatie van de dipolen.

Belangrijk om mee rekening te houden zijn hysteresis en kruip die worden veroorzaakt door het heroriënteren van de dipolen in het piëzoelectrische materiaal. Hierbij geldt dat bij het aanhouden van een bepaalde spanning meer en meer dipolen zich naar het elektrische veld richten wat een steeds grotere vervorming tot gevolg heeft. Indien er lang geen spanning op de dipolen staat, kunnen domeinen hun oriëntatie verliezen. Het materiaal

moet dan opnieuw gepolariseerd worden om de originele responsiecurve terug te krijgen. Overschrijding van de maximale elektrische veldsterkte kan leiden tot depolarisatie en uiteindelijk zelfs tot destructie van het (keramische) materiaal.

Temperatuur heeft relevante effecten op het materiaal. De Curie temperatuur geeft de waarde aan waarbij het piëzoelectrische effect verdwijnt ten gevolge van volledige depolarisatie. Deze temperatuur ligt tussen de 160 en 350°C voor keramische materialen. Temperatuur heeft ook effect op de  $\epsilon$ ,  $e$  en  $s$ .

Hoge belastingen, in zowel mechanische, als elektrische zin, leiden tot microscheurtjes die de eigenschappen van het materiaal beïnvloeden. Dit effect wordt versneld door het aanwezig zijn van zuurstof of andere vervuilingen in het materiaal. Tegenwoordig is het mogelijk materialen te produceren die zonder schade  $10^9$  hoge belastingscycli aankunnen.

De maximale vervorming hangt af van het type belasting. Wordt de actuator belast met een constante kracht, dan blijft de vervorming door het piëzoelectrische effect even groot. Een karakteristiek van het materiaal is de kracht waarbij de mechanische vervorming net zo groot is als de maximale vervorming door het piëzoelectrische effect. Is de belasting evenredig met de vervorming, dan wordt door het elastische gedrag van het materiaal de maximale vervorming gereduceerd. (figuur 5.3)

Drukspanningen tot 100 N/mm<sup>2</sup> zijn, afhankelijk van het materiaal, toelaatbaar. Toelaatbare trek- en schuifspanningen zijn echter zeer gering.

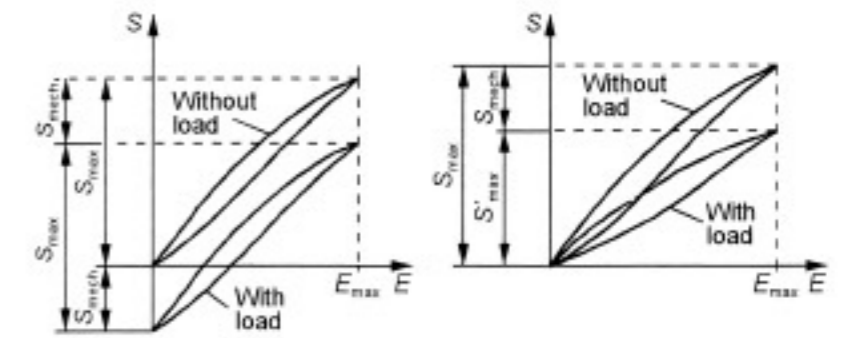
Door het combineren van meerdere lagen piëzoelectrisch materiaal, worden afzonderlijke verplaatsingen opgeteld. Schijfjes met diktes die variëren van 0,1 tot 0,5 mm kunnen verplaatsingen ondergaan van 1 mm bij een kracht van 1000 N (0,5 mm). Het combineren van enkele honderden laagjes is mogelijk.

Grotere verplaatsingen zijn mogelijk indien gebruik wordt gemaakt van buigende actuatoren. Een aan een zijde ingeklemde strip kan aan het uiteinde een verplaatsing van ongeveer 1 mm. De opgewekte kracht is echter minder dan 1 N.

### 5.2.2 geheugenmetaal actuatoren

Het geheugeneffect komt voor bij verschillende materialen. Het effect houdt in dat een materiaal een vervorming kan ondergaan en dat het materiaal vervolgens weer teruggebracht kan worden naar de originele staat, die het materiaal als het ware onthouden heeft. Dit kan bijvoorbeeld gerealiseerd worden door het materiaal op te warmen.

Bij bepaalde legeringen van metalen houdt het effect verband met de fase overgang tussen twee vaste toestanden: die van een martensiet en een austenietstructuur. Boven een bepaalde overgangstemperatuur bevindt het materiaal zich in de austeniet fase. Austeniet heeft een symmetrische structuur en een hoge  $E$ -waarde. Wordt het materiaal afgekoeld, dan verandert de structuur naar martensiet dat veel makkelijker vervormbaar is. Wordt het materiaal in deze toestand vervormd, dan kan de verandering ongedaan gemaakt worden door het weer in de austeniet toestand te brengen. Dit terugveranderen kan gepaard gaan met grote krachten.



Figuur 5.3. Elastisch gedrag piëzoelectrisch materiaal

Vervormingen ten gevolgen van afschuiving, buiging en normaalkracht kunnen allemaal worden opgenomen en terugveranderd, waardoor actuatoren voor heel specifieke taken gemaakt kunnen worden.

Er worden drie categorieën onderscheiden voor het geheugeneffect:

#### One way effect

In koude (martensiet) toestand wordt het materiaal vervormd. Door opwarming (austenietvorming) wordt de originele vorm verkregen. Na afkoeling blijft deze behouden.

Toepassingen bijvoorbeeld in verbindingselementen.

#### Two way effect

Het materiaal onthoudt twee vormen, de koude en de warme. In feite zijn dit thermisch gestuurde actuatoren. Bij verwarmen en afkoelen veranderen ze steeds van vorm. Bij het afkoelen ontstaan slechts kleine krachten. De materialen moeten soms getraind worden om de koude toestand te onthouden. Deze training kan bestaan uit het 20-100 keer herhalen van een (terug)vervorming.

#### Superelasticiteit

Geheugenmetalen gedragen zich boven de overgangstemperatuur superelastisch. Dit houdt in dat het elastisch gebied 5 tot 10 keer zo groot is als dat van conventionele materialen. Toepassingen worden gevonden in operaties met minimaal letsel en in tandgeneeskunde (beugels).

De belangrijkste op het moment gebruikte legering is die van nikkel en titanium (en soms koper). Het voornaamste probleem van deze legering is de lage overgangstemperatuur. Materialen met een hogere overgangstemperatuur en dezelfde (gunstige) vermoeiingseigenschappen als NiTi zijn in ontwikkeling. Van belang bij het produceren van geheugenmetaal actuatoren zijn de temperatuur waarbij het gedrag wordt 'getraind' en het aantal trainingen. Dit bepaalt de duurzaamheid van het effect en hysteresis.

Het activeren van geheugenmetaal actuatoren kan op verschillende manieren. Het voordeel van thermische activatie is de eenvoudige vorm van energie. Dit maakt het erg geschikt voor veiligheidstoepassingen. Bovendien zijn dergelijke materialen sensoren en actuatoren in één. Wat veel voorkomt is dat de actuatoren worden opgewaard door er een elektrische stroom door te laten lopen. Dit resulteert in erg compacte actuatoren.

Veel toegepaste vormen van actuatoren zijn weergegeven in de figuur. (figuur 5.4)

Interessante toepassingen worden gevonden in de medische wereld, maar ook voor uitklapbare constructies. Er zijn bijvoorbeeld schotels gemaakt voor de ruimtevaart die heel compact vervoerd moesten worden. In de ruimte, door het opwarmen door de zon, vervormde het materiaal zich terug naar de schotelvorm die het bij productie had gekregen.

Een nadeel van hierboven beschreven geheugenmetaal is dat het relatief langzaam is. Hierdoor is het niet geschikt voor toepassingen die een snelle actuatie vereisen. MSMA staat voor Magnetic Shape memory

alloys. Deze geheugenmetalen reageren op een magnetisch veld en zijn sneller dan andere geheugenmetalen.

### 5.2.3 magnetostrictieve actuatoren

Magnetostrictie treedt op in de meeste ferro-magnetische materialen. Het leidt tot verscheidene effecten. Het meest bruikbare daarvan wordt het Joule effect genoemd. Dit leidt tot een uitzetting of verkorting van een staaf in een constant, longitudinaal magnetisch veld. Deze rek treedt altijd op in dezelfde richting, onafhankelijk van de richting van het magnetisch veld.

Terfenol-D,  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9}$ , is een magnetostrictieve legering die bij kamertemperatuur een grote rek geeft bij een klein magnetisch veld. Het materiaal kan min of meer gelineariseerd worden in het gedrag door het voor te magnetiseren en het mechanisch voor te spannen.

Lineaire actuatoren kunnen gemaakt worden die verplaatsingen van 20 tot 200  $\mu m$  en krachten van 500 tot 5000 kN mogelijk maken bij lage voltages. Grote, dynamische, rekken zijn mogelijk met Terfenol-D (tot 0,4%). Hoewel een typisch nadeel van magnetostrictieve actuatoren de efficiëntie is, wordt hier een redelijke efficiëntie bereikt.

Basis formules voor het beschrijven van het magnetostrictieve gedrag zijn:

$$S = f(T, H)$$

$$B = g(T, H)$$

waarin S en T tensoren zijn van rek en spanning, B en H vectoren van inductie en het magnetisch veld. De relaties zijn niet lineair. F en g zijn functies die kunnen worden verkregen door het magnetostrictieve effect te meten bij bepaalde omstandigheden. Deze functies kunnen dan numeriek worden beschreven, maar ze kunnen ook bestaan uit een ontwikkelde Fourier-reeks.

Hoewel het gedrag niet lineair is kan het in sommige gevallen toch worden beschreven met de quasi-lineaire vergelijkingen voor piëzo magnetische wetten:

$$S_i = s_{ij}^H T_j + d_{mi} H_n \quad | \quad i, j = 1, \dots, 6$$

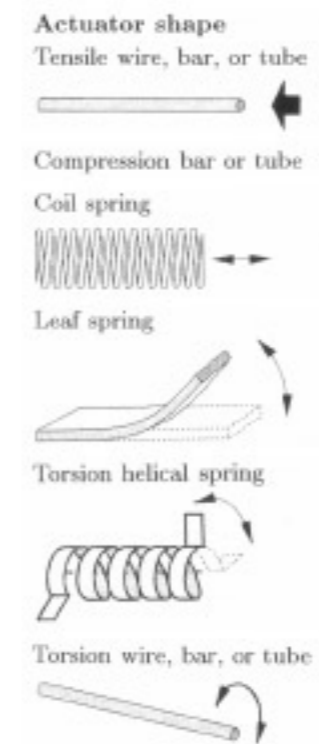
$$B_m = d_{mj} T_j + \mu_{mn}^T H_n \quad | \quad m, n = 1, \dots, 3$$

met s, d en m de magneto-elastische coëfficiënten, S en T de tensoren van rek en spanning en B en H de vectoren van inductie en het magnetisch veld.

Toepassing van magnetostrictieve materialen worden vooral gevonden in de vorm van vervormende actuatoren voor bijvoorbeeld trillingsdemping. Toepassingen in microactuators is mogelijk.

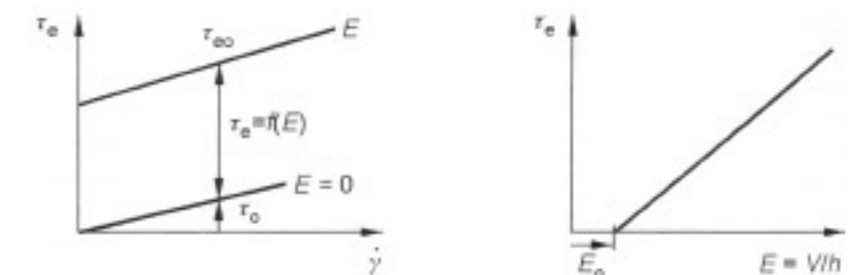
### 5.2.4 electro- en magnetoreologische vloeistof actuators

Er zijn vloeistoffen, suspensies, waarin zodanige deeltjes zitten, dat indien een spanning wordt opgebouwd over de vloeistof, er een bepaalde



Figuur 5.4. Voorkomende vormen van geheugenmetaal actuators

Figuur 5.5. ER vloeistof wel en niet onder spanning. Het model is vergelijkbaar met dat van Bingham plasticiteit



interactie tussen de deeltjes plaatsvindt die de weerstand in de vloeistof doet veranderen. Dit electrovisceuze effect moet niet verward worden met de vertraging die optreedt als een vloeistof begint te stromen in bijvoorbeeld een hydraulische zuiger. Ook de naam 'electrovisceus' is verwarrend, omdat feitelijk de viscositeit maar weinig verandert. Meer is het de schuif en vloeispanning in het materiaal die verandert. Uit experimenten is gebleken dat als de electroreologische (ER) vloeistof onder spanning wordt gezet, er tussen de elektroden 'kolommen' van deeltjes ontstaan die zorgen voor een hogere schuifspanning (figuur 5.5).

Het idee van een ER vloeistof actuator is het inbedden van een ER vloeistof in een vervormbare (niet vloeibare) massa. Het gedrag van dit samengestelde systeem moet wiskundig worden beschreven, vervolgens kan het worden afgesteld voor de toepassing.

Naast electroreologische vloeistoffen, zijn er ook vloeistoffen die reageren op een magnetisch veld. Ook hier is de vloeistof een suspensie van (ijzer)deeltjes in een 'draagvloeistof' als olie of water.

### 5.2.5 chemische actuatoren

Chemische actuatoren werken meestal door een uitzetting van het materiaal die een kracht kan uitoefenen. Soms is dit effect ongewenst, zoals bijvoorbeeld bij de corrosie van staal in beton, maar er zijn ook toepassingen mogelijk waarbij het gas dat vrijkomt tijdens de corrosie de dosering van een smeermiddel aanstuurt. Een bekend voorbeeld van een snelle chemische actuator is de airbag die gebruikt wordt in auto's.

Het nadeel van de meeste chemische actuatoren is de onomkeerbaarheid van de reactie. Hierdoor zijn de actuatoren slechts geschikt voor eenmalig gebruik. Elektrochemie echter kan beter worden aangestuurd en soms zelfs omgekeerd waardoor dit extra mogelijkheden biedt.

Met betrekking tot sensor techniek zijn elektrochemische sensoren toegepast voor het detecteren van schadelijke gassen.

Het veranderen van volume bij een chemische actuator komt meestal op het volgende neer: ofwel het uitgangsmateriaal zelf verandert van structuur, of er ontstaat een ander (extra) materiaal, zoals gas.

Het voordeel van een chemische actuator voor het verzorgen van een volumeverandering boven een pneumatisch systeem is dat daarbij de luchtdruk via een kostbaar systeem in het systeem gebracht moet worden, en later via een ander systeem er weer uit. Als gebruik wordt gemaakt van een elektrochemische actuator blijft alles binnen het systeem. De gasproductie komt meestal tot stand door middel van elektrolyse en het verbruik van het gas vervolgens door toepassing van een brandstofcel.

Omdat de chemische reactie tijd kost is de elektrochemische actuator vooral geschikt voor langzame toepassingen. Dit kan bijvoorbeeld zijn het openen en sluiten van kleppen in verwarmings- en koelingssystemen of het openen van antennes in ruimtevaart toepassingen. De actuator is heel betrouwbaar, gebruikt weinig energie en maakt weinig geluid waardoor het ook goed toegepast kan worden in woongebouwen.

Chemisch-mechanische actuatoren zetten een chemische reactie direct

om in een mechanische reactie. Soms is elektrische energie nodig om de chemische reactie te laten verlopen (electro-chemisch-mechanisch) waarbij dus de elektrische energie de 'power carrier' is. Soms is elektrische energie nodig om de chemische reactie te starten (zoals bij de menselijke spier), er zijn dan chemische componenten die de energie leveren.

Er zijn verschillende chemisch-mechanische stoffen, zoals synthetische rubbers en polyelectrolytische gel's, maar ook spieren zoals die van mensen vallen eronder.

### 5.2.6 samengestelde actuatoren: de spier

Zonder spieren zou er geen beweging mogelijk zijn bij levende organismen. Een beschouwing van misschien wel het meest geavanceerde biologische instrument.

Opbouw van een spier

De opbouw van een zoogdierspier is weergegeven in de figuur. (figuur 5.6) Grofweg gesproken is er sprake van een spierbundel, met daarin bundels van spiervezels. Deze vezels zijn opgebouwd uit strengen die zorgen voor de samentrekking van de spier en ondersteunende cellen. De vezels die zich kunnen samentrekken bestaan uit myosine, actine en Z-membranen.

Contractie werkt door een interactie tussen de actine en de myosine strengen. De kop van een myosine molecuul grijpt aan op een monomeer die zich bevindt in de actine streng. Als op deze manier veel verbindingen tot stand komen, dan verschuiven de strengen ten opzichte van elkaar en vindt een contractie plaats. (figuur 5.7)

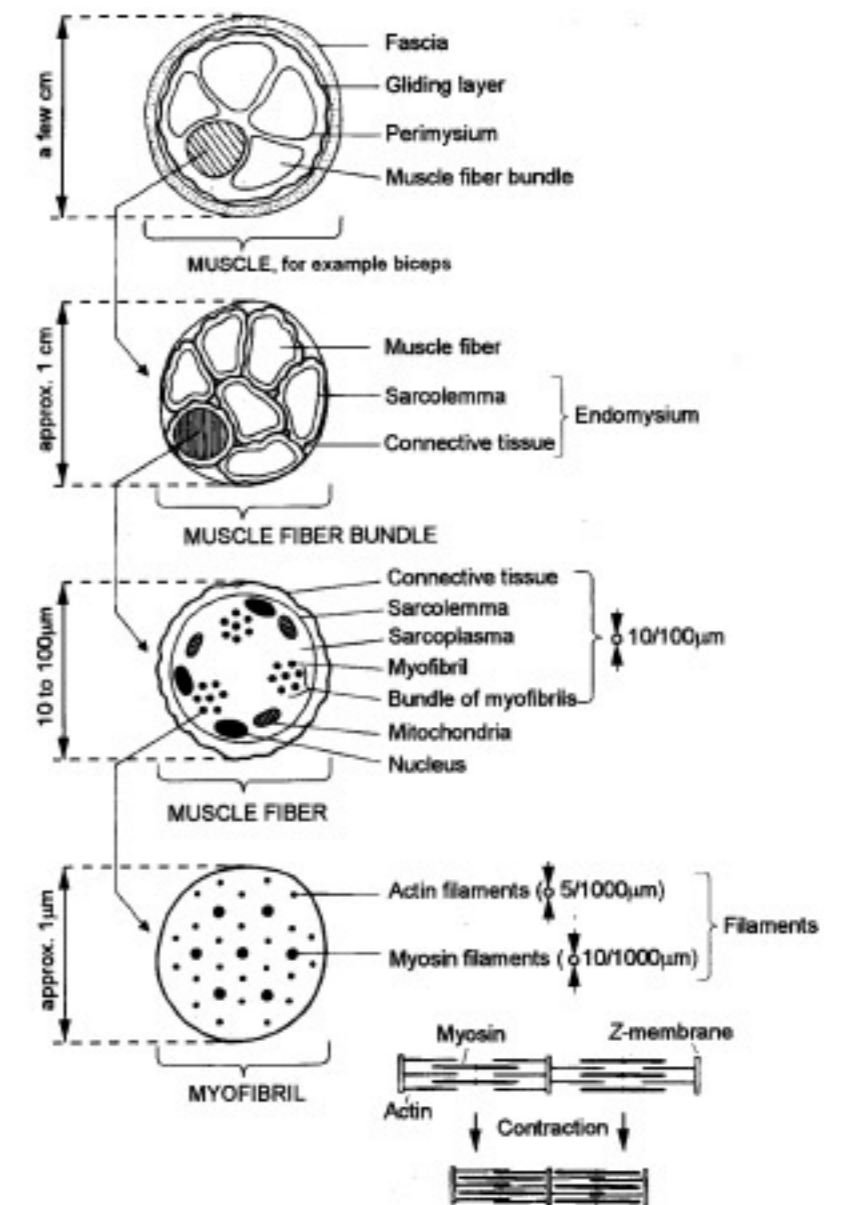
Eigenschappen van de spier

De spanning die een spier kan opnemen of genereren hangt af van de uitrekking van de spier. Als de rek toeneemt, dan neemt de opneembare spanning af, omdat er minder verbindingen tussen actine en myosine gevormd kunnen worden. Als de rek negatief is (de spier wordt ingedrukt), dan kan door een verstoorde structuur in de spier ook minder spanning worden opgenomen.

Een spier reageert op (elektrische) pulsen. Indien de frequentie van deze pulsen wordt opgevoerd volgen contracties elkaar sneller op. Zodra de volgende puls komt voordat de spier tengevolge van de vorige puls weer is ontspannen, neemt de spanning in de spier toe tot een bepaalde waarde. Bij een hogere frequentie wordt deze waarde hoger. 50 pulsen per seconde is ongeveer de grens waarbij de spier niet meer reageert met afzonderlijke reacties, maar met een constante samentrekking.

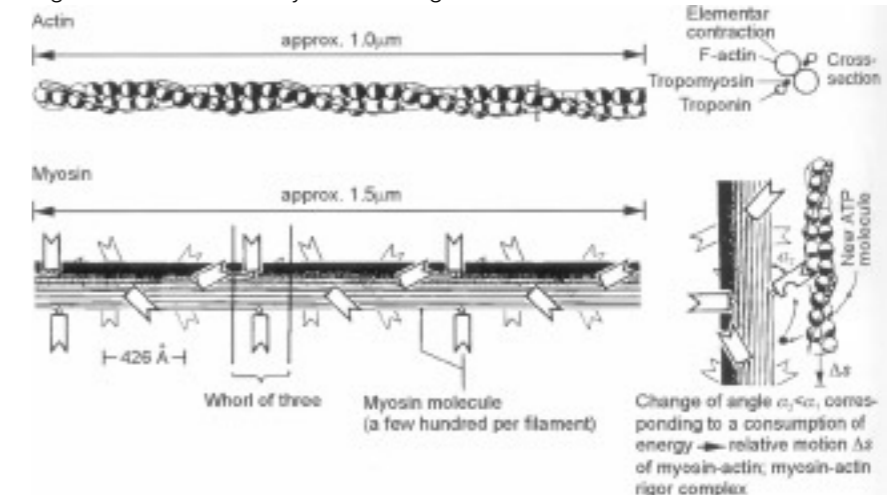
Een (skelet)spier heeft ongeveer een elastische efficiëntie van 85%. Dit betekent dat er 15% energieverlies is tussen het samentrekken en het ontspannen van de spier. De getoonde grafiek geldt voor een passieve werkende spier, ofwel bij een opgelegde vervorming. Een soortgelijke grafiek geldt voor actieve spieren. (figuur 5.8)

Er is een relatie tussen de snelheid en de opneembare kracht van een spier. De relatie is relatief gezien ongeveer gelijk voor alle typen spieren, zoals getoond in de figuur. (figuur 5.9)



Figuur 5.6. Opbouw van een spier zoals voorkomend bij zoogdieren

Figuur 5.7. Actine en Myosine strengen



Het samentrekken van de spier kan in hoofdzaak op twee manieren: bij gelijkblijvende spanning een vervorming ondergaan (isotonisch), of bij gelijke lengte een veranderende spanning (isometrisch). De gevallen (zie ook figuur 5.10) wisselen elkaar af bij het optillen van een gewicht: zodra het gewicht op de grond staat wordt een spanning in de spier opgebouwd (isometrisch), is de spanning groot genoeg, dan verplaatst het gewicht en blijft de spanning in de spier gelijk (isotonisch). Speciaal geval, dat het meest lijkt op de in de natuur voorkomende situatie is een spier verbonden aan een veer. Hier vindt een combinatie van beide gevallen plaats (genaamd auxotonisch). (figuur 5.10)

Het tot stand brengen van bewegingen  
Er worden door Nachtigall in [8] vier manieren van bewegen onderscheiden die door spierwerking tot stand komen.

#### 1. Een hoekverandering

We nemen als voorbeeld de biceps en de triceps. Door de aansluiting van de spier aan een hefboom heeft een contractie van de spier een hoekverandering tussen de boven- en onderarm tot gevolg. De tegenoverliggende spier, de antagonist, kan het gebeurde tegengaan of ongedaan maken.

#### 2. Een verandering van afstand

Bij vleugels van sommige insecten worden spieren gebruikt om met behulp van het mechanisme van hoekverandering de vleugel te laten bewegen (in feite net als de onder- ten opzichte van de bovenarm). Bijen en verder ontwikkelde vliegen vliegen met behulp van een ander mechanisme. Een kap die met spieren aan de rest van het lichaam is bevestigd wordt op en neer bewogen. Doordat de vleugels bevestigd zijn aan twee scharnierpunten bewegen ook deze op en neer. (figuur 5.11)

#### 3. Een verandering in de oppervlakte

Er zijn spieren die iets veranderen in een oppervlakte, zoals bij een inktvis die van kleur kan veranderen. Dit gebeurt doordat spieren in de huid van de vis de pigmentcellen kunnen uitrekken. De pigmentdeeltjes verspreiden zich hierdoor over de huid waardoor de kleur donkerder wordt. Bij het ontspannen van de spiertjes trekken de pigmentdeeltjes in de cellen weer naar elkaar toe en de lichtere achtergrondkleur komt terug.

#### 4. Een verandering van volume

Er zijn spieren die een volume kleiner maken, zoals spieren in slagaderen om de bloeddruk te regelen. Hierbij is de bloeddruk de antagonist die bij ontspannen van de spieren het volume weer groter maken.

#### Kracht, positie en sturing

Bij de biceps en de triceps zien we dat de spier relatief dicht bij de scharnier is bevestigd. Dit betekent dat voor het verplaatsen van de hand een relatief grote kracht nodig is, immers voor momentevenwicht moet voor hetzelfde moment een veel grotere kracht worden uitgeoefend. Toch lijkt het bevestigingspunt van de spier niet verkeerd, immers als de spier dicht bij de hand bevestigd zou zijn, zou de arm een veel minder praktisch instrument zijn.

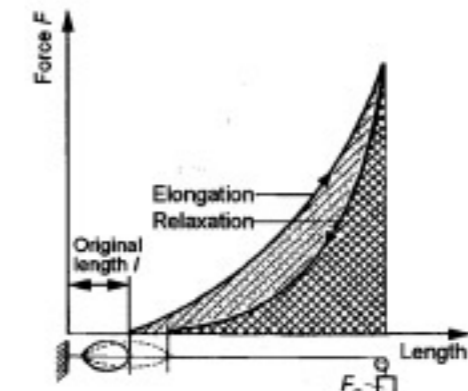
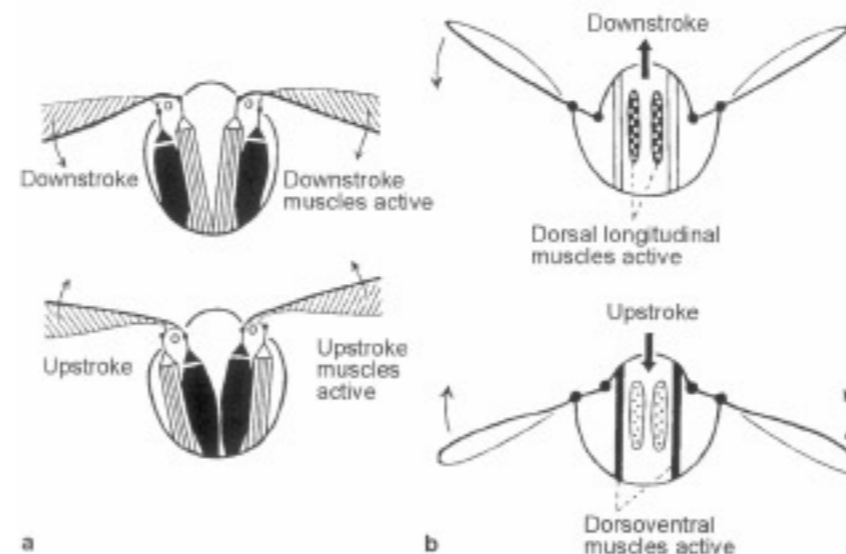
Bij het bewegen van de arm valt een ander principe op. Bij een gestrekte

arm is de 'arm' van het moment door de spierkracht ten opzichte van het gewicht erg klein: er is een grote kracht nodig voor het bewegen van de onderarm. Zodra de onderarm een hoek maakt met de bovenarm, dan wordt de momentarm groter waardoor bij gelijkblijvende spanning in de spier de onderarm wordt 'gekatapulteerd'. Voordat de onderarm zijn uiteindelijke positie heeft bereikt kan de spier zich al ontspannen. Omgekeerd kan de antagonist zich beginnen te spannen voordat de onderarm zijn positie heeft bereikt. Dit effect kan versterkt worden doordat het gewicht dat zich in de hand bevindt een steeds kleinere momentarm krijgt ten opzichte van het gewicht. (figuur 5.12)

Het komt ook voor dat spieren niet zelf voor een beweging zorgen, maar door het aanspannen ervan een andere beweging mogelijk maken. Dit is bijvoorbeeld het geval bij het vleugelmechanisme van vliegen.

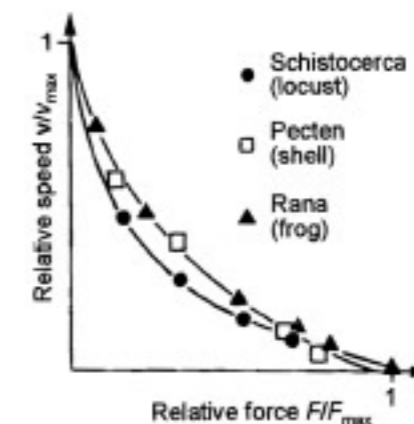
Ook bij het springen van bijvoorbeeld sprinkhanen en vlooien is er sprake van een samenwerking van verschillende spieren met verschillende functies. Dit vereist een bijzondere coördinatie.

Voor het reageren op de samentrekking van een spier zijn zenuwsystemen rond de spieren gewikkeld. Zodra de onderlinge afstand tussen de wikkelingen verandert geven ze een signaal af. Voor aanvang van de beweging krijgt niet alleen de spier, maar ook de sensor de intentie van de beweging mee. Hierdoor kan bijvoorbeeld op kleine of juist op grote veranderingen gelet worden. Een typische 'control loop' is weergegeven in de figuur. (figuur 5.13)



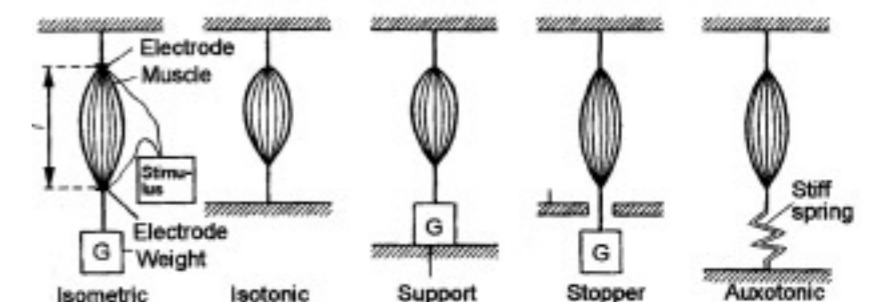
Figuur 5.8. Efficiëntie van een typische skelet spier

Figuur 5.9. Relatie tussen snelheid en opneembare kracht van een typische spier



Figuur 5.10. Het tot stand brengen van bewegingen

Figuur 5.11. Eenvoudig bewegingsmechanisme insect





### 5.2.7 samengestelde actuatoren: pneumatische spieren van Festo

Festo is een bedrijf dat wereldwijd de toon zet op het gebied van pneumatische apparatuur. Veel pneumatiek wordt ingezet in machinerie. Door middel van compressoren, leidingstelsels, automatische ventielen die druk- of stromingsgestuurd werken worden actuatoren van allerlei vorm in beweging gezet om met verschillende precisie en snelheid bepaalde taken uit te voeren. Een van de actuatoren die worden geleverd en geproduceerd door Festo is de Fluidic Muscle. Een spier die qua gedrag lijkt op een biologische spier. (figuur 5.14, weblink07)

Het principe is eenvoudig: de spier bestaat uit twee aansluitingen met daartussen een membraan van vezelversterkt materiaal (figuur 5.15). Indien druk wordt opgebouwd in de huls, wordt het materiaal naar buiten gedrukt als een ballon. Hierdoor neemt de lengte van de spier af. De hoge aanvangskracht van de spier neemt af met de verkorting. Dit is in te zien als gekeken wordt naar de tangens van de hoek die het membraan maakt met de as van de spier. In uitgangspositie heeft een druk in de huls een groot effect. Dit komt doordat de ontbondene van de kracht in de richting van de as van de spier groot is. Naarmate de kromming groter wordt, neemt de grootte van die ontbondene af. Doordat de inwendige hoek van het weefsel van het spiermateriaal verandert, en daarmee de richting van de vezels, neemt ook de stijfheid van de spier af.

Het typische verloop van de kracht uitgezet tegen de vervorming is weergegeven in figuur 5.16. Duidelijk te zien is de niet lineaire afname van de kracht bij groter wordende vervorming. Dit betekent dat ook de stijfheid van de spier verandert bij veranderende lengte.

In het eenvoudigste geval levert de spier een kracht vanuit rustpositie. Het kan dan bijvoorbeeld een constante massa optillen en deze in verschillende posities vasthouden. Ook kan de spier worden voorgerektd waardoor de spier langer wordt dan de uitgangspositie. Op deze manier worden grotere aanvangskrachten verkregen.

Daarnaast reageert de spier als pneumatische veer op een veranderende belasting. Hierbij kan de voorspankracht of de veerstijfheid worden aangepast. Als de spier als veer fungeert kan de druk of het volume constant gehouden worden.

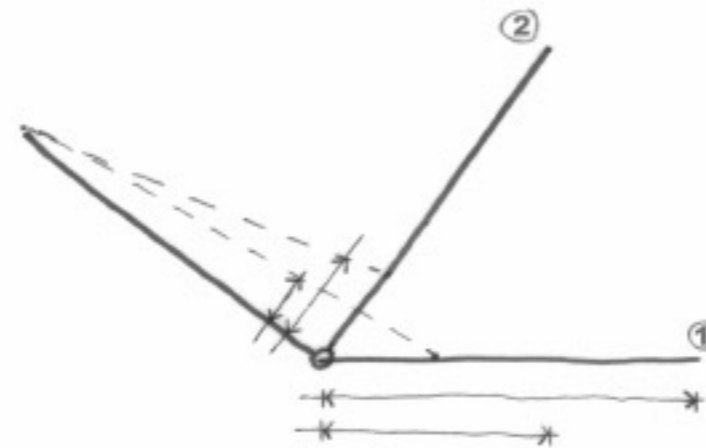
De spier wordt door Festo geleverd in verschillende afmetingen. De lengte is maximaal negen meter, de doorsnede varieert van tien tot 40mm. Bij de grootste doorsnede zijn verkortingen mogelijk tot 25% van de oorspronkelijke lengte.

Het bepalen van de benodigde spier kan geschieden door gebruik te maken van tabellen die door Festo worden uitgegeven. Het nadeel is dat effecten als hysteresis niet worden meegenomen. Een programma dat door Festo is ontwikkeld om de geschikte spier te kiezen doet dat wel. Dit is te downloaden van hun internetsite [www.festo.com](http://www.festo.com).

Met behulp van diverse onderdelen kan de spier op verschillende manieren worden bevestigd. Ook kan de spier aan twee kanten worden voorzien van een lucht aan-/afvoer waardoor ook grotere spieren snel kunnen reageren.

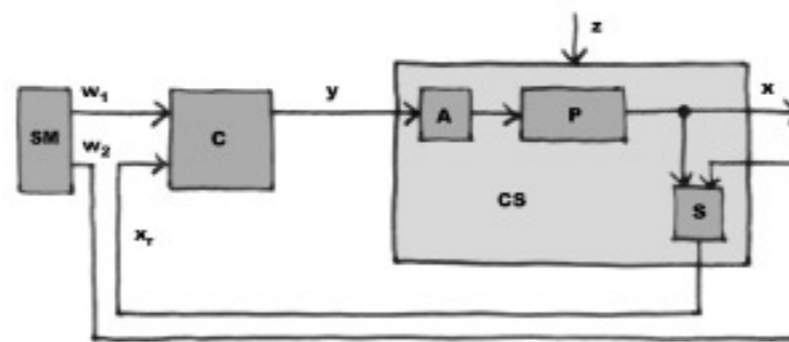
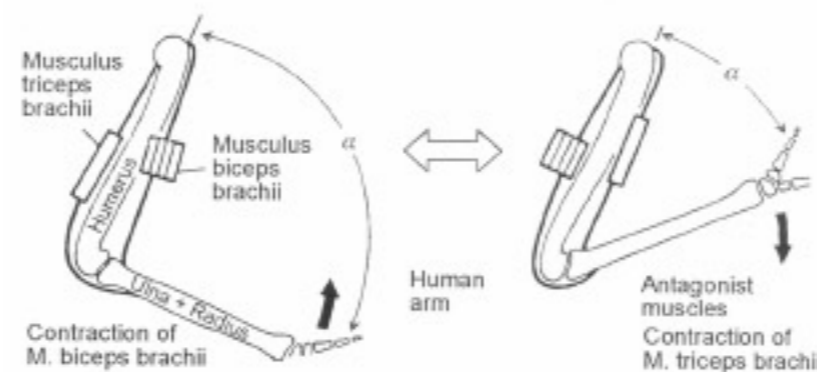
Door middel van een leidingstelsel kan de druk centraal worden

opgebouwd en verspreid worden naar de spieren. Flexibele leidingen van kunststof kunnen hiervoor worden gebruikt waardoor de spier is toe te passen in een bewegend systeem.



Figuur 5.12a. Katapult effect schematisch

Figuur 5.12b. Katapult effect bij hoekverandering onderarm



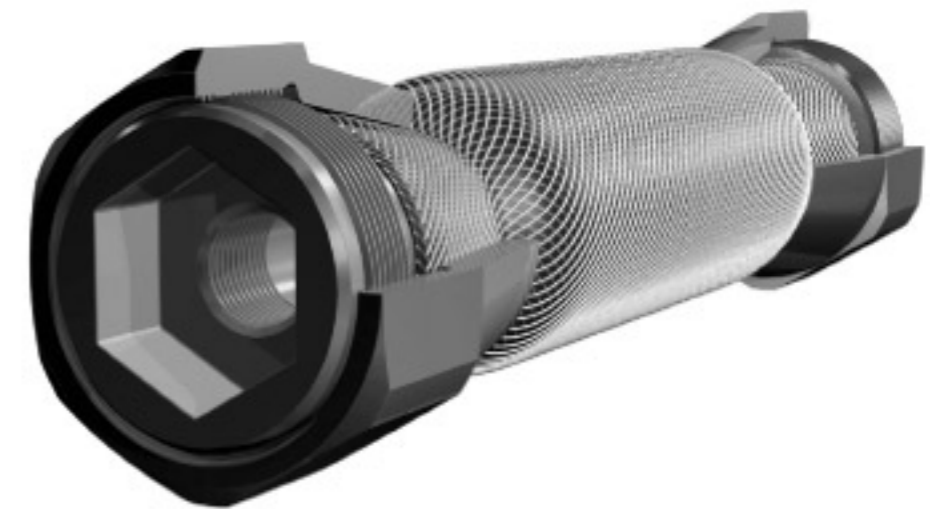
Figuur 5.13. Control loop van een spier

SM: Setting means; C: Controller; A: Actuator; P: Proces or system to be controlled; S: Sensing device; CS: Controlled System; w1, w2: Reference input 1 and 2; y: Manipulated variable; x: Output quantity; xr: Feedback variable; z: Disturbance

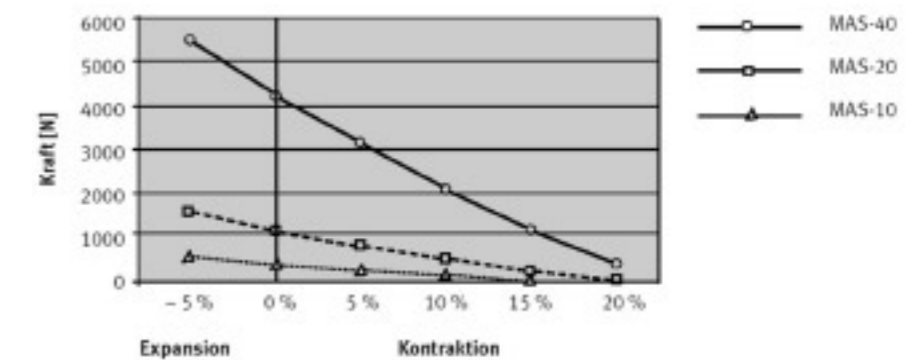


Figuur 5.14. Festo Fluidic Muscle (MAS 10, 20 en 40)

Figuur 5.15. Opbouw Festo spier



Figuur 5.16. Relatie tussen opgewekte kracht en contractie



## 6. ontwikkeling adaptief draagsysteem

### 6.1 inleiding

Trans-ports vervormt. Zie daartoe ook paragraaf 3.5.2, [103] en figuur 3.9. Grote veranderingen van de bouwvorm vragen van de constructie dat deze kan mee vervormen. Gezien deze grote vervormingen die op kunnen treden op schijnbaar willekeurige momenten, doemt de parallel op met een levend organisme. Een beeld ontstaat van een draagconstructie als een skelet, met zuiver trek- en drukelementen. Spieren en botten. Een tensegrity structuur (zie paragraaf 4.2.5), of iets wat daarop lijkt.

Omdat het gebouw en de constructie steeds een andere vorm aannemen, moet de constructie steeds opnieuw een evenwicht zoeken. De constructie past zich dus voortdurend aan.

In dit hoofdstuk zullen eerste de uitgangspunten worden besproken die ten grondslag liggen aan de draagstructuur SAM. De ontwikkeling van dit systeem is echter nog niet afgerond. Daarom wordt verderop in dit hoofdstuk toegelicht hoe SAM kan worden doorontwikkeld en wat overwegingen daarbij kunnen zijn. Om te kijken of het systeem kans van slagen heeft, is versie 2.0 van het systeem als uitgangspunt genomen voor een analyse en een computermodellering. Dit wordt beschreven in de hoofdstukken 7 en 8.

### 6.2 uitgangspunten en randvoorwaarden

Uit de literatuurstudie is een aantal interessante ideeën naar voren gekomen. Enkele daarvan zijn als uitgangspunt gekozen voor de te ontwikkelen beweegbare constructie. Uiteindelijk zijn de belangrijkste uitgangspunten samengevat in de vier onderstaande:

1. driehoekig patroon
2. meerlagig systeem
3. systeem bestaande uit repeterende eenheden
4. systeem dat natuur nabootst

uitgangspunt 1: driehoekig patroon

Bij het ontwikkelen van een systeem is uitgegaan van een driehoekig patroon. Alle ruimtelijke vormen zijn met driehoeken te maken of te benaderen. Daarnaast is de driehoek een vormvast element, waardoor het een geschikte uitgangsvorm is voor een constructie.

Regelmatige ruimtelijke vormen die alleen bestaan uit gelijkzijdige driehoeken zijn de tetraëder (4-vlak), de octaëder (8-vlak) en het icosaeëder (20-vlak). De twee andere regelmatige polyeders zijn de hexaëder of kubus (6-vlak opgebouwd uit vierkanten) en de dodecaëder (12-vlak opgebouwd uit vijfhoeken), zie figuur 6.1. Alle andere veelvlakken zijn afgeleid van deze basisvormen door bijvoorbeeld hoeken af te knotten of combinaties te maken van meerdere soorten veelhoeken. In verband met de eenvoud is vooral gekeken naar de mogelijkheden die het tetraëder en het octaëder bieden.

uitgangspunt 2: meerlagig systeem

Gezien de grote veranderingen die de vorm van de constructie moet kunnen ondergaan leek het in uitgangspunt onmogelijk een enkellaags

constructie te ontwerpen. Een enkellaags constructie is in principe minder geschikt om te worden toegepast in niet-orthogonale vormen met verschillende krommingshoeken. Bij een meerlagige constructie kan de constructiehoogte worden vergroot waardoor een veel grotere vrijheid in toelaatbare vormen ontstaat. Hierbij komt het voordeel dat door het toevoegen van een extra laag de mogelijkheid ontstaat de hoogte te gebruiken voor vervorming van de constructie uit het vlak. Wordt namelijk de onderste laag samengetrokken, dan bolt de constructie op. Omgekeerd bolt de constructie naar beneden als de bovenste laag wordt samengetrokken.

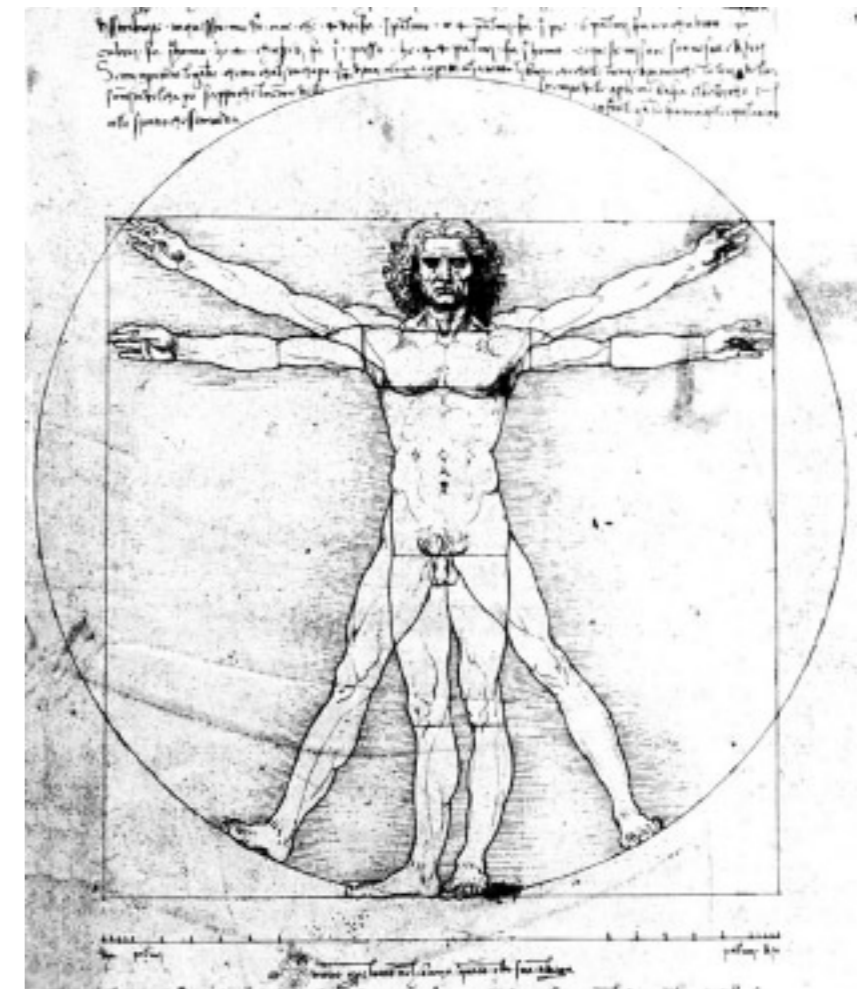
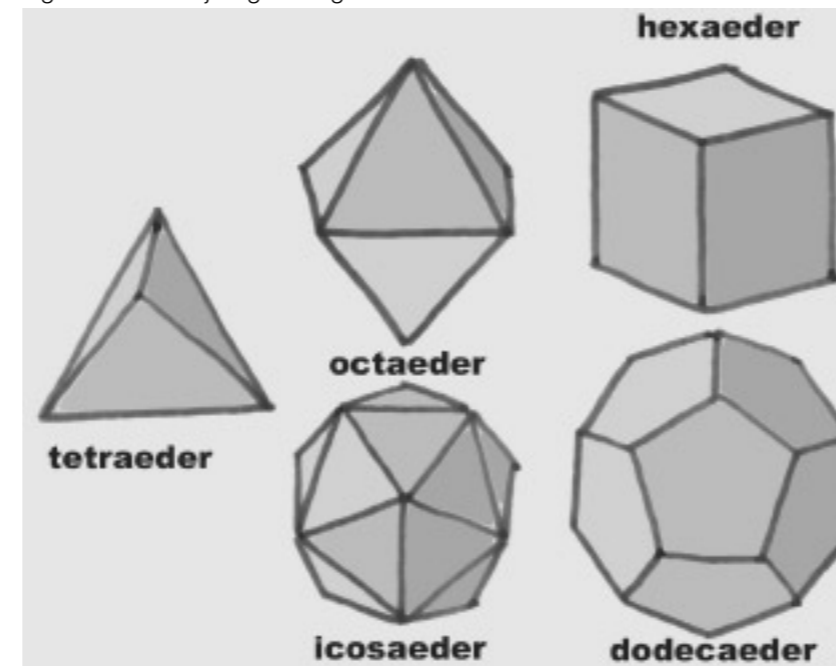
uitgangspunt 3: systeem bestaande uit eenheden

De filosofie achter het aanpassingsvermogen van de constructie is dat de constructie niet centraal wordt aangestuurd. Dit betekent dat elementen of eenheden van gekoppelde elementen ter plaatse bepalen hoe ze zich moeten aanpassen. Om eenheden op elkaar te laten reageren is het niet noodzakelijk om de hele constructie op te bouwen uit dezelfde eenheden, maar het vereenvoudigt de opgave in beginsel en het maakt de oplossing universeler. Bijkomend voordeel is dat standaardisering de constructiekosten reduceert. Hoewel sommigen geloven dat binnen afzienbare tijd standaardisering niet meer persé goedkoper is dan het produceren van unieke elementen, is de huidige stand van zaken een andere.

uitgangspunt 4: systeem dat natuur nabootst

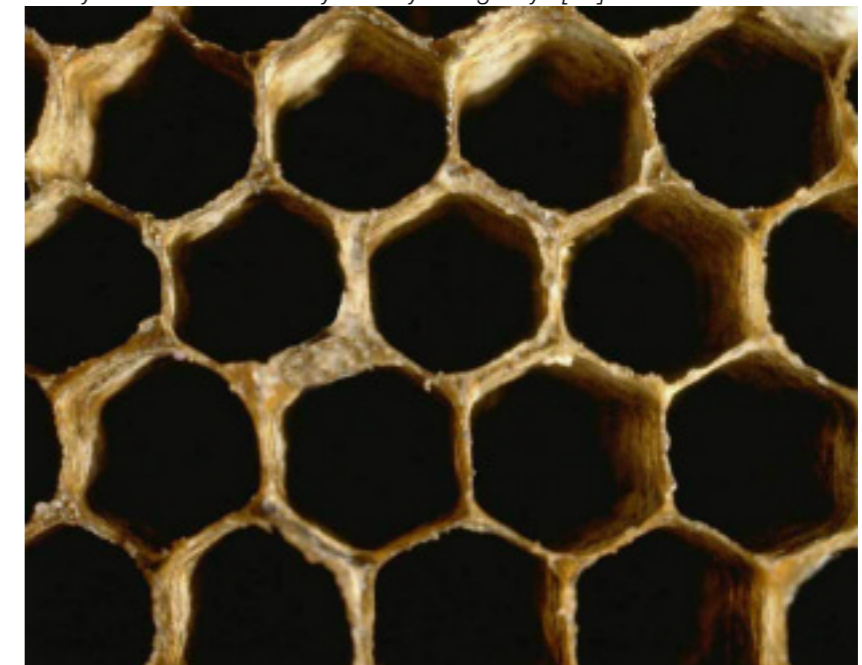
De natuur is altijd een grote inspirator geweest voor technologen (figuren 6.2 en 6.3). Hoewel niet altijd efficiënt, is het in staat zich aan te passen aan veranderingen. Willen we dus een flexibel adaptief systeem, dan kan het de moeite lonen om bijvoorbeeld naar ons eigen lichaam te kijken. Uitgerust met ons evenwichtsorgaan is het lichaam in staat in evenwicht te blijven onder sterk uiteenlopende omstandigheden: lopend over terrein met verschillende hellingen of met stenen, maar bijvoorbeeld ook op een versnellende ondergrond of bij windbelasting.

Figuur 6.1. De vijf regelmatige veelvlakken



Figuur 6.2. Leonardo da Vinci en de verhoudingen van de mens

Figuur 6.3. De honingraat is een uitermate efficiënt patroon. "Bees build honeycombs because they're busy being lazy." [41]



We willen een systeem maken dat bestaat uit zuiver trek en drukstaven. Dat geïnspireerd is op een skelet met spieren waarbij elke spier een antagonist heeft, een spier die het tegengestelde effect veroorzaakt. Een systeem, hard van binnen, zacht van buiten. Botten binnenin, spieren eromheen. Tensegrity of iets wat daarop lijkt (zie ook paragraaf 4.2.5).

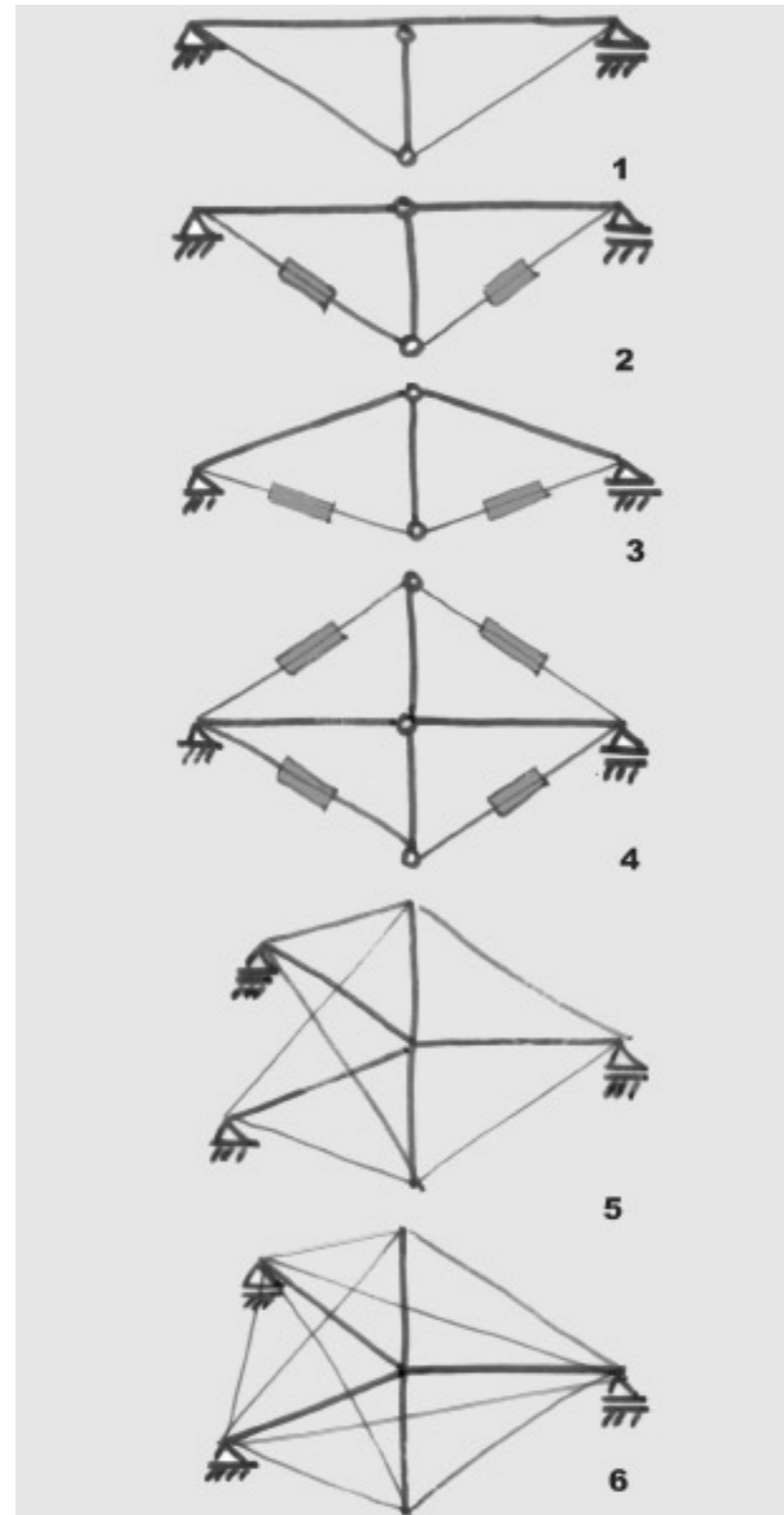
### 6.3. S.A.M

SAM is de afkorting die staat voor Smart Adaptable Machine (figuur 6.4), de constructie die wordt ontwikkeld voor Trans-ports. Oorspronkelijk komt het idee van een onderspannen ligger in de 2D ruimte (figuur 6.5.1). Dit systeem zou met behulp van twee actuatoren (in de trekstaven) de vervorming van de ligger bij een variërende, naar beneden gerichte belasting constant kunnen houden (figuur 6.5.2 en 6.5.3). Een naar boven gerichte kracht echter kan ongehinderd de constructie vervormen, dus werden ook twee trekstaven boven aangebracht (figuur 6.5.4). Dit systeem werd vertaald naar de 3D ruimte door een extra 'helft' in het midden aan de ligger te bevestigen en de drie helften in bovenaanzicht met onderlinge hoeken van  $2\pi/3$  te rangschikken (figuur 6.5.5). Met behulp van drie trekstaven rondom werd het systeem vormvast gemaakt (figuur 6.5.6). Worden nu alle trekstaven als actuator uitgevoerd, dan ontstaat een samenstel van elementen wat een grote vormvrijheid heeft en wat vormvast gehouden kan worden. Dat is SAM.

SAM is in ontwikkeling. Ergens in die ontwikkeling is een punt gekozen van waaruit het principe getest wordt. Dat is bij versie 2.0. Feitelijk is S.A.M v2.0 een dubbele tetraëder (zie ook figuur 6.5). Een doorgaande staaf loopt van de top naar beneden en in het midden zijn drie drukstaven scharnierend verbonden met de doorgaande staaf. Alle einden van de drukstaven worden verder met elkaar verbonden door trekstaven. Een basiselement van SAM bestaat dus uit één buigstaaf, drie drukstaven en negen trekstaven. Het vlak dat wordt beschreven door de drie armen (drukstaven) vormt in uitgangssituatie de basisdriehoek waarmee het patroon van de gehele draagconstructie wordt opgebouwd (figuur 6.6).

De verschillende eenheden worden onderling gekoppeld via de eindpunten van de drukstaven. Behalve langs de randen ontstaan daar knooppunten waar 6 elementen elkaar raken. Dit betekent dat in een enkele knoop 6 drukstaven en 18 trekstaven (actuatoren) worden gekoppeld (figuur 6.7). Daarnaast worden de uiteinden van de buigstaven (de top en de onderkant van de constructie) van de verschillende eenheden met elkaar verbonden door actuatoren waardoor de elementen ten opzichte van elkaar ook vormvast verbonden zijn en actief kunnen bewegen. Het complete systeem is op deze manier flexibel (figuur 6.8).

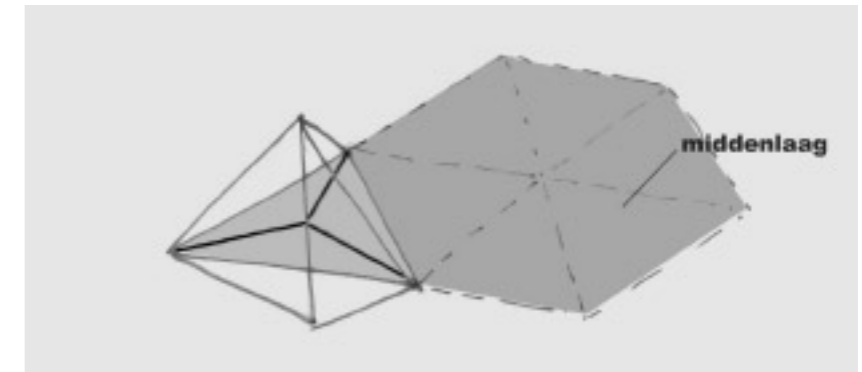
**SAM**  
**smart adaptable machine**  
**autonomous mechanism**  
**structural architectural mode**



Figuur 6.5. Ontwikkeling van SAM v2.0

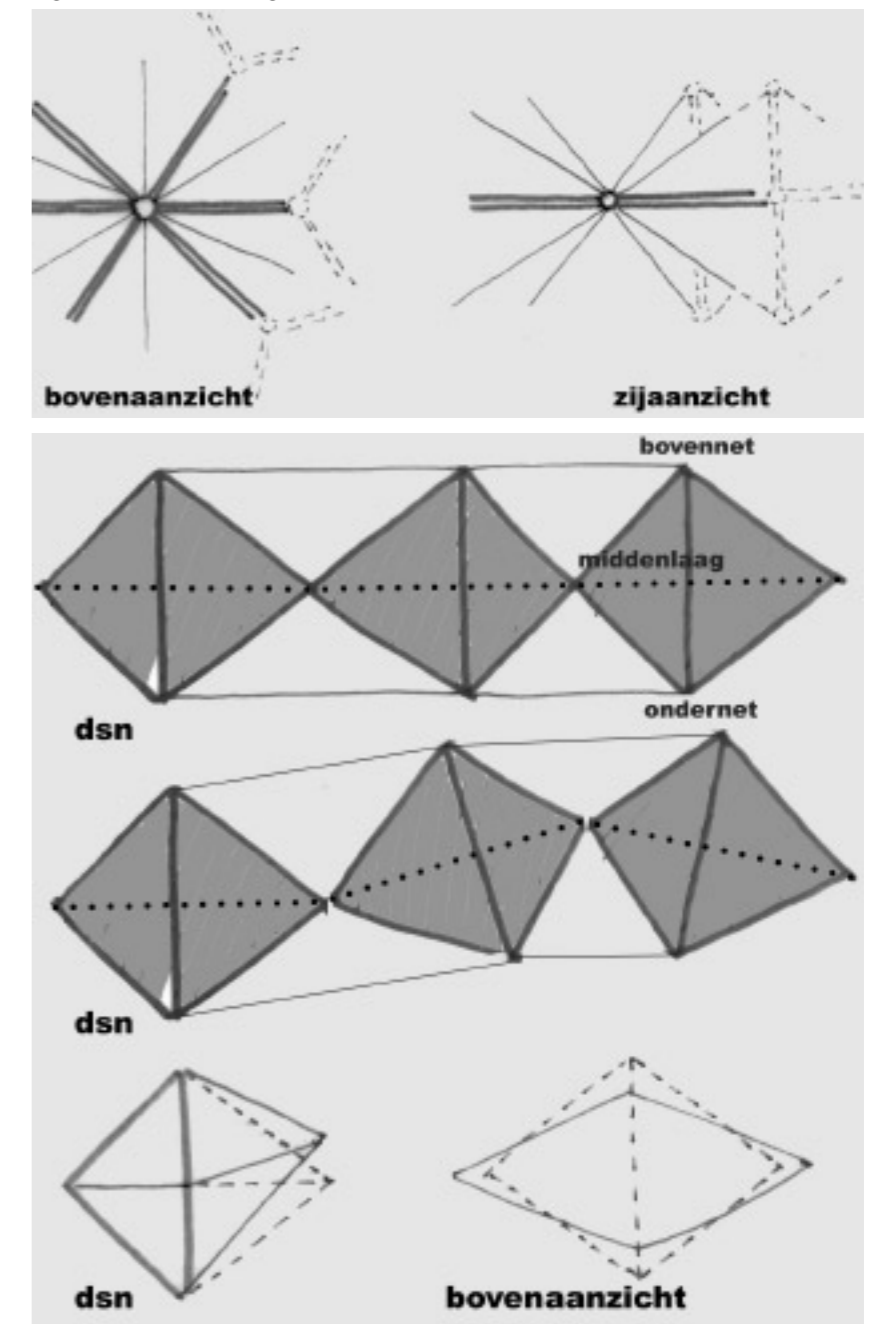
←Figuur 6.4. SAM

→Figuur 6.8. Boven- en ondernet en vervormingsmogelijkheden



Figuur 6.6. Basispatroon constructie

Figuur 6.7. Aansluiting van 24 elementen



### 6.3.1 actuatoren

De actuatoren in de trekstaven moeten een verkorting en/of verlenging in lengterichting kunnen ondergaan. Er zijn verschillende systemen die daarvoor in aanmerking komen. De keuze van een van deze systemen legt in belangrijke mate de randvoorwaarden vast waarbinnen de constructie verder kan worden ontwikkeld.

1. Het meest voor de hand liggen pistons (figuur 6.9). Eenvoudige zuigers of telescopische systemen die hydraulisch of pneumatisch worden aangestuurd. Deze systemen zijn snel en nauwkeurig. Bovendien zijn ze veelzijdig toegepast en zijn ze in staat grote krachten op te wekken. Het aansluiten van deze actuatoren in een constructie kan op een relatief eenvoudige manier, het belangrijkste nadeel is het hoge eigengewicht.

2. Daarnaast zijn schroefsystemen denkbaar waarbij de trekstaaf in lengterichting voorzien is van een schroefdraad. De trekstaaf of een onderdeel in de aansluiting draait rond, waardoor de trekstaaf in- en uitgeschroefd kan worden. Het nadeel van dit systeem is dat het langzaam is. Bovendien zijn de trekstaven relatief zwaar omdat het geen kabels kunnen zijn, maar massieve staven.

3. Een trekdraad die zich oprolt heeft niet het nadeel van het hoge eigengewicht, maar van een bewerkelijke aansluiting. Elke trekdraad moet worden uitgerust met een spoel waarop de draad kan worden gewonden. Hoewel dat voor het systeem niet noodzakelijk is, zijn grote vervormingen mogelijk.

4. De pneumatische spier van Festo (figuur 6.10, weblink07) is eenvoudig te verbinden aan de constructie, heeft een laag eigengewicht, scoort redelijk als het gaat om snelheid en kan verkorten tot 25% van zijn oorspronkelijke lengte. Omdat het systeem werkt op luchtdruk kan per spier worden volstaan met een regelbaar ventiel wat lucht in- en uitlaat van en naar een systeem van drukleidingen. Omdat het daarnaast een parallel heeft met de (zich gedraagt als een) organische spier wordt dit element als actuator toegepast in SAM. Het belangrijkste nadeel van de Festo spier zijn de geringe krachten die het kan opnemen. Bronnen bij Festo vermelden dat spieren met grotere trekkrachten dan nu mogelijk zijn ontwikkeld worden, maar ook kan gedacht worden aan het parallel toepassen van meerdere spieren tegelijk (spierbundels).

### 6.3.2 boven- en onderlaag

De eenheden van SAM kunnen in drie lagen worden opgedeeld: een top-, onder- en middenlaag (zie ook figuur 6.8). De eenheden worden in principe zodanig gekoppeld dat de middenlaag van de eenheden de hartlijn van de totale constructie is. Om het geheel kinetisch bepaald te maken moeten de boven- en onderkanten van de eenheden worden gekoppeld. Deze koppelingen vormen boven en onder een extra laag in de constructie. We hebben dan in totaal drie constructieve lagen. Zodra de onder- en bovenlaag niet meer gelijk vervormen, beweegt de constructie uit zijn vlak.

Een belangrijk probleem dat op kan treden in de constructie als geheel is globale instabiliteit. Hierbij bezwijkt (een deel van) de constructie door tweede orde effecten. Het complexe hieraan is dat het verschijnsel niet lokaal waarneembaar is en dat het in verschillende vormen kan optreden. Figuur 6.11 laat verschillende knikvormen zien voor een koepel. Als het

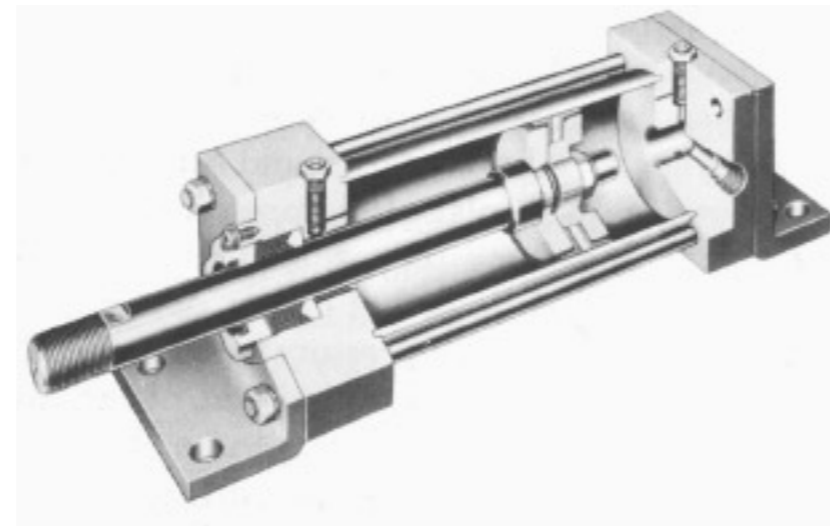
systeem dus zuiver uit eenheden bestaat die slechts informatie krijgen van en verstrekken aan hun directe burens, bestaat het gevaar dat de constructie bezwijkt. Er zijn meerdere oplossingen denkbaar voor dit probleem. Als bijvoorbeeld elk element behalve met zijn directe burens, ook met elementen elders in de constructie communiceert, dan zouden configuraties waarbij gevaar voor instabiliteit bestaat op tijd gesignaleerd kunnen worden. De elementen reageren dan behalve op hun directe burens ook op andere elementen.

Een andere oplossing is dat het boven- en ondernet deze functie vervullen. Het boven- en ondernet zijn de actuatoren die de eenheden koppelen om de constructie vormvast te maken. Deze kunnen met behulp van eenvoudige regels voor bijvoorbeeld minimale of maximale kromming en dikte van de constructie instabiliteit zoals doorslag voorkomen. Boven- en ondernet worden zo de veiligheidsvoorziening van de constructie. Een vangnet.

### 6.3.3 aansluitingen

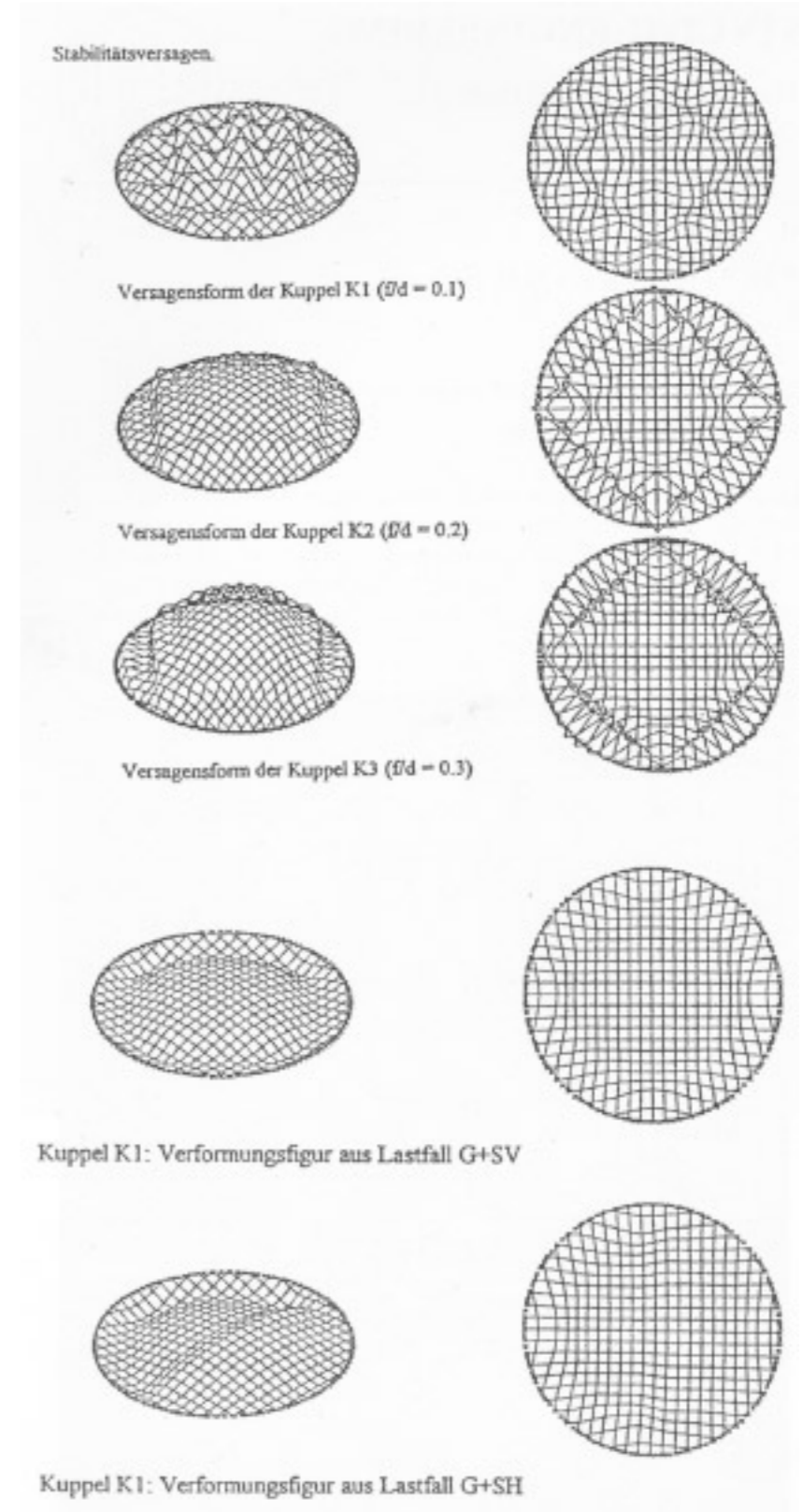
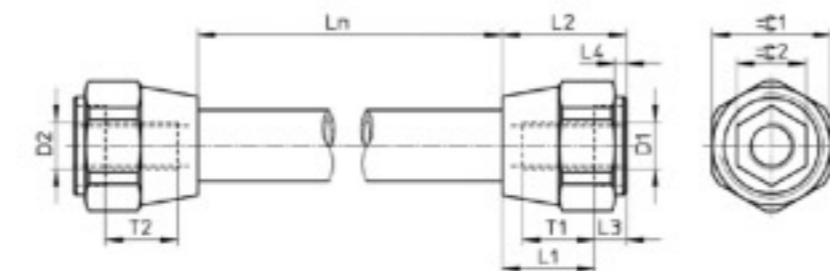
Binnen SAM zijn er drie verschillende typen aansluitingen. Type 1 is de aansluiting tussen de armen en de buigstaaf. Type 2 is de aansluiting tussen de uiteinden van de armen van de verschillende eenheden. Type 3 is de aansluiting van de eenheden aan het boven- of ondernet (figuur 6.12).

Afhankelijk van de uitvoering kan in de verschillende typen aansluitingen instabiliteit optreden (figuur 6.13). Dit heeft te maken met de richting en positie van de hartlijnen van de elementen. Ideaal zouden de aansluitingen



Figuur 6.9. Opengewerkt zuigersysteem

Figuur 6.10. Festo Fluidic Muscle



Figuur 6.11. Verschillende bezwijkvormen voor een koepel, heel en half belast.

van de typen 1 en 2 bollen zijn waar tegenaan de drukstaven zo zijn bevestigd dat de hartlijnen altijd door het midden van de bol lopen (figuur 6.14). Dit soort verbindingen lijkt op die in onder andere het menselijk lichaam voorkomen. Het zijn gewrichten. Omdat de staven bij deze typen aansluitingen altijd onder druk staan hoeven ze niet vast verbonden te worden aan de bol, ze drukken zichzelf vast.

De rotatievrijheid van de staven wordt op deze manier afhankelijk van de grootte van de bol. Daarnaast zijn er enkele restricties aan de bewegingsvrijheid van de staven om te zorgen dat ze elkaar niet raken, om te zorgen dat andere kunnen blijven bewegen en om instabiliteit te voorkomen.

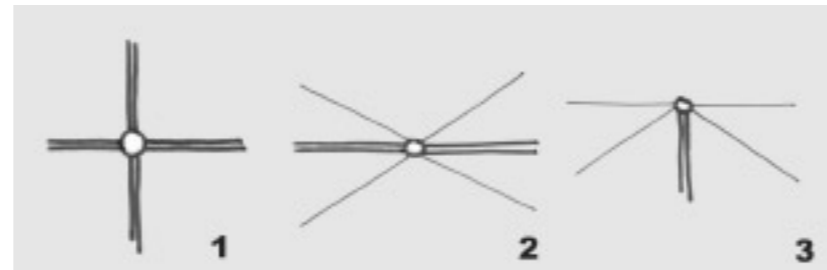
Voor de hoeken  $\alpha$ ,  $\beta$  en  $\gamma$  is in samenhang met de vervormingsmogelijkheid van de Festo spieren (en een veiligheidsmarge) een maximale hoekverandering van  $10^\circ +$  en  $-$  aangehouden. Omdat er meerdere eenheden worden gekoppeld kan de totale vervorming van de constructie oplopen. Voor de hoeken  $\delta$  en  $\epsilon$  is een minimale hoek van  $90^\circ$  en een maximale hoek van  $150^\circ$  aangehouden. Dit heeft naast de fysieke restricties van de Festo spier ook te maken met het te allen tijde mogelijk blijven van een beweging terug naar de uitgangspositie. Hier ontstaat het probleem dat als twee hoeken  $90^\circ$  zijn, de resthoek groter is dan  $150^\circ$ . Er is dus sprake van een bepaald oplossingsgebied waarbinnen de hoeken mogen variëren. Dit gebied is weergegeven in figuur 6.15.

### 6.3.4 filosofie van de aansturing

In paragraaf 4.3 is uiteengezet hoe een zwerm (figuren 6.16 en 6.17) of een gedecentraliseerd systeem over een zekere intelligentie kan beschikken. Het doel is deze vorm van intelligentie te implementeren in SAM. Dit betekent dat er geen centraal systeem is wat de constructie aanstuurt en continu uitrekt, maar dat de verantwoordelijkheid voor het uitvoeren van de verschillende taken bij de verschillende elementen wordt gelegd. In het geval van SAM bij de afzonderlijke eenheden.

Omdat van te voren niet duidelijk is of een dergelijk systeem werkt is het belangrijk dat een degelijk model wordt gemaakt om verschillende principes onder verschillende omstandigheden te testen. Dit wordt besproken in hoofdstuk 8. Verwacht wordt dat een prototype van enkele eenheden dat geen last heeft van globale instabiliteitsverschijnselen zal werken als het zuiver gebaseerd is op zwermgedrag. Voor de constructie als geheel is dat moeilijk te voorspellen.

Eenvoudige regels waar de constructie zich aan kan houden kunnen per eenheid in een regelunit worden ingelezen waarmee de ventielen van de Festo spieren worden aangestuurd. Er kan worden gebruik gemaakt van een systeem met continu-drukleidingen. Spieren kunnen dan altijd worden gespannen, ontspannen betekent het afleiden van lucht naar de omgeving.

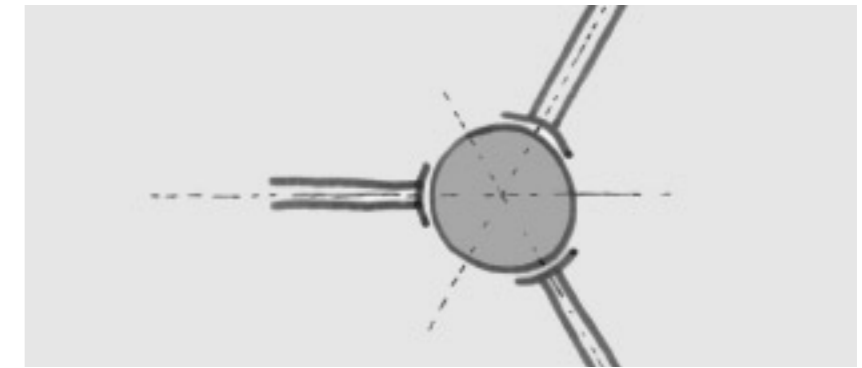
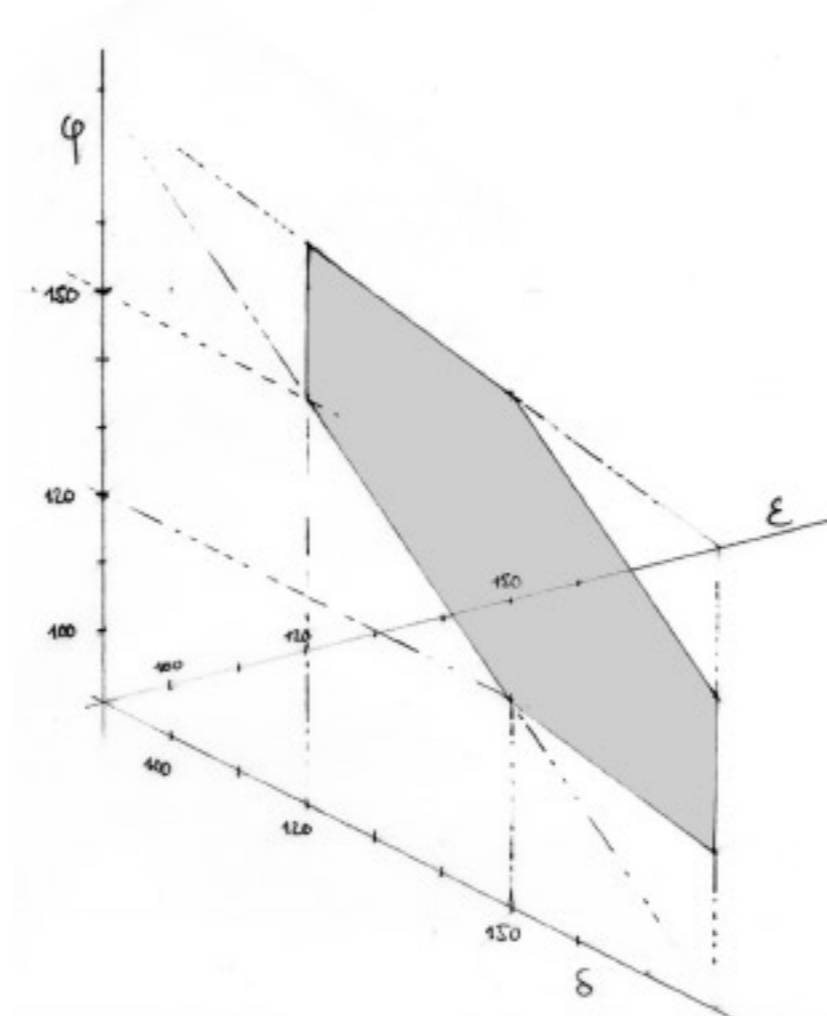


Figuur 6.12. Drie typen aansluitingen in SAM



Figuur 6.13. Instabiliteit middenknoop

Figuur 6.15. Afhankelijkheid hoeken  $\delta$ ,  $\epsilon$  en  $\phi$



Figuur 6.14. Hartlijnen door centrum middenknoop



Figuur 6.16. Mierenkolonie en

Figuur 6.17. Zwerm vogels als gedecentraliseerd intelligent systeem



## 6.4. alternatieven en ontwikkelingen

### 6.4.1 tensegrity

Zoals in de probleemanalyse wordt gesteld, is er bij een probleem als binnen dit afstuderen niet duidelijk een set alternatieven. Er is een bepaalde weg ingeslagen en pas later zal duidelijk worden of dit verstandig was of niet. Toch zijn er wel alternatieven denkbaar die dicht aanliggen tegen S.A.M of die een verbetering daarvan kunnen betekenen in een verdere ontwikkeling.

Het alternatief dat het meest in lijn ligt met S.A.M is een tensegrity systeem. De eenvoudigste tensegrity structuur is die figuur die is afgeleid van het octaëder. Drie drukstaven vormen de hoofdassen van de figuur en de hoekpunten worden verbonden door trekstaven. Zo vormen de trekstaven de ribben van de ruimtelijke figuur. De lengte van de trekstaven kan zo geregeld worden dat de drukstaven elkaar niet raken. Dit legt echter restricties op aan de bewegingsvrijheid van de figuur. Net als bij SAM kunnen de trekstaven als spier worden uitgevoerd die voor een vervorming van het systeem kunnen zorgen. Groot voordeel van dit systeem is dat de octaëder eenheden zodanig aan elkaar verbonden kunnen worden dat geen extra elementen meer nodig zijn zoals het boven- en ondernet bij SAM v2.0.

We kunnen met de octaeder een patroon samenstellen zoals te zien is in figuur 6.18. Een van de zijden wordt op het platte vlak gelegd, en andere octaeders worden zodanig aangelegd dat op het platte vlak een patroon van driehoeken ontstaat. Vanzelf ontstaat nu ook in het bovenvlak een driehoekig patroon.

Het patroon dat ontstaat is gunstig wat betreft het aantal staven dat aansluit op de knooppunten. Maximaal drie drukstaven en negen trekstaven. In principe bestaat de basisstructuur uit drie drukstaven en twaalf trekstaven. De drukstaven lopen door de hele figuur en kruisen elkaar in het middelpunt. Door de staaflengtes juist in te stellen raken de drukstaven elkaar niet in het middelpunt. De figuur is dan ook niet meer een volmaakte octaëder, sommige ribben zijn immers korter dan andere.

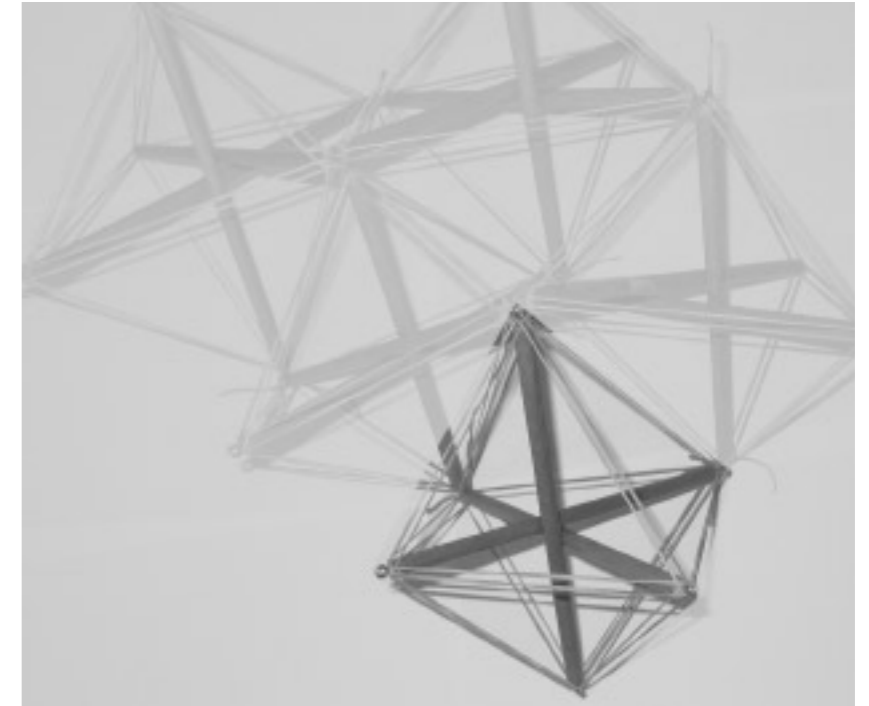
### 6.4.2 S.A.M v3.0

De middenstaaf in het SAM systeem is een buigstaaf. Feitelijk is het mogelijk een systeem te maken met zuiver trek- en drukstaven. In dat geval moet de buigstaaf in tweeën worden gedeeld en scharnierend worden verbonden aan de middenknoop. Het systeem wordt hiermee meer flexibel en minder statisch onbepaald. Het aantal staven blijft namelijk gelijk, er verdwijnen alleen vier onbekenden terwijl er maar twee vergelijkingen wegvallen. Het systeem is dus 2-voudig statisch onbepaald.

De figuur die zo ontstaat kan in onvervormde situatie nog steeds als dubbele tetraëder beschreven worden. Het systeem is daar echter helemaal niet meer aan gebonden. Met dit systeem kan een willekeurig aantal vormen gemaakt worden. Er is een bolscharnier in het hart van de figuur, daartegenaan worden staven gedrukt die rondom worden afgespannen met spieren. Op eenvoudige wijze kan zo een tetraëder, een octaëder, een dubbele tetraëder of een kubus worden gemaakt (figuur 6.19). In tabel 6.1 worden van deze figuren het aantal onbekenden, het aantal vergelijkingen en daarmee de graad van statisch onbepaaldheid

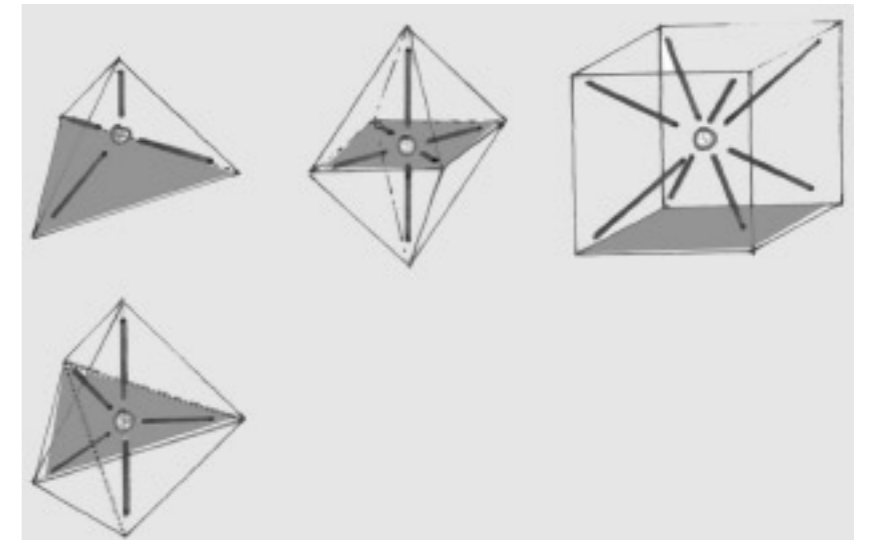
van de figuren weergegeven (zie ook hoofdstuk 7).

Belangrijk is vervolgens de manier waarop de eenheden kunnen worden gestapeld. Zoals eerder werd beschreven is een octaëder eenvoudig te stapelen tot een grotere structuur. Dit geldt ook voor de kubus. En ook voor tetraëders zijn verschillende stapelingen mogelijk, maar punt van aandacht wordt dan de bevestiging van de verschillende eenheden aan elkaar.



Figuur 6.18. Octaeder patroon

Figuur 6.19. S.A.M v3.0 in verschillende gedaanten



Tabel 6.1.

	Aantal onbekenden	Aantal vergelijkingen	Graad van statisch onbepaaldheid
SAMv2.0	24	20	4
SAMv3.0	20	18	2
Tetraëder	16	15	1
Octaëder	24	21	3
Kubus	26	27	-1 (kinematisch onbepaald)

## 7. analyse draagsysteem

### 7.1 inleiding

In hoofdstuk 6 is de ontwikkeling besproken van het draagsysteem SAM. In dit hoofdstuk wordt verder ingegaan op de vorm van de constructie en het krachtenverloop daarin. Hoewel de constructie bedacht is als een systeem met afzonderlijke trek- en drukstaven, wordt in het mechanicamodel uitgegaan van een systeem waarin alle staven trek en druk kunnen opnemen. Als de trekstaven worden voorgespannen klopt dit met de werkelijkheid, een drukspanning wordt dan opgenomen als een vermindering van de trekspanning. In de analyse wordt verder uitgegaan van een constructie met repeterende eenheden. Een eenheid bestaat uit veertien staven en zes knopen en is met de wereld verbonden middels zes oplegreacties. In eerste instantie wordt uitgegaan van de onvervormde figuur. De drie drukstaven die scharnierend zijn verbonden aan de middenstaaf zullen worden aangeduid met de 'armen' van de figuur. De trekstaven worden aangeduid met 'spieren'.

### 7.2 evenwichtsvergelijkingen

Voor het te allen tijde kunnen beschrijven van de vorm van de figuur willen we een aantal parameters hebben die we binnen bepaalde grenzen kunnen variëren. Deze parameters zijn weergegeven in figuur 7.1. De twee lengtematen (voor de buigstaaf en voor de armen) zijn arbitrair gekozen, behoudens het feit dat ze eenvoudige rekenwaarden geven, op 1 eenheid voor  $la$  (lengte  $a$ ), en 2 eenheden voor  $r$  (de straal van de bol die de uiteinden van de armen beschrijft). Daarnaast zijn het de vijf hoeken  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  en  $\epsilon$  die de vorm vastleggen.  $\alpha$ ,  $\beta$  en  $\gamma$  beschrijven de hoek tussen de armen en het x-y vlak en de hoeken  $\delta$  en  $\epsilon$  geven de hoek aan tussen respectievelijk de geprojecteerde armen 2 en 3 met de geprojecteerde arm 1 op het x-y vlak. N.B. naar  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  en  $\epsilon$  wordt in Maple gerefereerd als a, b, c, d en e.

Voor de knopen 1 tot en met 6 (zie figuur 7.2) kunnen we drie evenwichtsvergelijkingen opschrijven. Dit resulteert in  $6 \cdot 3 = 18$  vergelijkingen. Daarnaast heeft knoop 5 nog twee vergelijkingen voor momentenevenwicht (x en y). In totaal hebben we dus 20 vergelijkingen.

Er zijn 14 staven, als we de middenstaaf beschouwen als 2 staven die buigstijf met elkaar zijn verbonden. Dit geeft een totaal van 14 onbekende normaalkrachten, en in de buigstaaf 2 onbekende dwarskrachten (x en y) en 2 onbekende momenten (x en y). Daarnaast zijn er 6 onbekende oplegreacties. In totaal hebben we dus 24 onbekenden.

De figuur is dus  $24 - 20 = 4$ -voudig statisch onbepaald. Dit houdt in dat als we de onbekende krachten willen bepalen, deze altijd worden uitgedrukt in een of meerdere andere krachten. Voor een deel hebben we dit echter in de hand.

Het opstellen van de vergelijkingen op zich is redelijk eenvoudig (tabel 7.1). Voor alle knopen wordt bekeken welke staven er op aansluiten, en daarmee welke krachten erop aangrijpen. Deze krachten moeten in evenwicht zijn, omdat we uitgaan van het statisch gedrag van de constructie. Versnellingen van de knooppunten ten gevolge van de krachten die erop werken worden niet in de beschouwing meegewogen. De oplegreacties zijn verwerkt in de knopen 1, 4 en 6, waarbij knoop 4 in

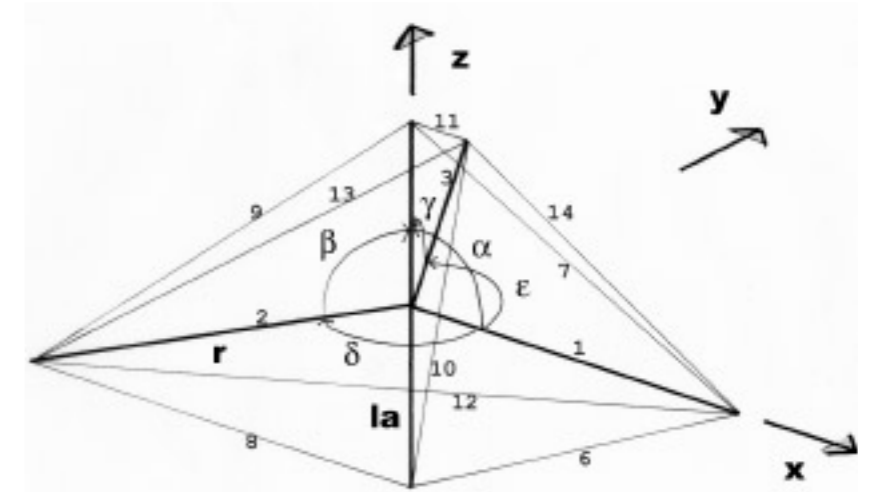
x-, y- en z-richting wordt gesteund, knoop 6 in x- en y-richting en knoop 1 alleen in y-richting om rotatie van het gehele element tegen te gaan (figuur 7.2). De assen zijn zodanig gekozen dat de x-as altijd door de uitgangspositie van arm 1 loopt, en de z-as door de staven 4 en 5.

Om in het assenstelsel te passen moeten alle staafkrachten worden uitgedrukt in een x-, y- en z-component. Omdat de figuur steeds kan vervormen moeten deze uitdrukkingen gebruik maken van de vijf hoeken die we hebben gebruikt om de vorm van de figuur vast te leggen. Dit resulteert in een aantal goniometrische relaties tussen de staafkrachten en hun afgeleide componenten (bijlage 1). Het bezwaar van deze relaties is dat ze niet continu zijn ( $\sin/\cos = \tan$ ), waardoor het onmogelijk bleek de vergelijkingen op te lossen met variabele  $\alpha$  tot en met  $\epsilon$ . Een oplossing voor dit probleem wordt later besproken.

Een oplossing voor het stelsel kan dus gevonden worden bij constante hoeken. Er blijven dan nog vier onbekenden over. Omdat de staafkrachten in de spieren te regelen en dus te meten zijn, is het geen bezwaar als we niet alle krachten uit de vergelijkingen weten. We kunnen ze in werkelijkheid meten. De krachten in de drukstaven zijn minder eenvoudig te bepalen. Toch is uiteindelijk gekozen de vier overgebleven onbekende krachten de staafkrachten van de staven 1 (arm), 8 (spier), 10 (spier) en 12 (spier) te laten zijn. De oplossing bij  $\alpha$ ,  $\beta$  en  $\gamma = \frac{1}{2} \pi$  en  $\delta$  en  $\epsilon = \frac{2}{3} \pi$  is gegeven in bijlage 2. In die oplossing zijn ook de externe krachten op de knopen 1, 2 en 3 opgenomen.

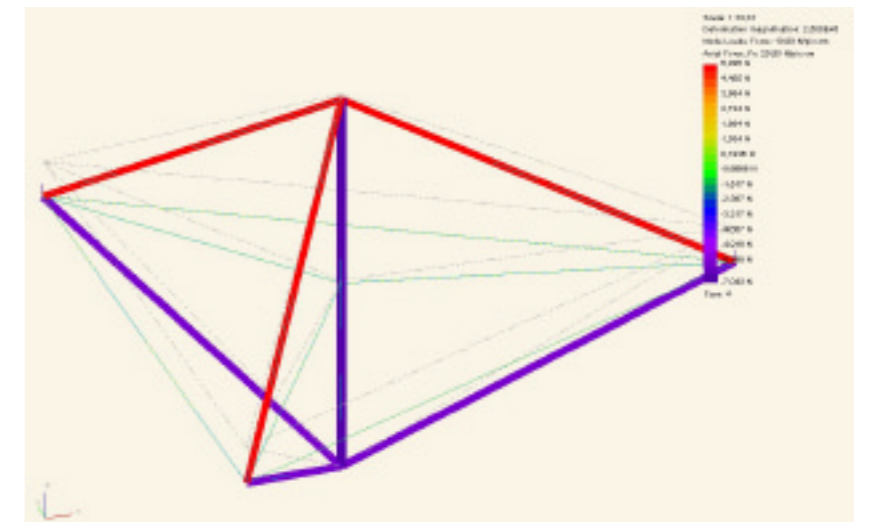
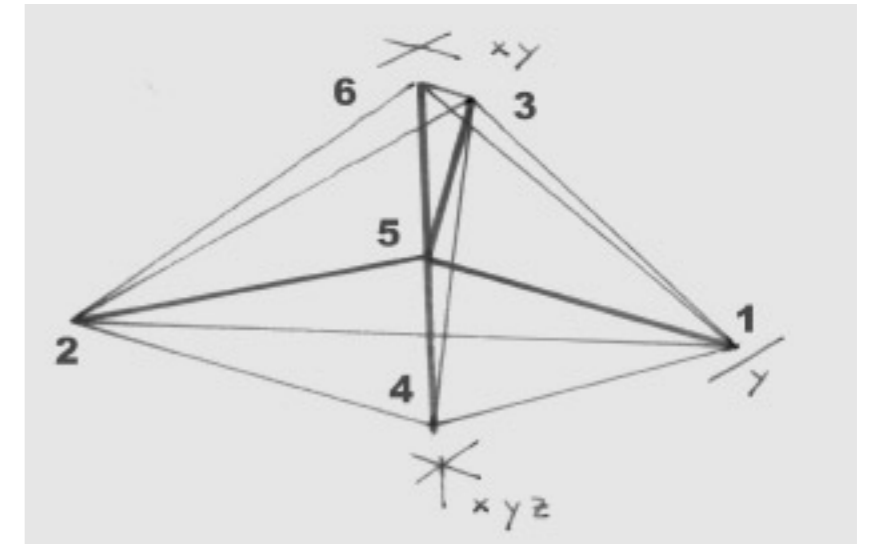
Tabel 7.1. Evenwichtsvergelijkingen

SomFx1:= Fx1_1 + Fx6_1 + Fx7_1 + Fx12_1 + Fx14_1 + FEx1 =	0:
SomFy1:= Fy1_1 + Fy6_1 + Fy7_1 + Fy12_1 + Fy14_1 + FEy1 =	-Ry1:
SomFz1:= Fz1_1 + Fz6_1 + Fz7_1 + Fz12_1 + Fz14_1 + FEz1 =	0:
SomFx2:= Fx2_2 + Fx8_2 + Fx9_2 + Fx12_2 + Fx13_2 + FEx2 =	0:
SomFy2:= Fy2_2 + Fy8_2 + Fy9_2 + Fy12_2 + Fy13_2 + FEy2 =	0:
SomFz2:= Fz2_2 + Fz8_2 + Fz9_2 + Fz12_2 + Fz13_2 + FEz2 =	0:
SomFx3:= Fx3_3 + Fx10_3 + Fx11_3 + Fx13_3 + Fx14_3 + FEx3 =	0:
SomFy3:= Fy3_3 + Fy10_3 + Fy11_3 + Fy13_3 + Fy14_3 + FEy3 =	0:
SomFz3:= Fz3_3 + Fz10_3 + Fz11_3 + Fz13_3 + Fz14_3 + FEz3 =	0:
SomFx4:= Fx4_4 + Fx6_4 + Fx8_4 + Fx10_4 + Dx + FEx4 =	-Rx4:
SomFy4:= Fy4_4 + Fy6_4 + Fy8_4 + Fy10_4 + Dy + FEy4 =	-Ry4:
SomFz4:= Fz4_4 + Fz6_4 + Fz8_4 + Fz10_4 + FEz4 =	-Rz4:
SomFx5:= Fx1_5 + Fx2_5 + Fx3_5 + Fx4_5 + Fx5_5 - 2*Dx + FEx5 =	0:
SomFy5:= Fy1_5 + Fy2_5 + Fy3_5 + Fy4_5 + Fy5_5 - 2*Dy + FEy5 =	0:
SomFz5:= Fz1_5 + Fz2_5 + Fz3_5 + Fz4_5 + Fz5_5 + FEz5 =	0:
SomFx6:= Fx5_6 + Fx7_6 + Fx9_6 + Fx11_6 + Dx + FEx6 =	-Rx6:
SomFy6:= Fy5_6 + Fy7_6 + Fy9_6 + Fy11_6 + Dy + FEy6 =	-Ry6:
SomFz6:= Fz5_6 + Fz7_6 + Fz9_6 + Fz11_6 + FEz6 =	0:



Figuur 7.1. Tekenafspraken en staafnummers

Figuur 7.2. Oplegreacties en knoopnummers



Figuur 7.3. Controle van de resultaten in GSA

### 7.3 controle resultaten

Om de uitkomsten van het stelsel te controleren is het systeem in een Eindige Elementen programma gemodelleerd. Hiervoor is gebruik gemaakt van het pakket General Structural Analysis (GSA), de huissoftware van Arup [i20] en [i21]. GSA is ontwikkeld door Oasys Software en wordt door Arup wereldwijd gebruikt met zeer bevredigende resultaten.

De controle is uitgevoerd door in GSA (figuur 7.3) het systeem in verschillende configuraties te modelleren. Ook zijn verschillende belastingsituaties bekeken. De staafkrachten uit GSA voor de staven 1, 8, 10 en 12 zijn ingevuld in de evenwichtsvergelijkingen en vervolgens zijn de resultaten voor de overige staafkrachten naast die van GSA gezet. De resultaten zijn weergegeven in bijlage 3. Naast de staafkrachten is ook de procentuele afwijking van de uitkomsten van de evenwichtsvergelijkingen ten opzichte van de uitkomsten van GSA weergegeven.

De resultaten die te zien zijn in de bijlage geven vertrouwen in de opgestelde vergelijkingen. De resultaten verschillen voor kleine vervormingen (tot 0,01 rad) maximaal 1,4%, hetgeen is toe te schrijven aan onnauwkeurigheden. Voor grotere vervormingen zijn grotere onnauwkeurigheden gebleken die waarschijnlijk hun oorsprong hebben in de goniometrische relaties. Het verder zoeken naar fouten hierin is een tijdrovende zaak en daarom achterwege gelaten. De kleinere onnauwkeurigheden hebben hoofdzakelijk te maken met de invoer van de geometrie in GSA. Vervolgens levert het overnemen van resultaten uit GSA naar Maple onnauwkeurigheden op.

### 7.4 gevoeligheid en adaptief gedrag

#### 7.4.1 analyse gevoeligheid

Als de constructie zelf moet bepalen hoe het zijn krachtenverloop kan optimaliseren, dan moet het over informatie of gegevens beschikken die daarin inzicht geven. Deze gegevens bevatten de gevoeligheid van de in de constructie aanwezige krachten voor veranderingen van de veranderbare parameters. Dit zijn in principe de krachten in alle spieren, omdat deze gestuurd kunnen worden en van alle hoeken omdat ook die gestuurd kunnen worden. Omdat we alle spierkrachten in de vier krachten N1, N8, N10 en N12 uitdrukken, en alle hoeken in de vijf hoeken  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  en  $\epsilon$ , willen we de gevoeligheid weten van alle staafkrachten N1 tot en met N14 voor veranderingen in genoemde krachten en hoeken.

We kunnen een gevoeligheidsanalyse uitvoeren door vanuit een vaste positie de variabelen stuk voor stuk een andere waarde te geven en te kijken wat het effect is op de staafkrachten. De resultaten kunnen we samenvatten in een matrix en deze matrix kan worden aangesproken door de constructie om een beslissing te nemen over een aanpassing van de krachten. Echter, omdat de relaties niet lineair zijn, zou bij elke vorm een andere matrix gemaakt moeten worden. Voor het computermodel hebben we gekozen gebruik te maken van de gevoeligheidsmatrix van de uitgangssituatie.

Voor het bepalen van deze gevoeligheidsmatrix zijn we uitgegaan van een situatie waarin de hoeken  $\alpha$ ,  $\beta$  en  $\gamma$  gelijk zijn aan  $0^\circ$  en  $\delta$  en  $\epsilon$  aan  $120^\circ$  (zie nogmaals figuur 7.1 voor de tekenafspraken). Verder werken op de knopen 1, 2 en 3 krachten van elk 5kN in de negatieve z-richting.

Omdat uit een eindige elementen berekening bleek dat de staafkrachten in staven 1, 2 en 3 in dat geval 13.52kN zijn (druk), is deze waarde ook voor N1 opgegeven. De krachten N8, N10 en N12 zijn gelijk aan 1 gekozen, een arbitraire voorspanning.

De matrix die we op deze manier verkrijgen is weergegeven in figuur 7.4. In deze matrix kunnen eenvoudig de grootste waarden worden opgezocht (dikgedrukt). Deze geven aan welke aanpassing in de constructie leidt tot de grootste veranderingen. Met behulp van dit gegeven kan een beslissingsmodel gemaakt worden wat aangeeft welke verandering wordt uitgevoerd.

Naast de hoeken zijn in de vector achter de matrix ook de staafkrachten in de staven 1, 8, 10 en 12 opgenomen. Dit omdat door het aanpassen van deze krachten ook de krachtsverdeling in de constructie wordt aangepast. Het is echter onduidelijk hoe een vergelijking gemaakt kan worden tussen het effect van een veranderde hoek of het effect van een veranderde kracht. Het zijn namelijk andere grootheden. Bovendien is het uitgangspunt van beide veranderingen verschillend. Het een is een vormverandering met als gevolg een verandering van interne krachten, terwijl het andere een directe verandering van interne krachten inhoudt.

We kiezen ervoor de nadruk te leggen op de vormverandering en niet op het aanpassen van de voorspanning bij gelijkblijvende vorm. Hierom is in figuur 7.5 de matrix weergegeven voor uitsluitend veranderingen van vorm.

Ook met de resultaten van GSA kan een gevoeligheidsmatrix worden gemaakt (figuur 7.6). Deze is echter anders van aard, omdat hier veel minder variabelen constant blijven tijdens de verandering van anderen. Alles reageert op elkaar. Wel is duidelijk te zien aan de gegevens wat gevoelsmatig al duidelijk was: een verandering van hoek  $\alpha$  heeft het meeste effect op de staafkrachten in staven 6 en 7 en om de staafkrachten 6 en 7 te veranderen kan het beste hoek  $\alpha$  worden aangepast. Hetzelfde geldt voor hoek  $\beta$  voor de staafkrachten in 8 en 9, en voor hoek  $\gamma$  voor de staafkrachten in 10 en 11. Voor de staafkrachten in 12, 13 en 14 zijn het meest van invloed de hoeken  $\delta$  en  $\epsilon$ , en omdat de staafkrachten in 12, 13 en 14 ook sterk van elkaar afhangen hebben beide hoeken evenveel invloed op die staafkrachten.

#### 7.4.2 adaptiviteit

Behalve op basis van de gevoeligheidsmatrix, kunnen we ook op een eenvoudiger manier een voorstelling maken van de gevoeligheid. Dit verbetert ons inzicht in het systeem waarmee ook de kans op fouten afneemt. Hiervoor gaan we in eerste instantie uit van een klein stukje uit SAM. We nemen van één eenheid de middenstaaf en een enkele drukstaaf die daaraan scharnierend is verbonden, waarbij we de boven- en onderkant van de middenstaaf middels spieren aan het uiteinde van de drukstaaf verbinden (figuur 7.7).

Omdat de spieren zowel moeten kunnen verkorten als verlengen moeten ze beiden een contractie ondergaan die ongeveer de helft is van de totale contractie. Deze contractie brengt met zich mee dat er een zekere voorspanning in het systeem aanwezig is.

Een voorspanning van bijvoorbeeld 5,6 N in elke spier zorgt voor een

$$\begin{matrix} \Delta N1 \\ \Delta N2 \\ \Delta N3 \\ \Delta N4 \\ \Delta N5 \\ \Delta N6 \\ \Delta N7 \\ \Delta N8 \\ \Delta N9 \\ \Delta N10 \\ \Delta N11 \\ \Delta N12 \\ \Delta N13 \\ \Delta N14 \end{matrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1.069 & 1.764 & 1.060 & -1.099 & 1.394 & 0.091 & 1.879 & 0.091 & 1.823 \\ 1.069 & 1.055 & 1.762 & -4.143 & 2.394 & 0.091 & 0.091 & 1.879 & 1.823 \\ -1.154 & -0.967 & -0.967 & 1.049 & -0.092 & -0.284 & 0.414 & 0.414 & -0.467 \\ 12.367 & 12.535 & 12.535 & 1.049 & -0.092 & -0.284 & 0.414 & 0.414 & -0.467 \\ 1.050 & 0.647 & 0.648 & -2.265 & 0.286 & 0.554 & -0.005 & -0.005 & 0.963 \\ -5.488 & -0.610 & -0.609 & -2.231 & 0.320 & 0.520 & -0.039 & -0.039 & 0.929 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1.257 & -6.530 & -1.257 & 0.034 & 0.034 & -0.034 & -1.034 & -0.034 & -0.034 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1.257 & -1.257 & -6.530 & 0.034 & 0.034 & -0.034 & -0.034 & -1.034 & -0.034 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -0.004 & 0.006 & 0.005 & 0.875 & -1.717 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & -1.000 \\ 0.000 & 0.008 & 0.006 & 4.390 & -0.867 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & -1.000 \end{bmatrix} \begin{matrix} \Delta\alpha \\ \Delta\beta \\ \Delta\gamma \\ \Delta\delta \\ \Delta\epsilon \\ \Delta N1 \\ \Delta N8 \\ \Delta N10 \\ \Delta N12 \end{matrix}$$

Figuur 7.4. Gevoeligheidsmatrix oplossing evenwichtsvergelijkingen

Figuur 7.5. Gevoeligheidsmatrix voor uitsluitend vormveranderingen

$$\begin{matrix} \Delta N1 \\ \Delta N2 \\ \Delta N3 \\ \Delta N4 \\ \Delta N5 \\ \Delta N6 \\ \Delta N7 \\ \Delta N8 \\ \Delta N9 \\ \Delta N10 \\ \Delta N11 \\ \Delta N12 \\ \Delta N13 \\ \Delta N14 \end{matrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.069 & 1.764 & 1.060 & -1.099 & 1.394 \\ 1.069 & 1.055 & 1.762 & -4.143 & 2.394 \\ -1.154 & -0.967 & -0.967 & 1.049 & -0.092 \\ 12.367 & 12.535 & 12.535 & 1.049 & -0.092 \\ 1.050 & 0.647 & 0.648 & -2.265 & 0.286 \\ -5.488 & -0.610 & -0.609 & -2.231 & 0.320 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.257 & -6.530 & -1.257 & 0.034 & 0.034 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.257 & -1.257 & -6.530 & 0.034 & 0.034 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.004 & 0.006 & 0.005 & 0.875 & -1.717 \\ 0.000 & 0.008 & 0.006 & 4.390 & -0.867 \end{bmatrix} \begin{matrix} \Delta\alpha \\ \Delta\beta \\ \Delta\gamma \\ \Delta\delta \\ \Delta\epsilon \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \Delta N1 \\ \Delta N2 \\ \Delta N3 \\ \Delta N4 \\ \Delta N5 \\ \Delta N6 \\ \Delta N7 \\ \Delta N8 \\ \Delta N9 \\ \Delta N10 \\ \Delta N11 \\ \Delta N12 \\ \Delta N13 \\ \Delta N14 \end{matrix} = \begin{bmatrix} 2.960 & 2.960 & 2.960 & -0.110 & -0.110 \\ 2.960 & 2.960 & 2.960 & 0.000 & 0.110 \\ 2.960 & 2.960 & 2.960 & 0.110 & 0.000 \\ -4.900 & -4.900 & -4.900 & 0.000 & 0.000 \\ -4.800 & -4.800 & -4.800 & 0.000 & 0.000 \\ 2.100 & -0.200 & -0.200 & 0.200 & 0.200 \\ 2.100 & 0.000 & 0.000 & 0.100 & 0.100 \\ -0.300 & 2.100 & -0.300 & 0.000 & -0.200 \\ 0.000 & 2.100 & 0.000 & 0.000 & -0.200 \\ -0.300 & -0.300 & 2.100 & -0.200 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 2.100 & -0.200 & 0.000 \\ -1.600 & -1.600 & -1.600 & -0.180 & 0.000 \\ -1.600 & -1.600 & -1.600 & 0.170 & 0.170 \\ -1.600 & -1.600 & -1.600 & 0.000 & -0.180 \end{bmatrix} \begin{matrix} \Delta\alpha \\ \Delta\beta \\ \Delta\gamma \\ \Delta\delta \\ \Delta\epsilon \end{matrix}$$

Figuur 7.6. Gevoeligheidsmatrix General Structural Analysis



drukkracht in de drukstaaf van 10 N (figuur 7.8). afhankelijk van de hoek die de drukstaaf maakt met de staander verandert de voorspanning in de staven. Dit komt doordat de spieren daarmee ook een andere hoek ten opzichte van de drukstaaf krijgen waardoor zich een nieuw evenwicht instelt.

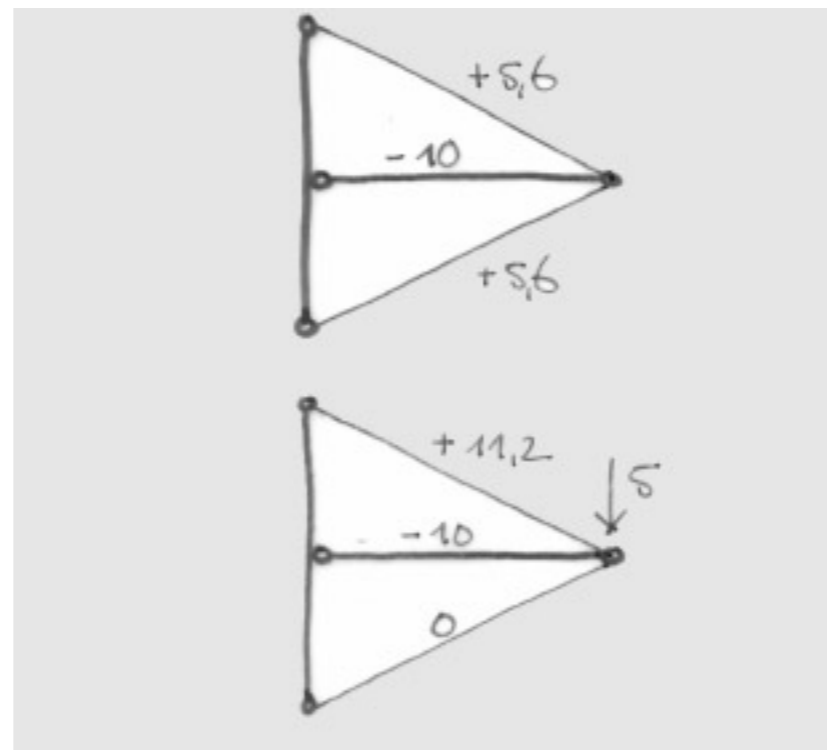
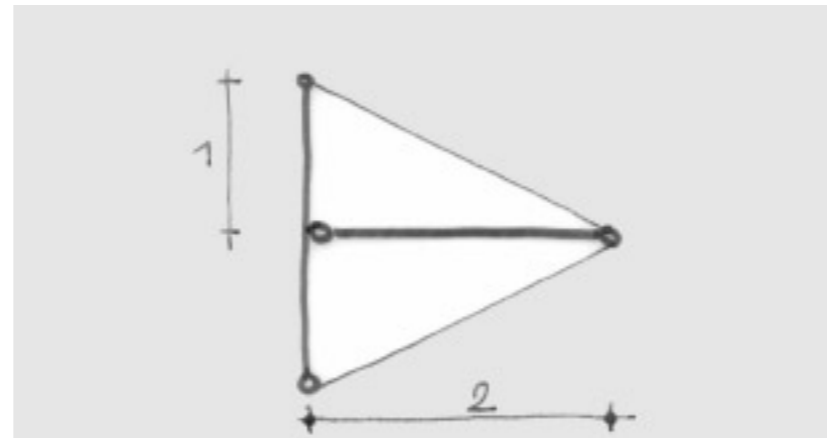
Hoewel voor de spieren in veel gevallen hetzelfde geldt als voor kabels, werkt het verhelderend ons de spieren voor te stellen als kabels, omdat hiermee de complexiteit wordt gereduceerd. Belasten we nu het uiteinde van de drukstaaf met een verticale kracht, dan zal de bovenkabel meer en de onderkabel minder trek opnemen. Een verticale kracht van 5 N kan in uitgangssituatie (hoek  $\alpha=0$ ) worden opgenomen zonder dat de onderkabel slap gaat hangen, omdat de kracht in de bovenspier in dat geval is opgelopen tot 11,2 N en de kracht in de onderspier afgenomen tot 0 N.

Geven we de drukstaaf een negatieve hoek, dan blijkt bij 5 N verticale belasting de onderste kabel wel slap te hangen. Geven we de drukstaaf een positieve hoek, dan kan het systeem een iets grotere kracht dan 5 N opnemen.

In het algemeen kan gezegd worden dat een situatie waarin de drukstaaf een positieve hoek maakt met de horizontaal, de trekkracht in de staven afneemt. Dit komt doordat de spier die meer trek moet leveren een gunstiger hoek krijgt ten opzichte van de drukstaaf; ze nemen nu beiden een deel van de verticale belasting op, terwijl dit eerst alleen door de kabels gebeurde. We zien, als we de onderspier wegdenken (of de kracht hierin 0 stellen), dat de trekkracht in de overgebleven kabel bij een neerwaarts gerichte verticale belasting van 5 N steeds afneemt bij toenemende hoek. Bij een hoek van de drukstaaf van -5 graden met de horizontaal is de trekkracht in de bovenkabel 11,56 N, bij 0 graden 11,2 N en bij 5 graden 10,78 N. De drukkracht in de drukstaaf is in alle gevallen 10 N (!). De trekkracht zal nog verder afnemen bij groter wordende hoek. In verband met de maximale rek van de toe te passen spieren en in verband met stabiliteit van het systeem zal de hoek maximaal 10 graden bedragen, de trekkracht is dan nog 92,8% van de kracht in uitgangssituatie (figuur 7.9).

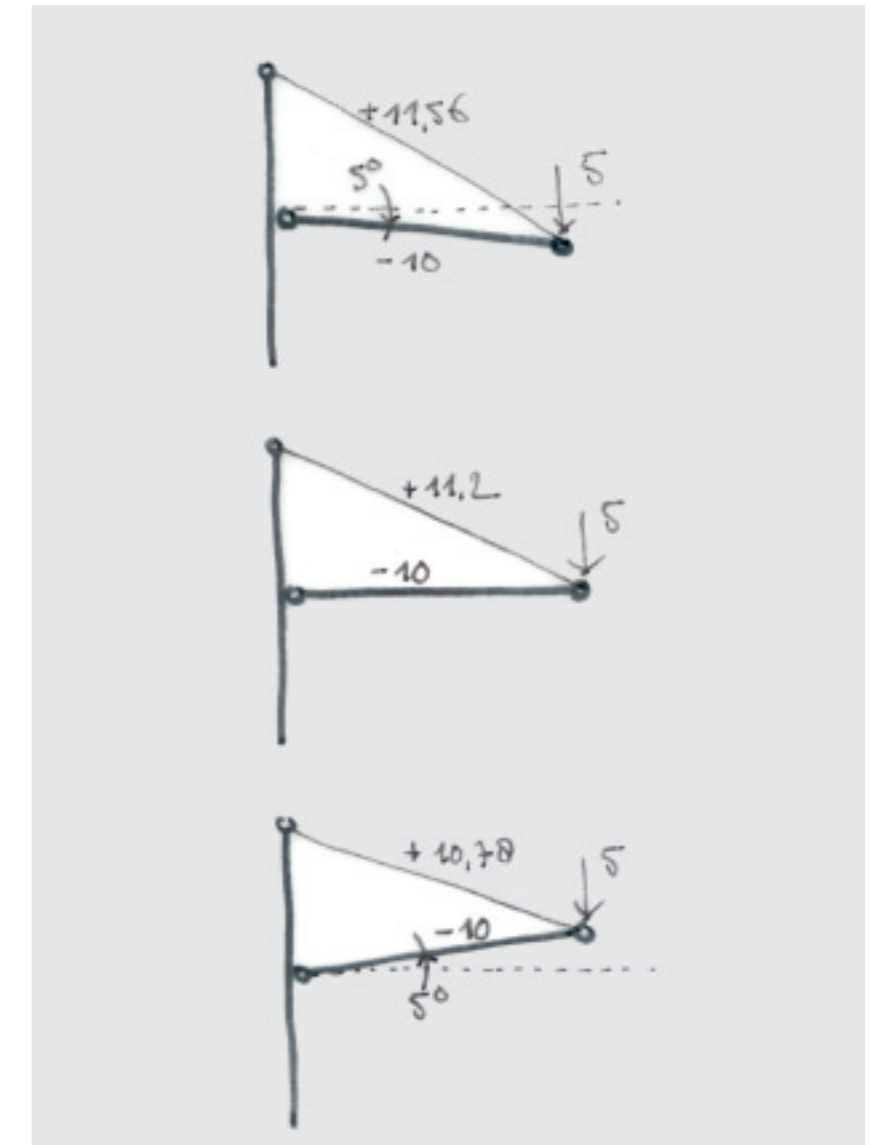
Een reactie van het systeem op een belasting erop, kan dus eenvoudig bestaan uit een rotatie van de drukstaaf. Grijpt er op een knoop een last aan, dan beweegt het systeem daartegenin om zo de trekkracht van de spieren te minimaliseren. Registratie van de toename van de belasting kan geschieden middels druksensoren en/of rekstrookjes, maar ook door het meten van een toenemend verschil in spanning in boven- en onderkabel of -spier.

Figuur 7.7. Centrale- en drukstaaf uit S.A.M verbonden met kabels



Figuur 7.8. Kracht in trek- en drukstaven bij voorspanning en belasting

Figuur 7.9. Krachten in trekstaaf bij variërende hoek



## 8. modellering prototype

### 8.1 Virtools™

Virtools™ is software waarmee virtuele interactieve 3D-omgevingen kunnen worden gemaakt. Deze omgevingen werken realtime, dat houdt in dat ze niet van tevoren volledig zijn uitgedacht en ontworpen, maar dat de vrijheden en restricties kunnen worden opgegeven waaruit het gedrag volgt. Verschillende parameters kunnen tijdens de 'uptime' van het model worden aangepast. In Virtools™ kan ook in real-time worden ontworpen, zodat tijdens het 'runnen' van het model nog aanpassingen kunnen worden gedaan. Het programma wordt hoofdzakelijk gebruikt door ontwikkelaars van spellen, interactieve websites en advertenties [18].

Voor het ontwikkelen van interactieve architectuur wordt Virtools™ gebruikt door architectenbureau Oosterhuis.nl; in de Hyperbody onderwijsmodule die op de faculteit bouwkunde van de TU Delft wordt aangeboden, wordt het programma gebruikt om onderzoek te doen naar interactieve architectuur en architectuur waarbij de scheidslijn tussen ontwerp- en gebruiksfase niet duidelijk meer is te trekken.

Het bouwen van een systeem of een model in Virtools™ is relatief eenvoudig. Behalve dat het programma standaard beschikt over een set bouwblokken, kunnen deze op eenvoudige manier aan elkaar worden geschakeld. Deze bouwblokken bestaan uit procedures die 3D-objecten of andere variabelen manipuleren. De bouwblokken hebben in principe een 'behaviour' input die ze als het ware activeert of aanroept en een output die aangeeft of ze klaar zijn. Daarnaast hebben ze meestal een of meerdere parameter in- en outputs. Via deze laatste kunnen variabelen worden gemanipuleerd in het bouwblok. Als het model wordt gestart, doorloopt het tijdstappen (frames). Het aantal tijdstappen wat per seconde wordt doorlopen, is afhankelijk van de snelheid van de computer waarop het model wordt gedraaid. Voor de stappen tussen de verschillende blokken kan worden opgegeven hoeveel tijdstappen ze duren. Naast de bouwblokken, die zijn te vergelijken met procedures in andere programmeeromgevingen zijn er functies, die "parameter operations" worden genoemd. Figuur 8.1 laat ter illustratie een stukje code zien wat een 3D-object laat transleren totdat de x-waarde van zijn positie 10 is.

Om het realtime reageren van de constructie op vormveranderingen en belastingen te kunnen onderzoeken is besloten ook de constructie te modelleren in Virtools™. Het wordt dan namelijk mogelijk de elementen een aantal regels op te geven en te kijken hoe ze op elkaar reageren. Hiertoe moeten we in Virtools™ eerst een aantal primaire mechanische processen programmeren. In ons model is alleen rekening gehouden met de krachten die de elementen op elkaar uitoefenen, afhankelijk van de spierkrachten. Er is geen zwaartekracht en de elementen kunnen niet botsen.

### 8.2. modelleren van het systeem

#### 8.2.1 uitgangspunten bij het modelleren

Bij het modelleren gaan we eerst constructief gedrag in het model inbouwen. Dit doen we door de verplaatsingen van de knopen een

bepaalde functie van de krachten te laten zijn. Een knoop ondervindt een resulterende kracht en zal ten gevolge daarvan gaan bewegen. Door deze verplaatsing ontstaat er rek in de staven die verbonden zijn aan deze knoop. Deze rek wordt bepaald door het verschil tussen de oorspronkelijke en de huidige lengte van de staaf te delen door de oorspronkelijke lengte. Dit resulteert per staaf in een kracht volgens een relatie op basis van  $e$ . Nu wordt opnieuw de resulterende kracht berekend, op basis waarvan de knoop weer verplaatst.

Volgens de tweede wet van Newton is de versnelling van een lichaam evenredig met de erop werkende kracht en omgekeerd evenredig met de massa. De snelheid waarmee het lichaam uiteindelijk beweegt kan vervolgens bepaald worden door de versnelling te integreren over de tijd en deze bij de beginsnelheid op te tellen. Om deze relatie toe te passen is het echter noodzakelijk te weten wat de massa is van de verschillende onderdelen van de constructie. Voor onze constructie zijn we echter geïnteresseerd in het algemene statische gedrag van de constructie en niet in het dynamische. We hebben daarom elke knoop een fictieve massa gegeven en de verplaatsing van de knooppunten elke tijdstap direct afhankelijk gemaakt van de erop werkende resulterende kracht.

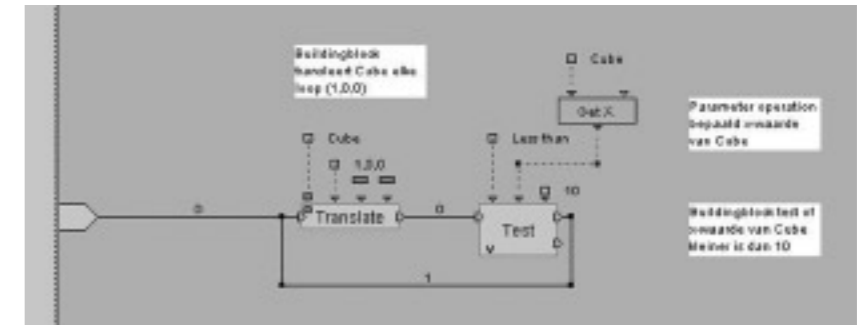
#### 8.2.2 actief gestuurd passief en actief gestuurd actief gedrag

De relatie tussen de rek en de spanning of de rek en de kracht die we vinden in de spieren kunnen we manipuleren. Dit is mogelijk omdat we in staat zijn in de Festo spieren zowel de vervorming te sturen als de optredende krachten (zie ook paragraaf 5.2.7). We kunnen dus een lineaire relatie opleggen, maar ook elke andere relatie die we wenselijk achten.

Ten opzichte van een lineaire stijfheidsrelatie zouden we ons kunnen voorstellen wat de voordelen zijn van een materiaal wat naar mate het meer vervormt, stijver gaat reageren. Er is dus bij elke vervorming meer energie nodig om de vervorming groter te maken. Dit gedrag kennen we van bijvoorbeeld staal, alleen treedt dit effect pas op in het vloeigebied. Een constructie gemaakt van dit soort materiaal zet zich bij wijze van spreken schrap als het wordt belast. Een gevaar van deze stijfheidsrelatie is dat uiteindelijk bij een kleine variatie van de rek het materiaal kan bezwijken omdat de materiaalsterkte wordt bereikt.

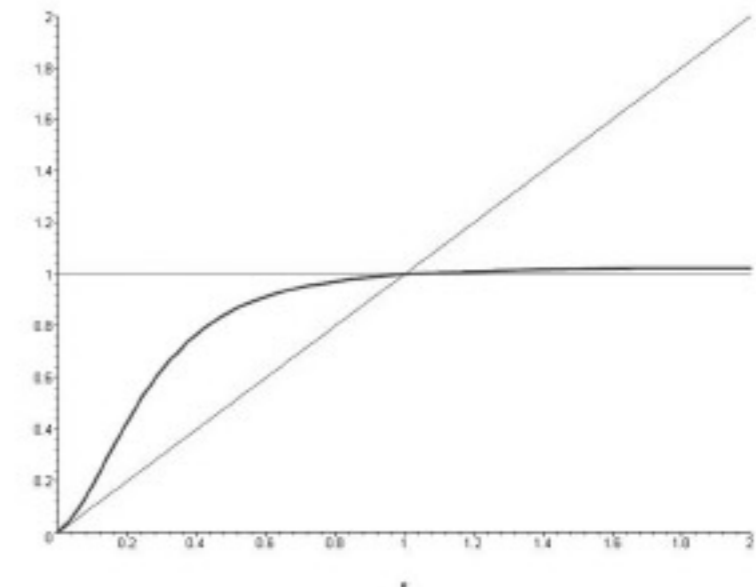
We kunnen ons ook een materiaal voorstellen dat zich juist niet schrap zet, maar dat juist steeds slapper wordt als het meer wordt belast totdat het uiteindelijk vloeit; het blijft vervormen onder constante belasting. Nadeel is dat het materiaal weinig krachten op kan nemen. Voordeel van deze relatie is dat als ze wordt gecombineerd met andere (stijvere) materialen in een constructie, het materiaal zelf niet snel zal bezwijken, omdat het zich onttrekt aan te grote krachten en deze laat opnemen door de stijvere onderdelen.

Omdat we het gedrag van de spieren binnen zekere grenzen zelf kunnen bepalen, zouden we een relatie kunnen opleggen die de voordelen van beide hierboven beschreven relaties combineert (figuur 8.2). In eerste instantie zal de spier steeds stijver reageren op grotere vervormingen. Hierdoor worden te grote, directe, verplaatsingen in eerste instantie voorkomen. Wordt echter een bepaalde kracht bereikt, dan zal de spier gaan 'vloeien' of meegeven om bezwijken ervan te voorkomen.



Figuur 8.1. Translatie van een kubus in Virtools

Figuur 8.2. Actief gestuurd passief gedrag volgens  $\frac{e + 10e^2}{1 + 10e^2}$



Natuurlijk moet bedacht worden dat de spier niet onbeperkt fictief kan vloeien. Op een gegeven moment wordt namelijk de maximale lengte van de spier bereikt. Op dat moment moet een ander mechanisme in werking treden dat de constructie als geheel laat vervormen om te grote krachten of vervormingen op bepaalde plaatsen te compenseren.

Bovenstaand gedrag van de constructie kunnen we kenmerken als actief gestuurd passief gedrag. Daarnaast hebben we actief gestuurd actief gedrag. Dit houdt in dat de constructie een vorm zal zoeken waarbij de krachten het beste kunnen worden afgedragen. Het is duidelijk dat 'het beste' ruim geïnterpreteerd kan worden, dus er moeten optimaliseringscriteria worden opgesteld.

Deze criteria kunnen we opstellen voor de constructie als geheel. Doel van de optimalisatie kan dan bijvoorbeeld zijn het minimaliseren van alle spanningen of krachten, waarbij grote verschillen tussen spanningen kunnen bestaan, maar waarbij het totaal van de spanningen het laagst is. Maar bijvoorbeeld ook het nivelleren van de spanningen, waarbij het totaal van de spanningen niet laag hoeft te zijn, maar waarbij de spanningen gelijkmatig over de constructie zijn verdeeld, elementen helpen elkaar.

Zulke criteria kunnen ook voor de afzonderlijke elementen worden opgesteld. In SAM willen we als het ware dat de constructie 'lui' is. Alle elementen willen zo weinig mogelijk doen, en zullen daartoe proberen hun krachten zoveel mogelijk op hun burens af te dragen. De constructie wordt geoptimaliseerd naar minimum energie niveau. De constructie is opgebouwd uit eenheden, en elke eenheid vervormt zodanig dat de krachten die erop werken tot minimale spanningen in de verschillende elementen leiden. Het optimaliseringscriterium is dus een zo laag mogelijke kracht voor elke staaf. De gegevens van de staaf (rek en kracht) zijn bekend bij de regelunit van de eenheid waarmee deze op basis van de gevoeligheidsmatrix een beslissing neemt over een mogelijke verandering. Dit kan zijn een vervorming of een aanpassing van een (andere) staafkracht.

Nu blijkt dat deze actieve vervorming een vervorming is tegen de kracht in. Een soort schrap zetten van de constructie. Dit is uiteengezet in hoofdstuk 7. De twee hierboven beschreven strategieën voor adaptiviteit conflicteren dus met elkaar. Immers, bij het aangrijpen van een kracht wil de spier in het ene geval meegeven, en in het andere geval zichzelf aantrekken. Daarom is voor beide systemen een apart model gemaakt.

### 8.3. maken virtuele prototypes

Voor het modelleren van de stijfheidsrelatie die we het actief gestuurd passief gedrag noemen is een model gemaakt wat bekeken kan worden via weblink09 onder de naam "Smart Forces" (figuur 8.3). Met de cursortoetsen zijn de verschillende bollen te bewegen die met spieren aan elkaar zijn verbonden die reageren volgens beschreven stijfheidsrelatie. De rek van de spieren, bepaald uit de afstand tussen de bollen, bepaalt hoeveel kracht er op de bollen wordt uitgeoefend. Hierdoor bewegen ze meer of minder gemakkelijk. De kleur van de spieren geeft een indicatie van de rek. Komen de bollen te dicht bij elkaar (de elementen zullen in werkelijkheid slap hangen) dan oefenen de spieren geen kracht meer op de bollen uit.

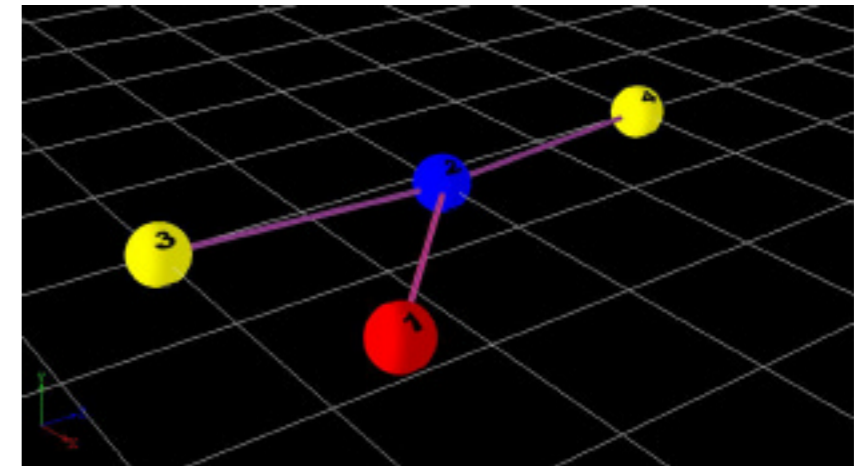
Het actief gestuurd actief gedrag is gemodelleerd in het "Adaptive Single Unit Model"; ook dit is toegankelijk via weblink09 (figuur 8.4). Aan dit systeem zijn enkele eenvoudige regels meegegeven.

1. De spieren oefenen een kracht uit op de knopen volgens een bepaalde stijfheidsrelatie.
2. Zodra een opgegeven hoek ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  of  $\epsilon$ ) te groot wordt, ontspant de antagonist, zodat de meest belaste spier meer kracht kan leveren.
3. Indien een kracht op een knoop werkt, dan beweegt de constructie tegen deze kracht in.

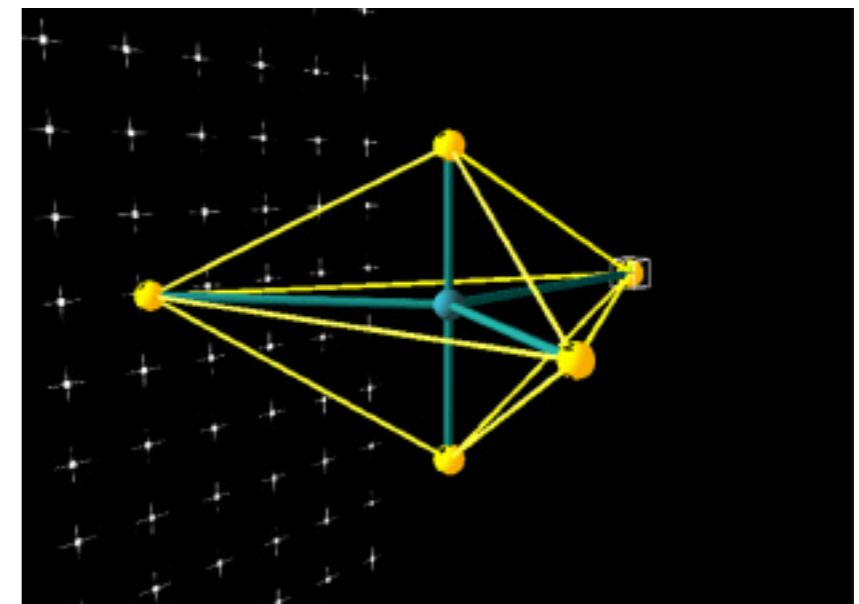
Zodra de kracht aangrijpt reageert de constructie met een tegenbeweging die een betere vorm oplevert op de kracht af te dragen. Omdat het model werkt met bovenbeschreven regels, reageert het systeem 'schokkend'. Uit de neerwaartse belasting volgt als reactie een beweging omhoog van het uiteinde van de drukstaaf (een rotatie van de drukstaaf). Wordt nu de hoek van de drukstaaf te groot, dan volgt een ontspanning van de spier, de hoek voldoet weer, en de staaf roteert weer tegen de kracht in. Enzovoort.

In het laatste model dat is gemaakt (ook toegankelijk via weblink09), zijn 6 eenheden aan elkaar geschakeld met ook een boven- en ondernet (figuur 8.5). In dit model is de invloed van het boven- en ondernet te zien. Het net reageert hier op dezelfde manier als de andere actuatoren, en het probeert de constructie terug te brengen naar zijn evenwichtstoestand. Met andere 'presets' kan het net ook bepaalde vormen in de constructie aanbrengen.

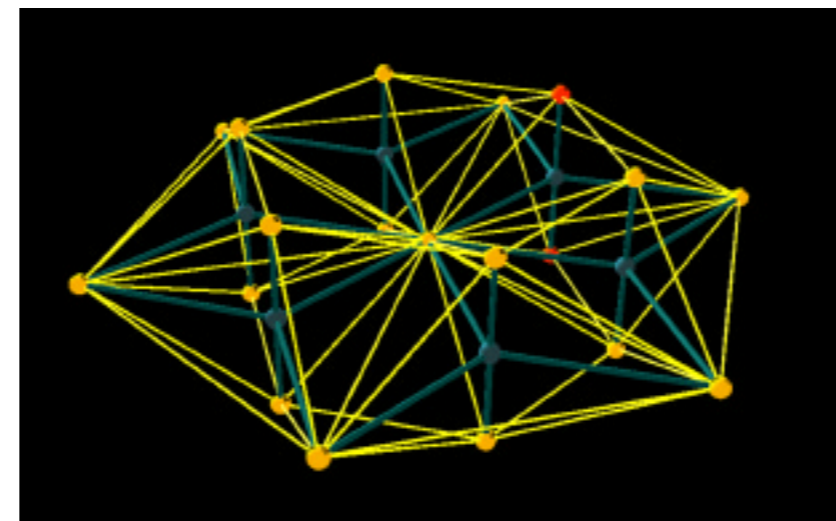
In bijlage 3 is de belangrijkste code weergegeven van de 3 modellen. De volledige code is te bekijken op de bij het rapport geleverde cd, of te downloaden van de website. Om de code te bewerken, moet gebruik gemaakt worden van een geregistreerde versie van Virtools™.



Figuur 8.3. Virtools model Smart Forces



Figuur 8.4. Virtools model Adaptive Single Unit Model



Figuur 8.5. S.A.M; zes eenheden

## 9. conclusies en aanbevelingen

### 9.1 inleiding

Dit afstuderen is een onderzoek geweest naar mogelijkheden van actief aanpassingsvermogen in draagconstructies. Zoals in hoofdstuk 1 is ingeleid, bestaan er verschillende vormen van aanpassingsvermogen. De fascinatie voor het biologische vernuft en de technologische vooruitgang hebben de aanzet gegeven tot een onderzoek in die richting. In hoofdstuk 2 is ingegaan op de soort aanpak die hoort bij een dergelijk onderzoek. Er is geen duidelijk omschreven probleem, omdat het probleem nog grotendeels onbekend is. Door het proberen van oplossingen, wordt het inzicht in de problematiek vergroot. Dit is een niet-lineair proces.

Omdat een draagconstructie zelden een ding op zich is, handelt hoofdstuk 3 over architectuur. Al tientallen jaren wordt er gedroomd over bewegende en vervormbare architectuur. Veel voorbeelden vonden geen navolging, maar via de cyber-architectuur, waarin de computer het belangrijkste ontwerpgereedschap is, ontstaat er weer nieuwe aandacht voor beweging en vervorming (Trans-ports). Draagconstructies die transformeren bestaan ook al sinds nomaden tenten bouwen. Toch is het reduceren van transportvolume en -massa in de ruimtevaart reden voor ontwikkeling van steeds nieuwe en slimmere systemen. Hoofdstuk 4 laat een aantal van dergelijke systemen zien en toont ook aan dat toepassing van adaptiviteit in gebouwen tot voordelen kan leiden, als bijvoorbeeld het dempen van trillingen en het reduceren van eigengewicht. Het controleren van adaptieve processen gebeurt idealiter met een intelligent, lerend computersysteem. Toepassing van zwermintelligentie is een mogelijkheid waarvan buitengewone resultaten verwacht worden. Hoofdstuk 5 biedt enkele middelen aan om adaptiviteit mee te maken. Sensoren en actuatoren zijn naast een controlerend systeem de bouwstenen van adaptiviteit. Bij elkaar genomen worden deze drie adaptronica genoemd.

In hoofdstuk 6 wordt S.A.M besproken. Met Trans-ports als denkraam is een draagsysteem ontwikkeld dat een buitengewone flexibiliteit heeft die ook kan worden aangestuurd. Het is een systeem dat uitermate geschikt is om adaptiviteit in verschillende vormen op uit te testen en kan gezien worden als een product dat het inzicht in de complexiteit van adaptieve draagconstructies vergroot. Om S.A.M beter te begrijpen, is een uitvoerige analyse van de krachtswerking uitgevoerd (hoofdstuk 7). Dit heeft geresulteerd in een matrix die de gevoeligheid van de krachtswerking voor veranderingen in de vorm van S.A.M weergeeft. Met het verworven inzicht zijn enkele modellen gemaakt waarin adaptiviteit gebaseerd op verschillende strategieën is getest. Het resultaat wordt beschreven in hoofdstuk 8 en is toegankelijk via de website of met de cd: een model met actief passief gedrag en een model met actief actief gedrag.

In dit hoofdstuk wordt gekeken of en in hoeverre is voldaan aan de doelstelling en hoe een vervolg van het onderzoek er uit zou kunnen zien.

### 9.2 terugkoppeling naar probleem en doelstelling

Voor de leesbaarheid zijn hieronder de probleem- en doelstelling uit hoofdstuk 2 herhaald:

#### Probleemdefinitie

*Door de onbekendheid met het ontwerpen van zichzelf aanpassende draagconstructies is inzicht nodig in de problemen die optreden bij het ontwerpen van dergelijke constructies.*

#### Doelstelling

*Door het ontwerpen van een zichzelf aanpassende draagconstructie moet duidelijk worden wat de problemen zijn waar de ontwerper van een zichzelf aanpassende draagconstructie mee te maken krijgt.*

Een van de grote uitdagingen van dit afstuderen was dat de problemen en doelstelling niet van het begin af duidelijk waren. De formulering ervan is een aantal keer gewijzigd, waarbij soms meer de nadruk lag op het concrete, en soms op het vage. In hoofdstuk 2 wordt al beschreven dat er een categorie problemen is waarbij het werken aan een oplossing het inzicht in de problematiek verhoogt. Een soort ontwerpend onderzoek. Ook binnen dit afstuderen leidde elke poging iets concreet te maken tot meer inzicht. Nieuwe problemen ontstonden waar ze niet werden verwacht, maar ook oplossingen waar ze niet werden gezocht.

Er zijn in feite twee uitersten met betrekking tot het vasthouden aan een vooraf gesteld doel. De een eerbiedigt het doel tot het uiterste, wat leidt tot een oogkleppen-tactiek. Er is geen oog meer voor het omringende. De andere tactiek stelt het doel voortdurend bij, te veel oog voor het omringende. Het zal duidelijk zijn dat de optimale aanpak hier ergens tussenin ligt, waarbij de ene problematiek meer vraagt om een doelmatiger aanpak dan de andere.

Dit afstuderen is een werk geweest dat vooral heeft verschillende aspecten bekeken die komen kijken bij het ontwerpen van een adaptieve draagconstructie. Mogelijke toepassingen, manieren van beweging, componenten die beweging mogelijk maken en strategieën voor adaptie. Een boeiend gebied is aangeboord waar nog uitgebreid onderzoek kan worden verricht. Er blijven na dit afstuderen vele vragen, waarschijnlijk meer dan er oorspronkelijk waren. Maar roept niet elk antwoord nieuwe vragen op?

Gedacht is dat het wellicht helder is het werk op te delen in een aantal categorieën. Per categorie wordt vervolgens beschreven wat de behaalde resultaten zijn en wat het nut is geweest voor het behalen van het doel van het afstuderen.

#### Theorie

In eerste instantie is een literatuurstudie gedaan naar het onderwerp van de adaptieve draagconstructies. Op enkele universiteiten (o.a. Stuttgart) bleken mensen bezig met onderzoek naar zichzelf aanpassende systemen, maar de literatuurverwijzingen kwamen meestal uit bij literatuur die handelde over één of enkele van de betrokken (deel)disciplines. Ook de schaal van het meeste onderzoek is een hele andere dan die waarin civiel ingenieurs normaliter werken. Veel literatuur handelt over micro-onderdelen met kleine vervormingen en kleine spanningen. Verder bleken vooral lucht- en ruimtevaart studies zich te richten op het onderwerp, omdat voor die disciplines het reduceren van eigengewicht een van de

belangrijkste doelen is. Overigens komt er elke dag meer informatie beschikbaar in de vorm van nieuwe publicaties, websites en televisie.

Omdat het onderwerp zich bevindt aan het front van de nieuwe ontwikkelingen, wordt er ook door bedrijven veel in geïnvesteerd. De hele leefomgeving van mensen wordt adaptief. Van eenvoudige systemen als automatische ruitenwissers, tot complexere als slimme thermostaten en koelkasten die zelf producten bijbestellen. De resultaten van dergelijk onderzoek echter zijn niet openbaar.

Binnen de bouwwereld speelt de architectuur altijd een voorttrekkende rol. Dit wordt duidelijk in de actuele discussie rond en het bouwen van vrije-vorm architectuur. Ook kinetic en adaptable architecture zijn voorbeelden van de avant-gardistische partij die de architectuur kan en moet zijn. Het is hierom dat een deel van het literatuuronderzoek zich heeft gericht op architectuur. In dit rapport heeft dat tenslotte de functie gekregen van een soort inleiding in de kinetische architectuur en het aantonen van een opkomende interesse in dat gebied.

Teruggrijpend op de doelstelling kunnen we stellen dat problemen bij het maken van beweegbare gebouwen vooral liggen in de mate van beweegbaarheid die het gebouw moet kunnen ondergaan en een systeem van klimaatscheiding, comfort en veiligheid die dat moet kunnen meemaken. Daarnaast is een belangrijke vraag waaraan het gebouw zich aanpast. Aan zijn omgeving, of juist aan zijn gebruikers. En in welke zin? Ter vergroting van het gebruikerscomfort, of bijvoorbeeld voor het minimaliseren van de gebruikte energie. Ten dienste van een samenleving, of juist enkel van de gebruikers. Of gaat dat misschien samen? Ook uniciteit en reproduceerbaarheid zijn belangrijke begrippen. De vraag naar de betekenis en het nut van bewegende en zichzelf aanpassende architectuur is nog niet beantwoord. Het is niet nodig het antwoord daarop af te wachten, wel om de discussie te volgen en ons af te vragen wat de rol van de techniek daarin is.

Het literatuuronderzoek richtte zich daarnaast op (beweegbare) constructies. Veel van deze systemen zijn geschikt om een gebouw een adaptief onderdeel te geven, bijvoorbeeld een dak van een stadion dat zich automatisch opent of sluit. Of een onderdeel in de constructie dat trillingen ten gevolge van aardbevingen of wind dempt. Een tuibrug kan worden uitgerust met actieve tuien, of een vakwerklijger of een ruimtevakwerk met actieve staven. Torens draaien zichzelf in de wind, gebouwen zetten zich schrap. Talrijke ideeën voor beweegbare mechanismen bestaan. Punt van onderzoek blijven de (gevoelige) aansluitingen en de aansturing en aandrijving van de mechanismen. Door het dynamische gedrag komen er bovendien extra krachten in de constructie die moeilijk zijn te voorspellen. Hiermee ontstaat de behoefte aan een model dat het gedrag van de constructie onder verschillende omstandigheden (realtime) in beeld brengt. Daarnaast moeten strategieën worden opgesteld en getest die het constructiesysteem in staat stellen zich zodanig aan te passen dan het zijn interne krachtsverdeling optimaliseert.

De actuatoren behelzen het derde deel van het literatuuronderzoek. Veel mechanismen zijn namelijk geschikt voor adaptief gebruik, cruciaal is vervolgens de inzet van de juiste actuatoren. De keus blijkt ruim, echter, meeste materialen en onderdelen zijn niet direct geschikt voor

gebruik in de civiele techniek. Hoewel microactuators ingezet kunnen worden in bijvoorbeeld de coating van tuien om trillingen daarin te dempen, hebben we voor het in beweging zetten van daken of andere constructieonderdelen ander materieel nodig. Hydrauliek lijkt een geschikte optie, echter voor toepassing op grote schaal in een lichtgewicht draagconstructie is dit te zwaar; gewicht is immers een van de belangrijkste factoren. Pneumatiek is qua gewicht een uitkomst, maar de aansturing is weer complexer door de stroomsnelheid en de samendrukbaarheid van lucht. De samendrukbaarheid kan echter ook weer worden ingezet om trillingen te dempen. Een parallel met biologische systemen spreekt tot de verbeelding, en daarnaast nog visueel interessant zijn de pneumatische spieren die worden gemaakt door Festo. Deze spieren vormen een interessant uitgangspunt en het verdient aanbeveling om het gebruik hiervan in een lichtgewicht draagconstructie verder te onderzoeken.

### **Beweegbaar flexibel systeem**

Met houtjes en touwtjes, oorspronkelijk gebaseerd op een onderspannen ligger, is een beweegbaar constructiesysteem ontwikkeld met maximale flexibiliteit. Het heet SAM. Voor een adaptief beweegbaar systeem moet immers eerst een beweegbaar en bestuurbaar systeem bestaan. De keuze had kunnen vallen op een bestaand systeem, zoals bijvoorbeeld een onderspannen ligger, of een ruimtevakwerk. De wens bestond echter om een systeem te gebruiken dat iets van de magie van een biologisch systeem in zich heeft. Het verdient sterk de aanbeveling dit systeem te vervolmaken. In het hoofdstuk dat het systeem beschrijft wordt al een aanzet gegeven voor de volgende stap in de ontwikkeling, namelijk het invoeren van een extra scharnier. Dit maakt de constructie nog beweeglijker en de krachtswerking wordt eenduidiger.

Het schakelen van de eenheden kan in principe op verschillende manieren: door het sec koppelen van de eenheden, of door het introduceren van een extra element om de eenheden te koppelen. Die laatste manier betekent dat de constructie wordt voorzien van een boven- en ondernet. Beide oplossingen hebben voor en nadelen. Belangrijkste voordeel van het toepassen van een boven- en ondernet is de veiligheid die kan worden ingebouwd voor onder andere globale instabiliteit. Het grote voordelen van het niet toepassen van deze netten is de modulariteit van het systeem, de eenvoud van de oplossing. Het verdient aanbeveling beide oplossingen verder te onderzoeken.

Er is een mechanica analyse gedaan naar de krachtswerking in het model. Een oplossing is gevonden voor de evenwichtsvergelijkingen en hiermee kunnen we de interne krachtsverdeling van het model beschrijven. Er is dus een maat voor de verhoudingen tussen de krachten die in de afzonderlijke elementen optreden. Er is echter niet gekeken naar krachten die werkelijk zullen optreden in de constructie. Dit heeft namelijk sterk te maken met de manier waarop het systeem wordt uitgevoerd, de gekozen afmetingen, de materiaalkeuze en de afwerking. Op een zeker moment wordt het belangrijk hier iets over te kunnen zeggen omdat daarmee de praktische waarde van het concept bepaald kan worden, maar voorlopig lijkt een meer abstract onderzoek nog waardevoller.

Uitbreider dient dan ook te worden ingegaan op de verhoudingen van de verschillende constructieonderdelen. De verhoudingen die zijn aangenomen in het huidige model komen uit een globale schatting

van de overspanning en de daarbij horende hoogte van een ruimtelijk vakwerk. Van belang is echter naast de interne krachten, de functionaliteit van de actuatoren; het effect van een verkorting of verlenging daarvan op de totale vervorming en de hoeveelheid energie die dit kost ten opzichte van die vervorming. Op basis van die criteria moet voor een efficiënt ontwerp een keuze worden gemaakt.

Een dynamische analyse van het model tijdens en net na een vervorming geeft inzicht in de dynamische eigenbelasting van het systeem. Afhankelijk van de dynamische belastingen van de actuatoren, kunnen deze een relatief belangrijk deel van de totale belasting vormen. Het is hiervoor onontbeerlijk een computermodel of een prototype van de constructie te maken en daaraan te meten en te rekenen. De modellen zoals ze zijn gemaakt in Virtools™ zijn indicatief van aard. Ze zijn geschikt om mogelijke vervormingen en toestanden te onderzoeken en om strategieën te testen in een realtime omgeving. Deze modellen dienen gekoppeld te worden aan een ander pakket om werkelijk te worden doorgerekend. De huidige constructiesoftware maakt gebruik van verplaatsingen in de constructie om tweede orde effecten uit te rekenen. Als we nu deze vervormingen kunnen vergroten en op kunnen leggen, dan zijn we in staat een bewegende constructie uit te rekenen. Het is daarnaast natuurlijk ook mogelijk een nieuw stuk code te schrijven en dit te combineren met een Virtools™ model. De inschatting is dat met de huidige gangbare computers het mogelijk moet zijn constructies tot ongeveer 3000 knopen realtime uit te rekenen. Dit houdt in dat een systeem van ongeveer 750 eenheden van S.A.Mv3.0 continue kan worden uitgerekend.

Globale instabiliteit, dat wil zeggen, knikvormen van de constructie als geheel verdient aanbeveling voor vervolgonderzoek. Veel onderzoek is en wordt gedaan naar de mogelijke knikvormen van koepels en andere regelmatige geometrische figuren. Veel complexer is het hierover iets te zeggen voor vrije vormen. Zonder een buitengewoon hoge veiligheid aan te hoeven nemen moet er meer bekend zijn van instabiliteit in een willekeurige schaal of ruimtelijke vorm. Totdat deze kennis beschikbaar wordt, moeten we genoegen nemen met SAM als onderdeel van een gebouw of kunstwerk waar instabiliteit of veiligheid geen zwaarwegende factoren zijn. Een wand bijvoorbeeld als de Hyposurface van dECOi, of een stuk dak dat bij instabiliteit gaat doorhangen, maar niet volledig bezwijkt.

### **Adaptief systeem**

Het ontwikkelen van adaptiviteit is gedurende het project niet iets losstaands geweest. Het was onderdeel van het ontwikkelen van het beweegbare systeem, de analyse daarvan en van het maken van het computermodel. De conclusies die volgden uit het gevoeligheidsonderzoek van een enkele unit van SAM leken evident. De resultaten van adaptief gedrag van de constructie als geheel zijn veel ingewikkelder. Hoewel we hebben aangenomen dat deze is te bewerkstelligen door de eenheden afzonderlijk eenvoudige regels op te geven, hebben we dit nog niet kunnen testen. Hoofdzakelijk had dit te maken met de beperkte capaciteit van de gebruikte desktop pc's. Met zorgvuldiger programmeerwerk had wellicht wat winst behaald kunnen worden, van zwermgedrag is echter pas sprake bij minimaal enkele tientallen eenheden. Toch lijkt SAM een interessant uitgangspunt. Doordat immers op vele plaatsen en op vele manieren gestuurd kan worden is het systeem geschikt om vele manieren van adaptiviteit uit te testen.

Vervormingsgestuurd of krachtgestuurd en inzetbaar voor verschillende doelen; puur constructief, maar ook functioneel en/of architectonisch. Als uitgangspunt voor een bewegend gebouw, of juist voor een statisch gebouw waarvan op een adaptieve manier de constructie wordt ontworpen. Met het model van SAM kan dan immers bij een opgegeven vorm door adaptie de ideale voorspanning van alle staven bepaald worden. Hiervan kan vervolgens een momentopname worden gemaakt en afgedrukt in een statische (werkelijke) constructie.

### **Modellen**

Behalve in computermodellen is ook geïnvesteerd in tastbare modellen. De modellen uit de eerste fase van het onderzoek zijn alleen nog op foto's waar te nemen. Het laatste model bestaat uit vier gekoppelde eenheden, waarbij voorlopig wordt aangenomen dat de schaal 1:2 is. Het nut van dergelijke modellen is het inzicht krijgen in de vorm, de vormvastheid, de krachtswerking, de mogelijkheden tot vervorming en zo u wilt de schoonheid ervan. Conclusies uit deze modellen hebben vooral geleid tot inzicht in het belang van de aansluitingen, in verband met instabiliteit en maakbaarheid. Dit heeft geleid tot een bolscharnier in het hart van SAM v3.0. Hierdoor vervalt de enige buigstaaf. Het model bestaat dan puur uit trek- en drukstaven.

De conclusies die we kunnen trekken uit de Virtools™ modellen, zijn kwalitatief van aard. Het grote voordeel is de 3D visualisatie die het debuggen veel eenvoudiger maakt. Er is een directe relatie tussen de programmering en het gedrag. Ook tijdens het draaien van het model kan het nog worden aangepast. De programmeerstructuur is erg overzichtelijk en gebruiksvriendelijk, wat soms maakt dat het iets omslachtig kan zijn. Duidelijk werd dat het tunen van de krachten in de spieren heel belangrijk is. Merkwaardig genoeg speelde ook tijdens het programmeren stabiliteit vaak een grote rol. Spieren die elkaars antagonist zijn gaan als ze niet goed worden afgesteld elkaars gedrag versterken waardoor de constructie in een soort resonantie raakt en uiteindelijk bezwijkt. Het verdient aanbeveling ook SAMv3.0 in Virtools™ te programmeren, omdat het model duidelijk aangeeft of het systeem stabiel gemaakt kan worden.

### **Contacten**

Behalve het gebruikelijke contact die een afstudeerder heeft met de leden van de commissie is tijdens het afstuderen contact gelegd met verschillende partijen en personen. In juni 2002 is het jaarlijkse symposium van het IASS in Warschau bezocht over lichtgewicht draagconstructies, waar ook Patrick Teuffel sprak. Samen met prof. Werner Sobek verricht hij onderzoek aan de universiteit van Stuttgart naar adaptieve draagconstructies. Zijn artikelen, zijn lezing en gesprekken met hem zijn een waardevolle aanvulling geweest op het inzicht in en het enthousiasme voor de stof.

Een gesprek met W.J. Huisman van de TU in Eindhoven en met J. Gerrits van de TU in Delft hebben het inzicht in de mogelijkheden van verschillende aansluitingen vergroot. Beide heren zijn bijzonder op de hoogte van mogelijke knopen, de eerste door het ontwikkelen van een bijzondere knoop in een koepel die gebouwd is op de campus van de TU in Eindhoven, de ander door het aanleggen van een database met knopen.

Bij Festo is contact gemaakt met de heren Van der Zaan en Haas. De eerste als locale specialist in de Fluidic Muscle, de ander als salesmanager. Dhr. Van der Zaan heeft een demonstratie gegeven van de spier en uitgelegd wat het principe ervan is. Dhr. Haas is de belangrijkste contactpersoon voor het opzetten van een vervolgotraject in het onderzoek met betrekking tot de spier.

Op de TU Delft is verder nog het contact met Bas Veldman van Lucht- en ruimtevaarttechniek belangrijk geweest. Door zijn specialisatie in opblaasbare constructies kwam Festo in beeld. Enthousiasmerend zijn verder nog de contacten met prof. Brookes van Bouwkunde en prof. Beukers van Lucht- en ruimtevaarttechniek geweest.

### Neerslag

Omdat het onderwerp van dit afstuderen veel te maken heeft met beweging, is een website gemaakt waarop bewegend beeldmateriaal is te vinden ter illustratie van de rapporttekst. Dit had ook op CD bij het rapport geleverd kunnen worden, maar een website had het voordeel dat deze continue geupdated kon zijn. Het plaatsen van de complete rapporttekst op de site leek uiteindelijk weer van minder waarde, daarom is uiteindelijk ervoor gekozen het via een aantal pdf bestanden toegankelijk te maken. De literatuurlijst en de lijst met internetverwijzingen is gehandhaafd omdat deze eventueel snel geraadpleegd moet kunnen worden. Ook zijn de modellen toegankelijk via de website, dit is een grote kracht van Virtools™. De meerwaarde van een website is duidelijk. In eerste instantie door het toegankelijk maken van bewegend beeldmateriaal, daarnaast van tussentijdse onderzoeksresultaten en in de derde plaats doordat het werk voor iedereen die het wil zien toegankelijk is. Via e-mail is het vervolgens mogelijk feedback te krijgen en over de inhoud te corresponderen.

Ter archivering van de website en van de originele code van de Virtools™ modellen is een CD gemaakt die bij het rapport hoort. Hiervan kunnen dus net als van de website de weblinks worden bezocht, de modellen worden gedraaid en het rapport worden gedownload. Deze offline website is de meest recente versie van voor de eindpresentatie.

### 9.3. Trans-ports: praktische overwegingen en aanbevelingen

#### 9.3.1 actuatoren

De afzonderlijke krachten die de Festo actuatoren in SAM kunnen opnemen zijn niet groot vanuit civiel technisch oogpunt. De vraag is of een systeem waarbij elke actuator uit een enkele spier bestaat krachtig genoeg is om zichzelf op te richten en te bewegen. Gedacht kan daarom worden aan spierbundels die bij dezelfde rek meer kracht kunnen opwekken. Voorwaarde is in ieder geval dat al het gebruikte materiaal zo licht mogelijk is, dat wil zeggen, het is aanbevolen gebruik te maken van aluminium of koolstof voor opname van de drukkrachten en een lichte huid.

Ter reductie van de kosten kan SAM ook worden ontwikkeld met continue antagonisten. In plaats van het principe dat elke spier een antispier heeft, kan de antispier ook bestaan uit een elastisch materiaal dat onafhankelijk trek op de spier uitoefent. Op deze manier wordt bijna de helft van het aantal actuatoren uitgespaard en daarmee ook veel gewicht voor installaties.

### 9.3.2 knopen

De praktische uitwerking van het bolscharnier knooppunt hangt samen

met nauwkeurigheid. Een klein onderzoek naar kunstledematen kan van dienst zijn, maar de daarin optredende krachten zijn veel lager dan die in SAM. Een bijkomend probleem is dat van het 'bodybuilder syndroom'. Hele sterke spieren oefenen ook grote krachten uit op de knooppunten. Hierdoor neemt wrijving toe en kan het knooppunt bezwijken.

### 9.3.3 huid

De huid moet zoals gezegd licht zijn. Dit om krachten op de constructie te minimaliseren. Daarnaast speelt het probleem van de rek in de huid bij vervorming van de constructie. Indien de huid geplooid wordt aangebracht, verdwijnt in een richting het grootste deel van deze krachten. Afhankelijk van de dikte van het materiaal, en dus ook van bijvoorbeeld de isolerende en beschermende werking, blijven de plooi krachten significant.

Philips ontwikkelt displays die geïntegreerd kunnen worden in textiel van kleding. De displays zelf zijn ook flexibel. Ook is er een techniek waarbij displays geprint worden door met conventionele printers geleidend materiaal op een speciale ondergrond te spuiten. Deze technieken maken het mogelijk om relatief goedkoop en op lichte wijze displays op te nemen in de huid van Trans-ports.

Onderzoek kan verder worden gedaan naar een mogelijkheid om het boven- en/of ondernet van SAM te vervangen door een elastisch membraan of een membraan met op sommige plaatsen geïntegreerd spierweefsel. De twee lagen dragen tevens bij aan een goede bescherming van de constructie. Nadeel is dat deze dan uit het zicht verdwijnt.

### 9.3.4 veiligheid

De veiligheid van het systeem is een belangrijk thema omdat de constructie onvoorspelbaar reageert of kan reageren. Dit onvoorspelbare komt doordat we niet precies meer weten wat er gebeurt. Het systeem is out of control. Dit kan betekenen dat het slimmer is dan wij, maar ook dat er dingen mis gaan. In principe zijn er twee veiligheidsbenaderingen: safe life en fail safe. De eerste benadering garandeert voor een bepaalde levensduur een zekere veiligheid voor het gebouw. Deze garantie is echter moeilijk te geven omdat niet duidelijk is wat het gebouw zal doen tijdens zijn levensduur. De andere benadering gaat er van uit dat het bezwijken of falen van een of meerdere onderdelen van de constructie niet het bezwijken van het geheel tot gevolg heeft (meerdere draagwegen en herverdeling). Met een eenvoudige risicoanalyse kan bepaald worden wat de kans is op falen van de onderdelen en tests kunnen uitwijzen hoe de constructie reageert op defecte onderdelen.

Het is overigens belangrijk ook een analyse te maken van de belangrijkste kans op defecten. De meest voor de hand liggende zijn brand, overbelasting, maar ook vermoeiing en vandalisme zijn factoren om rekening mee te houden. Daarnaast is het uitvallen van energie een kritische situatie.

### 9.4 vervolg

Voor een vervolgonderzoek zijn verschillende richtingen mogelijk. Hoewel in de vorige paragraaf al hier en daar aanbevelingen worden gedaan voor interessante onderzoeksaspecten, worden hieronder vier deelonderzoeken aangereikt waar andere afstudeerders of misschien

promovendi mee verder kunnen. Het is denkbaar dat een onderzoek zich richt op de praktische kant van de constructie, maar ook in de richting van de abstractere logica achter het aansturen van de constructie. Daarnaast kunnen verschillende deelaspecten van de constructie worden onderzocht.

Een van de belangrijkste aspecten van adaptiviteit is de strategie die wordt aangehouden bij het aanpassen. Hierin bestaat een breed scala aan mogelijkheden, die alle te maken hebben met optimalisatie. De uitgangspunten bij het optimaliseren bepalen het doel van de strategie, maar in grote mate ook de strategie zelf. Er is een duidelijk onderscheid te maken tussen een centraal aangestuurde draagconstructie, of een decentraal gestuurde.

Het is belangrijk dat onderzocht wordt wat de functie van het boven- en ondernet van SAM kan zijn in een strategie die bezwijken voorkomt. Er moeten vuistregels voor het instabiliteitsgedrag van vrije-vormconstructies worden opgesteld en toegepast op de bewegende constructie. Boven- en ondernet kunnen gebaseerd op deze vuistregels bezwijken voorkomen. Daarnaast is het nodig te onderzoeken of er ook een stapeling van de eenheden mogelijk is waarbij het boven- en ondernet komen te vervallen en hoe in dat geval bezwijken wordt voorkomen.

Een andere strategie die aandacht verdient is die waarbij zwermgedrag als intelligent middel wordt ingezet. Deze zwerm kan tot stand komen door alle constructiedelen in te zetten als onderdeel van de zwerm. Voor het onderzoek is het dan eerst nodig een echte zwerm te programmeren van liefst enkele honderden knopen en deze te laten reageren op verschillende impulsen. Door het opstellen van een set regels, constructief en adaptief, moet dit er voor zorgen dat een constructie in evenwicht blijft door te reageren op interne en externe signalen.

Genoemde strategieën kunnen worden ingezet met verschillende doelstellingen zoals bijvoorbeeld het minimaliseren van gewicht, of het voorkomen van instabiliteit. Nader onderzocht dient te worden wat de invloed is van het kiezen van andere uitgangspunten op het uiteindelijke gedrag van de constructie.

Een tweede onderwerp dat ook softwarematig van aard is, is het programmeren van een stuk software voor het continue uitrekenen van een bewegende constructie. Misschien is het mogelijk een bestaand rekenprogramma te gebruiken en het waar nodig aan te passen. Dit programma kan ingezet worden als middel in een strategie waarbij het draagconstructief systeem centraal wordt gecontroleerd. Het kan dan bijvoorbeeld het boven- en ondernet advies geven over een te ondernemen actie. Het gebruik hierin van een parallel computersysteem biedt wellicht bredere perspectieven.

Het derde onderzoek richt zich op Festo spieren in een civiel technische constructie. Bij krachten die doorgaans optreden in draagconstructies moet een eenvoudig systeem van spieren in staat zijn de constructie bepaalde bewegingen te laten uitvoeren. Dit kan bijvoorbeeld een staande mast zijn, of een uitkragende arm. Belangrijke vragen zijn wat de meest efficiënte afmetingen zijn van spieren en drukstaven gekeken naar krachtswerking, energieverbruik en kosten. Ook moet onderzocht worden of het mogelijk is het aantal actuatoren te reduceren door bijvoorbeeld

elastische antagonisten in te zetten, of om voor het besturen van een arm of mast drie in plaats van vier spieren te gebruiken.

Richting vier is ook praktisch van aard, namelijk het uitwerken van S.A.M. Aandacht gaat hierbij uit naar materiaalkeuze van de drukstaven en het daarbij horende gedrag en massa, het detailleren van de aansluitingen met de daarbij optredende krachten en tenslotte vermoeiingsaspecten van de constructie. Ook moet gekeken worden of het voldoende is S.A.M uit te voeren met enkele spieren of dat dubbele moeten worden ingezet om de krachten te vergroten. Wat betekent dat vervolgens voor de aansluitingen?

### 9.5 samenvatting conclusies

Samengevat staan hieronder de belangrijkste conclusies. De nummering ontbreekt omdat die een mate van voorkeur of gewicht zou uitdrukken. Getracht is een evenwichtige compositie van conclusies weer te geven.

Met de opkomst van vrije vorm en kinetische architectuur ontstaat het verlangen naar nieuwe manieren van omgaan met, en ontwerpen van draagconstructies.

Naast de volwaardige rol die de computer speelt in zowel architectuur als constructie techniek, wordt deze ook steeds meer de verbindende factor tussen beide vakgebieden.

Adaptieve (draag)systemen kunnen leiden tot efficiëntere en veiliger bouwwerken.

S.A.M is een constructiesysteem waarin veel aspecten samenkomen. Het bevat vele vrijheden en mogelijkheden tot sturing en is daarom geschikt om verschillende strategieën van adaptiviteit te testen.

Verskillende adaptie strategieën kunnen leiden tot tegenovergestelde reacties. Daarom is het belangrijk duidelijke optimalisatiecriteria te kiezen.

Festo spieren bieden een boeiend perspectief voor toepassing in draagconstructies.

Voor het simuleren van een adaptief, gedecentraliseerd constructiesysteem hebben de huidige niet-parallelle pc's al snel te weinig rekenkracht.

Heel veel ideeën bestaan al lang, en worden vaak opnieuw bedacht. Dit is niet erg, het gaat om de manier waarop ze met elkaar in verband worden gebracht.

### 9.6 tot slot

Het onderzoek naar adaptieve draagconstructies was en is een boeiende zoektocht in de materie van zwermssystemen, biomimetics en lightweight structures. Het balanceren op de rand van verschillende vakgebieden, de overlappen daarvan, het vooruitstrevende karakter en de fantastische toekomstperspectieven die het biedt, blijft fascineren.

Het zou dan ook buitengewoon jammer zijn als een dergelijk onderzoek niet wordt voortgezet aan de TU Delft. Hiervoor is het nodig een verband

op te richten dat structuur en continuïteit garandeert. Het voorstel is een onderzoeksgroep van afstudeerders en jonge onderzoekers op te richten met kennis uit verschillende vakgebieden. Met name de vakgebieden van de civiele techniek, bouwkunde en lucht- en ruimtevaarttechniek. Dit combineert namelijk de kennis van de bouw, van het bouwen en van de modernste techniek om te komen tot nieuwe voorstellen en ideeën op het gebied van de adaptieve gebouwen. Het onderzoek is enerzijds theoretisch, en anderzijds ontwerpend, omdat juist de raakvlakken daarvan kunnen aantonen hoe de nieuwe kennis leidt tot nieuwe inzichten en nieuwe ontwerpen. Kennis en creativiteit kan verder worden ingebracht door het organiseren van lezingen en workshops met werktuigbouwkundigen, technisch-biologen, IT-specialisten en kunstenaars.

De verwondering over een schijnbaar eenvoudig probleem kan aanleiding geven tot een uitvoerig onderzoek. Voor iedereen die om zich heen kijkt, biedt de omgeving gelegenheid genoeg tot verwondering. Maar deze verwondering kan zich vervolgens ontwikkelen tot een fascinatie. Dat laatste heeft zich bij mij voorgedaan gedurende dit afstuderen. Een fascinatie voor het aanpasbare.

## . Bronnen

### Literatuur

- [02] Gandhi, M.V., Thompson, B.S.: Smart Materials and Structures. London: Chapman & Hall, 1992
- [07] Zuk, W.; Clark, R.H.: Kinetic Architecture. New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1970
- [08] Janocha, H. (Ed.): Adaptronics and Smart Structures. Berlin: Springer, 1999
- [19] Sobek, W.; Haase, W.; Teuffel, P.: "Adaptive Systeme", Stahlbau 7(2000), 544-555
- [20] Tzou, H.S.; Anderson, G.L.: Intelligent Structural Systems. Dordrecht: Kluwer, 1992
- [21] Adeli, H.; Saleh, A.: Control, Optimization, and Smart Structures. New York: John Wiley & Sons, 1999
- [22] Roo, A.M. de; Herwijnen, F. van: Aardbevingsbestendig bouwen(2), Cement 8 (2000), blz. 38-52
- [23] Kelly, K.: Out of Control: The New Biology of Machines, Social Systems and the Economic World. Reading: Addison-Wesley, 1994
- [24] Thompson, D'Arcy Wentworth: On growth and form. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1971
- [25] Hertel, H.: Structure-form-movement. New York: Reinhold, 1966
- [26] Kronenburg, R.: Houses in motion; the genesis, history and development of the portable building / by Robert Kronenburg. Chichester: Wiley-Academy, 2002
- [27] Ramm, E., Bletzinger, K.: Structural Optimization, Newsletter Structural Morphology Group - IASS Working Group #15 - 9 (1998), blz. 6-13
- [28] Ramm, E., Kemmler, R.: Stability and Large Deformations in Structural Optimization, Proceedings of the international IASS symposium 'Lightweight Structures in Civil Engineering'. Warsaw, 2002
- [29] Sobek, W., Teuffel, P.: Adaptive Lightweight Structures, Proceedings of the international IASS symposium 'Lightweight Structures in Civil Engineering'. Warsaw, 2002
- [30] Woudenberg, I. A. R.: Windbelasting en de hoogbouwdraagconstructie. Afstudeerrapport. Delft, 2002
- [31] Tibert, G.: Deployable Tensegrity Structures for Space Applications. Doctoraal Scriptie. Stockholm, 2002
- [32] Oosterhuis, K.: Space Station Module, Architectural Design -

Hypersurface architecture II, blz. 84-89

- [33] Goulthorpe, M.: Aegis Hyposurface, Architectural Design - Hypersurface architecture II, blz. 60-65
- [34] Kepes, G.: The Man-made Object. Londen: Studio Vista, 1966
- [35] Oosterhuis, K.: Animated Bodies, Architectural Design - Architecture + Animation, blz. 36-39
- [36] Goulthorpe, M.: Misericord to a Grotesque Reification, Architectural Design - Architecture + Animation, blz. 56-63
- [37] IL 5, Wandelbare Dächers. Institut für leichte Flächentragwerke, Stuttgart, 1972
- [38] Horden, R.: Light Tech, Towards a light architecture. Basel: Birkhäuser verlag, 1995
- [39] Wagner, R.: The Virtual World of "Tensional Integrity". Paper for The Seventh International Workshop on the Design and Practical Realisation of Architectural Membrane Structures. TU Berlin, 2002
- [40] Oosterhuis, K.: Programmable Architecture. Milano: Arca Edizioni, 2002
- [41] Beukers, A.: Lightness: the inevitable renaissance of minimum energy structures / by Adriaan Beukers and Ed van Hinte. Rotterdam: 010 publishers, 1998

### Internet

(N.B. genoemde links zijn allen bereikbaar via het http)

architectuur

- [i01] Marcos Novak: [www.centrifuge.org/marcos/](http://www.centrifuge.org/marcos/)
- [i02] Oosterhuis.nl: [www.oosterhuis.nl](http://www.oosterhuis.nl)
- [i03] Oosterhuis trans-ports: [www.trans-ports.com](http://www.trans-ports.com)
- [i04] Decoi: [www.hyposurface.com](http://www.hyposurface.com)
- [i05] Calatrava: [www.calatrava.com](http://www.calatrava.com)
- [i06] Mediamatic: [www.mediamatic.nl/workshops/archief/2000\\_01/toporeader.html](http://www.mediamatic.nl/workshops/archief/2000_01/toporeader.html)
- [i07] Greg Lynn Form: [www.glyform.com](http://www.glyform.com)
- [i08] UN Studio: [www.unstudio.com](http://www.unstudio.com)
- [i09] Hoberman: [www.hoberman.com/fold/Associates/associates.htm](http://www.hoberman.com/fold/Associates/associates.htm)

Bedrijven

- [i10] Festo: [www.festo.com](http://www.festo.com)
- [i18] Virtools™: [www.virttools.com](http://www.virttools.com)
- [i20] Arup: [www.arup.com](http://www.arup.com)
- [i21] Oasys software: [www.oasys-software.com](http://www.oasys-software.com)

Universiteiten en instituten

- [i11] Lightstructures: [www.lightstructures.de](http://www.lightstructures.de)

Universität Stuttgart

- [i12] Institute for Structural Mechanics: [www.uni-stuttgart.de/ibs/](http://www.uni-stuttgart.de/ibs/)

- [i13] Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren: [www.uni-stuttgart.de/ilek/](http://www.uni-stuttgart.de/ilek/)

- [i14] Universität Aken: [arch.rwth-aachen.de/twl/www.twl/](http://arch.rwth-aachen.de/twl/www.twl/)

- [i15] Columbia university [www.cc.columbia.edu/cu/gsap/BT/](http://www.cc.columbia.edu/cu/gsap/BT/)

- [i16] MIT: [kdg.mit.edu/Matrix/matrix.html](http://kdg.mit.edu/Matrix/matrix.html)

- [i17] Deployable structures laboratory: [www-civ.eng.cam.ac.uk/dsl/](http://www-civ.eng.cam.ac.uk/dsl/)

Overig

- [i19] The Swap-meet: [www.theswapmeet.com/](http://www.theswapmeet.com/)

### Figuren

Voor de figuren in dit rapport is gebruik gemaakt van verschillende bronnen. Veel daarvan zijn in de literatuurlijst vermeld, voor anderen is onder andere gebruik gemaakt van verscheidene internet bronnen.