

Afstudeerverhaal

Afgelopen februari ben ik afgestudeerd aan de vakgroep BioMechanical Engineering op mijn onderzoek naar Statisch Gebalanceerde Tensegrity Mechanismen. In dit artikel zal ik proberen om een beeld te geven van mijn afstudeeronderwerp, en hoe het afstuderen verlopen is.

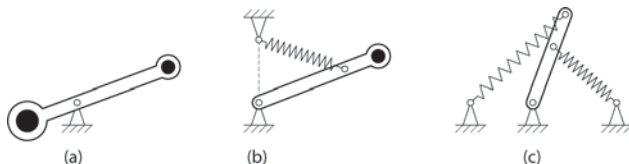
- Mark Schenk -

'Gaaf Onderzoek'

Toen ik op zoek ging naar een afstudeeronderwerp had ik een ding helder voor ogen: het moest interessant - met andere woorden, gaaf - genoeg zijn om me een jaar bezig te houden. Ook wilde ik graag nog eens 'echt' onderzoek doen, voordat ik de universiteit zou verlaten. Dat was dan ook wat ik mijn afstudeerbegeleider Just Herder voorlegde, toen ik langs kwam om met hem over afstudeeronderwerpen te praten. Zelfs zijn grote repertoire aan leuke projecten en ideeën was het toch allemaal nét niet, totdat we gezamenlijk op een totaal onverkend gebied uitkwamen; mijn onderzoek zou gaan plaatsvinden op het contactvlak van twee verschillende vakgebieden, dat van statisch balanceren en van tensegrity structures, met als resultaat statisch gebalanceerde tensegrity mechanismen.

Statisch Balanceren

Een statisch gebalanceerde constructie is in evenwicht in elke stand van zijn werkgebied, waardoor het in principe geen kracht kost om te verplaatsen. Een klassiek voorbeeld is de bureaulamp; het model dat je bij de IKEA koopt heeft weliswaar de wrijving hard nodig om in een positie te blijven, maar mits goed ontworpen (en dat betekent vooral het gebruik van de juiste veren) kan een 'Anglepoise' bureaulamp ook zonder wrijving in elke stand in evenwicht blijven. De benodigde veren zijn zo voorgespannen dat de veerkracht proportioneel is aan de lengte van de veer, en niet de verlenging - ze hebben dus rustlengte nul. De veren kunnen gebruikt worden om een massa, zoals een lamp, te compenseren, maar ze kunnen ook elkaar in iedere stand in evenwicht houden.



De staven zijn in evenwicht bij keuze van juiste veren

Tensegrities

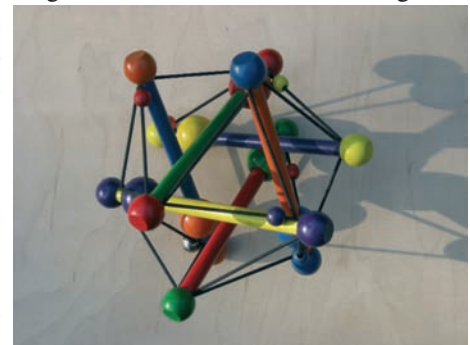
Een veel minder bekend aspect van mijn afstudeeronderwerp is dat van tensegrities. Dit is een speciaal type voorgespannen vakwerk, waarbij de elementen ofwel puur op trek ofwel puur op druk worden belast. Vaak zijn de compressie elementen niet onderling verbonden, en als de trekelementen worden vervangen door kabels, lijken de staven als het ware te zweven, wat resulteert in een prachtig visueel effect. Tensegrities zijn



Needle Tower in Washington

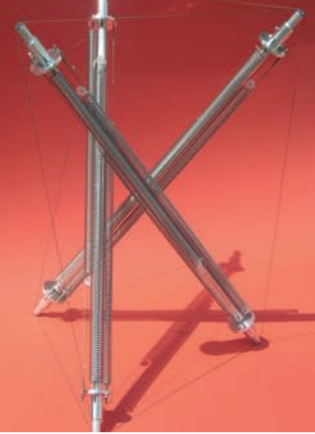
nog niet in algemeen gebruik in de techniek en zijn tot op het heden vooral bekend van kunstwerken. Een bekend voorbeeld is de 'Needle Tower II' van de kunstenaar Kenneth Snelson in het Kröller-Müller museum. In termen van mechanica zijn tensegrities in het algemeen zowel statisch als kinematisch onbepaald, en hebben dus

zowel interne spanningen als interne mechanismen. Interne mechanismen zijn knooppuntsverplaatsingen die tot de eerste orde geen verlenging van de elementen veroorzaken, en dus geen stijfheid hebben. De zogenaamde infinitesimale mechanismen verstijven geleidelijk door hogere-orde verlengingen (bijvoorbeeld kwadratisch met de verplaatsing). In een tensegrity worden deze interne mechanismen verder gestabiliseerd door de aanwezige voorspanning, en wordt de stijfheid proportioneel aan de voorspanning. Deze stabiliserende spanningstoestand is een kenmerkende eigenschap van tensegrities, en vormt ook de etymologie van *Speelgoed voor een baby, vol tensegrity* de naam: het woord tensegrity werd door R. Buckminster Fuller bedacht als samentrekking van tensional integrity. Met andere woorden, stevigheid door spanning.

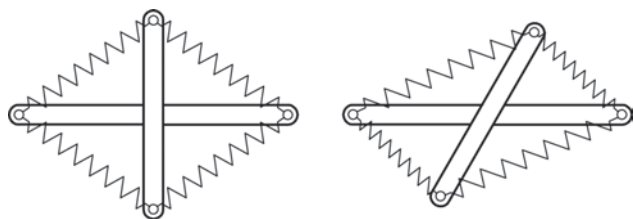


Statisch Gebalanceerde Tensegrity Mechanismen

Mijn doel was om beide bovenstaande vakgebieden te combineren; door de kabels te vervangen door de juiste voorgespannen veren, zouden de tensegrities statisch gebalanceerd kunnen worden. Er waren enkele eenvoudige voorbeelden bekend, maar het was onduidelijk of het ook in het algemeen mogelijk zou zijn. Aan mij de opdracht om dit te onderzoeken. Als het zou werken, zou het werkelijk fascinerende ruimtelijke constructies opleveren: ongeacht de veranderende posities van de elementen en de veranderende lengtes van de



veren, blijven de interne spanningen in evenwicht. Omdat het systeem geen voorkeursstand kent, kost het - wrijving daargelaten - geen energie en kracht om van stand te veranderen; met andere woorden, de tensegrity heeft geen stijfheid en gedraagt zich dus als een mechanisme! Dit levert twee equivalente termen op om dit type systeem te beschrijven: zero stiffness tensegrity structures, of statically balanced tensegrity mechanisms. Het levert



Voorbeeld van een *balanced tensegrity mechanisme*

echter ook twee totaal verschillende benaderingen op, moet je het beschouwen als vakwerk, of als mechanisme?

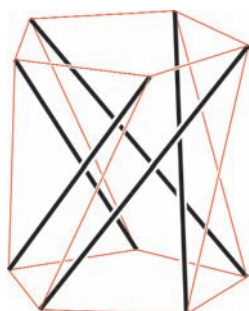
Cambridge

Als onderdeel van mijn afstuderen liep ik stage aan de Universiteit van Cambridge, bij de Structures Group, waar ik meedraaide als bezoeker en onderzoeker. Het studeren in deze befaamde universiteitsstad was een prachtige ervaring, zowel qua onderzoek als qua studentenleven. Hier werd ook mijn onderzoeksplan ontwikkeld: ik onderzocht wat een vakwerk stijf maakt, en wat daarbij de rol is van de voorspanning. Door dit goed te begrijpen probeerde ik vervolgens te achterhalen wanneer de tensegrity geen stijfheid heeft, en dus statisch gebalanceerd is. Wederom een beetje stijfheid en sterkte: de stijfheid van een vakwerk wordt beschreven door de tangentiële stijfheidsmatrix, die de relatie legt tussen externe krachten en knooppuntsverplaatsingen. Deze matrix bestaat uit twee onderdelen: de materiaalstijfheid en de geometrische stijfheid, waarin het effect van de voorspanning wordt verdisconteerd. Door gebruik te maken van een recente afleiding voor de stijfheidsmatrix, kregen we inzicht in wat het betekende om veren met rustlengte nul toe te voegen aan de constructie. Die kennis

gebruikten we vervolgens om te onderzoeken wanneer de eigenwaarden van de stijfheidsmatrix van de tensegrity nul zouden worden, en het geheel dus statisch gebalanceerd was.

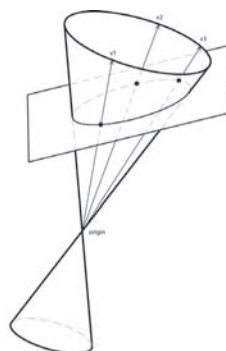
Theorie en Praktijk

De basis van mijn werk werd gelegd in Cambridge en na mijn terugkomst in Nederland werkte ik de ideeën uit



Een pentagon

tot een goed onderbouwde theorie. Er bleek namelijk een wiskundig vakgebied te zijn dat zich ook bezighoudt met de stabiliteit van tensegrities, maar dat meer uitgaat van de topologie van structuren en minder van de fysieke eigenschappen. Door observaties uit de wiskundige literatuur te herinterpreteren en toe te passen op mijn situatie kon ik uiteindelijk beschrijven waarom, en onder welke omstandigheden, een tensegrity geen stijfheid heeft als er veren met rustlengte nul worden toegevoegd. Het volgde dat als de richtingen van alle staven (en niet de veren) van een tensegrity op een conus liggen, er een vervorming bestaat die geen stijfheid heeft. Verder kon ik aantonen dat die verplaatsingen niet slechts infinitesimaal waren (de tangentiële stijfheidsmatrix is in principe alleen geldig voor infinitesimale verplaatsingen) maar ook geldig zijn over eindige verplaatsingen. Zo had ik dus in het algemeen aangetoond dat het type mechanisme waar



Het conusmodel

zien op mijn afstuderen.

we naar zochten ook daadwerkelijk bestond! Met een theoretische beschrijving op zak was de volgende stap om een prototype te maken. Een 'klein' probleem hierbij was dat in mijn theorie de zwaartekracht was verwaarloosd, en indien perfect gebouwd, zou het model onder zijn eigen gewicht in elkaar moeten zakken. Gelukkig hielp de wrijving een handje mee en kon ik een werkend model laten

Resultaat

Wat heeft het allemaal opgeleverd? Op het moment zijn er nog geen praktische toepassingen van mijn onderzoek. De meerwaarde ligt nu dan ook vooral in het verbeterde begrip van de stijfheid van vakwerken, en welk effect de speciale veren daarin hebben. Ook hebben we een totaal nieuw type mechanisme ontwikkeld waarvan de mogelijkheden nog onbekend zijn. Uiteindelijk zal die kennis weer ten goede komen van nieuwe statisch gebalanceerde constructies, maar vervolgonderzoek is wel nodig. Wat het afstuderen voor mezelf heeft opgeleverd, is het besef dat je bij je afstuderen pas genoeg moet nemen met een opdracht die je écht ziet zitten! Dan blijf je gemotiveerd genoeg om lekker door te werken, en ontdek je hoe leuk (theoretisch) onderzoek kan zijn! 🤖