

T e n s e g r i t y
k e n n i s m a k i n g

Studenten:
Latanya Damen | 571887 | Constructie
Jacky Choi | 547919 | Architectuur

Afstudeerbedrijf:
Mecanoo
Octatube

School:
Hogeschool van Arnhem & Nijmegen
Ruiterberglaan 31 6826 CC Arnhem

Afstudeerbegeleiders:
Eerste begeleider: Frits Schultheiss
Tweede begeleider: Jaap Rikken/Elise Mondeel

Bedrijfbegeleiders:
Yuli Huang
Peter van de Rotten

Datum:
19-08-2019

V o o r w o o r d

Deze scriptie is geschreven in het kader voor de opleiding Bouwkunde voor de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.

Na een afstudeerperiode van bijna vier maanden vormt dit rapport het eindresultaat van een onderzoek naar een onderwerp dat al tientallen jaren bestaat, maar toch niet heel bekend is in de bouwwereld; namelijk: Tensegrity. Verschillende architecten en constructeurs vonden het interessant dat wij dit onderwerp hebben gekozen, maar zo vonden ze het ook een gedurfde keuze. Dit onderwerp kan best complex zijn.

Tijdens het onderzoek hebben wij verschillende bouwbeurzen bezocht, constructie- en architecten bureaus, op locatie tensegrity projecten bekeken en deskundigen mogen spreken voor het project. Hierdoor kregen wij veel meer diepgang in het onderwerp en het project werd beoordeelt door partijen van verschillende achtergronden.

Dankzij onze afstudeerbedrijven Octatube en Mecanoo, hebben we kritische adviezen mee kunnen nemen in dit project die zeer praktisch zijn voor de hedendaagse bouwwereld. Onze begeleiders Peter van de Rotten en Yuli Huang hebben tijd vrijgemaakt om met ons aan tafel te zitten en met ons meegedacht. Zij boden ons ook een werkplek aan met wekelijkse begeleiding.

Mede door onze afstudeerbegeleiders Jaap Rikken en Frits Schultheiss kwamen we op dit afstudeeronderwerp. Zij waren

zeer enthousiast over dit onderwerp en hebben ons begeleid in het proces. Door de begeleiding heeft dit rapport een goede invulling gekregen en is het onderzoek naar een hoger niveau getild.

Hierbij willen wij al onze begeleiders bedanken voor de wijze adviezen die onze levens hebben vervuld met regenbogen en glitters. Ook willen wij de deskundigen Arjan Habraken, Mariëlle Rutten en Micheal van Telgen, die tijd vrij gemaakt hebben om met ons in gesprek te gaan bedanken. We vonden het heel leerzaam om jullie inzichten en adviezen te horen.

We hopen dat u veel kennis opdoet van dit rapport,

Jacky Choi
Latanya Damen

Arnhem, 28 mei 2019

S a m e n v a t t i n g

In 2050 is circulair systeemdenken de standaard in Nederland, want door circulair bouwen toe te passen op grote schaal, kan veel vooruitgang worden geboekt in het verminderen van CO₂-uitstoot (ORGA, 2015). Een bepaald bouwsysteem, zoals tensegrity heeft hierbij mogelijk een toegevoegde waarde. In Nederland zijn maar weinig gebouwen waarbij tensegrity is toegepast, terwijl tensegrity al meer dan 50 jaar bestaat. Het probleem is dus dat tensegrity te weinig wordt toegepast in de huidige bouw van Nederland. Met dit onderzoek wordt onderzocht wat van belang is als tensegrity wordt toegepast en hiervoor is een casus bedacht. De onderzoeksvraag luidt dan: "Wat is architectonisch en constructief van belang wanneer tensegrity toegepast wordt in een paviljoen op het campus van TU Delft?" en hierop wordt antwoord gegeven.

Tensegrity is een samentrekking van spanning (tension) en structurele integriteit (structural integrity). De integriteit is gebaseerd op een structuur waarbij het stabiel is en in evenwicht wordt gebracht door de trek- en drukkrachten. De trekkrachten worden opgevangen door staalkabels en de drukkrachten worden opgevangen door staven (Motto, 2003). Een tensegrity model kan worden gebouwd door weinig materiaal te gebruiken en dat is een van de grootste voordelen van tensegrity (Robert. E. Skelton, 2009). Aangezien tensegrity hedendaags weinig wordt toegepast is het de bedoeling dat tensegrity toegankelijker wordt gemaakt in de praktijk om mee te ontwerpen en construeren. De doelstelling van het onderzoek is dan ook om dit proces toegankelijker te maken. Het projectresultaat is een handboek met de ervaringen, belangrijkste punten en een stappenplan van het conceptueel paviljoen ontwerp op de campus van de TU Delft.

Het onderzoek bestaat uit twee soorten variantenstudies. Om het ontwerp te bepalen is een variantenstudie gemaakt met de architectonische aspecten. Voor de architectuur is dus een vormstudie gehouden. Vanuit het ontwerp is ook een variantenstudie uitgevoerd op het gebied van de constructie. Hierbij is van de gekozen vorm, een variantenstudie gemaakt voor de constructie. Voor een verticale toren worden verschillende constructieve oplossingen bekeken en wordt er een keuze gemaakt. De variantenstudies werden wel pas gemaakt, nadat onderzocht was wat tensegrity eigenlijk is. Dit begrip is namelijk best wel breed.

Om tot een goed conceptueel ontwerp te komen, zijn er interviews gehouden met experts die hebben gewerkt met tensegrity. Vanuit de interviews zijn er tips gegeven op het ontwerp en dit werd meegenomen om tot een eind concept te komen.

Het concept is een paviljoen waarbij het idee een box in een box gedachte is en dit bestaat uit allerlei kleine tensegrity units. De units hebben een grote van 0,75 x 0,75m. In elke unit zit ook op een vlak een membraan. Dit is gedaan om het paviljoen semi-open te

maken. Als het regent wordt het binnen bijna niet nat, want doordat er meerdere units naast elkaar staan, vormen de membranen een soort van bladeren aan een boom. Het is dan net of men onder een boom staat en als het regent blijft diegene droog. Het ontwerp ziet er best complex uit en dat is het ook. De grootste uitdaging was het koppelen van de units. De detaillering moest hiervoor dan ook goed worden uitgezocht. In dit onderzoek is er alleen maar gericht op de verbinding van de units op elkaar, want dit is al complex genoeg. De gedachte was dat de units makkelijk op elkaar vastgemaakt konden worden door een goede verbinding en dit is dan ook ontworpen. Het idee is om de kleine units alvast te maken in de fabriek en deze door een simpele verbinding vast te maken aan elkaar op de bouwplaats. De uitvoering wordt dan een soort klik-systeem.

Alleen om dit soort verbinding te realiseren kan er wel problemen ontstaan met de constructie zelf. Aangezien in dit rapport maar een fragment is uitgewerkt wordt er aangeraden om de gehele constructie uit te werken in de vervolgonderzoeken. De torens worden namelijk ook naast elkaar bevestigd en daardoor kunnen de krachten worden overdragen. Er zal dan ook een detail moeten worden ontworpen waarbij er rekening is gehouden met het verbinden in de horizontale- en verticale richting. De verwachting is dat de vervormingen dan minder worden en het gebouw stijver.

S u m m a r y

Thinking circular systematic is the norm in the Netherlands in 2050, because if circular building is progressed on big scales, a lot of progress could be made in lowering the CO2 emission (ORGA,2015). A certain buildingsystem, like tensegrity could have value for this issue. In the Netherlands there are only a few buildings with tensegrity, meanwhile tensegrity already exists more than 50 years. With this research the difficulties of working with tensegrity will be examined through a case. The main question for this research will be: "What is architectural and constructive important when tensegrity is applied in a pavilion for the TU Delft campus?".

Tensegrity is a constriction of the words tension and structural integrity. The integrity is based on a structure that is stabilised by traction and compression. The traction will work through cablestrings and the compression through the tubes.(Motro,2003) A tensegrity model could be build with quite few material, which is one of the biggest benefits of tensegrity(Robert. E. Skelton, 2009).Since tensegrity is not used often, the aim is to make tensegrity more assessible for the architerural and construction field. The project results will be a handbook with the experience, important points for attention and a guideline for working with tensegrity, based on the concept of a conceptual pavilion on the TU Delft campus.

The research is seperated in two variant studies. For the architectural aspect a form study is made. For the design a constructive study is also made to get a better understanding of the possibilities of the design. For the vertical loads different options have been given and analysed. These studies have been made after a literature study about tensegrity itself. Tensegrity is actually a quite broad subject.

To get a qualitative conceptual design, interviews were made with experts who worked with tensegrity before. The knowledge and advise from these interviews were taken into consideration and processed in the design.

The concept of the pavilion is lika a box in a box, constructed with small tensegrity units. The units have a size of 0,75 x 0,75 m. In every unit is on one face a membrane. This is used to make the pavilion semi-open. When it rains the inside will be nearly dry, because of all the layers of membranes, they form a tree with leaves like cover for the user. It will be like standing underneath a tree when it is raining. The design looks quite complex, which it is. The biggest challenge was connecting the units. Therefore the connection design required good research. In this research the focus stayed on the vertical connections of the units. The idea was to be able to connect the units easily and to be able to detach them easily. The units will be made in the factory, on site the units will be connected with a click-system.

But to realise this kind of connection, constructive problems become an issue. Since in this research only a fragment has been designed the advise for further research is to complete the whole constructive design. The towers should also connect in horizontal lines and be able to carry their neighboring loads together. A connection design will be need to carry both vertical and horizontal loads in the structure. The expectation is that deformation will be less and the structure will be more rigid.

Inhoudsopgave

Inleiding.....	9
Afstudeeronderzoek.....	10
1.1 Probleemstelling.....	10
1.2 Vraag- en Doelstelling.....	10
1.3 Onderzoeksmethode/toegepast onderzoek.....	11
1.4 Projectgrenzen/afbakening.....	11
1.5 Randvoorwaarden.....	11
1.6 Locatie.....	12
1.7 Theoretisch kader.....	12
1.8 Definitie Tensegrity.....	12
1.9 Definitie Paviljoen.....	13
Literatuuronderzoek.....	15
2.1 Wat is tensegrity?.....	15
2.2 Achtergrond/geschiedenis.....	16
2.3 Het ontstaan van tensegrity.....	16
2.4 Tensegrity Projecten.....	18
Interview onderzoek.....	21
3.1 Micheal van Telgen/Arcadis Rotterdam/ Constructeur.....	21
3.2 Mariëlle Rutten/Arup Amsterdam/Constructeur.....	21
3.3 Arjan Habraken/TU Eindhoven/SIDstudio /Constructeur/ Hoogleraar.....	22
Proces onderzoek.....	25
4.1 Procesevaluatie Architecten.....	25
4.2 Procesevaluatie Constructeurs.....	25

Concept ontwerp paviljoen.....	27
5.1 Constructieve onderbouwing.....	27
5.2 Verschillende tensegrity modellen.....	27
5.3 Materiaal gebruik.....	27
5.4 Stapeling units.....	27
5.5 Conclusie constructie van het paviljoen.....	30
5.6 Detaillering.....	30
5.7 Richard Buckminster Fuller.....	30
5.8 Kenneth Snelson.....	32
5.9 Randvoorwaarden detail paviljoen.....	33
5.10Morfologisch schema.....	33
5.11Concept knooppuntverbinding.....	34
5.12Visie concept ontwerp - Cube in Cube.....	35
 Herkansing onderdelen.....	 36
6.1 Constructie verticale toren en horizontale ligger.....	37
6.2 Verschil vervorming gehele constructie tussen hout en staal.....	41
6.3 Denkproces funderingsdetail.....	42
6.4 Denkproces knooppunt detail verticale toren.....	44
6.5 Denkproces knooppunt detail horizontale ligger.....	46
6.6 Keuze trekstangen.....	48
6.7 Detailberekeningen.....	48
6.8 Definitieve details.....	49
6.9 Warnor Tower.....	51
6.10Uitvoeringspunten.....	51
6.11Uitvoering details.....	52
6.12Proces.....	61

Handboek Tensegrity Kennismaking.....	51
7.1 Voor- en nadelen van tensegrity.....	37
7.2 Stappenplan.....	38
7.3 Extra aandachtspunten.....	41
Conclusie & Aanbevelingen.....	52
Bibliografie.....	55

I n l e i d i n g

Om klimaatverandering tegen te gaan wil de overheid dat de Nederlandse economie in 2030 minimaal 50% minder mineralen, fossiele grondstoffen en metalen gebruikt. In 2050 moet dat cijfer op 100% liggen (RVO, 2017). Om dit doel te bereiken zal Nederland circulair moeten bouwen. Bij het circulair bouwen worden materialen oneindig hergebruikt (MVO, 2015). Door circulair bouwen op grote schaal toe te passen kan veel vooruitgang worden geboekt in het verminderen van CO2-uitstoot (ORGA, 2015). In 2050 is circulair systeemdenken dus de standaard.

Middels biomimicry kan economie en ecologie bij elkaar worden gebracht en de transitie naar een circulaire systemische wereld worden versneld (Biomimicrynl, 2019). Biomimicry wordt als ontwikkelingsstap gezien voor een circulaire economie. In deze circulaire economie bestaat geen afval en worden grondstoffen steeds opnieuw gebruikt. Bij biomimicry worden bestaande denkbeelden gebruikt om de natuur te herstellen en zelfs te leren van de principes van de natuur. Het is een nieuwe wetenschap die voorbeelden uit de natuur bestudeert en imiteert of als inspiratie gebruikt om problemen in het mensdomein op te lossen (Biomimicrynl, 2019).

Een voorbeeld kan het menselijk skelet zijn, want alle botten van het skelet worden intact gehouden door spieren en pezen. Zonder deze spieren en pezen valt het skelet uiteen (Robert E. Skelton, 2009). Dit principe kan vertaald worden naar

een bouwmethode. Deze bouwmethode kan worden gerealiseerd met behulp van tensegrity. Tensegrity is een samentrekking van spanning (tension) en structurele integriteit (structural integrity). De integriteit is gebaseerd op een structuur waarbij het stabiel is en in evenwicht is tussen trek- en drukkrachten. De trekkrachten worden opgevangen door staalkabels en de drukkrachten worden opgevangen in staven (Motro, 2003).

Tensegrity staat bekend in de architectuur wereld om de simpliciteit. Door alleen kabels en buizen te verbinden zijn constructies mogelijk van enkele vierkante meters tot het oppervlak van een voetbalstadion. De kosten zijn efficiënt, omdat er weinig materialen nodig zijn. Dit is een van de grootste voordelen van tensegrity (Robert E. Skelton, 2009).

A f s t u d e e r o n d e r z o e k

1 . 1 P r o b l e e m s t e l l i n g

Uiteindelijk kan er geconcludeerd worden dat door circulair te bouwen, CO2-uitstoot wordt verminderd en tensegrity is mogelijk hierbij een toegevoegde waarde. Er zijn maar weinig gebouwen in Nederland waarbij tensegrity is toegepast, terwijl tensegrity al meer dan 50 jaar bestaat. Het probleem is dus dat tensegrity te weinig wordt toegepast in de huidige bouw van Nederland.

1 . 2 V r a a g - e n d o e l s t e l l i n g

De doelstelling van dit onderzoek is om een paviljoen te realiseren met behulp van tensegrity. Het paviljoen is dan bestemd voor op de campus van TU Delft. Nederland wil vanaf 2030 dat de helft van de gebouwen zijn gerealiseerd door middel van circulair bouwen en hierdoor wordt de CO2-uitstoot verminderd. Tensegrity kan dus een toegevoegde waarde zijn om dit probleem aan te pakken. Overigens is het doel ook om de bouwwereld te overtuigen om wat vaker te werken met tensegrity. Dit wordt namelijk tot op heden te weinig gedaan en dat terwijl de techniek al een tijd bestaat.

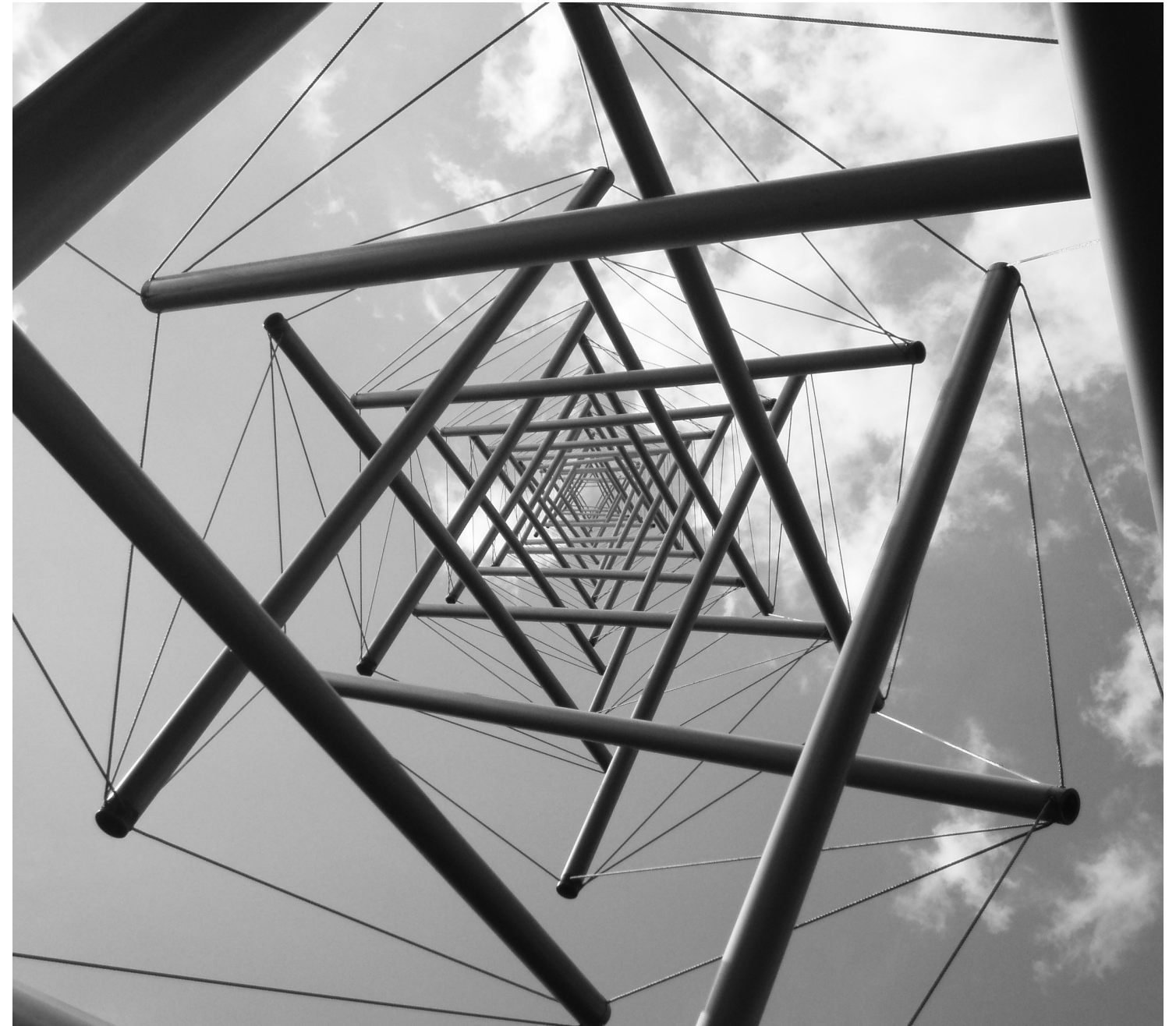
Daarom luidt de hoofdvraag in dit onderzoek:

"Wat is architectonisch en constructief van belang wanneer tensegrity toegepast wordt in een paviljoen op het campus van TU Delft?"

Deze hoofdvraag is uitgesplitst in deelvragen die eerst beantwoord en onderzocht dienen te worden voordat er een antwoord gegeven kan worden op de hoofdvraag. De deelvragen zijn:

1. Wat is tensegrity en welke tensegrity projecten bestaan er al in de bouw?
2. Wat voor adviezen hebben experts die ervaring hebben met tensegrity?
3. Wat blijkt uit voorgaand onderzoek belangrijk te zijn voor architecten en constructeurs die voor het eerst met tensegrity werken?
4. Hoe ziet het conceptueel ontwerp van een paviljoen waarbij de methode tensegrity systems is toegepast eruit?

Het projectresultaat bestaat uit een antwoord op de hoofdvraag door middel van de samenwerking met Mecanoo en Octatube aan het onderwerp tensegrity systems. Met dit onderzoek is het de bedoeling dat tensegrity toegankelijker wordt gemaakt in de praktijk om mee te ontwerpen en construeren. Om dit proces toegankelijker te maken is het projectresultaat een handboek met de ervaringen van het conceptueel paviljoen op TU Delft.



Figuur 1
Kenneth Snelson - Needle Tower

1.3 Onderzoeksmethode / toegepast onderzoek

Bij toegepast onderzoek wordt er onderzoek gepleegd voor de praktijk. Uit het onderzoek komen conclusies en aanbevelingen naar voren die direct toepasbaar zijn in de praktijk. Het is ook mogelijk dat met het onderzoek bepaalde producten of methoden worden ontworpen die in de praktijk kunnen worden toegepast. In dit onderzoek komt een concept naar voren die als doelstelling heeft om direct toepasbaar te zijn in de praktijk, daarom is hier gekozen voor een toegepaste onderzoeksmethode.

1.4 Projectgrenzen / Afbakening

De focus van het onderzoek zal liggen op het toepassen van een tensegrity systems in de huidige bouw. Het conceptuele paviljoen bestaat uit een vorm waarin de constructie niet zoals op de traditionele manier met kolommen en balken loodrecht op elkaar staan. Tensegrity is namelijk een lichtgewicht systeem die geen kolommen vereist in de constructie. Dit biedt veel ontwerp vrijheid in de architectuur.

Referentie projecten en technieken van de afgelopen 60 jaar zullen gebruikt worden in het onderzoek.

Dus in het kort zullen de volgende afbakeningen in het onderzoek zijn:

Type gebouw	Paviljoen
Type constructie	Tensegrity Systems
Functie	Commerciële functie
Doel	Bouwwereld overtuigen met tensegrity
Locatie	Campus TU Delft
Tijd	max. 1 jaar

1.5 Randvoorwaarden

Hieronder staat een overzicht van de randvoorwaarden waaraan het paviljoen moet voldoen.

Tijd

Max 1 jaar, minstens half jaar
Tijdelijk

Functie

Bijeenkomstfunctie, inspiratie voor tensegrity
Beschutting voor zon, regen en wind

Gebruikersvoorwaarden

Ruimte voor 15+ mensen
Kleine podium
Beschut staan van zon, regen en wind (gebruik van membranen)
Ruimte voor tafels en stoelen

Uitvoeringsvoorwaarden

Gemakkelijk op te zetten, binnen een week

op locatie
Mogelijkheid om te verplaatsen naar andere locaties
Herbruikbare units

Esthetische voorwaarden

Oogt rustig, maar trekt de aandacht van voorbijgangers
Transparant en licht

Unit

Unit niet groter dan 1 x 1 x 1m
Staven lengte max 2m min. 30cm

1.6 Locatie

De locatie van het paviljoen is bij de rode kruis. Deze staat op een grasvlakte voor het gebouw van Electro Engineering en de Electronic and Mechanical Support Division (EWI-gebouw). Het gebouw is het hoogste gebouw van Delft Campus. Het gebouw heeft een hoogte van wel 90m. Het is belangrijk dat het paviljoen de windkrachten kan verdragen op deze locatie.

De locatie is voor de hoofdingang van het gebouw en voor de fietsenstallingen. Er is veel verkeer rondom de locatie. Op enkele bomen na rondom de locatie zijn er zichtlijnen mogelijk naar het alle richtingen.

1.7 Theoretisch kader

In de hoofdvraag van dit onderzoek wordt een verband getrokken tussen tensegrity en een paviljoen. Nederland wil in 2030 minimaal 50% minder mineralen, fossiele grondstoffen en metalen gebruiken (RVO, 2017) en tensegrity kan hierbij bijdragen. Tensegrity heeft economische en ecologische voordelen, omdat er weinig materiaal wordt gebruikt en weinig energie benodigd is. Overigens zorgt een tensegrity structuur ervoor dat de constructie een hoge sterkte heeft door minimaal gebruik te maken van materialen (Ingber, 1998). Uit het onderzoek van Donald Ingber blijkt dus dat een 'tensegrity system' een duurzaam systeem is. Dit onderzoeksrapport richt zich op welke wijze 'tensegrity systems' bijdraagt aan het circulair bouwen in



LEGEND / LEGENDA

	TU buildings TU gebouwen
	Other buildings Overige gebouwen
	Building number Gebouwnummer
	(Main) entrance building (Hoofd)ingang gebouw
	Delivery entrance Goedereningang
	TU roadway TU ring
	Road Autoweg
	Bus track Busbaan
	Cycle path Fietspad
	Pedestrian area Voetgangersgebied
	Bus stop Bushalte
	Parking Parkeerplaats
	Park / sport field / grass surface Park / sportveld / gras
	Water
	Area under construction Gebied in ontwikkeling

Figuur 1.3
Plattegrond - TU Delft

Nederland en of tensegrity toegankelijker kan worden gemaakt in de praktijk om mee te ontwerpen of construeren.

Om de hoofdvraag goed te kunnen beantwoorden moeten eerst de begrippen worden toegelicht. De onderzoeksvraag wordt gedefinieerd om het onderzoek in te kaderen. Voor dit onderzoek is de volgende hoofdvraag opgesteld en gaat dit onderzoek uit van de volgende definities.

"Wat is architectonisch en constructief van belang wanneer tensegrity toegepast wordt in een paviljoen op het campus van TU Delft?"

1.8 Definitie Tensegrity

Buckminster Fuller heeft het woord tensegrity bedacht door de woorden 'tension' = spanning en 'intergrity' = integriteit samen te voegen (Lalvani, 1996). In zijn boek 'Synergetics' geeft Fuller de volgende definitie: "Tensegrity describes a structural relationship principle in which structural shape is guaranteed by the finitely closed, comprehensively continuous, tensional behaviours of the system and not by the discontinuous and exclusively local compressional behaviors" (Fuller, 1975). Hij bedoelt hiermee dat tensegrity een structureel relatieprincipe is waarin de vorm wordt gegarandeerd door het spanningsgedrag van het systeem en wordt de vorm gesloten gehouden. Volgens Rene Motro heeft tensegrity de volgende betekenis: "Tensegrity system

is a system in a stable self-equilibrated state comprising a discontinuous set of compressed components inside a continuum of tensioned components” (Motro, 2003). Hij bedoelt hiermee dat tensegrity een systeem is dat stabiel is en zelf in evenwicht wordt gebracht door zijn eigen structuur. Het systeem bestaat uit een set van op druk belaste componenten (drukstaven) en op trek belaste componenten (trekstaven). Dit onderzoek gaat uit van de definitie van Rene Motro, want hij geeft meer een wetenschappelijke definitie en kan er worden gezegd dat een tensegrity model in stand wordt gehouden door de trekstaven die zijn verbonden met de drukstaven. Echter mogen dezelfde staven elkaar niet aanraken. Een drukstaaf is altijd verbonden met meerdere trekstaven en niet met een andere drukstaaf.

In het proefschrift van Valentin Gomez Jauregui wordt een overzicht gegeven van de voor- en nadelen van tensegrity. De voordelen van tensegrity was genoeg reden geweest voor Rene Motro, Robert Skelton, Ariel Hanaor, Anthony Pugh en Robert Burkhardt om de architectonische mogelijkheden te onderzoeken (Pars, 2019). Zij hebben allen een onderzoek geschreven over tensegrity en uit al deze onderzoeken kan worden geconcludeerd dat tensegrity toch wel een lastige techniek is voor een goede kabel-buis-verbinding en is het voor een constructeur best complex om te berekenen. Daardoor kunnen problemen ontstaan tijdens de productie (Burkhardt, 2004).

Tensegrity wordt dus om die reden niet vaak toegepast in de praktijk. Robert

E. Skelton wijde daar in een artikel de volgende uitdrukking aan: “Tensegrity, as a concept, has been around for more than 50 years, but until now we have lacked the mathematics needed to make it an engineering tool. There are lots of ways to put sticks and strings together that give you nothing but a useless pile. However, our new computational tools enable us to design an airplane wing structure that can extend and retract like a bird’s wing” (Sciencedaily, 2006). Hij bedoelt hiermee dat het systeem tensegrity al tientallen jaren bestaat, maar niet wordt toegepast en dit heeft te maken met de complexiteit. Echter kunnen bepaalde programma’s als hulpmiddel worden gebruikt en is de technologie met de jaren ook veranderd. Dus kan geconcludeerd worden dat tensegrity tegenwoordig wat eenvoudiger is uit te voeren dan in het verleden.

1.9 Definitie Paviljoen

Volgens de Van Dale is een paviljoen een lichtgebouw huisje of overdekte stelling in parken, op feestterreinen. Een paviljoen kan ook een bij- of zijgebouw van een hotel, ziekenhuis enz. Volgens onderzoeker Jorrit Spel is het woord paviljoen een symbool geworden voor grote begrippen als kunst, nationaliteit, ideologie en technologie. Het paviljoen haalt alles uit de kast in vorm, ruimte en materiaal (Spel, 2007).

In dit onderzoek gaan we ervan uit dat een paviljoen een lichtgewicht gebouw is en deze heeft als gebruiksfunctie een bijeenkomstfunctie. Verder wordt er met

het paviljoen veel gespeeld met de vorm, ruimte en materiaal. In dit onderzoek wordt dus gebruik gemaakt van de definitie van Jorrit Spel. Overigens is er ook gekozen voor een paviljoen, omdat hiervoor geen bouwbesluiten gelden.

Tensegrity wordt tot op heden niet vaak toegepast bij paviljoens, maar wel bij een aantal utiliteitsgebouwen. Zo wordt tensegrity meestal toegepast bij dakconstructies, omdat het grote overspanningen aankan. Bij de projecten “Het gelders huis” en “Olympic Gymnastics Arena, Seoul” bestaat het dak uit een tensegrity constructie.

Conclusie

De grootste uitdaging wordt een goede kabel-buis-verbinding maken en de constructieberekeningen te berekenen. Om dit goed te kunnen waarborgen, zal er een morfologisch schema gemaakt moeten worden met verschillende verbindingen die al bestaan bij tensegrity en zo kan er voor dit onderzoek de juiste soort verbinding worden gekozen. Overigens zal bij de constructieve berekeningen gebruik moeten worden gemaakt van bepaalde programma’s die complexe berekeningen kan berekenen. Dit kan dan als een goed hulpmiddel worden gebruikt.

L i t e r a t u u r o n d e r z o e k

Tensegrity Structures

Deelvraag 1 Wat is tensegrity en welke tensegrity projecten bestaan er al in de bouw?

2.1 Wat is tensegrity?

Tensegrity is een systeem dat stabiel is en zelf in evenwicht wordt gebracht door zijn eigen structuur. Het is een structureel principe dat bestaat uit een set van op druk belaste componenten (meestal staven) en op trek belaste componenten (meestal kabels). In het systeem mogen de op druk belaste componenten elkaar niet aanraken. Overigens is er een voorspanning nodig op een paar kabels om de stabiliteit te waarborgen (Motro, 2003).

Buckminster Fuller noemde de integriteit gebaseerd op een evenwicht tussen trek- en drukbelastingen, tensegrity. Het begrip is een samentrekking van tension en structural integrity.

Het begrip, uitgelegd vanuit een bouwkundige invalshoek, houdt in dat een constructie een structureel karakter heeft dat gebaseerd is op trek- en drukkrachten. Stalen kabels dragen de trekkrachten en de drukkrachten worden opgevangen door staafprofielen van staal, aluminium of hout. Een tensegrity structuur bestaat uit twee soorten elementen. De een is een stijf element dat drukkrachten opvangt, deze bestaat vaak uit staafprofielen. Het andere element zijn de kabels, deze dragen de trekkrachten in de tensegrity structuur.

Om de definitie van een tensegrity systeem te begrijpen zal eerst uitgelegd worden wat een tensegrity configuratie is. Stijve elementen in een configuratie die op geen

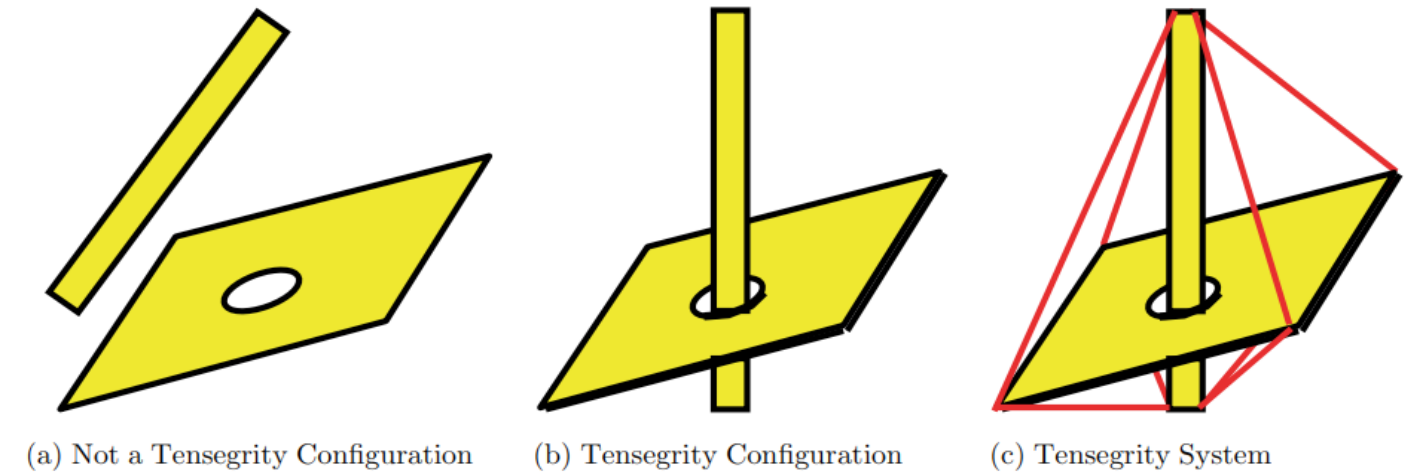
enkele manier gestabiliseerd kunnen worden met trekkabels is geen tensegrity configuratie (figuur 2.1.a). Dus een configuratie van stijve elementen die wel met trekkabels gestabiliseerd worden is een tensegrity configuratie (figuur 2.1.b).

Daarna komt het verschil tussen een tensegrity configuratie die stabiel of onstabiel is. Wanneer een tensegrity configuratie stabiel is zal de structuur terugkeren naar zijn originele vorm nadat er een externe kracht is uitgeoefend. Natuurlijk is de definitie van stabiliteit afhankelijk van de externe krachten in deze situatie. Een tensegrity systeem bestaat uit een ongedefinieerd aantal gespannen kabels die verbonden zijn aan een tensegrity configuratie van stijve elementen. (Robert E. Skelton, 2009)

Vanuit deze definitie blijkt dat een tensegrity systeem stabiel en onstabiel kan zijn. In figuur 2.1.c is een stabiele tensegrity systeem weergegeven.

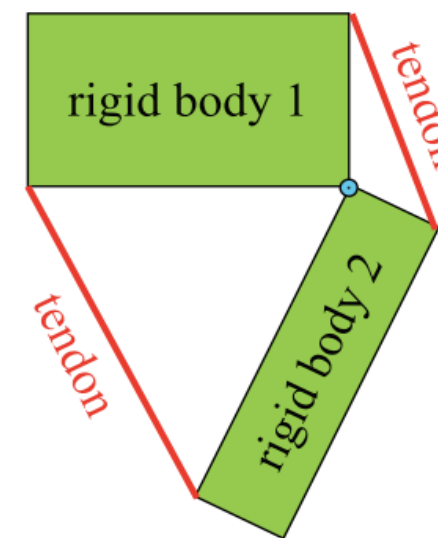
Een tensegrity configuratie waar geen contact is tussen stijve elementen is een klasse 1 tensegrity systeem, wordt ook wel pure tensegrity systeem genoemd. Tensegrity systeem met 'K' aantal stijve elementen die in contact zijn is een klasse 'K' tensegrity systeem.

In figuur 2.2.a is een klasse 2 tensegrity weergegeven en figuur 2.2.b geeft een klasse 3 tensegrity weer. In dit onderzoek zal vooral naar klasse 1 tensegrity systemen gekeken worden.



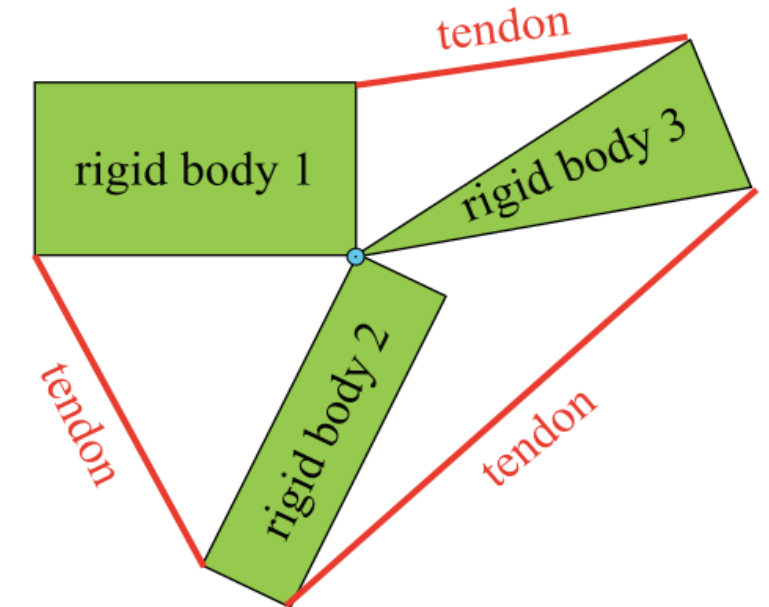
Figuur 2.1
Plattegrond - TU Delft

2 rigid bodies
2 **tensile** elements



(a) class 2 tensegrity

3 rigid bodies
3 **tensile** elements



(b) Class 3 tensegrity

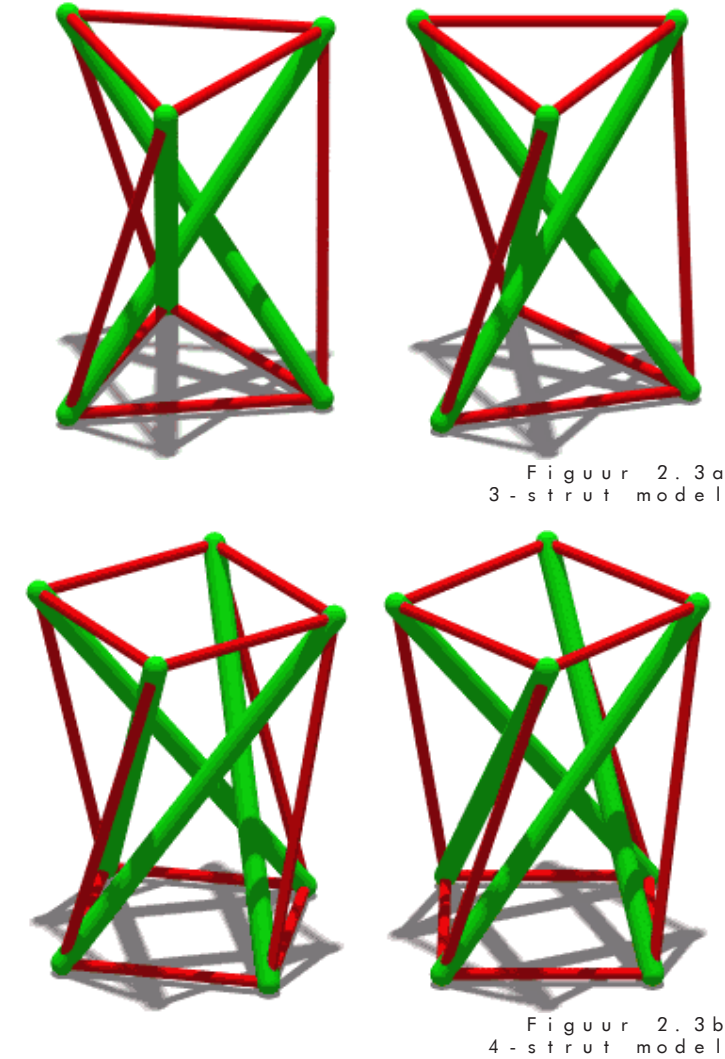
Figuur 2.2
Plattegrond - TU Delft

Om ervoor te zorgen dat een tensegrity model stabiel is, wordt een eenvoudige rekenregel toegepast. Het minimale aantal benodigde kabels = 3 x het aantal staven (n) (Bing, 2004). In figuur 2.3a wordt een tensegrity model getoond met 3 staven en in figuur 2.3b 4 staven. Het aantal benodigde kabels komt overeen met deze simpele rekenregel.

Het tensegrity model met drie staven in figuur 2.3a en 2.3b wordt beschouwd als de eenvoudigste tensegrity structuur. De "3-strut model" bestaat uit drie staven en negen kabels en deze zijn stabiel volgende de bovenstaande formule. De staven hebben allen dezelfde lengte en zijn aan de boven- en onderkant verbonden in een driehoek van kabels met dezelfde lengte. Om van alle staven en kabels een driedimensionaal model te maken zou de volgende stap zijn om alles in één richting te roteren. De bovenkant van elke staaf moet dan worden verbonden met de onderkant van een andere staaf. Hetzelfde principe wordt gebruikt om de 4-strut tensegrity model te creëren, waarbij de boven- en onderkant in een vierkant zijn verbonden (Burkhardt, 2008).

2.2 Achtergrond / geschiedenis

Tensegrity is voor de bouwwereld best interessant, want het heeft een mysterieus ontstaan en het heeft unieke eigenschappen voor de architectuur. Het is een lichtgewicht constructie en hierdoor kan er in de



architectuur veel met de vorm worden gespeeld. Hoewel een gelijkwaardige idee over tensegrity is ontstaan in de jaren 20 van de vorige eeuw, werden de meeste studies over tensegrity geschreven door Buckminster Fuller. De Amerikaanse architect wordt gezien als de uitvinder van de geodetische koepel. Hij bedacht het begrip "tensegrity" door een combinatie van de woorden "tensile" (= treksterkte) en

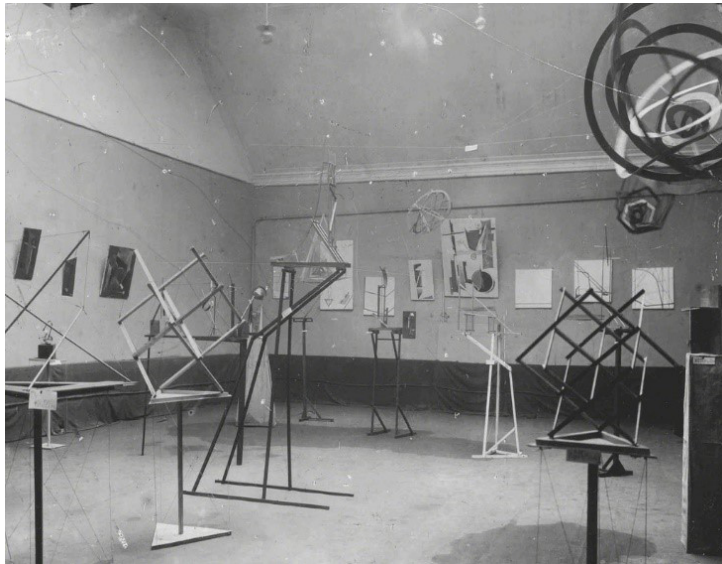
"integrity" (= integriteit). Kenneth Snelson materialiseerde het idee in prototypes, maar de eerste echte "tensegrity unit" werd uitgevoerd door David Emmerich in de jaren 60 van de vorige eeuw (Bing, 2004).

2.3 Het ontstaan van tensegrity

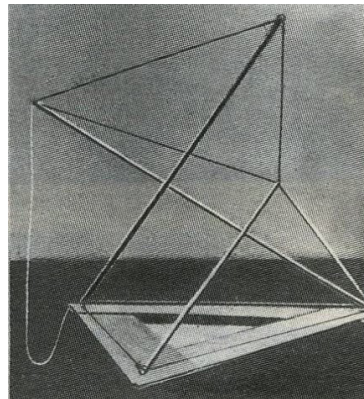
Het is niet bekend wie de precieze uitvinder van tensegrity is, want er zijn drie mannen die claimen dat zij de uitvinder van tensegrity zijn: David Georges Emmerich, Richard Buckminster Fuller en Kenneth Snelson. Zij waren waarschijnlijk allemaal geïnspireerd door het werk van Karl Ioganson, want Emmerich vertelde dat het eerste prototype van tensegrity was gemaakt door een zekere Karl Ioganson in 1920 (Emmerich D., Structures tendues et autotendantes, 1988). Dit systeem werd destijds "Gleichgewichtkonstruktion" genoemd.

In het boek van Laszlo Moholy Nagy, "Von materiel zu Architektur", stonden twee foto's van een expositie erin en daarin werd het werk van Ioganson getoond. Deze expositie vond plaats, in Moskou, in 1921 (Motro, 2003). In figuur 2.4 wordt de expositie getoond die plaatsvond in Moskou. Op de expositie stonden structuren die lijken op tensegrity. Echter kunnen deze structuren van Ioganson niet worden geïnterpreteerd als tensegrity, want een van de belangrijkste elementen van tensegrity ontbreekt in zijn ontwerpen en dat is voorspanning op een van de kabels.

In figuur 2.5 wordt een model van Ioganson getoond en daarin is te zien dat de kabel aan de linkerkant geen voorspanning heeft.



Figuur 2.4 Obmokhu (the Society of Young Artists), Moskou (Ioganson, self-stressed constructions)



Figuur 2.5 Karl Ioganson "tensegrity" (Ioganson, Gleichgewichtkonstruktion)

De volgende stap in het ontdekkingsproces naar de tensegrity systeem was de poging op het balansgewicht te verwijderen en de elementen te laten stabiliseren met behulp van trekkabels. Hierdoor ontstond de X-kolom structuur (zie figuur 2.8).

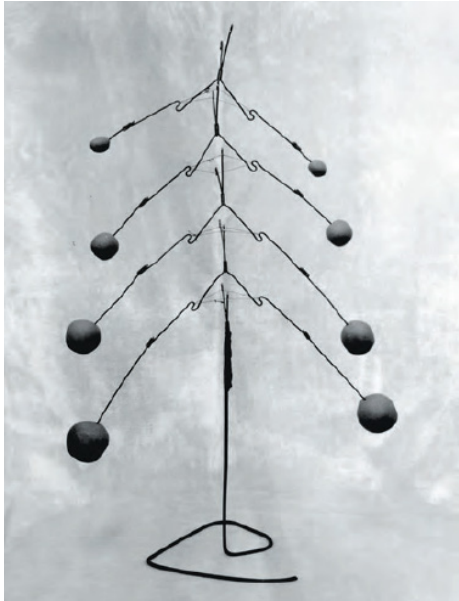
Nadat Kenneth Snelson zijn modellen liet zien aan Fuller, adviseerde Fuller dat Kenneth de x-vormige drukelementen te vervangen door staven in de vorm van een tetrahedron. Hierdoor ontstond de eerste genoemde tensegrity systeem. Snelson vroeg een octrooi aan voor zijn uitvindingen: "Continuous Tension, Discontinuous Compression Structures" (U.S. Patentnr. 3.169.611, 1965).

Tegelijkertijd onderzocht David Georges Emmerich in Frankrijk de tensegrity prisma's en de combinatie van prisma's (zie figuur 2.9) in een meer complexe tensegrity structuur. Hij bestempelde dit allemaal onder de naam "structures tendues et autotendants". Dit betekent voorgespannen trekconstructies (Frankrijk Patentnr. 1.377.290, 1963). Hieruit kan geconcludeerd worden dat ook Emmerich een bijdrage had bij het ontstaan van tensegrity.

In de opvolgende studies van Buckminster Fuller werd Kenneth Snelson niet vernoemd en rond die tijd bedacht Fuller het begrip "tensegrity". Buckminster Fuller is verder gegaan met het ontwikkelen van "Cable domes". Zijn eerste ontwerp heeft hij gemaakt in 1953 (zie figuur 2.10). Nu was



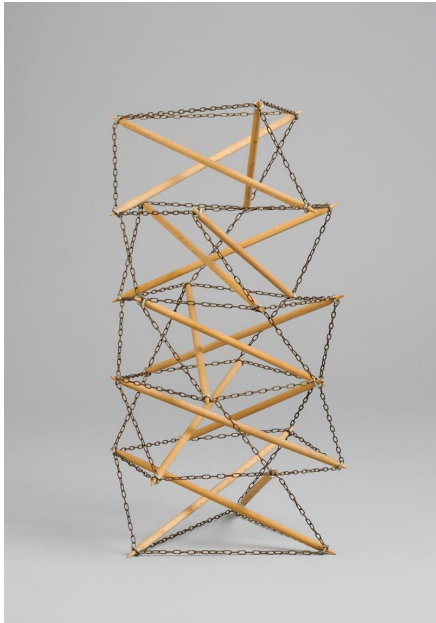
Figuur 2.6
Kenneth Snelson, "One to another", 1948 (Snelson, Moving Column, 1st study)



Figuur 2.7
Kenneth Snelson, "One to the next", 1948 (Snelson, Moving Column, 2nd study)

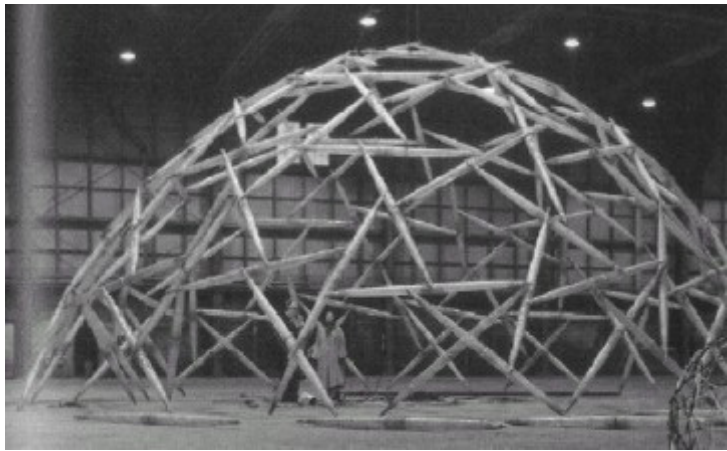


Figuur 2.8
Kenneth Snelson, "X-shape", 1948 (Snelson, Early X-Piece)



Figuur 2.9
David Georges Emmerich, "Mât antiprismatique 3B monogyre", 1963 (Emmerich D. G.)

zijn koepel uit 1953 constructief gezien een zwak ontwerp, want de constructie van de koepel was niet in staat om zijn eigen gewicht te dragen (Pars, 2019). In de koepel ontbrak het gebruik van triangulatie en daardoor was de constructie dan ook niet stabiel.



Figuur 2.10
Buckminster Fuller, "Geodesic Tensegrity Dome", 1953 (Buckminster)

Kenneth Snelson heeft tensegrity alleen nog maar toegepast bij het maken van diverse kunstwerken. Snelson beweert dan ook dat tensegrity geen praktische toepassing is maar alleen een kunstzinnige waarde heeft.

De eerste werkelijke gebouwde "Cable Dome" is ontworpen door David H. Geiger. Hij was geïnspireerd geraakt door het werk van Buckminster Fuller. De eerste "Cable Dome" werd gebouwd in Seoul te gelegen in Zuid-Korea genaamd de 'Olympic Gymnastics Arena' (1986). Echter wordt dit project niet erkend als een tensegrity systeem door de meeste

ingenieurs, omdat de drukring niet binnenin de trekkabels ligt. Het dak bestaat uit een soort compressierand, waarbinnen de kabels gespannen zijn en hierdoor lijkt het meer op een fietswiel dan op een echte tensegrity systeem.

In 1992 Matthys P. Levy verbeterde de lay-out van de "Cable Dome" in een soort van elliptische vorm voor de olympische spelen van Atlanta. Dit project wordt dan ook gezien als de eerste tensegrity dome (= koepel) die ter wereld is gebouwd (Fu, 2018)

2.4 Tensegrity projecten

Montreal Biosphere (1967) - Buckminster Fuller

Origineel ontworpen voor Expo 67. De constructie bestond origineel uit staal met acryl cellen die de koepel afsluit. Met een diameter van 76m en een hoogte van 62m. Het is een klasse 1 tensegrity koepel. Het is een 2-laagse koepel verbonden met een rooster van stutten.

In 1976 was er een brand die alle acryl cellen verbrand had, alleen de staalconstructie was overgebleven. (Wikipedia, Montreal Biosphere, 2019)

Underwood Pavilion (2014) - Gernot Riether en Andrew Wit

Een project van de Ball State Universiteit begeleid door de professoren Gernot en Andrew. Het paviljoen is bedoeld voor

Indiana's post-industrieel landschap om mensen aan te trekken tot plaatsen die tot op heden niet als openbare ruimtes beschouwd worden. De constructie bestaat uit 56, 3-strut tensegrity modellen. Elke module is aangekleed met wit Elasthan, een stof die schaduw en afkoeling biedt tijdens de hete zomers in Indiana. Het paviljoen is licht en transporteerbaar. De modules nemen weinig ruimte in beslag tijdens het transport. (Miller, 2019)

Needle tower II (1968) - Kenneth Snelson

Snelsons eerste solotentoonstelling was in 1969 in het beeldenpark van het Kröller-Müller Museum in Otterlo. De Needle tower II werd hier onder andere tentoongesteld. Het is een 3-strut tensegrity systeem die op elkaar gestapeld is. De Modules worden steeds kleiner wanneer ze omhooggaan. Hierdoor wordt de illusie gecreëerd dat de toren hoger is dan het in werkelijkheid is. (Wikipedia, Kenneth Snelson, 2019)

Georgia Dome (1992) - Matthys P. Levy

De constructie van de Georgia Dome is gebaseerd op de dakconstructie van Fuller. In het dak zit in het midden een ovale drukring en hieraan zitten trekkabels verbonden die een bepaalde voorspanning hebben. De dakconstructie van Georgia Dome is dus gebaseerd op het denksysteem van Fuller met triangulatie (Setzer, 1992).



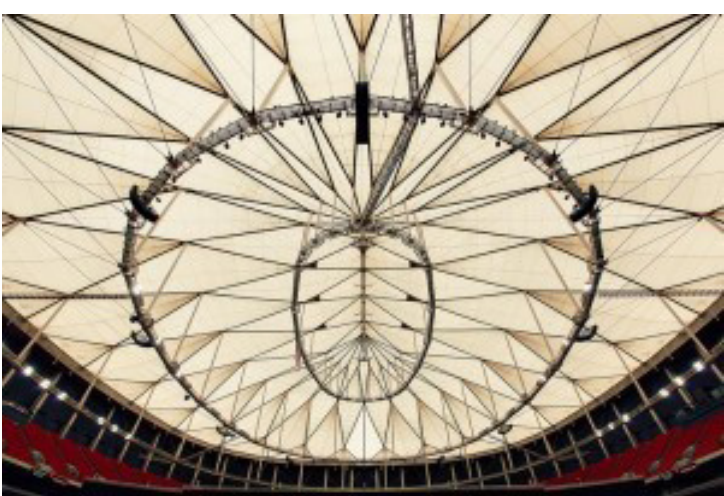
Figuur 2.11
Montreal Biosphere (Wikipedia, Montreal Biosphere, 2019)



Figuur 2.12
Underwood Pavilion (Miller, 2019)



Figuur 2.13
Needle Tower (Wikipedia, Kenneth Snelson, 2019)



Figuur 2.14
Georgiadome (Levy), (firthefirst)

Kurilpa Bridge (2009) - Cox
Rayner Architects

De brug is 470 meter lang met een
overspanning van 120 meter. De constructie
bestaat uit een prisma tensegrity, waarbij
de buizen de drukelementen zijn en de
kabels de spanningselementen. De brug
bevat ook zonnepanelen om de energie voor
de LED-verlichting te leveren (Arup, 2009).



Figuur 2.15
David Georges Emmerich, "Mât antiprismatique 3B monogyre" (Emmerich D. G.)

I n t e r v i e w o n d e r z o e k

Tensegrity ervaringen

Deelvraag 2 Wat voor adviezen hebben experts die ervaring hebben met tensegrity?

3.1 Michael van
Telgen / Arcadis
Rotterdam /
Constructeur
25 – 03 – 2019

1. *Wat voor projecten heeft u aan
gewerkt waarbij tensegrity is toegepast?*

Afstudeerproject: Parametric design
and calculation of circular and elliptical
tensegrity domes
Voorgespannen kabel wielconstructie. Dat
fietswiel was zoiets als Buckminster Fuller.
Doel van me afstuderen was als je geen
cirkelvormige plattegrond hebt, maar een
ovaalvormige plattegrond en wat dan de
gevolgen waren van de spanningen in de
constructie.
Grote Marktstraat (Den Haag) - Octatube :
tensegrity kunstwerk
Twee verschillende soorten elementen
in de winkelstraat, een soort kunstwerk
opgehangen tussen gebouwen. Een soort
wolk van een driepoot die in verschillende
richtingen uitwaaid. Uiteindelijk is
het vanwege de brandveiligheid niet
doorgegaan.
Gelders Huis (Arnhem) – Octatube :
tensegrity vierkant met glas dat de
binnenplaats overkoepelt

2. *Wat waren vooral uw struikelblokken
tijdens het proces met tensegrity begrijpen
en realiseren?*

Begrijpen zat voor mij vooral bij de

vormgeving, want dit is best lastig.
Het komt tot deze vorm (maquette die
we hadden meegenomen), door deze
verhouding van staven en kabels met
deze voorspanning erin, maar als ik hem
verander wordt het een hele andere vorm.
Het is best wel een secuur systeem en als
je één ding verandert, dan veranderen
alle dingen mee. Dat maakt het voor een
bouwer best wel lastig om te begrijpen. Er
zijn wel adviseurs bijvoorbeeld Arup die heel
mooi uit hun computer weten te toveren
hoe het in de eindvorm vormgegeven
zou moeten zijn en wat de bijbehorende
voorspanningen zouden zijn. Maar als je
als architect zou eisen dat een staaf een
bepaalde marge zou hebben, dan kom je
in een soort van papieren werkelijkheid
terecht waarin je nooit zo'n constructie
kan maken. Omdat het eigenlijk een
soort kunstvoorwerp is en niet zozeer een
vormvast systeem.
De meest begrijpbare tensegrity's die ik
heb gezien, zijn eigenlijk toch die meer in
het vlak liggen en onafhankelijk van zijn
buren iets zou kunnen doen. Bijvoorbeeld
het Gelders huis, de effecten naar de burens
toe zijn daarbij niet zoveel. Integendeel tot
jullie project zijn de effecten in 3D, oftewel
in alle richtingen.
De vervorming van de tensegrity was vooral
een struikelblok

3. *Met wat voor tensegrity heeft
u gewerkt en wat hield dit in? Evt.
membranen?*

Circulaire en ovalen koepel tensegrity, zoals
Buckminster Fuller.

4. *Hoe was het proces van de uitvoering
van tensegrity? Wat was er anders dan bij
normale staalbouw processen?*

Niet betrokken geweest bij de uitvoering.
Het staal zal op lange termijn relaxeren,
hierdoor moet je de kabels opnieuw
voorspannen. Op lange termijn zal daardoor
de vorm beetje inzakken, hier moet je
rekening mee houden bij de uitvoering.
Stijfheid van het materiaal is hierbij heel
belangrijk.

5. *Wat had u willen weten voordat u met
tensegrity ging werken, zodat het proces
makkelijker zou zijn?*

Dat het een best complex systeem is en dat
alles van elkaar afhankelijk is. Bijvoorbeeld
dat postelastieken voor de maquette na
een tijdje uitdrogen en afbreken. Het
is belangrijk om het systeem goed te
begrijpen voordat je er mee kan ontwerpen.

*Heeft u tips voor ons project? Evt
detaillering uitvoering?*

Houdt rekening met de vervorming van de
units onderaan de toren. Het gewicht die de
onderste unit moet dragen is zwaarder en
hierdoor zal de vervorming groter zijn dan
de bovenste units. Houd hiermee rekening
voor het beeld dat je voor ogen hebt. Als je
beetje pech hebt zouden de staven elkaar
kunnen aanraken door de vervorming.
Houdt hiermee rekening want wanneer ze
elkaar aanraken is het geen pure tensegrity
meer.

3.2 Mariëlle
Rutten / Arup
Amsterdam /
Constructeur
03 – 04 – 2019

1. *Wat voor projecten heeft u aan
gewerkt waarbij tensegrity is toegepast?*

Afstudeerproject: Pneu-Tensegrity,
tensegrity-constructies in combinatie met
pneumatisch voorgespannen elementen als
onderdeel van de hoofd draagconstructies.
Een opblaasbare tent constructie. De tent
constructie is berekend en de knooppunten
zijn gedetailleerd. Onderzocht wat de
werking is van pneu-tensegrity constructies.
Voorgespannen kabel wielconstructie. Dat
fietswiel was zoiets als Buckminster Fuller.
Doel van me
Grote Marktstraat (Den Haag) - Tensegrity
kunstwerk
Twee verschillende soorten elementen
in de winkelstraat, een soort kunstwerk
opgehangen tussen gebouwen. Een soort
wolk van een driepoot die in verschillende
richtingen uitwaait.

2. *Wat waren vooral uw struikelblokken
tijdens het proces met tensegrity begrijpen
en realiseren?*

Er was vooral wat struikelblokken bij
het proces van de Grote Marktstraat.
Dit project bestond uit een constructie
die best complex was in zijn geheel.

Dit project is niet uitgevoerd vanwege de uitvoeringsproblemen, maar ook de kosten voor dit project was te hoog. Ook de vervormingen die voorkwam in dit kunstwerk was complex. Alles moest op de juiste manier worden berekend, zodat de vervormingen niet te groot waren. De vorm en voorgespannen kabels was hierbij zeer belangrijk. Om dit project beter te begrijpen hadden we van het kunstwerk een maquette gemaakt. Hierbij las de focus op de knoopverbindingen. Dit was een grote uitdaging in dit project. De knoopverbindingen had ik gemaakt door middel van kroonsteentjes.

3. *Met wat voor tensegrity heeft u gewerkt en wat hield dit in? Evt. membranen?*

Voor mijn afstudeerverslag had ik gewerkt met pneu-tensegrity en hierbij was het de bedoeling dat ik een tent had ontworpen voor een festival en daarbij bestond de constructie uit een pneu-tensegrity. Ik heb voor dit project ook een bepaald knooppuntdetail ontworpen. De bedoeling was dat de tent in zijn geheel geplaatst kon worden door het op te blazen met lucht. De knooppuntdetails was hiervoor dan speciaal ontworpen. Moeten jullie maar in mijn verslag kijken om het detail te zien. Overigens had ik voor de tent ook membranen toegepast. Voor dit had ik een aparte studie gemaakt. Bij de Grote Marktstraat was de "normale" tensegrity toegepast.

4. *Hoe was het proces van de uitvoering van tensegrity? Wat was er anders dan bij normale staalbouw processen?*

Bij mijn afstudeerverslag was de uitvoering anders dan anders. Ik had de focus gelegd op een constructie die in zijn geheel kan worden geplaatst en dit wordt niet vaak gedaan in de bouwwereld. Ik wilde de tent in 1 keer opblazen. Hiervoor had ik dus een knooppuntdetail ontworpen. Dit proces heeft een tijd geduurd, want ik had hiervoor veel literatuuronderzoek gedaan.

5. *Wat had u willen weten voordat u met tensegrity ging werken, zodat het proces makkelijker zou zijn?*

Alles wat ik hiervoor zei. Als ik dit had geweten had ik mijn stappen wellicht anders aangepakt.

Heeft u tips voor ons project? Evt. detaillering uitvoering?

Jullie ontwerp ziet er mooi uit en de gedachte erachter is ook goed bedacht, alleen bestaat het paviljoen nu uit tensegrity units die op elkaar zijn gestapeld. De drukstaven raken elkaar aan en het is juist mooi als dat niet gebeurt. Probeer dit ontwerp nog aan te passen, want het zou leuk zijn als jullie ontwerp ook echt bestaat uit een pure tensegrity constructie. Overigens moeten jullie je ook richten op de verbindingen van de units. Hoe willen jullie namelijk alles met elkaar verbinden.

3.3 Arjan Habraken /
TU Eindhoven /
SIDstudio /
Constructeur /
Hogleraar
12 - 04 - 2019

1. *Wat voor projecten heeft u aan gewerkt waarbij tensegrity is toegepast?*

Gelders Huis (Arnhem) – Tensegrity-constructie met 29 etfe-kussens. Het Gelders Huis in Arnhem werd in 2016 gerenoveerd en uitgebreid. De binnenhof werd overkapt. De dakconstructie bestaat uit een tensegrity systeem waarvan de drukstaven schuin staan en richten naar het centrum van de binnenhof. De tensegrity van dit dak bestaat uit een synclastisch (opblaasbaar, kromming) boven- en onderkabelnet. Ik heb met een team deze dakconstructie berekend en de detaillering ervan ontworpen. Grote Marktstraat (Den Haag) - Tensegrity kunstwerk

2. *Wat waren vooral uw struikelblokken tijdens het proces met tensegrity begrijpen en realiseren?*

Er was vooral wat struikelblokken bij het proces van de Grote Marktstraat. Dit project was wel een eyeopener, want dit had wel een hele hoge complexiteit vanwege het koppelen van de elementen en dat de interne krachtswerking veranderd per element. Dat betekent dat elk element

eigenlijk anders reageert, maar die elementen reageren ook weer op elkaar. Dus het is een heel complex interactief proces. Het is een kip en ei verhaal. De een verandert de andere weer en dit verandert de andere weer, dus het is een heel complex geheel en daardoor worden architecten ook wel een beetje gek van, want je kan niet zomaar zeggen van ach ik verander 1 kabel wel qua positie maar dit gaat niet. Dan moeten alle kabels weer gecoördineerd worden, want alles reageert met elkaar. Het is namelijk 1 geheel.

3. *Met wat voor tensegrity heeft u gewerkt en wat hield dit in? Evt. membranen?*

Tensegrity dakconstructies, alles wordt dan in een horizontale richting verbonden. Bij het ontwerp van jullie zie ik dat jullie tensegrity units willen bouwen waarbij die verbonden zijn in de verticale en horizontale richting. Dat wordt bijna niet toegepast. Overigens werd bij de dakconstructie in Arnhem wel membranen toegepast en dat zijn die etfe-kussens. De dakbelasting op de etfe-kussens worden grotendeels afgedragen op de drukstaven in het dak.

4. *Hoe was het proces van de uitvoering van tensegrity? Wat was er anders dan bij normale staalbouw processen?*

Een aantal onderdelen werd tijdens de uitvoering in zijn geheel uitgevoerd. Zo werd het kabelnet met de drukstaven in zijn geheel opgehesen en verbonden aan de etfe-liggers.

5. *Wat had u willen weten voordat u met tensegrity ging werken, zodat het proces makkelijker zou zijn?*

Alles wat ik hiervoor zei. Als ik dit had geweten had ik mijn stappen wellicht anders aangepakt.

Heeft u tips voor ons project? Evt detaillering uitvoering?

Jullie hebben een best complex ontwerp. De grootste uitdaging is om de units in een horizontale en verticale richting te verbinden. Één richting is al best complex en jullie willen in twee richtingen de units verbinden. Dit is best wel een zeer grote uitdaging voor zo'n korte periode. Wat ik zou doen is dat jullie je gaan richten op één richting verbinding. Probeer dan eerst de verticale verbinding. Als er nog tijd is voor een horizontale verbinding kan je die doen en dan kan je beide richtingen combineren, maar probeer maar eens die verticale richting uit te werken. Als dit jullie lukt ben je al aardig op weg. Overigens zijn de units van jullie op elkaar gestapeld. Je krijgt dan horizontale kabels die een grote drukkracht moeten opnemen. Probeer dit te vermijden i.v.m. de vervormingen die op zullen treden. Kijk eens naar de toren van Kenneth Snelson. Jullie hebben namelijk torens in het paviljoen zitten.

P r o c e s o n d e r z o e k

P r o c e s e v a l u a t i e

Deelvraag 3 Wat blijkt uit voorgaand onderzoek belangrijk te zijn voor architecten en constructeurs die voor het eerst met tensegrity werken?

4 . 1 A r c h i t e c t e n

Allereerst is het belangrijk om te weten waarom er voor tensegrity gekozen is. Tensegrity is een systeem dat weinig toegepast wordt en hierdoor is er weinig ervaring met tensegrity in de bouwwereld. Weinig ervaring betekent meer risicofactoren. Daarom is het belangrijk om een duidelijke reden te hebben voor het kiezen van tensegrity, zo kan er ook beter gecommuniceerd worden met de client en uitvoerder.

Begrijpen

Tensegrity systemen werken niet zoals kolommen en balkconstructies. Om een simpel voorbeeld te geven wordt er gekeken naar een bakstenen muur. Losse elementen worden gestapeld en verbonden met cement. Als één baksteen afbreekt, zal er niet veel gebeuren. De bakstenen kunnen in elk gewenste vorm geplaatst worden, zolang de bakstenen stabiel op elkaar blijven liggen.

Een tensegrity constructie werkt heel anders. Wanneer er ook maar één kabel of staaf breekt, zal de gehele constructie in elkaar storten. Dit kan voorkomen worden door meerdere kabels te verbinden aan een staaf, zodat het krachtenspel meerdere opties heeft. Het grootste verschil is dat de vorm van de tensegrity constructie vervormt. Het is een geheel dat als een geheel reageert op externe krachten. Hierdoor is het belangrijk dat tijdens het ontwerpproces rekening wordt gehouden

met de mogelijke vervormingen in de constructie. Om hier rekening mee te houden is het belangrijk om te begrijpen hoe de vorm van het tensegrity systeem vervormt.

Doel van ontwerp

Het doel van een ontwerp is altijd belangrijk geweest. Zo is dit ook zo wanneer er met tensegrity ontworpen wordt. De reden waarom het doel hier beschreven staat is, omdat ontwerpen met tensegrity lastig is door de vervormingen in het systeem. Hierdoor kan de architect gemakkelijk overspoeld worden door vervormingen die niet in het ontwerp horen. Het is daardoor makkelijk om het originele doel over het hoofd te zien. Daarom is het extra belangrijk om het doel van het ontwerp niet uit het oog te verliezen.

Ontwerpen

Er zijn verschillende vormen en varianten in tensegrity systemen. Het is goed om een vormstudie te maken van één tensegrity vorm waarmee de architect wilt ontwerpen. Deze vormstudie kan het beste gemaakt worden door zelf maquettes te maken. Zo wordt er voorkomen dat het ontwerp overspoeld wordt door mogelijkheden waar de architect weinig ervaring mee heeft. Afhankelijk in hoeverre de architect zijn ontwerp absoluut wilt houden, is het altijd goed om samen met de constructeur aan tafel te zitten om de mogelijkheden van het ontwerp te bespreken. Zo worden mogelijke constructieve problemen meteen aangepakt en mogelijk versimpelt in het ontwerp.

4 . 2 C o n s t r u c t e u r s

Begrijpen

Als een architect een tensegrity model heeft ontworpen is het aan de constructeur om dit constructief uit te werken. Het model moet namelijk zijn vorm behouden, dus zal de vervorming een belangrijke rol spelen. Sommige kabels moeten voorgespannen worden en om dit te bepalen kan dit het beste uitgewerkt worden in een rekenprogramma, want zo kan een programma precies de krachten weergeven in zo'n voorgespannen kabel en de vervorming is ook gelijk te zien. Voordat een model wordt uitgewerkt in een rekenprogramma, is het eerst verstandig om van het model een maquette te maken. Aan de hand van de maquette kan al globaal worden bekeken wat de vervorming wordt als een bepaalde staaf een drukkracht krijgt.

Ontwerpen

Als de architect een vorm heeft uitgewerkt is het aan de constructeur te bepalen welke knoopverbindingen een tensegrity model moet krijgen. Voor de constructie is de verbinding tussen een staaf en een kabel een belangrijk onderdeel. Om een geschikt detail te ontwerpen voor het desbetreffende ontwerp, is het verstandig om eerst onderzoek te verrichten naar de mogelijkheden van verbindingen die bedoeld zijn voor tensegrity. Soms kan een bepaalde knoopverbinding niet esthetisch genoeg zijn en dit zal dan in goed overleg met de architect moeten gebeuren. Een detail moet

voldoen aan de wensen van de architect.

Communicatie met de architect en aannemer

Het is van belang om tijdens het reken- en ontwerpproces goed te communiceren met de architect, want de vervormingen die optreden moeten wel naar wens gebeuren en het ontwerp van het knooppuntdetail moet ook voldoen aan de wensen van de architect. Goede communicatie is dan een noodzaak. Als er een tensegrity constructie wordt gebouwd zal dit voor de aannemer vast een grote uitdaging worden. De meeste aannemers hebben geen ervaring met deze constructie. De aannemer kan hierdoor komen met veel vragen en is het aan de constructeur om dit goed te beantwoorden. Ook is het misschien raadzaam om langs te gaan op de bouwplaats. Goede communicatie is hierbij dan ook vereist.

C o n c e p t o n t w e r p
p a v i l j o e n

H e t O n t w e r p

Deelvraag 4 Hoe ziet het conceptueel ontwerp van een paviljoen waar -
bij de methode tensegrity systems is toegepast eruit?

5 . 1 C o n s t r u c t i e v e o n d e r b o u w i n g

In het vorige kopje is uitgelegd wat voor vorm het paviljoen krijgt. Het paviljoen bestaat uit allemaal dezelfde units en deze hebben alle een simpele tensegrity vorm gekregen. Om de vorm van een unit te ontwerpen is er gekeken naar het architectonische aspect, maar ook het constructieve aspect. De vorm werd pas ontworpen, nadat er onderzocht werd hoeveel drukstaven er toegepast kan worden per unit. In dit hoofdstuk wordt besproken waarom er gekozen is voor een unit met vier drukstaven. Overigens komt er per unit een membraan en hiervoor is onderzocht welke membraan wordt toegepast. In de bijlage is het literatuuronderzoek van de membraan terug te vinden. Verder komt in dit hoofdstuk ook een variantenstudie naar voren. Vanuit deze variantenstudie is een keuze gemaakt voor de constructie van het paviljoen. Dit wordt dan door middel van beelden en tekst toegelicht. Voor de constructie zijn ook bepaalde berekeningen gemaakt. Deze berekeningen zijn terug te vinden in de bijlage. Tot slot wordt dit hoofdstuk afgesloten met een conclusie.

5 . 2 V e r s c h i l l e n d e t e n s e g r i t y m o d e l l e n

Tensegrity model met drie staven

Een tensegrity model met drie drukstaven wordt gezien als de eenvoudigste tensegrity model binnen de gehele tensegrity familie. Dit model heeft naast drie drukstaven ook negen trekstaven en het wordt ontworpen door de lengtes van de drukstaven gelijk te houden. De lengtes van de trekstaven worden ook gelijk gehouden (Motro, 2003).

Tensegrity model met vier staven

Een tensegrity model met vier drukstaven geeft meer interieur ruimte dan een tensegrity model met 3 drukstaven en doordat er meer trekstaven worden toegepast, geven deze extra staven het model een hogere stijfheid in alle richtingen (Motro, 2003).

Tensegrity model met vijf staven

Een tensegrity met vijf staven of meer wordt complexer om uit te rekenen. Het model is wel stijver, alleen is er wel minder interieur ruimte beschikbaar aangezien de staven dicht bij elkaar gaat liggen. Vlakke vormen is ook moeilijker te realiseren met vijf staven. Verder is een model met vijf staven ook moeilijker om te maken, er kunnen dan problemen ontstaan tijdens het bouwproces (Motro, 2003).

Conclusie gekozen model

Voor het ontwerp van het paviljoen is er gekozen voor een tensegrity model met vier drukstaven, want dit model heeft een

hogere stijfheid dan een model met drie drukstaven. Alleen is de stijfheid wel hoger bij een model met vijf staven of meer, maar om de stijfheid goed te realiseren is er een oplossing. Van een model met vier drukstaven kan één unit worden gemaakt en deze unit kan worden gedupliceerd in het ontwerp. Zo blijft de stijfheid dan toch nog gewaarborgd. Bij een model met vier drukstaven is er ook meer interieurruimte aangezien je vlakke vlakken kan maken. Verder is dit model ook makkelijker uitvoerbaar dan een model met vijf drukstaven (Motro, 2003).

5 . 3

M a t e r i a a l g e b r u i k

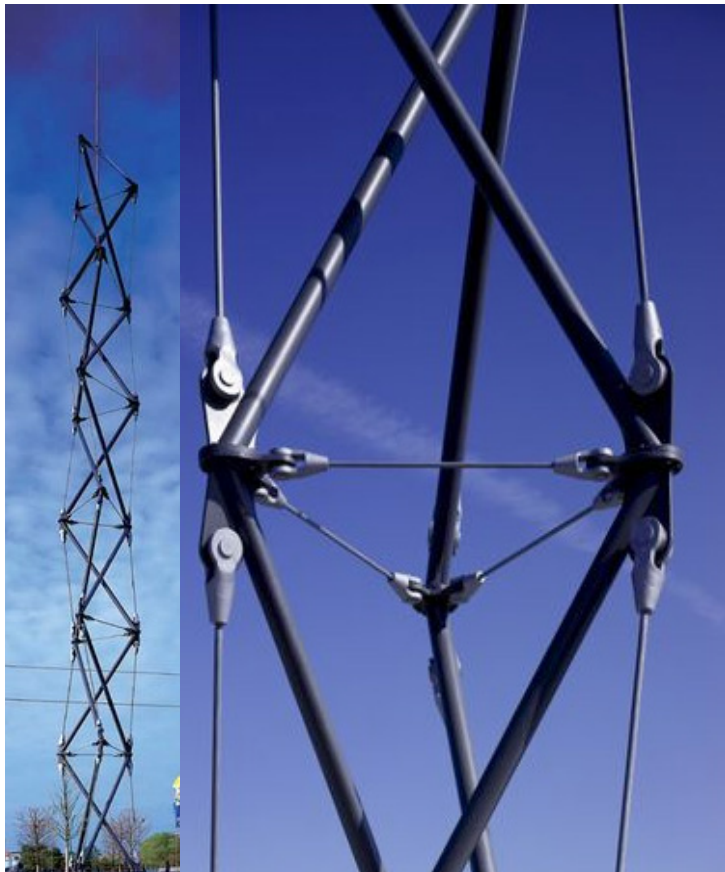
De materiaalkeuze van de units is bepaald aan de hand van een materiaalstudie. De materiaalstudie is terug te vinden in de bijlagen. De drukbuizen zijn van staal en de trekkabels zijn ook van staal. De basismaterialen worden toegepast bij de tensegrity units. Elke unit in het paviljoen krijgt ook op een driehoekige vlak een membraan. De membraan bestaat uit het materiaal PVC coated polyester fabric, want deze keuze is gemaakt vanuit de randvoorwaarden. Info over de verschillende soorten membranen en de randvoorwaarden zijn terug te vinden in de bijlagen.

5 . 4 S t a p e l i n g U n i t s

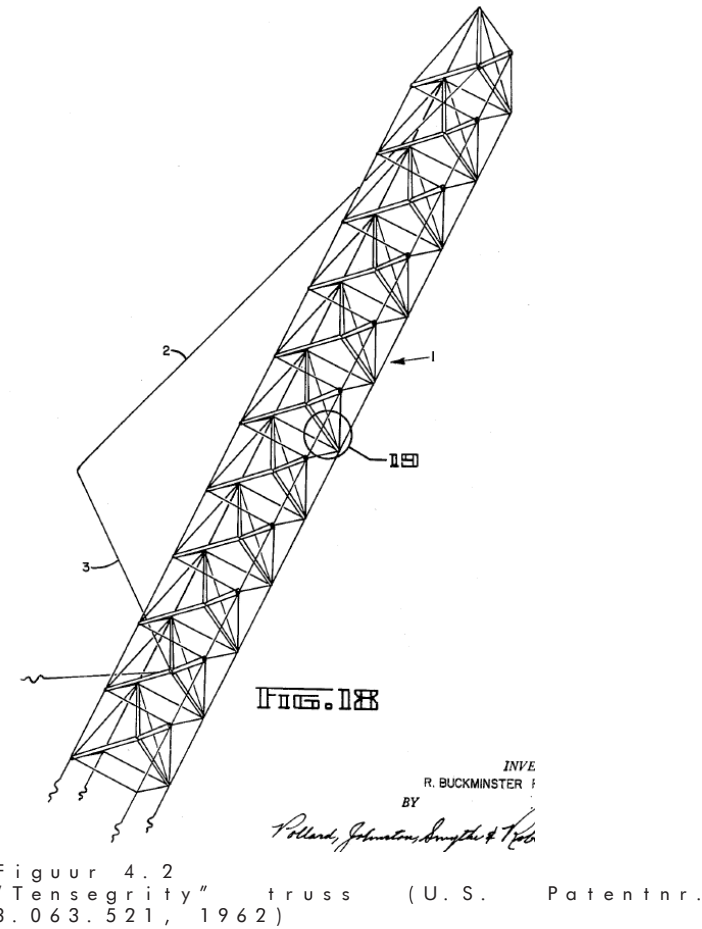
Het ontwerp van het paviljoen bestaat uit kleine 4-struts units die op elkaar gestapeld zijn. Bij de opstapeling raken de drukstaven elkaar niet, zo blijft het ontwerp een pure

tensegrity constructie. Alleen heeft zo'n constructie wel nadelen, want een drukstaaf komt in het midden van een horizontale kabel. Er komt dan een drukkracht op een horizontale trekkabel en moet dan onderzocht worden of dit wel mogelijk is. De constructie kan eventueel ook op een andere manier worden uitgevoerd, zoals die van Kenneth Snelson 'The Needle Tower' (zie figuur 2.13 deelvraag 1). Voor het paviljoen is dit alleen een nadeel, want deze vormgeving komt niet overeen met de architectonische gedachte voor het paviljoen. The Needle Tower begint onder breed en wordt steeds smaller naar mate het langer wordt, dit is niet de bedoeling voor het paviljoen. In dit onderzoek wordt dan onderzocht waarom de units niet op elkaar zouden kunnen worden gestapeld. De units kunnen wel makkelijk op elkaar worden gestapeld waarbij de constructie stabiel, stijf en sterk genoeg is, maar dan zouden de drukstaven elkaar aanraken (zie figuur 4.1) en dit is niet de bedoeling. Voor dit onderzoek ligt de focus op een klasse 1 tensegrity en niet op een klasse 2 tensegrity.

Via literatuuronderzoek is naar voren gekomen dat diverse onderzoekers ook een tensegrity toren had ontworpen waarbij de drukstaaf steunt op een horizontale kabel. Fuller had in zijn patent een toren ontworpen (zie figuur 4.2), alleen ondervond deze toren wel constructieve problemen. Tijdens het literatuuronderzoek zijn er meerdere beelden over dezelfde principe toren gevonden (zie figuren 4.3 en 4.4). Bij deze constructies zijn alle gebruik gemaakt van horizontale trekkabels en valt een drukstaaf daarop.



Figuur 4.1
Warnow tower, tensegrity klasse 2 (Jugger)



Figuur 4.2
"Tensegrity" truss (U.S. Patentnr. 3.063.521, 1962)

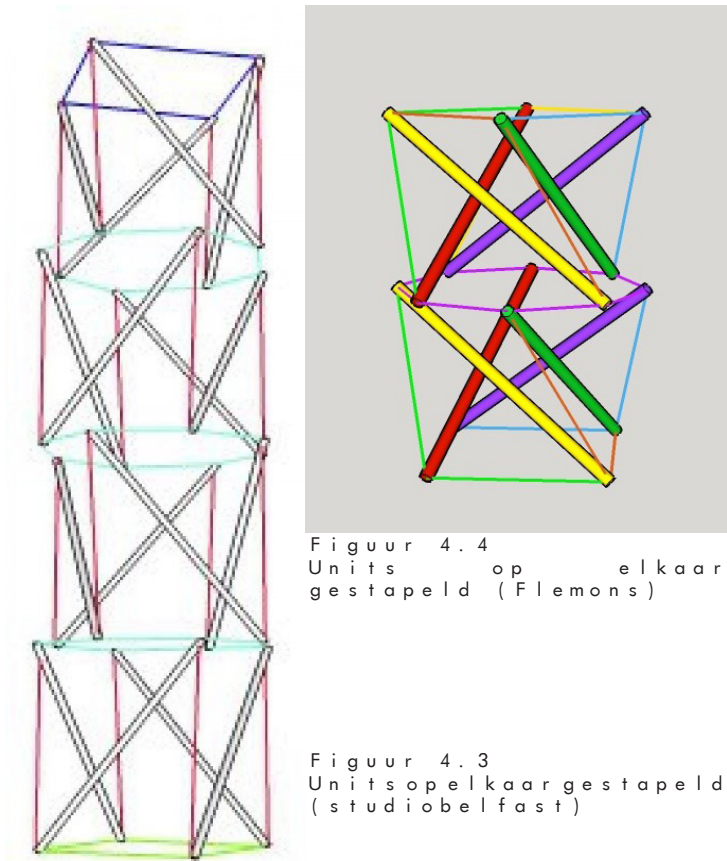
In figuur 4.5 is van het menselijk lichaam een tensegrity model gemaakt. In het ingezoomde deel is ook gebruik gemaakt van horizontale trekkabels. De opstapeling van de units in het paviljoen wordt dan verder onderzocht op het gebied van de constructie. De sterkte, stijfheid en stabiliteit wordt hierbij getoetst.

Om de juiste constructie te kiezen voor het paviljoen, is een variantenstudie gemaakt. In de variantenstudie zijn een aantal constructies uitgewerkt. Om de

constructie te berekenen is maar één verticale toren uitgewerkt van het paviljoen. Het gedrag van de toren is onderzocht. De variantenstudie is terug te vinden in de bijlage.

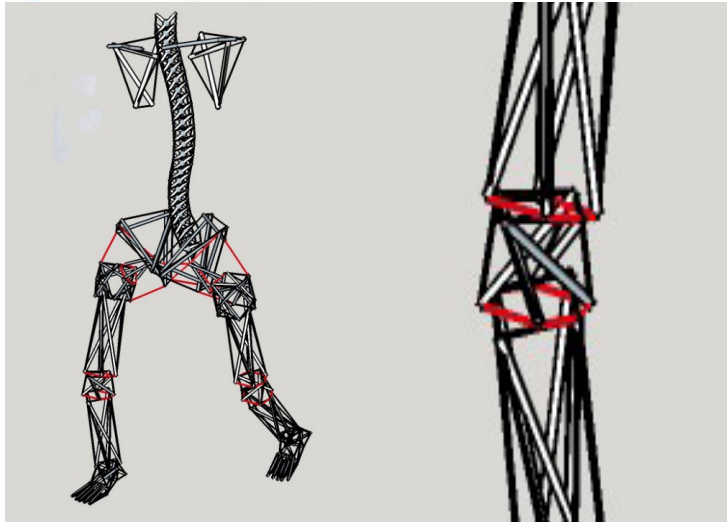
Bij alle varianten zijn de units 0,75 x 0,75 m. De materialen zijn ook allemaal hetzelfde. Er is een aanname gedaan, de drukbuizen hebben een diameter van 80 mm en de trekkabels een diameter van 10 mm. De aanname komt van het werk van Kenneth Snelson. In zijn boek "Kenneth Snelson: Art and Ideas" gebruikt hij vaak deze maten. Vanuit de variantenstudie is de 3e variant gekozen om verder uit te werken. Hierbij zal extra trekkabels moeten worden toegevoegd en zal de precieze windbelasting op de drukbuizen moeten worden berekend. Overigens komt er ook een membraan in elke unit. Dit wordt aan drie punten vastgemaakt, dus zal het voor de eenvoudigheid anders worden berekend dan normaal. In het programma kan de membranen niet worden ingevoerd, dus wordt het berekend als puntlasten. Op drie buizen komt dan elk één puntlast. Deze puntlast wordt met de hand berekend en de windbelasting is ook met de hand berekend. Deze berekeningen zijn terug te vinden in de bijlage.

Uit de variantenstudie is een keuze gemaakt en de keuze is gevallen op de 3e variant. Deze variant is alleen nu aangepast. In de volgende figuren staat de volledig uitgerekende tensegrity toren weergegeven.



Figuur 4.4
Units op elkaar gestapeld (Flemons)

Figuur 4.3
Units op elkaar gestapeld (studiobelfast)

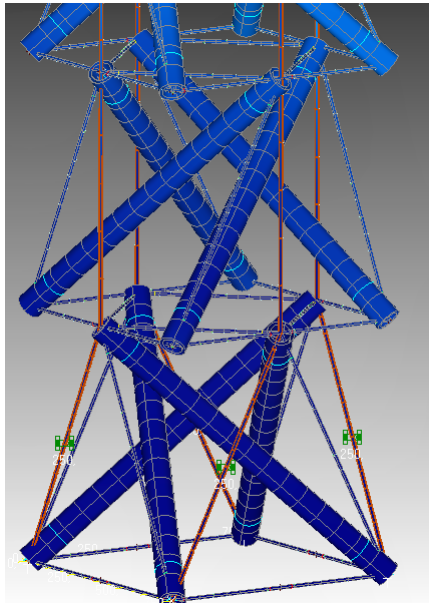


Figuur 4.5
Tensegrity model van het menselijk lichaam (Flemons)

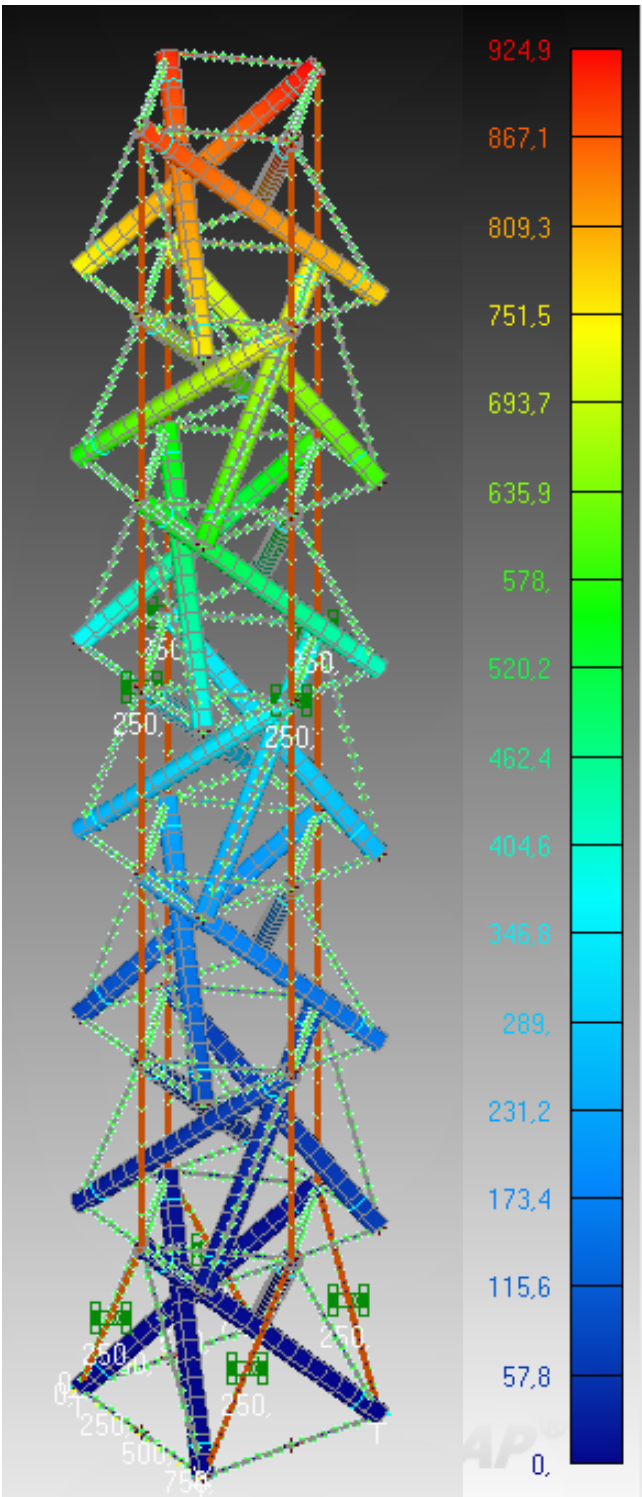
Bij deze tensegrity toren zijn alle voorkomende krachten berekend. Het eigen gewicht is, voorspannen kabels van 250 N, windbelasting op de drukbuizen en de puntlasten van de wind die ontstaan door de membranen.

Bij het eindresultaat is gebruik gemaakt van vier lang trekkabels en de onderste unit heeft vier trekkabels erbij gekregen. Zo wordt alle krachten naar beneden geleid en wordt het een stijve toren. De voorspanning in de staven is niet zo groot, want anders wordt het gebouw te stijf.

De vervorming is het minst bij deze voorspanning. Bij een grote voorspanning wordt de vervorming te groot, want de toren wordt te stijf en wordt het ook nog

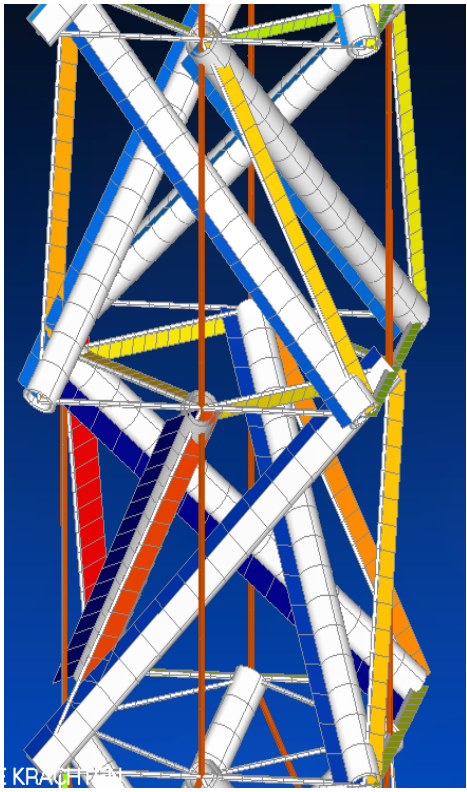


Figuur 4.6
Vervorming
tensegrity
toren

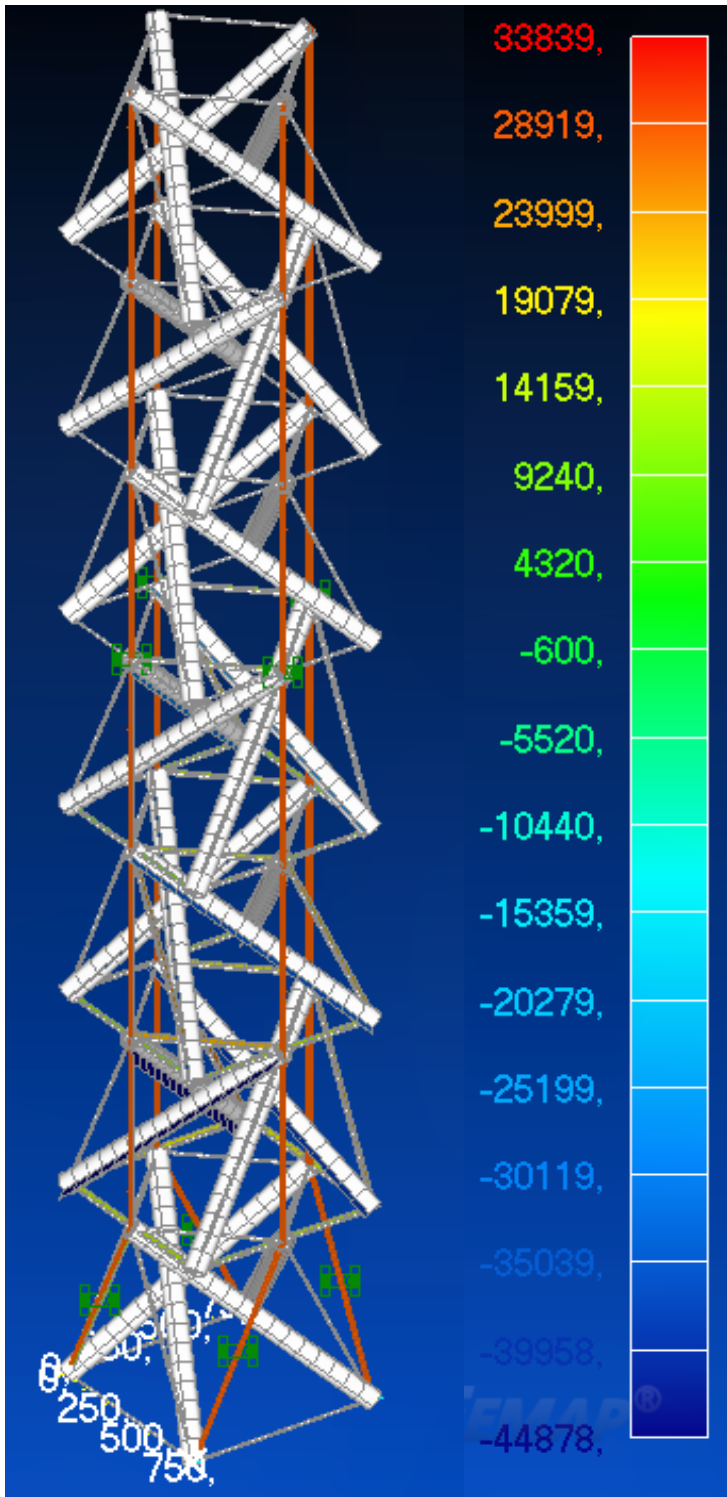


eens onstabiel. Wat wel geconcludeerd kan worden is dat vervormingen in het gebouw te groot is. In figuur 4.6 is een tabel te zien van de vervormingen. De vervormingen zijn gegeven in millimeters.

In figuur 4.7 zijn de axiale krachten van de verticale toren weergegeven. De axiale krachten in de horizontale kabels zijn niet groot. Verticale trekkabels nemen dus meer kracht op.



Figuur 4.7
Axiale krachten tensegrity toren



5.5 Conclusie constructie van het paviljoen

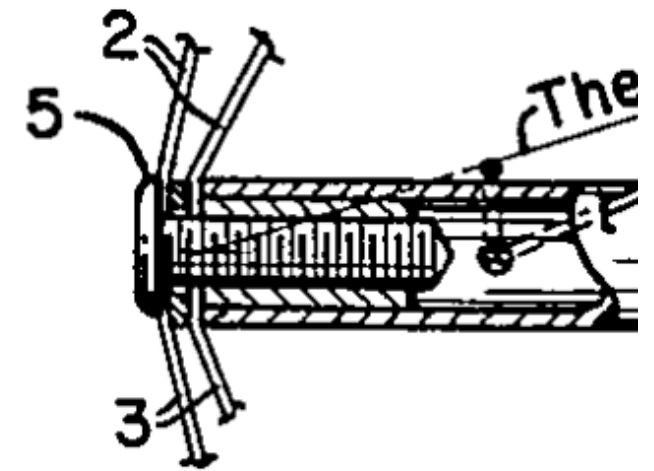
Wat uit de variantenstudie en de berekeningen van de definitieve gekozen variant geconcludeerd kan worden is dat een aantal aspecten nog nader moet worden onderzocht. Hiervoor zal dan nieuwe onderzoeken moeten worden verricht. De vervorming in het uiteindelijke ontwerp is te groot. De toren heeft een vervorming van maximaal 925 mm. Wellicht wordt deze vervorming wel minder aangezien het hele paviljoen bestaat uit meerdere tensegrity torens. De toren zijn dan ook samen verbonden in de horizontale richting. De vervorming kan dan minder worden, omdat de krachten worden overgedragen naar de andere torens. Het paviljoen is namelijk best compact en door al die torens kan de stijfheid worden verhoogd van het hele paviljoen. Overigens worden er ook nog eens best veel membranen toegepast in het paviljoen en de vervorming is juist groot geworden door de membranen. Zonder de membranen wordt de vervorming een stuk minder. Wellicht kunnen er ook minder membranen worden toegepast om de vervorming terug te brengen. Stel dat al deze maatregelen niet zou werken, dan zou er een andere oplossing moeten worden gezocht. Een andere oplossing kan zijn om een tensegrity klasse 2 uit te voeren. De drukstaven gaan elkaar dan aanraken, maar zo hoeven de horizontale kabels geen grote drukkrachten op te nemen en zo wordt ook nog eens de vorm van het

paviljoen behouden. De vervorming wordt dan waarschijnlijk een stuk minder als een tensegrity klasse 2 wordt toegepast. Een andere oplossing kan zijn om eventueel torens te maken die gebaseerd zijn op the needle tower van Snelson, alleen een nadeel hiervan is dat de gedachte van de vorm compleet verdwijnt en het is ook nog eens veel moeilijker uitvoerbaar. In dit onderzoek is namelijk het doel om de units zo gemakkelijk mogelijk met elkaar te verbinden en dat kan alleen door losstaande units te maken. Deze units worden dan op elkaar gestapeld op de bouwplaats. Om alles één voor één aan te sluiten, zoals Kenneth Snelson deed, is veel te complex voor het paviljoen, want er zijn zoveel staven en kabels. Een aannemer kan dan door het bos de bomen niet meer zien.

5.6 Detaillering

Architectonisch en constructief is het ontwerp voor dit onderzoek al onderbouwd, maar de laatste belangrijke stap is de detaillering van de tensegrity units. Na literatuurstudie is gebleken dat er over tensegrity veel informatie is te vinden over de vorm en het gebruik van het principe. Echter is er minder informatie te vinden over de manier om de kabels te verbinden aan de staven. De meeste verbindingen zijn terug te vinden in de octrooien van Fuller en Snelson. In dit hoofdstuk wordt bekeken welke soorten verbindingen er al bestaan voor tensegrity. De functies zoals de spanning van de kabels en instelbaarheid wordt behandeld in dit hoofdstuk. Aangezien

de units in het ontwerp een horizontale en verticale verbinding hebben, wordt in dit onderzoek alleen gericht op de verticale verbinding. Dit wordt gedaan omdat het al best een complex onderdeel is en gezien de korte onderzoeksperiode wordt er gericht op één verbinding. Ook wordt bij de verticale verbinding geen rekening gehouden met de extra stalen kabels die geplaatst moet worden, want het doel is om een detail te ontwerpen waarbij de units los van elkaar wordt gezien en men deze aan elkaar willen vastmaken. De resultaten van de bestaande verbindingen zal in een morfologisch schema komen en zo wordt er verbinding gekozen die van toepassing kan zijn op het paviljoen. De juiste verbinding wordt gekozen door middel van de randvoorwaarden die zijn opgesteld voor het ontwerp.



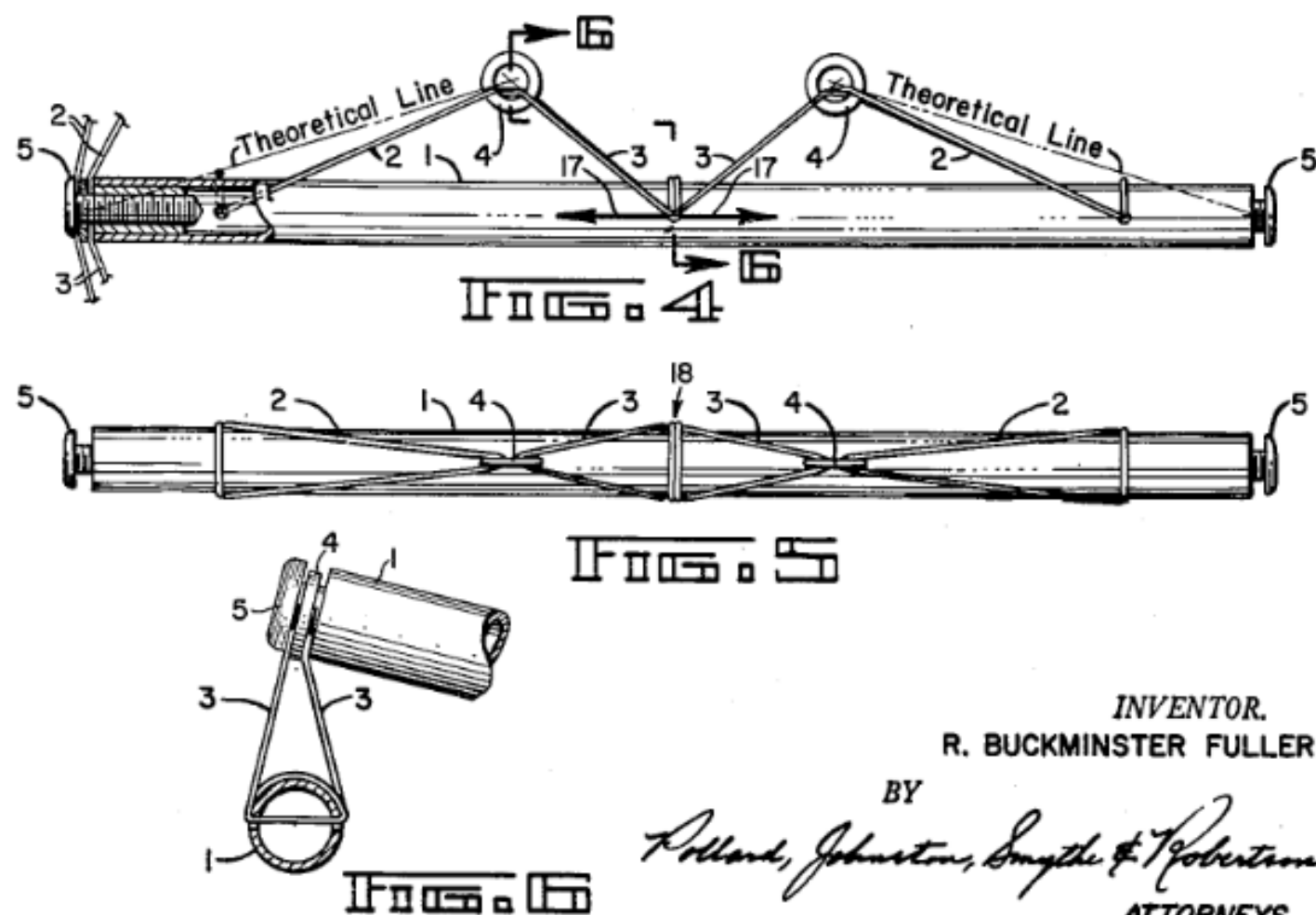
Figuur 4.9
Ingezoomde knoopverbinding
(Fuller B.)

5.7 Richard Buckminster Fuller

Buckminster Fuller was de eerste persoon die een octrooi had geschreven over een tensegrity knooppuntverbinding. In het octrooi "Tensile-integrity structures" van Fuller wordt één soort knooppuntverbinding getoond. In figuur 4.8 staat de knooppuntverbinding weergegeven. Fuller's knooppuntverbindingen werden alleen toegepast in geodetische koepels.

- 1 Drukelement (staaf) (zie figuur 4.1)
- 2 Spanelement (kabel)
- 3 Spanelement (kabel)
- 4 Sluitring (zie figuur 4.1)
- 5 Schroefdraad

Architectonisch en constructief is het ontwerp voor dit onderzoek al onderbouwd, maar de laatste belangrijke stap is de

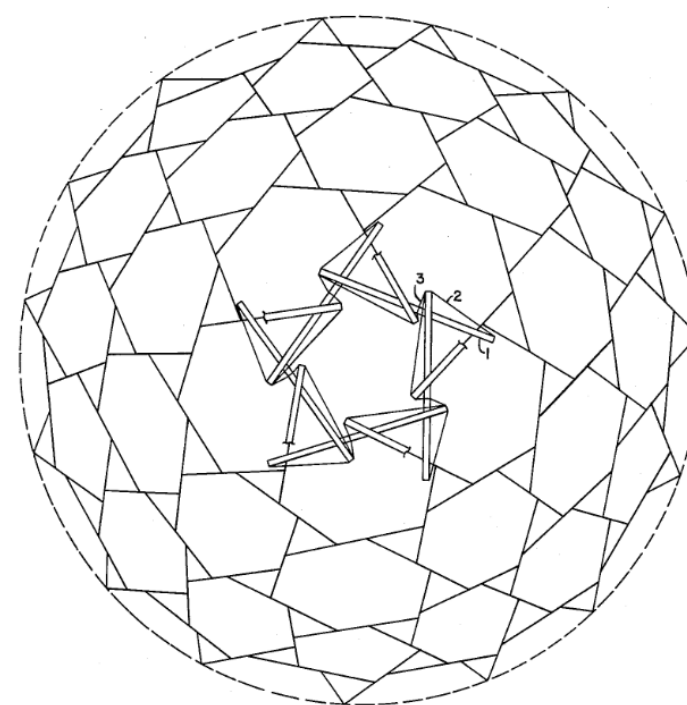


Figuur 4.8
Zij- en bovenaanzicht knoopverbinding
(Fuller B.)

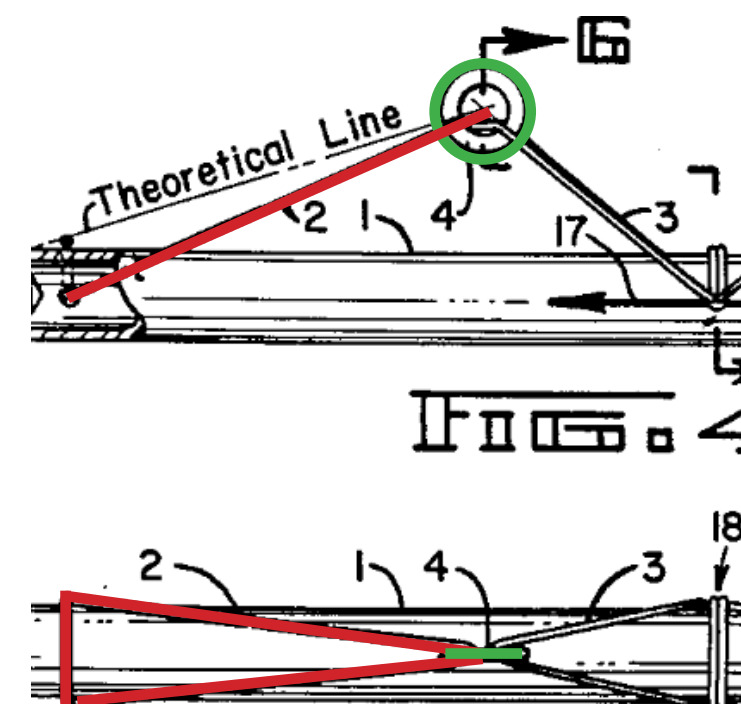
detaillering van de tensegrity units. Na literatuurstudie is gebleken dat er over tensegrity veel informatie is te vinden over de vorm en het gebruik van het principe. Echter is er minder informatie te vinden over de manier om de kabels te verbinden aan de staven. De meeste verbindingen zijn terug te vinden in de octrooien van Fuller en Snelson. In dit hoofdstuk wordt bekeken welke soorten verbindingen er al

bestaan voor tensegrity. De functies zoals de spanning van de kabels en instelbaarheid wordt behandeld in dit hoofdstuk. Aangezien de units in het ontwerp een horizontale en verticale verbinding hebben, wordt in dit onderzoek alleen gericht op de verticale verbinding. Dit wordt gedaan omdat het al best een complex onderdeel is en gezien de korte onderzoeksperiode wordt er gericht op één verbinding. Ook wordt

bij de verticale verbinding geen rekening gehouden met de extra stalen kabels die geplaatst moet worden, want het doel is om een detail te ontwerpen waarbij de units los van elkaar wordt gezien en men deze aan elkaar willen vastmaken. De resultaten van de bestaande verbindingen zal in een morfologisch schema komen en zo wordt er verbinding gekozen die van toepassing kan zijn op het paviljoen. De juiste verbinding wordt gekozen door middel van de randvoorwaarden die zijn opgesteld voor het ontwerp.



Figuur 4.8
Overzicht ontwerp van knooppunt
(Fuller B.)



Figuur 4.10
Rode lijn = 1 lange trekkabel met een lus
Groene lijn = sluitring
(Fuller B.)

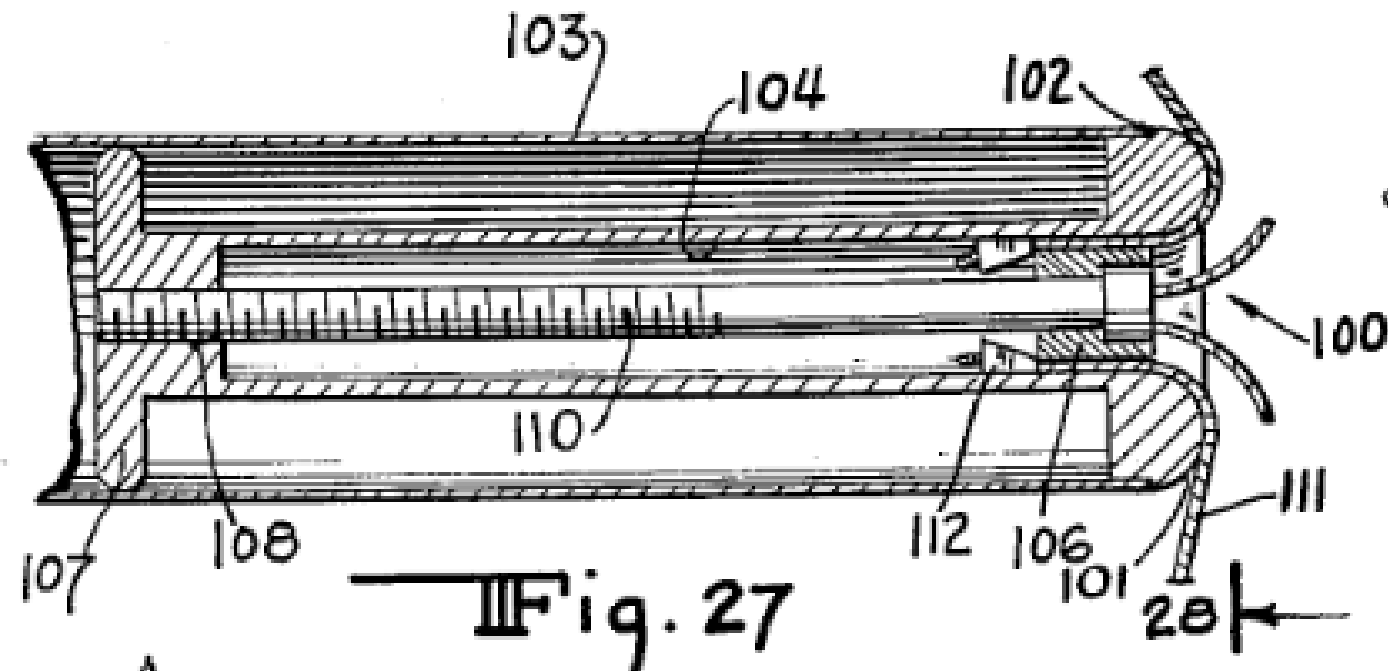
5.8 Kenneth Snelson

In het octrooi, "Continuous tension, discontinuous compression structures", van Kenneth Snelson worden twee soorten knoopverbindingen getoond voor een tensegrity model. De doorsnede en het bovenaanzicht van de eerste verbinding wordt getoond in de figuren 4.11 en 4.12. In het octrooi is een volledige beschrijving van de werking van de verbinding te vinden. Deze verbinding kan worden gebruikt om de drukelementen met elkaar te verbinden door middel van spanelementen. Het geheel vormt dan een soort traliwerk. In tabel 1 wordt beschreven wat de nummers in de figuren betekenen.

- 100 Knooppuntverbinding
- 101 Ringvormige, boogvormige lip
- 102 Schouder
- 103 Drukelement (staaf)
- 104 Axiale boring
- 106 Verschuifbaar inzetstuk
- 107 De onderkant van de knooppuntverbinding
- 108 Getapte gat (voor een draadtap)
- 110 Schroefbout
- 111 Spanelement (kabel)
- 112 Uiteinde Trek element (kabel)
- 113 Verzonken inbusbout

De knooppuntverbinding (100) is een afzonderlijk onderdeel dat in een drukelement (staaf) (103) wordt geschoven. Het is niet nodig om dit te bevestigen, omdat de spanelementen (111) het verbindingsstuk in het drukelement zal duwen. Aan de bovenzijde van de

verbinding worden de kabels (111) ingevoegd met een rond uitsteeksel aan het uiteinde (112). De schroefbout (110) kan in het getapte gat (108) worden geschroefd. De kabels worden gespannen door de schroefbout (110) aan te draaien. De kabels worden in het drukelement geduwd doordat het verschuifbare inzetstuk (106) in de axiale boring (104) wordt geschroefd. Alle kabeluiteinden (112) worden dan naar beneden gedrukt en zo blijft alles op zijn plaats en worden de kabels ook gescheiden gehouden. De inbusbout (113) heeft een verzonken kop waarin een inbusleutel past, zodat de bout kan worden aangedraaid. Bij deze knooppuntverbinding worden flexibele kabels geadviseerd, omdat ze een scherpe buiging maken over de boogvormige lip (101).



Figuur 4.13
3D-model tweede verbinding (Snelson)

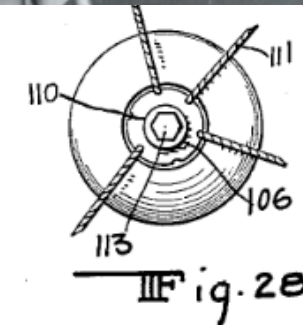
De tweede verbinding, in het octrooi van Kenneth Snelson, is een gemodificeerde verbinding van de eerste verbinding. De verbinding is gemaakt voor situaties waarbij de spanelementen niet hoeven te buigen, want het kan niet worden gebogen in een bepaalde hoek. Hierdoor is het mogelijk om sterkere stijvere kabels te gebruiken in deze verbinding.

In de tensegrity modellen van Snelson worden de gemodificeerde verbindingen (zie figuur 4.13) toegepast. Alleen heeft deze verbinding nog een upgrade gekregen, want er zit namelijk geen bout meer in. In zijn boek "Kenneth Snelson: Art and Ideas" wordt de moderne verbinding getoond (zie figuur 4.14).

Bij de moderne verbinding worden de verbindingen tussen de kabels en opzetstukken als eerst gerealiseerd. De drukelementen (staven) kunnen later worden geplaatst. Wel betekent dit dat de kabels eerst worden gemeten en op maat worden uitgesneden. Binnenin de opzetstukken zijn de gaten in de vorm van een schroefdraad voorzien. De gaten bestaan uit een inwendige schroefdraad. De staalkabels worden hierin dan vastgemaakt door middel van ovale hulzen die vastzitten aan het uiteinde van de kabel. De ovale hulzen kan door middel van een krimptang



Figuur 4.14
Moderne verbinding (Snelson, Art and Ideas)
ovale huis (soort balletje)



Figuur 4.12
Bovenaanzicht eerste verbinding voor een tensegrity model (Snelson)

worden vastgemaakt op de kabel. Een voorbeeld van de ovale huls is weergegeven in figuur 4.14 (zie rode cirkel). Om spanning aan te brengen op de kabels wordt een staalkabeltakel gebruikt.

5.9 Randvoorwaarden detail paviljoen

Om de juiste verbinding toe te passen bij het ontwerp van het paviljoen is er een onderzoek verricht naar de huidige oplossingen voor een tensegrity verbinding. Om een verbinding zo simpel mogelijk te houden zijn alleen de verbindingen van Fuller en Snelson onderzocht, omdat dit de basis is. Het paviljoen bestaat uit kleine 4-strut units en om het zo fijn mogelijk te houden moet de knoopverbindingen zo simpel mogelijk zijn. Voor dit onderzoek zijn een aantal randvoorwaarden opgesteld om een detail te ontwerpen die geschikt is voor het paviljoen.

Voorwaarden knoopverbindingen:

- Maximale diameter van 80 mm voor de drukbuis.
- Maximale diameter van 10 mm voor de staalkabels.
- Een maximum van vijf kabels verbinden aan de knooppunt.
- Esthetische knoopverbinding i.v.m. kleine units.
- Knoopverbinding maken die 1 unit in zijn geheel maakt, maar ook de units met elkaar verbindt in de verticale richting. Het wordt dan dus een soort 2-in-1 verbinding.

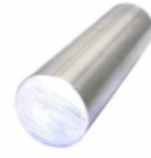
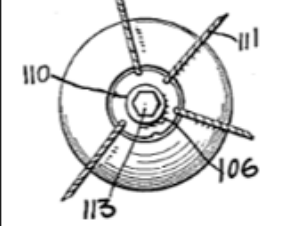
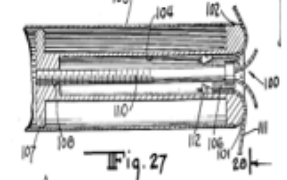
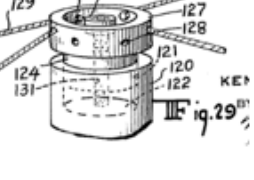
- Knoopverbinding zo simpel mogelijk houden. Snelson's verbinding als referentie gebruiken.
- Makkelijk uitvoerbaar

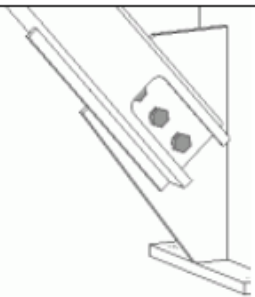
Om voor dit onderzoek een zo simpel mogelijk detail te ontwerpen is een mini-morfologische schema gemaakt. Hierin staan de basis tensegrity verbindingen in, met onder anderen die van Snelson. Aan de hand van dit schema kan een detail worden ontworpen die van toepassing is voor het paviljoen. De randvoorwaarden wordt dan getoetst aan de hand van het morfologische schema.

5.10 Morfologisch schema

Bij het maken van deze schema zijn de onderdelen van de details gebruikt van Snelson en Fuller.

Aan de hand van het bovenstaande morfologische schema is een detail ontworpen. Elke randvoorwaarde is getoetst en zo kwam er per kenmerk de beste oplossing uit. In het schema zijn de stappen weergegeven door middel van pijltjes.

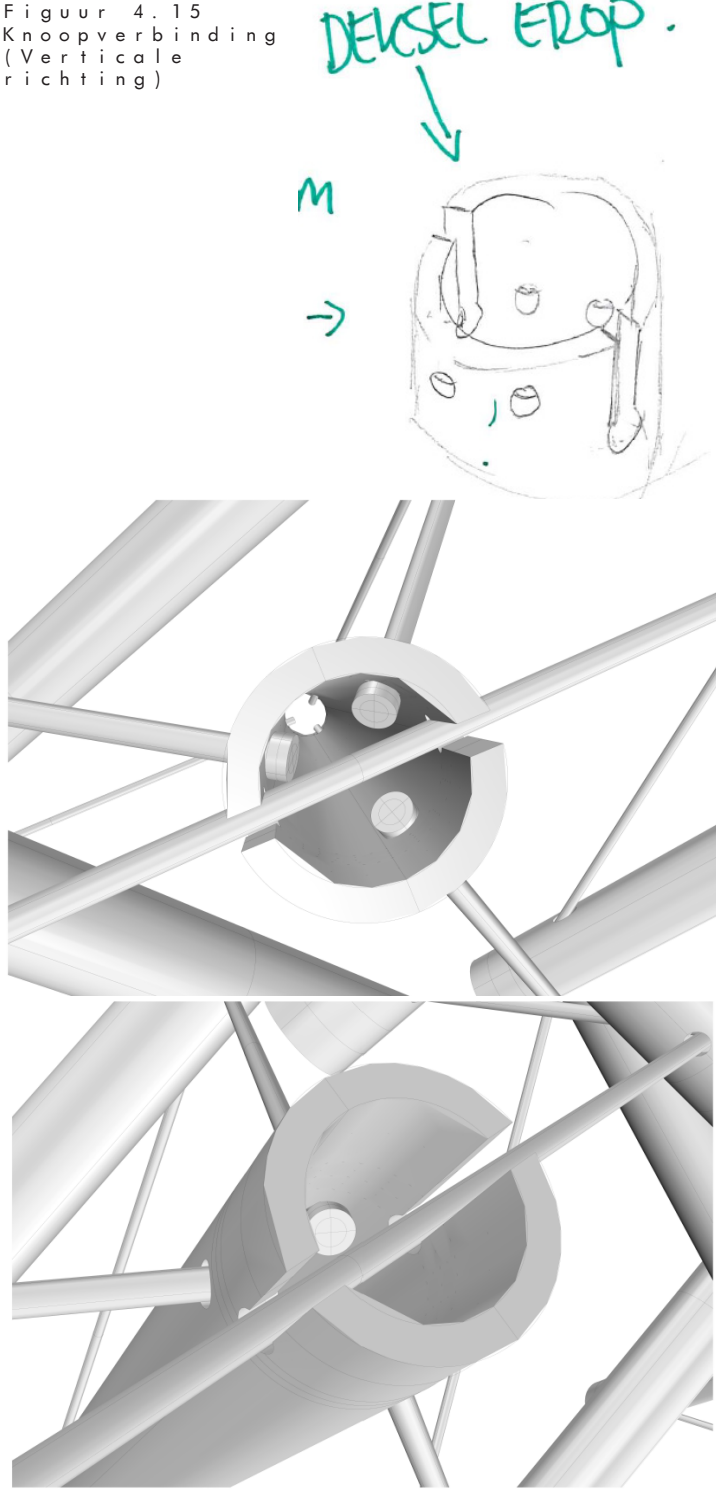
Kenmerken	Mogelijke oplossingen			
Vorm drukelement				
	Massieve staa	Holle buis		
Bovenkant drukstaaf				
	Holle opening	Ronde afdichting	Schroefdraad te zien aan de bovenkant	
Maximale kabel aansluiting	3 staven	4 staven	Meer dan 4 staven	
Kabel	Geknipt	Doorlopend		
Kabels aanspannen	Alle kabels	Enkele kabel		
Lengte staalkabel	Vast	Verstelbaar		
Verbinding	In het knooppunt	Op het knooppunt	Toevoeging aan het knooppunt	
Bevestiging kabel				
	Schroefbout	Moer	Staalkabel met lus	Schroefdraadhuls
Aanspanning				

	Staalkabeltakel	Draadspanner	Verschuifbare inzetstuk wordt naar beneden gedrukt.	Verschuifbare inzetstuk wordt naar boven gedrukt
Kabeluiteinde	Niks			
		Draaibare externe draad (opzetstuk)	Kabel huls	
Aansluiting kabel				
	Buis met gaten	Buis met sleuven	Buis met koppelplaten	

5.11 Concept knooppuntverbinding

Voor het paviljoen is een knooppuntverbinding ontworpen door middel van de uitkomsten vanuit het morfologisch schema. In figuur 4.8 is een schets weergegeven van het ontworpen detail. Vanuit de schets is een 3D-model getekend van het detail en beelden hiervan zijn ook terug te zien in figuur 4.15.

Toelichting detail
Het detail is bedoeld voor de verticale unit toren. Bij deze verbinding is rekening gehouden met de units die boven op elkaar worden gestapeld. Om de verticale toren zo gemakkelijk mogelijk uit te voeren zou het detail in figuur 4.15 het meest geschikt zijn, want door middel van dit detail wordt het een kliksysteem. Eerst wordt in een fabriek alle kleine units gemaakt en deze wordt dan vervoerd naar de bouwplaats. De verbindingen van de units zelf is gebaseerd op de verbinding van Kenneth Snelson. Per buis zitten drie gaten en hierin worden drie trekkabels vastgemaakt. De buis heeft wel al een verlengde stuk erop zitten en hierin zit twee sleuven. De eerste stap is dus de kleine units in de fabriek te maken. De vervolgstap is om al die units met elkaar te verbinden. De units worden in de tegengestelde richting van elkaar, op elkaar gestapeld. De horizontale kabel aan de onderkant van elke unit valt in de twee sleuven. Dit wordt vervolgens gedaan bij elke unit die op elkaar wordt gestapeld. De laatste stap is om alles netjes af te dichten.



Het is de bedoeling dat elke drukbuis een deksel krijg en dat deze deksel er ook voor zorgt dat de horizontale kabel niet uit de sleuven valt. De deksel is van staal en deze wordt op de drukbuis gedraaid. De bovenkant van de drukbuis bestaat uit een schroefring en zo kan de deksel, met de inwendige ringen, erop worden gedraaid. Het principe is dan net alsof men een pindakaas pot dichtdraait.

In figuur 4.15 is geen rekening gehouden met de aansluiting voor de membranen. De membranen werken niet constructief mee, dus kan de membranen aansloten worden onder de verbindingen van de kabels. De membranen worden dan aangesloten door middel van koppelplaten. In figuur 4.16 is een voorbeeld verbinding te zien van een membraan aansluiting door middel van een koppelplaat. De foto is afkomstig uit het boek "Membrane Structures" van Klaus-Micheal Koch en in dit boek zijn allerlei soorten verbindingen terug te vinden.

Verder is bij de knooppuntverbinding ook geen rekening gehouden met de eventuele extra kabels die bevestigd moet worden bij één toren. De knoopverbinding is dan ook op concept niveau uitgewerkt.



Figuur 4.16
Voorbeeld
membraan
aansluiting

5.12 Visie concept ontwerp - Cube in cube

Tensegrity is een onbekende bouwmethode, ondanks dat deze al meer dan 50 jaar bestaat. Het is een lichte bouwmethode geïnspireerd op de bouw tussen spieren en botten van mensen en dieren. Het kan met weinig materiaal grote overspanningen overbruggen.

Doel

De visie is om tensegrity toegankelijker te maken voor de bouwwereld. Door een paviljoen op het campus terrein van TU Delft te plaatsen worden studenten geïnspireerd met tensegrity. Zo is er ook een voorbeeld om te laten zien wat er mogelijk is met tensegrity. Het paviljoen zal de aandacht trekken op het campus, maar zal niet alleen dienen als een inspiratiebron.

Functie

Het paviljoen zal ook functioneren als een bijeenkomst locatie voor studenten, zoals kleine borrels, toespraken, presentatie momenten, ontspanningslocatie, lunchruimte etc. Het kan een openbare ruimte overdag zijn en in de avond als kleine feestzaal functioneren. De bedoeling is dat het een flexibele ruimte is die mensen bijeenbrengt onder de openlucht, maar met een semi open ervaring.

Ervaring

Het paviljoen zal zeilen bevatten die zoals bladeren van een boom schaduw bieden

en wind blokkeren, maar het zal geen duidelijke grens als binnen en buiten geven voor de gebruiker. Het zal een semi-open ervaring geven. Voorbijgangers kunnen hierdoor maar voor een deel zien wat er gebeurt in het paviljoen.

Wanneer iemand dichterbij komt zal die zien dat de constructiestaven van het paviljoen lijken te zweven tussen allemaal draden. In de eerste instantie zal iemand niet begrijpen hoe het paviljoen constructief stabiel staat, hierdoor ontstaat er verwarring. Met deze emotie zal er meer nieuwsgierigheid en interesse ontstaan voor tensegrity. Ook raken gebruikers beter bekend met het concept tensegrity.

Visueel

Het beeld dat het paviljoen zal geven is een semi transparante box. Het moet de indruk wekken alsof het half transparant is. Hierdoor zal het lijken alsof de box half oplost in de omgeving.

Als een voorbijganger voorbijloopt zal elke hoek naar het paviljoen ook een ander zicht geven aan wat er binnen in afspeelt. Hierdoor speelt het gebouw met het zicht van voorbijgangers en ook die van gebruikers. Dit wekt nieuwsgierigheid op en trekt voorbijgangers aan om dichterbij te komen om te kunnen zien wat er werkelijk afspeelt.

H e r k a n s i n g o n d e r d e l e n

Uit een eerdere conclusie was gebleken dat het eerste ontwerp van het paviljoen grote problemen met zich meebrengt. Bij dit ontwerp was een tensegrity constructie toegepast met de klasse 1, want dit wordt beschouwd als een pure tensegrity constructie. Het paviljoen bestond uit meerdere units en ieder unit bestond uit vier drukbuizen en 12 trekkabels. Deze constructie was dan berekend en daaruit was gebleken dat de constructie te veel vervormt met een veel te hoge waarde. Dit had te maken met de horizontale kabels in de constructie, want op deze kabels stonden drukbuizen en zo kwam er een hoge drukkracht op de horizontale kabel. Voor het paviljoen is de tensegrity klasse 1 dan niet geschikt. Om de constructie van het paviljoen te waarborgen, zal er een andere klasse tensegrity moeten worden toegepast.

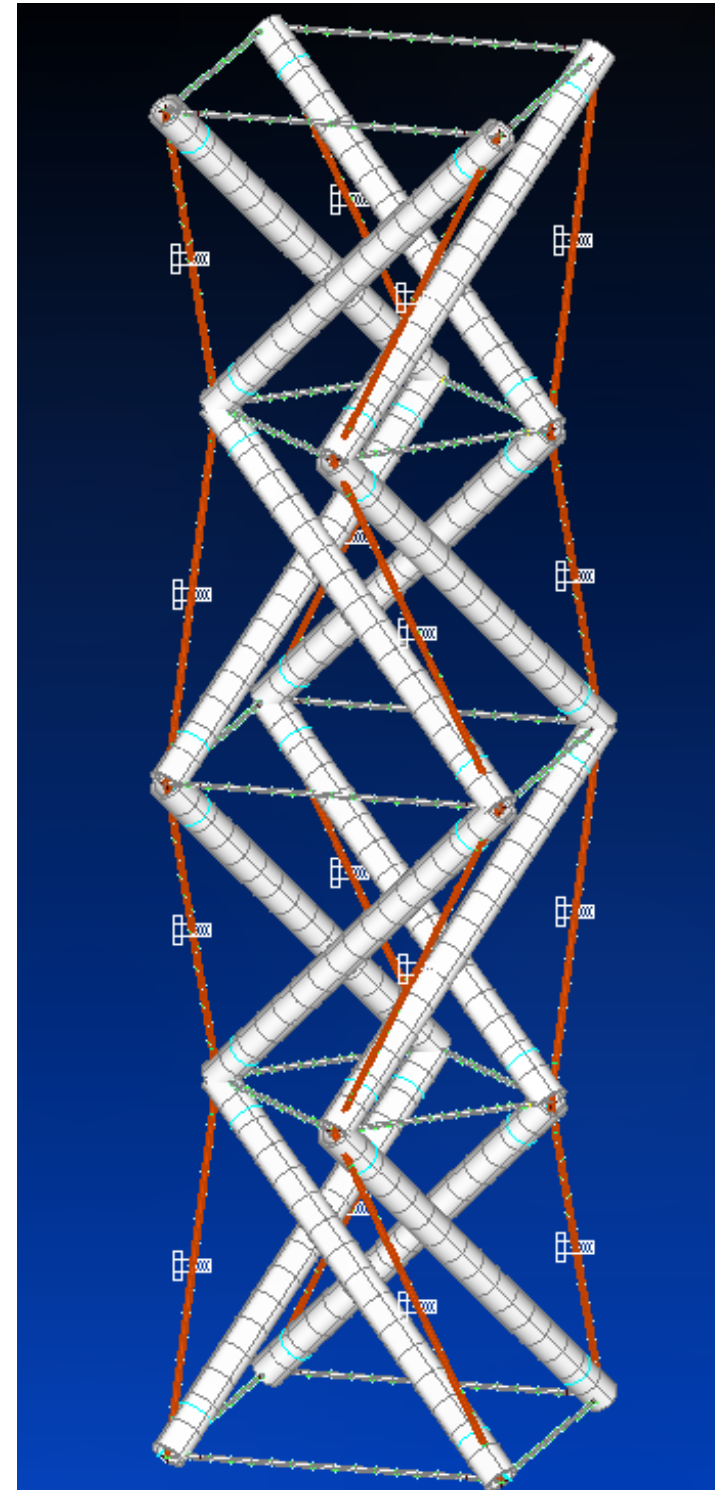
De vorm van het paviljoen moet worden behouden in verband met de architectonische visie, dus de units moeten hun vorm behouden en hiermee zal dus moeten worden gespeeld, zodat er een andere tensegrity klasse uitkomt.

De unit met de vier drukstaven wordt voor het nieuwe ontwerp weer gebruikt, alleen wordt het anders gepositioneerd. De units worden op z'n kop op elkaar gestapeld (zie figuur 1), waarbij de drukstaven elkaar aanraken. Nu komt er dus geen drukkracht meer op de horizontale kabel. De constructie heeft nu wel een geheel andere tensegrity klasse. De tensegrity klasse wordt bepaald door het aantal stijve elementen die elkaar aan één stuk door aanraken. In

figuur 1 raken vier staven elkaar aan 1 stuk aan, dus dat zou dan een tensegrity klasse 4 zijn, maar nou is dit maar een fragment. Het paviljoen bestaat namelijk uit 1098 units en deze raken elkaar, in het nieuwe ontwerp, aan in de verticale en horizontale richting. De drukstaven raken elkaar aan in de constructie per nieuwe unit, dus dan zou er kunnen worden gesproken van een tensegrity klasse 1098. Bij het nieuwe ontwerp is dan totaal geen sprake meer pure tensegrity. De constructie kan dan bijna worden beschouwd als een soort vakwerk.

Het doel is en blijft om tensegrity te onderzoeken en daarom wordt deze nieuwe klasse onderzocht. De vervorming in het oude ontwerp was namelijk maximaal 925 mm en dit moet in het nieuwe ontwerp flink worden teruggedrongen. In dit hoofdstuk wordt de constructie van het nieuwe ontwerp besproken op het materiaal gebruik, detaillering en de benodigde berekeningen.

Figuur 5.1
Fragment
paviljoen



6.1 Constructie verticale toren en horizontale ligger

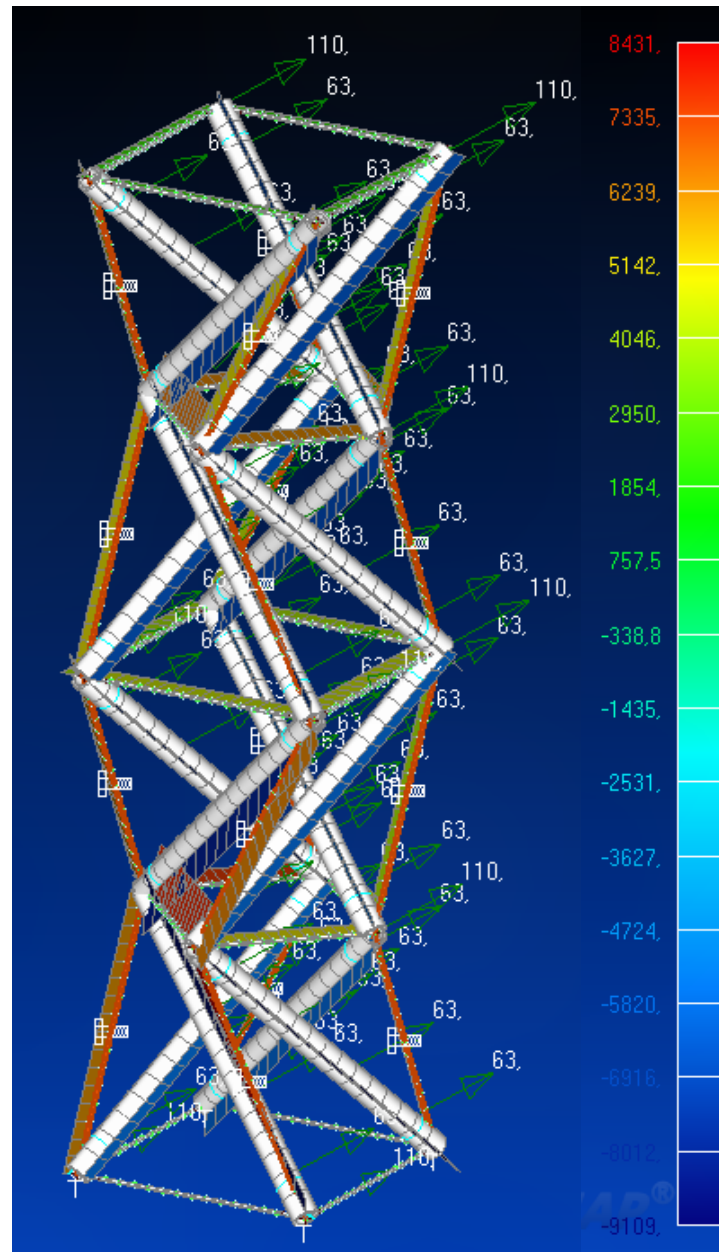
Het nieuwe ontwerp voor het paviljoen heeft een geheel nieuwe constructie en deze moet berekend worden. In het programma Femap zijn twee fragmenten berekend. De horizontale ligger (deel dakconstructie) en verticale toren (deel gevel) zijn berekend op de sterkte, stijfheid en stabiliteit. Om deze berekeningen te maken is er rekening gehouden met een stalen buis van 80 mm en een stalen trekkabel van 10 mm. Met deze maten was ook de constructie van het vorige ontwerp mee berekend. Zo zijn de verschillen op het gebied van de vervorming beter te zien. Er zijn twee modellen gemaakt met ieder vier units. Hieronder wordt ieder model beter uitgelegd op basis van afbeeldingen.

In figuur 5.2 ziet u het model van de verticale toren. Hierop zijn de axiale krachten berekend. De krachten wat op dit model komt is:

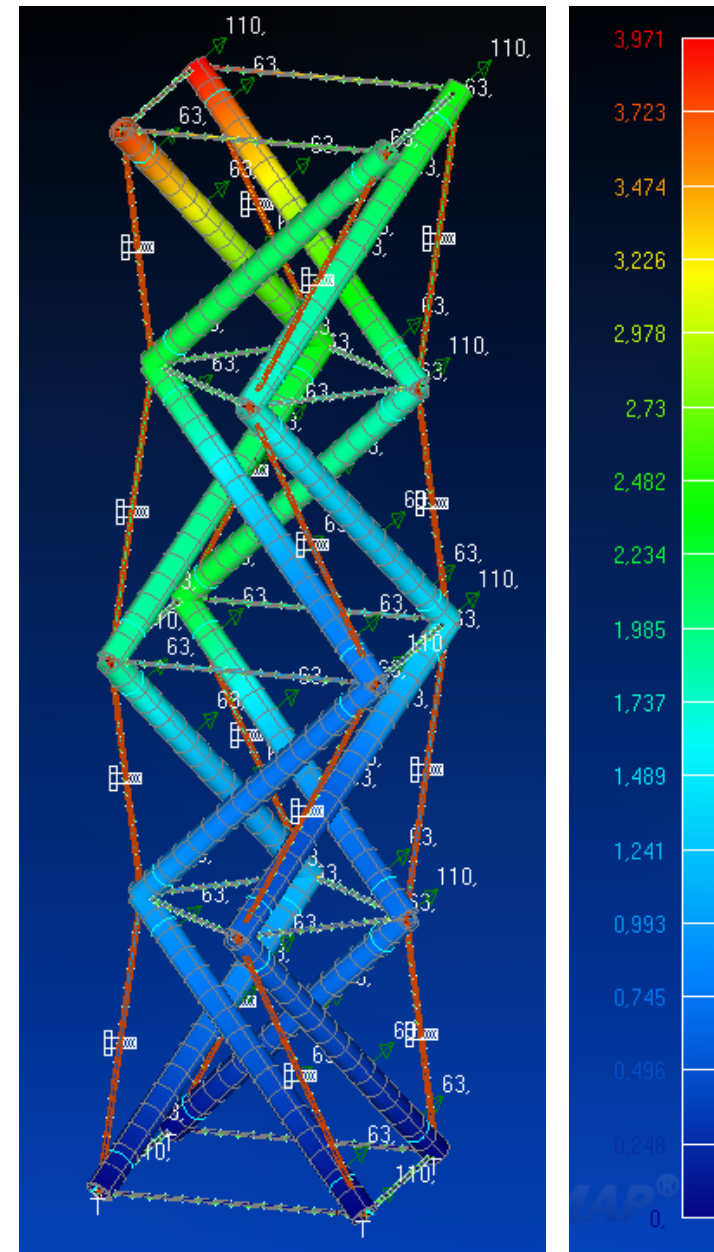
- Eigen Gewicht
- Wind op de drukbuizen (63 N)
- Wind op de Membranen (vereenvoudigd berekent als puntlasten op een drukbuis) (110 N)
- Voorspanning in de diagonale kabels (5kN)

De windbelasting op de drukbuis en van de membranen is met de hand berekent en terug te vinden in de bijlage. In dit model zijn alle diagonale kabels voorgespannen met een kracht van 5 kN. Deze kracht is bepaald en hiermee wordt dan gerekend of de constructie voldoet. De vier opleggingen in dit model zijn alle vast gemaakt en is niet iedere oplegging in verschillende richtingen gemoduleerd. Dit is gedaan voor de makkelijkheid voor het detailleren van het funderingsdetail. Elke oplegging heeft dan dezelfde funderingsdetail.

De maximale axiale kracht in de trekstaaf is 8431 N = 8,5 kN en de maximale axiale kracht in de drukstaaf is 9109 N = 9,1 kN. De krachten zijn weergegeven in verschillende kleuren en deze zijn terug te zien in figuur 5.2.



Figuur 5.2
De axiale krachten van de verticale toren

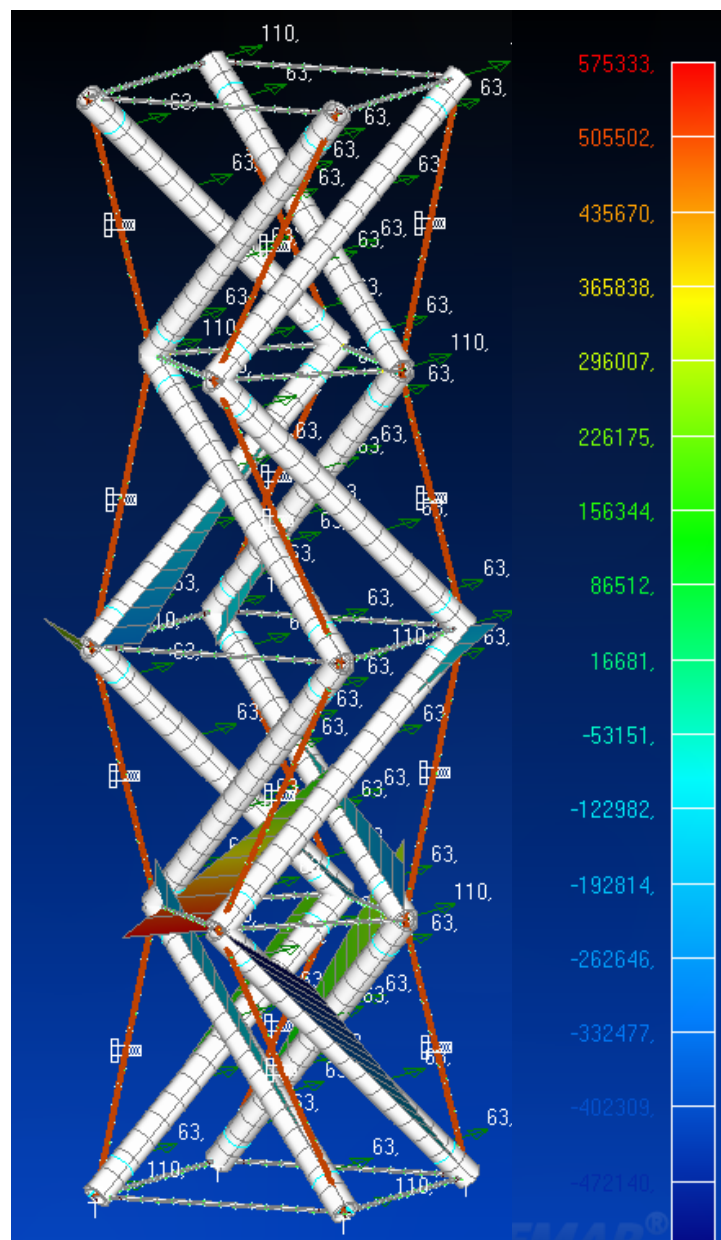


Figuur 5.3
De vervorming van de verticale toren

In figuur 5.3 ziet u het model van de verticale toren en hierop is de vervorming van de constructie weergegeven. De vervorming is te zien door middel van de gekleurde tabel en die kan worden gematcht met de gekleurde staven.

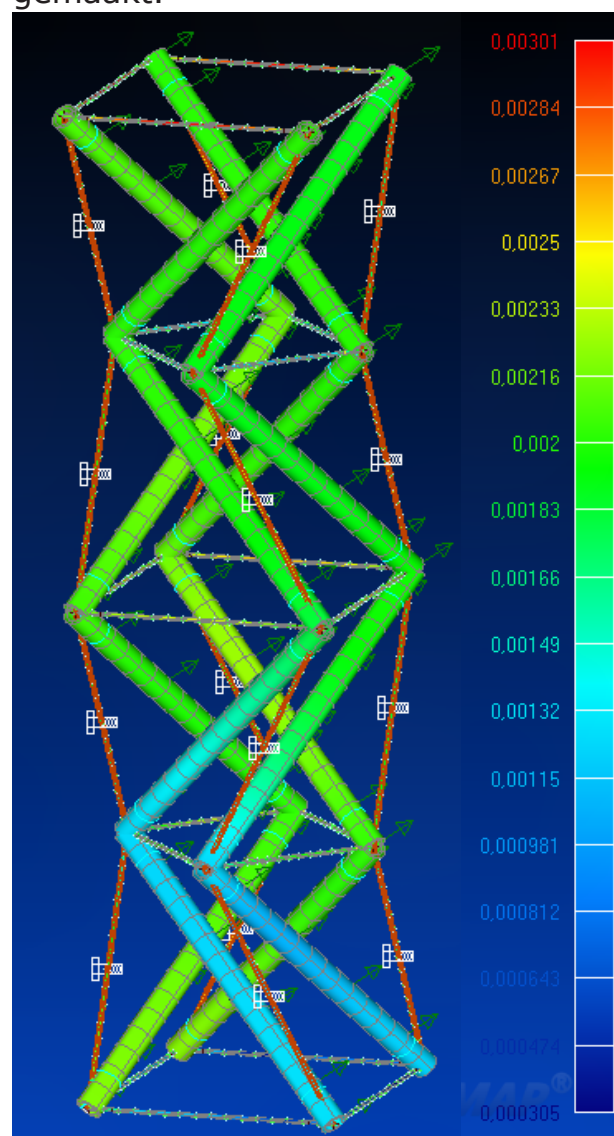
Wat opvalt is dat de maximale vervorming in dit model maar 3,9 mm is. Dit is fors minder dan de oude model. Alleen heeft die model wel drie units meer opgestapeld, maar dan nog zal de vervorming nooit rond de 900 mm zitten, zoals bij het vorige ontwerp.

Wat te concluderen valt is dat de vervorming bij dit ontwerp een stuk minder hoog uit valt dan bij het vorige ontwerp. De constructie van het paviljoen kan worden gewaarborgt door dit type constructie. Een vervorming van maximaal 4 mm is namelijk gangbaar.

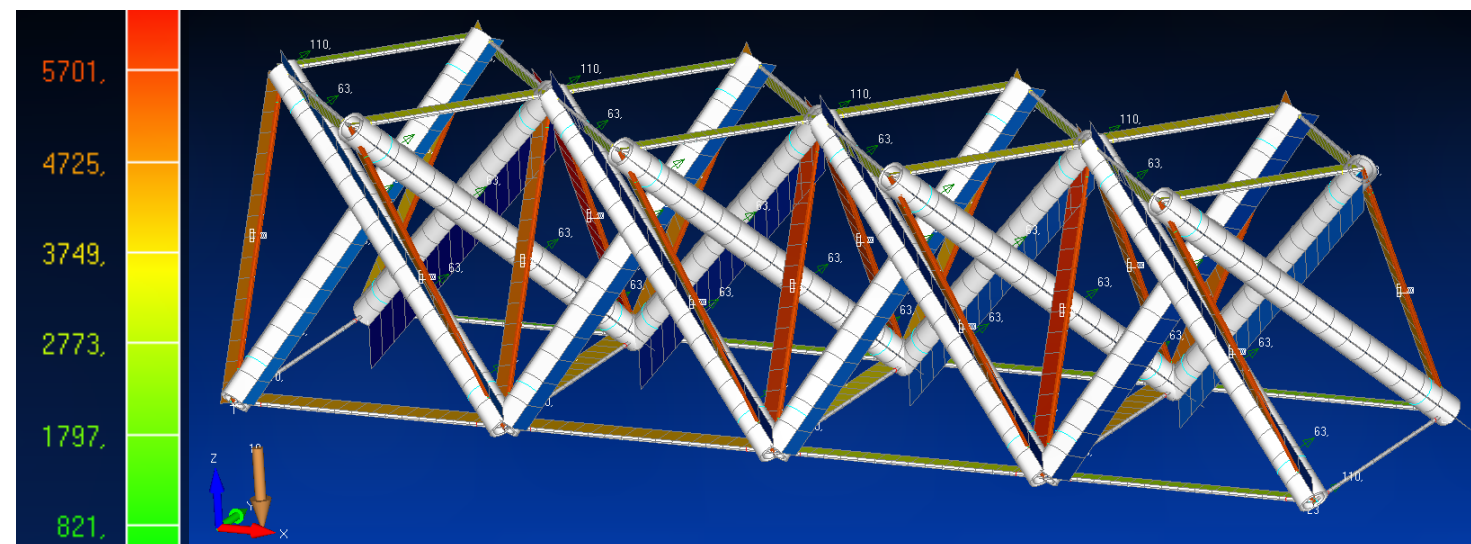


Figuur 5.4
De momenten van de verticale toren

In figuur 5.4 ziet u het model van de verticale toren en hierop zijn de momenten van de constructie weergegeven. Wat opvalt is dat er kleine momenten zijn in de knooppunten van het model. $575333 \text{ N/mm} = 0,58 \text{ kNm}$. De knoopverbindingen hoeven geen grote momenten over te brengen dus kunnen scharnierde verbindingen worden gemaakt.



Figuur 5.5
De rotatie van de verticale toren



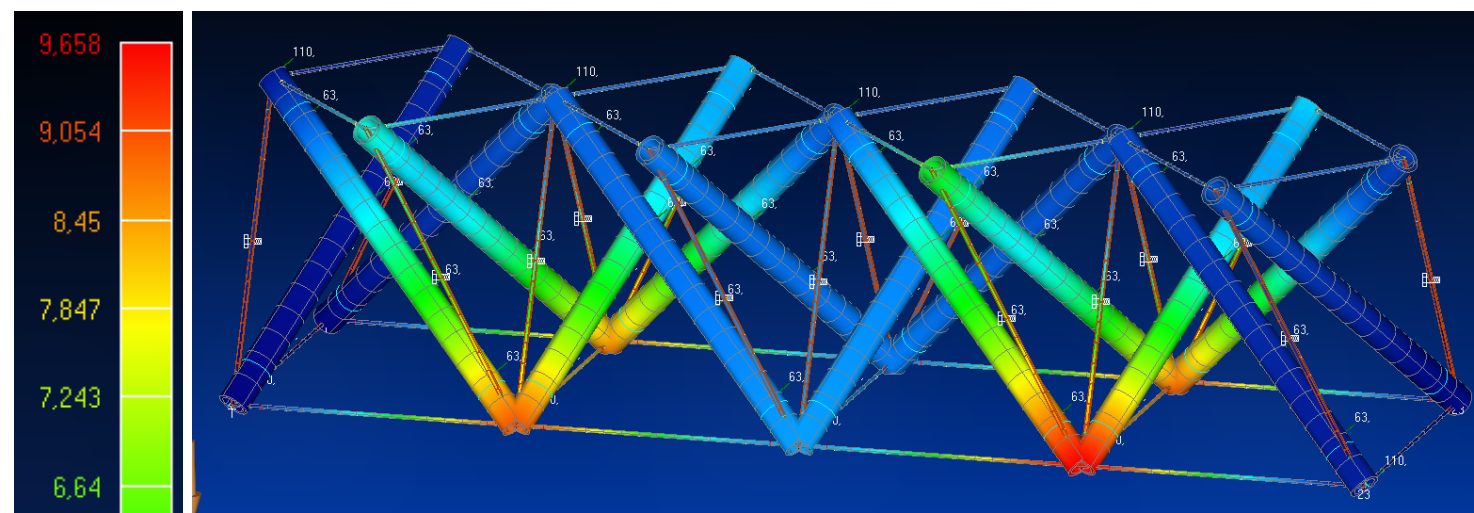
Figuur 5.6
De axiale van de horizontale ligger

In figuur 5.6 ziet u het model van de horizontale ligger. Hierop zijn de axiale krachten berekend. De krachten wat op dit model komt is:

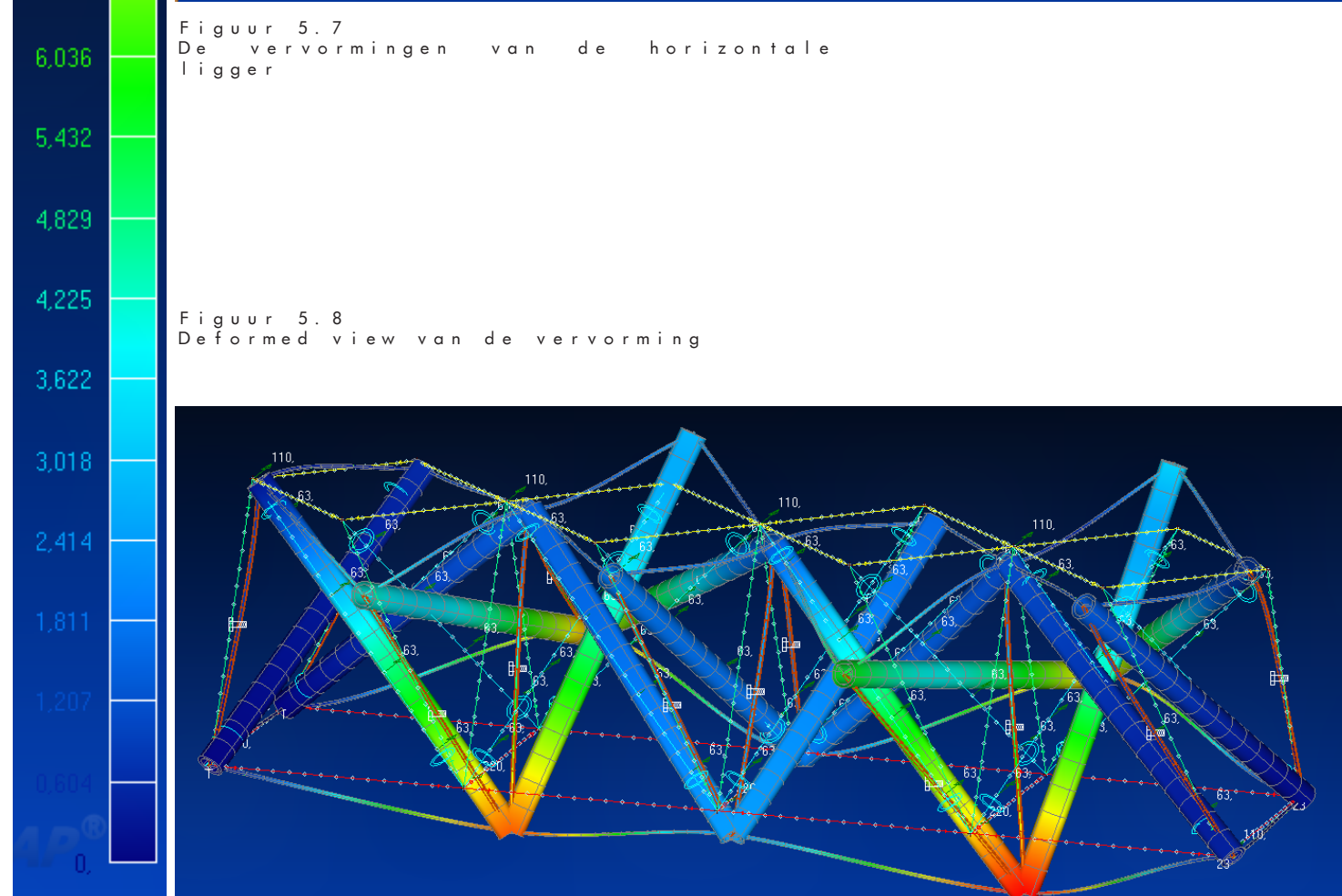
- Eigen Gewicht
- Wind op de drukbuizen (63 N)
- Wind op de Membranen (vereenvoudigd berekent als puntlasten op een drukbuis) (110 N)
- Voorspanning in de diagonale kabels (5kN)

De windbelasting op de drukbuis en van de membranen is met de hand berekent en terug te vinden in de bijlage. In dit model zijn alle diagonale kabels voorgespannen met een

kracht van 5 kN. Deze kracht is bepaald en hiermee wordt dan gerekend of de constructie voldoet. De maximale axiale kracht in de trekstaaf is $6677 \text{ N} = 6,7 \text{ kN}$ en de maximale axiale kracht in de drukstaaf is $8939 \text{ N} = 8,9 \text{ kN}$. De krachten zijn weergegeven in verschillende kleuren en deze zijn terug te zien in figuur 5.6.



Figuur 5.7
De vervormingen van de horizontale
ligger



Figuur 5.8
Deformed view van de vervorming

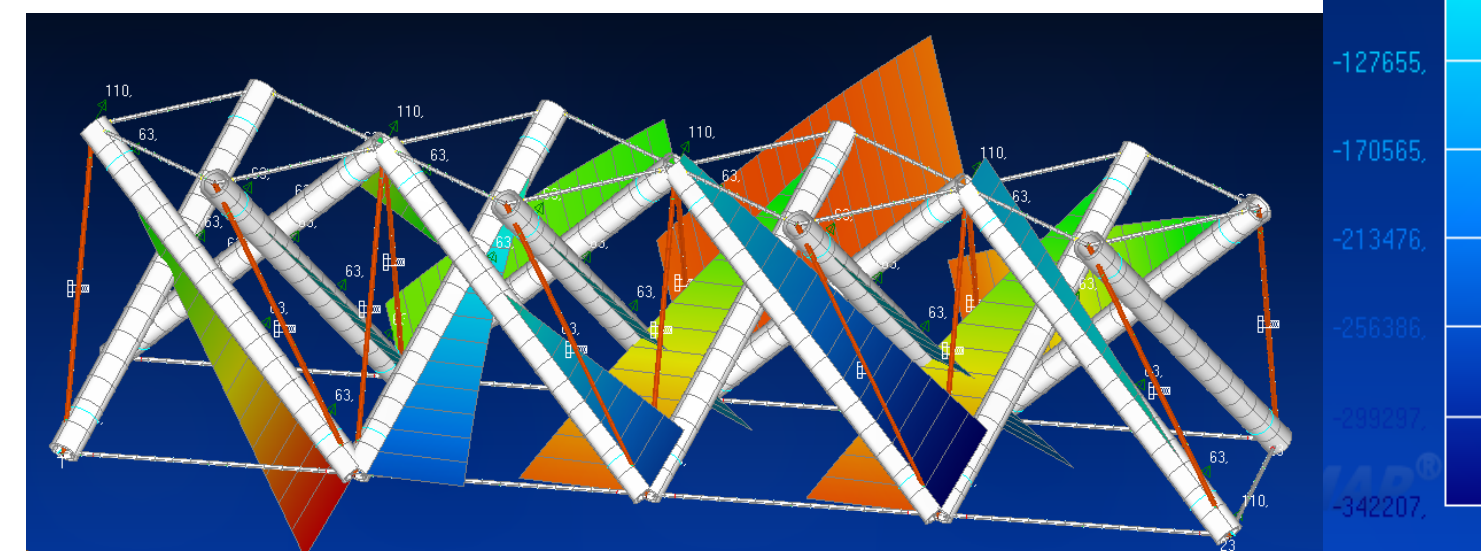
In figuur 5.7 ziet u het model van de horizontale ligger en hierop is de vervorming van de constructie weergegeven. De vervorming is te zien door middel van de gekleurde tabel en die kan worden gematcht met de gekleurde staven. In figuur 8 is de vervorming te zien. De vervorming wordt in de afbeelding wel overdreven weergegeven, maar wordt er wel een beter beeld gecreëerd van de vervorming.

Wat opvalt is dat de maximale vervorming in dit model 9,7 mm is. Bij het vorige ontwerp was er geen berekening gemaakt van de horizontale ligger, maar de verwachting is dat de horizontale ligger in het oude ontwerp fors hoger zou zijn dan bij dit nieuwe ontwerp.

Wat te concluderen valt is dat de vervorming bij dit ontwerp een stuk minder hoog uit valt dan verwacht. De constructie van het paviljoen kan worden gewaarborgt door dit type constructie. Een vervorming van

maximaal 10 mm is namelijk gangbaar.

In figuur 5.9 ziet u het model van de horizontale ligger en hierop zijn de momenten van de constructie weergegeven. Wat opvalt is dat er kleine momenten zijn in de knooppunten van het model. $344360 \text{ N/mm} = 0,34 \text{ kNm}$. De knoopverbindingen hoeven geen grote momenten over te brengen dus kunnen er scharnierde verbindingen worden gemaakt.

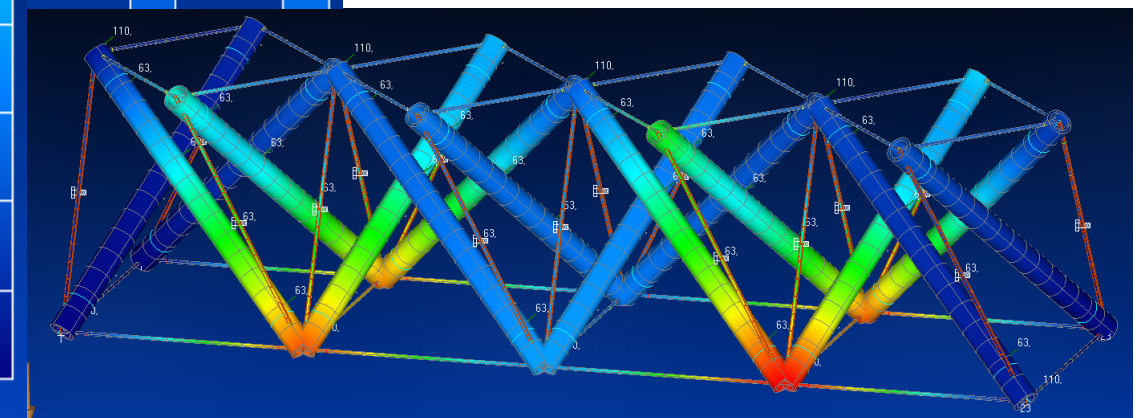
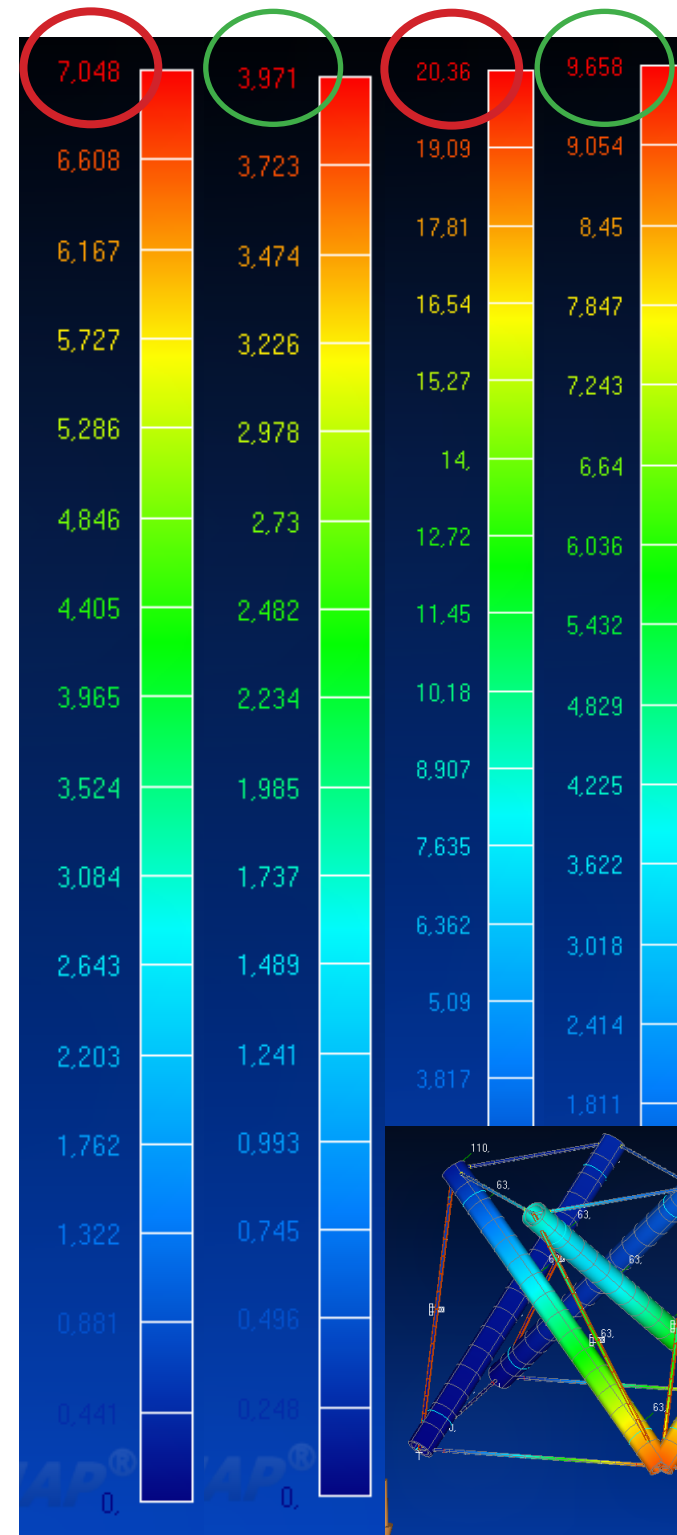
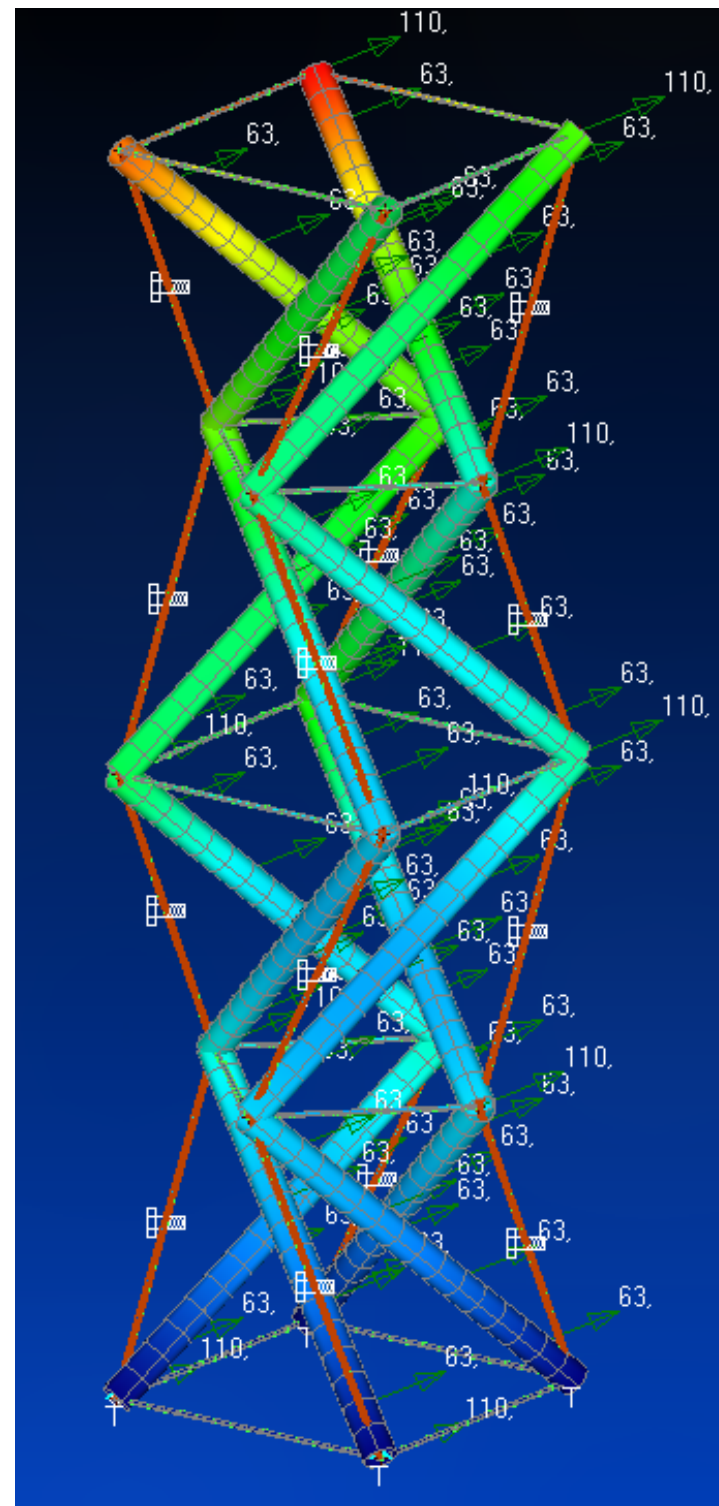


Figuur 5.9
De momenten van de horizontale
ligger

6.2 Verschil vervorming gehele constructie tussen hout en staal

Er is gekeken naar de vervorming van de gehele constructie tussen twee materialen. Staal en hout zijn vergeleken met elkaar op het gebied van de vervormingen. Dezelfde maten zijn aangehouden van het gebruik van de materialen, alleen een ander materiaal is dan getoetst op de vervorming. De rode cirkel geeft de maximale vervorming weer van het materiaal hout en de groene cirkel geeft de maximale vervorming weer van het materiaal staal.

Wat opvalt is dat de vervorming bij het gebruik van hout bijna vermenigvuldigd wordt en om de vervorming in de constructie zo min mogelijk te houden is er daarom mede gekozen voor het materiaal staal.



Denkproces details

In totaal zijn er drie details ontworpen voor het paviljoen. Het eind detail is gekozen aan de hand van een denkproces per detail. Er is per detail een paar afwegingen gemaakt en zodoende is er een detail gekozen om verder uit te werken. De voor- en nadelen zijn beschreven per detail.

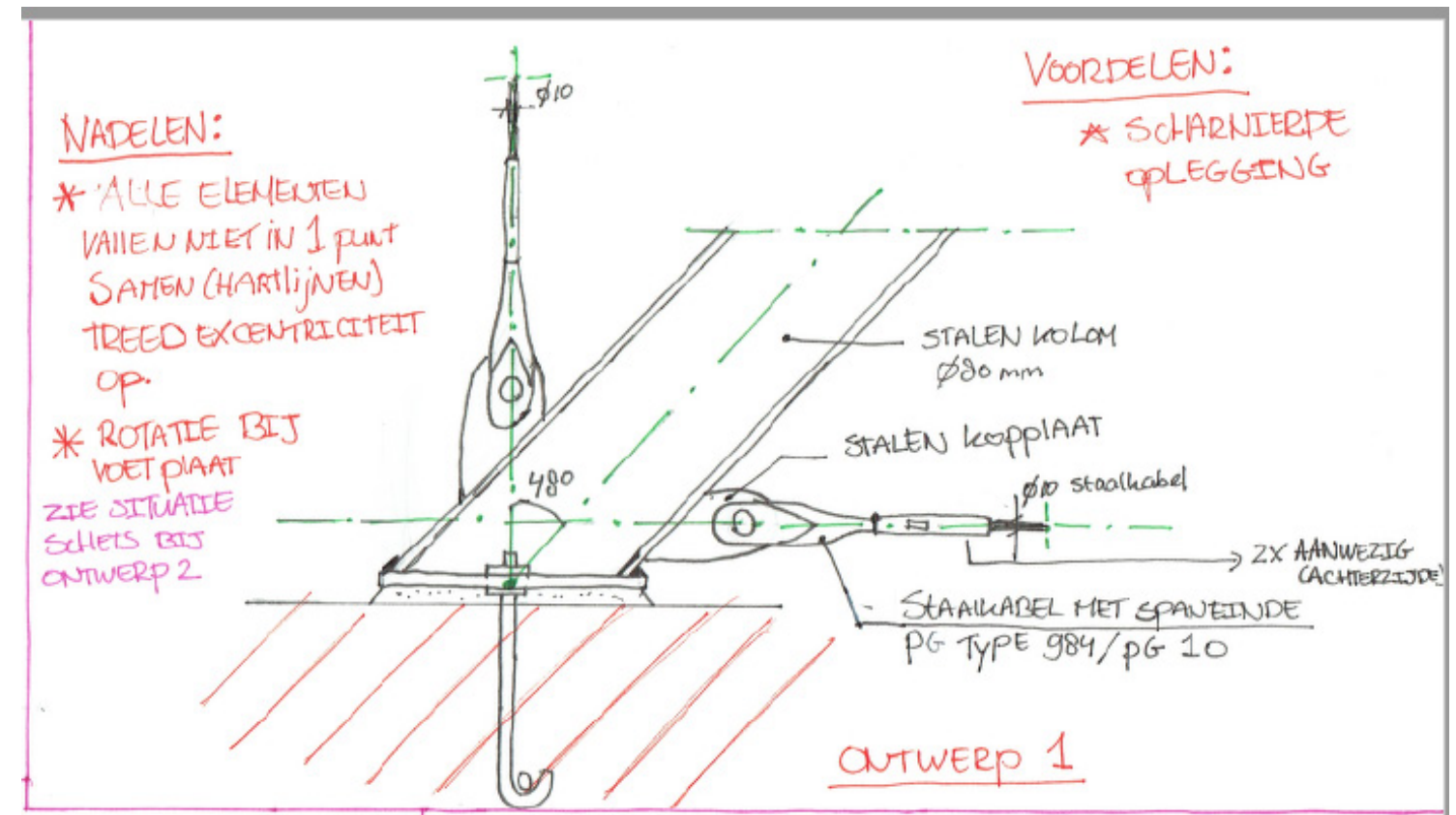
6.3 Denkproces funderingsdetail

DENKPROCES FUNDERINGSDetail

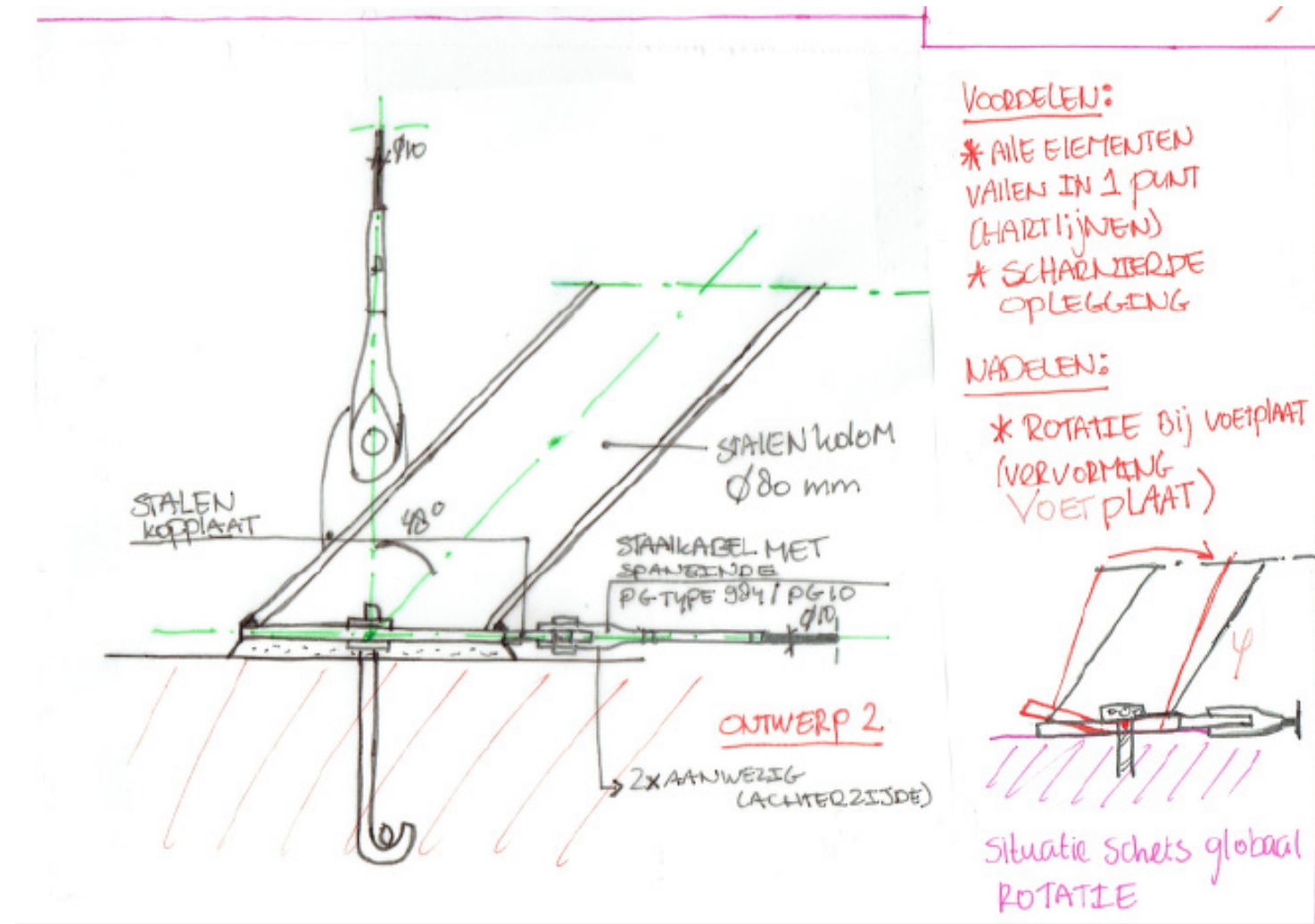
AANDACHTSPUNTEN ONTWERP DETAIL:

- * SCHARNIERENDE OPLEGGING
- * KOLONNEN, TREKSTANGEN MET DE KOPPLATEN MOETEN VIA DE HARTLIJNEN ZODANIG WORDEN VERBONDEN DAT ALLE LIJNEN IN 1 PUNT BIJ ELKAAR SAMENKOMEN, WANT OP DEZE MANIER WORDT DE IDEALE KRACHTSAFDACHT BEREKENT EN TREED ER GEEN EXCENTRICITEIT OP.
- * PER STAALBUIS ZITTEN MAXIMAAL 3 TREKSTANGEN VERBONDEN

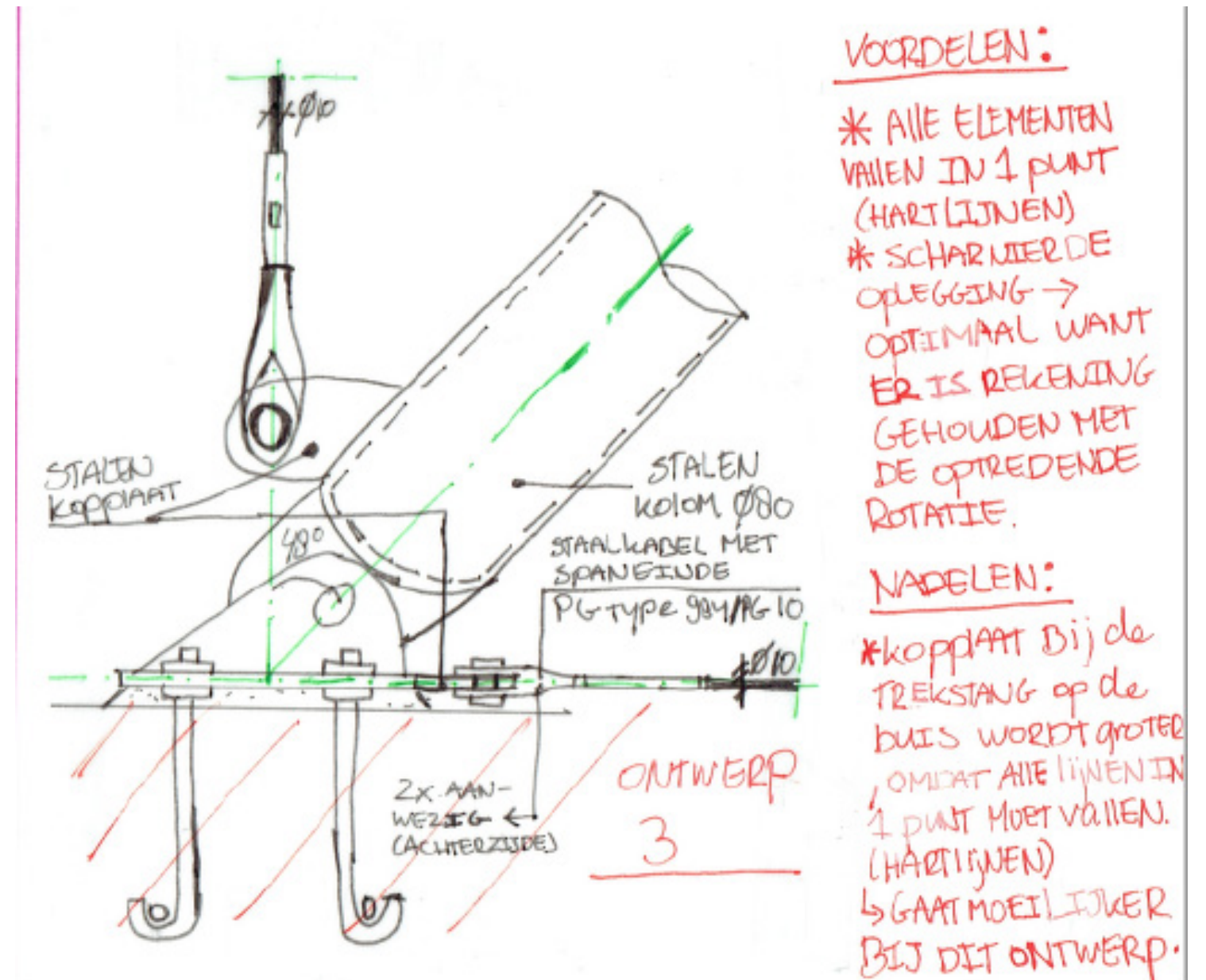
Ontwerp 1



Ontwerp 2



Ontwerp 3



Keuze funderingsdetail:

Er is gekozen voor ontwerp 2. Dit wordt verder toegelicht bij het uitwerken van dit ontwerp.

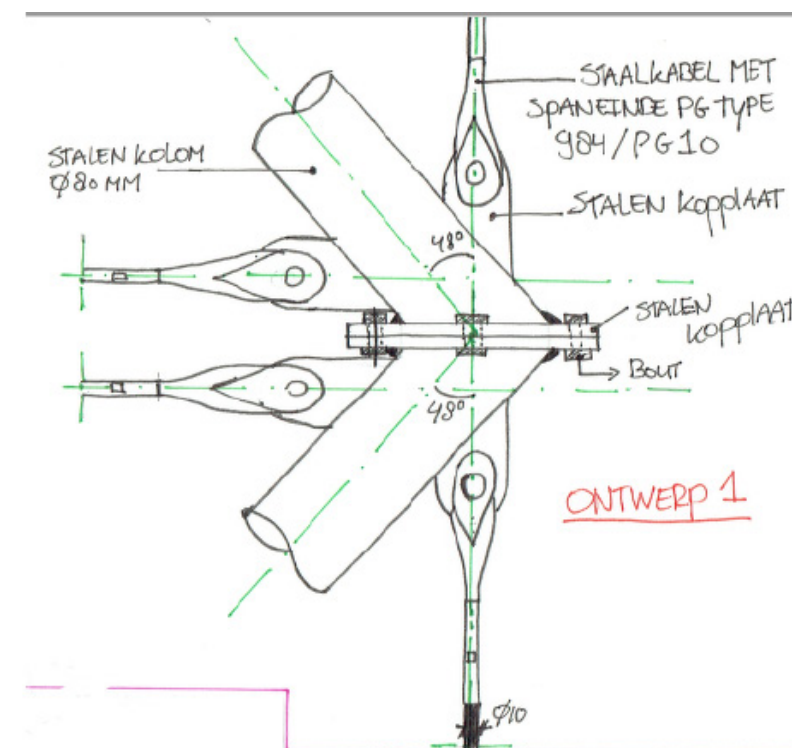
6.4 Denkproces
knooppunt detail
verticale toren

Ontwerp 1

DENKPROCES KNOOPPUNT DETAIL
VERTICALE TOREN

AANDACHTSPUNTEN ONTWERP DETAIL:

- * SCHARNIERENDE OPLEGGING
- * KOLOMMEN, TREKSTAVEN MET DE KOPPLATEN MOETEN VIA DE HARTLIJNEN ZODANIG WORDEN VERBONDEN DAT ALLE LIJNEN IN 1 PUNT BIJ ELKAAR SAMENKOMEN, WANT OP DEZE MANIER WORDT DE IDEALE KRACHTAFDRACHT BEDEKENT EN TREED ER GEEN EXCENTRICITEIT OP.
- * PER KNOOPPUNT ZITTEN MAXIMAAL 2 DUIZEN EN 4 TREKSTANGEN VERBONDEN



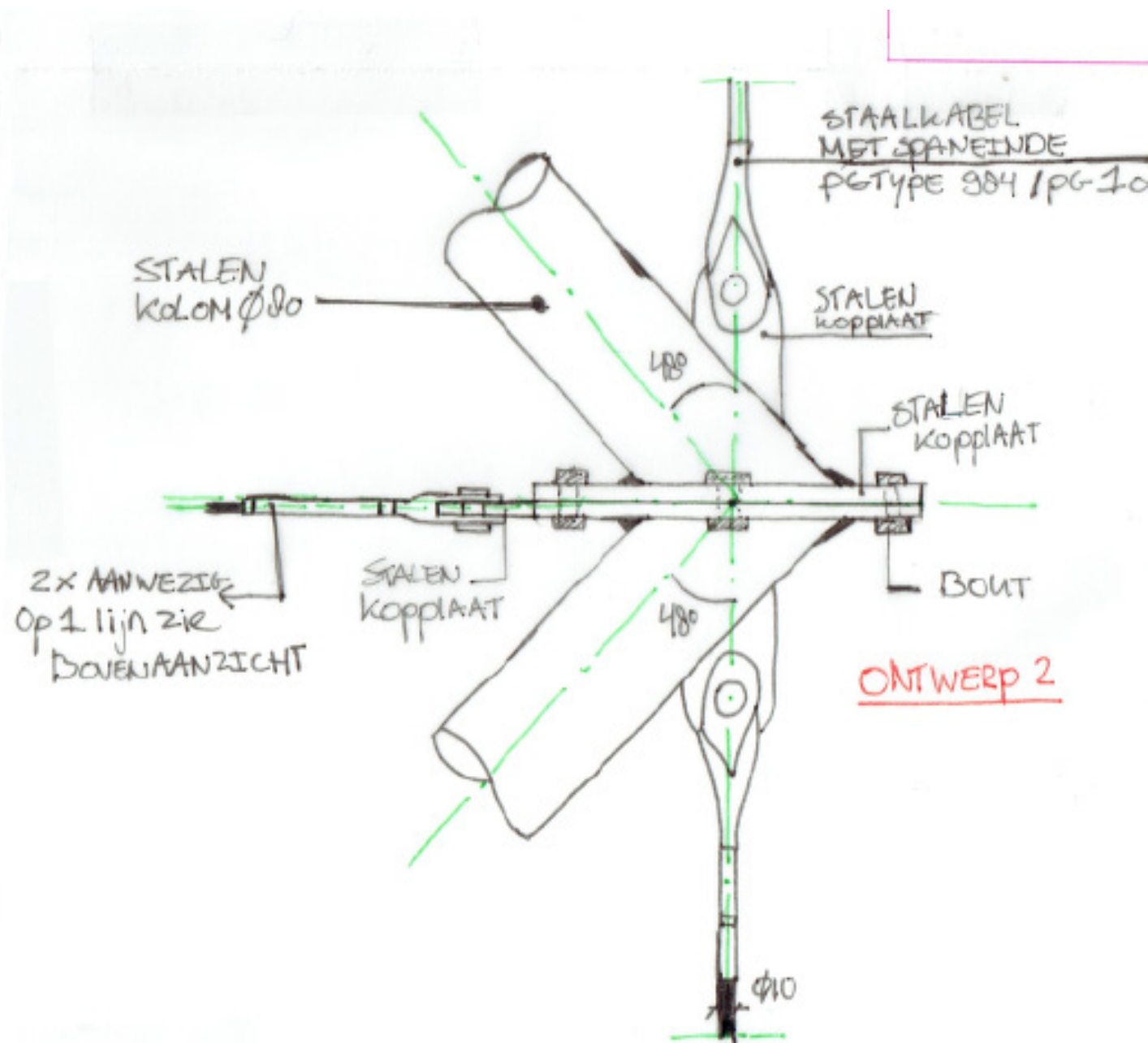
VOORDELEN:

- * SCHARNIERENDE OPLEGGING

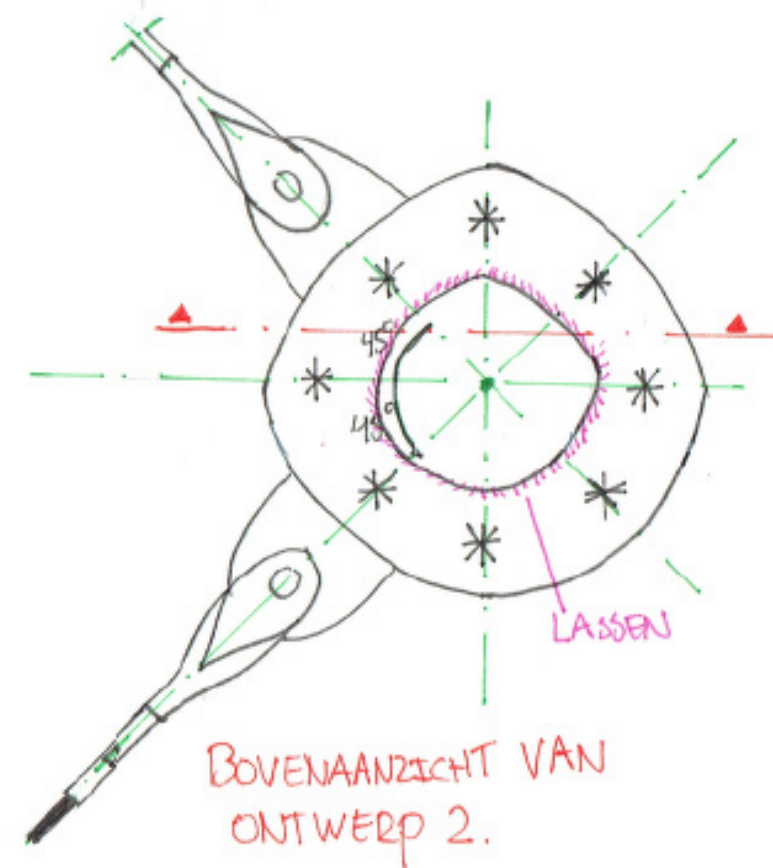
NADELEN:

- * ALLE ELEMENTEN VALLEN NIET IN 1 PUNT SAMEN (HARTLIJNEN) TREED EXCENTRICITEIT OP.
- * BOUT AAN DE LINKERKANT MOEILIK UITVOERBAAR (KLEINE RUIMTE).
- * KOPPLATEN AAN DE LINKERKANT HEBBEN WEINIG LASRUIMTE VOOR DE UITVOERING. LIGT TE DICHT BIJ DE ONDERSTE (LIGGENDE) KOPPLATEN.
- * DE TREKSTANGEN AAN DE LINKERKANT MOETEN WORDEN GEMAAKT OP 1 LIJN. WANT HET ZIJN DE STANGEN VAN 1 WIT.

Ontwerp 2



Ontwerp 3



VOORDELEN:

- (rotatie)
- * SCHARNIERENDE OPLEGGING
- * ALLE ELEMENTEN VALEN IN 1 PUNT (HARTLIJNEN)
- * GEDEEGE RUIMTE OM DE BOUW TE BEVESTIGEN (KOPPLAAT IS BIJ ONTWERP 2 IETS LANGER GEMAAKT)

NADELEN:

- * DE HORIZONTALE KABELS VALEN BIJNA IN DE HARTLIJN. MET DE POSITIE VAN DE STALEN KOPPLAAT KAN EEN DEETJE MEE WORDEN GESPEELD. ZO NIET, DAN TREED EEN HELE KLEINE EXCENTRICITEIT OP BIJ DE HORIZONTALE KABELS

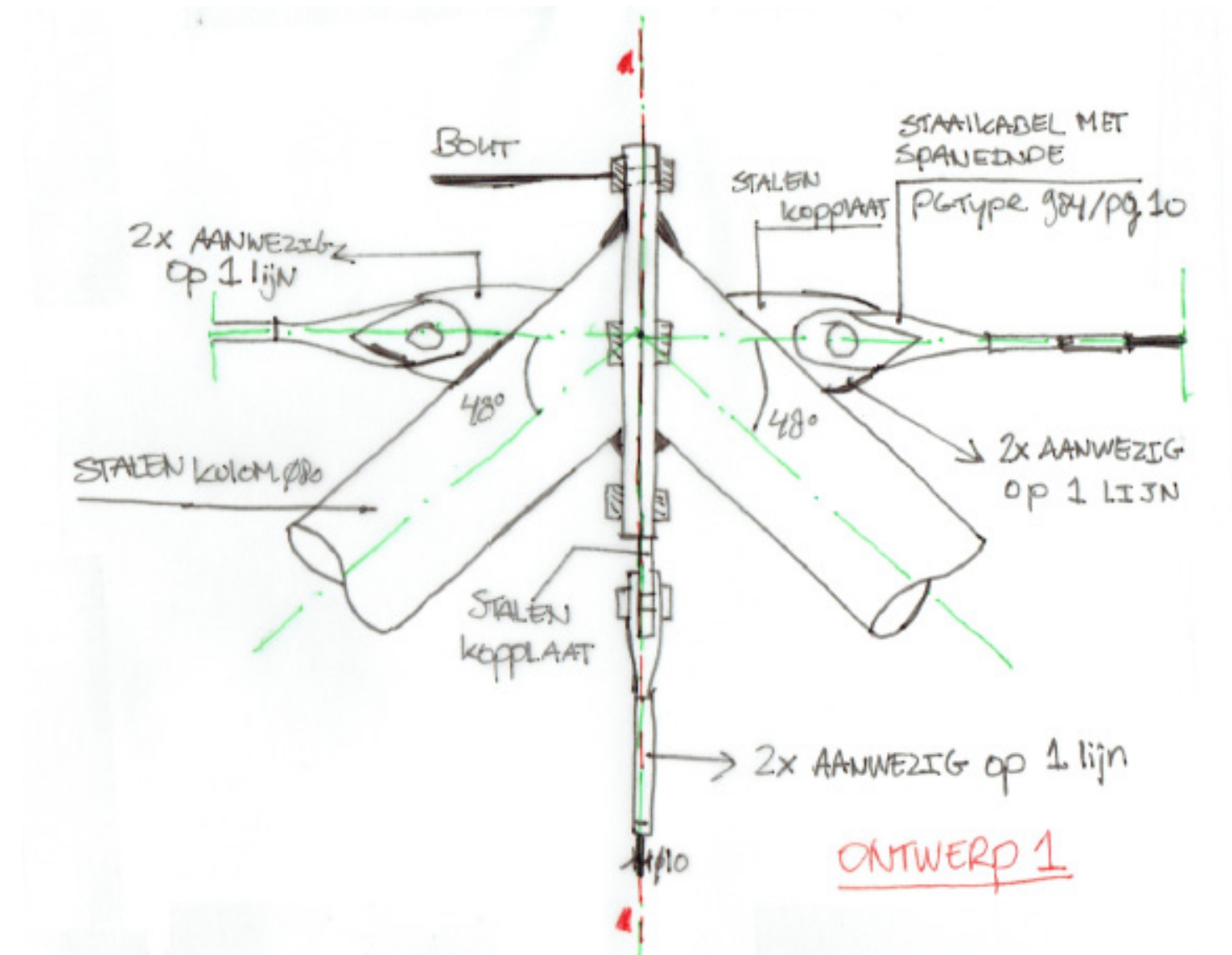
6.5 Denkproces
knooppunt detail
horizontale ligger

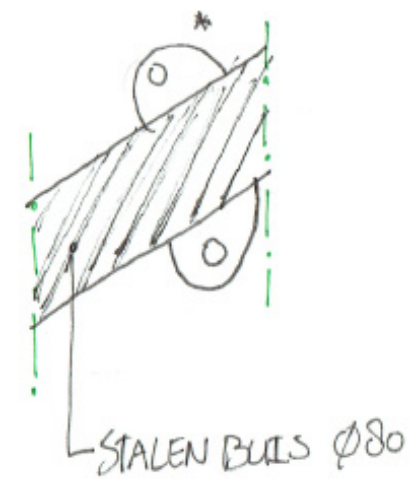
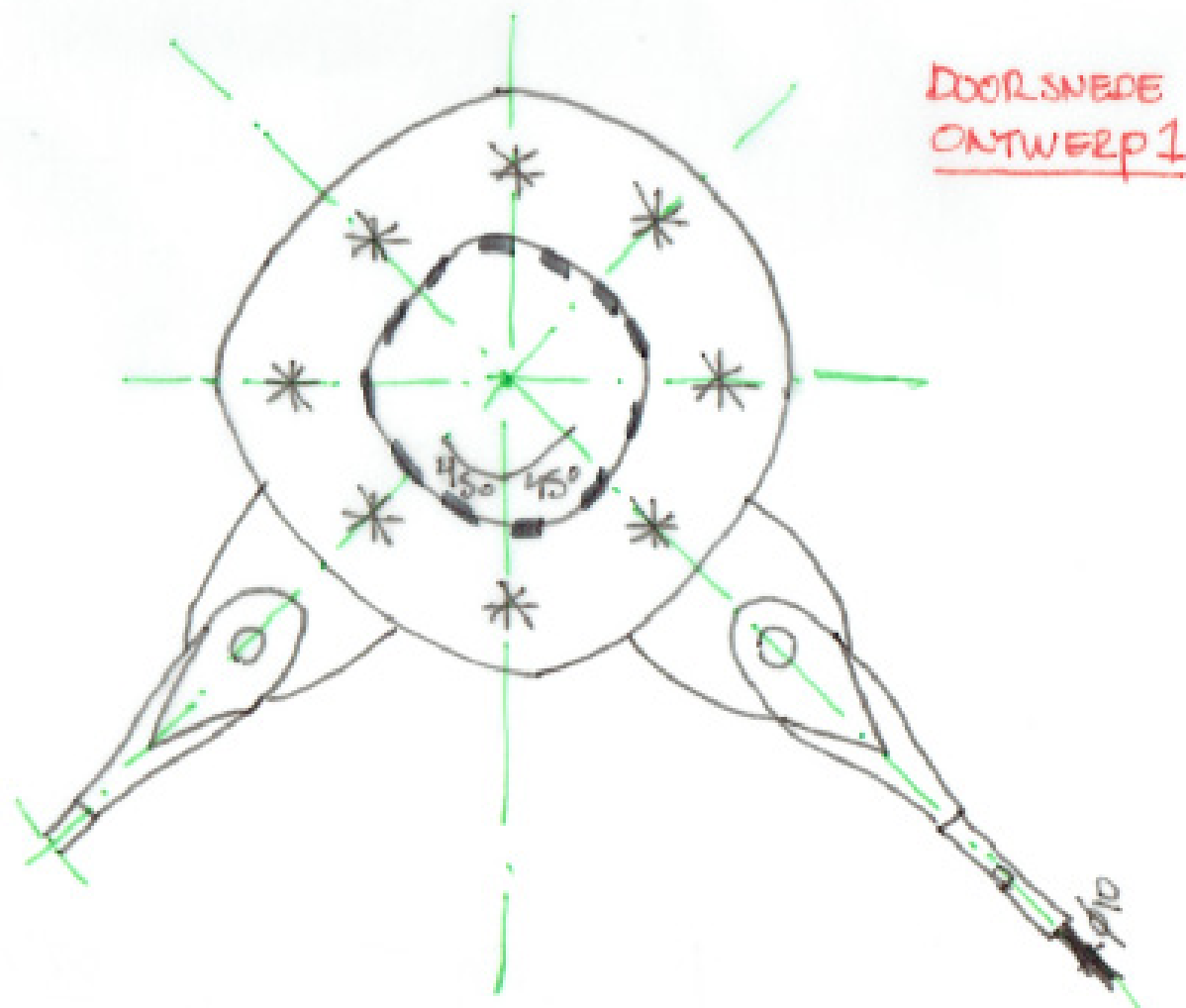
DENKPROCES KNOOPPUNT DETAIL HORIZONTALE LIGGER

AANDACHTSPUNTEN ONTWERP DETAIL:

- * VOOR DE UITVOERING DEZELFDE DETAIL AIS DE KNOOPPUNT VAN DE VERTICALE TOREN, WANT ZO WORDEN ALLE KNOOPPUNTEN OP DEZELFDE MANIER UITGEVOERD. VOOR DE MAKKELIJKEID DUS.
- * VERDER DEZELFDE AANDACHTSPUNTEN AIS DE KNOOPPUNT DETAIL VAN DE VERTICALE TOREN.
- * PER KNOOPPUNT ZITTEN MAXIMAAL 2 BUIZEN EN 6 TREKSTANGEN

Ontwerp 1





* PER BUIS ZITTEN 2 STALEN KOPPLATEN
MET 2 TREKSTANGEN

VOOR- EN NADELEN:

* ZIJN HETZELFDE ALS
ONTWERP 2 VAN HET
KNOOPPUNT DETAIL VAN
DE VERTICALE TOREN.

Keuze knooppunt detail horizontale ligger:

Er is gekozen voor ontwerp 1. Dit wordt verder toegelicht bij het uitwerken van dit ontwerp.

6.6 Keuze trekstangen

In de constructie zitten trekstangen in. De keuze voor de trekstang is gekozen uit een gids. Er is gekozen voor de trekstang PG 10 type 980/ type 984, want hierin wordt een staalkabel met een diameter van 10 mm bevestigd en hiermee is berekend. Hieronder zijn de 3D-plaatjes te zien van de trekstangen die worden toegepast. In de bijlage staan de uitgebreide informatie in per type trekstang. De gegevens van trekstang PG 10 staan in een tabel.

Iedere trekstang heeft een andere uiteinde. De type 984 bevat een spaneinde en de type 980 niet. Elk trekstang heeft dus beide types.

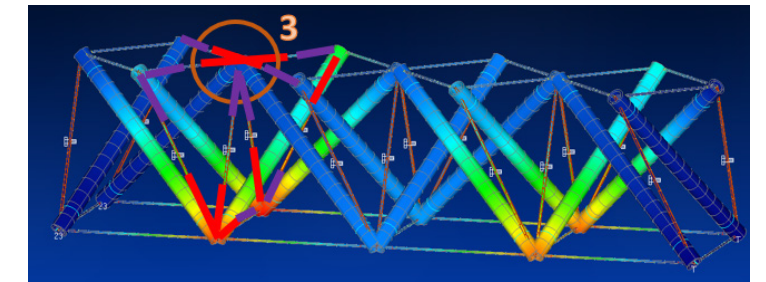
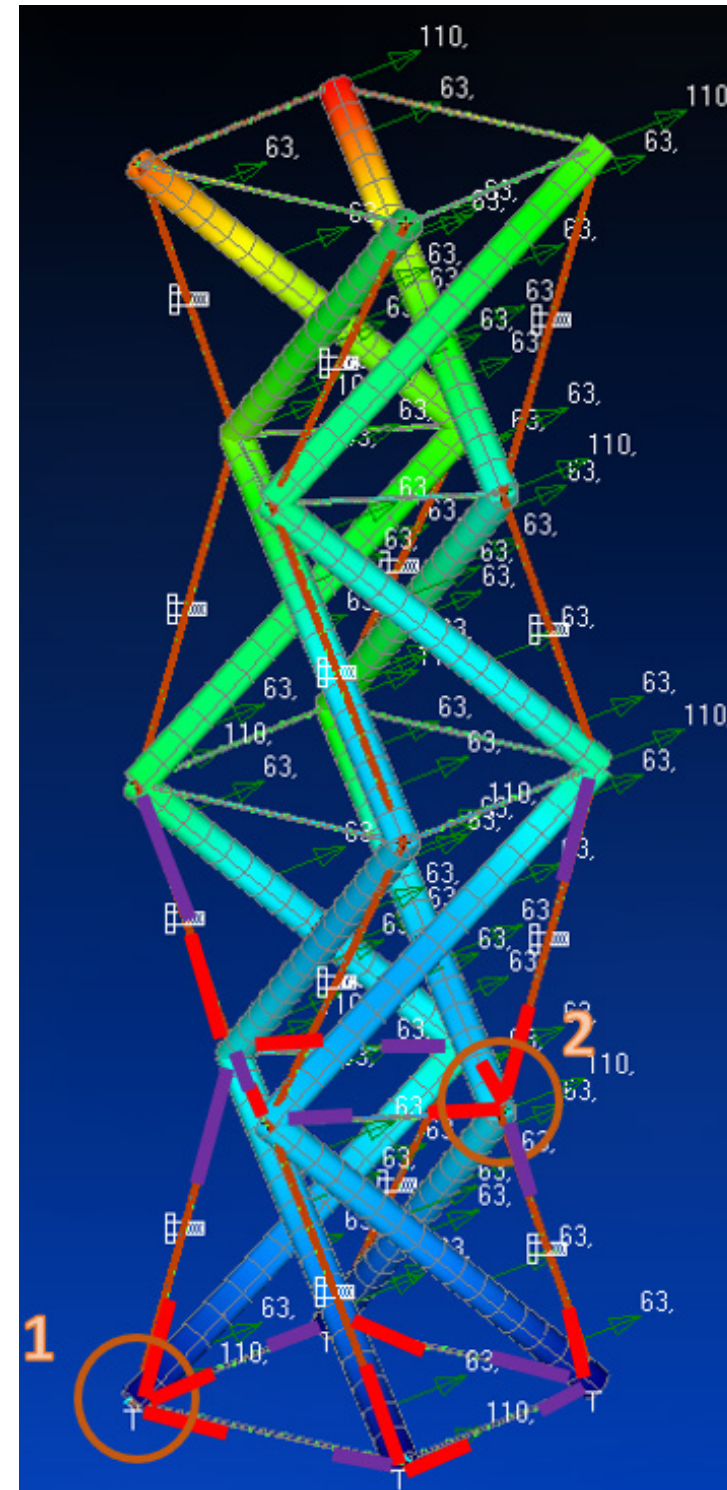
Figuur 5.8
Trekstang PG Type 980



Bij de definitieve details moet er rekening worden gehouden met de beide types van de trekstangen. Hieronder staat een overzicht van de verticale toren en de horizontale ligger. Hierin wordt aangegeven welke details verder is uitgewerkt en waar de type 984 en type 980 begint. Hieronder staan de verticale toren en horizontale ligger globaal weergegeven. De rode lijnen zijn de trekstangen met de type 984 en de paarse lijnen zijn de trekstangen met de type 980. Er is een fragment met deze kleurtjes aangegeven om een beeld te geven waar welke type trekstang zit.

Deel van de verticale toren is met de desbetreffende kleurtjes weergegeven. Verder zijn er twee knooppuntdetails aangegeven en zijn dit ook verder uitgewerkt. Detail 1 : Funderingsdetail. Detail 2: Verticale toren knooppuntdetail.

Figuur 5.8
Trekstang PG Type 984



Deel van de horizontale ligger is met de desbetreffende kleurtjes weergegeven.

Verder is er één knooppuntdetail aangegeven en is dit zijn ook verder uitgewerkt.

Detail 3 : Horizontale ligger knooppuntdetail.

6.7 Detailberekeningen

Voor de drie knooppuntdetails zijn handberekeningen gemaakt. Deze berekeningen zijn terug te vinden in de bijlage. In de berekeningen zijn de gegeven maten van de leverancier, van de trekstangen, berekent of de diktes voldoen bij deze constructie.

6.8 Definitieve details

De details zijn uitgetekend op schaal 1:10 en terug te vinden in de bijlage. In de bijlagen staan de aanzichtstekeningen en de doorsnedes van de knooppuntdetail. Hieronder worden alleen de aanzichten van de detail getoond met een toelichting. Bij de uiteindelijke gekozen details is er gekozen voor een detail waarbij alle hartlijnen samen komen in één punt, want op deze manier wordt de ideale krachtafdacht berekend en treed er geen excentriciteit op. Een detail kiezen waarbij dit geen optie was, is geen geschikte keuze. Verder hebben alle verbindingen een scharnierde verbinding, want dit zorgt ervoor dat er tussen de elementen rotatie mogelijk is en is toegestaan. Dit is namelijk nodig bij een tensegrity constructie, want het is een "bewegende" constructie.

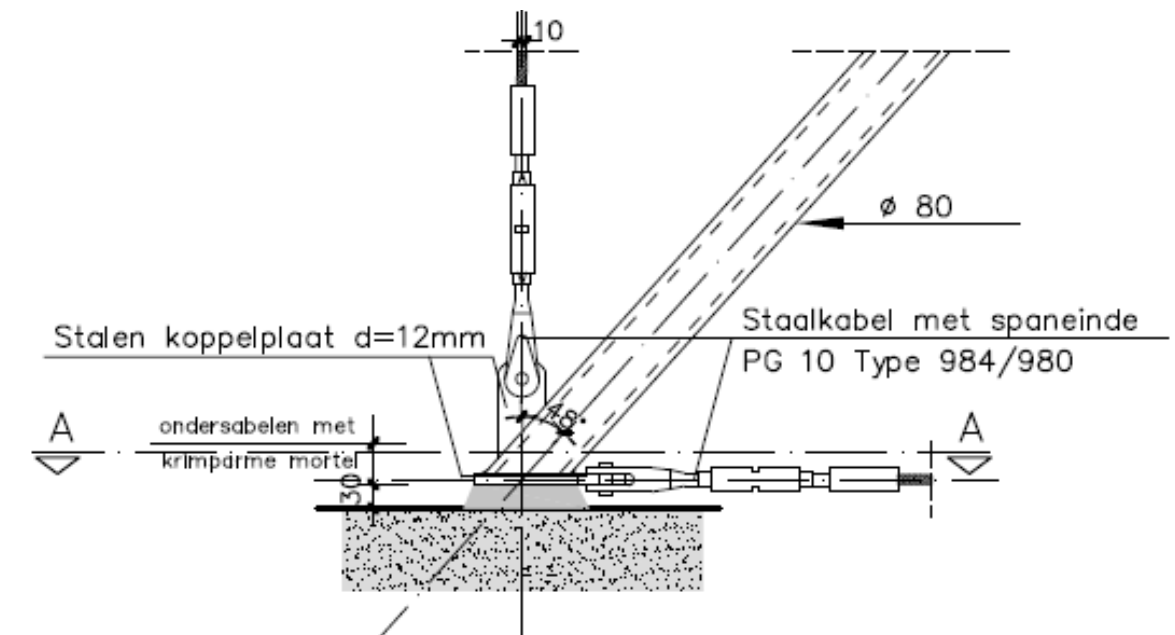
Funderingsdetail:

Vanuit het denkproces is gekozen om ontwerp 2 verder uit te werken. Uit de voor- en nadelen kon het beste gekozen worden voor ontwerp 2 of 3. Ontwerp 3 werkt als het meest scharnierde verbinding. Ontwerp 2 werkt ook als een scharnierde verbinding, alleen kan er een rotatie optreden (zie schets in het denkproces). Nou is gebleken uit de berekeningen dat de rotatie nihil is dus kan er gekozen worden voor ontwerp 2 en dit is dan ook verder uitgewerkt tot een detailtekening. In deze tekening zijn ook de definitieve maten verwerkt die vanuit de handberekeningen komen.

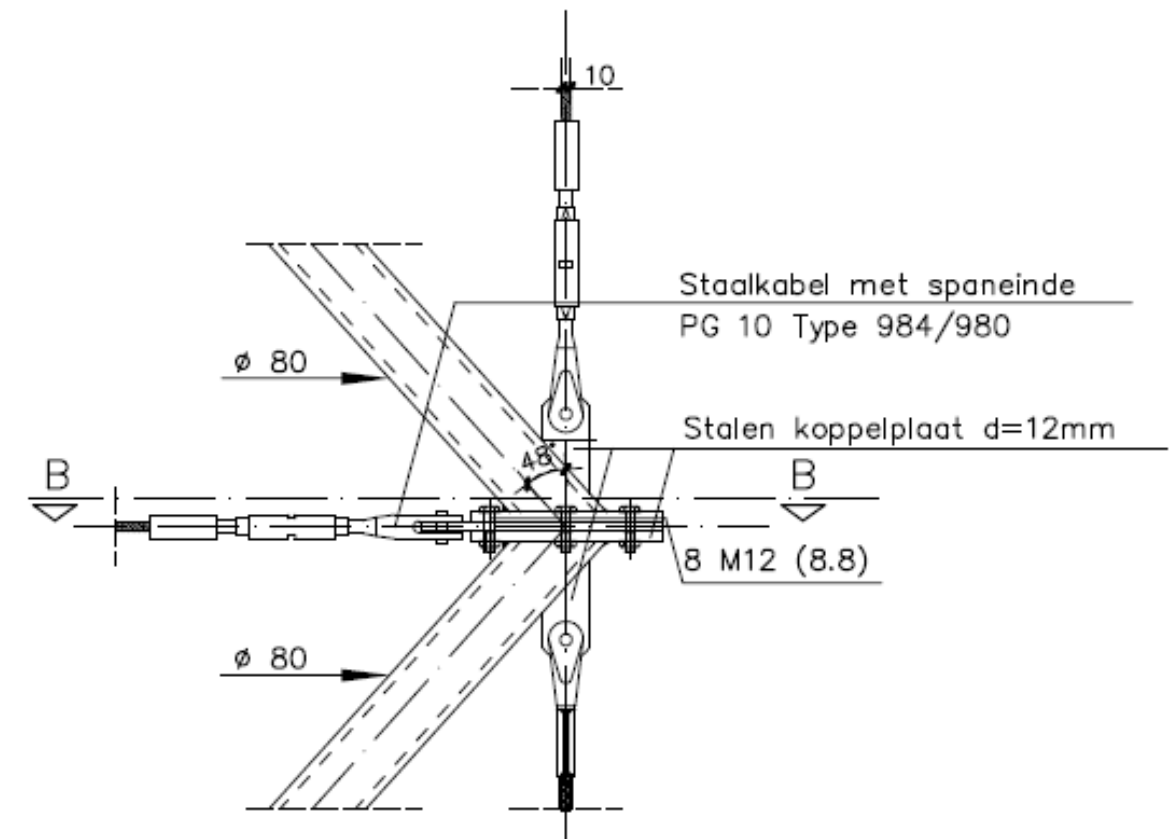
In het detail wordt eerst de kolom gelast op de stalen koppelplaat en hieraan zit al van te voren een koppelplaat vast die wordt gebruikt als penverbinding voor de trekstang. De andere kopplaat wordt later op de buis gelast en de trekstangen worden overigens op de bouwplaats na voorgespannen. De gehele proces wordt per unit vooraf gemaakt, zodat losstaande units op de bouwplaats alleen op en naast elkaar hoeft te worden bevestigd. In de uitvoeringsproces van de units staat het proces uitgelegd.

Verticale toren knooppuntdetail:

Deze knooppunt detail bevat een nieuw deel van iedere unit. De bovenste buis met de stalen koppelplaat worden op de bouwplaats bevestigd boven de onderste kolom met diens koppelplaat. Qua bevestigen wordt het een soort klik-systeem.



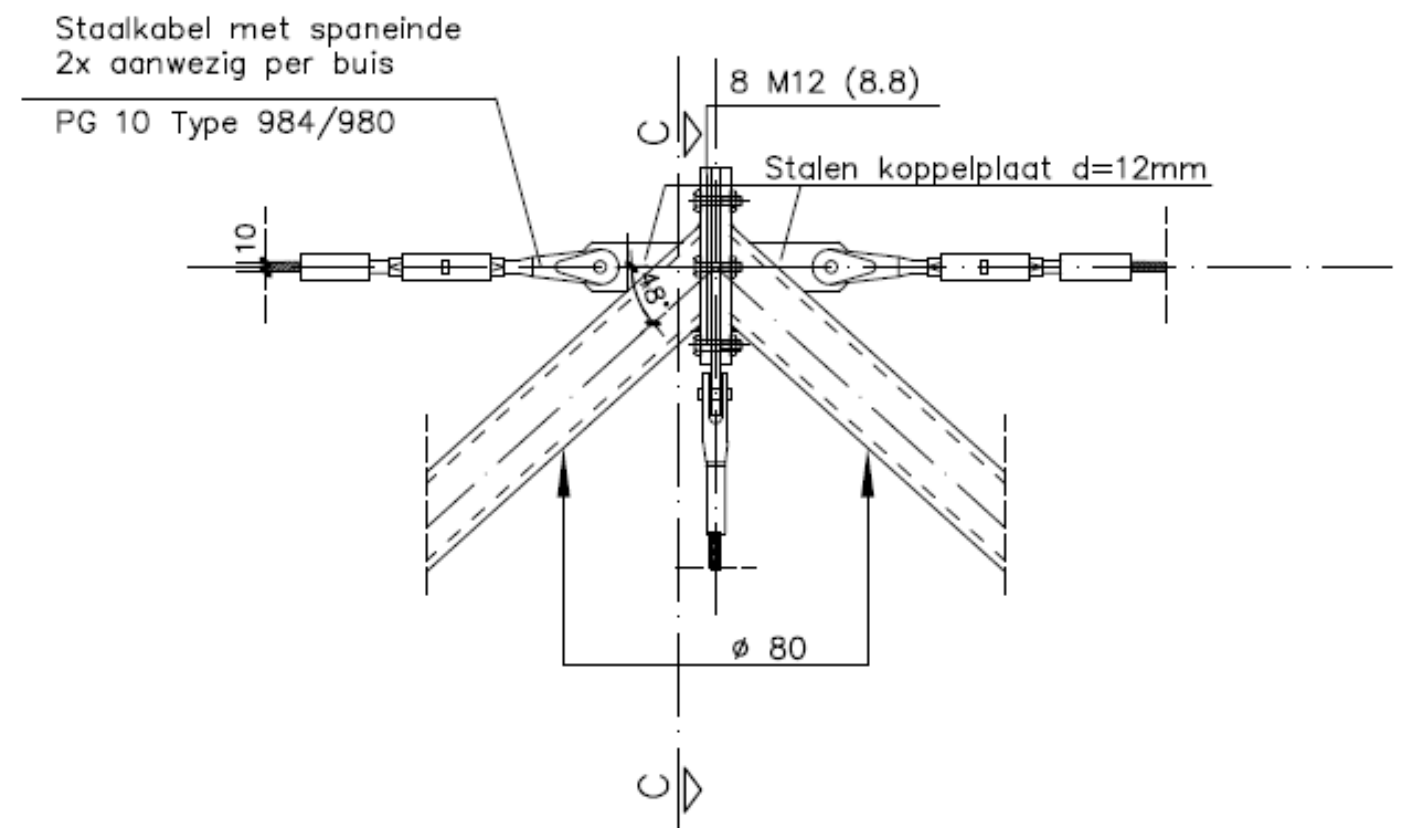
Funderingsdetail—Aanzicht



Verticale toren knooppuntdetail—Aanzicht

Horizontale ligger knooppuntdetail:

De horizontale ligger knooppuntdetail lijkt veel op het knooppuntdetail van de verticale toren. Dit is gedaan om de uitvoering zo simpel mogelijk te houden, want er worden in het paviljoen 1098 tensegrity-units toegepast. Het enige verschil is dat er in deze knooppunt zes trekkabels zitten in het knooppunt van de verticale toren zitten vier trekkabels.



Horizontale ligger knooppuntdetail—Aanzicht

Uitvoering paviljoen

6.9 Warnow tower

Het is van belang bij de uitvoering dat deze natuurlijk veilig, efficiënt en snel uitgevoerd kan worden. Zo ook voor dit tensegrity paviljoen. Ter referentie is er gekeken naar de Warnow tower in Rostock Duitsland. De constructie van de toren is vergelijkbaar met de constructie van het paviljoen.

De Warnow tower bevat 6, 3-strut units die verticaal gestapeld zijn. De units zijn in de fabriek in elkaar gezet en op locatie gestapeld. Eerst worden de onderste 3 units op elkaar gestapeld, daarna worden de bovenste 3 units apart op elkaar gestapeld. Dus er ontstaan 2 torens van 3 units. Vervolgens wordt de toren met de bovenste 3 units op de onderste toren gestapeld met behulp van een hijskraan.

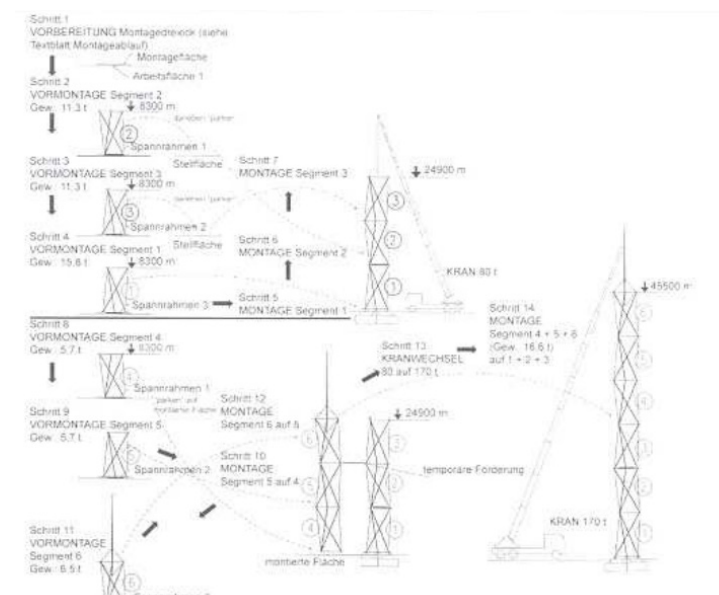
Zie figuur 5.1, 5.2 en 5.3 ter referentie



Figuur 5.1
Warnow tower opzet montage unit



Figuur 5.2
Warnow tower montage unit in fabriek



Figuur 5.3
Uitvoering Warnow Tower

6.10

Uitvoeringspunten

Bij de uitvoering van het paviljoen is het van belang dat naar belangrijke probleempunten gekeken wordt om de uitvoering goed te laten verlopen. Voor de uitvoering is daarom gekeken naar de volgende punten:

- verbindingpunten snel verbinden
- stapelen van units
- vorm van unit waarborgen
- uitvoeringsgemak
- veiligheid
- units aan elkaar verbinden
- complexiteit behapbaar maken

Om elke unit precies hetzelfde op te zetten zoals in het 3d model is zeer tijdrovend en niet van noodzaak voor de constructie. De esthetische eisen waren ook niet om perfecte tensegrity vormen te creëren. Dus bij de uitvoering is het niet nodig om elke unit identiek te krijgen. Wel is het van belang dat de vorm herkenbaar blijft en de units gestapeld kunnen worden. Dus er is een hulpmiddel nodig om de vorm van de units ongeveer gelijk te houden.

Dit maakt het voor de uitvoering gemakkelijker om elke unit op te zetten in dezelfde vorm en eventueel te corrigeren naar dezelfde vorm toe.

Doordat in het paviljoen 1098 units zijn met elk 4 staven die verbonden moeten worden aan beide zijden, zijn er dus bijna 8000 knooppunten die verbonden moeten worden

tijdens de uitvoering. Daarom is het belangrijk dat deze knooppunten snel en gemakkelijk verbonden kunnen worden. uitvoerbaarheidsgemak staat om deze reden hoog op het lijstje.

Het originele concept detail is om die reden aangepast, zodat tijdens de uitvoering de staven gemakkelijk verbonden kunnen worden, zonder teveel gefriemel.

Hiernavolgend wordt in stappen uitgelegd hoe de uitvoering het paviljoen zal plaatsvinden. Eerst zal er gekeken worden naar de bevestigingspunten en van hieruit zal uitgezoomd worden naar het totaalbeeld van de uitvoering.

Uitvoerings knooppunten

6.11 Uitvoering details

De detaillering van de verbindingpunten van de units is in onderstaande afbeeldingen weergegeven. Deze worden constructief onderbouwd in de constructie bijlagen onder het kopje “detail berekeningen”.

Elke staaf heeft in principe een kop- en

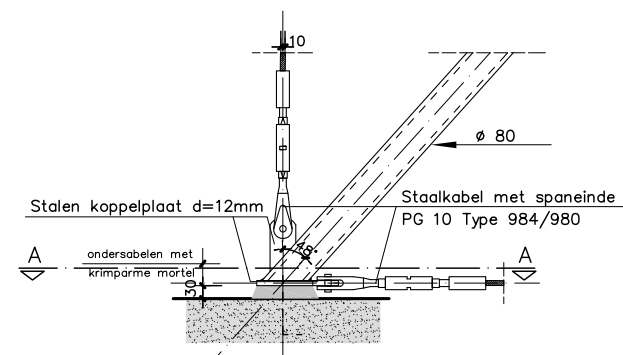
voetplaat waar de kabels aan verbonden kunnen worden.

De verbinding van de kabel tussen 2 units zit als het ware tussen de units ingeklemd en wordt vastgezet met moeren en bouten. Zo worden dubbele kabels voorkomen

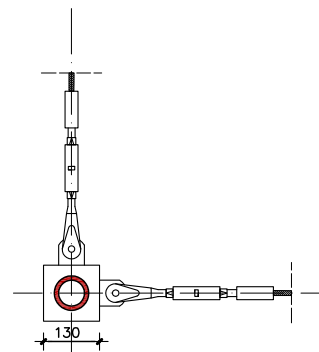
en kunnen de krachten goed opgenomen worden door beide units.

Doordat de koppelplaten aan de buitenkant van de buizen zitten, kunnen de bouwvakkers gemakkelijk bij de bevestigingspunten komen. Architectonisch gezien is dit minder aantrekkelijk, maar er zijn meer dan 1000 verbindingpunten in het paviljoen aanwezig. Dus de uitvoering moet goed uitvoerbaar zijn om het project realiseerbaar te houden. Daarom is er voor deze oplossing gekozen.

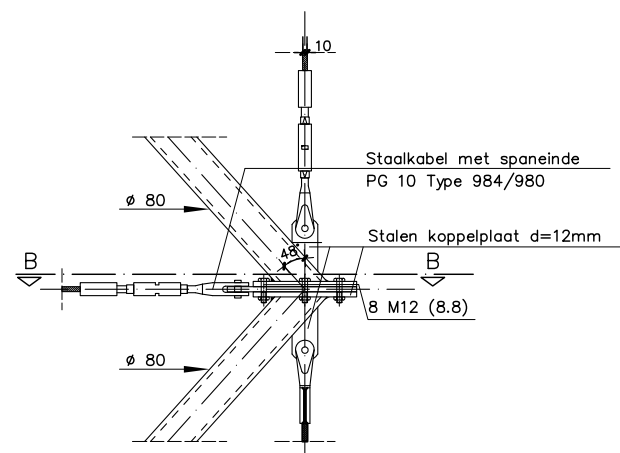
In de detaillering is nu alleen gekeken naar één horizontale knooppunt van units en één verticale knooppunt van units. In de uitvoering is het ook gefocust op horizontale of verticale uitvoering van de units.



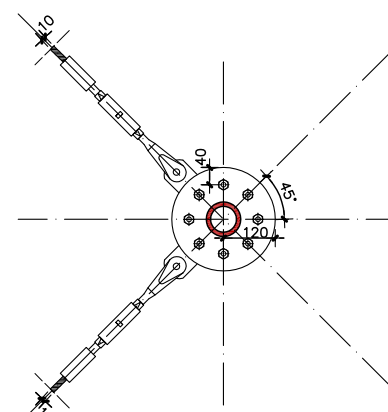
Funderingsdetail–Aanzicht



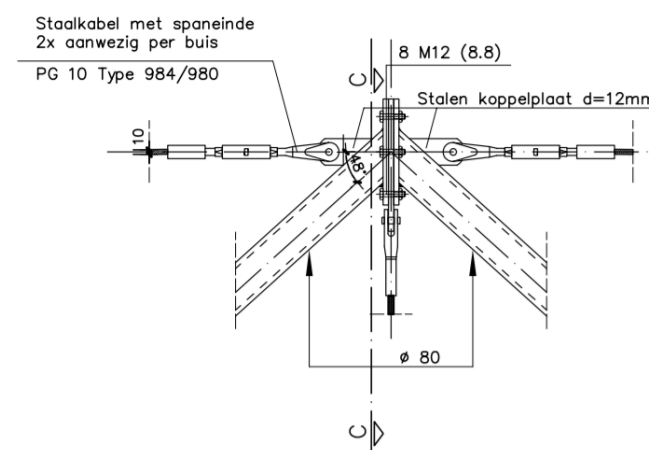
Doorsnede A–A fundering



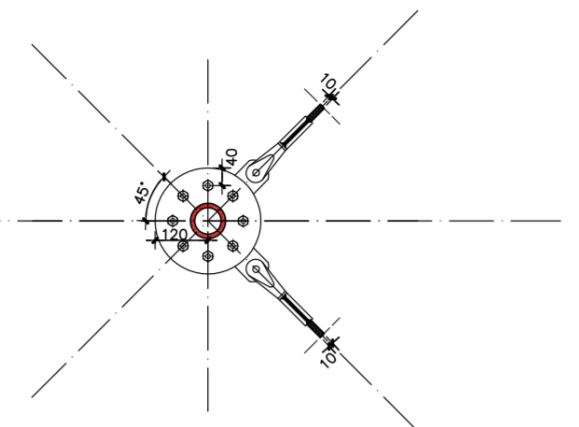
Verticale toren knooppuntdetail–Aanzicht



Doorsnede B–B Knooppunt

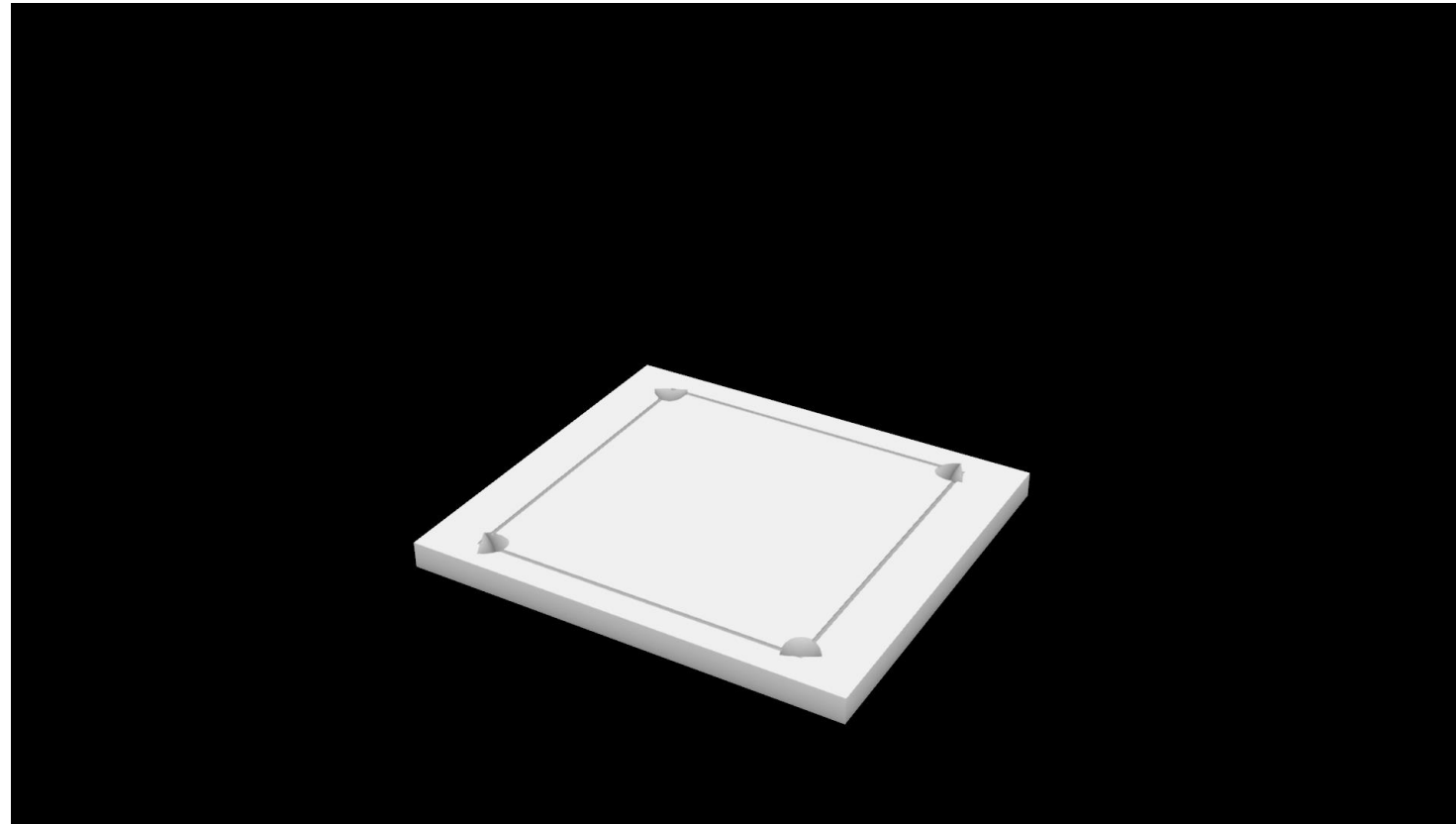


Horizontale ligger knooppuntdetail–Aanzicht



Doorsnede C–C Knooppunt

Uitvoering unit

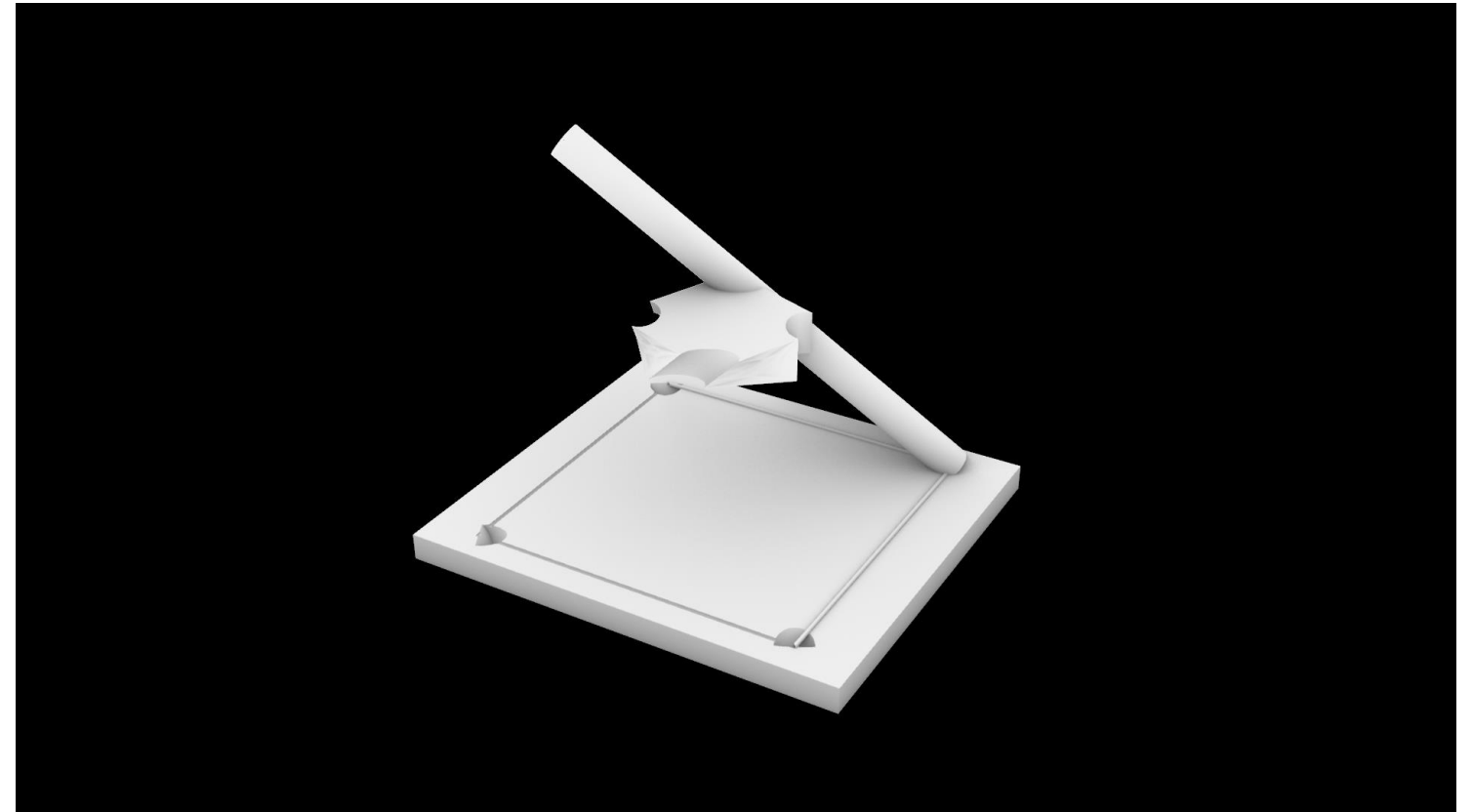
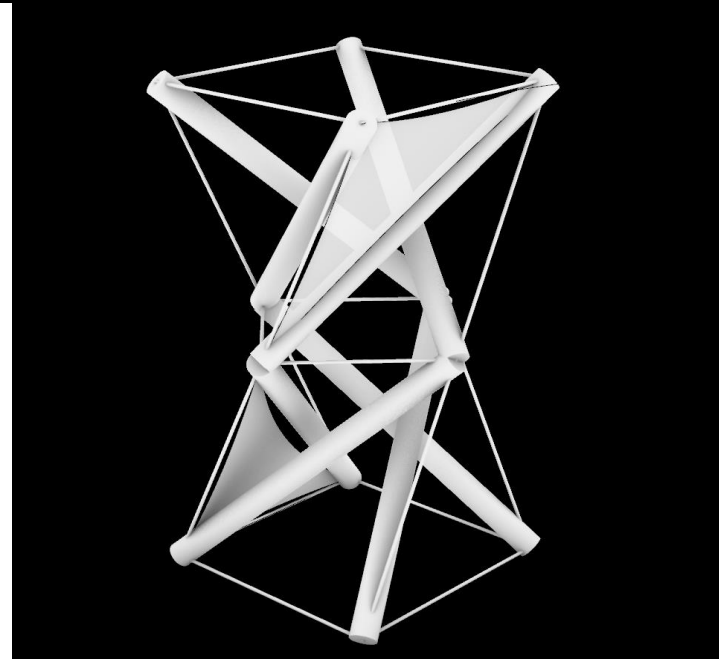


1 Mal onderkant unit

Om de uitvoering van 1 unit gemakkelijker te maken is er een mal waar de staven in passen, zodat ze gelijk in de goede vorm staan. Deze mal hoeft niet bevestigd te worden aan de staven, waardoor deze ook makkelijk los schuift wanneer de unit klaar is.

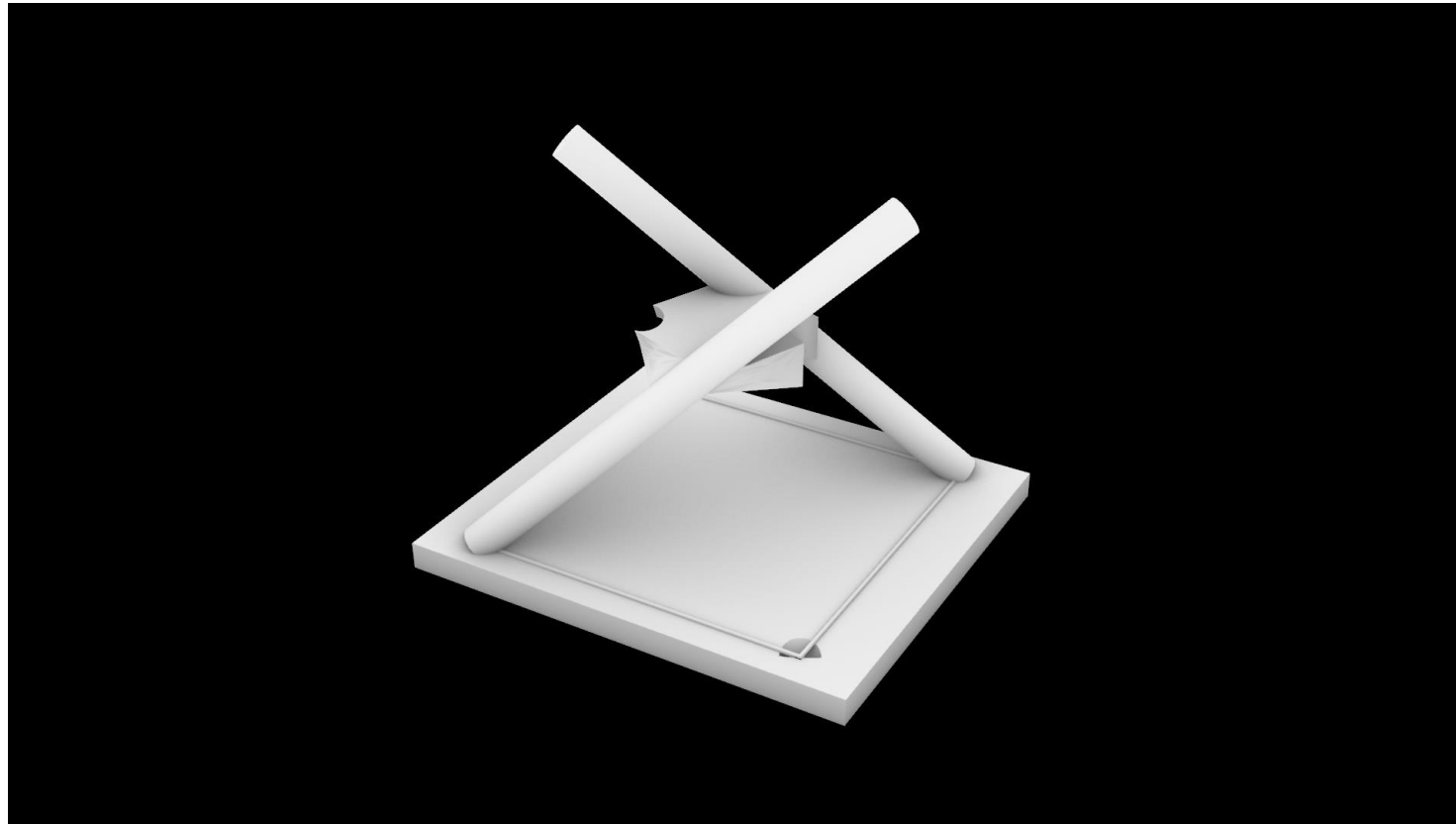
De mal kan omgedraait worden voor de units die gespiegeld bevestigd worden in het paviljoen.

Zie bovenste unit in de afbeelding hiernaast.



2 Mal midden in unit

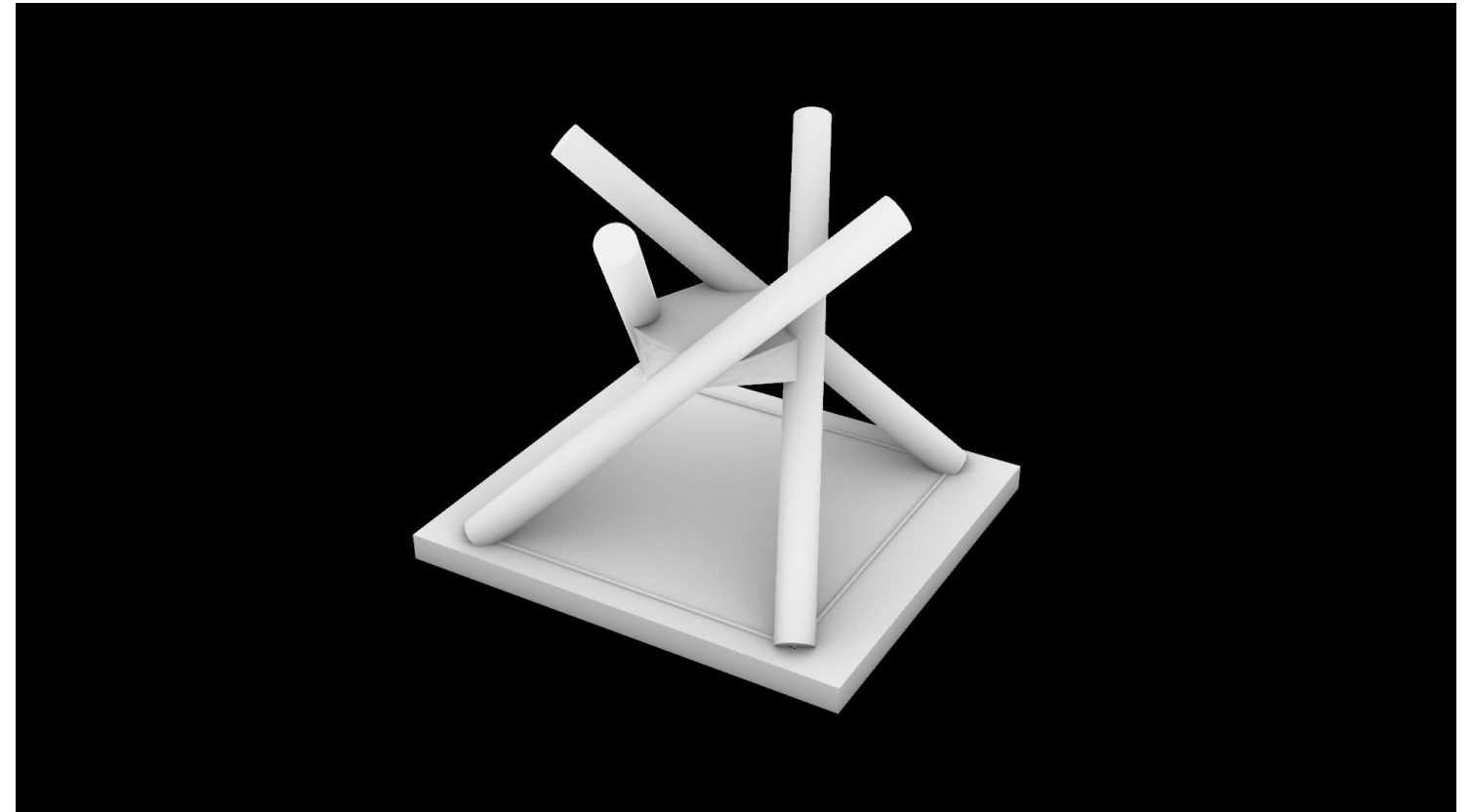
De mal voor in het midden van de unit houdt alle staven in de juiste hoek. De kabels hoeven alleen bevestigd te worden aan de staven en evt aangespannen te worden als ze te slap zijn. Ook deze mal hoeft niet aan de staven bevestigd te worden. Zo kan de mal gemakkelijk verwijderd worden nadat de unit gereed is. Het materiaal van de mallen zijn nog niet bepaald.



3 Plaats de staven in de mal len

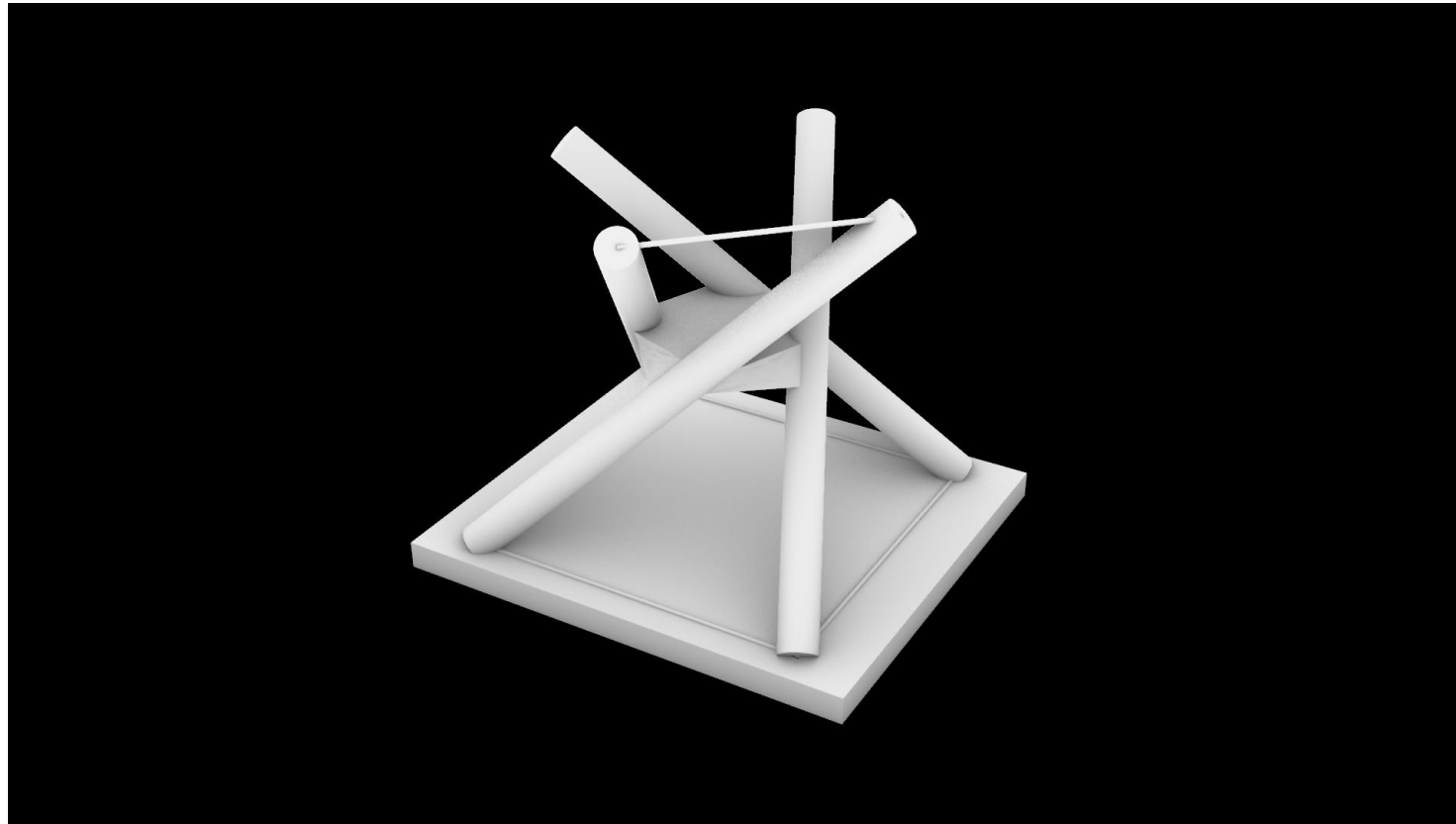
Plaats de eerste 2 staven in de mal zoals op de afbeelding.

Bevestig alvast 2 kabels aan de onderzijde van elke staaf, zodat deze alleen bevestigd hoeft te worden aan de andere staven.



4 Verbindt de onderste kabels

Zorg ervoor dat de kabels volgens de mal gespannen staan. Ze hoeven nog niet strak gespannen staan, wanneer alle kabels bevestigd zijn worden alle kabels strak gezet. Zo wordt voorkomen dat de onderste kabels strakker gespannen staan dan de bovenste kabels.

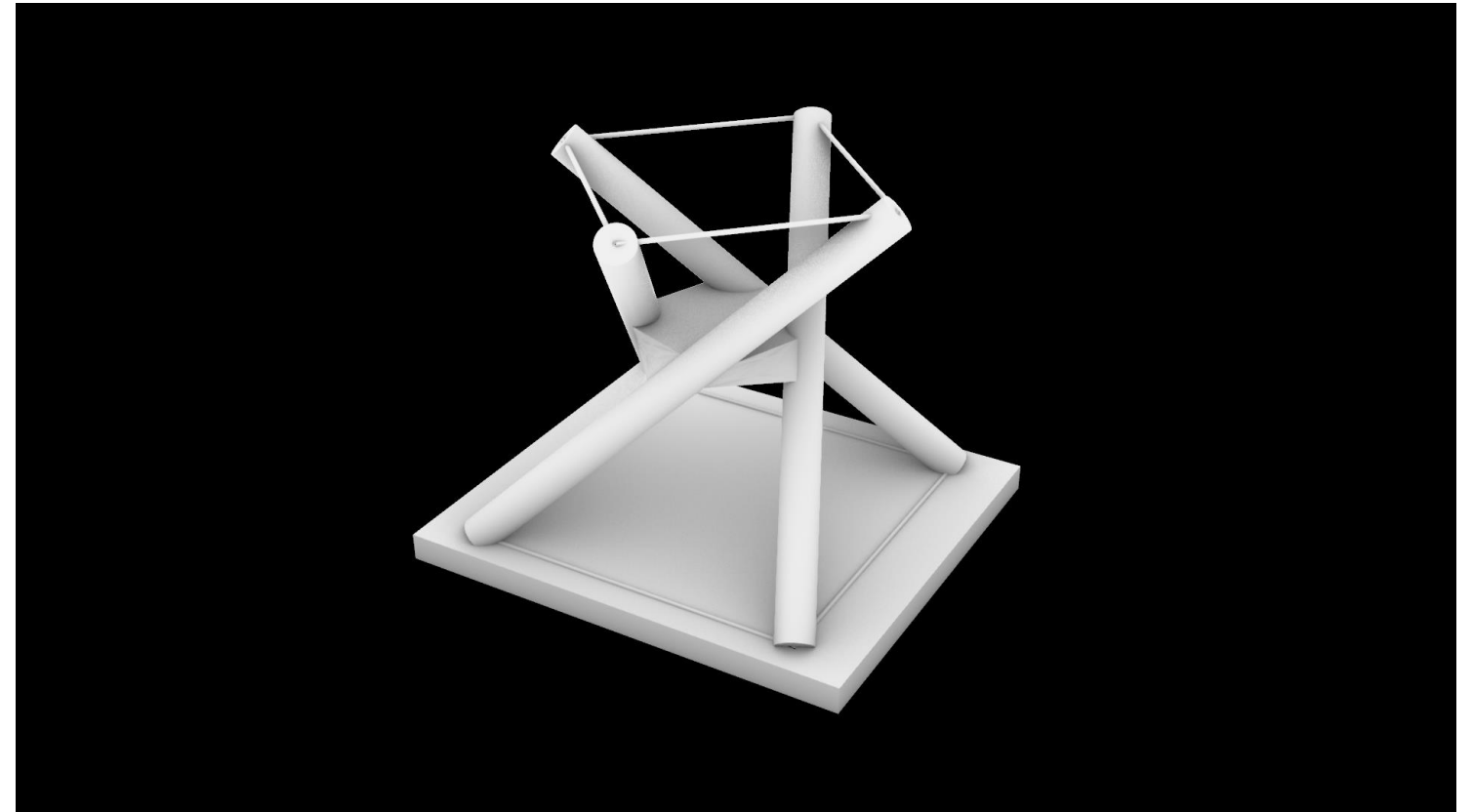


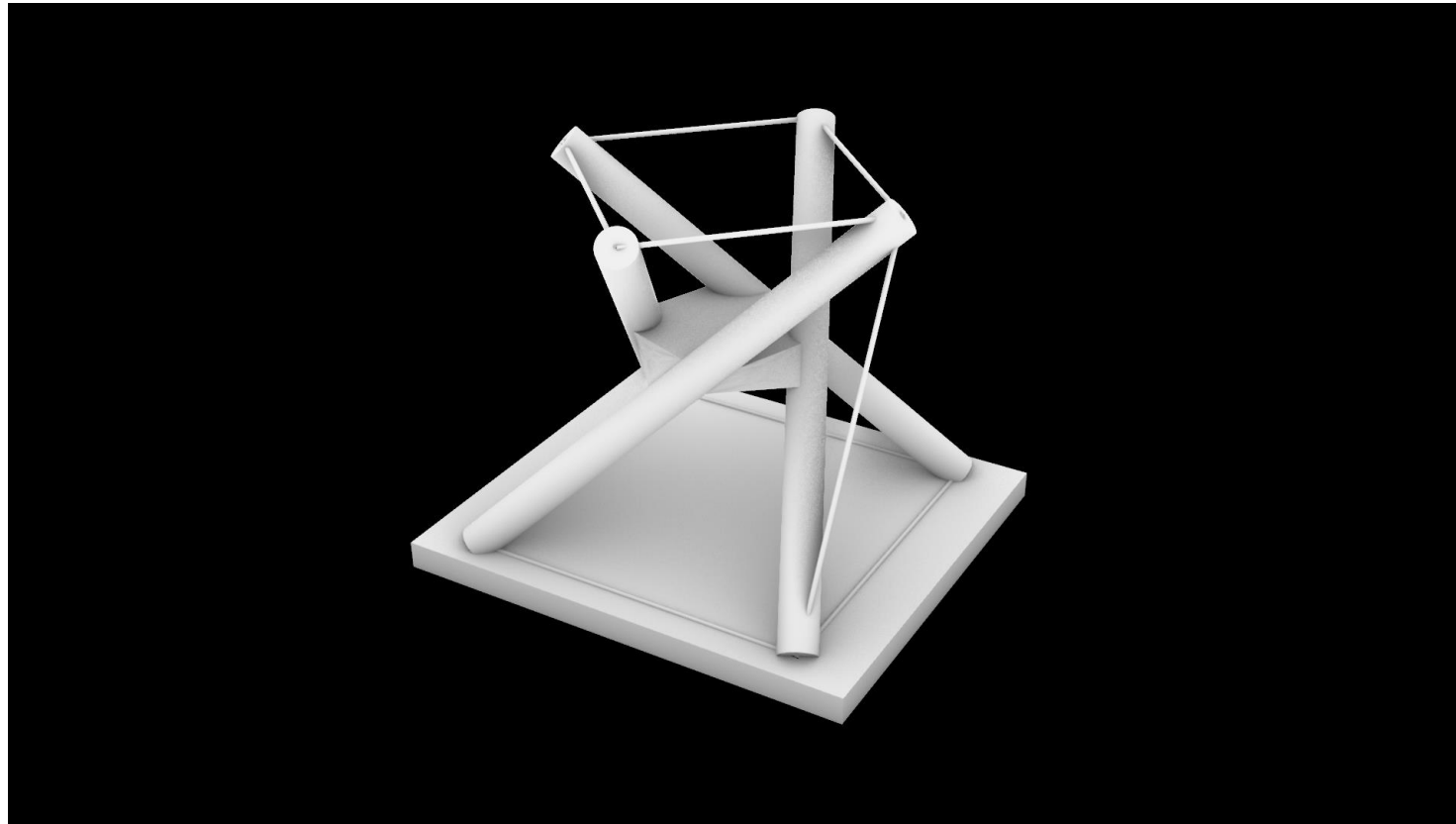
4 Verbindt de bovenste kabels

Verbindt de kabels aan de bovenkant zoals op de afbeelding.

Zorg dat de kabels horizontaal gespannen zijn, maar niet strak gespannen. Wanneer de dwarskabels aan de zijkanten bevestigd worden zullen deze trekken aan de bovenste kabels. Hierdoor zal de vorm kunnen wijzigen, dit wordt later in het proces gecorrigeerd.

Als de bovenste kabels te strak gespannen staan is het bevestigen van de dwarskabels moeilijker.

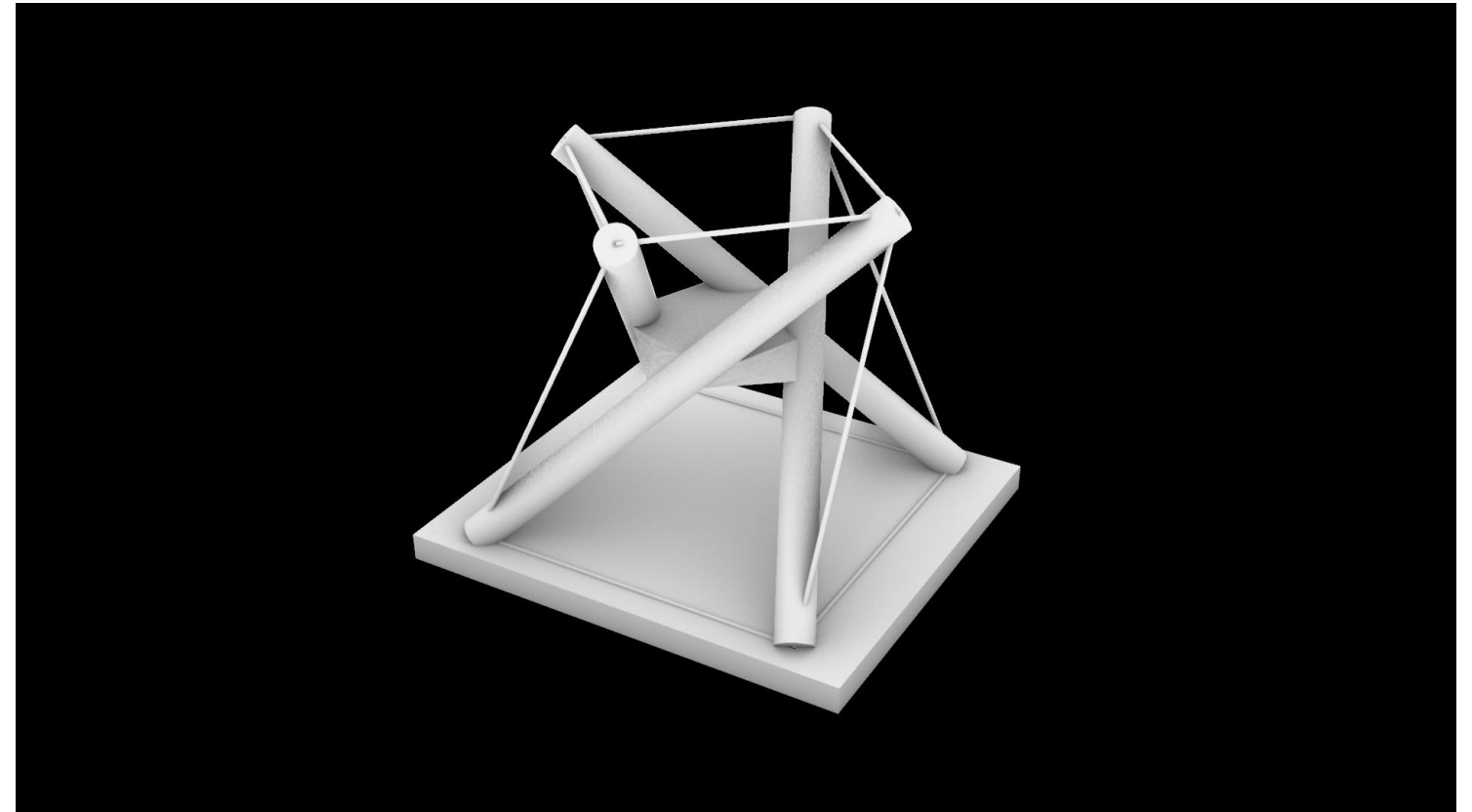




5 Verbindt de dwars kabels

Verbindt de 4 dwars kabels zoals op de afbeelding. Deze kabels zullen het geheel van de constructie onder spanning zetten. De vervormingen zullen plaatsvinden wanneer de laatste kabels verbonden zijn aan de staven. Het is het van belang dat de dwars kabels even lang zijn voordat ze bevestigd worden en evenveel gespannen worden nadat ze bevestigd zijn.

De vervormingen die niet kloppen kunnen later gecorrigeerd worden aan de bovenste en onderste kabels.





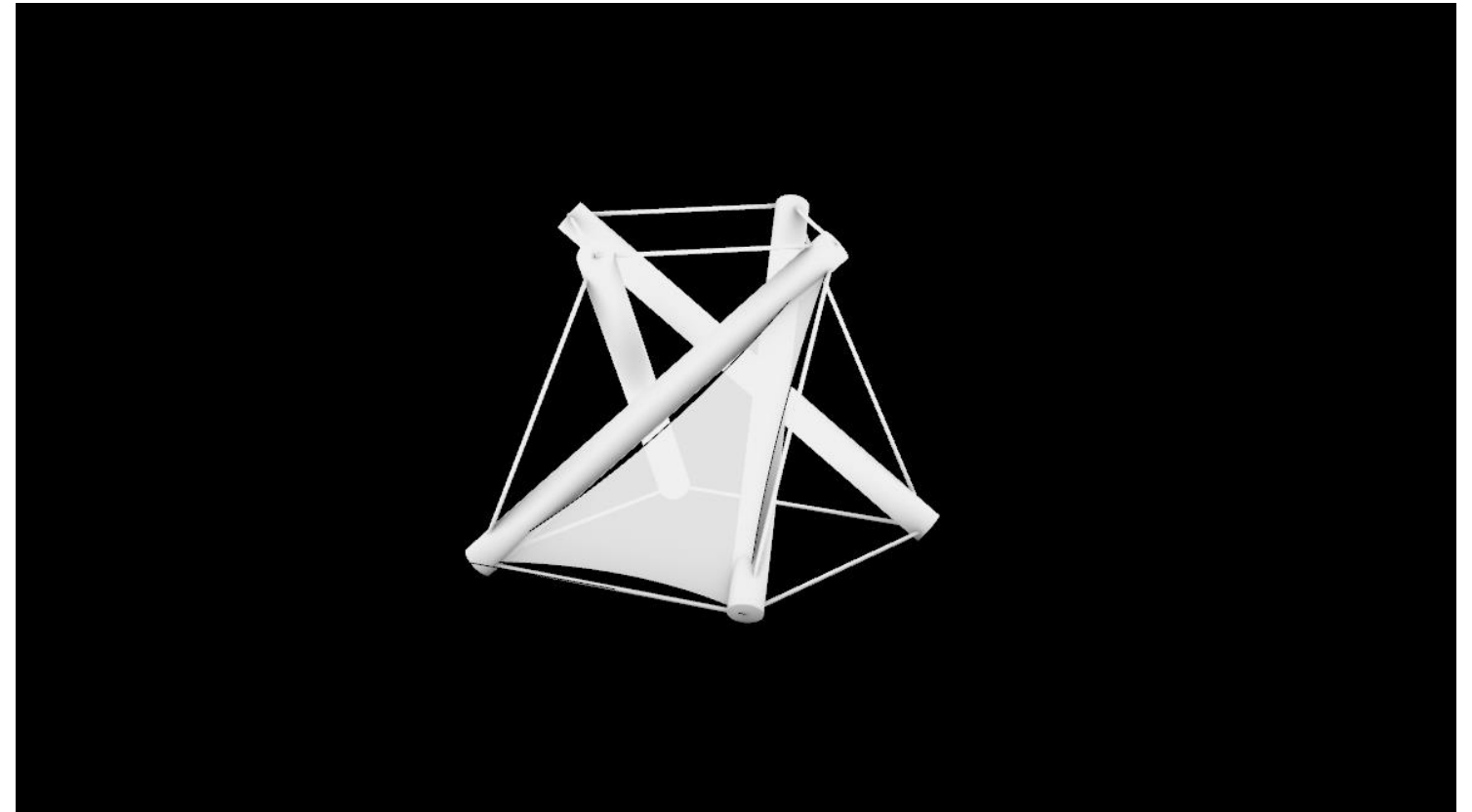
5 Verbindt de dwars kabels

Wanneer alle kabels verbonden zijn plaats de bovenste mal op de unit. Zet vervolgens alle kabels strak in de onderste en bovenste mal. Controleer of alle dwarskabels gespannen staan.

Verwijder vervolgens de middelste mal eerst door deze naar beneden te schuiven. Als de staven niet teveel van draaihoek wijzigen kan de onderste en bovenste mal ook verwijderd worden.

De unit hoort niet veel te vervormen, zodra kabels of staven meer dan circa 5 cm

verschuiven is er sprake van te grote vorm afwijkingen. Zet de mallen terug en ontspan de kabels, zodat er opnieuw gespannen kan worden. Probeer kabels ongeveer even veel aan te spannen.

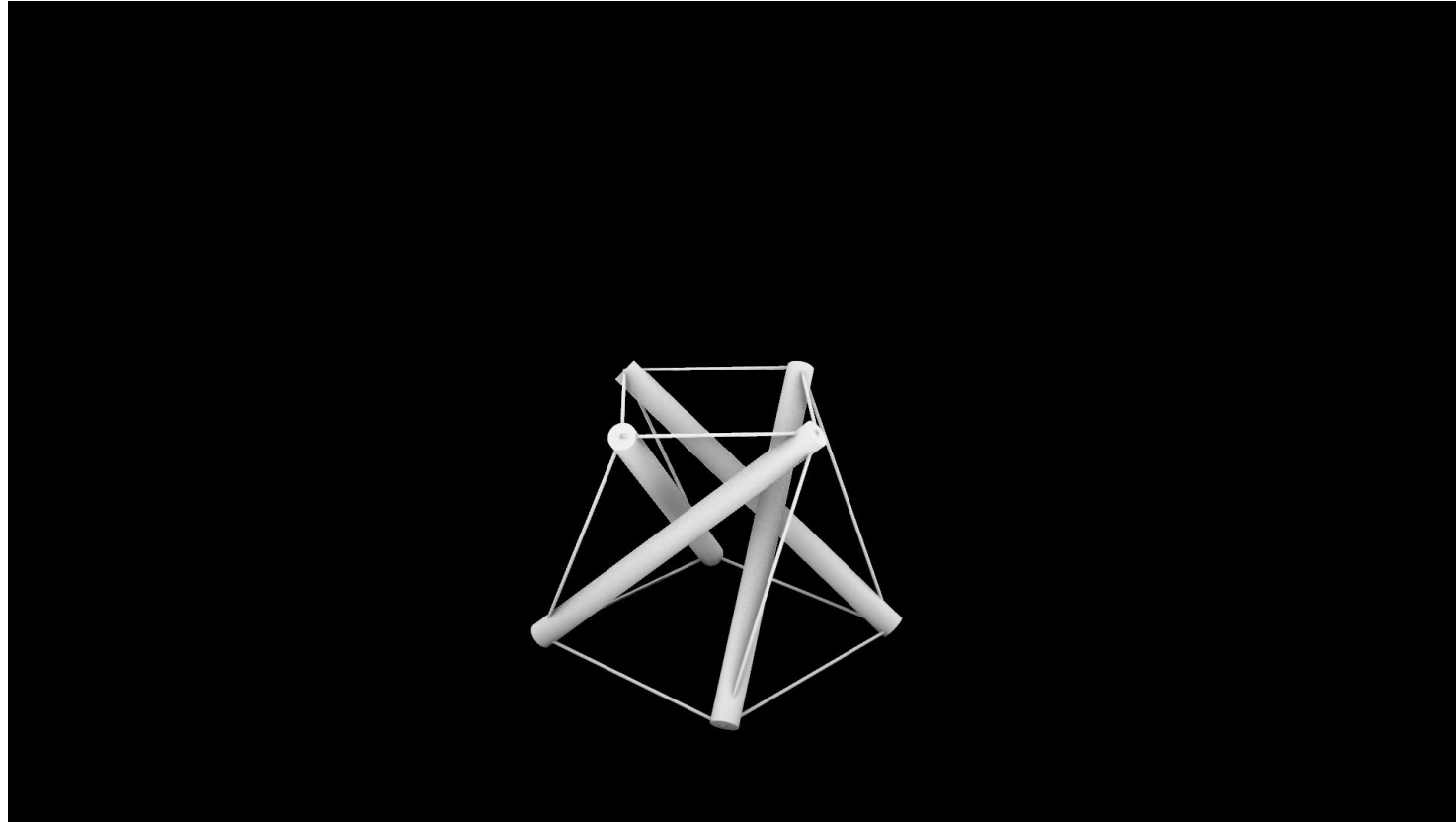


6 Verbindt het membraan aan de unit

Wanneer de unit klaar is zonder meer dan 5 cm vervormingen kan het membraan gespannen worden aan de membraan haken van de unit.

Vervolgens kan de volgende unit gestapeld of ernaast bevestigd worden. Dit wordt in "uitvoering units koppelen" toegelicht

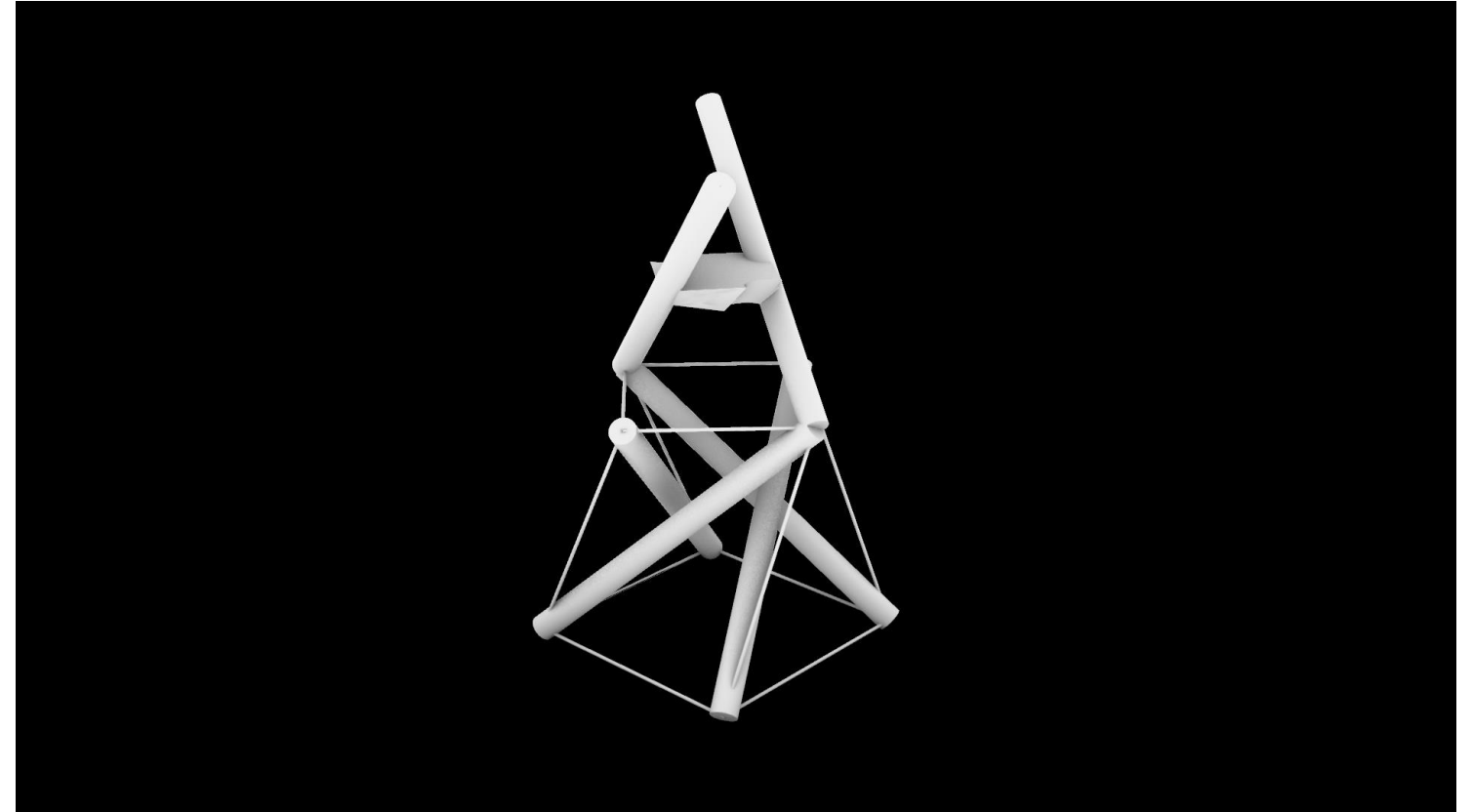
Uitvoering units koppelen

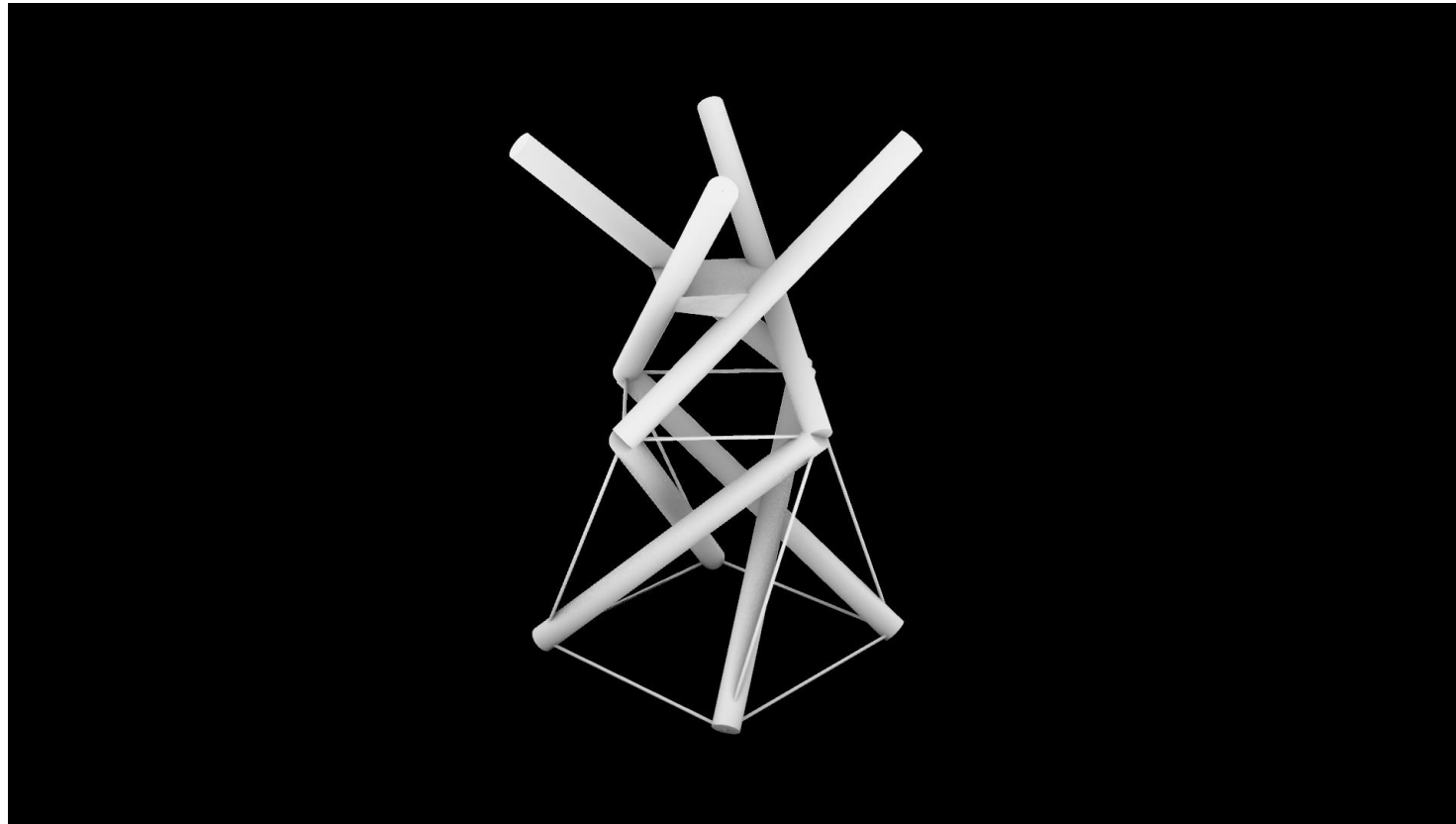


1 Units stapelen

Om de volgende unit te bevestigen zullen 2 mallen opnieuw gebruikt worden. In deze uitleg zullen de units verticaal gestapeld worden, maar het principe geldt hetzelfde voor de horizontale units.

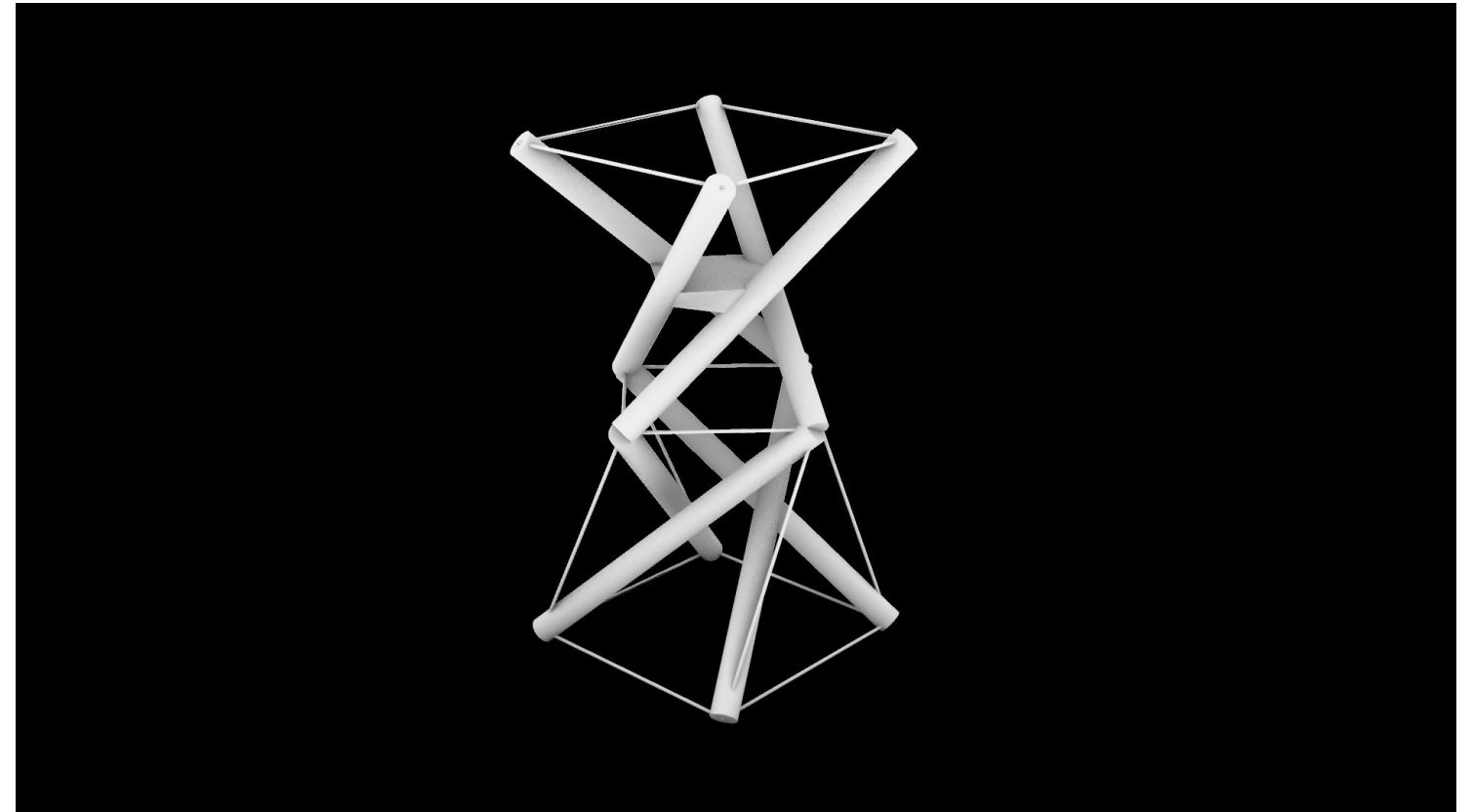
De staven worden direct op de bovenste units bevestigd met de middelste mal in het midden om de juiste draaihoek aan te houden.

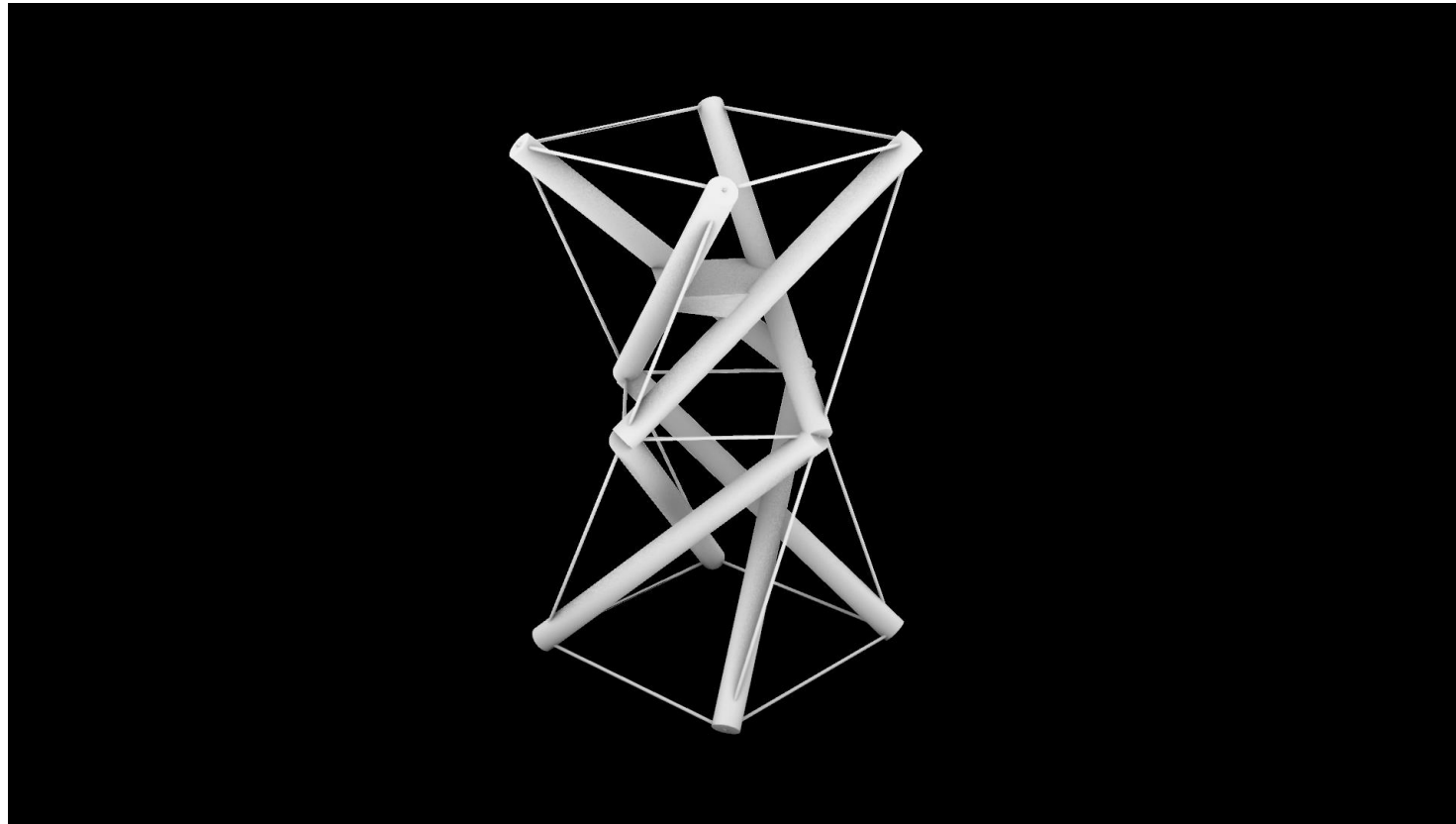




2 Units stapelen

Vervolgens worden dezelfde stappen ondergaan als een losse unit bouwen. Grootste verschil is dat de onderste mal niet nodig is. Daar in plaats worde de staven direct gekoppeld aan de bestaande unit.





3 Units stapelen

Nadat de unit gekoppeld is kunnen de kabels gespannen worden met behulp van de bovenste mal ter referentie aan de vorm.

Let op dat de onderste kabels al gespannen zijn en niet opnieuw gespannen worden.



U i t v o e r i n g s p r o c e s

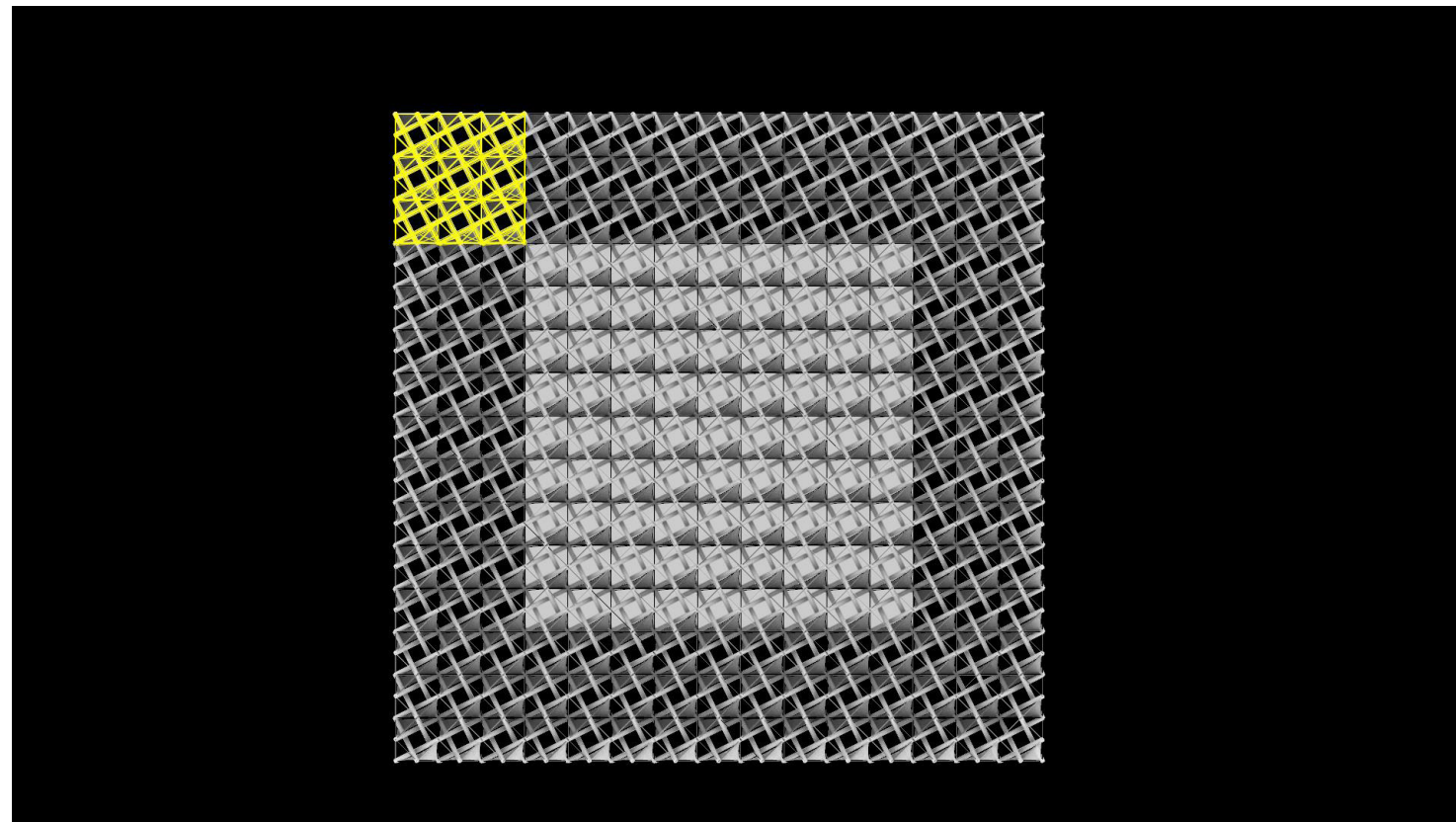
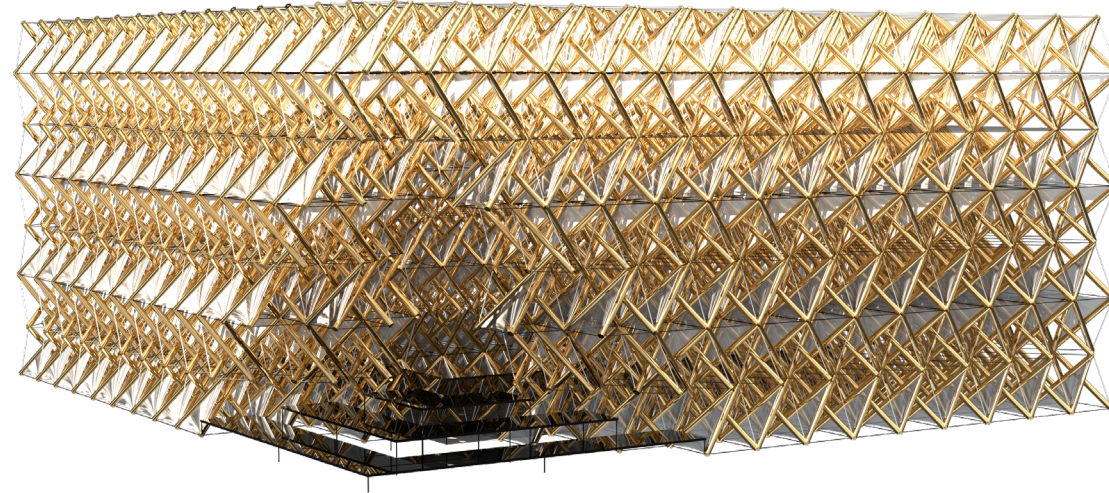
6 . 1 2 P r o c e s

De paviljoen wordt op locatie volledig in elkaar gezet. Units worden aan elkaar verbonden zoals lego blokjes. Het voordeel hieraan is dat tegelijkertijd meerdere units gebouwd kunnen worden om deze later aan elkaar te verbinden.

Zo is een optie om blokken units van 3 x 3 te bouwen en deze later aan elkaar te verbinden. Gezien de wanden 3 units dik zijn en de hoogte 7 units is. Zijn blokken van 3 x 3 het meest efficiënt.

Er kunnen meerdere mallen aanwezig zijn, zodat er tegelijkertijd meerdere units bevestigd of gebouwd kunnen worden.

Zo wordt het proces van het tensegrity paviljoen optimaal gehouden en behapbaar voor de uitvoerders.



Handboek
Tensegrity Kennismaking

Tensegrity voor paviljoenen

Wat zou een reden zijn om voor tensegrity te kiezen in de bouw dan de bekende staalbouw technieken of vertrouwde betonbouw? Welke voordelen zitten aan tensegrity die andere methodes niet bieden? Een nieuwe bouwmethode die niet regelmatig gebruikt wordt brengt meer risico's met zich mee, want het is onbekend, nieuw, onvoorspelbaar etc. Waar moet erop gelet worden wanneer er met tensegrity gewerkt wordt? Wat zijn de valhoeken van het werken ermee?

In dit handboek wordt kort vertelt wat de voor- en nadelen zijn van tensegrity in de bouw. Een mogelijk stappenplan is gegeven met praktische tips en aandachtspunten waar specifiek op gelet moet worden tijdens een project met tensegrity systemen.

7.1 Voor- en nadelen van tensegrity

Voordelen:

- De multidirectionele spanningsnetwerk bevat toevallige spanningen waar ze waar dan ook plaatsvinden en zo zijn er geen punten met lokale zwakheid (Kenner, 1976).
- Vanwege het vermogen om als geheel te reageren, is het mogelijk om materialen in een zeer economische manier te gebruiken. Dit biedt de mogelijkheid om een maximale hoeveelheid kracht te bieden voor een gegeven hoeveelheid bouw materiaal (Inger, 1998). Volgens Vesna en Fuller (Vesna, 2000) kan men met het gebruik van tensegrity tot meer dingen in staat zijn met weinig materiaal.
- Ze hebben geen enkele torsie en knikken is zeer zeldzaam vanwege de korte lengte van de drukstaven.
- Spanningskrachten zenden zich op een natuurlijke wijze over de kortste afstand uit tussen twee punten, dus de leden van een tensegrity-structuur zijn precies gepositioneerd om spanning het best te weerstaan.
- Het feit dat tensegrity structuren gemakkelijk kunnen trillen, betekent dat de krachten worden snel worden overgedragen. De belastingen kunnen dan niet lokaal worden. Dit is erg handig in termen van absorberen van schokken en seismische trillingen (Smaili, 2003). Dus tensegrity is wenselijk in gebieden waarbij aardbevingen een probleem vormen.
- De ruimtelijke definitie van de individuele tensegrity modulus staat een uitzonderlijk vermogen toe om systemen te creëren door het samen te voegen. Een tensegrity model is van zichzelf stabiel (Muller, 1971).
- Voor grote tensegrity constructies zou het proces relatief eenvoudig zijn om uit te voeren, aangezien de structuur zelfdragend is (Whelan, 1981).
- Burkhardt (1994-2004) bevestigt dat de bouw van torens, bruggen en koepels met behulp van tensegrity de constructies zeer veerkrachtig maken en tegelijkertijd ook zeer economisch.

Nadelen:

- Volgens Hanaor (1987) moet de structuur van tensegrity modellen worden opgelost, want bij sommige ontwerpen komt er een ophoping van de drukstaven. Als de lengte van een ontwerp groter wordt kunnen de drukstaven elkaar aanraken en hiervoor zal er een oplossing moeten worden bedacht.
- De complexiteit van de fabricage kan een barrière voor het ontwikkelen van zwevende drukstaven. Bolvormige structuren zijn complex en dit kan leiden tot problemen in de productie (Burkhardt, 2004).
- Er is nog steeds tot op heden een gebrek aan ontwerp- en analysetechnieken voor deze tensegrity structuren. Meerdere programma's moet men gebruiken. Voor het moduleren heeft men een programma en voor de berekeningen wordt weer een ander programma gebruikt.
- Om kritische belastingen te ondersteunen, moeten de voorgespannen kabels hoog genoeg zijn en dit kan moeilijk worden in grotere constructies (Schodeck, 1993).

7.2 Stapplan

1. Oriënteren

Zoek bestaande projecten met functies die hetzelfde zijn als jouw project en oriënteer je in wat tensegrity is en inhoudt.

Om te helpen met de oriëntatie zijn de volgende bronnen mogelijk van toepassing:

- Structure Systems – Heino Engel
- Tensegrity systems – Robert E. Skelton, Mauricio C. de Oliveira
- Tensegrity: Structural Systems for the Future – Rene Motro
- Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking – R. Buckminster Fuller

2. Bestuderen

Bestudeer door middel van maquettes het krachterspel en de vorm van tensegrity. Probeer verschillende vormen van tensegrity te maken die van toepassing kunnen zijn voor het project.

Maquettes zijn in het begin het makkelijkst te maken met satéstokjes en elastieken.

Andere mogelijkheden voor kabels zijn:

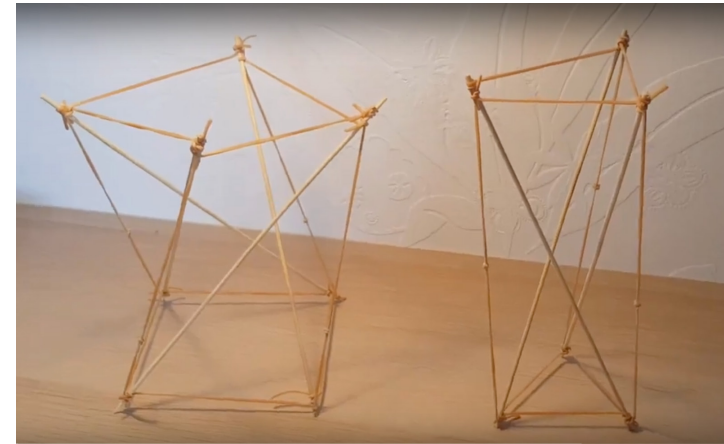
- Staaldraad aanspannen met behulp van kroonsteentjes
- Staaldraad ombuigen in de rietjes
- Naaidraad

Mogelijkheden voor de staven zijn:

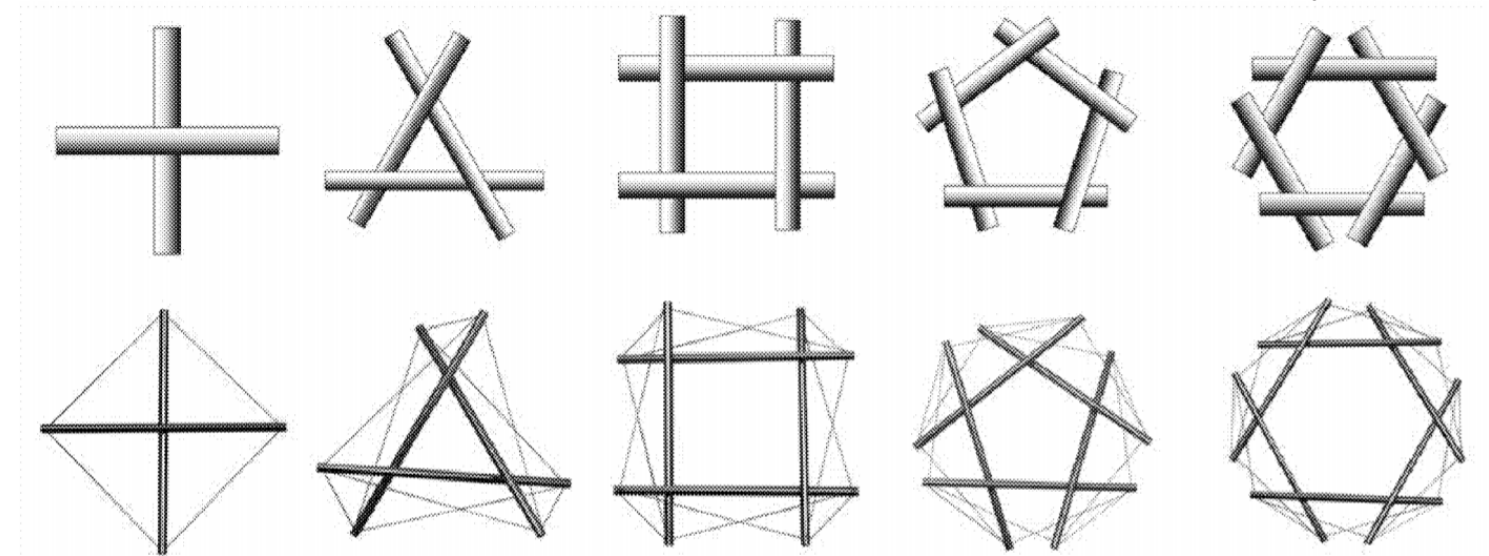
- Houtenstokken
- Rietjes
- Stalen buisjes

3. Tensegrity vorm bepalen

Een tensegrity configuratie kan opgebouwd zijn uit verschillende vormen, in de afbeelding hieronder zijn enkele vormen weergegeven. Het is belangrijk om te focussen op 1 specifieke vorm, want zo kan er doelgericht worden gewerkt met tensegrity.



Figuur 6.1
Maquettes van Jacky



Figuur 6.2
Tensegrity vormen
(Telgen, 2012)

4. Uitwerken, mogelijke programma's

Architectuur tekenprogramma's

- Rhino
- Sketch-up

Constructieve rekenprogramma's

- Femap
- Grasshopper

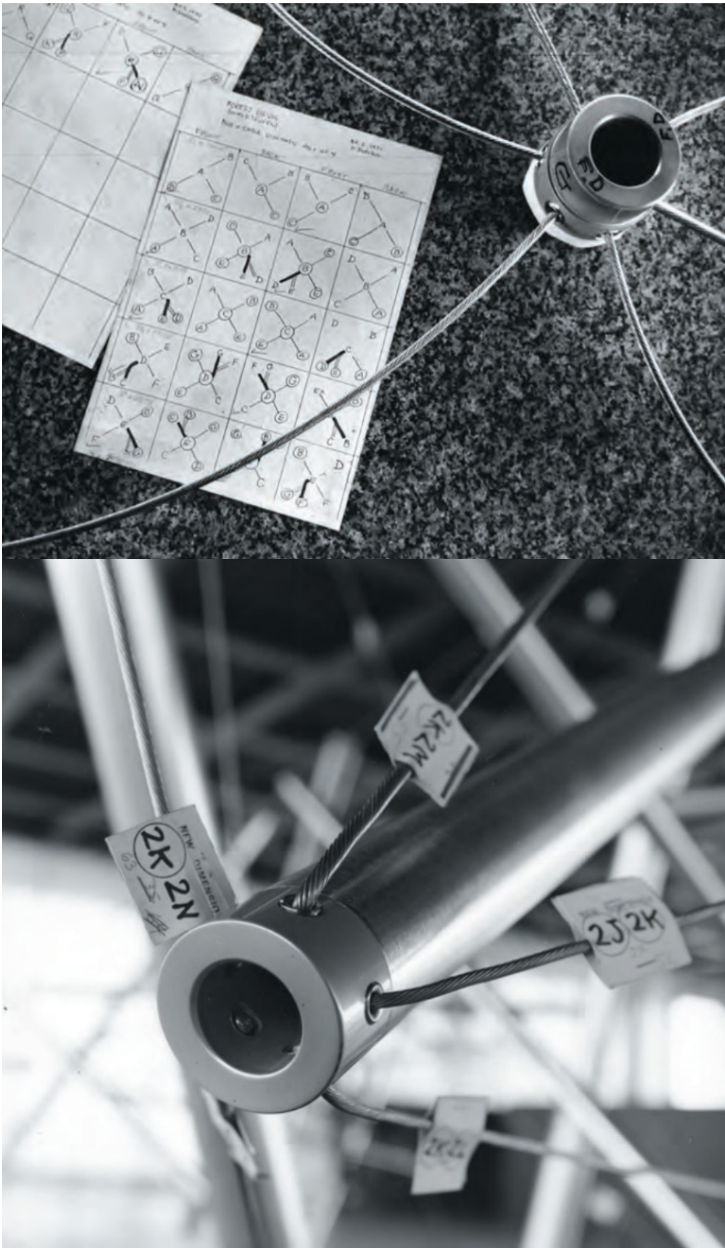
5. Detaileren

Om de knooppunten van een tensegrity ontwerp te detaileren, kan de volgende referentiebeelden worden gebruikt:

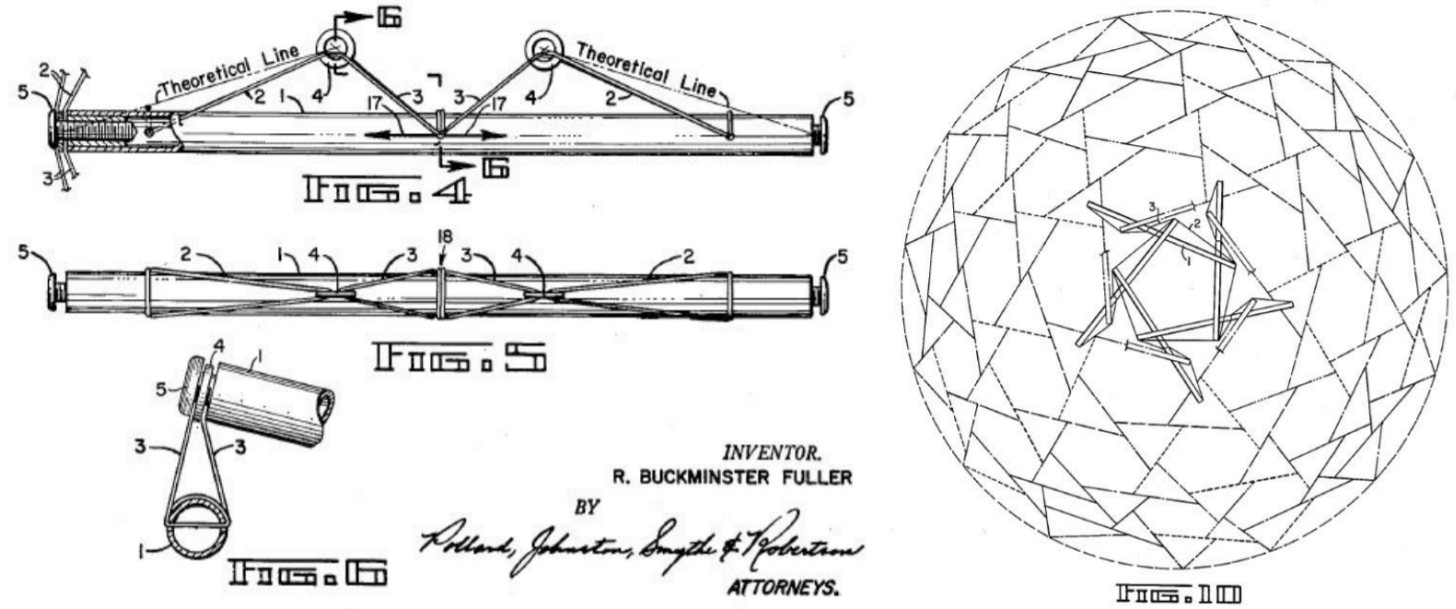
- Kenneth Snelson Sculpture detail



Figuur 6.3
Detail Kenneth Snelson
(Heartney, 2013)

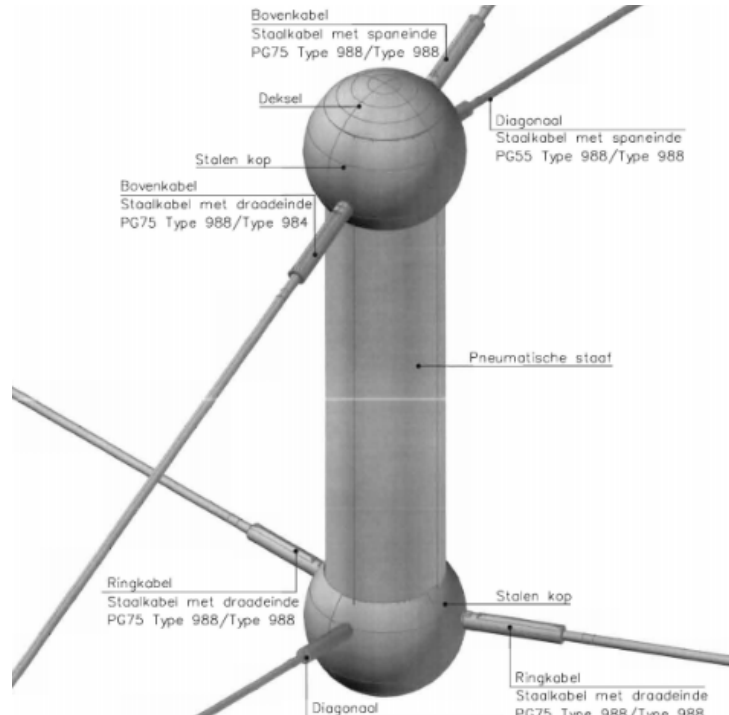
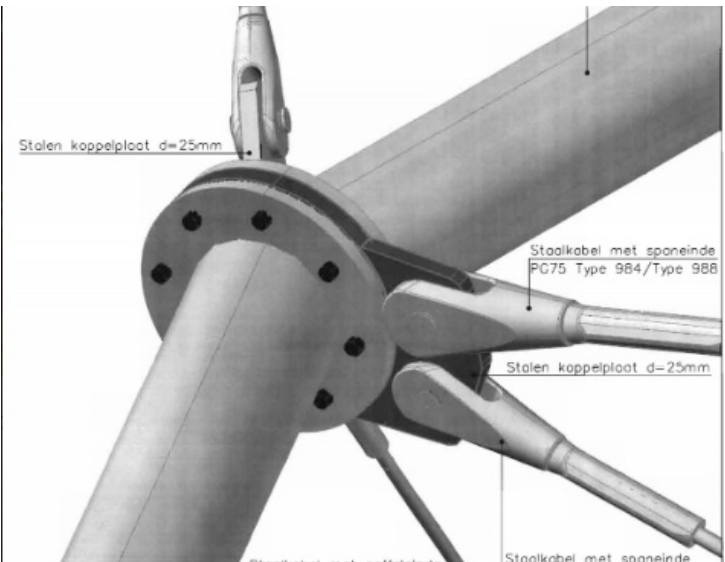


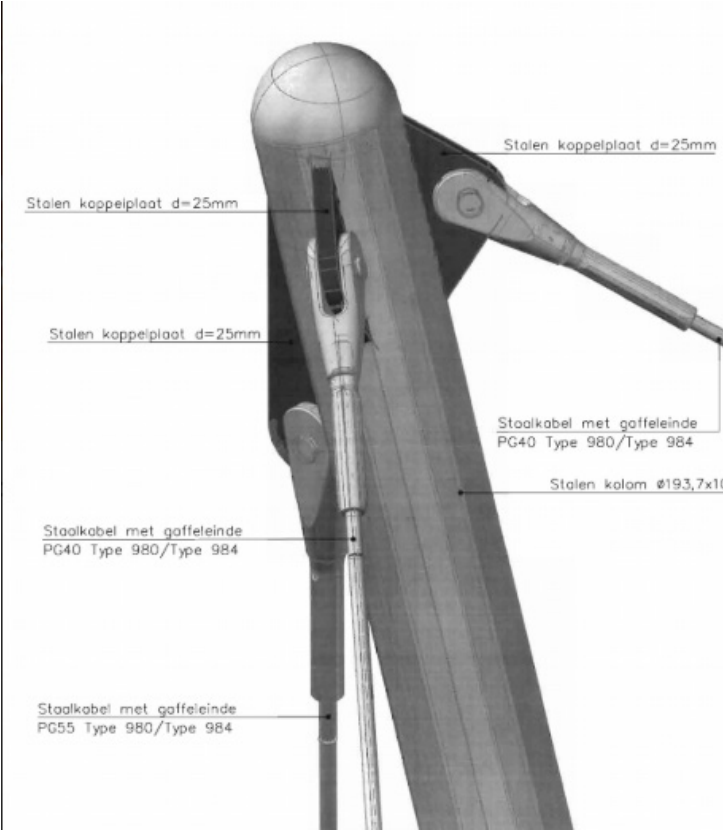
- Buckminster Fuller Geodesic dome detail



Figuur 6.4
Detail Buckminster Fuller
(Bernards, 2014)

- Marielle Rutten (Afstudeerproject), knooppuntverbinding is gericht op de pneu-tensegrity constructie.



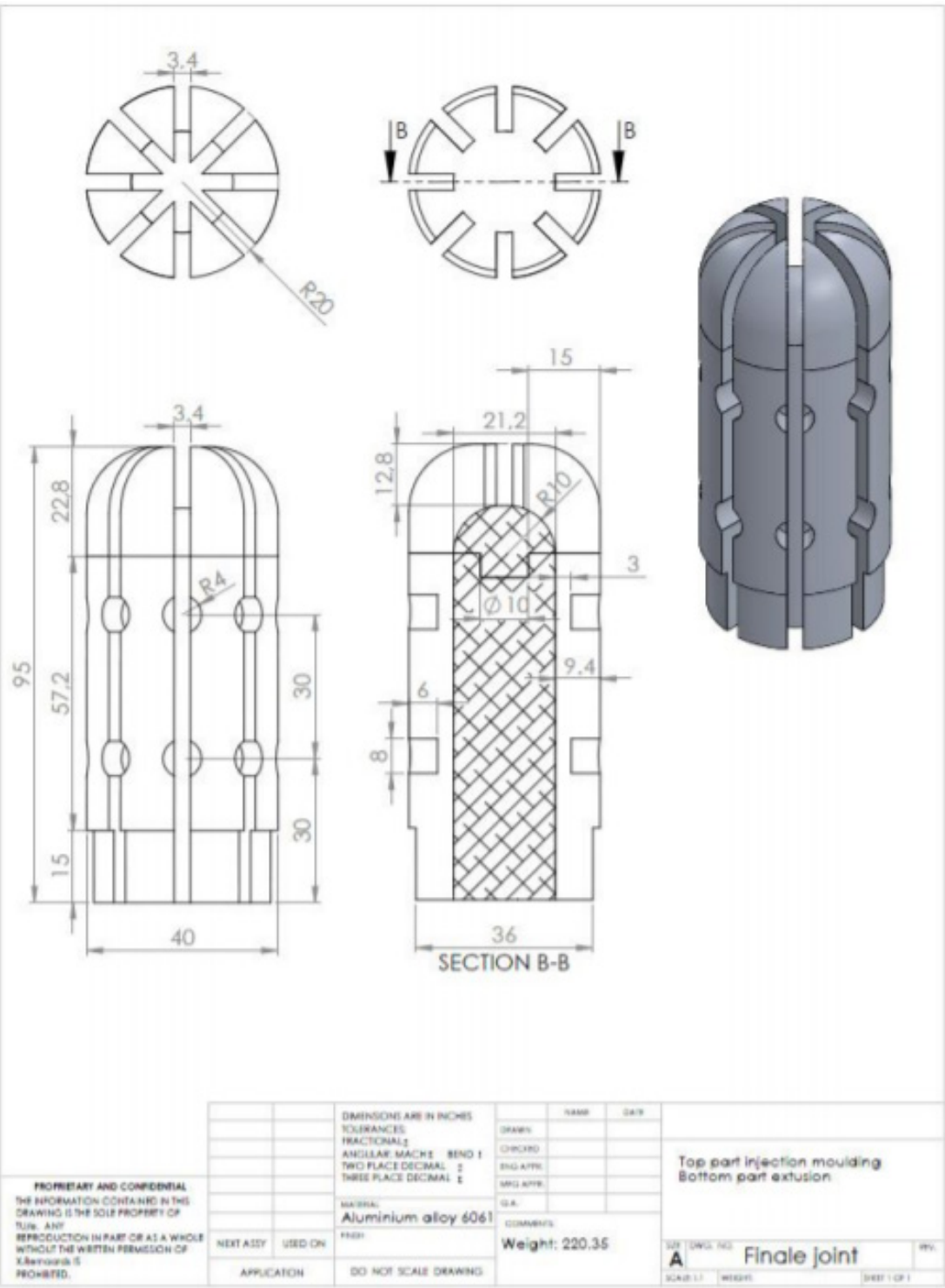


Figuur 6.5
Detail Mariëtte Rutten
(Rutten, 2008)

- Afstudeerproject van Xander Bernaards detail

Het afstudeerproject 'Development of a tensegrity joint' van Xander Bernaards van de TU Eindhoven heeft onderzoek gedaan specifiek op tensegrity detailleringen. Hieruit is veel informatie te vinden over de mogelijkheden en belangrijke punten voor de tensegrity detailleringen.

Figuur 6.6
Xander Bernaards
(Xander, 2014)



6. Constructief berekenen

- Axiale krachten berekenen in de druk-en trekstaven.
- Voorspanning trekkabel berekenen.
- De vervorming berekenen van de gehele constructie op basis van eigen gewicht en voorspanning trekkabels. Dit wordt dan gedaan om alvast inzicht te krijgen van wat de vervorming wordt bij alleen de permanente belastingen.
- Nadat de permanente belastingen zijn berekend, moeten de veranderlijke belastingen worden berekend. Onder de veranderlijke belasting wordt voor dit project alleen de windbelasting berekend, maar bij andere projecten kan bijvoorbeeld een veranderlijke belasting komen van de vloerbelasting.
- De windbelasting wordt in twee onderdelen verdeeld: q-last windbelasting op alle drukbuizen van het gehele tensegrity gebouw. Het tweede onderdeel is; puntlasten op het uiteinde van een drukbuis berekenen, want een membraan wordt op een aantal punten verankerd. De windbelasting die komt op een membraan, wordt dan grofweg meegenomen in de berekening. Om de windbelasting precies te berekenen van een membraan, kan een programma zoals RFEM worden gebruikt om precies de windbelasting te berekenen. Er zijn niet veel programma's die dit kunnen.
- De vervorming van het gehele gebouw berekenen, nadat alle permanente -en veranderlijke belasting zijn berekend.
- Wet van Hooke: rekking van een kabel berekenen, nadat alle krachten bekend zijn.
- Conclusie trekken of de stabiliteit, sterkte en stijfheid wel wordt gewaarborgd.

7.3 Extra aandachtspunten

Architectonische aspecten

- Zijn de vervormingen wel of niet gewenst?
- Aantal kabels
- Esthetica van de detaillering
- Bevestigingspunten voor membranen zorgen voor > vervorming van constructie is deze wel of niet gewenst?
- Gevolgen van kabels die stuk gaan
- Spanningsrelaxatie van de kabels op lange termijn
- Veiligheidsgevoel van gebruikers wanneer constructie vervormt

Constructieve aspecten

- Spanningen
- Knooppuntverbindingen

Conclusie & Aanbevelingen

Conclusie & Aanbevelingen

Hoofdvraag Wat is architectonisch en constructief van belang wanneer tensegrity toegepast wordt in een paviljoen op het campus van TU Delft?

De grootste knooppunten voor het paviljoen zijn de vervormingen en de membranen die de wind opvangen, hierdoor kunnen de vervormingen groot worden. Dit komt voornamelijk als klasse 1 tensegrity is toegepast. De stijfheid van de constructie is het laagst bij klasse 1. Zodra staven in contact zijn zal de constructie stijver worden. Vanwege de visie is in dit onderzoek klasse 1 tensegrity aangehouden om tensegrity systemen te onderzoeken, zodat het proces de beste resultaten geeft voor wat de lastige punten zijn van het werken met tensegrity systemen. Nadat klasse 1 was onderzocht is een conclusie getrokken dat voor een grotere constructie (paviljoen) een andere tensegrity klasse gebruikt moet worden en dat wordt ook toegepast. De vervormingen van de gehele constructie loopt dan fors terug naar een gangbare maat. Hieruit zijn de volgende belangpunten naar voren gekomen.

Architectonische aspecten

Uitvoerbaarheid

De reden waarom uitvoerbaarheid als eerste punt staat bij architectonische aspecten is, omdat tijdens de vormstudie met maquettes dit het eerste punt is waartegen aangelopen wordt. Zodra één kabel losschiet in een maquette, valt de gehele tensegrity systeem in elkaar. Ook wanneer er niet genoeg voorspanning is in 1 of meerdere kabels staat de maquette niet stabiel en/of krijgt deze niet de gewenste vorm.

Het is in de realiteit ook de grootste uitdaging om de uitvoering vertaalbaar te maken aan aannemers. Mensen worden in eerste instantie overweldigd met de complexiteit van de constructie. Hierdoor wordt het lastiger om partijen te overtuigen dat het wel haalbaar is en niet een te groot risico op economisch vlak. Het uitvoeringsproces is bij de definitieve ontwerp van het paviljoen zodanig uitgewerkt dat het voor de aannemers een stuk aangenamer wordt om te werken met een tensegrity constructie.

Vervormingen

De vervormingen in tensegrity systemen zijn niet altijd gewenst voor het ontwerp. Het is moeilijk exacte lijnen te bepalen van een tensegrity systeem, doordat deze mogelijk afwijken in de realiteit. Hierdoor is het lastig om te ontwerpen met tensegrity. Door het systeem goed te begrijpen, krijgt men als ontwerper meer houvast tijdens het ontwerpproces. Er zou eventueel gekeken kunnen worden naar onderzoeksrapporten over het vormgeven van tensegrity systemen.

Gebruikersvriendelijk

In het geval met klasse 1 tensegrity systemen kunnen de vervormingen ervoor zorgen dat de gebruikers zich onveilig gaan voelen. Doordat mensen gewend zijn dat gebouwen stil staan, zou een bewegende constructie die lichtjes met de wind meebeweegt als gevaarlijk en onstabiel ervaren kunnen worden. Het is hierdoor in kleine gebouwen lastig deze ervaring onmerkbaar te maken. In grote gebouwen zal dit minder snel ervaren worden door de grote oppervlakte van de constructie. De vervormingen in het paviljoen was zo groot dat het gebouw te veel zou bewegen. In het definitieve ontwerp lopen de vervormingen zo terug dat de gebruiker het minder snel zou opmerken.

Constructieve aspecten

Wind

Tensegrity klasse 1

De vervorming van de gehele constructie wordt juist zo groot door de totale windbelasting. Zonder de windbelasting vervormt de constructie hooguit een paar millimeter, want het is een licht gewicht constructie dus zal door het eigen gewicht niet veel vervormen. De voorgespannen kabels zorgen er ook voor dat de constructie stabiel blijft.

Één tensegrity toren bestaat uit zeven units die op elkaar zijn gestapeld en hierop komt windbelasting op de drukbuizen. Door deze windbelasting gaat de gehele constructie vervormen. De vervorming wordt aan de top meer dan 100 mm. Elk unit heeft ook nog eens een membraan in een vlak zitten. Het membraan heeft een driehoekige vorm en dit vangt ook wind op.

De windbelasting van de membranen zijn ook meegerekend in de gehele constructie en door deze belasting gaat de toren extreem vervormen aan de bovenkant. De vervorming wordt aan de bovenkant dan wel meer dan 900 mm. De windbelasting is al een boosdoener, maar wind vanuit één richting is er enemaal. De windbelasting die extra op zo'n constructie komt van de membranen kan voorkomen worden. Het kan weggehaald worden of de hoeveelheid moet fors verminderd worden en zo wordt de vervorming dan ook minder.

Tijdens de berekening zijn er extra kabels toegevoegd in de toren. Deze kabels hebben een voorspanning van 250 N en hierdoor wordt de toren nog "stabiel gehouden". Het gaat niet omvallen. De voorspanning kan niet groter, want dan zou het te stijf worden en dan wordt het juist instabiel. Hieraan kan niet veel meer aan veranderd worden. Het zou

eventueel wel kunnen als er een nieuwe vorm unit gebouwd wordt waarbij er geen gebruik is gemaakt van losstaande units en horizontale kabels. Alles zou dan in 1 keer moeten worden gebouwd. Het hele ontwerp zou dan veranderd moeten worden.

Tensegrity klasse > 1

De wind wordt na onderzoek bij de nieuwe tensegrity constructie geen probleem meer, doordat de druk elementen elkaar raken in de verticale – en horizontale richting in de gehele paviljoen. De vervormingen worden hierdoor fors verminderd doordat een andere klasse tensegrity wordt toegepast. De voorspanning in de kabels wordt dan wel een stuk groter dan een tensegrity klasse 1. Het gaat van 250 N naar 5000 N, maar de kabel van 10 mm kan dit hebben. Wat wel een nadeel is bij het nieuwe ontwerp, is dat er hierdoor geen sprake meer is van een pure tensegrity constructie. De uitdaging om een tensegrity klasse 1 te maken vervalst dan. De drukstaven raken elkaar doorgaans aan in de gehele constructie en het bestaat uit 1098 units, dus er zou dan sprake zijn van een hele grote klasse wat nog niet echt bestaat. De constructie wordt dan bijna een soort van vakwerk.

Knooppuntverbindingen in horizontale- en verticale richting

De knooppuntverbindingen zijn een heel belangrijk onderdeel in een tensegrity systeem. De juiste verbinding zal moeten worden ontworpen. In dit onderzoek zijn voor het nieuwe ontwerp drie knooppuntdetails ontworpen. Om dit te ontwerpen is er een uitgebreid onderzoek vooraf gemaakt. Om de drie details te ontwerpen zijn er denkprocessen gemaakt. Iedere detail had een eigen denkproces.

De uiteindelijke ontworpen details hebben geen betrekking op een tensegrity constructie met de klasse 1. De details zijn zodanig ontworpen dat de units op elkaar gestapeld kunnen worden. Zo kan het paviljoen gemakkelijk worden kunnen uitgevoerd. Het paviljoen bestaat uit vele tensegrity units en deze units worden met elkaar verbonden in de horizontale – en verticale richting.

Bij beide richtingen worden de knooppunten op dezelfde manier verbonden. Hiervoor is gekozen, omdat dit type constructie niet te complex mag worden bij de uitvoering. Iedere unit wordt gemaakt in een soort mal en kan dan gekoppeld worden aan andere units. Op de bouwplaats kunnen de units eenvoudig op elkaar gestapeld worden middels de ontworpen knooppuntdetails. Het uitvoeringsproces wordt stap voor stap uitgelegd in het hoofdverslag.

Algemene eindconclusie

Uit dit uitgebreide onderzoek is gebleken dat er gebouwd moet worden met een hogere tensegrity klasse, want zo worden vervormingen flink ingeperkt en kan de uitvoering ook een stuk makkelijker worden uitgevoerd. Ook kan een vorm makkelijker worden ontworpen, want de drukelementen mogen elkaar aanraken.

B i b l i o g r a f i e

Burkhardt, R. (2004). A Practical Guide to Tensegrity Design.

Fuller, R. B. (1975). Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking. Ingber, D. E. (1998). The Architecture of Life. Opgehaald van <http://vv.arts.ucla.edu/projects/ingber/ingber.html>

Lalvani, H. (1996). Origins of tensegrity: views of Emmerich, Fuller. 11:27-55. Motro, R. (2003). Tensegrity: structural systems for the future .

Pars, M. (2019). Tensegrity . Opgehaald van Tensegriteit : <http://www.tensegriteit.nl/n-architecture.html>

Robert E. Skelton, M. C. (2009). Tensegrity systems. In Tensegrity in nature. Springer. Sciencedaily. (2006). Strings As Structural Elements? Engineers Devise Mathematics For New Age Structures.

Spel, J. (2007). Typologie van een paviljoen. In Tropisch woud paviljoen - popcentrum (p. 15).

Arup. (2009). Kurilpa Bridge. Opgehaald van Web.archive: https://web.archive.org/web/20091122171259/http://www.arup.com/Projects/Kurilpa_Bridge.aspx

Bing, W. B. (2004). Free-standing Tension Structures. Spon Press.

Buckminster. (sd). Geodesic tensegrity dome. Verenigde Staten .

Burkhardt, R. W. (2008). Basis Tensegrity Structures . In A Practical Guide to Tensegrity Design (pp. 37-40).

Cmglee. (sd). Simplest tensegrity structure. Wikipedia.

Emmerich, D. (1963). Frankrijk Patentnr. 1.377.290.

Emmerich, D. (1988). Structures tendues et autotendantes . Monographies de Géométrie Constructive, Éditions de l'Ecole d'Architecture de Paris La Villette .

Emmerich, D. G. (sd). Structures autotendantes. Frankrijk .

firthefirst. (sd). a teatray in the sky. Atlanta, Georgia.

Fu, F. (2018). Application of Tensegrity Structure in Construction Projects. In Design and Analysis of Tall and Complex Structures. Butterworth-Heinemann .

Ioganson, K. (sd). Gleichgewichtskonstruktion. Study in Balance. Moskou.

Ioganson, K. (sd). self-stressed constructions. Second Spring Exhibition of the OBMOKhU, Moskou.

Levy, M. P. (sd). Analysis of the Georgia Dome Cable Roof. Verenigde Staten.

Miller, R. (2019, mei 19). Underwood Pavilion. Opgehaald van Frame web:

<https://www.frameweb.com/news/underwood-pavilion-by-gernot-riether-and-andrew-wit>

Motro, R. (2003). Tensegrity: structural systems for the future. Kogan Page Science.

Pars, M. (2019). Tensegrity. Opgehaald van tensegriteit: <http://www.tensegriteit.nl/n-architecture.html>

Pinterest. (sd). Kurilpa Bridge. Brisbane. Robert E. Skelton, M. C. (2009). Tensegrity Systems. London New York: Springer.

Setzer, S. W. (1992). Raise High the Record Roof. Opgehaald van Columbia: <http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/GEORGIA/g-raise.html>

Snelson, K. (1965). U.S. Patentnr. 3.169.611.

Snelson, K. (1996). Tensegrity. International Journal of Space Structures, Volume 11

(Issue 1-2) pp. 43-48. Snelson, K. (sd). Early X-Piece. North Carolina.

Snelson, K. (sd). Moving Column, 1st study. North Carolina.

Snelson, K. (sd). Moving Column, 2nd study . North Carolina .

Wikipedia. (2019, mei 20). Kenneth Snelson. Opgehaald van Wikipedia: https://nl.wikipedia.org/wiki/Kenneth_Snelson

Wikipedia. (2019, mei 18). Montreal

Biosphere. Opgehaald van Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Montreal_Biosphere

Flemons, T. (sd). Modular design for a tensegrity biped. Intensiondesigns.

Flemons, T. (sd). Revolute joint formed by a face bond between two four-strut prisms. Intensiondesign .

Fuller, B. (sd). Joint used in geodesic dome. Tensile-integrity structures .

Fuller, R. B. (1962). U.S. Patentnr. 3.063.521.

Juggler. (sd). Warnow tower. Wikipedia .

Motro, R. (2003). Tensegrity: Structural systems for the future. Kogan page science.

Snelson, K. (1965). U.S. Patentnr. 3.169.611.

Snelson, K. (sd). Art and Ideas. Installing a sculpture in Berlin.

Snelson, K. (sd). Knooppuntverbinding. Continuous tension, discontinuous compression structures. U.S. .

studiobelfast. (sd). The limits of a Tensegrity Structure.

Bernaards, X. (2014). Development of a tensegrity joint. Eindhoven: TU Eindhoven.

Heartney, E. (2013). Kenneth Snelson; Art and Ideas. New York: KForces made visible.

Rutten, M. (2008). Pneu-Tensegrity. Eindhoven: TU Eindhoven.

Telgen, M. v. (2012). Parametric design and calculation of circular and elliptical tensegrity domes. Eindhoven: TU Eindhoven.

KENNER, H. (1976) Geodesic Math and How to Use It, Berkeley, California: University of California Press.

INGBER, D.E. (1998) "The Architecture of Life". Scientific American Magazine. January, 1998. Also available in <http://vv.arts.ucla.edu/projects/ingber/ingber.html>

VESNA, V. (2000) Networked Public Spaces: An Investigation into Virtual Embodiment. Unpublished PhD thesis.

University of Wales College, Newport. Also available in <http://vv.arts.ucla.edu/publications/thesis/official/tensegrity.htm>

SMAILI, A. (2003) Pliage/Dépliage de systèmes de Tensegrité. Montpellier: Laboratoire de Mécanique et Génie Civil. Université Montpellier II. Also available in <http://www.lirmm.fr/doctiss04/art/M02.pdf>

MULLER, G. (1971) "Kenneth Snelson's Position is Unique", Kunstverein Hannover, New York, February 1971.

WHELAN, R. (1981) "Kenneth Snelson, Straddling the Abyss Between Art and Science", Art News, February 1981.

BURKHARDT, R.W. (1994-2004) A practical guide to tensegrity design, [on-line], Cambridge (USA) <http://www.channel1.com/users/bobwb/tenseg/book/cover.html> Accessed December 2003-August 2004.

HANAOR, A. (1987) "Preliminary Investigation of Double-Layer Tensegrities", in H.V. Topping, ed., Proceedings of International Conference on the Design and Construction of Non-conventional Structures (Vol.2), Edinburgh, Scotland: Civil-Comp Press.

SCHODEK, DANIEL L. (1993) Structure in Sculpture, Cambridge, Mass. (USA): M.I.T. Press.

