

Praktische gids voor het ontwerpen en construeren van tensegrity-structuren

Vincent Emonds
Universiteit Hasselt
Masteropleiding Architectuur
Seminarie Bouwtechnisch Concept
Promotor: Robrecht Keersmaekers
Academiejaar 2014-2015



Inhoud

Inhoud	3
Abstract	5
Inleiding	6
Algemeen.....	7
Wat zijn tensegrity-structuren	7
Eigenschappen van tensegrity-structuren	7
Definitie van een tensegrity-structuur	7
Geometrische eisen.....	8
Indeling van tensegrity-structuren.....	10
T-prisma's	10
Sferische tensegrities	11
Tensegrity-assemblages	11
Onregelmatige tensegrities	11
Case-study: Needle Tower – Kenneth Snelson.....	12
Historisch overzicht	13
Tentoonstelling Kenneth Snelson 1969.....	13
Renovatie 1995.....	14
Restauratie 2004	16
Opbouw Needle Tower	17
Algemeen.....	17
Concept	17
Structuur.....	17
Afmetingen	18
Huidige constructie	19
Constructie van schaalmodellen	21
Algemene constructiemethode.....	21
Materialen	21
Stutten.....	21
Trekkingen	21
Verschillende constructiewijzen.....	23
Insnijding aan het uiteinde van de stutten.....	23
Schroefvoeg aan het uiteinde van de stutten.....	24
Verbinding met behulp van insnijding en parels.....	25
Constructie van basistensegrities.....	26

De simplex	27
Elementen	27
Assemblage.....	27
De T-icosaëder.....	29
Elementen	29
Assemblage.....	29
De T-tetraëder	32
Elementen	32
Assemblage.....	32
Aaneenschakelen van basistensegrities	35
Verbinding met behulp van gelijkzijdige driehoeken	36
Praktische voorbeelden.....	38
Simplex – simplex	38
Simplex – icosaëder	39
Simplex – tetraëder	39
Eigen ontwerpen	40
Tensegrity-boog.....	40
Ontwerp	40
Constructie	40
TSI-153.....	43
Ontwerp	43
Constructie op grotere schaal	45
Algemene constructiemethode.....	45
Productie van de staalkabels.....	46
Productie van de drukkers.....	48
Assemblage van het geheel.....	49
Besluit.....	54
Dankwoord	55
Bibliografie	56
Lijst van figuren	57

Abstract

Tensegrity-structuren zijn zelfdragende constructieve systemen opgebouwd uit een netwerk van kabels (trekelementen) met daarin afzonderlijke staven (drukelementen). Door hun bijzonder uitzicht werden ze in de loop der jaren vaak opgericht als artistieke objecten. De Needle Tower, ontworpen door Kenneth Snelson, is wellicht de bekendste tensegrity-sculptuur. In dit werk volgt onder meer een case-study van deze tensegrity-toren.

Om van een tensegrity te spreken moet een structuur voldoen aan enkele essentiële eigenschappen. Deze eigenschappen worden besproken in een eerste algemeen hoofdstuk, samen met de indeling van verschillende soorten tensegrities. In deze scriptie wordt vervolgens een handleiding geformuleerd voor het ontwerpen en construeren van tensegrity-structuren. Er worden enkele algemene constructiemethodes beschreven, waarna een gids volgt om verschillende basisstructuren te construeren. Verder wordt een methode uitgelegd om deze basistensegrities aan elkaar te schakelen tot complexere tensegrity-assemblages. Deze handleiding is ook als website beschikbaar op www.tensegritystructuren.wordpress.com.

Tenslotte wordt de opgedane kennis gecombineerd om zelf enkele tensegrities te ontwerpen en construeren. Eén van deze ontwerpen werd op een grotere schaal uitgevoerd en zal in de agora van het architectuurgebouw van de Universiteit Hasselt tentoongesteld worden.

Inleiding

Tensegrity-structuren zijn systemen opgebouwd uit elementen die enkel op druk of enkel op trek belast worden. In dit systeem zijn de elementen op druk (de stutten of drukstaven) niet met elkaar verbonden, waardoor de constructie van de structuren op het eerste zicht onmogelijk lijkt. Tensegrities bezitten daardoor een grote artistieke aantrekkingskracht.

Niet elke samenstelling van op trek belaste trekkers en op druk belaste staven is echter een tensegrity. In een eerste algemeen hoofdstuk worden daarom de eigenschappen en geometrische eisen waaraan tensegrity-structuren moeten voldoen beschreven. Daarnaast wordt een indeling gemaakt in verschillende soorten van tensegrities.

Om inzicht te krijgen in de constructie van deze specifieke structuren werd een gedetailleerde case-study gemaakt van de hoogste tensegrity-structuur ter wereld: de "Needle Tower II" (1969) van Kenneth Snelson. Deze toren bevindt zich in het Kröller-Müller Museum in het Nederlandse Otterlo.

In dit werk wordt vervolgens op een praktische wijze onderzocht hoe tensegrity-structuren ontworpen en geconstrueerd kunnen worden. Dit onderzoek gebeurt op basis van schaalmodellen van verschillende groottes. Bij de constructie van deze schaalmodellen zijn er diverse mogelijkheden wat betreft het materiaalgebruik en de verbindingstechniek. Deze verschillende opties worden besproken onder de noemer algemene constructiemethodes.

In de loop der jaren werden reeds veel verschillende basistensegrities beschreven. In het volgende deel wordt de constructie van enkele van deze basisstructuren stap voor stap uitgelegd. Vervolgens wordt een techniek beschreven om deze basisstructuren aan elkaar te schakelen. Op deze manier kunnen complexere tensegrity-assemblages ontworpen worden.

Tot slot wordt deze opgedane kennis gecombineerd om enkele eigen ontwerpen uit te werken. Het ontwerp en de constructie van deze eigen ontwerpen komen in het laatste hoofdstuk aan bod. Eén van de doelstellingen van deze scriptie was om een ontwerp op grote schaal uit te voeren en aan het universiteitsgebouw te plaatsen. De tensegrity-sculptuur "TSI-153" (2015) (Figuur 0) zal worden tentoongesteld in de agora van het architectuurgebouw van de Universiteit Hasselt.



Figuur 0

Algemeen

Wat zijn tensegrity-structuren

Tensegrity-structuren zijn zelfdragende systemen opgebouwd uit een netwerk van kabels met daarin afzonderlijke staven. De staven worden enkel belast met een drukkracht en worden ook stutten of drukkers genoemd. De kabels worden enkel belast met een trekkracht en worden daarom ook aangeduid als trekkers. De verbinding van de trekkers en stutten gebeurt steeds ter hoogte van de eindpunten van de stutten. Het tensegrity-principe werd door verschillende personen ontdekt in de loop van de jaren '40 en '50 van de vorige eeuw. De Fransman David Georges Emmerich was de eerste die een tensegrity-structuur ontwikkelde in Europa. In Amerika waren er twee belangrijke personen die het principe ontwikkelden, weliswaar onafhankelijk van elkaar: Richard Buckminster Fuller en Kenneth Snelson. Tijdens het verdere onderzoek naar tensegrity-structuren gedurende de tweede helft van de 20^{ste} eeuw raakten steeds meer eigenschappen van tensegrity-structuren bekend. Deze eigenschappen worden in dit gedeelte kort besproken om uiteindelijk tot een complete definitie van een tensegrity-structuur te komen (Jennes, 2005).

Eigenschappen van tensegrity-structuren

In de eerste definities van tensegrity-structuren kwam slechts één eigenschap aan bod: de samenstelling van de structuur uit een continu netwerk van trekkers en een discontinu netwerk van drukkers. Of eenvoudig uitgedrukt: de structuur bestaat uit een gesloten netwerk van kabels waartussen afzonderlijke staven zweven. Ondanks dat deze eigenschap wellicht de belangrijkste is voor een tensegrity, zijn er meer karakteristieken die de structuur bepalen (Jennes, 2005).

Om de stabiliteit van het geheel te verzekeren is er steeds een voorspanning nodig in de elementen. De trekkers trachten de knooppunten naar elkaar toe te trekken, terwijl de drukkers ervoor zorgen dat de knooppunten even ver van elkaar verwijderd worden. Op deze manier ontstaat er een zelfdragend geheel. Deze constante spanning en het zelfdragende karakter zijn ook twee essentiële kenmerken van tensegrity-structuren (Jennes, 2005).

Verder kunnen nog een aantal bijkomende karakteristieken aangehaald worden: er wordt steeds gebruikt gemaakt van rechtlijnige onderdelen die enkel axiaal belast worden. De verbinding van de verschillende elementen gebeurt op het uiteinde van de drukkers en wordt steeds scharnierend uitgevoerd (Jennes, 2005).

Definitie van een tensegrity-structuur

Op basis van de karakteristieken die hierboven beschreven werden formuleerde de heer Jan Jennes in 2005 volgende algemene, Nederlandstalige definitie van een tensegrity-structuur:

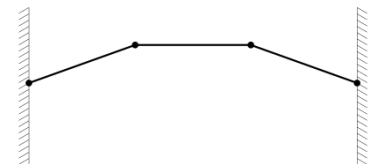
Een tensegrity-structuur is een zelfdragend, voorgespannen systeem dat zijn stabiliteit te danken heeft aan een samenwerking tussen een omsluitend, continu netwerk van rechte elementen axiaal belast op trek en een discontinu netwerk van rechte elementen axiaal belast op druk waarbij de aaneenschakeling op het einde van de elementen gebeurt door scharnierende verbindingen. (Jennes, 2005, p. 9)

Geometrische eisen

Het feit dat een tensegrity bestaat uit een netwerk van kabels met daarin afzonderlijke staven doet vermoeden dat niet elke configuratie van deze twee soorten elementen kan bestempeld worden als een tensegrity-structuur. De vorm van een tensegrity is erg specifiek, de structuren kunnen slechts bestaan in bepaalde posities. De lengtes van de verschillende onderdelen zijn zodanig op elkaar afgestemd dat bij assemblage het geheel een stabiel volume beschrijft. De drukkers duwen de knooppunten uiteen, terwijl de trekkers trachten ze naar elkaar toe te trekken (Jennes, 2005).

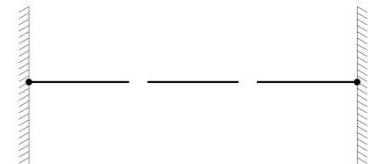
Het veranderen van de lengte van één van de onderdelen zal dan ook grote gevolgen hebben voor de structuur. Enerzijds zal het verlengen van één van de stutten of het verkorten van een trekker de assemblage van het geheel onmogelijk maken. Het verkorten van een stut of het verlengen van één van de trekkers zal anderzijds de spanning in de structuur wegnemen. Wanneer deze kenmerkende voorspanning wegvalt ontstaat er een mechanisme en kan er niet meer gesproken worden van een tensegrity-structuur. Om dit principe van de tensegrity-structuur te verduidelijken kan een tweedimensionale structuur van drie scharnierende staven gebruikt worden (Jennes, 2005).

In Figuur 1 is de lengte van de staven te groot. Het geheel is geen stabiele structuur, er is daarentegen sprake van een mechanisme. Bij tensegrities is dit het geval als de drukkers te kort of de trekkers te lang uitgevoerd worden.



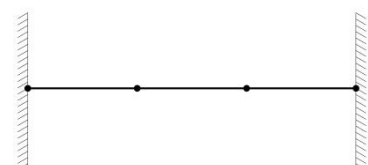
Figuur 1

Als de staven te klein zijn is het niet meer mogelijk om de structuur te assembleren (Figuur 2). Deze situatie komt voor als de drukkers van een tensegrity te lang zijn of de trekkers te kort.



Figuur 2

Enkel wanneer de elementen de juiste lengte hebben kan de structuur geassembleerd worden zonder dat er een mechanisme ontstaat (Figuur 3). Het is net deze positie die bepalend is voor een tensegrity-structuur. In Figuur 1 en Figuur 2 kan dus in feite niet gesproken worden van een tensegrity-structuur. De correcte lengte van de onderdelen van een dergelijke structuur is immers deze waarbij het geheel nog gemonteerd kan worden zonder dat er een mechanisme ontstaat (Figuur 3). Aangezien de onderdelen in dat geval nog net de assemblage toelaten wordt ook wel gezegd dat de structuur zich bevindt op de grens van assemblage (Jennes, 2005).



Figuur 3

Het berekenen van de lengtes van tensegrity-onderdelen is relatief eenvoudig bij enkele basisstructuren, maar wordt erg complex wanneer het gaat over gecombineerde of grotere structuren. Over de berekeningen van de geometrie van tensegrities wordt in deze scriptie niet verder uitgeweid. De geïnteresseerde lezer kan zo bijvoorbeeld terecht bij de scriptie "Tensegrity-structuren" (2005) van Jan Jennes (Nederlandstalig) of het boek "A Practical Guide to Tensegrity Design" (2004) van Robert William Burkhardt (Engelstalig) (Jennes, 2005) (Burkhardt, 2004).

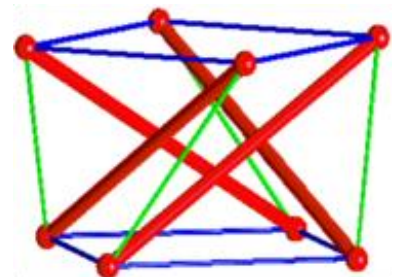
Om de geometrie van de schaalmodellen te bepalen wordt in dit werkstuk gebruikt gemaakt van de elastische eigenschappen van de trekkers. De vorm van de structuren is steeds gebaseerd op reeds gekende basisstructuren. Wanneer bij deze structuren alle correcte verbindingen tot stand gebracht worden met behulp van elastische trekkers zal de spanning zich verdelen over de verschillende elementen. De structuur zal dan automatisch de vorm aannemen die overeenkomt met de grens van assemblage.

Indeling van tensegrity-structuren

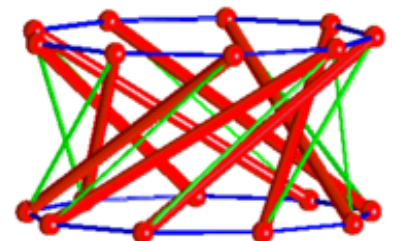
In de relatief korte geschiedenis van tensegrity-structuren werden reeds veel verschillende modellen ontwikkeld. Deze structuren kunnen op verschillende manieren ingedeeld worden: op basis van het aantal gebruikte stutten, naar de basisvorm waarvan de structuren zijn afgeleid of naar de wijze waarop de stutten en trekkers gepositioneerd zijn ten opzichte van elkaar (Jennes, 2005). Omdat deze scriptie voornamelijk handelt over het vormelijke aspect van tensegrity-structuren gebeurt de opdeling in verschillende categorieën hier op basis van de ruimtelijke vorm waarvan de tensegrity is afgeleid.

T-prisma's

De T-prisma's zijn – zoals de term doet vermoeden – tensegrities die gebaseerd zijn op een prisma. Ze bestaan uit twee gelijke evenwijdige polygonen die ten opzichte van elkaar geroteerd worden. De hoek waarover geroteerd moet worden is afhankelijk van het aantal hoekpunten van de polygonen volgens de formule $90^\circ - 180^\circ/n$ (n = aantal hoekpunten van één polygoon) (Gómez-Jáuregui, Otero, Arias, & Manchado, 2012). Na de rotatie worden de hoekpunten van de polygonen onderling verbonden met behulp van n drukkers en n trekkers. De namen van de T-prisma's bestaan steeds uit een T gevolgd door het aantal hoeken van de basispolygoon. In Figuur 4 wordt een T4 afgebeeld: de blauwe lijnen zijn de 2 basisvierkanten, de rode lijnen stellen de drukkers voor en de groene lijnen zijn de zijdelingse trekkers. Figuur 5 toont een T9. De T-prisma's worden minder stabiel naarmate het aantal drukkers groter wordt (Jennes, 2005).

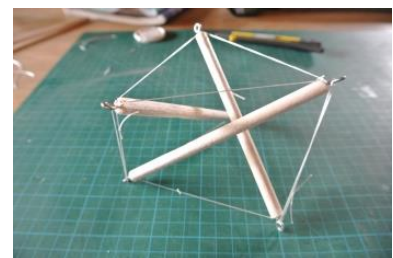


Figuur 4



Figuur 5

De eenvoudigste van deze prisma's is de T3, het prisma opgebouwd met behulp van driehoeken. Deze structuur is waarschijnlijk één van de eerste ontdekte tensegrities en wordt algemeen beschouwd als dé basistensegrity. Er zijn vele namen gebruikt om deze structuur te benoemen, in het vervolg van deze scriptie wordt steeds de naam simplex gebruikt. Figuur 6 toont een eigen model van deze simplex.



Figuur 6

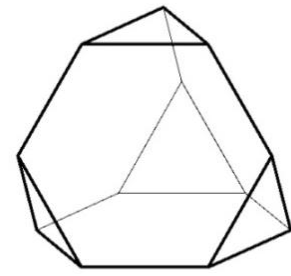
Er zijn vele variaties van de T-prisma's mogelijk. Het is immers niet noodzakelijk dat de basispolygoon even groot zijn. Bovendien moeten deze vlakken niet evenwijdig met elkaar liggen. Er kan dus ook gevarieerd worden met de lengte van de stutten en de zijdelingse trekkers. Figuur 7 laat enkele variaties van de simplex zien, waarbij gevarieerd werd met de lengte van de verschillende elementen.



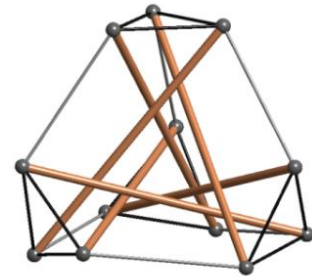
Figuur 7

Sferische tensegrities

De platonische en archimedische polyeders vormen de basis voor de sferische tensegrities. Platonische polyeders (of regelmatige veelvlakken) zijn veelvlakken waarvan de zijvlakken allen identieke veelhoeken zijn. De kubus en de tetraëder zijn hiervan de bekendste voorbeelden. Archimedische polyeders zijn veelvlakken waarvan de zijvlakken bestaan uit twee of meer soorten regelmatige veelhoeken. De meeste archimedische polyeders zijn afgeknotte vormen van de platonische polyeders (Dijkman, z.j.). Zo is een afgeknotte tetraëder bijvoorbeeld opgebouwd uit vier driehoeken en vier zeshoeken (Figuur 8). De naam van de tensegrity-varianten wordt bij de sferische structuren gevormd door de naam van de basispolyeder, voorafgegaan door een T (Jennes, 2005). Zo is Figuur 9 een voorstelling van een T-tetraëder, waarbij de relatie met de vorige figuur duidelijk zichtbaar is.



Figuur 8



Figuur 9

De T-tetraëder is één van de eenvoudigste voorbeelden van een sferische tensegrity. Wanneer andere platonische polyeders als basisvorm gebruikt worden zullen grotere tensegrity-sferen ontstaan. Figuur 10 toont zo bijvoorbeeld een T-dodecaëder. Deze structuren komen in dit werkstuk niet aan bod omwille van hun grotere complexiteit en hun beperkte combinatiemogelijkheden met andere structuren.



Figuur 10

Tensegrity-assemblages

Vanaf het moment dat er meerdere basistensegrities aan elkaar geschakeld worden spreekt men van een tensegrity-assemblage. Alle combinaties van basisstructuren die in het vervolg van deze scriptie worden ontworpen en besproken maken dus deel uit van deze categorie. Ook Kenneth Snelsons Needle Tower – die in het volgende hoofdstuk uitvoerig wordt besproken – is in feite een tensegrity-assemblage, samengesteld uit 24 opeengestapelde simplexen.

Onregelmatige tensegrities

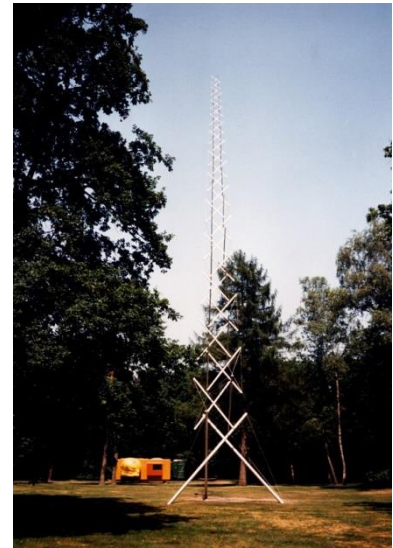
Er bestaan ook structuren die wel beantwoorden aan alle eisen voor tensegrity-structuren, maar waarvan de geometrie nagenoeg geen regelmaat vertoont. Deze structuren worden meestal experimenteel vervaardigd (Jennes, 2005). Kenneth Snelson heeft verschillende onregelmatige sculpturen ontworpen die voldoen aan alle basiseisen van tensegrities, waaronder het werk “Triple Crown” uit 1991 (Figuur 11).



Figuur 11

Case-study: Needle Tower – Kenneth Snelson

Kenneth Snelson is een Amerikaans kunstenaar en fotograaf, die samen met Buckminster Fuller en David Georges Emmerich wordt beschouwd als de grondlegger van het onderzoek naar tensegrity-structuren (Jennes, 2005). Zijn Needle Tower is wellicht de bekendste tensegrity-structuur die ooit werd gemaakt. Er zijn twee versies van de toren: de “Needle Tower” (1968) bevindt zich in het Hirshhorn Museum and Sculpture Garden in Washington D.C. en is achttien meter hoog. De “Needle Tower II” (1969) (Figuur 12) werd door Snelson een jaar later gebouwd en staat in het Kröller-Müller Museum in het Nederlandse Otterlo. De opbouw van beide torens is exact hetzelfde maar de afmetingen van de “Needle Tower II” zijn groter waardoor hij twaalf meter hoger is dan de eerste versie (Snelson, z.j.). Hier volgt een analyse van deze tweede versie van Snelsons bekende tensegrity-structuur.



Figuur 12

In het eerste gedeelte wordt een kort historisch overzicht gegeven. Eerst komt de aanleiding voor de bouw van de toren en de allereerste opbouw aan bod. Vervolgens wordt de renovatie van het object in 1995 en de restauratie ervan in 2004 bondig besproken.

Het tweede gedeelte van deze case-study handelt over de huidige opbouw van de “Needle Tower II”. Het concept van het kunstwerk, de afmetingen en materiaalgegevens komen als eerste aan bod. Vervolgens wordt de structurele opbouw besproken. Tot slot wordt er gedetailleerd ingegaan op de huidige constructiemethode van de toren.

Historisch overzicht

De “Needle Tower II” werd voor het eerst opgericht in juli 1969 in het kader van de tentoonstelling ‘Kenneth Snelson 1969’ in de beeldentuin van het Kröller-Müller Museum. Deze tentoonstelling is daarom het eerste onderdeel van dit historisch overzicht. Door de jaren heen werd de toren verschillende malen beschadigd, waarna men in 1995 over moest gaan tot een grondige renovatie en in 2004 zelfs tot een restauratie. De belangrijkste aanpassingen aan de constructiemethode komen in de volgende paragrafen aan bod.

Tentoonstelling Kenneth Snelson 1969

“Van 19 juli tot 7 september 1969 werd op het tentoonstellingsveld een zestal zeer grote werken van Kenneth Snelson getoond. Het betrof hier zijn eerste solo-expositie in Europa. De tentoonstelling kwam tot stand in samenwerking met de kunstenaar en zijn kunsthandel, de Dwan Gallery te New York” (Van Aller, 2005, p. 41)

De affiche voor de tentoonstelling werd ontworpen door Pieter Brattinga (Figuur 13). De werken voor de tentoonstelling zijn afkomstig van een tentoonstelling die Snelson eerder hield in Texas: “Kenneth Snelson: Five Monumental Sculptures”. Een van de oorspronkelijke werken was de “Needle Tower”. Deze werd echter plotseling verkocht, waarop Snelson beslist om een nieuw (en hoger) exemplaar te maken voor de tentoonstelling in Otterlo (Van Aller, 2005). Figuur 14 en Figuur 15 tonen historische afbeeldingen van enkele tentoongestelde werken.

Er was veel belangstelling voor deze uitzonderlijke tentoonstelling, zowel van de zijde van het publiek als van de critici. De directie van het Kröller-Müller Museum (KMM) uitte dan ook zijn wens om een groot werk van Kenneth Snelson voor het museum te behouden. De aankoop van de “Needle Tower II” werd goedgekeurd door de regenten in de vergadering van december 1969. Daarnaast werd ook beslist dat de toren zou opgesteld worden in Düsseldorf in het kader van de tentoonstelling “Stress Structures, Ausstellung im Rheinpark” in de maanden april en mei van het jaar 1970 (Van Aller, 2005).

Door een zware storm waait de toren op 29 april 1970 om in Düsseldorf. De schade bleek aanzienlijk te zijn: 22 buizen waren gebroken of verbogen, anderen waren meegenomen en alle overige buizen waren erg gekrast. De directie van het KMM vraagt aan de Dwan Gallery om een nieuwe toren op te sturen die door Snelson zelf opgesteld zou worden. De kunstenaar zou in juni 1970 komen en de nieuwe toren zou zo snel mogelijk opgestuurd worden. Het is echter onduidelijk met welk materiaal en wanneer de toren uiteindelijk weer werd opgesteld (Van Aller, 2005).



Figuur 13



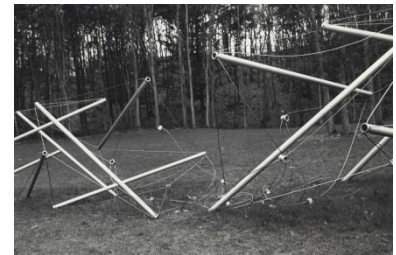
Figuur 14



Figuur 15

Renovatie 1995

Door de jaren heen werd er verschillende malen melding gemaakt van schade aan de toren, en dit omwille van diverse redenen. Wanneer er een hevige storm woedde in Otterlo gebeurde het soms dat er takken van de omringende bomen tegen de constructie geslingerd werden, waardoor de kabels in de toren konden breken. Figuur 16 toont zo bijvoorbeeld de schade veroorzaakt door een storm in de zomer van 1973. Er werd ook melding gemaakt van een blikseminslag op de toren, waardoor zwartgeblakerde koppen vervangen dienden te worden. Om stormschade in de toekomst te voorkomen werd in 1972 – in overleg met Snelson – beslist om de constructie in de wintermaanden plat te leggen (Van Aller, 2005).



Figuur 16

Dit had tot gevolg dat het kon gebeuren dat de toren beschadigd raakte door toedoen van bezoekers van het KMM. Het risico op schade door bezoekers was echter aanzienlijk lager dan het gevaar op stormschade. Sinds 1972 werd de toren daarom steeds gestreken van november tot april. In het begin gebeurde dit met behulp van een kraan die men diende te huren. Rond 1975 is er echter een methode ontwikkeld om de toren te strijken en overeind te zetten. Men maakte hiervoor een hefboom met 2 stalen kabels waarvan één bevestigd werd aan module 4, op ongeveer $1/3^{\text{de}}$ hoogte van de toren, en de andere aan een trekvoertuig. Door vervolgens voorzichtig vooruit te rijden met het trekvoertuig kon de toren in een verticale positie gebracht worden. Figuur 17 toont het rechtekken van de toren met behulp van de hefboom die zichtbaar is aan de rechterzijde van de afbeelding (Van Aller, 2005).



Figuur 17

De schade die de “Needle Tower II” door de jaren heen opliep werd steeds op een zo degelijk mogelijke manier hersteld. Hiervoor werden de staven, kabels of koppen echter regelmatig vervangen door stukken die door een andere fabrikant werden geleverd. Daardoor ontstonden er verschillen in kleur en constructiewijze tussen de verschillende delen van de toren. Figuur 18 toont de verscheidenheid aan koppen die door de jaren heen ontstaan was.



Figuur 18

Er kon bovendien niet alleen schade toegebracht worden door storm of door toedoen van bezoekers maar er ontstond ook schade door slijtage. Wanneer de spanning in de kabels te laag was kon de wind ervoor zorgen dat de toren lichtjes heen en weer wiegde, waardoor de kabels braken op het punt waar ze verbonden werden met de kop. De spanning mocht echter ook niet te hoog zijn omdat het gevaar dan bestond dat de kabel in de staaf ging beginnen zagen. Er was nog nooit een dergelijk hoge tensegrity-structuur gebouwd, waardoor het voor zowel Snelson als het KMM pionieren was (Van Aller, 2005).

Op 1 december 1993 meldde Marjan Brouwer, toenmalig conservator sculptuur van het KMM, dat de toren essentiële vernieuwingen zou moeten ondergaan, vooral in het bovenste 2/3^{de} gedeelte. Volgens haar maakte het soldeer de kabels te stijf, waardoor ze konden breken. In 1994 werd besloten om effectief over te gaan tot een grondige renovatie. Op dat moment bestond de toren nog voor ongeveer de helft uit originele stukken. Na verschillende voorstellen werd er uiteindelijk voor geopteerd om alles vanaf module drie te vervangen en geen gebruik meer te maken van de originele buizen. Deze nieuwe buizen werden echter ook niet geproduceerd door het bedrijf dat de originele stukken had geleverd, waardoor er een licht kleurverschil zichtbaar was tussen de onderste twee modules en de rest van de toren (Van Aller, 2005).

Restauratie 2004

Ook na de renovatie in 1995 werden er nog regelmatig problemen vastgesteld met de "Needle Tower II". Het gebeurde wel eens dat er kabels braken zonder dat daar rechtstreeks aanleiding toe was. Er werd ook putcorrosie vastgesteld op de koppen van de buizen die rechtstreeks in contact met de grond hadden gestaan. Daarnaast kon het risico op stormschade nooit helemaal uitgesloten worden door de toren te strijken in de wintermaanden. Figuur 19 toont de toren na een zware storm op 28 oktober 2002. Om al deze problemen te kunnen aanpakken is besloten om de oorzaak van deze materiële problemen nader te onderzoeken. Hiervoor werd een materiaaltechnisch onderzoek uitgevoerd waarna de mogelijkheden voor de passieve en actieve conservering bestudeerd werden (Van Aller, 2005).



Figuur 19

Uit het materiaaltechnisch onderzoek bleek dat vooral het gesoldeerde knopje op het uiteinde van de kabels voor problemen zorgde. Oorspronkelijk werden de kopjes hardgesoldeerd met behulp van een gasbrander. In de loop der jaren had Snelson in zijn structuren deze methode vervangen door een techniek met behulp van inductieverhitting. De kabeleinden zouden op deze manier minder vervormen waardoor de kabels een grotere trekkracht zouden kunnen doorstaan. Daarnaast was het essentieel dat de spanning van de kabels symmetrisch verdeeld werd. Door verkeerd aanpassen of bevestigen van de kabels was dit echter niet meer het geval (Van Aller, 2005).

Het doel was om het werk op zodanige wijze te herstellen dat de levensduur van de kabels langer zou zijn dan vroeger het geval was. Er werden verschillende mogelijkheden voor passieve en actieve conservering overwogen: van niets doen over een preventieve (minimale) conservering tot een volledige reconstructie. Na afweging van de opties werd besloten om te kiezen voor een grondige restauratie van het geheel.

Op aanraden van Kenneth Snelson werd ervoor gekozen om samen te werken met het Amerikaans bedrijf Pinwheelcorp onder leiding van Philip Stewart. In april 2003 kwam Stewart naar het KMM om de toren te ontmantelen en te inspecteren. Alle buizen, kabels en koppen werden in kaart gebracht om te beoordelen welke elementen vervangen en welke gerepareerd dienden te worden. Het uitgangspunt van het hele project is steeds geweest dat alle kabels vervangen zouden worden door nieuwe kabels met hogere kwaliteitseisen. Tijdens de ontmanteling bleek dat de kabels niet vervangen konden worden zonder daarbij de koppen gedeeltelijk te beschadigen. Hierop werd besloten om ook alle koppen opnieuw te maken. De buizen uit 1995 konden na behandeling wel hergebruikt worden. Belangrijk was de oude buizen en de nieuwe koppen hetzelfde uitzicht zouden hebben. Hiervoor werden verschillende behandelingen van de elementen bestudeerd om uiteindelijk tot een bevredigend resultaat te komen. De buizen uit 1995 werden geborsteld en de nieuwe koppen radiaal gepolijst. Het kleurverschil van beide elementen is bij deze behandelingen verwaarloosbaar (Van Aller, 2005).

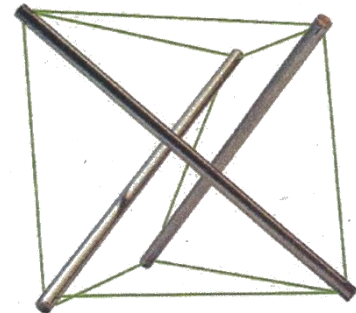
Op 25 juni 2004 werd uiteindelijk overgegaan tot de herinstallatie van de toren onder leiding van Philip Stewart van Pinwheelcorp. De opbouw van de toren komt in het volgende hoofdstuk nog gedetailleerd aan bod.

Opbouw Needle Tower

Algemeen

Concept

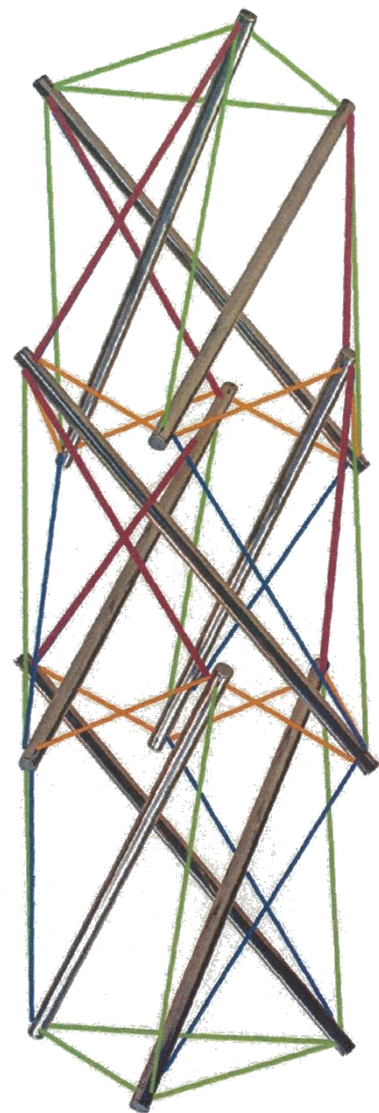
De Needle Tower is een exploratie van Kenneth Snelson naar de uiterste mogelijkheden van het tensegrity-principe om structuur omhoog te drukken. Het idee erachter is dat de structuur van onderaf – steeds kleiner wordend – tot in het oneindige lijkt door te lopen. Het werk is een ruimtelijke constructie van aluminium drukstaven die met elkaar verbonden zijn door roestvrij stalen spankabels. Deze kabels zijn door middel van wartels bevestigd in de koppen, die op hun beurt in de buizen geschoven zijn (Van Aller, 2005).



Figuur 20

Structuur

De volledige toren bestaat uit vierentwintig modules. Iedere module heeft de vorm van een simplex, de eenvoudigste tensegrity-structuur. Deze basisstructuur bestaat uit negen kabels en drie staven. Zes kabels vormen twee gelijkzijdige driehoeken in een horizontaal vlak: één driehoek onderaan en de andere bovenaan. De hoekpunten van deze driehoeken worden met elkaar verbonden door de overige drie kabels (zijdellingse trekkers) en door de drie staven. Afhankelijk van de manier waarop deze schuine kabels en staven met de driehoeken verbonden worden ontstaat er respectievelijk een links- of rechtsdraaiende simplex. Figuur 20 geeft een linksdraaiende simplex weer. Door afwisselend links- en rechtsdraaiende simplexen op elkaar te stapelen wordt de volledige Needle Tower geconstrueerd.



Figuur 21

Figuur 21 toont drie gekoppelde modules van deze Needle Tower. De verticale groene lijnen zijn de oorspronkelijke zijdellingse trekkers van afzonderlijke simplex-modules. De verbinding tussen de verschillende modules gebeurt door het onderste staaf-uiteinde van de bovenliggende module vast te hechten aan de bovenste staaf-uiteinden van de onderliggende module. Deze 6 verbindingstrekkers (oranje) vervangen de basisdriehoeken van de oorspronkelijke simplexen. Daarnaast worden ook nog twee soorten verstevigingstrekkers aangebracht: de rode trekkers verbinden de bovenste stut-uiteinden met elkaar, terwijl de blauwe trekkers de onderste stut-uiteinden aan elkaar koppelen. Op deze manier ontstaat de complete Needle Tower, die zo een stabiele structuur vormt. Deze methode om verschillende simplexen met elkaar te combineren komt later ook aan bod in de praktische handleiding.

Afmetingen

In zijn totaliteit is de toren – afhankelijk van de bron – tussen de 26 en 30 meter hoog. Het geheel is opgebouwd uit 72 geanodiseerde aluminium buizen (24 modules, 3 buizen per module) van verschillende lengtes, diameters en wanddiktes. Aan ieder uiteinde van de buizen bevindt zich een kop om de kabels in te bevestigen, wat het totaal aantal koppen op 144 brengt. Om de spanning in de verschillende onderdelen van de toren goed op te kunnen vangen zijn de roestvrij stalen kabels dikker aan de basis van de toren dan aan de top. In het totaal worden er 357 kabels van 8 verschillende diameters gebruikt. Allen worden ze voorzien van 2 wartels en een hardgesoldeerde kop aan het uiteinde (Figuur 22) om ze te kunnen bevestigen aan de koppen (Van Aller, 2005).



Figuur 22

Huidige constructie

De opbouw van de huidige “Needle Tower II” gebeurde in de zomer van 2004 onder leiding van Philip Stewart van het Amerikaans bedrijf Pinwheelcorp. Na uitgebreide studies werd besloten om enkel de aluminium buizen uit 1995 te hergebruiken. De kabels, wartels en koppen werden nieuw geproduceerd (Van Aller, 2005).

In de eerste fase werden alle onderdelen van de toren uitgepakt, schoongemaakt, gesorteerd en nagekeken op mogelijke defecten. Vervolgens werd voor de bovenste (en dus kleinste) modules een net geweven: de kabels werden met behulp van de wartels in de juiste volgorde aan de koppen bevestigd zodat er een netvormig geheel ontstond (Figuur 23).



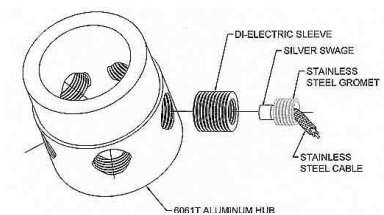
Figuur 23

Hierna werden de buizen op de correcte manier in dit net geplaatst om het bovenste gedeelte van de toren compleet te maken (Figuur 24). De lengte van sommige kabels werd gecorrigeerd om zo een goede stijfheid in de toren te bekomen. De spanning in het bovenste gedeelte van de toren blijft beperkt, waardoor de constructie volledig manueel kon gebeuren.



Figuur 24

Bij de vroegere constructiemethode van de “Needle Tower II” had men problemen met de bevestiging van de wartels in de koppen: tussen de aluminium koppen en de roestvrij stalen wartels ontstond immers galvanische corrosie, wat de levensduur van de toren verminderde. Om dit te vermijden werd besloten om te werken met een dubbele wartel: de buitenste wartel werd op voorhand in de kop bevestigd, de binnenste werd bevestigd aan de roestvrij stalen kabels. Deze opbouw wordt getoond in Figuur 25. Tussen de aluminium kop en de buitenste wartel werd vervolgens epoxy geïnjecteerd. Deze fungeert als di-elektrische factor om zo de galvanische corrosie tegen te gaan. Om de epoxy te kunnen aanbrengen tussen de koppen en de wartels werd door Pinwheelcorp een speciale epoxy-injecteermachine ontwikkeld. Figuur 26 toont het injecteren van epoxy in de koppen (Van Aller, 2005).



Figuur 25



Figuur 26

Wanneer de epoxy in de koppen gedroogd was kon men beginnen met het monteren van de volledige toren. Om dit op een efficiënte manier te kunnen doen zijn alle kabels en koppen op de standplaats van de toren in de beeldentuin in elkaar geweven tot een groot netwerk (cfr. het bovenste gedeelte van de toren). De bovenste modules (die al klaar waren) werden aan het netwerk bevestigd en de toren werd verder naar beneden uitgebreid met de overige buizen. De kabelsetjes hadden niet allemaal de perfecte maatvoering. Om de spankracht overal gelijk te verdelen werden verschillende kabeltjes nog versteld met behulp van een mobiele inductiegenerator. Doordat de spanning in de onderste delen van de toren erg groot is moest een lier gebruikt worden om de buizen in de juiste positie te krijgen (Figuur 27) (Van Aller, 2005).



Figuur 27

Om de constructie te verankeren in de grond werden drie nieuwe funderingsankers ontworpen (Figuur 28). Het strijken van de toren in de winterperiode werd eenvoudig mogelijk gemaakt door bij 2 van de 3 funderingsankers een scharnierende verbinding voorzien tussen het anker en de kop van de onderste buis. De kop van de derde buis steunt op het anker maar is er niet vast aan bevestigd. De funderingsankers worden op hun beurt met behulp van keilbouten bevestigd aan de betonnen funderingsplaten die zich 80 cm onder het maaiveld bevinden. Wanneer de funderingsankers vastgezet waren werd de toren als geheel aan de twee kantelankers vastgeschroefd. De toren werd precies boven de twee ankers geschoven met behulp van een aantal plastic sleschijven die het mogelijk maakten de hele toren te verschuiven. De toren was nu gereed om overeind te zetten (Van Aller, 2005).



Figuur 28

Voor het strijken en overeind zetten van de toren was reeds in 1975 een methode ontwikkeld (zie Renovatie 1995). Deze beproefde methode werd ook nu opnieuw gebruikt, met dit verschil dat er naast de hijskabel – bevestigd aan een trekvoertuig – ook een touw aan de andere zijde van de toren bevestigd werd om de constructie op het kantelmoment in balans te houden. Op 16 juli 2004 werd de toren permanent overeind gezet. Toen twee maanden later bleek dat de nieuwe constructiemethode succesvol was, werd besloten om de funderingsankers vol te storten met beton en toe te dekken met aarde (Van Aller, 2005). Figuur 29 toont het anker voor het volstorten met beton, Figuur 30 toont het uiteindelijke resultaat.



Figuur 29



Figuur 30

Sindsdien wordt de toren elke winter gestreken van november tot april. Er hebben zich de laatste jaren geen fundamentele problemen met de structuur meer voorgedaan. De nieuwe constructiemethode en grondige restauratie heeft dus zeker zijn vruchten afgeworpen.

Constructie van schaalmodellen

Algemene constructiemethode

Om een tensegrity op een kleine of middelgrote schaal te maken zijn er verschillende constructiemethodes en –materialen mogelijk. Eerst worden de eisen voor de verschillende te gebruiken materialen opgesomd. Vervolgens worden enkele mogelijke constructiemethodes toegelicht. Dit gebeurt steeds vanuit een praktijkgerichte instelling.

Materialen

Tensegrity-structuren zijn opgebouwd uit slechts twee verschillende elementen: stutten en trekkers. De stutten vangen drukspanning op (drukkrachten), terwijl de trekkers steeds onder trekspanning staan (trekkrachten). Omwille van hun functie is voor beide elementen een verschillende materiaalkeuze vereist die hieronder toegelicht wordt.

Stutten

De stutten zijn de gedrukte elementen van een tensegrity-structuur. De gebruikte elementen moeten kunnen weerstaan aan de drukkrachten en mogen ook niet te buigzaam zijn. Omdat het een schaalmodel betreft zullen de stutten immers nooit zuiver op druk belast worden maar zal er ook een (meestal klein) buigend moment ontstaan. Staven van metaal, hout, kunststof of zelfs glas zijn allen geschikt om als stutten dienst te doen. Staven van hout of kunststof zijn echter de eenvoudigste oplossing omwille van de eenvoudige bewerkbaarheid. De diameter van de gebruikte staven kan variëren van zes tot meer dan twintig millimeter. Omwille van praktische en esthetische redenen worden in de kleinste modellen steeds houten staven gebruikt. Bij de middelgrote modellen werd geopteerd voor holle buizen uit PVC. De verschillende constructiemethodes komen in het volgend onderdeel van deze scriptie aan bod.

Trekkers

De trekkers zijn de elementen van een tensegrity-structuur die voortdurend onder een trekspanning staan. Ze vormen een gesloten netwerk rond de stutten. De elasticiteit van het gebruikte materiaal is van essentieel belang voor de trekkers. De spanning mag in de loop van de tijd niet afnemen aangezien dit er voor zou zorgen dat de structuur begint te vervormen.

Eenvoudige elastieken kunnen dienst doen als trekkers maar verliezen na verloop van tijd hun spankracht door verwerking. Bij de kleinste schaalmodellen werd er daarom ook gebruik gemaakt van zogenaamd 'magic cord'(Figuur 31). Dit materiaal wordt vaak gebruikt om armbanden en kettingen van te knopen en vind je in de meeste knutselwinkels. Het is sterk elastisch en behoudt zijn spankracht langer dan een eenvoudige elastiek. Er zijn diverse doorsnedes mogelijk in functie van de gekozen schaal van het model. In de voorbeelden wordt steeds gebruik gemaakt van 'magic cord' met een diameter van 0,6 millimeter.



Figuur 31

Bij grotere modellen speelt de stijfheid van de structuur ook een belangrijke rol. De structuren mogen immers niet te veel bewegen onder invloed van externe factoren zoals aanraking door bezoekers. Het 'magic cord' dat in de kleinste modellen gebruikt wordt is bij een grotere schaal niet geschikt omdat het te elastisch is. Eenvoudig metselkoord (Figuur 32) bleek bij middelgrote modellen wel praktisch: het kan relatief grote spanningen dragen en is in beperkte mate elastisch. Door deze beperkte eigenschap blijft het vrij eenvoudig om de juiste configuratie van de structuren te vinden maar wordt er toch een relatief stijve structuur gevormd. De structuur blijft echter zeer licht, waardoor ze nog steeds zeer kwetsbaar is voor (accidentele) aanrakingen. Bij een grote constructie wordt er om deze reden beter met zwaardere materialen en hogere spanningen gewerkt. De verschillende constructiemethodes worden in het vervolg van deze scriptie nog verder besproken.



Figuur 32

Verskillende constructiewijzen

De essentie bij het construeren van tensegrity-structuren is het verbinden van de trekkers aan het uiteinde van de drukkers. Hiervoor zijn verschillende methoden mogelijk die ieder hun voor- en nadelen hebben. Enkele van de vele mogelijke constructiewijzen worden hieronder besproken.

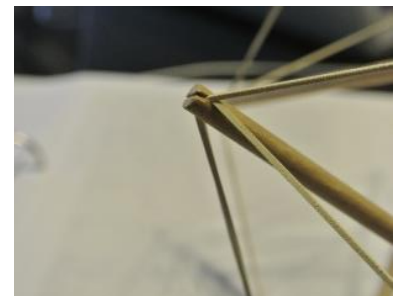
Insnijding aan het uiteinde van de stutten

De eenvoudigste methode om de trekkers aan de stutten te bevestigen is met behulp van een insnijding aan ieder uiteinde van de stutten. Klem de houten stutten vast tussen een bankschroef en maak voorzichtig een insnijding in het midden van ieder uiteinde met een dunne figuurzaag (Figuur 33). De trekkers kunnen nu eenvoudig bevestigd worden door ze tot onderaan in de opening te schuiven (Figuur 34).

Het voordeel van deze constructiewijze is ongetwijfeld de eenvoudige bevestigingswijze en de zuivere afwerking van de knooppunten. Deze methode is dan ook zeer geschikt voor het maken van eenvoudige basistensegrities. Wanneer verschillende basisstructuren aan elkaar gekoppeld moeten worden is deze productiewijze echter veel minder geschikt. De verbindingen tussen de trekkers en drukkers zijn immers niet zo stevig waardoor ze snel los komen wanneer verschillende structuren geschakeld moeten worden. Bovendien is deze methode enkel geschikt indien de trekkers van de tensegrity geconstrueerd worden met elastische lussen, zoals bij de T-icosaëder. De trekkers kunnen immers niet afzonderlijk aan het uiteinde van de stutten bevestigd worden. Om complexere tensegrities te gaan construeren is deze methode dus niet geschikt.



Figuur 33



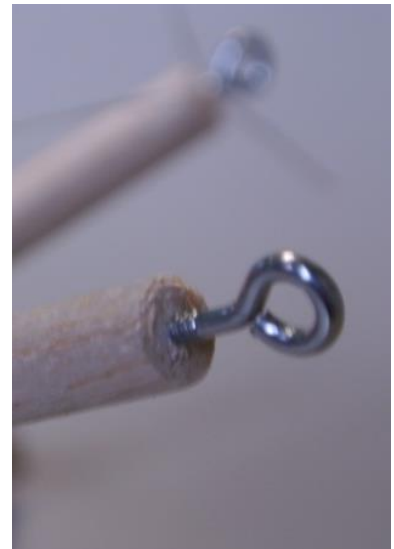
Figuur 34

Schroefoog aan het uiteinde van de stutten

Om de trekkers te bevestigen aan het uiteinde van de stutten kan ook gebruik gemaakt worden van zogenaamde schroefogen. Wanneer voor de stutten een zachte houtsoort gebruikt wordt kunnen de schroefogen eenvoudig manueel ingedraaid worden (Figuur 35). Bij gebruik van een hardere houtsoort is het noodzakelijk om een gaatje voor te boren in het uiteinde van de stut om het bevestigen mogelijk te maken.

Deze methode geeft een minder 'zuiver' resultaat dan de vorige methode. In tegenstelling tot de vorige constructiewijze is hier naast trekkers en stutten immers ook gebruik gemaakt van een apart materiaal voor de knooppunten. Dit geeft esthetisch misschien een iets minder goed resultaat, maar heeft ook belangrijke voordelen. De bevestiging van de trekkers aan de schroefogen is zeer stevig en werkt in alle richtingen (Figuur 36). Hierdoor kan je de gemaakte structuren in alle richtingen vervormen zonder dat de knooppunten los komen. Ook maakt deze constructiewijze het mogelijk om vele trekkers te bevestigen aan één knooppunt. Dat maakt deze productiemethode uitermate geschikt om verschillende basis-tensegrities aan elkaar te koppelen om zo complexe tensegrity-structuren te bekomen.

Een ander belangrijk voordeel van dit systeem is de eenvoudige verstelbaarheid. Om perfect symmetrische structuren te bekomen moet de spanning in alle trekkers immers exact gelijk zijn. Het maken van lussen die exact even lang zijn is echter een quasi onmogelijke opdracht. Deze wijze van construeren maakt het mogelijk om na de assemblage de spanning in de verschillende trekkers bij te stellen. Door de trekkers meerdere malen om het schroefoogje heen te draaien wordt de lengte van de trekker verkleind en kan de spanning op de juiste plaatsen verhoogd worden (Figuur 37). Dit vergt heel wat geduld, maar geeft uiteindelijk een mooi evenwichtig resultaat. Ook wanneer verschillende structuren met elkaar verbonden worden kan deze techniek gebuikt worden om een symmetrisch resultaat te bekomen. Bij complexe structuren wordt het echter steeds moeilijker om de spanning op de juiste manier te corrigeren, omdat de modellen erg fragiel zijn. In dergelijke gevallen wordt er beter geopteerd voor een grotere constructiemethode.



Figuur 35



Figuur 36



Figuur 37

Verbinding met behulp van insnijding en parels

Bij de vorige constructiemethodes werd steeds gewerkt met lussen van trekkers die verschillende stut-uiteinden met elkaar verbonden. Wanneer een model op grotere schaal geconstrueerd wordt is het niet mogelijk om met lussen te werken en zullen alle trekkers apart aan de uiteindes van de stutten bevestigd worden. Er dient dus een methode gezocht te worden om deze verbinding op een eenvoudige maar degelijke manier tot stand te brengen.

Omdat er verschillende trekkers verbonden moeten worden aan ieder stut-uiteinde wordt er gewerkt met holle buisjes uit kunststof. Aan het uiteinde van deze buisjes worden insnijdingen gemaakt om de trekkers in te bevestigen (Figuur 38). Het aantal insnijdingen en hun positie is afhankelijk van het ontwerp van de tensegrity-structuur.



Figuur 38

Bij middelgrote structuren is metselkoord (Figuur 39) zeer geschikt als trekker. Enerzijds is het in beperkte mate elastisch, wat handig is bij het bepalen van de juiste lengte van de trekkers. De koorden zullen wat meegeven waardoor de structuur in de juiste positie gedwongen wordt. Anderzijds zorgt de beperking van de elasticiteit er ook voor dat er uiteindelijk een vrij stijf geheel wordt verkregen, hetgeen niet mogelijk is met het eerder gebruikte 'magic cord'.



Figuur 39

Om de trekkers vast te maken aan de stut-uiteinden moet er een parel vastgeknoopt worden aan beide uiteinden van het koord (Figuur 40). Het gebruik van een platte knoop is hiervoor de eenvoudigste methode. Het koord kan nu eenvoudig aan het uiteinde van de stut bevestigd worden door de parel in het buisje te duwen en tegelijkertijd het koord in de eerder gemaakte insnijding te schuiven.



Figuur 40

Het is belangrijk dat de gebruikte parels de juiste grootte hebben. Als ze te klein zijn zullen ze onvoldoende stevigheid bieden wanneer de structuur onder grote spanning komt te staan. Te grote parels zullen dan weer zorgen voor een tekort aan plaats in het buisje aangezien er verschillende trekkers bevestigd dienen te worden aan één uiteinde (Figuur 41). In dit geval werden strijkparels gebruikt, welke zeer geschikt zijn.



Figuur 41

Constructie van basistensegrities

In dit hoofdstuk wordt de constructie van verschillende basistensegrities uitgelegd: de Simplex, de T-icosaëder en de T-tetraëder komen achtereenvolgens aan bod. De constructiemethode wordt stap voor stap uitgelegd zodat de lezer zelf aan de slag kan gaan met de verschillende modellen.

Uiteraard bestaan er nog vele andere tensegrities, zoals reeds in het begin van deze scriptie werd aangehaald. De drie structuren die hier uitgelegd worden zijn de eenvoudigste structuren die gebruik maken van een driehoek als basisvorm. Het grote voordeel hiervan is dat zij op een relatief eenvoudige manier met elkaar te combineren zijn. De T-prisma's die een andere vorm (vierkant, vijfhoek, zeshoek) gebruiken als basisvorm zijn ook vrij eenvoudig te construeren. Omwille van hun beperkte combinatiemogelijkheden komen zij hier echter niet aan bod. Ook de overige (vaak complexe) sferische tensegrities maken geen onderdeel uit van deze scriptie.

De simplex

De simplex is de eenvoudigste tensegrity die er bestaat (Burkhardt, 2004). Het is de T-prisma met een driehoek als basisvorm. Hij is opgebouwd uit drie stutten die onderling verbonden worden door negen trekkers. Er zijn twee variaties mogelijk: een linksdraaiende en een rechtsdraaiende simplex. Doordat de trekkers van een simplex bovenaan en onderaan twee evenwijdige driehoekig vlakken vormen is deze tensegrity eenvoudig aan elkaar te schakelen tot een toren.

Elementen (Figuur 42)

- 3 houten stutten van 14 cm lang
- 6 schroefogen
- 110 cm 'magic cord'
- 3 eenvoudige elastieken



Figuur 42

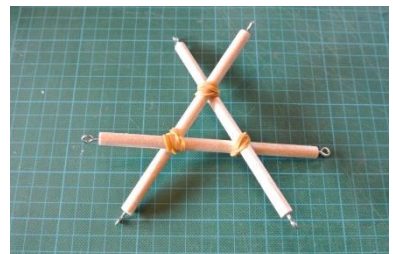
Assemblage

Stap 1: bevestig de schroefogen op ieder uiteinde van de houten stutten (Figuur 43).

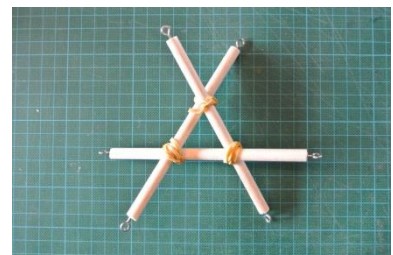


Figuur 43

Stap 2: verbind de stutten met behulp van de elastieken aan elkaar. Er zijn twee variaties mogelijk. Een linksdraaiende simplex wordt verkregen door de verbinding in Figuur 44. Figuur 45 demonstreert de verbinding voor een rechtsdraaiende simplex (Gurstelle, 2006).



Figuur 44



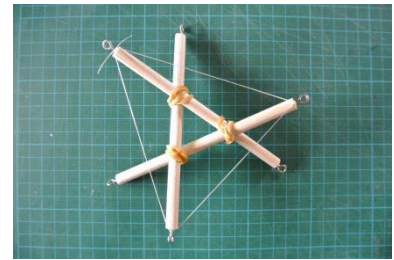
Figuur 45

Stap 3: knip het 'magic cord' in 3 delen van 20 cm en 2 stukken van 25 cm. Knoop de verschillende delen vervolgens in een lus met behulp van een platte knoop en trek het geheel stevig aan (Figuur 46).

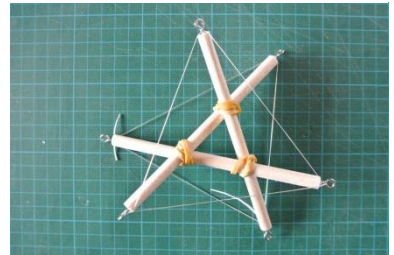


Figuur 46

Stap 4: gebruik één van de lussen van 25 cm om 3 stutten met elkaar te verbinden zoals in Figuur 47. Draai vervolgens het model om en gebruik de 2^{de} lus van 25 cm om de overige 3 stutten met elkaar te verbinden (Figuur 48). Het is zeer belangrijk dat de spanning in de 3 zijden van de lussen gelijk is. Dit kan je eenvoudig controleren door aan de trekkers te laten trillen en te luisteren welke toon ze voortbrengen. Hoe hoger spanning in de trekker, hoe hoger de toon die hij zal voortbrengen. Door de tonen van de 3 zijden met elkaar te vergelijken en kleine correcties te doen kan ervoor gezorgd worden dat de spanning evenredig verdeeld wordt. Het is belangrijk dat hier voldoende aandacht aan wordt besteed, eens de simplex volledig geassembleerd is wordt het immers veel moeilijker om een scheve situatie recht te trekken (Gurstelle, 2006).

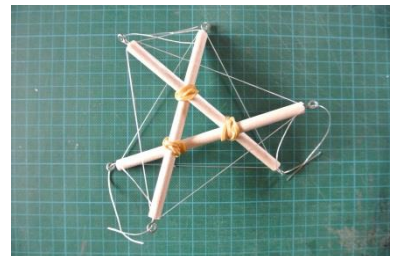


Figuur 47



Figuur 48

Stap 5: verbind de uiteinden van de stutten die het dichtst bij elkaar liggen met behulp van de 3 lussen van 20 cm zoals getoond in Figuur 49. Deze lussen zullen op dit moment nog niet onder spanning staan. Wanneer de elastieken losgemaakt worden zal de structuur zich echter rechtekken en zullen de lussen automatisch aangespannen worden.



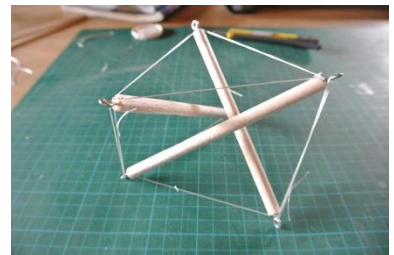
Figuur 49

Stap 6: knip of snijd de elastieken die de stutten tegen elkaar gedrukt houden door (Figuur 50). Het model zal zich nu oprichten en de lussen worden opgespannen tot ze zich in de evenwichtssituatie bevinden.



Figuur 50

Stap 7: de simplex is nu klaar en moet enkel nog gecorrigeerd worden om een evenwichtig model te bekomen (Figuur 51). Door op de juiste plaatsen de lussen enkele malen extra om de schroefogen heen te draaien kan de spanning per trekker bijgesteld worden. Zo kan uiteindelijk een simplex verkregen worden waarbij het onder- en bovenvlak bestaan uit 2 evenwijdige gelijkzijdige driehoeken, die weliswaar gedraaid zijn ten opzichte van elkaar. Figuur 52 geeft het uiteindelijke resultaat weer: een rechtsdraaiende (rechts) en linksdraaiende simplex (links).



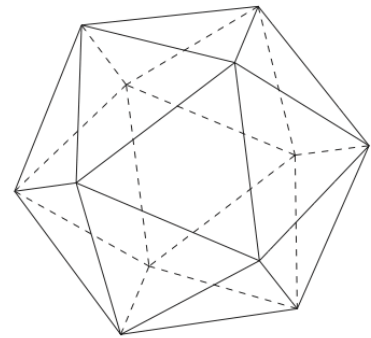
Figuur 51



Figuur 52

De T-icosaëder

De T-icosaëder is de tensegrity die gebaseerd is op een icosaëder, een regelmatig 20-vlak. Deze figuur bestaat uit 20 gelijkzijdige en congruente driehoeken (Figuur 53) (Van Ravenstein, 2011). Als tensegrity-variant kan de figuur verwezenlijkt worden met behulp van 6 stutten en 24 trekkers. Ondanks het complexere uitzicht van deze structuur is de constructie ervan vrij eenvoudig.



Figuur 53

Elementen (Figuur 54)

- 3 houten stutten van 20 cm lang
- een beetje tape, of iets anders dat kan dienen om de stutten te markeren
- een 10-tal eenvoudige elastieken



Figuur 54

Assemblage

Stap 1: maak in ieder van de 6 stutten een insnijding aan beide uiteinden, zoals reeds eerder uitgelegd bij de algemene constructiemethode (Figuur 55).



Figuur 55

Stap 2: het uiteindelijke model bestaat uit 3 paren van 2 evenwijdige stutten. Om verwarring te voorkomen is het belangrijk om deze evenwijdige stutten goed per paar te markeren. Hiervoor werden in dit geval enkele stukken tape op de uiteindes van de stutten aangebracht (Figuur 56).



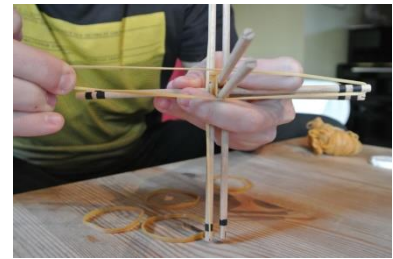
Figuur 56

Stap 3: maak de stutten vast in een stervorm met behulp van enkele eenvoudige elastieken, zoals te zien is op Figuur 57 ("Simple Tensegrity Set", 2012). Zorg dat de elastieken goed aangespannen zijn, zodat het geheel stevig is.

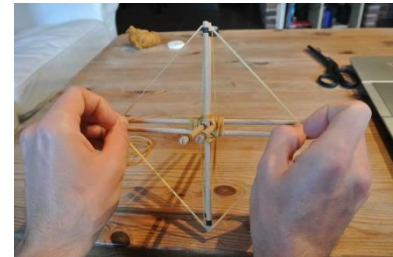


Figuur 57

Stap 4: bevestig een elastiek aan beide uiteindes van één van de stutten (Figuur 58). Neem vervolgens deze elastiek vast aan beide zijden ter hoogte van het knooppunt van de verschillende stutten. Trek de elastiek naar buiten toe en controleer of de spanning aan de twee zijden hetzelfde is. Dit is het geval wanneer de elastiek een symmetrische figuur vormt (Figuur 59).

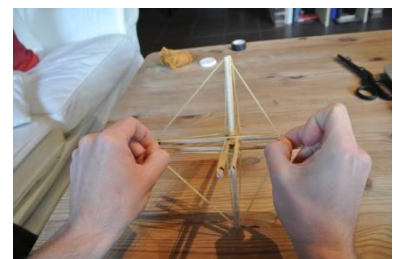


Figuur 58



Figuur 59

Stap 5: herhaal de vorige stap voor alle overige stutten. Wanneer de spanning ongelijk over de beide zijden verdeeld is moet deze gecorrigeerd worden (Figuur 60). Het is belangrijk om hier in deze fase de nodige aandacht aan te besteden, aangezien deze spanningscorrectie zeer moeilijk is wanneer de structuur volledig gemonteerd is. Als al de elastieken aan beide zijden gelijk gespannen zijn is het model klaar voor de volgende stap.



Figuur 60

Stap 6: in deze stap worden de verschillende stutten aan elkaar verbonden met behulp van de trekkers. Neem één van de elastieken vast ter hoogte van het knooppunt en bevestig deze aan het uiteinde van één van de andere stutten ("Simple Tensegrity Set", 2012). Figuur 61 illustreert deze werkwijze. Om uiteindelijk een symmetrisch model te bekomen is het hier ook belangrijk om de spanning gelijk te verdelen over de verschillende delen. De stutten moeten onderling steeds orthogonaal blijven.



Figuur 61

Stap 7: herhaal de vorige stap voor alle andere elastieken. Figuur 62 geeft het model weer dat dan uiteindelijk wordt bekomen.

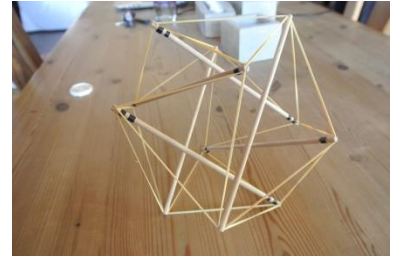


Figuur 62

Stap 8: als alle verbindingen op de correcte manier tot stand zijn gebracht is het tijd om de steunelastieken te verwijderen. Wanneer je deze doorknipt (Figuur 63) zal het model zichzelf automatisch in evenwicht trekken en ontstaat de T-icosaëder. Als je in iedere fase de spanning gelijk hebt verdeeld over de verschillende delen van de elastieken wordt een mooi symmetrisch model bekomen met 3 paar evenwijdige stutten (Figuur 64).



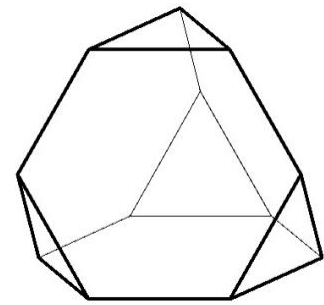
Figuur 63



Figuur 64

De T-tetraëder

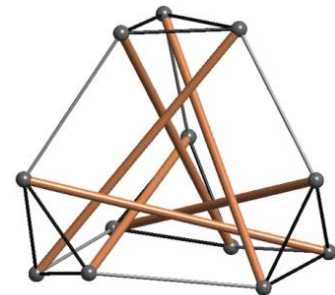
De T-tetraëder is de tensegrity die gebaseerd is op een afgeknotte tetraëder (Figuur 65). Deze figuur bestaat uit vier gelijkzijdige en congruente driehoeken en vier regelmatige zeshoeken (Van Ravenstein, 2011). Als tensegrity-variant kan de figuur verwezenlijkt worden met behulp van 6 stutten en 18 trekkers. Bij de constructie van de Simplex en de T-icosaëder was de methode vrij eenvoudig door de stutten aan elkaar te verbinden bij de assemblage. Een dergelijke eenvoudige constructiemethode ontbreekt echter bij de assemblage van de T-tetraëder. De assemblage van deze basistensegrity vergt daardoor wat meer geduld en inzicht.



Figuur 65

Elementen

- 6 kunststof stutten van 60 cm lang
- een rol eenvoudig metselkoord
- een doosje strijkparels, bij voorkeur in verschillende kleuren



Figuur 66

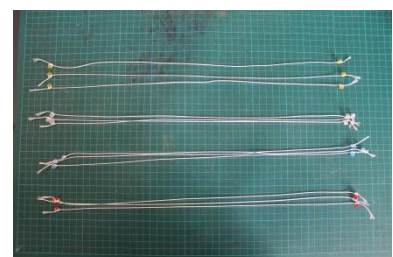
Assemblage

Stap 1: voor de T-tetraëder zijn 4 identieke gelijkzijdige driehoeken van trekkers nodig, zoals te zien is in Figuur 66. Knip daarom 12 stukken metselkoord af en teken exact dezelfde lengte af op alle stukken (Figuur 67). Afhankelijk van de gewenste verhoudingen van de T-tetraëder moet de lengte van de trekkers $1/4^{\text{de}}$ tot $2/3^{\text{de}}$ van de lengte van de stutten bedragen.



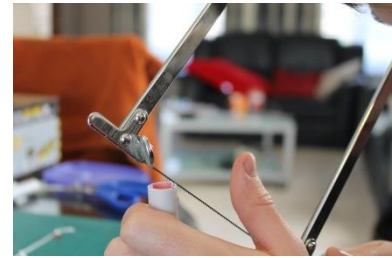
Figuur 67

Stap 2: knoop de strijkparels vast aan de stukken metselkoord. Het is handig om per driehoek strijkparels van een andere kleur te gebruiken. Dit zal het makkelijker maken om het overzicht te bewaren tijdens de assemblage. Figuur 68 toont het resultaat na deze stap.

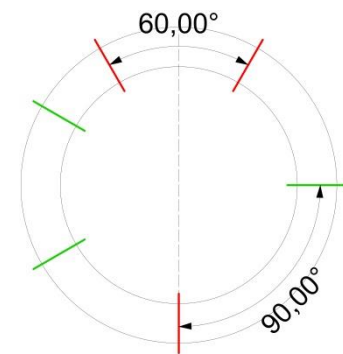


Figuur 68

Stap 3: aan ieder uiteinde van de stutten zullen 3 trekkers verbonden worden. Maak daarvoor 3 insnijdingen aan ieder stuteinde met behulp van een figuurzaag (Figuur 69). Het is belangrijk dat deze insnijdingen op de juiste positie worden aangebracht. Figuur 70 toont de wijze waarop dit moet gebeuren. De rode lijnen tonen de positie van de insnijdingen aan het ene uiteinde van de stut, de groene lijnen geven de positie van de insnijdingen weer aan het andere uiteinde van dezelfde stut. De zes stutten moeten allen op deze manier ingesneden worden.



Figuur 69



Figuur 70

Stap 4: in stap 2 werden reeds 12 van de 18 trekkers gemaakt, met een vastgelegde lengte. De 6 overige trekkers zullen gebruikt worden om de structuur op te spannen. We zijn echter niet in staat om op voorhand de exacte lengte van deze trekkers te bepalen. Knip daarom 6 stukken koord af met een voldoende grote lengte, beter te lang dan te kort. Knoop aan één zijde van de trekkers al een parel vast, de andere zijde blijft voorlopig los.

Stap 5: werkelijke assemblage van de T-tetraëder. Neem een voorbeeldfiguur bij de hand en breng de verschillende verbindingen tot stand (Figuur 71). Begin met de vier gelijkzijdige driehoeken. Door aan de stut-uiteinden dezelfde kleuren toe te kennen als de trekkers waarmee ze verbonden dienen te worden (stap 2) kan het overzicht bewaard worden. De tensegrity zal zich pas opspannen bij de laatste verbinding, wat het zeer moeilijk maakt om de structuur in evenwicht te houden tijdens de assemblage. In deze fase roep je best de hulp in van een tweede persoon: de ene moet de structuur in evenwicht houden terwijl de andere de trekkers verbindt met de stutten. Bevestig de overige 6 stutten wanneer de gelijkzijdige driehoeken correct bevestigd zijn. Zij zullen het geheel opspannen. Aan één zijde kunnen deze trekkers op de gekende wijze met behulp van de parel bevestigd worden. Schuif ze aan de andere zijde in de insnijding en wikkel ze enkele keren om het stuteinde heen om zo een voorlopige verbinding tot stand te brengen. Als alle verbindingen op de juiste manier zijn aangebracht zal de structuur zichzelf in evenwicht kunnen houden (Figuur 72). Nu moeten de trekkers enkel nog aangespannen worden.



Figuur 71



Figuur 72

Stap 6: om een symmetrische T-tetraëder te krijgen moeten de laatste 6 trekkers allen exact even lang zijn. Maak deze trekkers om beurt een stukje korter tot het moment dat de voorlopige verbindingen niet sterk genoeg meer zijn om de steeds groter wordende spanning te dragen. Meet vervolgens de lengte van de 6 trekkers, in het beste geval zijn deze allen even groot. Leg de lengte van deze trekkers nu vast op iets minder dan het gemiddelde van de voorlopige lengtes. De vaste verbindingen zullen immers een grotere spanning aankunnen dan de voorlopige verbindingen. Maak vervolgens de parels vast op de juiste afstand en bevestig ze aan de stut-uiteinden (Figuur 73). Hoe hoger de spanning in de structuur is, des te stijver het geheel zal zijn. Deze stap vergt heel wat geduld maar is essentieel om een stevige en symmetrische T-tetraëder te bekomen. Het uiteindelijke resultaat is te zien op Figuur 74.



Figuur 73



Figuur 74

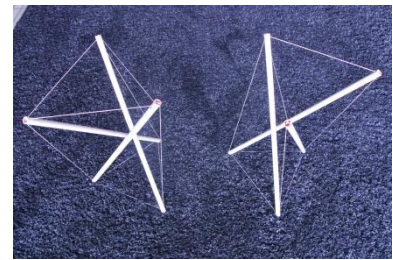
Aaneenschakelen van basistensegrities

De basistensegrities die in het vorige hoofdstuk geconstrueerd werden zijn allen vrij eenvoudig te verwezenlijken. Door met de lengte van de elementen (trekkers en/of drukkers) te variëren zullen de verhoudingen veranderen. Op deze manier kunnen er zeer veel verschillende vormen van tensegrities verkregen worden. De complexiteit van de structuur zal echter steeds beperkt blijven aangezien het aantal trekkers en drukkers niet wijzigt.

Als we complexere structuren willen ontwerpen moet er een manier gezocht worden om verschillende basisstructuren met elkaar te verbinden. De basistensegrities die in deze scriptie beschreven werden bevatten allen meerdere gelijkzijdige driehoeken van trekkers. Dit gemeenschappelijk kenmerk maakt het relatief eenvoudig om de structuren aan elkaar te koppelen. De methode om deze koppeling tot stand te brengen wordt in het volgende hoofdstuk uitgelegd. Daarna komen ook enkele voorbeelden van gecombineerde structuren aan bod. De basisstructuren die gebruikt worden zijn de simplex, de T-icosaëder en de T-tetraëder. Ter vereenvoudiging wordt de "T" in de laatste 2 termen in het vervolg van deze scriptie weggelaten. Er wordt echter steeds de tensegrity-vorm bedoeld wanneer er wordt gesproken over een tetraëder of een icosaëder.

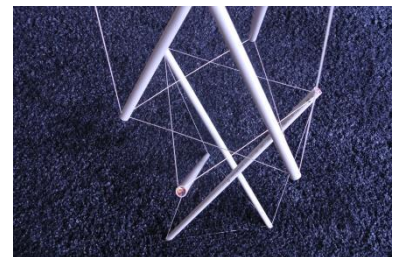
Verbinding met behulp van gelijkzijdige driehoeken

Het construeren van complexere tensegrity-structuren is het makkelijkst wanneer de schaal van de modellen niet te klein is. De kleinste modellen zijn immers erg fragiel, waardoor het nagenoeg onmogelijk is om alle spanningen gelijk te verdelen bij complexere structuren. Daarom wordt er hier uitgegaan van middelgrote structuren. De verbinding tussen het stut-uiteinde en de trekker gebeurt met behulp van een insnijding en parels. In het voorbeeld hieronder wordt gewerkt met twee simplexen, één links- en één rechtsdraaiende (Figuur 75). De methode is echter op identieke wijze toe te passen bij de andere basistensegrities.



Figuur 75

Stap 1: plaats de gelijkzijdige driehoeken van de structuur op elkaar met een onderlinge hoekverdraaiing van 60° . Op deze manier ontstaat een stervorm zoals aangegeven in (Figuur 76)



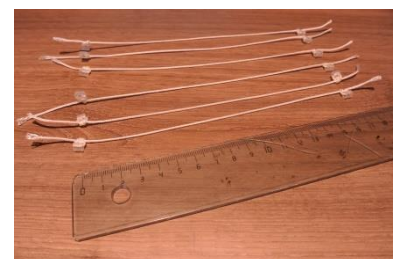
Figuur 76

Stap 2: de stut-uiteinden van de twee simplexen zullen met elkaar verbonden worden. Zo zal een contactvlak ontstaan dat een regelmatige zeshoek vormt. Meet langs alle zijden de onderlinge afstand tussen de stut-uiteinden (Figuur 77). Als de twee structuren op de juiste manier op elkaar gestapeld zijn zal deze afstand overal gelijk zijn.



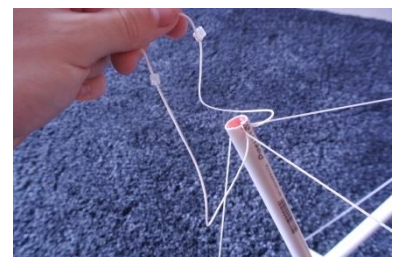
Figuur 77

Stap 3: maak 6 trekkers met als lengte de afstand tussen de te verbinden stut-uiteinden die gemeten werd in stap 2 (Figuur 78).



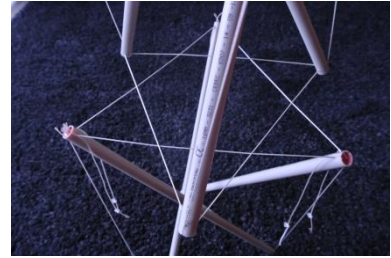
Figuur 78

Stap 4: bevestig de nieuwe trekkers aan de uiteindes van één van de te verbinden structuren (Figuur 79). Maak de oorspronkelijke verbinding los en schuif de nieuwe trekker als onderste in de insnijding. Maak vervolgens de oude verbinding terug vast, zodat het geheel stabiel blijft. De oorspronkelijke verbinding bevindt zich nu als bovenste in de insnijding, waardoor hij straks makkelijk te verwijderen is.

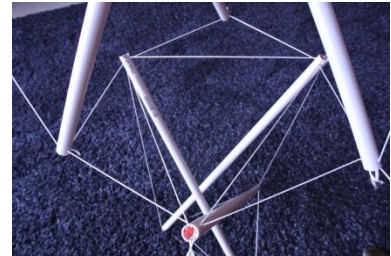


Figuur 79

Stap 5: plaats de te verbinden structuren op elkaar zoals aangegeven in stap 1 (Figuur 80). De nieuwe verbindingen zullen eerst de basisdriehoek van de bovenste structuur vervangen. Maak deze verbindingen los en vervang ze door de nieuwe trekkers. Figuur 81 toont de tensegrity wanneer alle 6 de verbindingen vervangen zijn. De basisdriehoek van de onderste structuur is wel nog steeds verbonden.

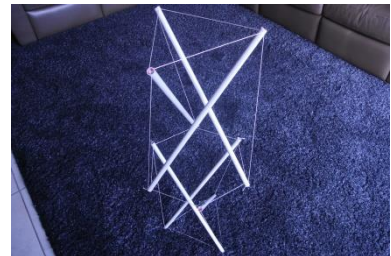


Figuur 80

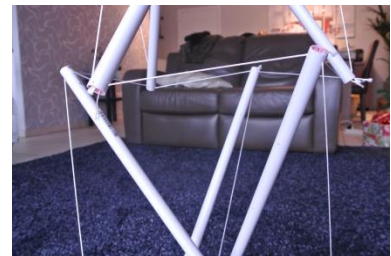


Figuur 81

Stap 6: verwijder tenslotte de basisdriehoek van de onderste structuur. De gecombineerde tensegrity zal nu automatisch een nieuwe evenwichtsvorm aannemen (Figuur 82). Bij een grote spanning in de trekkers die de 2 structuren met elkaar verbinden blijven deze trekkers in één vlak liggen. In Figuur 83 is te zien dat dit hier niet het geval is. Door een relatief lage spanning zijn de stutten onder invloed van de zwaartekracht in de verticale zin verschoven.



Figuur 82



Figuur 83

Noot: de verbinding van beide structuren wordt hier tot stand gebracht met een minimum aan trekkers. Naarmate de structuren groter worden zullen de tensegrities bij een minimum aantal trekkers steeds aan stijfheid verliezen. Om de stijfheid bij complexe tensegrities te vergroten kunnen extra trekkers aangebracht worden die de verschillende basisstructuren met elkaar verbinden. De wijze waarop dit kan gebeuren komt in het volgende deel aan bod.

Praktische voorbeelden

Simplex – simplex

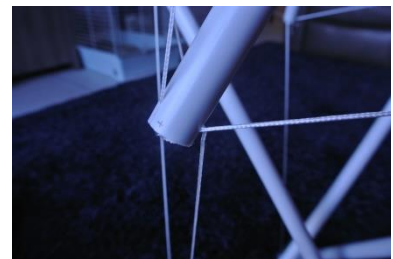
Figuur 82 (zie vorige) toont de aaneenschakeling van een rechts- en linksdraaiende simplex met een minimum aantal trekkers. Om de structuur te verstevigen kunnen de bovenste (en onderste) stutuiteinden van de verschillende structuren onderling met elkaar verbonden worden. Er zullen zo 6 extra trekkers kunnen bevestigd worden, die de structuur extra stevigheid zullen verlenen. Meet hiervoor eerst de afstand tussen deze stutuiteinden (Figuur 84) en maak 6 identieke trekkers. Deze trekkers moeten enkele centimeters korter zijn dan de gemeten afstand om ervoor te zorgen dat het geheel onder een grote spanning zal staan. Immers: hoe groter de spanning in de trekkers, hoe stijver de gehele structuur zal zijn.

Vervolgens moeten de trekkers bevestigd worden aan de stutuiteinden. Deze verstevigingstrekkers kunnen echter niet zoals de rest van de trekkers gewoon in één van de gleuven geschoven worden. Ze zullen immers in de richting van de gleuf spannen en zouden dan uit de gleuf getrokken worden. Figuur 85 toont de correcte bevestigingswijze van de verstevigingstrekkers. Ze werden onder de reeds aangebrachte verbindingstrekkers in de insnijding geschoven zodat deze het uitschuiven van de onderste trekkers voorkomen.

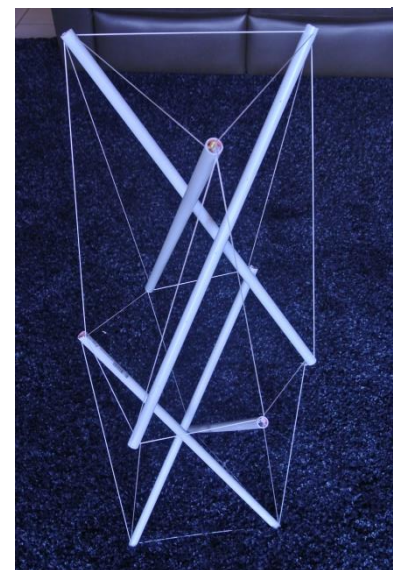
Figuur 86 toont het resultaat als alle verstevigingen op de juiste plaats zijn aangebracht. Door op deze manier afwisselend verschillende links- en rechtsdraaiende simplexen op elkaar te stapelen kan uiteindelijk een Needle Tower bekomen worden.



Figuur 84



Figuur 85



Figuur 86

Simplex – icsaëder

De simplex en de icsaëder kunnen net als de vorige structuur aan elkaar gekoppeld worden door de methode van de gelijkzijdige driehoeken toe te passen. Figuur 87 toont de gecombineerde tensegrity wanneer er nog geen verstevigingstrekkers zijn aangebracht. Het zeshoekig contact vlak is in dit geval nagenoeg horizontaal, wat duidt op een grote spanning in de verbindingstrekkers.



Figuur 87

Om de structuur te verstevigen kunnen er extra trekkers aangebracht worden tussen de stut-uiteinden van de simplex die steunen op de grond en de onderste stut-uiteinden van de icsaëder. Als de spanning in deze extra trekkers hoog genoeg is zal er een erg stabiele structuur gevormd worden. Op Figuur 88 is duidelijk te zien dat het horizontale contactvlak van de uiteindelijke structuur niet meer horizontaal zal zijn. De onderste stut-uiteinden van de icsaëder zijn door de extra trekkers naar beneden getrokken en bevinden zich nu lager dan de bovenste stut-uiteinden van de simplex.



Figuur 88

Simplex – tetraëder

De simplex en de tetraëder kunnen op analoge wijze aan elkaar gekoppeld worden met behulp van hun gelijkzijdige driehoeken. Figuur 89 toont de gecombineerde structuur zonder extra verstevigingstrekkers.



Figuur 89

Omdat de tetraëder een vrij complexe structuur is die op zich minder stabiel is dan de simplex of de icsaëder kunnen hier best verschillende verstevigingstrekkers aangebracht worden. Net als bij de vorige combinatie kunnen de stuteindes van de simplex die de grond raken verbonden worden met de onderste stut-uiteinden van de tetraëder.

Daarnaast kunnen de bovenste stuteindes van de simplex extra opgespannen worden door van hieruit twee extra verbindingen aan te brengen naar de bovenste stut-uiteinden van de tetraëder. Op deze manier kunnen ook alle bovenste stut-uiteinden van de tetraëder verbonden worden met een extra trekker, wat de stabiliteit van het geheel ten goede komt. Figuur 90 toont de complete tensegrity-assemblage met alle aangebrachte verstevigingstrekkers.



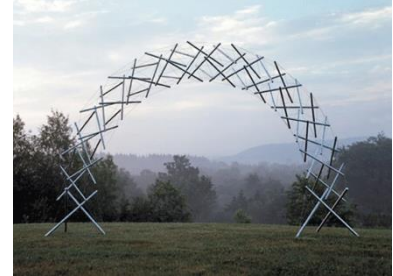
Figuur 90

Eigen ontwerpen

Tensegrity-boog

Ontwerp

In het onderzoek naar tensegrity-structuren zijn er al verschillende personen geweest die geëxperimenteerd hebben met tensegrity-bogen. Robert Burkhardt was de eerste die erin slaagde om een boog te creëren die gebruikte maakte van het tensegrity-principe. Na Burkhardt slaagde ook Snelson erin een tensegrity-boog te construeren: Figuur 91 toont Snelsons werk "Rainbow Arch" uit 2001. De structuur is qua modules en qua stapeling volledig identiek aan zijn "Needle Tower" (Jennes, 2005).



Figuur 91

Constructie

De tensegrity-boog is het eenvoudigst te verwezenlijken door het aaneenschakelen van verschillende rechts- en linksdraaiende simplexen. Eerst werd naar een manier gezocht om de bovenste en onderste basisdriehoek van een simplex-module te kantelen ten opzichte van elkaar door te variëren met de lengte van de drukkers en de zijdelingse trekkers. Figuur 92 geeft de verschillende modellen weer die uitgetest werden. Bij het linkse model werd één drukker en de bijhorende zijdelingse trekker verkleind. Het middelste model toont een variant waarbij enkel één drukker verkleind werd. Bij het rechtse model tenslotte werden twee van de drie zijdelingse trekkers korter uitgevoerd dan bij een normale (symmetrische) simplex.



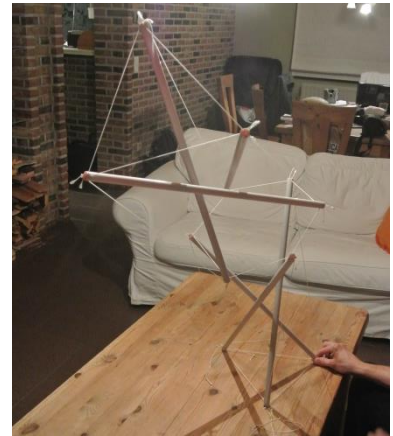
Figuur 92

Dit laatste model bleek uiteindelijk het beste om een boog mee uit te voeren. Door met drie identieke drukkers te werken blijft de hoekverdraaiing van het model 30° en door aan twee zijden de trekkers in te korten verkrijgt de structuur een goede kantelingshoek. Figuur 93 toont een links- en rechtsdraaiende variant van dit model. Door deze afwisselend op elkaar te stapelen zal uiteindelijk een tensegrity-boog bekomen worden.



Figuur 93

Door de simplexen te verbinden met behulp van de reeds beproefde methode van gelijkzijdige driehoeken ontstaat een zeshoekig contactvlak tussen de verschillende structuren. Bij de combinatie van 2 structuren blijft het geheel vrij stabiel, zelfs wanneer er geen versterkingstrekkers aangebracht worden (Figuur 94). Wanneer er echter meerdere simplexen met elkaar gecombineerd worden gaat de structuur al snel erg overhellen onder invloed van de zwaartekracht (Figuur 95). Het zal dus noodzakelijk zijn om extra versterkingstrekkers aan te brengen. Deze trekkers worden aangebracht zoals reeds uitgelegd bij de combinatie simplex-simplex. De lengte van deze versterkingstrekkers varieert uiteraard in functie van de kantelingshoek van de basissimplex.



Figuur 94



Figuur 95

Bij grotere structuren vormt ook de bevestigingsmethode met behulp van een insnijding en pears een probleem. Wanneer de structuren verplaatst worden zullen de krachten zich immers anders verdelen, waardoor het gevaar bestaat dat er verbindingen kunnen loskomen. Door het falen van één verbinding zal de gehele constructie in elkaar storten, wat uiteraard dient vermeden te worden (Figuur 96).



Figuur 96

Om de verbinding tussen de trekkers en de insnijdingen steviger te maken kan er op het uiteinde van de drukkers een stuk tape aangebracht worden na het bevestigen van alle trekkers (Figuur 97). Op deze manier wordt vermeden dat de trekkers bij een veranderende belasting van de structuur uit de insnijdingen zullen schuiven.



Figuur 97

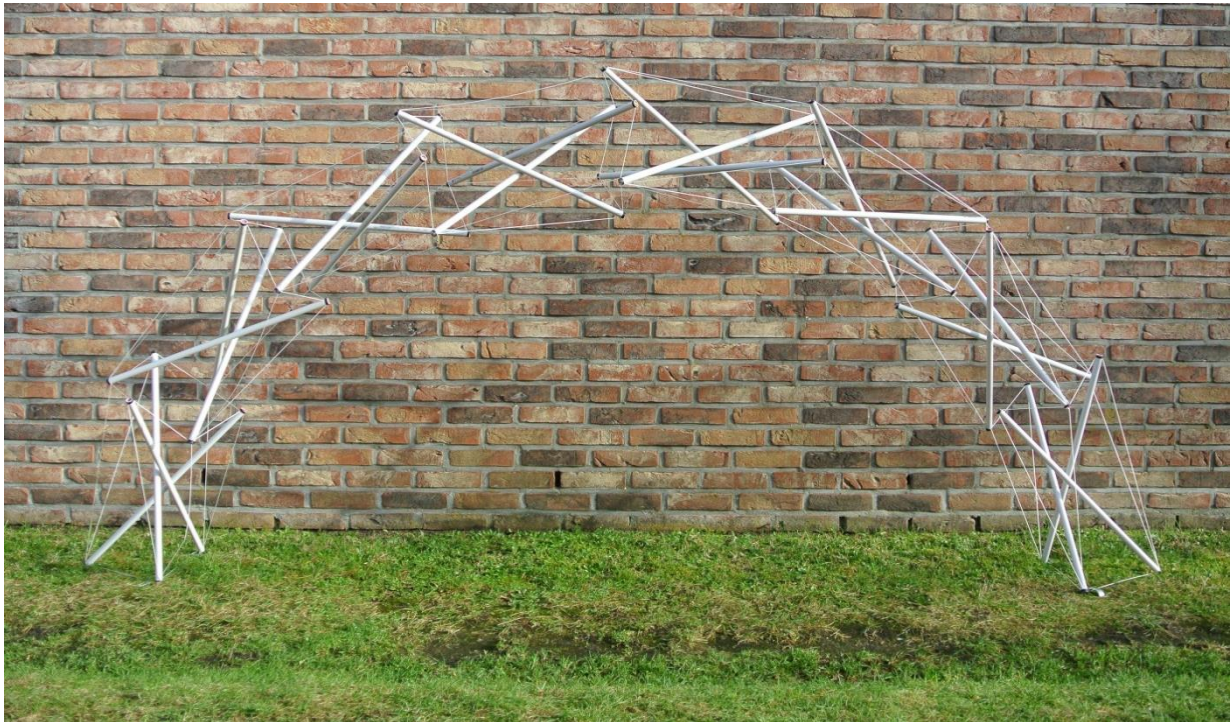
Als de methode uiteindelijk vastgelegd is kunnen de links- en rechtsdraaiende simplexen afwisselend aan elkaar geschakeld worden. Dit vergt heel wat tijd en geduld (Figuur 98).



Figuur 98

De uiteindelijke structuur bestaat uit 8 aaneengeschakelde simplexen.

De overspanning van de tensegrity-boog is 2,2 meter en hij is 1,0 meter hoog (Figuur 99).



Figuur 99

TSI-153

Ontwerp

Om al de opgedane kennis in verband met de tensegrity-basisstructuren en het aaneenschakelen van deze structuren te combineren in één grote structuur werd de TSI-153 ontworpen. TSI is de afkorting van Tetraëder – Simplex – Icosaëder, de basistensegrities die in de gehele structuur respectievelijk één, vijf en drie keer voorkomen.

Bij het ontwerp van de structuur werd uitgegaan van de methode met behulp van insnijding en parels omdat deze methode het dichtst aanleunt bij de uiteindelijke constructiemethode op grote schaal, welke in het volgend hoofdstuk uitgebreid aan bod komt.

De tetraëder fungeert als centraal element in de TSI-153. Deze basistensegrity wordt gekenmerkt door 4 gelijkzijdige driehoeken van trekkers, waaraan op de reeds beproefde wijze ander elementen geschakeld kunnen worden. Figuur 100 toont de tetraëder, waarbij aan de onderste basisdriehoek reeds een (linksdraaiende) simplex verbonden werd. Onder deze simplex werd vervolgens een grotere rechtsdraaiende simplex bevestigd. Deze twee simplexen samen doen dienst als een poot voor de gehele constructie. Vervolgens kunnen er extra basisstructuren bevestigd worden aan de drie andere gelijkzijdige driehoeken van de centrale tetraëder. Zo ontstaat er een structuur met één poot en drie armen. Om de gehele constructie in evenwicht te houden moeten deze drie delen exact hetzelfde zijn. Er werd gekozen voor een icoesaëder in combinatie met een simplex (Figuur 101). De simplex wordt met de onderzijde verbonden aan de tetraëder en met de bovenzijde aan de icoesaëder. Zo fungeert hij als een tussenschakel, waardoor de afzonderlijke structuren nog duidelijk zichtbaar blijven in het ontwerp.

De complexe TSI-153 is zodanig groot dat hij niet stabiel is wanneer er slechts een minimum aan trekkers wordt gebruikt. Er moeten steeds de nodige verstevigingstrekkers aangebracht worden tussen de verschillende elementen, zoals dit reeds werd uitgelegd in het vorige hoofdstuk. Op Figuur 102 zijn vooraan de verstevigingstrekkers zichtbaar die tussen de bovenste simplex van de poot en de tetraëder aangebracht werden.

Naast deze verstevigingstrekkers die de verschillende aan elkaar grenzende basistensegrities extra stevigheid verlenen, wordt er bovenaan ook een driehoek van trekkers voorzien die de drie 'armen' van de constructie extra opspant (Figuur 103). Bij afwezigheid van deze trekkers zouden de armen van de structuur immers erg gaan doorbuigen onder invloed van hun eigengewicht.



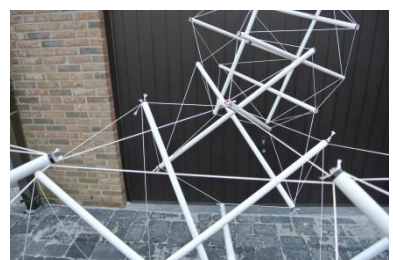
Figuur 100



Figuur 101

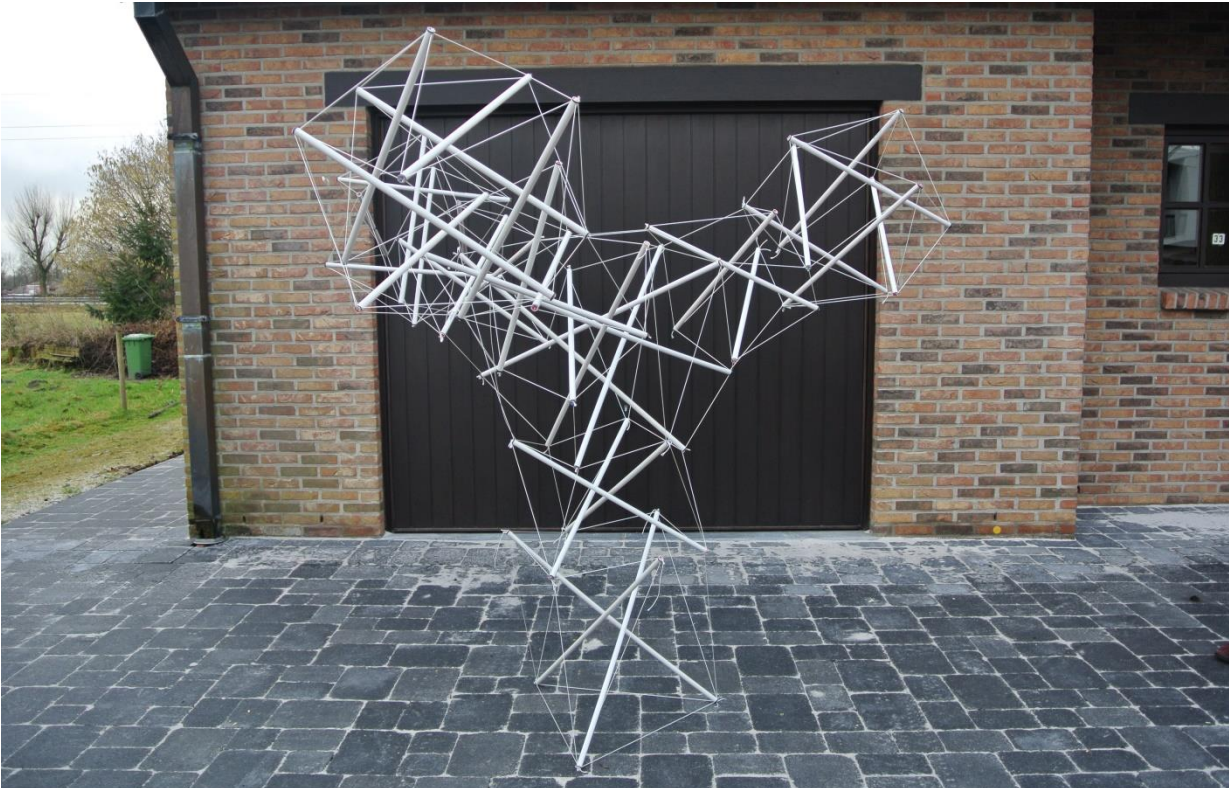


Figuur 102



Figuur 103

Figuur 104 en Figuur 105 geven een totaalbeeld van het proefmodel van de TSI-153.



Figuur 104



Figuur 105

Constructie op grotere schaal

Algemene constructiemethode

Om de TSI-153 op een grotere schaal te construeren is een andere constructiemethode vereist dan de methode met de parels en het metselkoord. Bij het ontwerp van de structuur bleek immers dat deze – ondanks het aanbrengen van verschillende verstevigingstrekkers – niet erg stabiel is. Dit is vooral te wijten aan de relatief lage spanning in het metselkoord. Bij het vergroten van de spanning zou het koord echter breken. In het grotere schaalmodel wordt er om deze redenen gewerkt met staalkabel van 3 mm doorsnede. Om de spanning in het model te kunnen corrigeren werden er op strategische plaatsen draadspanners aangebracht tussen de staalkabels (Figuur 106).



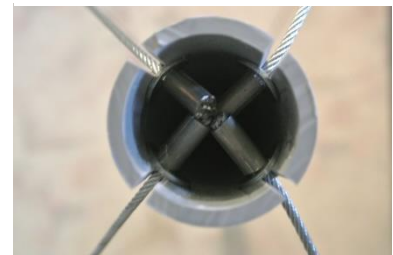
Figuur 106

Bij de keuze van de drukkers is het belangrijk dat er een voldoende grote diameter gekozen wordt, zodat er in de buis genoeg plaats is om de verbinding met de trekkers te voorzien. Daarnaast moeten de drukkers ook een relatief grote drukspanning kunnen weerstaan. Om deze redenen werd er gekozen voor dikwandige PVC-buizen van 4 cm doorsnede (Figuur 107).



Figuur 107

De verbinding tussen de trekkers en de drukkers gebeurt op gelijkaardige wijze als bij het vorige model. Er wordt een insnijding gemaakt aan het uiteinde van de stutten. De trekkers worden in deze insnijding bevestigd door een klemmetje te persen aan het einde van de staaldraad en deze in de gleuf te schuiven. Om het contactvlak tussen het klemmetje en de PVC-buis te vergroten wordt een rondel aangebracht die de ronding van de buis volgt (Figuur 108).



Figuur 108

Om te voorkomen dat deze verbindingen los zouden komen wordt er tenslotte nog een PVC-kap op het buisuiteinde aangebracht (Figuur 109). Wanneer één van de trekkers spant in de richting van de insnijding moet de eindkap stevig bevestigd kunnen worden. Als de kap permanent bevestigd mag worden wordt ze verlijmd met behulp van PVC-lijm. Als het een demonteerbare kap betreft wordt de verbinding verzekerd met behulp van een schroefbout die doorheen de kap en het buisuiteinde wordt bevestigd (Figuur 110).

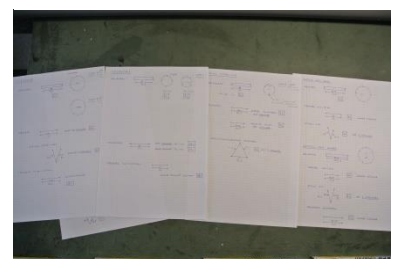


Figuur 109

Op de constructiemethode van de trekkers en drukkers wordt in het volgende gedeelte dieper ingegaan. De maten van de verschillende onderdelen zijn gebaseerd op deze van het proefmodel. Van alle onderdelen werden de afmetingen gemeten en vermenigvuldigd met 1,5. Op deze manier werden gedetailleerde plannen gemaakt van de TSI-153 (Figuur 111). Alle onderdelen kregen hun eigen code om zo het overzicht te kunnen bewaren tijdens de assemblage.



Figuur 110



Figuur 111

Productie van de staalkabels

Aan iedere zijde van de staalkabels is een rondel bevestigd die de vorm van de PVC-buis volgt, om zo het contactvlak tussen de staalkabel en de buis te vergroten. De gebruikte rondellen worden daarom in een eerste fase in een mal gelegd en bewerkt met een hamer zodat ze goed op de binnenzijde van de buizen zullen aansluiten (Figuur 112).



Figuur 112

De staaldraad is bevestigd op een grote spoel. Om de verschillende onderdelen op maat te kunnen maken moet er aan het uiteinde eerst een klem worden aangebracht. De staaldraad wordt daarvoor door het klemmetje gestoken en teruggeplooid (Figuur 113). Vervolgens wordt het klemmetje samengeperst, waardoor een stevige verbinding ontstaat (Figuur 114).



Figuur 113



Figuur 114

Omdat er verschillende staalkabels aan één buisuiteinde zullen bevestigd worden mag het klemmetje niet te groot zijn. Het gedeelte van de staalkabel dat uit de klem steekt wordt om deze reden afgesneden (Figuur 115).



Figuur 115

Om de kabels op de juiste lengte te kunnen maken wordt deze lengte eerst afgetekend op een houten lat. De staalkabel wordt aan de ene zijde van de lat ingeklemd en de staaldraad wordt enkele centimeters langer dan de benodigde lengte afgeknipt (Figuur 116).



Figuur 116

Vervolgens worden de rondellen in de juiste richting op de kabel geschoven en wordt een tweede klem aangebracht op de juiste afstand (Figuur 117). Tot slot wordt ook deze klem samengeperst en wordt het overbodige gedeelte van de staalkabel afgesneden.



Figuur 117

Bij staalkabels met een spanner moet er eerst een kous bevestigd worden aan het uiteinde van de staalkabel (Figuur 118). Deze kous verhindert na de assemblage van de gehele structuur het slijten van de kabel door wrijving met de spanner.



Figuur 118

Aangezien de spanners aan één uiteinde voorzien zijn van een haak en aan de andere zijde van een oog, bestaat het totale element uit twee afzonderlijke delen. Aan de zijde van het oog moet de kous reeds bevestigd worden bij de productie van de kabels. Om dit te kunnen verwezenlijken moet de kous eerst opengewrongen worden (Figuur 119). Vervolgens wordt de kous door het oog gestoken en wordt ze weer dicht geslagen. Tot slot kan ook de staalkabel aan de kous bevestigd worden met behulp van een klem (Figuur 120).



Figuur 119



Figuur 120

Het afmeten van de lengte van de kabels met spanner gebeurt op analoge wijze als bij de kabels zonder spanner. Belangrijk hierbij is dat de spanners volledig opengedraaid worden alvorens de lengte te bepalen (Figuur 121).



Figuur 121

Productie van de drukkers

De bewerking van de drukkers uit dikwandige PVC kan eenvoudig gebeuren met behulp van een metaalslijpschijf. De eerste stap is het afsnijden van een stuk buis met de juiste lengte (Figuur 122).



Figuur 122

Om de diepte van de insnijdingen te bepalen wordt op beide uiteinden van de drukker een eindkap geplaatst. Vervolgens wordt de rand van de eindkap afgetekend op de buis (Figuur 123).



Figuur 123

Door aandachtig het proefmodel te bestuderen werd voor iedere drukker bepaald waar de insnijdingen aangebracht moeten worden. De volgende stap bestaat erin de plaats van deze gleuven aan te duiden op de buisuiteindes (Figuur 124).



Figuur 124

De insnijdingen zijn bij voorkeur even breed als de staalkabels. Een slijpschijf met een dikte van 3 mm is in dit geval de beste optie. De gleuven moeten bovendien 3 mm dieper zijn dan de afgetekende lijn zodat de staalkabel vlak onder de eindkap zal beginnen (Figuur 125).



Figuur 125

Tot slot is het belangrijk om de verschillende buizen goed te labelen (Figuur 126). Zo zal er geen verwarring kunnen ontstaan tijdens de assemblage van het geheel.



Figuur 126

Assemblage van het geheel

Net als bij het proefmodel is het voor het model op grotere schaal ook het makkelijkst om eerst al de afzonderlijke basistensegrities te construeren. Er worden voorlopige trekkers aangebracht op de plaatsen waar de basisstructuren aan elkaar geschakeld zullen worden. Deze voorlopige trekkers kunnen eenvoudig gemaakt worden met de reeds beproefde techniek van metselkoord en parels. Aangezien de insnijding breder is dan in het proefmodel wordt hier best gewerkt met een dubbele parel aan beide uiteinden (Figuur 127). Als alle basismodellen – 1 tetraëder (Figuur 128), 5 simplexen en 3 icoesaëders – geconstrueerd zijn kan de werkelijke assemblage beginnen.



Figuur 127



Figuur 128

Er wordt best begonnen met de constructie van de ‘armen’. Deze zijn samengesteld uit een simplex en een icoesaëder. Plaats deze structuren met de te combineren driehoeken op elkaar en vervang de voorlopige trekkers één voor één door de op maat gemaakte stalen trekkers (Figuur 129). Als alle voorlopige trekkers vervangen zijn is het aangeraden de eindkappen te plaatsen en ze vast te maken met tape om de voorkomen dat de verbindingen loskomen wanneer de structuur verplaatst wordt.



Figuur 129

De volgende stap is het bevestigen van de ‘armen’ aan de centrale tetraëder. Vanaf dit moment is het echter niet meer mogelijk om alleen te werken. Door de grote omvang van de structuren is er één persoon nodig om de structuur in de juiste positie te houden terwijl een tweede de trekkers op de juiste plaatsen bevestigt. Figuur 130 toont de structuur wanneer één van de drie armen aangebracht werd.



Figuur 130

Door een vaste ondersteuning aan te brengen kunnen ook de volgende armen bevestigd worden door 2 personen. Bij Figuur 131 werden reeds twee armen aan de centrale tetraëder verbonden.



Figuur 131

Als ook de laatste arm bevestigd is moet de extra verstevigingsdriehoek bovenaan aangebracht worden. Deze zorgt ervoor dat de armen naar elkaar toegetrokken worden zodat ze niet te veel gaan doorbuigen onder hun eigengewicht. In Figuur 132 is duidelijk te zien dat de eindkappen van de buis aan een grote trekkracht moeten kunnen weerstaan. Ze moeten dus op een stevige manier aan de buisuiteindes bevestigd worden.



Figuur 132

Opdat de structuur later nog afgebroken kan worden gebeurt deze bevestiging met behulp van een lange schroefbout die dwars door de eindkap en het buisuiteinde gestoken wordt. Om deze te kunnen bevestigen wordt er eerst een gat geboord, waarbij het belangrijk is dat dit gat niet te dicht bij één van de insnijdingen wordt aangebracht (Figuur 133).



Figuur 133

In een laatste fase worden de twee simplexen bevestigd die fungeren als een poot voor de gehele constructie. Vanaf dit moment zijn er minimum 4 personen nodig om de assemblage te voltooien. De hele structuur moet door drie personen van de grond geheven worden zodat de vierde de juiste verbindingen tot stand kan brengen. Figuur 134 toont de constructie wanneer de bovenste simplex reeds bevestigd werd.



Figuur 134

Wanneer de structuur op de grond werd geplaatst bleek dat het metselkoord onderaan niet kon weerstaan aan de grote trekkracht die ontstond door het eigengewicht van de constructie. Het werd daarom vervangen door een dubbele trekker van sjortouw (Figuur 135).



Figuur 135

De onderste simplex is de laatste basisstructuur die aan het geheel geschakeld wordt. De structuur wordt door 3 personen tot een bepaalde hoogte opgeheven (Figuur 136). Omdat deze echter te zwaar bleek om lang vast te houden werden er voorlopig enkele steunen onder de drie hoekpunten geplaatst (Figuur 137). De krachten in de voorlopige trekkers zijn erg groot, waardoor het veel moeite kost om ze te verwijderen en te vervangen door de stalen trekkers die de structuur verbinden met de onderste simplex. Als alle verbindingen correct tot stand zijn gebracht worden de steunpunten voorzichtig verwijderd.



Figuur 136



Figuur 137

De structuur blijft staan zonder extra ondersteuning maar is nog niet erg stabiel. In Figuur 138 is duidelijk te zien dat verschillende trekkers nog niet opgespannen zijn. Een laatste stap is dus het gelijkmatig opspannen van de constructie met behulp van de spanners. Dit vergt veel geduld en precisie maar is essentieel om uiteindelijk een symmetrische en evenwichtige structuur te bekomen.



Figuur 138

Om ervoor te zorgen dat de spanners aan alle zijden exact groot zijn kan de afstand gemeten worden tussen de schroeven van de spanners (Figuur 139).



Figuur 139

Het finale model van de TSI-153 wordt getoond op de volgende pagina's. Dit model zal gedurende april en mei 2015 tentoongesteld worden aan de agora van het architectuurgebouw van de Universiteit Hasselt.



Figuur 140



Figuur 141



Figuur 142



Figuur 143

Besluit

Tensegrity-structuren hebben door hun specifieke opbouw grote artistieke kwaliteiten. De schijnbare onmogelijkheid van de structuren is zeer fascinerend. Door stap voor stap de constructie van verschillende basismodellen te beschrijven zal dit werk hopelijk velen aanzetten tot het zelf construeren van schaalmodellen. Wanneer verschillende basisstructuren met elkaar gecombineerd worden ontstaan zeer complexe en interessante tensegrity-assemblages. De variatiemogelijkheden zijn oneindig. Door een website te maken over het onderwerp is de informatie in verband met het praktisch ontwerpen en construeren van tensegrity-structuren voor iedereen eenvoudig te raadplegen.

Dit werkstuk beperkt zich echter enkel en alleen tot het ontwerpen van structuren omwille van hun esthetische kwaliteiten. Bij toepassing van tensegrity-principes in de bouwkunde moet er met veel meer factoren dan louter de vorm rekening gehouden worden. Zo spelen onder meer de voorspanning in de structuren en de krachtwerving ten gevolge van externe belastingen een belangrijke rol. Dit onderwerp wordt wereldwijd door verschillende onderzoekers bestudeerd maar werd in deze scriptie niet behandeld.

Er is zeker nog uitgebreider onderzoek naar tensegrity-structuren mogelijk. Zo kan de mogelijkheid tot het construeren van beweegbare systemen bestudeerd worden, of kan er onderzoek worden gevoerd naar het digitaal modelleren van tensegrities. Er zou daarvoor bijvoorbeeld gebruik kunnen gemaakt worden van de tool Rhino Membrane, die in dit werk niet werd bestudeerd maar zich zeker leent tot verder onderzoek.

Dankwoord

Het is mij een aangename plicht een dankwoord te richten tot allen die mij bij het schrijven van deze scriptie hebben bijgestaan.

In de eerste plaats dank ik mijn promotor, de heer Robrecht Keersmaekers, voor het voorstellen van het interessante onderwerp en voor de tips en begeleiding bij het schrijven van dit werkstuk en de constructie van de schaalmodellen.

Ook wil ik graag de heer Jan Jennes bedanken, wiens theoretisch werk als basis heeft gediend voor mijn scriptie.

Daarnaast wens ik ook mevrouw Els Hannes te bedanken voor de toelating die ik kreeg om een grote tensegrity-structuur te plaatsen in het schoolgebouw en het constructief meedenken over de meest geschikte locatie voor deze sculptuur.

Verder gaat mijn dank ook uit naar Marcel van der Sande van het Kröller-Müller Museum voor de vriendelijke ontvangst en de gedetailleerde informatie over de "Needle Tower II".

Tenslotte wens ik alle personen te bedanken die me hebben bijgestaan bij het construeren van de verschillende schaalmodellen. In de eerste plaats Jos en Paul van de firma AHL, voor de handige tips bij het construeren van de staalkabels en de toestemming om gebruik te maken van hun werkatelier. Daarnaast gaat mijn oprechte dank ook uit naar mijn ouders, mijn broers en mijn vriendin die me allen hebben geholpen bij het assembleren van de verschillende tensegrity-structuren. Zonder hen was het voltooien van deze scriptie wellicht niet mogelijk geweest.

Bibliografie

"Simple Tensegrity Set". (2012). *Simple tensegrity set*. Opgeroepen op Februari 3, 2014, van [www.instructables.com](http://www.instructables.com/id/Chopstick-Tensegrity-Setkind-of/?ALLSTEPS): <http://www.instructables.com/id/Chopstick-Tensegrity-Setkind-of/?ALLSTEPS>

Burkhardt, R. W. (2004). *A practical guide to tensegrity design*. Cambridge: Cambridge University.

Dijkman, D. (z.j.). *Platonische en Archimedische lichamen en de regel van Euler*. Opgeroepen op Januari 3, 2015, van www.wisplan.nl: <http://www.wisplan.nl/webquest/polyhedra2/index.htm>

Gómez-Jáuregui, V., Otero, C., Arias, R., & Machado, C. (2012). *New configurations for double-layer tensegrity grids*. Cantabria: University of Cantabria.

Gurstelle, W. (2006). Building tensegrity models. *Make Magazine*, pp. 100-113.

Jennes, J. (2005). *Tensegrity-structuren*. Leuven: KULeuven.

Snelson, K. (z.j.). *Towers*. Opgeroepen op september 25, 2014, van www.kennethsnelson.net: <http://kennethsnelson.net/category/sculptures/towers/>

Van Aller, B. (2005). *Needle Tower: Kenneth Snelson*. Otterlo: Kröller-Müller Museum.

Van Ravenstein, W. (2011). *Wiskunde en cultuur 2-3*. Opgeroepen op Oktober 12, 2014, van www.wiskundeleraar.nl: <http://www.wiskundeleraar.nl/bestanden/users/wiskast/Bijeenkomst%205.pdf>

Lijst van figuren

Figuur 0: Foto eigen werk.	6
Figuur 1: Eigen werk met Vectorworks, gebaseerd op een figuur uit Jennes, J. (2005). <i>Tensegrity-structuren</i> . Leuven: KULeuven.	8
Figuur 2: Eigen werk met Vectorworks, gebaseerd op een figuur uit Jennes, J. (2005). <i>Tensegrity-structuren</i> . Leuven: KULeuven.	8
Figuur 3: Eigen werk met Vectorworks, gebaseerd op een figuur uit Jennes, J. (2005). <i>Tensegrity-structuren</i> . Leuven: KULeuven.	8
Figuur 4: Zhang, G. (z.j.). <i>4 Stut prism</i> . Opgeroepen op februari 1, 2015, van www.tensegrity.wikispaces.com : http://tensegrity.wikispaces.com/Prism	10
Figuur 5: Zhang, G. (z.j.). <i>9 Stut prism</i> . Opgeroepen op februari 1, 2015, van www.tensegrity.wikispaces.com : http://tensegrity.wikispaces.com/Prism	10
Figuur 6: Foto eigen werk	10
Figuur 7: Foto eigen werk	10
Figuur 8: Hamaguchi, M. (z.j.). <i>Truncated tetrahedron</i> . Opgeroepen op november 22, 2014, van www.flickr.com : https://www.flickr.com/photos/m-a-s-a-k-o/7188462988/	11
Figuur 9: Ramar, P. (2008). <i>Tensegrity Structure T6</i> . Opgeroepen op november 12, 2014, van www2.eng.cam.ac.uk : http://www2.eng.cam.ac.uk/~rp317/catalogue.html	11
Figuur 10: Smith, W. (z.j.). <i>Buckyball</i> . Opgeroepen op januari 30, 2015, van www.you-can-touch-this.blogspot.be : http://you-can-touch-this.blogspot.be/p/sculpture-portfolio.html	11
Figuur 11: Snelson, K. (1991). <i>Triple crown</i> . Opgeroepen op januari 25, 2015, van www.kennethsnelson.net : http://kennethsnelson.net/category/sculptures/outdoor-works/	11
Figuur 12: Snelson, K. (1969). <i>Needle Tower II (1969) - aluminium, staaldraad/aluminium, steel wire - 28 x 5,4 x 5,4 m</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	12
Figuur 13: Brattinga, P. (1969). Kenneth Snelson. Opgeroepen op september 20, 2014, van www.liveauctioneers.com : http://www.liveauctioneers.com/item/5211851	13
Figuur 14: Snelson, K. (1969). <i>One Man Show – Kenneth Snelson (1969 – Historische foto</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	13
Figuur 15: Snelson, K. (1969). <i>One Man Show – Kenneth Snelson (1969 – Historische foto</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	13
Figuur 16: Snelson, K. (1969). <i>One Man Show – Kenneth Snelson (1969 – Historische foto</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	14
Figuur 17: Snelson, K. (1969). <i>One Man Show – Kenneth Snelson (1969 – Historische foto</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	14
Figuur 18: Snelson, K. (1969). <i>Needle Tower II (1969) - aluminium, staaldraad/aluminium, steel wire - 28 x 5,4 x 5,4 m</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	14
Figuur 19: Van Aller, B. (2005). <i>Verscheidenheid aan koppen</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	16
Figuur 20: Snelson, K. (2003). <i>Left helix</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	17
Figuur 21: Snelson, K. (2003). <i>Structure Needle Tower</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	17
Figuur 22: Van Aller, B. (2005). <i>Wartels en hardgesoldeerde koppen</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	18

Figuur 23: Van Aller, B. (2005). <i>Net van staalkabels en koppen</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	19
Figuur 24: Van Aller, B. (2005). <i>Bovenste gedeelte Needle tower II</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	19
Figuur 25: Stewart, P. (2005). <i>Tekening bevestiging kabels aan koppen</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	19
Figuur 26: Van Aller, B. (2005). <i>Injecteren van epoxy in de koppen</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	19
Figuur 27: Van Aller, B. (2005). <i>Gebruik van een lier bij de montage</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	20
Figuur 28: Van Aller, B. (2005). <i>Funderingsankers</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	20
Figuur 29: Van Aller, B. (2005). <i>Fundering voor het volstorten met beton</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	20
Figuur 30: Van Aller, B. (2005). <i>Fundering volgestort met beton</i> . Otterlo, the Netherlands: Collection Kröller-Müller Museum.	20
Figuur 31: Foto eigen werk	21
Figuur 32: Foto eigen werk	22
Figuur 33: Foto eigen werk	23
Figuur 34: Foto eigen werk	23
Figuur 35: Foto eigen werk	24
Figuur 36: Foto eigen werk	24
Figuur 37: Foto eigen werk	24
Figuur 38: Foto eigen werk	25
Figuur 39: Foto eigen werk	25
Figuur 40: Foto eigen werk	25
Figuur 41: Foto eigen werk	25
Figuur 42: Foto eigen werk	27
Figuur 43: Foto eigen werk	27
Figuur 44: Foto eigen werk	27
Figuur 45: Foto eigen werk	27
Figuur 46: Foto eigen werk	27
Figuur 47: Foto eigen werk	28
Figuur 48: Foto eigen werk	28
Figuur 49: Foto eigen werk	28
Figuur 50: Foto eigen werk	28
Figuur 51: Foto eigen werk	28
Figuur 52: Foto eigen werk	28
Figuur 53: Symens, S. (z.j.). <i>Icosaëder</i> . Geraadpleegd op januari 3, 2015, van www.ikhebeenvraag.be : https://www.ikhebeenvraag.be/mediastorage/FSImage/A0/2409/icsaeder.png	28
Figuur 54: Foto eigen werk	28
Figuur 55: Foto eigen werk	29
Figuur 56: Foto eigen werk	29
Figuur 57: Foto eigen werk	29
Figuur 58: Foto eigen werk	30

Figuur 59: Foto eigen werk	30
Figuur 60: Foto eigen werk	30
Figuur 61: Foto eigen werk	30
Figuur 62: Foto eigen werk	30
Figuur 63: Foto eigen werk	31
Figuur 64: Foto eigen werk	31
Figuur 65: Hamaguchi, M. (z.j.). <i>Truncated tetrahedron</i> . Opgeroepen op november 22, 2014, van www.flickr.com: https://www.flickr.com/photos/m-a-s-a-k-o/7188462988/	32
Figuur 66: Ramar, P. (2008). <i>Tensegrity Structure T6</i> . Opgeroepen op november 12, 2014, van www2.eng.com.ac.uk: http://www2.eng.cam.ac.uk/~rp317/catalogue.html	32
Figuur 67: Foto eigen werk	32
Figuur 68: Foto eigen werk	32
Figuur 69: Foto eigen werk	33
Figuur 70: Foto eigen werk	33
Figuur 71: Foto eigen werk	34
Figuur 72: Foto eigen werk	34
Figuur 73: Foto eigen werk	35
Figuur 74: Foto eigen werk	35
Figuur 75: Foto eigen werk	36
Figuur 76: Foto eigen werk	36
Figuur 77: Foto eigen werk	36
Figuur 78: Foto eigen werk	36
Figuur 79: Eigen werk met Vectorworks	36
Figuur 80: Foto eigen werk	36
Figuur 81: Foto eigen werk	37
Figuur 82: Foto eigen werk	37
Figuur 83: Foto eigen werk	37
Figuur 84: Foto eigen werk	38
Figuur 85: Foto eigen werk	38
Figuur 86: Foto eigen werk	38
Figuur 87: Foto eigen werk	39
Figuur 88: Foto eigen werk	39
Figuur 89: Foto eigen werk	39
Figuur 90: Foto eigen werk	39
Figuur 91: Snelson, K. (2001). <i>Rainbow arch</i> . Opgeroepen op januari 15, 2015, van www.kenneth-snelson.net : http://kennethsnelson.net/category/sculptures/outdoor-works/	40
Figuur 92: Foto eigen werk	40
Figuur 93: Foto eigen werk	40
Figuur 94: Foto eigen werk	41
Figuur 95: Foto eigen werk	41
Figuur 96: Foto eigen werk	41
Figuur 97: Foto eigen werk	41
Figuur 98: Foto eigen werk	41
Figuur 99: Foto eigen werk	42
Figuur 100: Foto eigen werk	43

Figuur 101: Foto eigen werk	43
Figuur 102: Foto eigen werk	43
Figuur 103: Foto eigen werk	43
Figuur 104: Foto eigen werk	44
Figuur 105: Foto eigen werk	44
Figuur 106: Foto eigen werk	45
Figuur 107: Foto eigen werk	45
Figuur 108: Foto eigen werk	45
Figuur 109: Foto eigen werk	45
Figuur 110: Foto eigen werk	45
Figuur 111: Foto eigen werk	45
Figuur 112: Foto eigen werk	46
Figuur 113: Foto eigen werk	46
Figuur 114: Foto eigen werk	46
Figuur 115: Foto eigen werk	46
Figuur 116: Foto eigen werk	46
Figuur 117: Foto eigen werk	46
Figuur 118: Foto eigen werk	47
Figuur 119: Foto eigen werk	47
Figuur 120: Foto eigen werk	47
Figuur 121: Foto eigen werk	47
Figuur 122: Foto eigen werk	48
Figuur 123: Foto eigen werk	48
Figuur 124: Foto eigen werk	48
Figuur 125: Foto eigen werk	48
Figuur 126: Foto eigen werk	48
Figuur 127: Foto eigen werk	49
Figuur 128: Foto eigen werk	49
Figuur 129: Foto eigen werk	49
Figuur 130: Foto eigen werk	49
Figuur 131: Foto eigen werk	49
Figuur 132: Foto eigen werk	50
Figuur 133: Foto eigen werk	50
Figuur 134: Foto eigen werk	50
Figuur 135: Foto eigen werk	50
Figuur 136: Foto eigen werk	50
Figuur 137: Foto eigen werk	50
Figuur 138: Foto eigen werk	51
Figuur 139: Foto eigen werk	51
Figuur 140: Foto eigen werk	52
Figuur 141: Foto eigen werk	52
Figuur 142: Foto eigen werk	53
Figuur 143: Foto eigen werk	53