

Kinetic architecture: design of a twisting steel bridge

Freya Reynebeau

Promotoren: prof. dr. Ronald De Meyer, prof. Charlotte Nys

Begeleider: Koen Verswijver

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Vakgroep Architectuur en stedenbouw

Voorzitter: prof. dr. Bart Verschaffel

Faculteit Ingenieurswetenschappen

Academiejaar 2008-2009



KINETIC ARCHITECTURE: DESIGN OF A TWISTING STEEL BRIDGE



Kinetic architecture: design of a twisting steel bridge

Freya Reynebeau

Promotoren: prof. dr. Ronald De Meyer, prof. Charlotte Nys

Begeleiders: dr. Ruben Verstraeten, dr. Koen Verswijver

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van

Master in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Vakgroep Architectuur en stedenbouw

Voorzitter: prof. dr. Bart Verschaffel

Faculteit Ingenieurswetenschappen

Academiejaar 2008-2009



DANKWOORD

Graag zou ik prof. De Meyer bedanken die mij de mogelijkheid bood om dit onderwerp te behandelen. Samen met Ruben Verstraeten en Koen Verswijver maakte hij tijd vrij om mij het nodige advies te geven en mij van feedback te voorzien.

Ik wil tevens de mensen van I-theses en SCIA bedanken voor de rekensoftware die zij mij ter beschikking stelden. Mijn speciale dank gaat uit naar Dieter Vermeulen van I-Theses voor de 3-daagse training met de software Robot Structural Analysis.

Bovendien zou ik de firma Gallon willen bedanken, in het bijzonder Frederik Gallon die mij een aantal inzichten bijbracht en informatie gaf over mechanische componenten die ik in mijn ontwerp zou kunnen toepassen.

Verder wil ik ook familie en vrienden bedanken: Pieter die mij wegwijs maakte in de software SolidWorks en hulp bood bij de technische tekeningen, Sam en Tom die steeds bereid waren mij te helpen met de 3D-printer en Gerrit voor zijn bijdrage aan de maquette. Voorts zou ik ook Maja, Leen en Eva willen bedanken voor hun raad bij het lay-outen en het aanbrengen van taalkundige correcties.

Tot slot bedank ik mijn ouders en Bram voor de steun en het vertrouwen gedurende de voorbije jaren.

BRUIKLEEN

“De auteur geeft de toelating deze scriptie voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de scriptie te kopiëren voor persoonlijk gebruik.

Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron duidelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze scriptie.”

2 juni 2009,

Freya Reynebeau

Kinetic Architecture: design of a twisting steel bridge

Freya Reynebeau

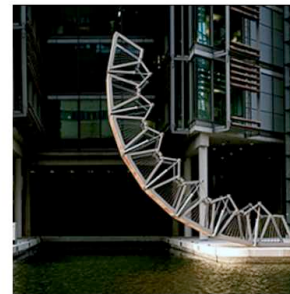
Supervisors: Prof. dr. Ronald De Meyer, Prof. Charlotte Nys, Ruben Verstraeten,
Koen Verswijver

I. INTRODUCTION

Since the Industrial Revolution, the world is developing at a growing speed. The intensification of social, economical and urban changes, linked with issues of sustainability, amplify the demand for architectural solutions that accommodate change. *Kinetic architecture* offers the promise of easy, rapid and reversible mechanical transformations in response to changing programmes and human needs.

In kinetic architecture, time is introduced as a fourth dimension in the design. In comparison with static architecture, additional knowledge and software, both to model and calculate, are needed. Therefore, this assignment concerns acquiring a clear understanding of the aspects that are typical for kinetic architecture.

More particular, this study is interested in movable bridges. As a result, it will give an overview of the different movements of existing bridges, after which a design of a moving, in this case twisting, bridge will be made.



II. MOVABLE BRIDGES

A. Overview

The area of bridge construction has been characterized by mechanized movements for a long time. Movement literally adds a new dimension to bridge design. A bridge can be opened with a surprising number of

different movements such as: swing, lift, retracting, etc. Depending on the number of operating mechanisms that can be used, each category has many variants. This diversity reflects the wide range of factors which affect a certain choice. [1]

B. The Rolling Bridge

One example of a movable bridge was studied in detail: The Rolling Bridge of the Thomas Heatherwick Studio in London. In its horizontal position, its 12 m length and 1.5 m width crossing, appears to be a rather conventional structure with a steel frame and a timber deck. Unlike a typical bascule span, however, the bridge does not remain straight as it rises, but gradually rolls up until its ends meet, transforming itself into a freestanding octagonal sculpture.[2] By means of this case study, certain software programmes were studied and compared, both to model and calculate kinetic architecture.

III. DESIGN OF A TWISTING, STEEL BRIDGE

After having acquired information on Kinetic Architecture in general and on different types of movable bridges, the final result of this dissertation will be a personal design of a movable bridge.

During the design process, simulation software (SolidWorks) and multiple prototypes of different scale were used to analyse the movement of the bridge geometrically and to model the joints and the moving mechanisms. After the preliminary design, the dynamic bridge was

dimensioned. The challenge lies in the ever-changing geometry and different loading conditions connected to the movement. The SCIA Engineer's 'batch-optimizer'-tool could be used to define the bridge's most critical position. The actual stability study was made by means of the static calculation programme Robot Structural Analysis.

IV. CONCLUSIONS

One can conclude that kinetic architecture asks for a different design approach. On the one hand, one should be looking for proper software to model and calculate the design. On the other hand, the interdisciplinary character of kinetic architecture requires relying on mechanical and structural engineering. Because of my limited knowledge and lack of experience in these fields, it was not possible to develop the design in all its technical components. As a result I made some proposals that should make the movement conceivable.

REFERENCES

- [1] Bennett David, "The architecture of bridge design", Thomas Telford, London, 1997, p. 60
- [2] Brown Jeff L., "Rolling London Footbridge Surprises Spectators", in *Civil Engineering*, maart 2005, pp. 16-18
- Kinetic Architecture, <http://kineticarchitecture.net>, 2009
- Kronenburg Robert, "Flexible: Architecture that Responds to Change", Laurence King Publishers, London, 2007
- MIT Kinetic Design Group, <http://www.robotecture.com/kdg>, 2009
- Zuk & Clark, "Kinetic Architecture", Van Nostrand Reinhold Press, New York, 1970

INHOUD

1	Inleiding.....	1
2	Kinetic Architecture.....	5
	2.1 Geschiedenis	
	2.2 Definitie en classificatie	
	2.3 Interdisciplinair	
3	Beweegbare bruggen.....	15
	3.1 Overzicht	
	3.2 Case study: de “Rolling Bridge”	
4	Design of a twisting steel bridge.....	37
	4.1 Architecturaal aspect	
	4.2 Technisch aspect	
5	Besluit.....	61
6	Bijlagen.....	63
7	Bibliografie.....	78

INLEIDING

“Nothing is permanent. Everything is in constant flux and change. Through day and night, through summer and winter, year after year, from birth to death, life flows in a timeless cycle - life in the soil and on the ground, in water and air, life of man and animal and plant - always in change and transformation, in rise and fall, in growth and decline, so that in all nature nothing is the same at day’s end as it was at day’s beginning.”¹

¹ Feininger Andreas, *Forms of Nature and Life*, Viking Press, New York, 1966, p. 19



A. CONTEXT

Sinds de Industriële Revolutie ontwikkelt de wereld zich met grote snelheid. Veranderingen op sociaal, economisch en stedelijk vlak versterken de nood aan architecturale oplossingen die veranderingen kunnen opnemen en oefenen bovendien een toenemende druk uit op de natuurlijke hulpbronnen. Het is dan ook logisch dat aspecten als multifunctionaliteit, aanpassingsvermogen en duurzaamheid een steeds belangrijkere rol gaan spelen in de huidige visie op architectuur.

Vanuit deze dringende vraag naar flexibiliteit is er belangstelling ontstaan voor het ontwikkelen van constructieve oplossingen die het vermogen hebben zich aan te passen.

In 1958 introduceerde uitvinder Massau met het “Maison Tournante” de gemechaniseerde beweging in de Belgische bouwkunst. Dit cilindervormige huis kan in anderhalf uur 360° rond haar as draaien waardoor het zich volledig kan aanpassen aan de wensen van de bewoners. Naast het volgen van de beweging van de zon, kan het huis zodanig gepositioneerd worden dat het mogelijk wordt om spelende kinderen in de tuin te observeren. (figuur 1.1)

Vandaag de dag zijn er concrete plannen om de skyline van Dubai uit te breiden met een draaiende wolkenkrabber. De “Rotating Tower” van David Fisher, als het ware een opeenstapeling van het “Maison Tournante”, bewijst immers dat beweging in de architectuur ook op grote schaal kan toegepast worden. Elke verdieping van die toren zal, zelfstandig en met een verschillende snelheid, rond haar as kunnen draaien naargelang de behoeften van de bewoners. Daarenboven verschaffen windturbines tussen de verdiepingen energie aan de bewoners en aan de omgeving. Hierdoor wordt ook het aspect van duurzaamheid enig belang toegekend binnen de dynamische bouwkunst. (figuur 1.2)

Naast rotatie zijn er nog tal van andere bewegingsvormen die in de architectuur aangewend worden om tegemoet te komen aan de weersgesteldheid, de activiteiten van de gebruikers of het verlangen naar meer openheid of privacy.

De eis van flexibiliteit vloeit niet alleen voort uit menselijke verlangens en behoeften, ook economische motieven liggen aan de basis van bewegende structuren. Architectuur heeft namelijk al altijd de gevolgen van veranderende programma's opgevangen: zodra de nood aan verandering de capaciteit van een gebouw overstijgt, grijpt een renovatie of vervanging plaats. Dit is niet alleen storend en tijdrovend maar ook duur. Kinetic architecture voorziet daarentegen in veelzijdigheid en aanpasbaarheid, waardoor de bruikbare levensduur en de economische waarde toenemen. (figuur 1.3)

In 2008 werd een ongeziene mijlpaal bereikt: voor het eerst in de geschiedenis leeft meer dan de helft van



Figuur 1.1_Maison Tournante < Mr. Massau
(www.lamaisontournante.be)



Figuur 1.2_Rotating Tower < David Fisher
(www.dynamicarchitecture.net)



Figuur 1.3_Maison à Bordeaux < Rem Koolhaas
(www.oma.nl)

de wereldbevolking (zo'n 3,3 miljard mensen) in stedelijke gebieden. In 2030 zal dit naar verwachting zelfs toegenomen zijn tot bijna 5 miljard. De steden zullen dus niet alleen een grotere bevolking over zich heen krijgen, maar ook een hogere densiteit kennen. Hierdoor zullen onder meer de sociale problemen in armere buurten toenemen. Omwille van het aanpassingsvermogen, transportmogelijkheden,... kan kinetic architecture ingezet worden als oplossing voor problemen zoals wildgroei en gebrekkige ventilatie. Aangezien ook de complexiteit van de onderlinge relaties vergroot, wordt ook binnen het verkeer enige flexibiliteit aan de dag gelegd: beweegbare bruggen moeten te allen tijde de doorgang van het er onder doorgaand verkeer kunnen verzekeren, schepen dienen met een bootlift naar een lager gelegen kanaal getransporteerd te worden,...

Architectuur die niet in staat is om tegemoet te komen aan die veranderende behoeften en geen flexibel gebruik toelaat, past niet binnen onze snel veranderende samenleving. Daarom is er nood aan lichte, aanpasbare en, in sommige gevallen, transporteerbare architectuur die haar vorm en grootte hieraan kan aanpassen. Een oplossing voor bovengenoemde veranderende programma's, eisen en omstandigheden, wordt geboden door de eenvoudige, snelle en omkeerbare, mechanische transformaties van de kinetic architecture.

B. PROBLEEM- EN DOELSTELLING

In kinetic architecture wordt tijd als een vierde dimensie aan het ontwerp toegevoegd. Dat impliceert dat er ook nood is aan kennis uit andere disciplines die zich buiten de architecturale vormgeving situeren. Om kinetische structuren te detailleren zal bijgevolg beroep moeten gedaan worden op informatie van de werktuigkunde, de mechanica en de materiaalkunde. De steeds veranderende geometrie en de verschillende belastingsvoorwaarden die met de beweging gepaard gaan, vergen bovendien aangepaste software om het ontwerp te modelleren en te berekenen. De softwarepakketten die doorgaans gebruikt worden bij statische architectuur volstaan hier dus niet.

Mijn masterproef heeft tot doel om inzicht te krijgen in bovengenoemde aspecten die typerend zijn voor kinetic architecture. Hierbij zal voornamelijk aandacht besteed worden aan beweegbare bruggen. Na een overzicht van de verschillende bewegingen van bestaande bruggen zal door mezelf een beweegbare brug ontworpen worden. Het is niet alleen de bedoeling om een esthetisch ontwerp te maken, de intentie is ook om het te detailleren en te dimensioneren door onder andere gebruik te maken van geschikte modelleer- en rekensoftware.

C. OVERZICHT

In hoofdstuk 2 worden de mogelijkheden van kinetic architecture verkend. Een historisch overzicht toont aan

dat transformaties zowel in traditionele architecturale vormen als in de meest eigentijdse ontwerpen voorkomen. Aangezien kinetic architecture een meerwaarde geeft aan de functionaliteit van een gebouw, wordt ze zowel in de kleinste als in de grootste structuren gebruikt. Beweging in architectuur wordt toegepast op verschillende schaal, en kan bovendien ook een uiteenlopende rol spelen binnen het architecturaal geheel. Een classificatie dringt zich dan ook op. Tot slot wordt nog opgemerkt dat architectuur die afgestemd wordt op de voortdurend veranderende behoeften zich op een kruising bevindt van verschillende wetenschappelijke domeinen. Het ontwerp van kinetische structuren vergt dan ook een interdisciplinaire kennis.

Hoofdstuk 3 handelt over bruggenbouw, een domein waarin reeds lange tijd gebruik wordt gemaakt van gemechaniseerde bewegingen. Aan de hand van een overzicht wordt aangetoond dat er verrassend veel verschillende mogelijkheden zijn om bruggen te openen: draaien, heffen, rollen,.... De "Rolling Bridge" van de Thomas Heatherwick Studio in Londen toont aan dat ook dit domein gekenmerkt wordt door een complexere dynamiek. Deze stalen voetgangersbrug benadert op een unieke manier de mogelijkheid voor doorgang van vaartuigen. Het brugdek, dat aanvankelijk steunt op de twee kades, maakt een slingerbeweging waardoor de brug in uitkraging komt en langzaam oprolt om uiteindelijk te transformeren in een vrijstaande, gesloten octagonale sculptuur die zich op één van de oevers nestelt. Aan de hand van de "Rolling Bridge" werden modelleer- en rekensoftware met elkaar vergeleken, met het oog op het selecteren van de meest geschikte pakketten voor kinetische structuren.

In navolging van de case study van de "Rolling Bridge", heb ik in hoofdstuk 4 gepoogd zelf een beweegbare brug te ontwerpen. Tijdens het ontwerpproces werden simulatiesoftware (SolidWorks) en maquettes gebruikt om de beweging van de brug geometrisch te benaderen alsook om de technische componenten (scharnieren, aandrijfmechanisme,...) vorm te geven. Simulatie en modellering kunnen dan ook beschouwd worden als de voornaamste ontwerp- en onderzoeksmethode. Om het stalen frame van de brug te dimensioneren werd gebruik gemaakt van rekensoftware. Met behulp van SCIA Engineer werd de meest nadelige stand van de brug bepaald waarna een stabiliteitsstudie werd gedaan met het statische rekenpakket Robot Structural Analysis.

Hoofdstuk 5 besluit deze masterproef met een bespreking van de verworven kennis en met een overzicht van de problemen waarmee ik geconfronteerd werd.

Bijgevoegde cd-rom bevat tot slot een aantal dynamische beelden om het eigen ontwerp te illustreren en een aantal technische elementen toe te lichten.

KINETIC ARCHITECTURE

Het idee van beweging in architectuur is niet nieuw. Doorheen alle stadia van de geschiedenis hebben mensen geprobeerd bouwwerken te maken met beweegbare onderdelen. Op die manier ontstaan gebouwen die het vermogen hebben om zich aan te passen aan de steeds veranderende eisen en omstandigheden. Door de toename van dynamische, flexibele en continu wijzigende activiteiten alsook door de technologische ontwikkelingen, wordt beweging steeds vaker in de architectuur geïntegreerd. De mogelijkheden om vandaag beweging in gebouwen toe te passen, zijn sterk geëvolueerd in vergelijking met wat vroeger mogelijk was.

Het domein van de kinetic architecture is veelomvattend. Het is dus noodzakelijk om de talrijke kinetische structuren onder te brengen in categorieën. De kinetische structuren die het onderwerp uitmaken van deze masterproef kunnen gedefinieerd worden als “embedded kinetic structures”. Ze maken deel uit van een groter architecturaal geheel en kunnen zich, op een vaste locatie, fysisch vervormen als reactie op menselijke of omgevingsgebonden factoren.

Bij het onderzoeken van kinetic architecture kan eenvoudig vastgesteld worden dat kennis uit verschillende disciplines vereist is binnen dit onderzoeksdomein. Een structurele transformatie kan niet ontworpen worden zonder een basiskennis van aandrijfmechanismen, verbindingsmogelijkheden,... . Aangezien kinetische structuren dus cumulaties zijn van architecturale vormgeving, werktuigkunde en mechanica, kan kinetic architecture gedefinieerd worden als een interdisciplinair onderzoeksgebied. Door het ontwikkelen van de computertechnologie zijn simulatie- en rekensoftware dit onderzoeksgebied binnengedrongen als een substantieel medium.



2.1 GESCHIEDENIS

Het concept 'beweging' is steeds aanwezig geweest in de geschiedenis van de architectuur, en wel op verschillende manieren. Reeds in de prehistorie rolde men stenen voor de opening van grotten om zich te beschermen tegen dieren en weersomstandigheden. Terwijl bij de nomaden de capaciteit om een draagbare of tijdelijke shelter te bouwen nog altijd één van de belangrijkste voorwaarden vormt om te overleven.

Door haar schaal en belangrijke technische prestatie wordt het velarium van het Romeinse Colosseum (figuur 2.1) als een doorbraak beschouwd in de ontwikkeling van de kinetic architecture. Dit enorme zeildoek kon een schaduw creëren om tegemoet te komen aan de veranderende weersomstandigheden. In geval van grote hitte, maar ook bij slecht weer, kon het velarium tijdens de gladiatorenengevechten via kabels opengetrokken worden waardoor de toeschouwers beschermd werden.

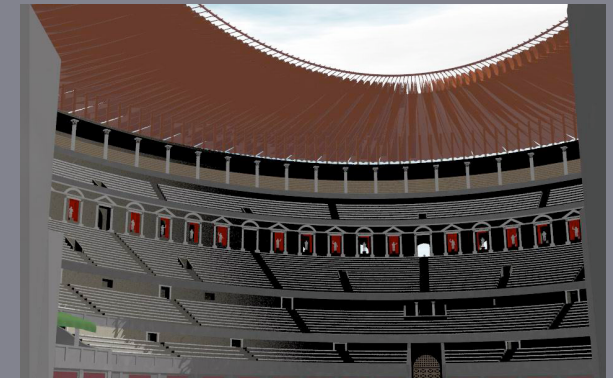
De rotaties van de kinetic architecture werden volgens auteur Chad Randl¹ in de architectuur geïntroduceerd met de ontwikkeling van het wiel, dat ontelbare toepassingen heeft gekend doorheen de geschiedenis. Van waterraden uit de oudheid en middeleeuwse windmolens (figuur 2.2) tot de assen, tandwielen en katrollen die Leonardo Da Vinci tekende in zijn schetsboek. Dergelijke roterende machines overtroffen de mogelijkheden van de menselijke spieren waardoor de beschikbare kracht en ruimte verveelvoudigd werd. Ook voor militaire doeleinden werden roterende machines aangewend.

Hoewel de finaliteit van bovenstaande ontwikkelingen voornamelijk lag in het opwekken van energie en het verlichten van de arbeid, werd het principe van het wiel ook om andere redenen gebruikt. Vanaf de 12e eeuw verschenen in tuinen en parken van Europese edelen, en later ook in meer bescheiden omgevingen, ronddraaiende zomerpaviljoenen als eerbare kenmerken van landschapsontwerpen.

Ook theaters en kerken behoren tot vroege vormen van mechanische gebouwen om aan de culturele en religieuze behoeften tegemoet te komen.

In de middeleeuwen waren openluchtspektakels zeer populair in Europa. Openluchttoneel werd opgevoerd in demontabele theaters die men 'mansions' (figuur 2.3) noemde. Platformen of stalletjes werden opgezet op het marktplein of soms in een bestaand gebouw. Als bescherming tegen zon en regen werd gebruik gemaakt van inklapbare daken.

Draaiende podia maakten het mogelijk om theatervoorstellingen te voorzien van nieuwe vormen van dynamische ensceneringen en om snelle decorveranderingen door te voeren. Een gelijkaardig principe werd toegepast in



Figuur 2.1_Velarium van het Colosseum
(www.kineticarchitecture.net)



Figuur 2.2 Windmolens
(Randl, 2008, p.18)



Figuur 2.3 Mansion
(Korkmaz, 2004, p.10)

¹ Randl Chad, *Revolving Architecture*, Princeton Architectural Press, New York, 2008, pp. 16-28

kerken: roterende altaren, opgedeeld in secties, werden aangewend om eenzelfde ruimte te gebruiken voor een dienst voor protestanten, katholieken of joden.

In 1881 werd zelfs de eerste ronddraaiende cilindervormige gevangenis gebouwd om het aantal bewakers te reduceren. Dit concept had aanvankelijk succes, maar al snel bleek dat het heel wat nadelen met zich meebracht op het vlak van veiligheid en gezondheid. Er kon zelfs gesproken worden van “a failure of the idea that technology would always provide a solution that was in the best interests of humankind”.²

De eerste circussen en rondtrekkende carnavals werden oorspronkelijk georganiseerd in lokale agrarische gebouwen; door de ontwikkelingen in de 19e eeuw werden echter mobiele gebouwen gecreëerd zodat het entertainment op ruimere, meer geschikte locaties kon plaatsvinden. Kinetic architecture werd niet enkel ingezet als flexibele huisvesting maar vormde ook het eigenlijke object van vermaak op kermissen, wereldtentoonstellingen,.... Uitzicht en aanschouwing waren dé instrumenten voor de creatie van nieuwe voorzieningen. Zo verschenen reuzenraden (figuur 2.4) en ronddraaiende torens als landmark in de omgeving en ontwikkelden zich tot duidelijke kenmerken van het moderne leven. Tentoonstellingen en voorstellingen, zoals “The Great Exhibition” van 1851 in Londen, werden aldus de architecturale uithangborden voor de ontwikkeling van nieuwe ontwerpideeën. Dit alles luidde een periode van technische ontwikkelingen in waardoor alles mobieler en beweeglijker zou worden en kinetic architecture zodoende de kans zou krijgen om onbeperkt toegepast te worden.

Aan het begin van de 20e eeuw werd een reeks mobiele bouwsystemen ontwikkeld. Het betrof eenvoudig te transporteren structuren met een grote overspanning die dienst deden als stelplaats voor voertuigen en zelfs als vliegtuighangars. Een hedendaags voorbeeld is het “Airquarium” van Festo dat door haar bolvormige volume een aanzienlijke overspanning verzoent met een grote mobiliteit (figuur 2.5).

In de 20e eeuw werd kinetic architecture ook veelvuldig aangewend voor privédoeleinden. Het meest bekende gebouw met veranderlijk interieur uit die periode is wellicht het “Rietveld Schröderhuis” (figuur 2.6) in Utrecht. Het gelijkvloers is vrij conventioneel ingericht, terwijl de bovenste verdieping ontworpen is om tegemoet te komen aan Schröders wens om in één ruimte te leven. De praktische behoeften worden opgevangen door de introductie van afscheidbare ruimten die naar keuze kunnen gebruikt worden. Rietveld gebruikte zijn eerdere opleiding tot meubelmaker om te komen tot een systeem van glijdende en schuivende wanden dat de badkamer en slaapkamers van de andere ruimtes kon scheiden. Het toepassen van beweging bleef echter niet beperkt tot het niveau van het interieur, zoals in de eengezinswoningen van Rietveld, Le Corbusier en andere architecten uit het modernisme. Tussen 1929 en 1935 werd in de omgeving van Marcellise (Italië) “Villa Girasole” (figuur 2.7)),



Figuur 2.4 _George Ferris Wheel at World's Columbian Exposition (Randl, 2008, p.41)



Figuur 2.5 _Airquarium < Festo (Siegal, 2002, p.35)



Figuur 2.6 _Interieur Schröderhuis < Gerrit Rietveld (Kronenburg, 2007, p.27)

² Randl Chad, *Revolving Architecture*, Princeton Architectural Press, New York, 2008, pp. 32-39

een ronddraaiend huis, gebouwd. Het was de droom van de ingenieur om een huis te bouwen dat de beweging van de zon zou volgen en in relatie zou staan met het landschap en de maatschappelijke omgeving. Door een druk op de knop kon het huis 360° draaien in 9 uur en 20 minuten. Later volgden ook andere landen met de bouw van hun ronddraaiend huis. Zo ook in België waar, naar aanleiding van de wereldtentoonstelling van 1958, het “Maison Tournante” werd gebouwd door haar uitvinder Mr. Massau.

De periode na de Tweede Wereldoorlog werd gekenmerkt door massale sociale veranderingen en een ongekeerde technologische innovatie. Het was in die periode dat Buckminster Fuller (architect, ingenieur, auteur, uitvinder,...) zijn “Geodesic Dome” ontwikkelde: een opmerkelijke, bolvormige structuur die zeer snel en met beperkte mankracht kon opgebouwd worden uit lichte onderdelen (figuur 2.8). Omwille van zijn efficiënt en economisch karakter werd de “Geodesic Dome” overal verwelkomd als een mogelijke oplossing voor het wereldwijde huisvestingsprobleem. Hoewel zijn creatie nooit een grote populariteit heeft gekend is de invloed van het werk van Buckminster Fuller vandaag nog steeds merkbaar in het domein van de kinetic architecture.

In navolging van de ronddraaiende huizen, verschenen vanaf het midden van de 20e eeuw wereldwijd ronddraaiende restaurants. Zij boden door hun hoogte en rotatie een panoramisch zicht op de omgeving. Hun succes nam echter snel af doordat het panoramische zicht verloren ging door de omliggende hoogbouw of door het feit dat zij het doel waren van militaire aanslagen.

De jaren 60 brachten een groot aantal experimenteel architecturale ontwerpen voort, gekoppeld aan de tegencultuur die de samenleving was binnengedrongen. Dit als reactie op de ongebreidelde commercie, de spanningen van de Koude Oorlog en de afschuwelijke eentonigheid van de meeste nieuwe stedelijke ontwikkelingen. Vrijwel gelijktijdig ontstond over de hele wereld een reeks jonge, avant-garde groepen: Ant Farm and EAT in Amerika; Archizoom, UFO en Superstudio in Italië; Coop Himmelbau, Haus-Rucker-Co en Missing Link in Australië; Utopie in Frankrijk; Metabolists in Japan; en Archigram in het Verenigd Koninkrijk. Het merendeel van die groepen zette zich af tegen de klassieke weergave van architectuur. In het bijzonder experimenteerden zij met nieuwe materialen en technieken uit andere takken van de industrie. Het werk van Archigram heeft wellicht de meeste bekendheid verworven, vooral omdat de groep de intentie had om haar ideeën te communiceren in plaats te filosoferen. “Plug-In City” (figuur 2.9), een concept van Peter Cook dat in 1964 werd gepubliceerd, was één van de vele projecten die als onderwerp het idee van geprefabriceerde huizen in een dens, fluctuerend stedelijk patroon hadden.

Vandaag de dag zijn de technische hindernissen met betrekking tot kinetic architecture grotendeels overwonnen. Vooruitgang in de techniek en de vindingrijkheid van de ontwerpers hebben nieuwe mogelijkheden gecreëerd met betrekking tot kinetische structuren: naast het laten roteren, schuiven, vouwen,... van starre elementen, worden,



Figuur 2.7_Villa Girasole < Angelo Invernizzi
(www.kineticarchitecture.net)



Figuur 2.8_Geodesic dome < Buckminster Fuller
(Kronenburg, 2007)



Figuur 2.9_Plug-In City < Archigram
(Kronenburg, 2007)

dankzij de ontwikkeling van hogesterkte materialen, opvouwbare membraanstructuren ontworpen waarmee grote overspanningen mogelijk zijn.

Vaak kan de initiële meerkost gecompenseerd worden met een grotere energie-efficiëntie ten gevolge van de beweging. Zo bijvoorbeeld voorzien windturbines tussen elke verdieping van de “Rotating Tower” in Dubai de bewoners en de buurt van stroom en volgen de zonnepanelen op het dak van de woning van Rolf Disch de hele dag door de wijzigende zonnestand teneinde een maximale energiewinst te bekomen. Om aan de veranderlijke warmtebehoeften tegemoet te komen werd door dRMM-Architecture een transparant huis ontworpen, omgeven door een mobiel(e) dak/wand (figuur 2.10). Het “Sliding House” biedt hierdoor de mogelijkheid om de gehele bouwcompositie en het karakter te veranderen naargelang het seizoen, de weersgesteldheid of de wensen van de bewoners. Bij de uitreiking van de Grand Designs Awards 2009 sleepte dit project twee awards in de wacht en werd omschreven als “one big stroke of genius, a crazy idea that isn’t gratuitous but a creative response to make the building highly responsive to its environment and an extraordinary place to live”³.

Hoewel kinetische oplossingen reeds van bij het begin in de architectuur aanwezig waren, worden ze nu geaccepteerd als een vanzelfsprekende architecturale oplossing in de hedendaagse, continu veranderende wereld. De technologische ontwikkelingen aan het einde van de 20e eeuw hebben verdere toepassingen van flexibiliteit in bouwsystemen toegelaten. Hierdoor is een begrip als beweging meer bruikbaar geworden in de hedendaagse bouwkunst.

3 www.drmm.co.uk/dRMM/news.html



Figuur 2.10_Sliding House < dRMM-Architecture
(www.drmm.co.uk+dRMM/news.html)

2.2 DEFINITIE EN CLASSIFICATIE

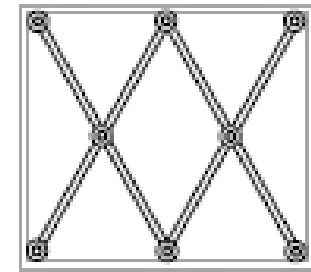
Michael Fox, hoofd van de Kinetic Design Group van MIT (Massachusetts Institute of Technology), definieert kinetic architecture als “buildings and/or building components with variable mobility, location and/or geometry”.⁴ Die definitie is veelomvattend en kan naar verschillende zaken verwijzen. Bovendien is kinetic architecture terug te vinden in uiteenlopende vakgebieden (kunst, gebouwen,...) en op een verschillende schaal (wolkenkrabbers, woningen, interieur,...). Het onderwerp van deze masterproef beslaat echter slechts een beperkte groep kinetische structuren. Bijgevolg worden, naar het voorbeeld van Michael Fox, de kinetische systemen geclassificeerd in drie algemene categorieën, namelijk: embedded, deployable and dynamic kinetic structures (figuur 2.11 tot 2.13).

Embedded kinetic structures zijn systemen die bestaan binnen een groter architecturaal geheel op een vaste locatie. De hoofdfunctie bestaat erin om het groter architecturaal systeem of gebouw te controleren als reactie op de veranderende factoren. Wijzigingen kunnen zowel teweeg gebracht worden door omgevingsgebonden als door menselijke invloeden. Ten gevolge van een fysieke transformatie verandert de vorm, het volume of de gedaante van de structuur waardoor een aanzienlijke wijziging ontstaat in het gebruik of de waarneming ervan. Het betreft een architectuur die open en dicht gaat, expandeert en ineenkrimpt. De dynamische elementen veranderen niet alleen de functie van het bouwwerk maar hebben ook een onmiskenbare impact op haar karakter.

The architectuur van Santiago Calatrava verkent regelmatig de mogelijkheden van kinetische elementen die een bijzondere affiniteit hebben met zijn organische, expressieve structuren. Zijn ontwerpen zijn een uitdrukking van het moment dat plaatsgrijpt tussen evenwicht en onevenwicht- een tijdstip waarop het structureel ontwerp het meest elegant wordt. Veel van zijn gebouwen hebben bijgevolg elementen die van vorm of plaats veranderen, bijvoorbeeld de ‘brise soleil’ die de ingang van het “Milwaukee Art Museum” bekroont (figuur 2.14). Dit sculpturaal element, dat zich als een waaier kan uitspreiden, geeft het dak van het gebouw ongetwijfeld een charismatische, vogelachtige aanblik. De 72 stalen vinnen van de structuur wegen 90 ton en hebben een spanwijdte van 66 meter. Het openen en sluiten van de vleugels doet de lichtinval in de glazen inkomhal drastisch veranderen waardoor uiteenlopende schaduweffecten kunnen bekomen worden.

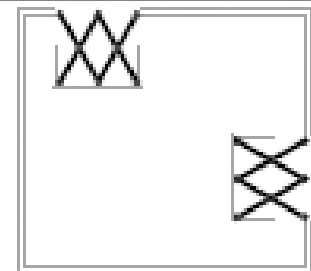
Kenmerkend voor **deployable kinetic structures** is dat ze zich bevinden op een tijdelijke plaats en gemakkelijk te transporteren zijn. Zulke systemen bezitten dan ook het vermogen om eenvoudig opgebouwd en afgebroken te worden. Robert Kronenburg, architect en hoofd van de “School of Architecture” in Liverpool (UK), onderscheidt

⁴ www.robotecture.com/eiw/lectures/Kinetics.pdf



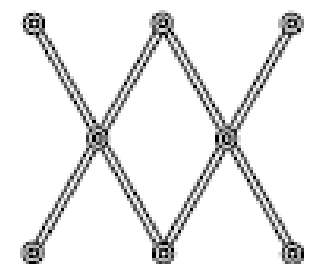
Embedded

Figuur 2.11_Embedded kinetic structures
(<http://kdg.mit.edu>)



Dynamic

Figuur 2.12_Dynamic kinetic structures
(<http://kdg.mit.edu>)



Deployable

Figuur 2.13_Deployable kinetic structures
(<http://kdg.mit.edu>)

in deze verplaatsbare architectuur drie verschillende methodes.⁵

De meest eenvoudige strategie voor het verplaatsen van een structuur is deze te transporteren in zijn geheel. Deze 'portable' methode heeft als voordeel dat het bouwwerk vrijwel onmiddellijk beschikbaar is voor gebruik als het arriveert op de nieuwe locatie. Bij een aantal van die bouwwerken is het transportsysteem geïntegreerd in hun eigen structuur. Dergelijke constructies zijn meestal beperkt in omvang door de beperkingen van de transportmogelijkheden.

Een meer flexibele benadering van verplaatsbare structuren ligt in het creëren van een voorziening die kan getransporteerd worden in een beperkt aantal onderdelen en op de site snel kan samengesteld worden. Deze 'dismountable' strategie maakt het mogelijk om vele verschillende architectonische vormen te creëren, en, wat nog belangrijker is, er wordt geen beperking opgelegd aan de grootte van het afgewerkte bouwwerk of aan de geografische locatie.

De meest flexibele vorm van verplaatsbare bouwwerken is een systeem met componenten die op verschillende manieren kunnen gemonteerd worden. Deze 'modulair' methode heeft vele voordelen. Het bouwwerk kan samengesteld worden in verschillende vormen en indelingen, waardoor het ook geschikt is voor andere functies en voor uiteenlopende soorten en groottes van sites. Aangezien er meerdere componenten zijn wordt het vervoer gemakkelijker en efficiënter. Vanwege het groot aantal onderdelen kan de montage en demontage echter zeer complex zijn en worden veel verbindingselementen vereist. Bovendien zal waarschijnlijk een uitgebreider opbouwteam en een langere opbouwperiode noodzakelijk zijn met gedetailleerde plannen en instructies.

Elk van voornoemde verplaatsbare strategieën – portable, dismountable en modulair – kan toegepast worden met een ruim gamma aan constructievormen. In het theehuis van Kengo Kuma (figuur 2.15), dat zich bevindt in de tuin van het "Museum für Angewandte Kunst" in Frankfurt, werd gebruik gemaakt van pneumatica om de tijdelijke installatie snel en eenvoudig op te zetten. Op het moment dat een ventilatiesysteem in werking treedt, ontvouwt het object zich als een zwevende, efemere structuur. Het theehuis expandeert tot een vorm die doet denken aan een witte bloesem waarin een ruimte van ongeveer 20 m² gecreëerd wordt.

Dynamic kinetic structures werken onafhankelijk ten aanzien van het architecturaal geheel waarin ze zich bevinden. Dynamische wanden, plafonds, deuren en zonneweringen laten toe om gebouwen gemakkelijk aan te passen aan verschillende functies, levenswijzen en specifieke vereisten van de gebruikers. Deze structuren zijn bijzonder waardevol in de woningbouw waar een aanpassing aan de behoeften van de gebruiker resulteert in een verbetering van zijn levenskwaliteit. Anderzijds spelen ze een belangrijke rol in bouwwerken met onvoorspelbare

⁵ Kronenburg Robert, *Flexible: Architecture that Responds to Change*, Laurence King Publishing, Londen, 2007, p. 176-206



Figuur 2.14_Milwaukee Art Museum < S. Calatrava, (www.kineticarchitecture.net)



Figuur 2.15_Das Teehaus des Museums für Angewandte Kunst < Kengo Kuma (Schneider Ulrich, 2008)

en variërende functies zoals tentoonstellingsruimtes, auditoria, theaters en warenhuizen.

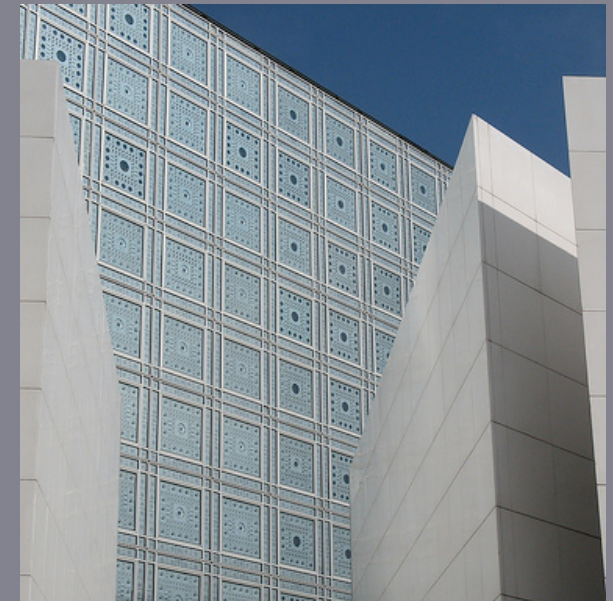
Als voorbeeld kan het “Institut du Monde Arabe” van Jean Nouvel aangehaald worden (figuur 2.15). Het biedt onderdak aan onder meer een museum voor Arabische kunst en een bibliotheek. Om tegemoet te komen aan de eisen van dit programma, is de zuidzijde van het bouwwerk bekleed met stalen diafragma's die automatisch openen en sluiten, naargelang de warmte en de sterkte van het invallende licht. Dergelijke interactieve gevelelementen herinneren bovendien aan de arabesken en geometrische vlakverdelingen uit de Islamitische kunst.

Hoewel fysieke transformatie de meest krachtige vorm van verandering is die een gebouw kan ondergaan, is het belangrijk om op te merken dat een aanzienlijke visuele transformatie ook kan plaatsvinden zonder fysieke beweging. De mogelijkheden voor spectaculaire, snelle veranderingen in het beeld van de architectuur zijn versneld door de ontwikkeling van nieuwe communicatie apparatuur zoals light-emitting diode (LED) schermen. Die technologie werd onder meer toegepast door Herzog en De Meuron in de “Allianz Arena” in München (figuur 2.16), een voetbalstadion voor twee thuisploegen, Bayern (die in het rood spelen) en TSV München (die in het blauw spelen). Het gebouw is bekleed met 2 816 ruitvormige ETFE (Ethylene tetrafluoroethylene Copolymer) kussens, opgehangen in een EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) rubberen klemsysteem dat hen toelaat om uit te zetten en te buigen. De LEDs worden bevestigd op de rand van elk kussen, dat bedrukt is met een patroon van witte stippen zodat het licht zich diffuus verspreidt. Aanvankelijk was de voornaamste drijfveer achter het concept het stadion blauw of rood te kunnen maken, afhankelijk van welke ploeg thuis speelt. De flexibiliteit van het LED-systeem laat echter toe dat de arena kan verlicht worden in een breed scala van berichten en patronen, waaronder pulserende en bewegende lichten die de arena schijnbaar doen draaien.

De case study en het ontwerp van deze masterproef kunnen binnen bovenstaande classificatie ondergebracht worden in de categorie van de “embedded kinetic structures”: de fysieke beweging van de structurele bouwelementen resulteert namelijk in de ruimtelijke dynamiek van de structuur in haar geheel.

2.3 INTERDISCIPLINAIR

Door de verscheidenheid in kinetische structuren te analyseren aan de hand van bovenstaande classificatie, kan geconstateerd worden dat kinetic architecture niet alleen een grote diversiteit kent maar ook interdisciplinair is: de invloeden en ervaringen die met kinetische structuren gepaard gaan, zijn zowel afkomstig uit verschillende takken van de architectuur als uit de werktuigkunde, de mechanica, de materiaalkunde en de auto-industrie. Het onderzoeksveld dat de toepassing van kinetische structuren in de bouwkunst bestudeert is slechts weinig



Figuur 2.15_ l'Institut du Monde arabe < J. Nouvel
(www.flickr.com)



Figuur 2.16_ Allianz Arena < Herzog & de Meuron
(Kronenburg, 2007)

verkend. Toch staat vast dat kinetic architecture een vereniging is van de architecturale vormgeving en technische know-how.

2.3.1 ARCHITECTURALE ASPECTEN

Door bewegende elementen in de architectuur te integreren, wordt 'tijd' als vierde dimensie in het ontwerp geïntroduceerd. Die toevoeging dwingt tot een verandering in het ontwerpproces. Terwijl de huidige gebouwen meestal ontworpen zijn als een statisch monument, dienen "embedded kinetic structures" verschillende vormen aan te nemen doorheen de tijd. Het uitgangspunt van het ontwerpproces ligt in het begrijpen en voorspellen van de reeks veranderingen die in de toekomst zal plaatsvinden. Eens die wijzigingen geïdentificeerd zijn, is het noodzakelijk om een architecturale vorm te ontwerpen die op voornoemd uitgangspunt inspeelt. Naast een aangepaste ontwerpstrategie is het tevens noodzakelijk om gebruik te maken van geavanceerde rekentools en visualisatiesoftware.

Om het ontwerp aanschouwelijk te maken en te evalueren, volstaan driedimensionale schetsen en aanzichten niet. Het is nodig om de beweging gecontroleerd te kunnen simuleren en de locatie en dimensies van de componenten te evalueren. Hiertoe werd een beroep gedaan op software die, gebaseerd op een parametrisch model, voornamelijk gebruikt wordt voor mechanische constructies. (SolidWorks, Generative Components)

Wat betreft de calculatie, moet bij kinetische structuren rekening gehouden worden met de veranderlijke belastingsvoorwaarden ten gevolge van de steeds wijzigende geometrie. Er is volgens mijn onderzoek geen calculatiesoftware beschikbaar die expliciet geschikt is om kinetische structuren door te rekenen. Ik heb dan ook voornamelijk gebruik gemaakt van statische rekenpakketten waarin een aantal standen van het bewegend object ingevoerd werden. Toch biedt bepaalde calculatiesoftware de mogelijkheid om het geometrisch model te parametriseren. Op die manier kunnen de verschillende standen met hun bijhorende resultaten (doorbuiging, spanningen,...) vrij eenvoudig bekomen worden.

2.3.2 TECHNISCHE ASPECTEN

Mede dankzij de evolutie in de constructietechnieken en het uitvinden van nieuwe materialen wordt het mogelijk om kinetische structuren te ontwerpen. Ze zijn hét middel bij uitstek om te 'profiteren' van de technologie, materialen en technieken die voortkomen uit de technische vooruitgang in andere disciplines, zoals de werktuigkunde en de automobielsector.

Vooreerst is het van belang om het juiste materiaal te selecteren. Vanwege hun dynamisch karakter zijn kinetische structuren meestal samengesteld uit relatief lichte materialen. Vandaag de dag zijn nieuwe materialen, zoals membranen, kunststoffen en composieten beschikbaar, die geïntegreerd kunnen worden in kinetische structuren. Aluminium en staal blijven de meest gebruikte op-druk-belaste materialen door hun beschikbaarheid en ervaring. Wanneer het budget het toelaat of indien bepaalde prestaties vereist zijn, worden nieuwe, geavanceerde materialen toegepast zoals koolstofvezel en Kevlar. Deze spin-offs van andere geavanceerde industrieën worden vooral toegepast in architectuur waarbij hoge prestaties vereist zijn in combinatie met de noodzaak om het gewicht te beperken. Het voorhanden zijn van geschikte materialen vergemakkelijkt de ontwikkeling van kinetische structuren. Het is voor de ontwerper van kinetische structuren van belang om zich bewust te zijn van de praktische, functionele en esthetische mogelijkheden van die hedendaagse materialen.

Bovendien moeten de ontwerpers kennis hebben van de methodes die gebruikt worden om mechanismen te creëren en te controleren. Ze moeten de capaciteit hebben om die methodes in te zetten voor het ontwerp van kinetische structuren, om zo een functioneel bouwwerk te bekomen met een groot aanpassingsvermogen. Het is hoofdzakelijk de architect die de scharnieren en andere elementverbindingen ontwikkelt door het observeren van de structuur, door na te gaan hoe deze structuur beweegt en hoe die kan bijgewerkt worden. Die mechanische componenten maken van het ontwerp een mechanisme dat aangedreven wordt door controlesystemen. De vooruitgang in de controletechniek beïnvloedt de ontwerpen van de kinetic architecture, waardoor pneumatisch en hydraulisch werkende componenten, zelf-nivellerende mechanismen,... kunnen toegepast worden. Het geheel van controlesystemen kan manueel aangestuurd worden of er kan beroep gedaan worden op waarnemingssystemen die omgevingsveranderingen (temperatuur, licht, akoestiek, ...) detecteren.

BEWEEGBARE BRUGGEN

In de burgerlijke bouwkunde, meer bepaald in de bruggenbouw, wordt al lang gebruik gemaakt van gemechaniseerde bewegingen (ophaalbrug, hefbrug, draaibrug, ...). Vandaag de dag duiken beweegbare bruggen op in alle denkbare varianten. Met deze kinetische oplossing probeert men tegemoet te komen aan de specifieke eisen van voetgangers/voertuigen enerzijds, en het eronder doorgaand verkeer anderzijds.

Na een kort overzicht van verschillende types beweegbare bruggen wordt er één, nl. de “Rolling Bridge”, meer in detail bestudeerd. Ook deze brug toont de vindingrijkheid van de hedendaagse ingenieurs en architecten. Bij het krijgen van de opdracht voor een beweegbare brug, stelde Thomas Heatherwick zich namelijk niet tevreden met een herneming van bestaande types zoals draaibare bruggen, hefbruggen, stijf ophaalbare bruggen,... In de plaats daarvan kwam hij met iets volledig nieuws voor de dag, een constructie die zowel een mobiele sculptuur als een ingenieursstructuur is.

Aan de hand van deze case study wordt dieper ingegaan op het architecturale en technische aspect van zulke kinetische structuren. De architecturale vorm wordt bestudeerd door de beweging doorheen de tijd te analyseren. Daarnaast wordt modelleer- en rekensoftware onderzocht om na te gaan welke computerprogramma's zich het best lenen tot het visualiseren en calculeren van kinetische architectuur. Wat betreft het technische aspect wordt voornamelijk aandacht besteed aan het aandrijfsysteem: het zeer precies kunnen controleren van de beweging is immers een basisvereiste.



3.1 OVERZICHT

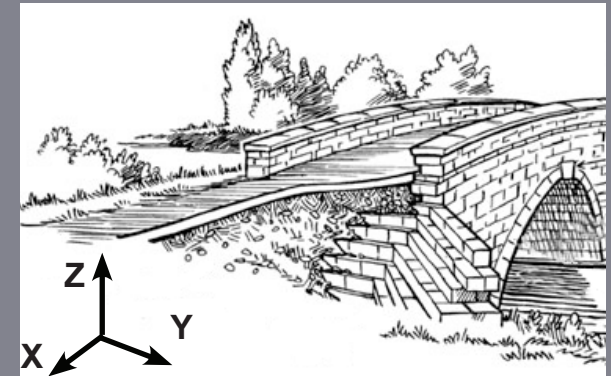
In het boek *Footbridges*⁶ wordt gesteld dat er twee belangrijke redenen zijn om beweegbare bruggen te bouwen. Vooreerst zijn ze noodzakelijk om te voorkomen dat de ene verkeersstroom met een andere interfereert (bruggen op zodanige hoogte bouwen zodat doorgang voor scheepvaart mogelijk wordt zou immers absurd zijn). Daarnaast worden ze gebouwd uit schrik voor overvallen: onze voorouders hadden al ophaalbruggen over hun grachten ter verdediging.

Veel publieke bruggen moeten dus beweegbaar zijn, bij voorkeur met een besturing van op afstand. De hele beweging wordt een spektakel, maar vraagt echter ook technische ondersteuning en extra kapitaal in vergelijking met vaste bruggen. Hieronder begrepen zijn o.a. het onderhoud en de aanschaf van een elektromechanische uitrusting, die naast de bewegingen van het brugdek ook een vergrendeling van de toestand moet mogelijk maken.

De keuze van het type beweegbare brug wordt meestal bepaald door de plaatselijke randvoorwaarden. De vereiste vrije doorgang bepaalt hoeveel plaats de geopende brug moet vrijhouden in verticale en in horizontale richting. Bovendien heeft de frequentie waarmee de brug moet openen een invloed op het type van motor. Door het gebruik van lichte materialen kunnen minder hoge eisen gesteld worden aan de motor en aan de tegengewichten van de brug. Beweegbare brugdekken worden dan ook bijna altijd in staalbouw uitgevoerd. Het beperken van gewicht is trouwens voor eender welke dynamische structuur van vitaal belang.

Het bewegen van het brugdek kan gebeuren door translatie, rotatie of door een combinatie van beide. Een mogelijk onderscheid in het gamma aan bruggen kan gemaakt worden volgens de richting waarin ze bewegen: translatie: U_x , U_y , U_z ; rotatie: R_x , R_y , R_z . (waarbij de x-as parallel aan de langsrichting van de brug en de y-as parallel met het water wordt beschouwd.) (figuur 3.1)

Naast die bruggen, die om of langs één van de assen bewegen, zijn er ook tijdelijke bruggen, die bijvoorbeeld gebouwd worden door de genie van het leger als er geen mogelijkheid bestaat een rivier over te steken. In dat geval wordt vaak een pontonbrug of een baileybrug (figuur 3.2) gebouwd. In Londen ontwierpen de architecten van Future Systems de “Floating Bridge”, een drijvende brug die Canary Wharf en West India Quay verbindt. Door gebruik te maken van pontons werd voldaan aan het opgelegde criterium dat de oevers niet mochten belast worden. (figuur 3.3)



Figuur 3.1 Positie assen
(Smeltz Andrew, 1998)



Figuur 3.2 Bailey Brug
(www.essential-architecture.com)



Figuur 3.3 Floating Bridge
(www.darkwaters.org.uk)

6 Baus & Schlaich, *Footbridges*, Birkhäuser, Basel, 2007, p 181-195

In onderstaand overzicht worden de meest voorkomende brugtypes besproken en geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld. Een schema moet de beweging van de brug verduidelijken.

A. ROLBRUG (U_x)

Bij dit brugtype wordt het dek verplaatst door horizontale translatie. Bij het openen van de brug bevinden bepaalde gedeelten van het dek zich in uitkragende stand ten opzichte van de ondersteuning. Om te vermijden dat de brug in het water kantelt, moet het zwaartepunt boven land liggen waardoor een groot deel van de brug op het land staat. Om dit te verkorten kan eventueel met een tegengewicht gewerkt worden.

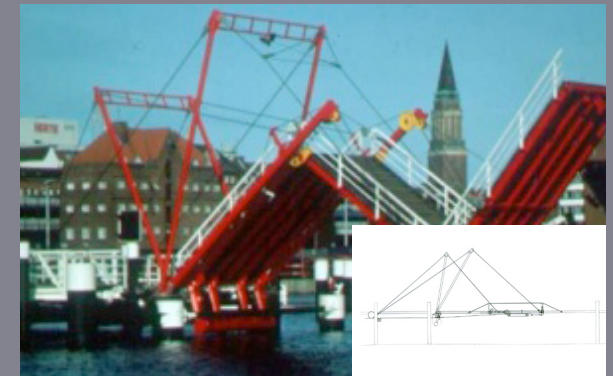
Aangezien de brug op het land wordt getrokken, is het een behoorlijk obstakel voor het verkeer. In de praktijk beperkt het toepassingsgebied zich dan ook tot kleine overspanningen (vnl. fiets- en voetgangersbruggen). Een vrij ongewoon voorbeeld van dit brugtype bevindt zich in Paddington Basin te Londen. Deze functionele maar stijlvolle brug heeft de vorm van een glazen, helixvormige stalen buis die door een schroefbeweging teruggetrokken wordt om doorgang aan de scheepvaart te verlenen. De “Helix Bridge” bestaat uit twee belangrijke structurele elementen: enerzijds de glazen helix die zich tussen twee vaste ringen bevindt, en anderzijds een afzonderlijk uitkragend dek dat dienst doet als tegengewicht en een integraal geheel vormt met de vaste ringen. Het tegengewicht wordt ondersteund door rolopleggingen zodat de helix gemakkelijk heen en weer kan bewegen over het kanaal. (figuur 3.4)

B. OPVUWBARE BRUG (U_x)

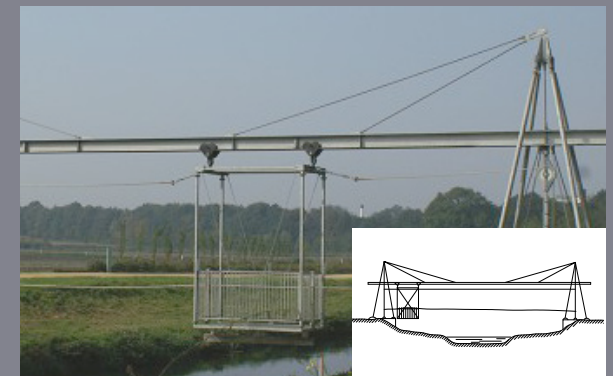
In gesloten toestand is de opvouwbare brug een klassieke tuibrug die langs beide zijden wordt opgehangen aan twee kabels. Wanneer men de kabels aanspant, gaat de brug open door te bewegen langs de horizontale x-as: het brugdek is voorzien van drie draaipunten en wordt als het ware opgevouwen tot een “N”. Een voordeel van deze beweging ligt in de reductie van het oppervlak dat onderhevig is aan windbelasting. Gezien de complexe mechanische werktuigkunde die dergelijke brug vereist, is er tot nu toe slechts één voorbeeld van verwezenlijkt. De “Hörnbrücke” is een stalen voetgangersbrug die bestaat uit drie brugsegmenten waarmee een lengte van 25,5 m wordt overspannen. Dit ontwerp van Schlaich Bergemann und Partner werd in 1997 voltooid en vormt een belangrijke en veel gebruikte oversteek in de haven in Kiel (Duitsland). (figuur 3.5)



Figuur 3.4_Helix Bridge < Buro Happold
(www.bdonline.co.uk)



Figuur 3.5_Hörnbrücke < Schlaich Bergemann
and Partners (Baus & Schlaich, 2007, p. 182)



Figuur 3.6_Erlebnisbrücke < Mirko Baum
(www.structurae.de)

C. 'TRANSPORTER'-BRUG (Ux)

De 'transporter'-brug is opgebouwd uit twee torens die een horizontale structuur dragen waaraan een platform is opgehangen. De verplaatsing van dit platform maakt het mogelijk om voetgangers en voertuigen te transporteren van de ene naar de andere kant van de rivier. Vaak werd dit brugtype gebouwd ter vervanging van een veerpont om de invloed van eb en vloed te omzeilen en op die manier toch een voldoende doorvaarhoogte voor schepen te bekomen. Dit type beweegbare brug is vrij zeldzaam en vandaag de dag zijn er nog maar enkele in gebruik.

In 2003 werd een miniatuurversie van de 'transporter'-brug gerealiseerd nabij de Duitse stad Mönchengladbach. De "Erlebnisbrücke" (ervaringsbrug) brengt voetgangers over de rivier Niers en herinnert aan de technieken die vroeger in de bruggenbouw werden toegepast. De naam van de brug werd niet enkel gekozen omdat de gebruikers boven de rivier 'zweven', maar ook omdat ze de 1,5 m op 2,5 m grote gondel met eigen spierkracht moeten verplaatsen. (figuur 3.6)

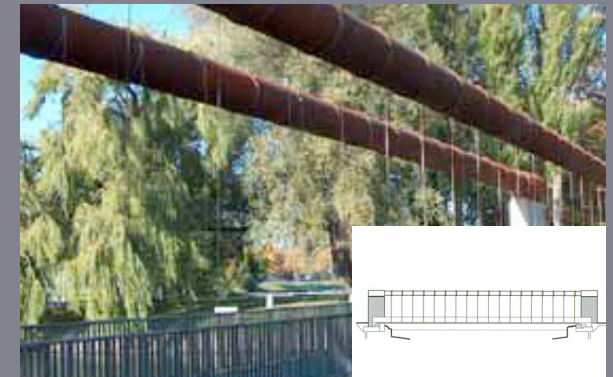
D. HEFBRUG (Uz)

Bij hefbruggen wordt het brugdek, soms ook 'val' genaamd, verticaal omhoog geheven doordat het is opgehangen aan vier hefkabels op zijn hoekpunten. De hefkabels lopen over roterende schijven en eindigen in tegengewichten. Alle genoemde elementen zijn opgesteld in vier heftorens die ofwel onafhankelijk van elkaar kunnen zijn, wat weliswaar een grotere stijfheid vereist, ofwel met elkaar kunnen verbonden worden tot een stijf raamwerk.

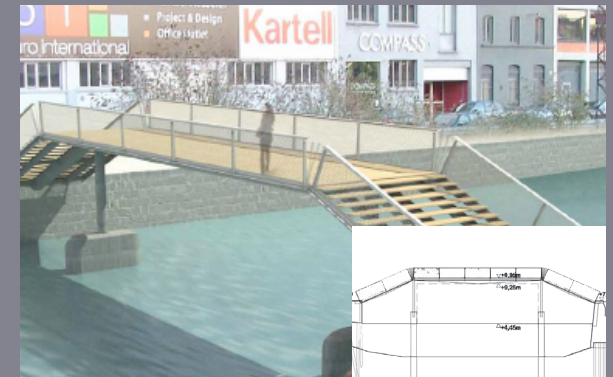
De tegengewichten dienen om het gewicht van de val gedeeltelijk te compenseren. Hierbij is het essentieel dat de val iets zwaarder weegt dan de tegengewichten, zodat de evenwichtsstand de gesloten stand is. De beweging van de val is vrij snel en behoeft in geopende stand geen vergrendeling. Op structureel vlak is het een groot voordeel dat de steunpunten van de val in alle standen hetzelfde zijn.

Het grote nadeel van dergelijke structuur is enerzijds de hefconstructie, die vaak als een storend element in het landschap wordt beschouwd, en anderzijds ook de beperkte doorvaarhoogte. Dit laatste kan vermeden worden door het dek neer te laten, in plaats van op te heffen, zodat het verdwijnt onder water. Die oplossing wordt echter weinig of niet toegepast wegens de vervuiling van het dek en de noodzaak aan een bijkomende corrosiebescherming.

Globaal gezien behoren hefbruggen tot één van de meest gebruikte types van beweegbare bruggen en zijn er heel wat varianten op dit brugmodel ontwikkeld.



Figuur 3.7 Coupurebrug < Jürg Conzett
(Baus & Schlaich, 2007, p.188)



Figuur 3.8 ontwerp fiets- en voetgangersbrug
Oude Dokken < Feichtinger Architects
(www.vlaams-bouwmeester.be)



Figuur 3.9 Katzbucketlücke < Schlaich
Bergemann and Partners
(Baus & Schlaich, 2007, p.184)

De “Coupurebrug” in Brugge is voorzien van een dek dat langs weerszijden is opgehangen aan 17 kabels. De structuur wordt omhoog gebracht door de kabels te winden rond 2 grote stalen buizen die draaien om hun as. (figuur 3.7)

In het winnende ontwerp van de open oproep voor de fiets- en voetgangersbrug in de Oude Dokken van Gent (Vlaamse Bouwmeester), wordt het dek van onderuit opgetild: zuigers onderaan de brug duwen het centrale travee omhoog zodat doorgang voor scheepvaart mogelijk wordt. Door treden te voorzien blijft de brug ook voor voetgangers toegankelijk in geopende toestand. (figuur 3.8)

Een ander voorbeeld van de hefbrug bevindt zich in het Duitse Duisburg. Het bureau Schlaich Bergermann and Partners ontwierp er een hangbrug, opgehangen aan 4 stalen masten. Ten gevolge van een kleine horizontale verplaatsing van de masten wordt de doorbuiging van de kabel opgeheven, waardoor het dek een convexe vorm aanneemt zoals de rug van een kat (= Katzbuckel). Om grote buigende momenten te vermijden is het dek opgebouwd uit een reeks korte elementen die werken zoals een schakelketting.

E. KANTELBRUG (R_x)

De kantelbrug is een beweegbare brug die roteert om de x-as, dus haaks op de richting van de rivier. Van dit soort brug bestaat slechts één voorbeeld: de “Gateshead Millennium Bridge” over de Tyne rivier in het Verenigd Koninkrijk. Die voetgangersbrug bestaat uit een boogvormig brugdek, dat door middel van staalkabels met een parabolische boog, het tegengewicht, is verbonden. Als de brug gesloten is, staat dit tegengewicht hoog boven water. Bij het openen van de brug, draaien grote hydraulische zuigers het tegengewicht naar beneden waardoor het brugdek naar omhoog beweegt. Door de rotatie van twee bogen rond een steunpunt wordt de doorvaarthoogte vergroot en kan de scheepvaart passeren. (figuur 3.10)

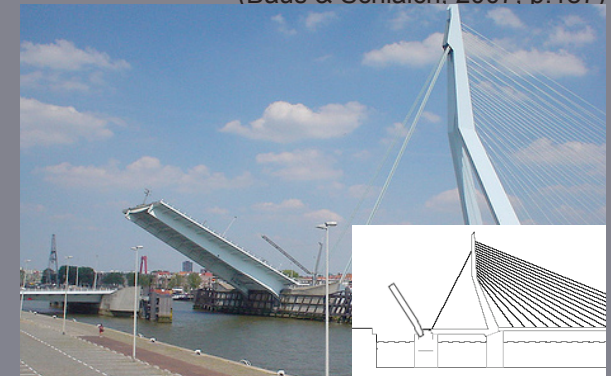
F. BASCULEBRUG/KLAPBRUG (R_y)

De beweging van deze brugtypes gebeurt door rotatie om een as evenwijdig aan de rivier. Het evenwicht om die as vereist dat aan het uitkragende uiteinde van het dek een tegengewicht wordt aangebracht. De voorarm is dan het nuttige gedeelte van het brugdek, terwijl de achterarm met het tegengewicht, waaraan het draaimechanisme gekoppeld is, zo kort mogelijk moet zijn. Tijdens het openen van de brug draait de achterarm in een kelder.

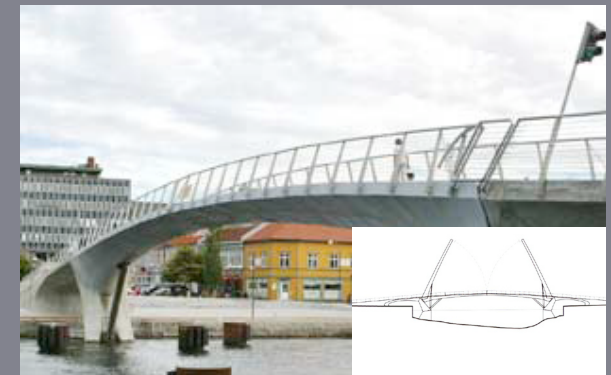
De rotatie kan plaatsgrijpen door twee hydraulische vijzels, die het brugdek omhoogduwen nabij het draaipunt. De aandrijfkraft, uitgeoefend door die vijzels, wordt bepaald door het onevenwicht van het dek en is te wijten aan het verschil in koppel uitgeoefend door de voorarm en de tegengewichten. In gesloten stand vormt de draaias



Figuur 3.10_Gateshead Millenium Bridge < Wilkinson Eyre Architects (Baus & Schlaich, 2007, p.187)



Figuur 3.11_Erasmusbrug < Ben Van Berkel (www.flickr.com)



Figuur 3.12_Brug over de Vesterelven (Baus & Schlaich, 2007, p. 127)

een steunpunt voor het brugdek, waarbij nog een gedeelte in uitkraging is. Als voorbeeld kan het basculegedeelte van de “Erasmusbrug” vermeld worden dat het grootste en zwaarste is van West-Europa. De 89 meter lange basculebrug, tussen de Kop van Zuid en de pyloon van de brug, wordt enkel gebruikt voor schepen die niet onder de tuibrug door kunnen. (figuur 3.11)

Indien het tegengewicht ontbreekt spreekt men van een klapbrug. Omwille van de grote hoeveelheid energie die nodig is om dergelijke brug te openen, wordt dit type enkel toegepast voor kleine bruggen. Door het gebruik van lichte materialen, zoals vezelversterkte polymeren, kan ook bij bruggen met grotere overspanningen het tegengewicht soms weggelaten worden. Dit werd onder meer toegepast in de brug over de Vesterelven Rivier in Noorwegen waardoor een overspanning van 28 m werd verwezenlijkt. (figuur 3.12)

G. VALBRUG/OPHAALBRUG (R_Y)

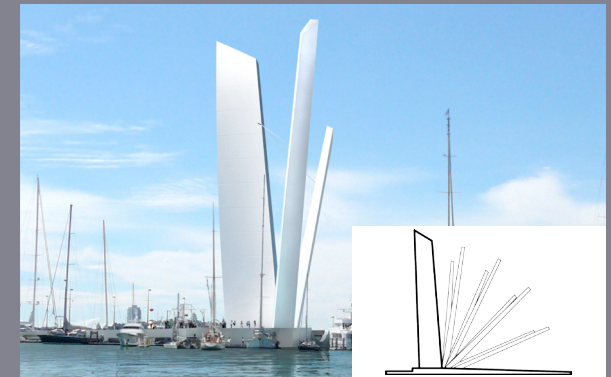
Bij deze bruggen wordt het brugdek, de val, opgetrokken door middel van haalkettingen bevestigd aan een torenconstructie. De valbrug is één van de eerste beweegbare bruggen en kwam voornamelijk voor bij kastelen en sommige stadspoorten. Uit de valbrug is later de ophaalbrug ontstaan. In tegenstelling tot de valbrug heeft de ophaalbrug wel een tegengewicht, waardoor het openen van de brug minder energie vergt en er over het algemeen een maximale overspanning van ongeveer 25 m kan bereikt worden.

In het winnende ontwerp van de “Te Wero Bridge” in Auckland (Nieuw Zeeland), werd geopteerd voor een ophaalbrug omwille van de aanwezigheid van een torenconstructie. Eén van de basisvereisten was immers dat de brug een landmark zou zijn, een voorwaarde die veel andere brugtypes in hun neerwaartse positie (de toestand waarin de brug zich het meeste van de tijd zal bevinden) moeilijk kunnen vervullen. Door te kiezen voor een ophaalbrug ontstaat een landmark dat bovendien een structurele functie heeft. (figuur 3.13)

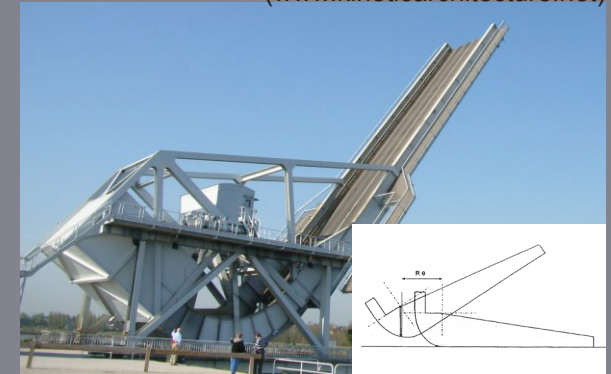
H. ROLBASCULEBRUG ($R_Y + U_X$)

Deze beweegbare brug, ook wel ‘Scherzerbrug’ genoemd, bestaat uit een brugdek waaraan een cirkelsegment wordt vastgehecht. De beweging is opgebouwd uit twee bewegingsrichtingen waardoor de doorvaartopening sneller en verder wordt vrijgemaakt dan bij andere brugtypes. Het evenwicht wordt verzekerd doordat het zwaartepunt van de brug en het middelpunt van het segment samenvallen.

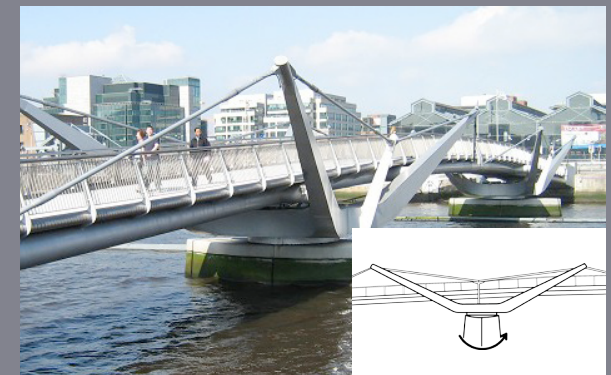
De originele “Pegasusbrug”, vooral bekend van de rol die ze speelde bij de landingen in Normandië tijdens de



Figuur 3.13_Te Wero Bridge < Denton Corker Marshall
(www.kineticarchitecture.net)



Figuur 3.14_Pegasus Bridge < John Howard
(products-of-normandy.com)



Figuur 3.15_Séan O Casy Bridge < Cyril O'Neill
(www.structurae.de)

Tweede Wereldoorlog, werd in 1993 vervangen door een grotere, modernere brug. Die nieuwe brug werd echter gebouwd volgens het originele ontwerp van 1935 en dus opnieuw als een rolbasculebrug uitgevoerd. (figuur 3.14)

I. DRAAIBRUG (Rz)

Dit brugtype gaat open en dicht door het roteren om een verticale as. Die as wordt ondersteund door een pijler in de te overschrijden waterloop en bestaat uit een draaispil van speciaal gietstaal, uitgerust met een lagering. De bovenkant van de brug beschrijft een cirkelboog bij het opengaan. Bijgevolg moeten de landhoofden en het rijdek aan de uiteinden de vorm van een cirkel hebben.

In geopende stand hangen beide brugdekhalften in uitkraging waardoor een zeer nadelige belastingstoestand ontstaat: het dek moet in staat zijn het eigen gewicht te dragen. Om de belastingen op de draaispil en aandrijving in deze toestand enigszins te verlichten, wordt soms een kleine heffing van het brugdek verwezenlijkt door middel van vijzels.

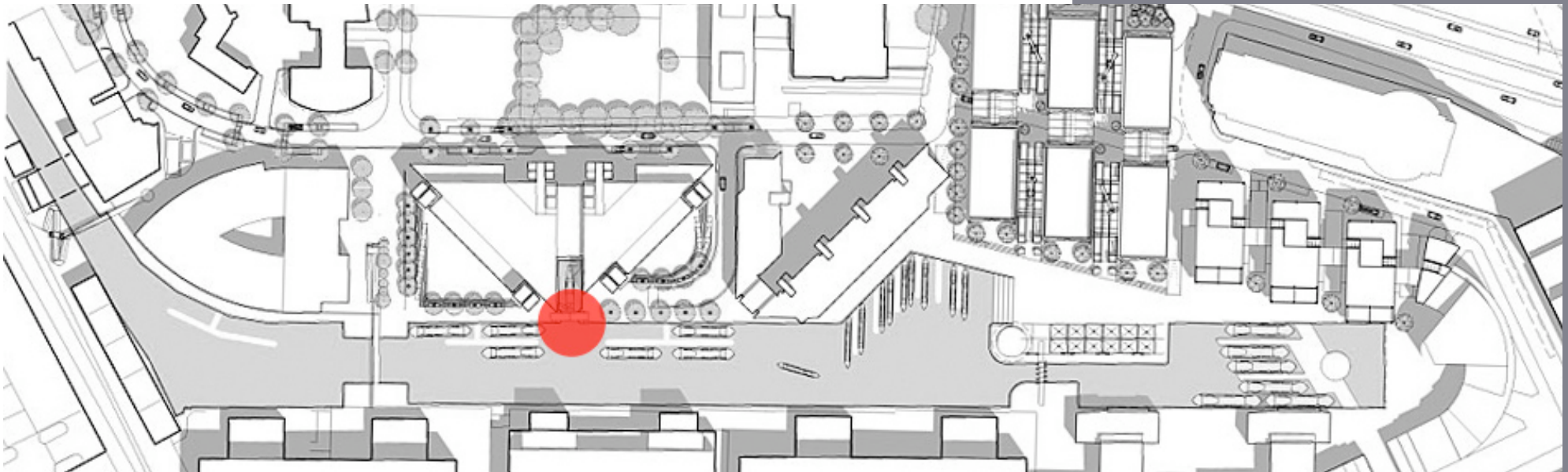
Bij een symmetrische, d.w.z. gelijkarmige, draaibrug vallen draaipunt en zwaartepunt van nature samen en is er geen tegengewicht nodig. Daarnaast bestaan er ook asymmetrische draaibruggen met een excentrisch draaipunt. Dit type komt echter minder frequent voor. De draaibrug heeft als nadeel dat er meer tijd nodig is om de brug te openen in vergelijking met andere brugtypes.

Het principe van de draaibrug werd onder meer toegepast in de “Séan O Casy Bridge”, waarmee de award voor “Best Pedestrian Bridge” (International IStructE Awards) in de wacht werd gesleept. De voetgangersbrug overspant ongeveer 100 m en heeft twee uitkragende armen die opendraaien om de boten op de rivier Liffey te laten passeren. Elke ‘klap’ van de brug is 44 m lang en 4,5 m breed. (figuur 3.15)

3.2 CASE STUDY: DE “ROLLING BRIDGE”

Bovenstaande indeling beschouwend, maakt deze brug net zoals de basculebrug, klapbrug, valbrug en ophaalbrug een rotatiebeweging rond de as parallel met het water. Toch werd de beweging van de “Rolling Bridge” nooit eerder vertoond: een stalen brug richt zich op boven het wateroppervlak om dan met een slingerbeweging in een vrijstaande, octogonale sculptuur op de kade rust te vinden. Het ontwerp voorziet een volledige opening in 180 seconden. In die tijdspanne beweegt de brug aanvankelijk zeer trapsgewijs waarna ze versnelt vanaf een hoogte van 8,4 m boven de kade. Vervolgens neemt de snelheid van de brug weer af om tot rust te komen in een veilige, gesloten bol. Met deze subtiële evenwichtsoefening van kunst, mechaniek en techniek pakt Thomas Heatherwick Studio de doorgang voor scheepvaartverkeer op een unieke manier aan.

De voetgangersbrug van 12,9 m overspant een 8,5 m breed zijkanaal, gelegen in de nieuwe commerciële zone in Paddington Basin, West-Londen. (figuur 3.16) Ze telt acht segmenten waarvan het skelet bestaat uit rechthoekige S355-stalen buizen. Elk segment werd vervaardigd uit drie delen: twee gelaste frames en het dek. De segmenten



Figuur 3.16_Inplanting van de “Rolling Bridge”
(www.richardrogers.co.uk)

zijn met elkaar verbonden door verticale cilinders die de borstwering langs beide zijden dragen. Die cilinders worden aangedreven door hydraulisch materiaal in de ondergrond en controleren de beweging bij het openen van de brug. Om de gewenste geometrie van de brugconfiguratie, en in het bijzonder de gesloten vorm, te bereiken, zijn toleranties vereist die normaal enkel voorkomen in de machinebouw.

3.2.1 ARCHITECTURAAL ASPECT

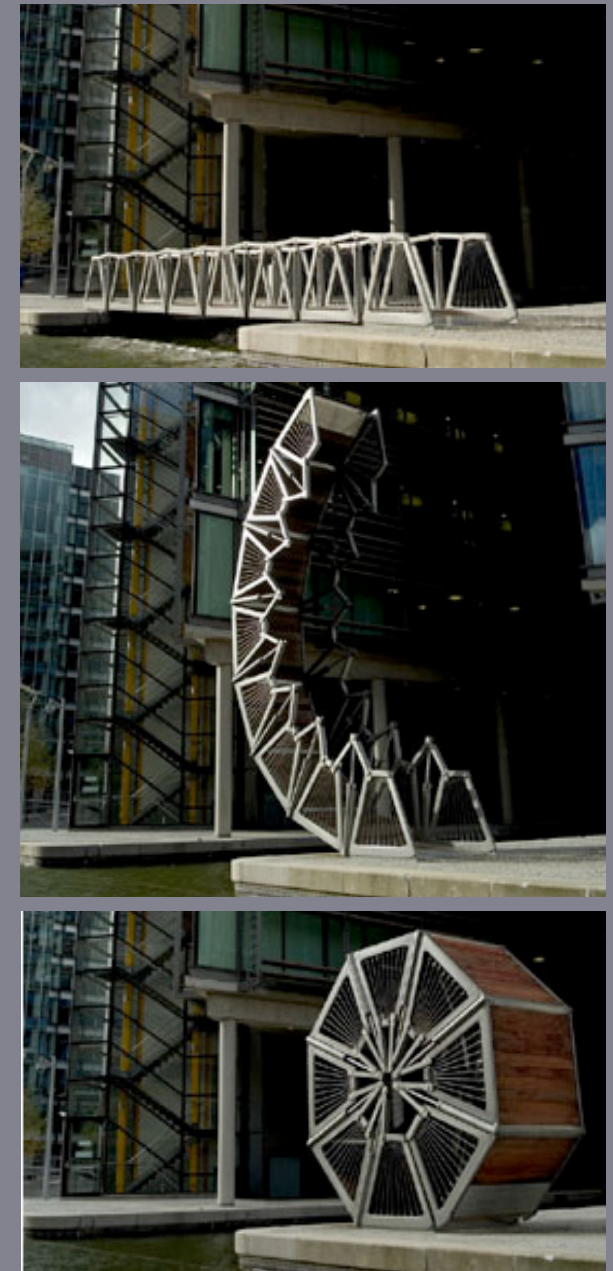
A. ARCHITECTURALE VORM

Het is eigen aan kinetische structuren dat ze verschillende vormen aannemen doorheen de tijd. Bij beweegbare bruggen wordt de beweging opgelegd door het scheepvaartverkeer. De ontwerpopdracht bestond erin om een passage voor voetgangers over het zijkanaal mogelijk te maken. Het was echter ook noodzakelijk om ten alle tijde een volledig vrije doorgang te kunnen verwezenlijken in functie van de scheepvaart. Om aan die veranderende eisen tegemoet te komen, werd bij de “Rolling Bridge” gekozen voor een brug die een organische beweging beschrijft.

In niet-opgerolde positie lijkt de brug eerder een traditionele structuur te zijn met een stalen frame en houten dek. De handgrepen bevinden zich in een positie voorbij hun horizontale ligging, om de brug in deze stand werkelijk te blokkeren. Hierdoor wordt verzekerd dat imposante krachten op de brug veilig kunnen overgebracht worden zonder dat het gevaar bestaat dat een segment van de brug zou inklappen. De leuning werken namelijk als vakwerkliggers steunend op de twee kades, waarbij de dekvloer-elementen op trek werken en de handgrepen op druk. De balustrade laat bovendien toe om de laterale spanning op te vangen door het U-vormig kader van elk segment.

Aangedreven door hydraulische cilinders, worden de balustrades gelijktijdig omhoog geduwd. Terwijl één element aan de kade bevestigd is, worden de overige zeven segmenten in beweging gebracht waardoor de brug wordt opgetrokken en langzaam begint te krullen. Terwijl de “Rolling Bridge” geleidelijk oprolt, gaat de structuur van vakwerkliggers op twee steunpunten over in een structuur van uitkragende liggers. Dit gaat bovendien gepaard met een omkering van de hoofdlast tussen de bovenste en de onderste vakwerkstaaf.

Na 180 seconden komen de uiteinden van de brug samen en is de brug teruggerold tot een veilige, gesloten bol waardoor volledige toegang tot het zijkanaal mogelijk wordt. ‘Stops’, gemonteerd aan de bovenkant van elke cilinder, dragen de statische belasting van de brug. Net zoals in de niet opgerolde positie is de brug in gesloten vorm stabiel en niet afhankelijk van het hydraulisch systeem.



Figuur 3.17_Rolling Bridge: 3 posities (Segers Marie, 'Rolling Bridge', 2006)

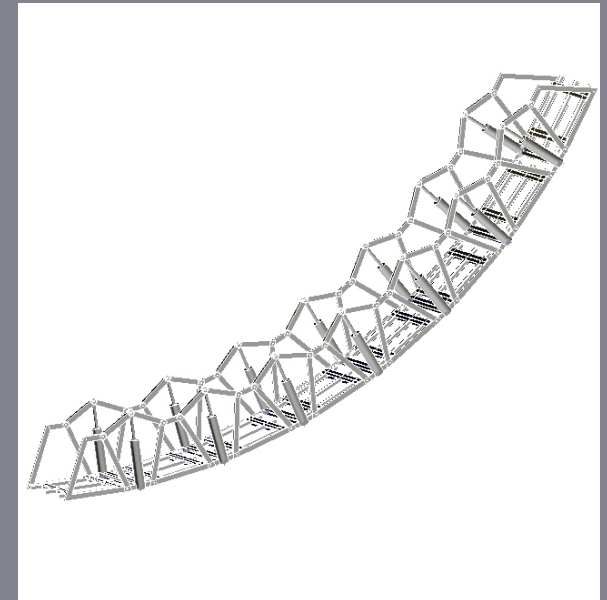
B. VISUALISATIE

Om de beweging van de brug te visualiseren werd modelleersoftware aangewend. Met statische pakketten, zoals CAD, is het noodzakelijk om elke stand van de brug afzonderlijk te tekenen. Dynamische pakketten, daarentegen, laten toe een virtueel model te genereren om de beweging te verifiëren en om de afmetingen van de elementen in elke stand na te gaan. Vandaar dat de “Rolling Bridge” in twee dynamische softwareprogramma’s gemodelleerd werd. Enerzijds is er het ‘3D-mechanical CAD program’ SolidWorks, dat vooral gebruikt wordt door product designers en mechanische ingenieurs. Anderzijds werd Generative Components aangewend, dat vooral door architecten en ingenieurs wordt gebruikt en omschreven wordt als een ‘associative and parametric modeling system’⁷.

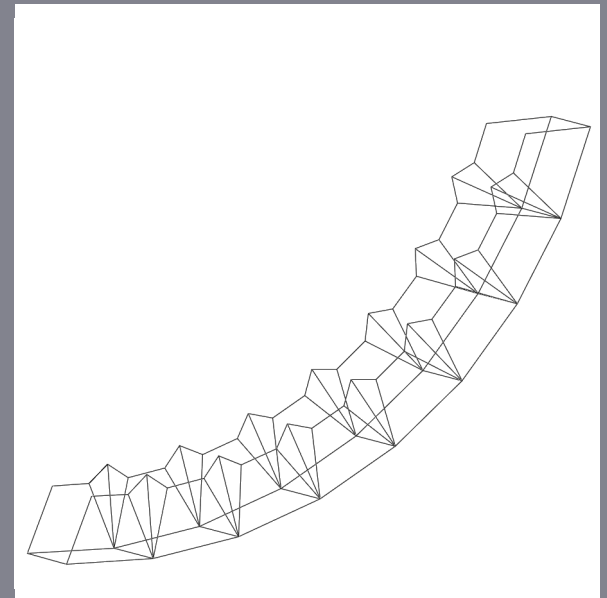
Daar waar SolidWorks vooral wordt toegepast om 3D-onderdelen en samenstellingen te creëren, heeft GC vooral tot doel het ontwerpproces van gebouwen te automatiseren en herhalingen in het ontwerp te versnellen door het werk op een logische manier op te bouwen.

Om in SolidWorks een model op te bouwen wordt gewoonlijk uitgegaan van een tweedimensionale schets (‘drawing’). Door die vorm onder andere te extruderen en uit te hollen, wordt een ‘part’ gecreëerd. De aldus bekomen ‘parts’ kunnen vervolgens samengesteld worden tot een ‘assembly’. Hiertoe worden relaties (parallel, loodrecht,...), de zogenaamde ‘mates’, toegekend aan de verschillende ‘parts’ waardoor de samenstelling op een eenvoudige manier kan gebeuren. (figuur 3.18) Het draadmodel dat in GC gegenereerd werd, is daarentegen opgebouwd aan de hand van ‘features’ (punten, lijnen,...). Alle ‘features’ van het model worden gelinkt met elkaar en met enkele ‘features’ die een vaste positie in het coördinatensysteem hebben. Het softwareprogramma is parametrisch in die zin dat een variabele kan ingevoerd worden. De ‘features’ kunnen dan in functie van één of meerdere variabelen uitgedrukt worden. (figuur 3.19)

In GC kan een andere stand van de brug bekomen worden door de waarde van de gekozen variabele, in dit geval de lengte van de hydraulische cilinder, te wijzigen. Aangezien er een verband bestaat tussen de ‘features’ van het model, zullen ook zij van positie wijzigen, hoewel ze niet rechtstreeks functie van de variabele zijn. SolidWorks, daarentegen, heeft de mogelijkheid om de hele beweging van de brug te simuleren door gebruik te maken van een animatietool. Hierbij is het noodzakelijk om, naast de beginstand op tijdstip nul, de eindstand die na een welbepaalde tijd moet bekomen worden te visualiseren. Dit kan eenvoudig door enkele wijzigingen aan te brengen aan de ‘mates’, bijvoorbeeld het veranderen van de afstand tussen het binnenste en het buitenste



Figuur 3.18_Simulatie “Rolling Bridge”
(SolidWorks)

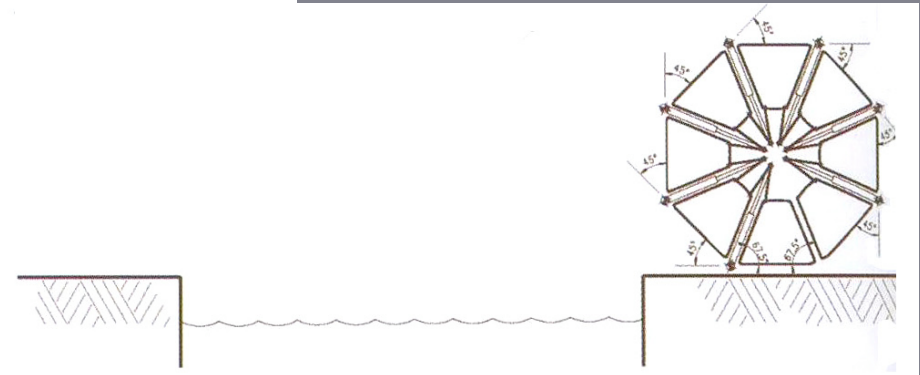


Figuur 3.19_Simulatie “Rolling Bridge”
(Generative Components)

A technical diagram of a propeller with 8 blades. The blades are arranged radially around a central hub. The angle between adjacent blades is labeled as 65°. The angle between a blade and the horizontal axis is labeled as 45°. The angle between a blade and the vertical axis is labeled as 67.5°. The propeller is shown in a cross-sectional view, with a dashed line indicating the horizontal axis of rotation.

Figuur 3.20_Aanzichten “Rolling Bridge”
(R.G., “Roll with it”, p. 57)

25



Figuur 3.20_Aanzichten “Rolling Bridge”
(R.G., “Roll with it”, p. 57)

van de rekenpakketten te onderzoeken om het meest geschikte pakket te selecteren en zo het eigen ontwerp te dimensioneren.

Voor de afmetingen, staalkwaliteit en andere technische gegevens werd beroep gedaan op de informatie van het ingenieursbureau Packman Lucas Consulting Engineers⁸ en de tekeningen in figuur 3.20.

Vooreerst werd een model gemaakt waarin de “Rolling Bridge” zich in open toestand bevindt, rustend op beide oevers. In deze toestand is de brug een ‘klassieke’ voetgangersbrug en werd de desbetreffende Eurocode geraadpleegd voor de inwerkende belastingen. In tweede instantie werd de brug beschouwd in haar bewegende toestand. Aangezien de rekenpakketten Powerframe en Robot Structural Analysis statisch zijn, moest voor de stabiliteitsstudie één stand van de brug gekozen worden. SCIA Engineer biedt echter de mogelijkheid om het model te parametriseren waardoor verschillende standen van de brug, mét hun bijhorende resultaten, op eenvoudige wijze weergegeven kunnen worden.

BRUG OP 2 STEUNPUNTEN

Geometrie en randvoorwaarden

a. Geometrie

Eerst en vooral moet de geometrie van de brug vastgelegd worden. Hiervoor stellen de rekenpakketten verschillende mogelijkheden ter beschikking. In Powerframe bestaat de meest eenvoudige manier erin om de geometrie in Autocad te tekenen en vervolgens te transporteren als dxf-formaat naar de rekensoftware. In SCIA Engineer en Robot Structural Analysis kan daarentegen gemakkelijker genavigeerd worden en kunnen afstanden zeer nauwkeurig ingegeven worden. Bijgevolg is het bij deze software aangewezen om de geometrie in het rekenpakket zelf te tekenen.

b. Materiaalkeuze en profieldoorsneden

Om de materiaalkeuze en de profieldoorsneden toe te kennen beschikken al de gebruikte rekenpakketten over databanken met courante materialen en standaardprofielen. Hierbij valt op te merken dat de profielendatabank van Robot Structural Analysis en SCIA Engineer uitgebreider is dan die van Powerframe. Bij alledrie is het mogelijk om de databanken aan te vullen met zelfgetekende profielen.

8 www.packmanlucas.com

De structuur van de “Rolling Bridge” is volledig uit staal opgebouwd. Een aantal publicaties vermelden dat de rechthoekige stalen buizen zijn vervaardigd uit staal met kwaliteit S355.⁹ Die kwaliteit werd daarom ook voor de andere profielen aangenomen. De profieldoorsneden die zijn toegekend staan in figuur 3.21 weergegeven. Het houten dek werd in Powerframe en Robot Structural Analysis niet mee opgenomen in het rekenmodel maar zal als permanente last in rekening gebracht worden.

c. Staafverbindingen

Naast een databank met materialen en profielen, maken de rekenpakketten eveneens gebruik van een databank met voorgedefinieerde staafverbindingen, doorgerekend volgens de Eurocodes. Hierin vertonen alle onderzochte rekenpakketten echter een aantal beperkingen waardoor het niet mogelijk was alle verbindingen van de “Rolling Bridge” te detailleren. Bijgevolg zijn de verbindingen tussen de staven gedefinieerd door het toekennen van vrijheidsgraden aan beide uiteinden van de staven. De rechthoekige buizen, die de trapezia van de balustrade uitmaken, zijn star met elkaar verbonden; alle 6 de vrijheidsgraden worden dus aan beide uiteinden belemmerd. Het voorgaande wordt eveneens aangenomen voor de staven die de hydraulische cilinders voorstellen. In open toestand worden de leuningens immers geblokkeerd om de stabiliteit te verzekeren. De gehelde rechthoekige buizen die de hydraulische cilinders verbinden met de trapezia en alle IPE-profielen van het brugdek worden gedefinieerd als pin-pin, nl. een belemmering van de verplaatsing in de x, y en z-richting en van de rotatie om de eigen as.

d. Steunpunten

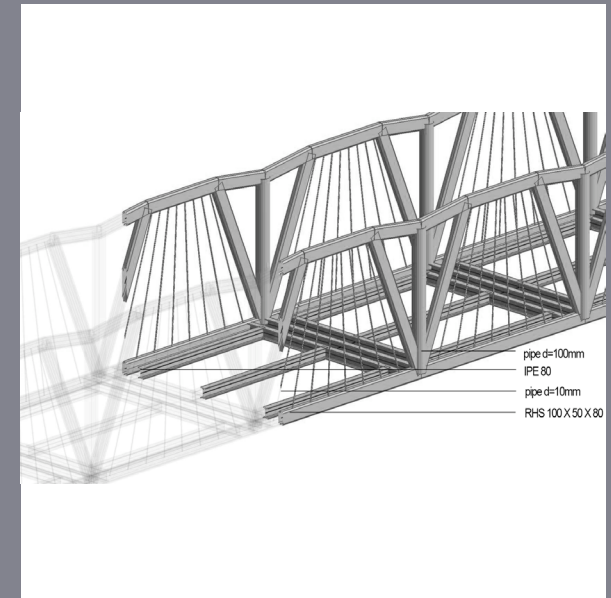
Eén segment van de brug zit volledig verankerd in de grond, twee andere steunen op de kade. Om dit te vertalen naar het rekenmodel worden de steunpunten toegekend zoals op figuur 3.22 is weergegeven. De symbolen visualiseren de verplaatsingen en rotaties die belemmerd worden. De steunpunten van het segment aan de overkant van het water (niet op de figuur weergegeven) hebben dezelfde eigenschappen als de 2 steunpunten van het segment dat op de kade rust (links op de figuur).

Lasten

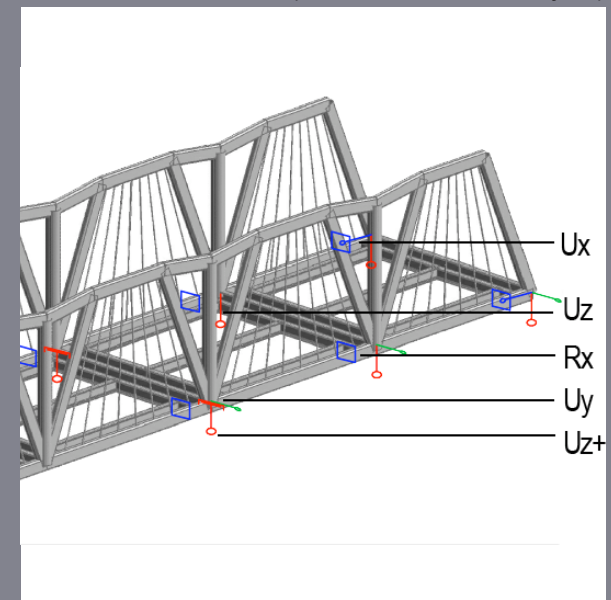
Op basis van de Eurocode¹⁰ werd getracht de inwerkende belastingen op de brug te analyseren. Het voetgangers- en fietsverkeer, normale constructiebelastingen van geringe omvang en buitgewone omstandigheden, doen

⁹ Segers Marie, 'Rolling Bridge', in Staal_Acier, 11, juni 2006, p. 16

¹⁰ Eurocode 1, “Actions on structures – Part 2-5 : Traffic loads on bridges : Actions on footways, cycle tracks and footbridges”, prEN 1991-2:2002



Figuur 3.21_Profieldoorsneden
(Robot Structural Analysis)



Figuur 3.22_Steunpunten
(Robot Structural Analysis)

verticale, horizontale, statische en dynamische krachten ontstaan. In wat volgt wordt een onderscheid gemaakt tussen de permanente, veranderlijke alsook wind- en sneeuwbelastingen.

a. Permanente belastingen

Onder de permanente lasten vallen het gewicht van de stalen profielen en van het houten dek (figuur 3.23). Beide zijn verticale, gelijkmatig verdeelde belastingen. Het gewicht van het stalen frame wordt door de rekenpakketten zelf bepaald op basis van de gekozen profielen. Het gewicht van het houten dek werd in de drie rekenpakketten op licht verschillende wijze ingevoerd. Zo kan Powerframe geen platen berekenen, vandaar dat het gewicht van het houten dek werd ingegeven als oppervlaktelast, inwerkend op de stalen IPE-profielen. Robot Structural Analysis en SCIA Engineer zijn wel in staat platen te berekenen. Robot Structural Analysis biedt echter de mogelijkheid om een fictieve plaat te genereren waarop belastingen (o.a. puntlasten) kunnen geplaatst worden. Dit biedt als voordeel dat het model beperkt blijft tot een raamwerkstructuur, dus zonder 2D-elementen. Daarom werd, net als in Powerframe, het gewicht van het houten dek manueel ingegeven. Op voorwaarde dat een benaderende waarde voor de massadichtheid en de dikte van het hout wordt aangenomen, werd het gewicht van het houten dek als volgt begroot:

$$600 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ N/kg} \cdot 0,05 \text{ m} = 0,3 \text{ kN/m}^2$$

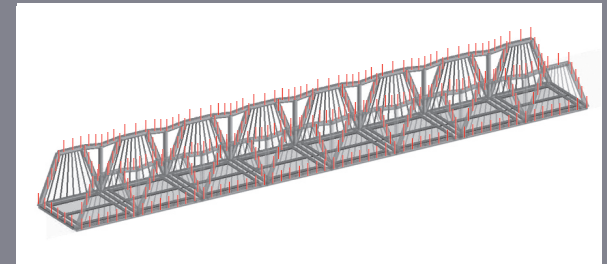
In SCIA Engineer werd het houten dek als een plaat gemodelleerd waarvan het gewicht door de software zelf werd berekend.

b. Veranderlijke belastingen

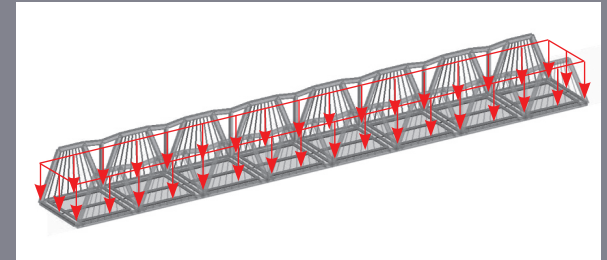
Volgens de Eurocode grijpt op het brugdek een gebruiksbelasting van 5 kN/m^2 aan. Dergelijk gelijkmatig verdeelde verticale belasting wordt, net zoals het gewicht van het houten dek, als oppervlaktelast ingegeven. (figuur 3.24)

De plaatselijke belasting is gelijk aan 10 kN en is werkzaam op een vierkant oppervlak waarvan de zijden $0,10 \text{ m}$ bedragen. Om die belasting op de meest nadelige plaats te laten aangrijpen, laten Robot Structural Analysis en SCIA Engineer toe deze last als mobiel te beschouwen. Dit zou echter aanleiding geven tot een groot aantal bijkomende belastingscombinaties waardoor het rekenwerk sterk zou toenemen. Aangezien het bovendien een vrij eenvoudige situatie betreft, nl. een ligger op twee steunpunten, kan de plaatselijke puntlast benaderend in het midden van de overspanning geplaatst worden. (figuur 3.25)

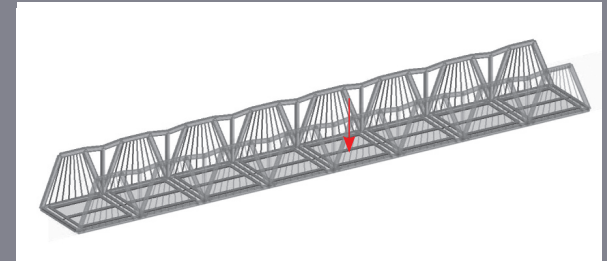
Naast de genoemde verticale veranderlijke belastingen, werkt ook nog een horizontale puntlast op het brugdek in. Indien er vanuit gegaan wordt dat er geen dienstvoertuig over de brug kan rijden, dan wordt die puntlast



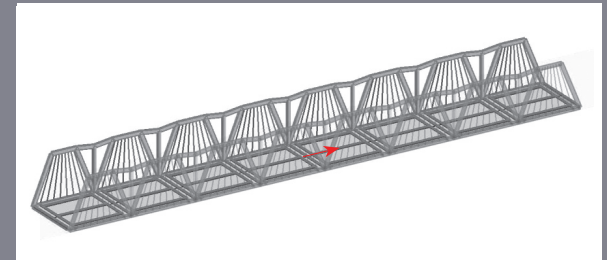
Figuur 3.23_Eigengewicht (stalen frame + houten dek) (Robot Structural Analysis)



Figuur 3.24_Gebruiksbelasting 5 kN/m^2 (Robot Structural Analysis)



Figuur 3.25_Plaatselijke belasting 10 kN (Robot Structural Analysis)



Figuur 3.26_Horizontale belasting $0,5 \text{ kN}$ (Robot Structural Analysis)

gelijkgesteld aan 10 % van de gebruiksbelasting. Dit resulteert in een horizontale last van 0,5 kN die aangrijpt langs de as van het brugdek. Er wordt van uitgegaan dat die horizontale kracht gelijktijdig werkzaam is met de overeenkomstige verticale belasting en in geen geval met de plaatselijke verticale belasting. (figuur 3.26)

Op de leuning werken eveneens veranderlijke belastingen in. Er moet gerekend worden met een verticale en horizontale, gelijkmatig verdeelde lijnbelasting van 1 kN/m. Zij kunnen echter niet samen voorkomen en worden dus als incompatibele belastingsgevallen beschouwd. (figuur 3.27 en 3.28)

c. Windbelasting

Om de windbelasting op de brug te bepalen werd beroep gedaan op de Eurocode¹¹. Hierbij werd ervan uitgegaan dat de windbelasting op de kabels verwaarloosbaar is. Een andere vereenvoudiging overweegt dat de tweede leuning verborgen ligt achter de andere en dus geen wind vangt. De berekening van de windkrachten P in de knooppunten van de leuning is in bijlage 1 opgenomen. (figuur 3.29)

d. Sneeuwbelasting

Het gewicht van de sneeuwlast op het brugdek werd eveneens berekend aan de hand van de Eurocode¹² in bijlage 2. Op basis van de hoogte boven het zeeniveau (35 m¹³) en haar geografische ligging, werd berekend dat er voor de “Rolling Bridge” een belasting van 0,4 kN/m² in rekening moet gebracht worden. (figuur 3.30)

Resultaten

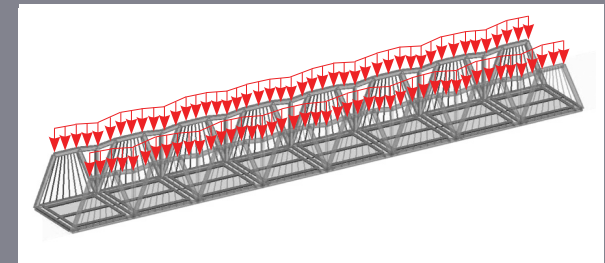
Na het definiëren van de verschillende belastingsgevallen, worden de belastingscombinaties gegenereerd. De rekenpakketten bieden de mogelijkheid om die generatie automatisch of manueel te laten uitvoeren. Wanneer de belastingscombinaties automatisch gegenereerd worden, zullen alle mogelijke combinaties uitgerekend worden waardoor de rekentijd hoog oploopt. Aangezien in het geval van de “Rolling Bridge” rekening moet gehouden worden met een groot aantal belastingsgevallen, is het aangewezen om de belastingscombinaties manueel of, indien het rekenpakket het toelaat, halfautomatisch te genereren.

Vervolgens kan overgegaan worden tot het berekenen van de structuur. “Powerframe is slechts in staat diverse typische staalstructuren, met name skeletstructuren, te berekenen met inachtname van schijfwerking. SCIA

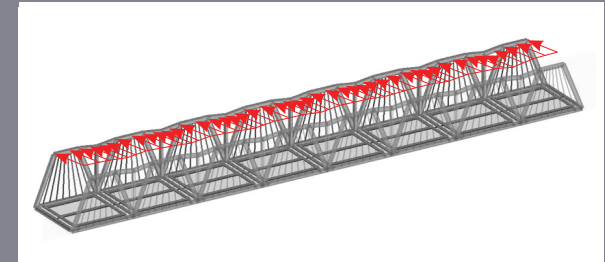
11 Eurocode 1, “Actions on structures – Part 1-4 : General actions : Wind loads”, EN 1991-1-4:2005

12 Eurocode 1, “Actions on structures – Part 1-3 : General actions : Snow loads”, EN 1991-1-3:2003

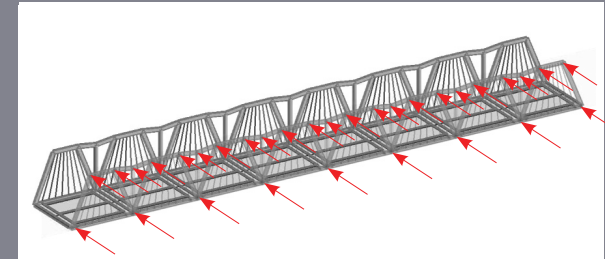
13 www.earthtools.org



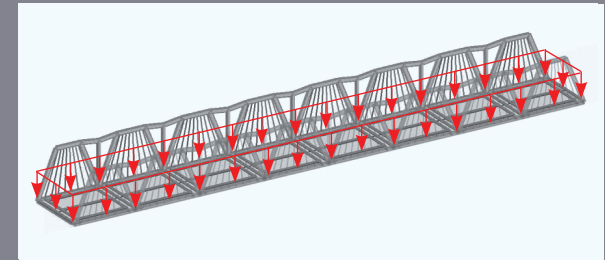
Figuur 3.27_Verticale belasting balustrade 1 kN/m
(Robot Structural Analysis)



Figuur 3.28_Horizontale belasting balustrade 1 kN/m (Robot Structural Analysis)



Figuur 3.29_Windbelasting
(Robot Structural Analysis)



Figuur 3.30_Sneeuwbelasting
(Robot Structural Analysis)

Engineer en Robot Structural Analysis, daarentegen, kunnen ook structuren met eindige elementen zoals platen en kabels doorrekenen. De uitgevoerde berekeningen gebeuren allemaal volgens de geldende Eurocodes en bijhorende nationale bijlagen. Powerframe en Robot Structural Analysis bieden ook de mogelijkheid om volgens landnormen te werken.”¹⁴

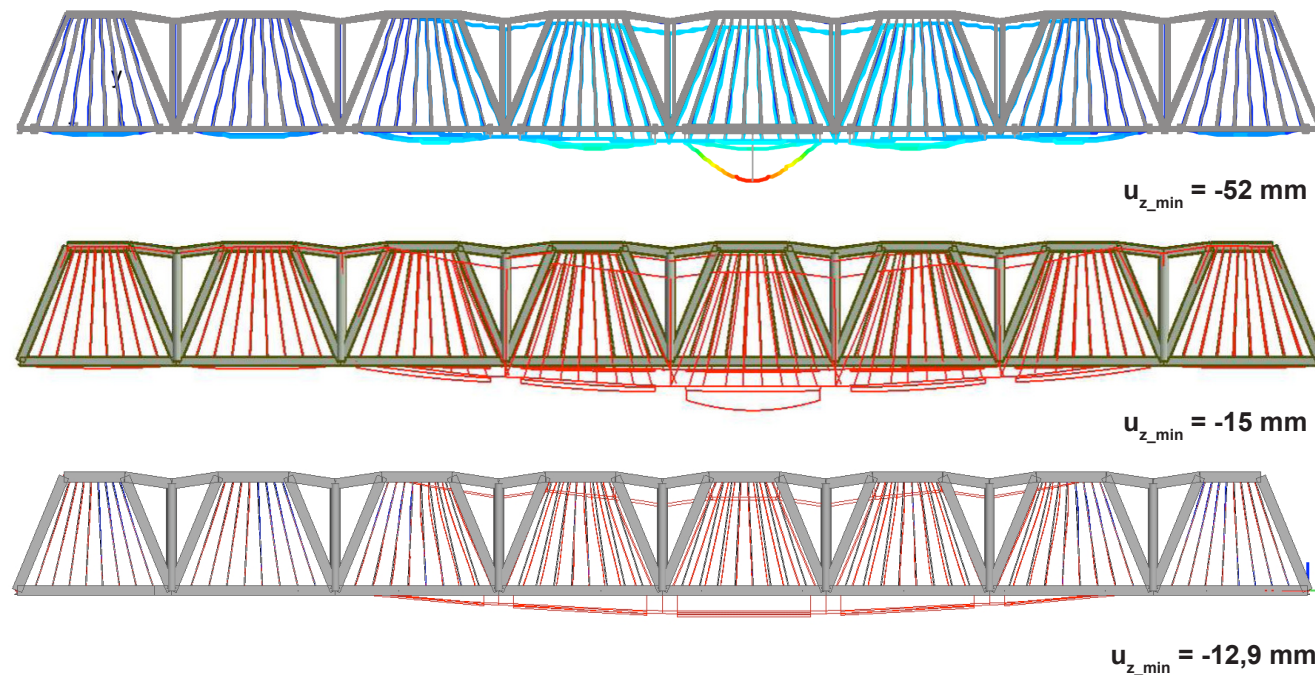
Na de berekening kunnen de resultaten bij alle onderzochte programma's zowel grafisch als aan de hand van rekennota's en tabellen gecontroleerd worden. Omwille van de kleurgradatie en schaal in haar grafieken, biedt Powerframe de meest duidelijke visuele weergave van de resultaten.

a. Doorbuiging

Voor een brug op twee steunpunten geldt dat de doorbuiging beperkt moet blijven tot $l/250$. Aangezien de brug een totale overspanning heeft van 8,5 m, moet de totale doorbuiging kleiner blijven dan 51,6 mm.

Een vergelijking van de resultaten aan de hand van de drie rekenpakketten geeft vrij uiteenliggende waarden

14 Christiaens Caroline, “Software voor staalbouw in België” in Staal_Acier, 15, juni 2007, p. 53-54



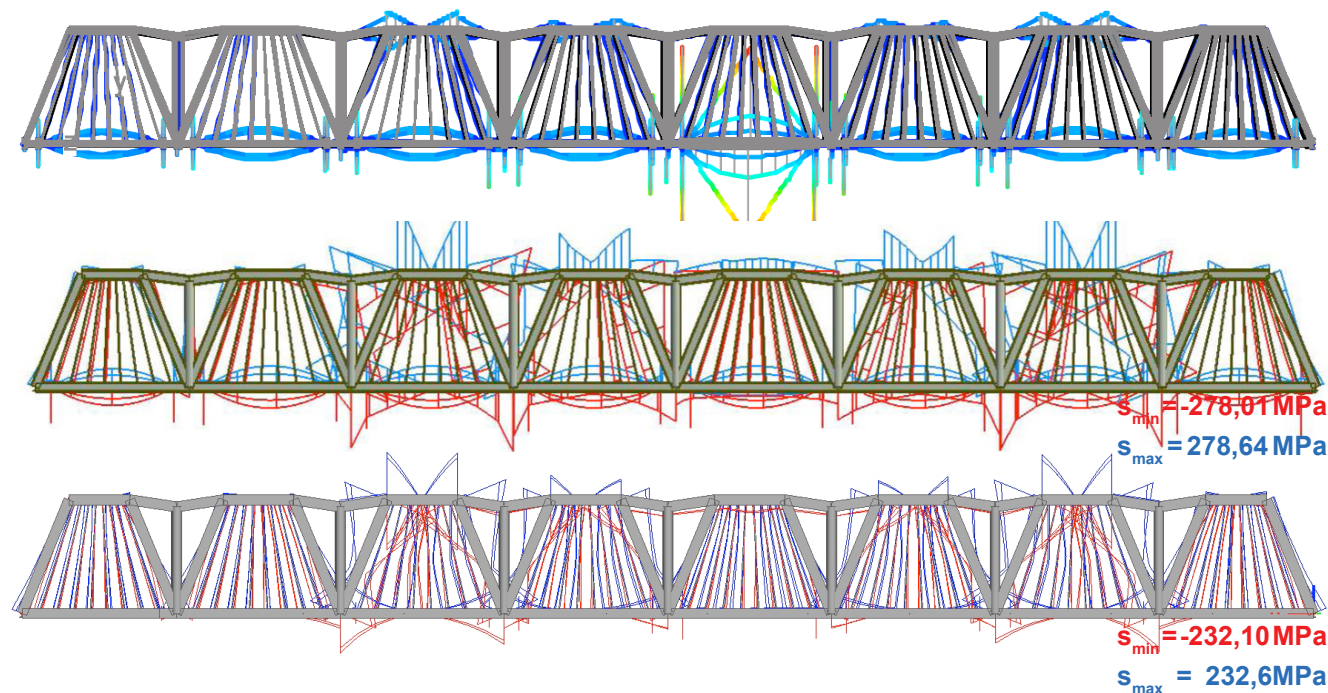
Figuur 3.31_Doorbuiging brug op 2 steunpunten
(v.b.n.o.:Powerframe_Robot Structural Analysis_
SCIA Engineer)

(figuur 3.31). Dit kan verklaard worden doordat het in Powerframe niet mogelijk is om een puntlast op een oppervlak te laten aangrijpen. De plaatselijke belasting van 10 kN moet dus noodgedwongen op een staaf van het brugdek geplaatst worden. Hierdoor is de doorbuiging veel groter dan wanneer de puntlast door het brugdek naar alle omliggende staven wordt verdeeld.

Het verschil tussen de doorbuiging in Robot Structural Analysis en in SCIA Engineer kan te wijten zijn aan het feit dat in Robot Structural Analysis met een fictieve plaat wordt gewerkt waarop vervolgens oppervlaktelasten en puntlasten worden aangebracht. Dit laatste is niet mogelijk in SCIA Engineer waardoor effectief een brugdek moest worden gemodelleerd. Zoals op de grafische weergave van figuur 3.31 te zien is, worden de lasten op een licht verschillende manier naar het stalen frame overgebracht, met afwijkende waarden tot gevolg.

b. Spanningen

Het stalen frame van de brug werd vervaardigd uit staal met kwaliteit S355, wat impliceert dat de spanningen beperkt moeten blijven tot 355 MPa.



Figuur 3.32 _Spanning brug op 2 steunpunten
(v.b.n.o.:Powerframe_Robot Structural Analysis
SCIA Engineer)

In Powerframe worden de spanningen in de x- en de y-richting afzonderlijk weergegeven. Dit resulteert in vier verschillende spanningen, zijnde: druk- en trekspanningen ten gevolge van N en My én druk- en trekspanningen ten gevolge van N en Mz. Aangezien men te maken heeft met samengestelde buiging zouden de drukspanningen enerzijds en de trekspanningen anderszijds moeten gecombineerd worden en wel zodanig dat N niet tweemaal in rekening wordt gebracht:

$$\sigma = \frac{N_x}{A} + \frac{M_y \cdot z}{I_z} + \frac{M_z \cdot y}{I_y}$$

Dit is zeer omslachtig, zeker omdat het model uit verschillende profielen bestaat met elk hun eigen waarde voor A, Iy,... . De waarden van de spanningen bekomen met Powerframe zijn dus niet echt relevant om te vergelijken met de resultaten van de andere rekenpakketten, waar wel met de samengestelde buiging wordt rekening gehouden, en worden dan ook niet weergegeven in figuur 3.32. Uit de grafische weergave, die een projectie is van de vier verschillende spanningen die door Powerframe berekend worden, kan wel worden opgemaakt dat de spanningen hoog oplopen. De reden hiervoor werd hierboven reeds toegelicht.

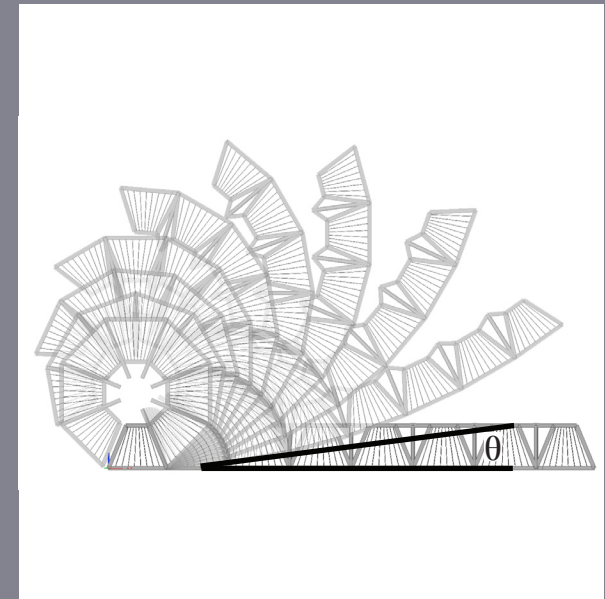
Het verschil tussen de waarden bekomen met de andere twee pakketten kan eveneens verklaard worden door hetgeen onder 'doorbuiging' werd vermeld. De bekomen waarden liggen allemaal onder de grens van 355 MPa. Het staal van de staven zal zich dus steeds onder de vloeigrens bevinden en bijgevolg een lineair verloop kennen.

BRUG IN BEWEGING

Geometrie en randvoorwaarden

SCIA Engineer biedt de mogelijkheid om het model van de "Rolling Bridge" te parametriseren door de coördinaten van alle knopen uit te drukken in functie van θ . Met behulp van de 'Batch Optimizer' kunnen de gewenste resultaten in de vorm van een tabel weergegeven worden voor verschillende waarden van θ (zie figuur 3.33 en 3.34). Hierdoor kan aangetoond worden dat de brug onder haar eigengewicht (stalen frame) de grootste doorbuiging en spanningen ondervindt wanneer $\theta = 40^\circ$. Deze positie werd dan ook gekozen om verder uit te werken in de 3 rekenpakketten. De segmenten van het hierboven getekende model worden dus allemaal met 40° gedraaid ten opzichte van het voorgaande segment. Bovendien worden er enkel steunpunten geplaatst onder het eerste (vaste) segment.

15 Thomas P., "Inleiding tot de sterkteleer", Faculteit toegepaste wetenschappen, Universiteit Gent, 1999, p.131



Figuur 3.33_Aanduiding parameter θ (SCIA Engineer)

$\theta [^\circ]$	$u_{z,min} [mm]$	$\sigma_{min} [MPa]$	$\sigma_{max} [MPa]$
0	-26,2	-98,7	105,5
5	-25,2	-90,2	102,4
10	-19,3	-70,6	84,7
15	-13,3	-56,5	63,9
20	-5,8	-47,4	53
25	-5,7	-47,3	39,8
30	-18,2	-48,6	32,8
35	-37,4	-70,3	61,3
40	-82,2	-158,8	162
45	-4,7	-81,5	65

Figuur 3.34_Resultaten voor verschillende waarden van θ ('Batch Optimizer' < SCIA Engineer)

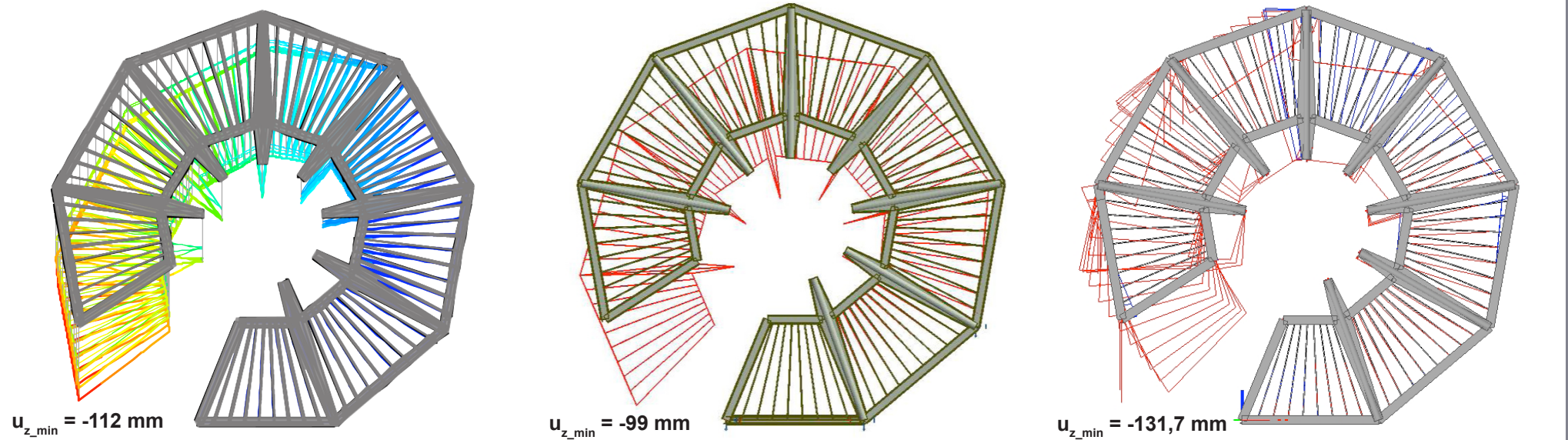
Lasten

Het aantal belastingen die in deze toestand op de brug inwerken kan gereduceerd worden: de enige belastingen die in rekening moeten gebracht worden zijn het gewicht van het stalen frame en het dek alsook de windbelasting. Aangezien de site van Thomas Heatherwick Studio¹⁶ vermeldt dat “on the rare occasion that wind speeds reach 30mph in the basin, the bridge will not open”, dient eigenlijk geen rekening gehouden te worden met de vervormingen ten gevolge van de windbelasting. Er zal dan ook geen windbelasting op het model geplaatst worden.

Resultaten

Net als in bovenstaand model kunnen de belastingscombinaties gegenereerd worden. Aangezien het aantal belastingen ditmaal beperkt is, zal de rekentijd bij een automatische generatie niet groot zijn. Het lijkt dan ook aangewezen om de combinaties volledig automatisch te laten genereren door het rekenpakket.

¹⁶ www.heatherwick.com



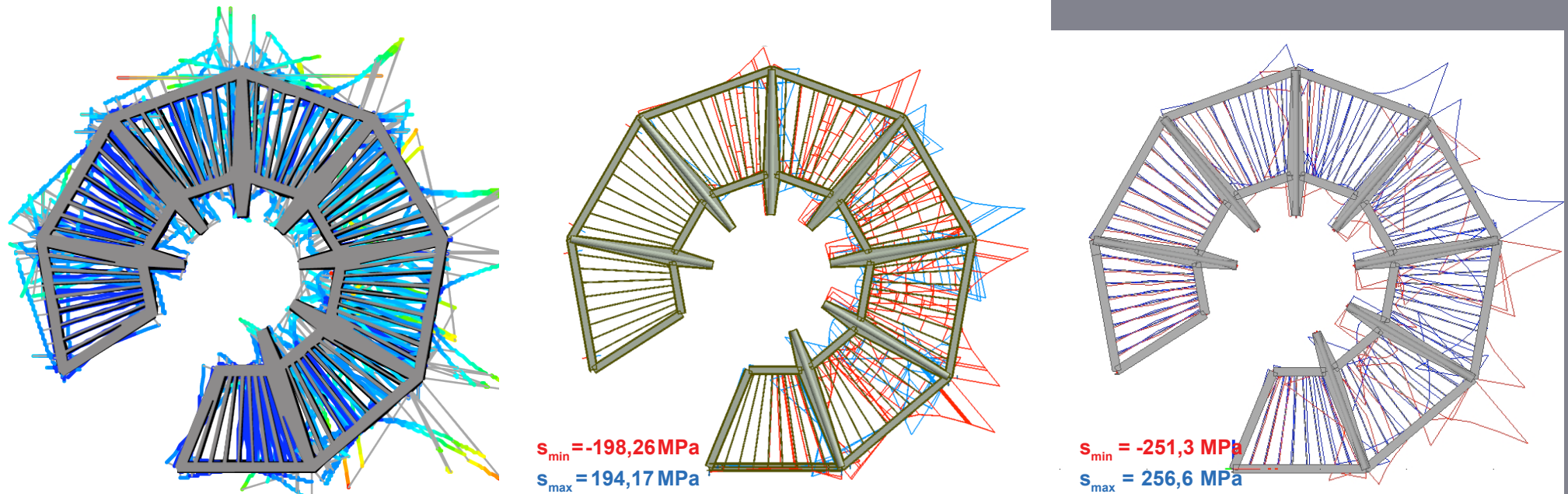
Figuur 3.35_Doorbuiging brug in beweging ($\theta = 40^\circ$) (v.l.n.r.:Powerframe_Robot Structural Analysis_SCIA Engineer)

a. Doorbuiging

Het laatste segment van de brug ondervindt tijdens de beweging de grootste doorbuiging. In de 'Batch Optimizer' werd enkel rekening gehouden met het eigengewicht van het stalen frame. Om de totale doorbuiging te kennen moet echter ook het houten dek in rekening gebracht worden. Het gewicht van het brugdek werd in de drie pakketten als een oppervlaktelast ingegeven. Het feit dat er licht verschillende waarden worden bekomen voor de maximale doorbuiging heeft vermoedelijk te maken met de manier waarop het rekenpakket de oppervlaktelast over de liggers verdeelt. Hoewel dit hier niet werd toegepast, bieden Robot Structural Analysis en SCIA Engineer de mogelijkheid om de spreiding van de oppervlaktelast te manipuleren. (figuur 3.35)

b. Spanningen

Met de drie rekenpakketten wordt een gelijkaardig spanningsverloop bekomen met een maximum gelegen tussen het derde en het vierde segment. Het verschil in doorbuiging bij de drie rekenpakketten is ook bij de spanningen merkbaar. Onder "Brug op 2 steunpunten" werd reeds vermeld dat de spanningen moeten beperkt blijven tot 355 MPa, waaraan ook in deze toestand voldaan is. (figuur 3.36)



Figuur 3.36_Spanningen brug in beweging ($\theta = 40^\circ$) (v.l.n.r.:Powerframe_Robot Structural Anaylis_SCIA Engineer)

3.2.2 TECHNISCH ASPECT

Aangezien er behoefte was aan een robuuste en onafhankelijke oplossing, werd er geopteerd voor het hydraulisch ontwerp van DJW Consulting waarbij een precieze controle over de beweging van de brug met zuivere hydraulica wordt verwezenlijkt. De garantie dat alle hydraulische cilinders met een constante snelheid worden aangedreven, ongeacht de immer wisselende en onvoorspelbare belastingen die op elk brugsegment aangrijpen, is de sleutel tot de hele werking van de brug. Om geluidshinder te vermijden, wordt het hele systeem van pomp, hoofd- en hulpcilinders, in de kelder van een nabijgelegen gebouw geplaatst. Een bekabeling,



Figuur 3.37_Hydraulisch systeem
(www.selmec.org.uk)

weggewerkt in het houten dek, voorziet vervolgens de brugcilinders van hydraulische voeding, waardoor het hele mechanisme in werking kan treden.

De hele beweging van de brug vergt energie die niet alleen moet worden toegevoerd maar die ook moet worden omgezet in andere energievormen. Een mechanische aandrijving stuurt een 11kW hydraulische pomp aan die dan de drukolie opwekt. Vervolgens voert de hydraulische pomp olie naar de 400 mm diameter hoofdcilinder waardoor deze laatste gaat stijgen. Door de mechanische verbinding zullen de 14 hulpcilinders, met een diameter van 160 mm, eveneens stijgen. Omwille van het principe van communicerende vaten, zal hierdoor olie onttrokken worden aan de 14 (100 mm diameter) brugcilinders die zich vervolgens in neerwaartse positie zullen bevinden. Het is ter hoogte van de brugcilinders dat de hydraulische energie terug wordt omgezet in mechanische energie onder de vorm van de 'ontrolbeweging'. Bij het oprollen van de brug vindt het omgekeerde proces plaats waardoor olie naar de brugcilinders wordt gevoerd en die cilinders bijgevolg stijgen. (figuur 3.37)

Een hydraulische aandrijving heeft het voordeel dat binnen een compact volume enorme krachten kunnen ontwikkeld worden. Bovendien is een continue en eenvoudige snelheidsregeling mogelijk, zelfs bij wisselende belasting. Dit heeft tot gevolg dat, in het geval van de "Rolling Bridge", de keuze voor een hydraulisch aandrijvingsysteem voor de hand lag. Wel kan opgemerkt worden dat de kostprijs aanzienlijk wordt door het uitgebreide leidingnet.

De gehele werking van de brug kan ook op een mechanische manier benaderd worden. Dit bewees The South East London Meccano Club met haar schaalmodel van de "Rolling Bridge" in Meccano.¹⁷ Aangezien er relatief hoge spanningen gegenereerd worden tijdens de beweging, volstonden tandwielen alleen niet. Bijgevolg moest elk segment voorzien worden van een aparte motor, die vervolgens een systeem van tandwielen in werking stelde. De moeilijkheid bestond erin om elk segment met eenzelfde snelheid te laten werken, aangezien ze onderhevig zijn aan verschillende krachten. Hoewel er, door het aanwenden van bewegende onderdelen in een mechanisch systeem, een groot risico bestaat op falen en meer onderhoud noodzakelijk is (voornamelijk door slijtage), slaagde men er toch in om een functionerend schaalmodel van de "Rolling Bridge" te verwezenlijken.

9 http://www.selmec.org.uk/article_0009_the_heatherwick_rolling_bridge.aspx

DESIGN OF A “TWISTING” STEEL BRIDGE

Om de nieuwe aanpak van kinetic architecture te illustreren, wordt een beweegbare brug ontworpen. Dit, weliswaar fictief, ontwerp heeft tot doel inzicht te krijgen in het architecturaal aspect van kinetische structuren. Aangezien kinetic architecture een interdisciplinair gebied betreft, is het eveneens noodzakelijk om kennis te verwerven omtrent het technisch aspect. Dus naast de essentiële architecturale context van kinetische structuren, maken mechanica en materiaalkunde ook een belangrijk onderdeel uit van de studie.

Hoewel in onderstaande structuur het architecturaal en het technisch aspect dus apart worden behandeld, dient opgemerkt te worden dat het ontwerp in feite een interactief proces is tussen beide aspecten. Zo kan de kinetische structuur bijvoorbeeld niet gedimensioneerd worden zonder te weten welk soort profielen noodzakelijk zijn en kunnen de mechanische verbindingen niet bepaald worden zonder de vereiste vrijheidsgraden te bestuderen aan de hand van SolidWorks.

Om bovengenoemde doelstellingen te verwezenlijken, is de studie gericht op het gebruik van simulatie en modellering als voornaamste onderzoeksmethodes. Doorheen het ontwerpproces werden prototypes, op verschillende schaal, gebruikt om de structuur experimenteel te evalueren.

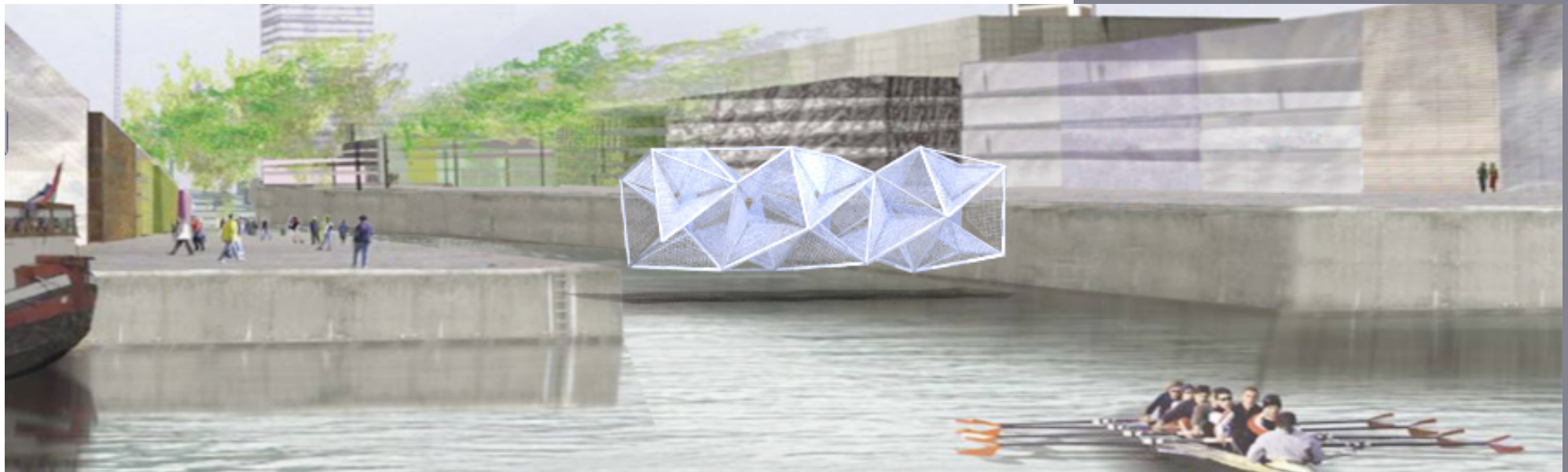


4.1 ARCHITECTURAAL ASPECT

Het opzet bestaat erin om een kinetische structuur te ontwerpen die doorheen de tijd verschillende vormen kan aannemen om de doorgang voor scheepvaart mogelijk te maken. In een eerste fase van het ontwerp zal deze doelstelling omgezet worden naar een architecturale vorm.

Eens de vorm vastligt, kan een mathematisch model worden opgesteld om de beweging nauwkeuriger te analyseren. Computersimulaties, aan de hand van SolidWorks, moeten toelaten om de resultaten van de mathematische modellering te testen en het ontwerp te visualiseren. Naast deze simulaties zijn maquettes ook een nuttig instrument om het ontwerp aanschouwelijk te maken en te evalueren.

Door gebruik te maken van de rekensoftware SCIA Engineer en Robot Structural Analysis wordt een structurele analyse van de voorgestelde constructie gemaakt. De doorbuiging en de spanningen kunnen beperkt worden tot de toelaatbare waarden door de profielsecties en het materiaal te optimaliseren.



Figuur 4.1_Beeld de “Twisting Bridge”
(SolidWorks)

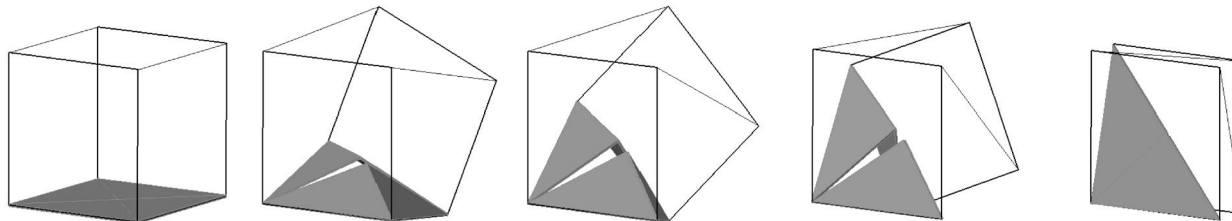
4.1.1 ARCHITECTURALE VORM

Om aan de veranderlijke verkeerssituatie, voetgangers-scheepvaart, tegemoet te komen werd een beweegbare voetgangersbrug ontwikkeld. De doorgang voor scheepvaart wordt mogelijk gemaakt doordat de brug een rotatie- en verkortingsbeweging ondergaat. Deze 'twist' veroorzaakt een transformatie van koker tot compact volume zoals op figuur 4.2 wordt verduidelijkt. Met deze twee uiterste toestanden kunnen beide verkeersstromen, weliswaar niet tegelijkertijd, gerealiseerd worden.

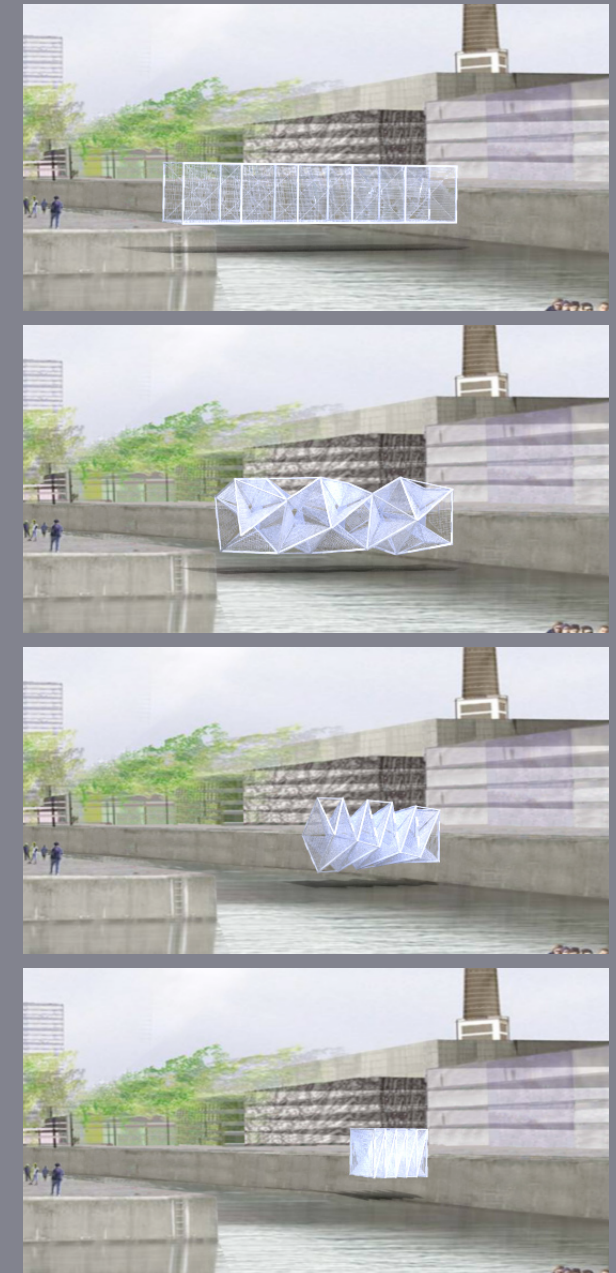
De brug bestaat uit twee hoofdcomponenten: het stalen geraamte en driehoekige vlakken.

Het geraamte van de brug is opgebouwd uit vierkante kaders die verbonden worden door staven waarvan de lengte iets groter is dan de zijde van de kaders. Door deze verbinding zal een hoekverdraaiing van de vierkante kaders een verkorting van de brug tot gevolg hebben. Nadat ze 90° gedraaid zijn liggen alle kaders terug in elkaars verlengde hoewel de totale lengte gereduceerd is.

Om stabiliteitsredenen enerzijds en om de brug begaanbaar te maken anderzijds, worden vlakken geïntroduceerd. Aangezien de brug tot haar compact volume moet kunnen herleid worden, werd ieder zijvlak opgedeeld in vier driehoekige segmenten die met behulp van scharnieren ten opzichte van elkaar kunnen bewegen zoals in figuur 4.3 wordt weergegeven. Bij rotatie van de vierkante kaders komen de ribben die twee driehoekige vlakken verbinden steeds meer uit het vlak, tot uiteindelijk de gepaarde driehoekige vlakken bijna samenvallen en de brug haar meest compacte toestand bereikt. Tijdens de beweging ontstaan tengevolge van de wijzigende geometrie openingen tussen de gepaarde vlakken. Deze zijn maximaal bij een hoekverdraaiing van 45° . Vanaf die stand wordt het omgekeerde proces doorlopen, zij het met steeds meer uit het vlak komende ribben, zodat in gesloten toestand de openingen weer tot een minimum herleid zijn.



Figuur 4.3_Beweging van 1 module (Autocad)



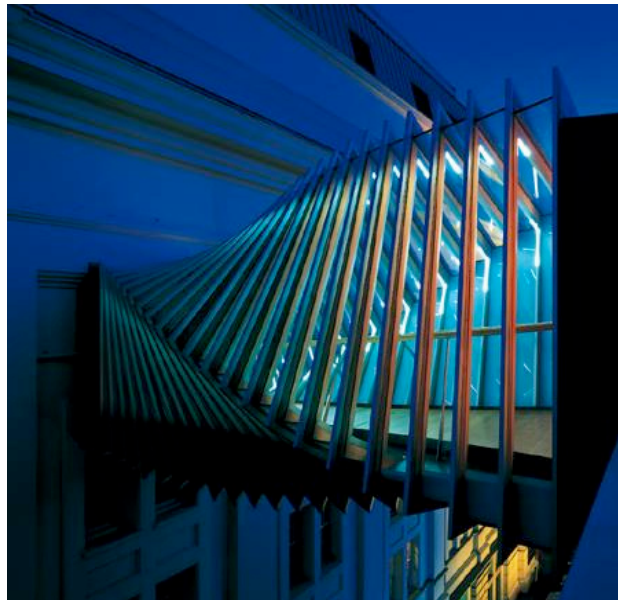
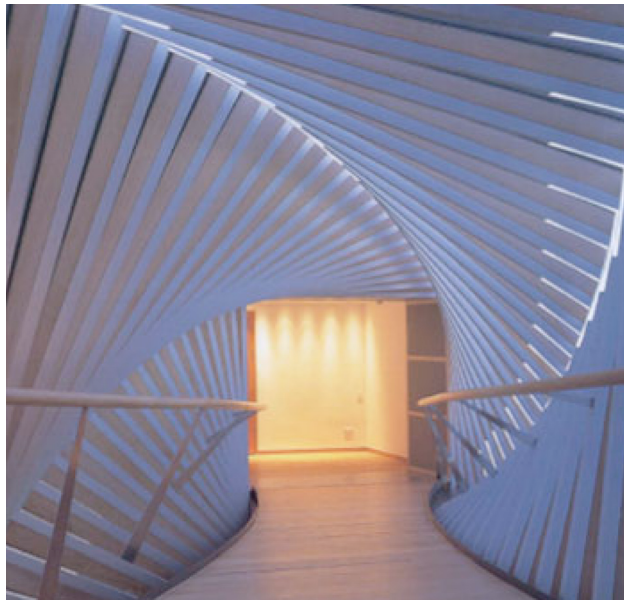
Figuur 4.2_Snapshots twistbeweging (SolidWorks)

Er valt op te merken dat deze 'twist'-beweging reeds eerder werd toegepast in de voetgangersbrug "Quai aux Fleurs" in Evry (Frankrijk) (figuur 4.4). De draagstructuur van die brug bestaat uit een bundel van vier ronde buizen, die de rotatie van een DNA-molecule beschrijven. In hun schroefbeweging vormen de buizen achtereenvolgens: de draagstructuur onder de staalbeplating (onderaan), de draagstructuur van het maasnetwerk (lateraal) en esthetische steunpunten waarin lichtarmaturen zijn verwerkt (bovenaan). Een gelijkaardig voorbeeld is "The Bridge of Aspiration" in Londen (figuur 4.5). Deze getordeerde voetgangersburg, hoog boven de straat, biedt de dansers van The Royal Ballet School een rechtstreekse toegang tot The Royal Opera House. Aangezien de openingen van beide gebouwen, zowel qua hoogte als zijdelings, niet recht tegenover elkaar liggen, stelden de ontwerpers van Wilkinson Eyre een elegante oplossing voor: 23 vierkante, houten frames omarmen de brug en worden op afstand gehouden door gelaagd glas. Elk volgend frame is met 4° gedraaid wat zowel binnen als buiten in een visuele dynamiek resulteert.

In plaats van een fysieke beweging wordt in bovenstaande toepassingen de notie van beweging gesuggereerd. Virtuele beweging en verandering worden uitgedrukt door gebruik te maken van technieken als vervorming, juxtapositie en repetitie. Hoewel beweging dus onrechtstreeks kan uitgedrukt worden, wordt in dit ontwerp een fysieke beweging beoogd om de doorgang van hetzij voetgangers, hetzij scheepvaart mogelijk te maken.



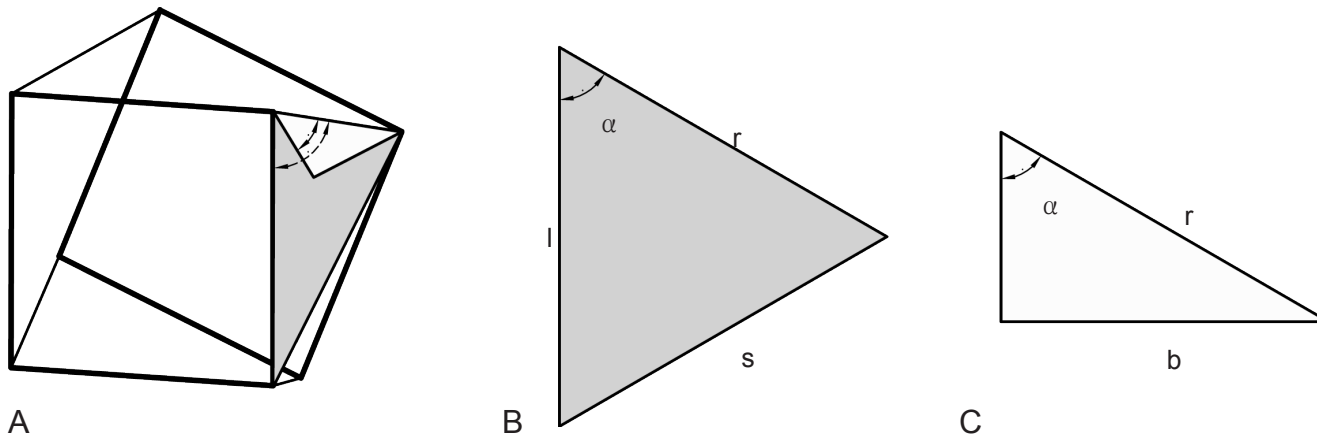
Figuur 4.4 Quai aux fleurs < DVVD
(Staal Acier, 16, september 2007, p. 61)



Figuur 4.5_ The Bridge of Aspiration < Wilkinson Eyre
(www.wilkinsonseyre.com)

4.1.2 MATHEMATISCH MODEL EN SIMULATIE

Om de rotatie- en verkortingsbeweging te analyseren wordt de afstand tussen twee diagonaal tegenover elkaar liggende hoekpunten als parameter ingevoerd. Door deze afstand te verkleinen ontstaat de hierboven beschreven beweging en transformeren de tussenliggende vierkanten tot een ruit. De enige parameter in de beweging is dus de afstand tussen twee tegenover elkaar liggende hoekpunten, aangeduid met de letter s , die vervolgens de hele geometrie vastlegt. Om deze geometrie te bepalen werd zowel de afstand tussen de middelpunten b als de hoekverdraaiing van 2 opeenvolgende vierkante kaders i berekend in functie van de parameter s . De lengte van de zijde van een vierkant wordt met de letter l aangeduid, de lengte van een verbindingstaaf met de letter r . Deze waarden zijn vrij te kiezen en worden als bekende parameters beschouwd.



Figuur 4.6_Afleiding mathematisch model: hoekverdraaiing tussen twee opeenvolgende vierkanten (Autocad)

Op basis van de cosinusregel kan uit figuur 4.6.B volgende formule afgeleid worden:

$$s^2 = r^2 + l^2 - 2 \cdot r \cdot l \cdot \cos(\alpha)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{r^2 + l^2 - s^2}{2 \cdot r \cdot l} \quad (1)$$

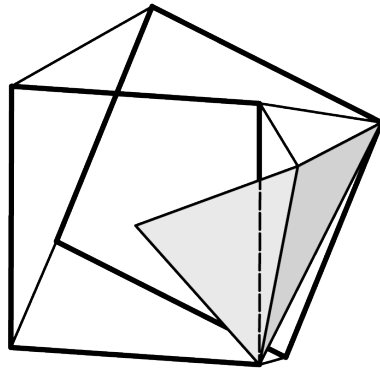
Door de goniometrische sinusfunctie op figuur 4.6.C toe te passen volgt:

$$b = r \cdot \sin(\alpha) \quad (2)$$

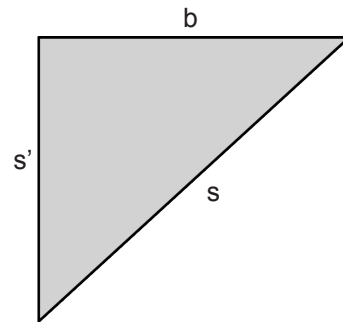
Met behulp van de grondformule van de goniometrie kan uit (1) en (2) de waarde van b afgeleid worden in functie van de parameter s:

$$b = r \cdot \sqrt{1 - \cos^2(\alpha)}$$

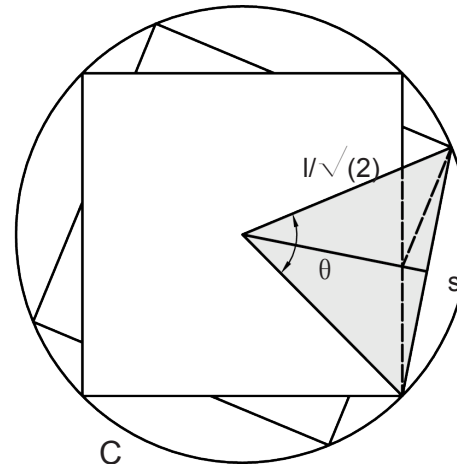
$$b = r \cdot \sqrt{1 - \frac{r^2 + l^2 - s^2}{2 \cdot r \cdot l}}$$



A



B



C

Figuur 4.7_Afleiding mathematisch model: hoekverdraaiing tussen twee opeenvolgende vierkanten (Autocad)

Vervolgens wordt de hoekverdraaiing θ uitgedrukt in functie van parameter s. In figuur 4.7.B wordt de onbekende s' gevonden door toepassing van de stelling van Pythagoras:

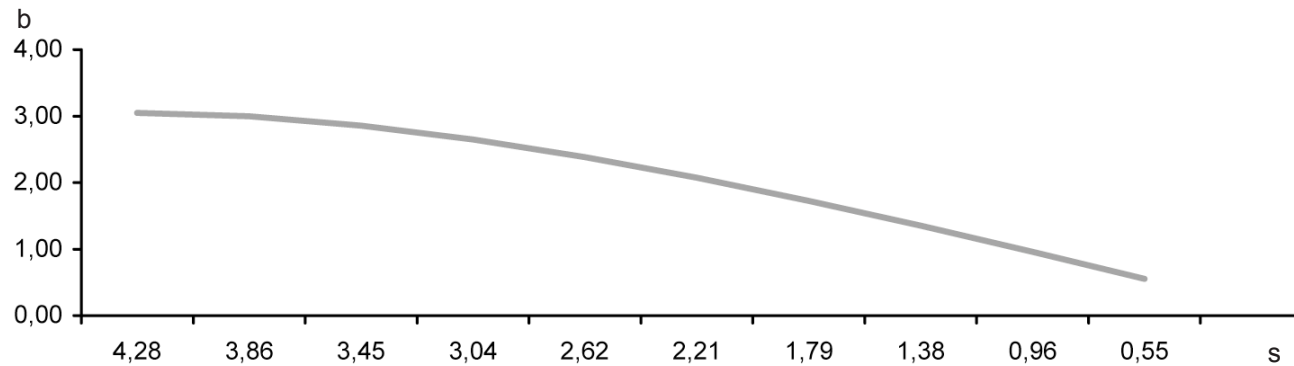
$$s'^2 = s^2 - b^2$$

Door tot slot de goniometrische sinusfunctie toe te passen op figuur 4.7.C, wordt de hoekverdraaiing (in functie van parameters s en b) bekomen:

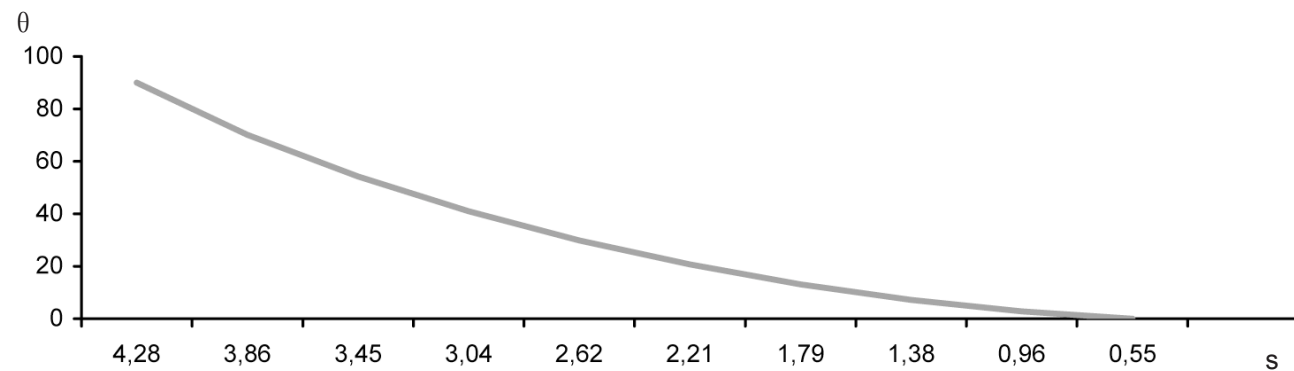
$$\sin(\vartheta/2) = \frac{s'}{2} \cdot \frac{\sqrt{2}}{l}$$

$$\sin(\vartheta/2) = \frac{\sqrt{s^2 - b^2}}{2} \cdot \frac{\sqrt{2}}{l}$$

$$\vartheta = 2 \cdot \text{Arcsin}\left(\frac{\sqrt{s^2 - b^2}}{2} \cdot \frac{\sqrt{2}}{l}\right)$$



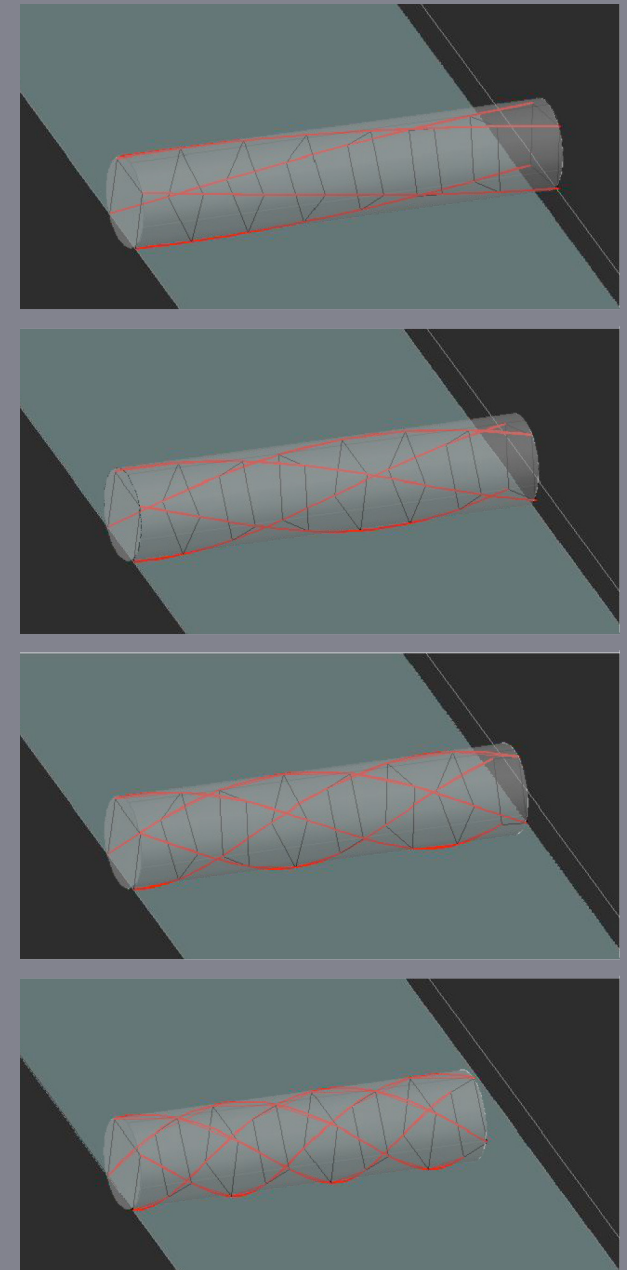
Figuur 4.8_Afstand tussen middelpunten van twee opeenvolgende vierkanten in functie van s (Excel)



Figuur 4.9_Hoekverdraaiing tussen twee opeenvolgende vierkanten in functie van s (Excel)

Met een lengte l van 3m en r van 3,05 m worden op basis van bovenstaande formules grafieken 4.8 en 4.9 bekomen. Hieruit blijkt dat er geen lineair, maar een sinusoidaal verband bestaat tussen de diagonaalafstand en de afstand tussen de middelpunten enerzijds en de hoekverdraaiing anderzijds, zoals eveneens uit de formules kon opgemaakt worden. Dit sinusoidaal verband is dan ook de verklaring voor het feit dat de brug in het begin een sterkere rotatie en verkorting kent dan op het einde.

Met behulp van de afgeleide formules kunnen verschillende standen van de brug uitgetekend worden in AutoCad (figuur 4.10). Uit de driedimensionale tekeningen volgt dat de hoekpunten van de vierkante kaders steeds zijn ingeschreven in een cilinder met als diameter de diagonaal van een vierkant. De hoogte van de cilinder is de afstand tussen de middelpunten van de buitenste vierkanten. Naarmate de beweging vordert, komen de vierkanten dichtere bij te liggen met een verkorting van de omgeschreven cilinder tot gevolg.



Figuur 4.10_Snapshots twistbeweging (Autocad)

Door de beweging nog meer in detail te analyseren kan aangetoond worden dat in elke stand de hoekpunten van de opeenvolgende kaders steeds op een helix zijn gelegen. Figuur 4.10 laat bovendien zien dat het aantal omwentelingen van elke helix toeneemt naarmate de lengte van de brug afneemt. Het is dus niet zo dat de hoekpunten tijdens hun beweging een helix beschrijven, maar in één bepaalde stand liggen de opeenvolgende hoekpunten wel op dezelfde helix.

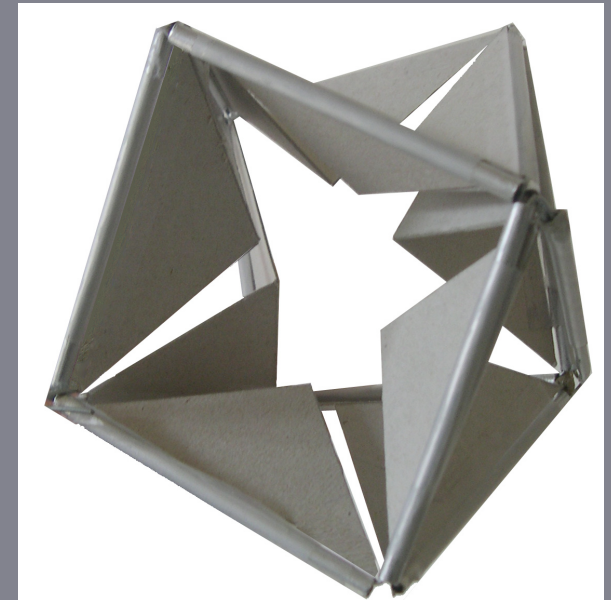
Eens het idee van de beweging was opgevat, werden prototypes gemaakt onder de vorm van eenvoudige werkmaquettes op schaal 1/50. Op die manier kon de beweging van beter bestudeerd worden en konden varianten afgeleid worden. Deze prototypes zijn voornamelijk nuttige instrumenten geweest om de beweging van elk onderdeel te begrijpen en de vorm van de vlakken af te leiden. (figuur 4.11)

Met behulp van SolidWorks kon een computersimulatie van de beweging van de brug gemaakt worden. Verschillende onderdelen werden in het model geïmporteerd waarna er relaties ('mates') aan werden toegekend. Hierdoor werd de bewegingsvrijheid van de verschillende onderdelen beperkt. Door vervolgens de diagonaalafstand te laten variëren van 4,28 tot 0,55 kon het hierboven beschreven, mathematisch, model getest worden. (figuur 4.12)

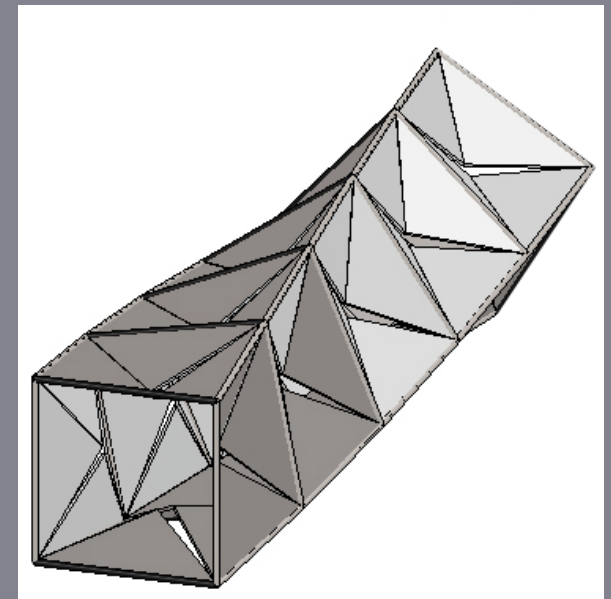
Op te merken valt dat deze simulaties slechts een geometrische benadering van de beweging inhouden. Er werd dus nog geen rekening gehouden met diktes van de materialen, de aanwezigheid van scharnieren,... Het model zal onder '4.2 Technisch aspect' meer in detail uitgewerkt worden.

4.1.3 STRUCTURELE ANALYSE

Uit de case study van de "Rolling Bridge" bleek SCIA Engineer de meest geschikte software voor het uitvoeren van de structurele analyse van een beweegbare brug. Aangezien ik mij het rekenpakket Robot Structural Analysis meer eigen gemaakt heb gedurende het onderzoek, zal SCIA Engineer enkel gebruikt worden voor het bepalen van de meest 'nadelige' toestand tijdens de beweging. De eigenlijke dimensionering van het ontwerp zal dus met Robot Structural Analysis uitgevoerd worden. De profielsectie en de staalkwaliteit van het frame moeten bepaald worden zodat ze volstaan voor alle mogelijke posities van de brug. In tegenstelling tot de studie van de "Rolling Bridge", zullen de situatie waarbij de brug op beide oevers rust en de toestand van beweging dus samen beschouwd worden.



Figuur 4.11_Simulatie twistbeweging (werkmaquette)



Figuur 4.12_Simulatie twistbeweging (SolidWorks)

Geometrie en randvoorwaarden

Geometrie

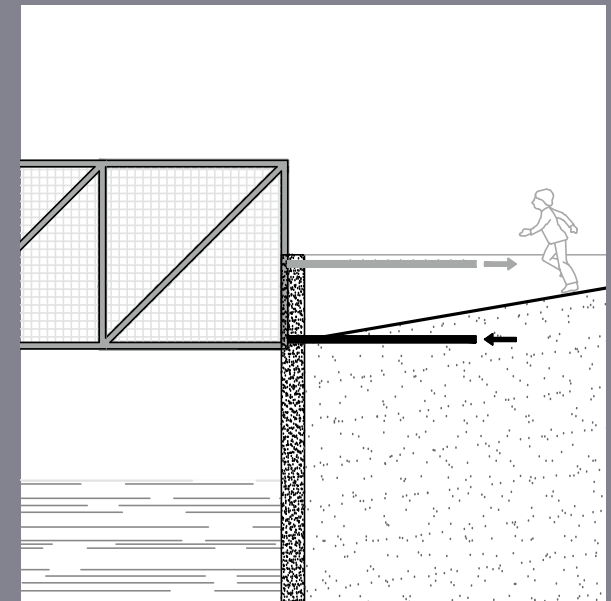
De geometrie van de brug is in principe een ruimtevakwerk, opgebouwd uit vijf segmenten, dat als een eenvoudig draadmodel in Robot Structural Analysis kon getekend worden. De vlakken werden er secundair aan toegevoegd als 'panels'. De belastingen die erop inwerken (eigengewicht en windbelasting) werden volgens de bissectricemethode naar de staven van het ruimtevakwerk overgebracht. Aan de hand van SCIA Engineer kon aangetoond worden dat de brug tijdens de beweging zich in haar meest nadelige positie bevindt bij een hoekverdraaiing $\theta = 0^\circ$ (zie figuur 4.13). Dit impliceert dat beide situaties kunnen bestudeerd worden op basis van hetzelfde geometrische model.

Materiaalkeuze en profieldoorsneden

Er zijn heel wat redenen (zie 4.2.1 Materiaalgebruik) om staal te verkiezen als materiaal voor het geraamte van de brug. Aangezien de vlakken bovendien rond de stalen staven moeten kunnen draaien, worden buizen met een ronde sectie aangewend. De meest courante afmetingen van ronde naadloze stalen buizen zijn in een tabel in

θ	u_{z_min} [mm]	σ_{-min} [MPa]	σ_{-max} [MPa]
0	-8	-33,8	34,1
10	-6,3	-30,1	30,2
20	-6	-26,4	26,5
30	-5,2	-22,8	23
40	-4,6	-19,5	19,8
50	-3,8	-17,8	17,4
60	-2,8	-16,2	15,9
70	-2	-13,7	13,5
80	-1,1	-9,9	10
90	-0,9	-7,7	7,6

Figuur 4.13_Resultaten 'Batch Optimizer' voor eigengewicht frame (SCIA Engineer)



Figuur 4.14_Voorstel verankering brug (Autocad)

bijlage 3 opgenomen. De keuze van de exacte profieldoorsnede, evenals de staalkwaliteit, zal uit de optimalisatie volgen.

Staafterbindingen

Om de staafterbindingen nader te specificeren is het noodzakelijk om de vrijheidsgraden af te leiden. Het basisidee van het ontwerp berust op het feit dat de staven, die de vierkanten uitmaken, star verbonden zijn met elkaar en dus over geen vrijheidsgraden beschikken. Om de vrijheidsgraden van de andere staven te bepalen wordt een grafische analyse gedaan (zie 4.2.2 Mechanische componenten). Aan de hand hiervan kan dus geïllustreerd worden dat per staafteruiteinde twee vrijheidsgraden (Ry-Rz) noodzakelijk zijn om de beweging van de module toe te laten.

Steunpunten

Om de brug te verankeren ter hoogte van het landhoofd én rotatie van alle segmenten toe te laten, wordt het brugdek een aantal meter onder het maaiveld gepositioneerd. Op die manier kan de brug met behulp van een druk- en trekstang in de grond verankerd worden zonder dat er storende elementen zoals kabels zichtbaar aanwezig zijn. Om de toegang tot de brug mogelijk te maken wordt een helling of luie trap geïntroduceerd, zoals op figuur 4.14 is aangegeven. Aangezien die verankering het enige steunpunt is tijdens de beweging zal ze een belangrijke invloed hebben op de doorbuiging en de spanningen die de brug in die toestand zal ondervinden.

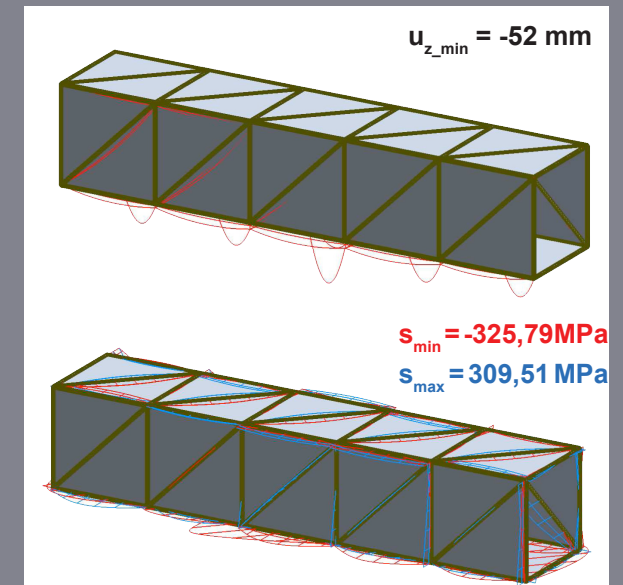
Lasten

De belastingen die inwerken op een voetgangersbrug werden aan de hand van de “Rolling Bridge” reeds bestudeerd. De tabel in bijlage 4 geeft nog een kort overzicht van de inwerkende belastingen. Wanneer de brug in uitkragende toestand wordt beschouwd, moeten enkel het eigengewicht (frame + vlakken) en de windbelasting in rekening worden gebracht.

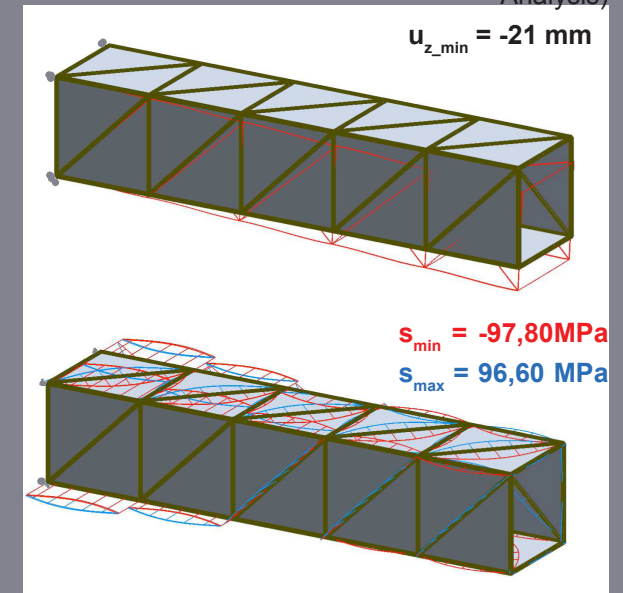
Optimalisatie

De staalkwaliteit en de profielsecties worden gekozen zodanig dat de doorbuiging beperkt blijft tot $l/250$ (brug op twee steunpunten) of $l/150$ (brug in uitkraging) en de spanningen kleiner blijven dan de vloeigrens.

In bijlage 6 wordt een overzicht gegeven van de maximale doorbuiging voor verschillende verankeringshoogten. Hieruit kan opgemaakt worden dat in de meeste gevallen de uitkragende toestand maatgevend is voor de keuze



Figuur 4.15_Brug op twee steunpunten: doorbuiging en spanningen (Robot Structural Analysis)



Figuur 4.16_Brug in uitkraging: doorbuiging en spanningen (Robot Structural Analysis)

van de profielsecties. Dit zou betekenen dat een profiel met vrij grote diameter moet gekozen worden dat slechts maximaal benut wordt in één (tijdelijke) toestand. Het lijkt dus economischer (en esthetischer) om het eerste vierkante kader volledig te verankeren aan de kade (verankeringshoogte=3 m) zodat de benodigde profielsecties ongeveer gelijk zijn voor beide toestanden.

Er zal dus gebruik gemaakt worden van ronde profielen met een sectie van 127 x 12,5 (zie bijlage 3). De doorbuigingen en spanningen die hierbij ontstaan worden in figuur 4.15 en 4.16 weergegeven. Om de optredende spanningen op te vangen zullen de profielen vervaardigd worden met een staalkwaliteit S355.

4.2 TECHNISCH ASPECT

Terwijl het architecturaal aspect beperkt bleef tot een geometrische benadering van de beweging van de voetgangersbrug, wordt in dit deel verder ingegaan op de technische componenten van het ontwerp. Hoewel mijn kennis hieromtrent beperkt is, heb ik toch getracht om aan de hand van productdocumentatie, informatie van bedrijven,... het ontwerp verder te detailleren.

In eerste instantie speelt de materiaalkeuze een belangrijke rol bij het ontwerp van kinetische structuren. Zeker voor wat beweegbare bruggen betreft, is het gebruik van lichte materialen aangewezen: “most decks are of lightweight material in order to save the demands on the motor and the counterweight”.¹⁸ Daarenboven is het van belang om op zoek te gaan naar een aandrijfsysteem. Onder ‘4.1 Architecturaal aspect’ werd immers een mechanisme ontworpen waarbij de geometrie wordt vastgelegd door één variabele parameter. In dit deel zal daarom op zoek gegaan worden naar een aandrijfsysteem dat de rol van die parameter vervult. De mogelijkheid tot bewegen hangt niet enkel af van de materiaalkeuze en het aandrijfmechanisme: er is ook nood aan mechanische verbindingen die over de vereiste vrijheidsgraden beschikken. In zijn ‘Doctoral thesis’ wees Korkmaz er echter op dat ervaring hierin een belangrijke rol speelt: “There is no method to find the best solution. This is an ability, which can be developed only after designing linkages for many years.”¹⁹

4.2.1 MATERIAALGEBRUIK

De globale doelstelling van kinetische structuren is het creëren van flexibele architectuur door de beweging van het geheel of een deel ervan. Om die beweging mogelijk te maken, is het van belang om te opteren voor lichte materialen. Toch dient rekening gehouden te worden met het feit dat het om een constructie gaat die zwaar belast kan worden. Het materiaal moet dus tevens in staat zijn om een behoorlijke belasting te dragen.

FRAME

Omwille van bovenstaande redenen werd ervoor gekozen om staal toe te passen als constructiemateriaal voor de brug. Het gebruik van staal resulteert niet alleen in een lichte, maar ook in een sterke structuur en laat door

¹⁸ Baus & Schlaich, “Footbridges”, Birkhäuser, Basel, 2007, p 194

¹⁹ Korkmaz Koray, “An Analytical Study of the Design Potentials in Kinetic Architecture”, PhD Thesis, Izmir Institute of Technology, Turkey, 2004, p. 62

haar mogelijkheid tot prefabricatie ook een snelle constructie toe. Bovendien is staal recycleerbaar waardoor het tegemoet komt aan het belang dat vandaag de dag gehecht wordt aan duurzame ontwikkeling.

Aangezien het staal in de omgeving van water gebruikt wordt, zal de corrosiesnelheid sterk toenemen door de hoge vochtigheidsgraad. Om de schade door corrosie te beperken dient het staal aan een oppervlaktebehandeling onderworpen te worden. Die behandeling omvat zowel een oppervlaktevoorbereiding als een corrosiebescherming. Bij nieuwbouw projecten wordt quasi uitsluitend gebruik gemaakt van zogenaamde 'straalbewerkingen' (gritstralen, staalstralen, zandstralen, shotstralen, ...). Zulke oppervlaktevoorbereiding heeft naast een reinigende werking ook nog een secundair, doch niet minder belangrijk effect, nl. het verlenen van ruwheid aan het te behandelen oppervlak. De ruwheid verhoogt immers sterk de relatieve hechtoppervlakte, waardoor de aanhechting van de coating aan het staal sterk verbeterd kan worden. De tweede fase van de oppervlaktebehandeling, de corrosiebescherming, is gebaseerd op het elimineren van minstens één van de 4 noodzakelijke elementen die de basis vormen van het corrosieproces, nl. anode, kathode, metallische geleider of elektrolytoplossing.

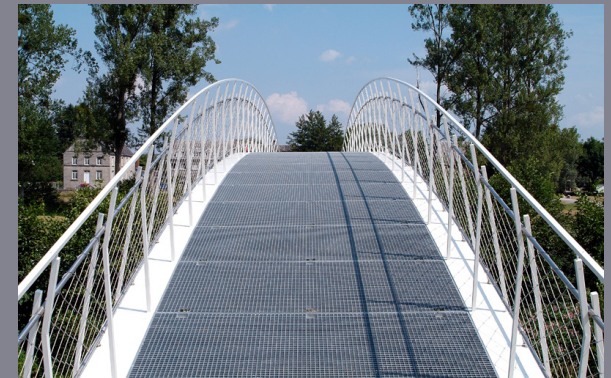
VLAKKEN

Zoals reeds vermeld, worden driehoekige vlakken geïntroduceerd om de stijfheid van de brug te vergroten. Tevens vormen zij het brugdek en een balustrade. In open toestand wordt de brug als het ware getransformeerd tot een gesloten koker. Om natuurlijke lichtinval in dit volume toe te laten, dienen de vlakken transparant te zijn of vervaardigd te zijn uit een materiaal met een open structuur.

Aangezien die vlakken het brugdek vormen moeten zij in staat zijn om een grote belasting te dragen. Het enige transparante, gesloten materiaal dat hiervoor mijn inziens in aanmerking komt is glas. Het gebruik van glas biedt de gebruikers van de brug bescherming tegen regen en wind. Dit vereist echter dat alle spleten en kieren volledig water- en luchtdicht gemaakt worden met behulp van rubbers, waardoor de detaillering zeer complex wordt. Bovendien vergt het gebruik van glas een regelmatige reiniging. Het is dus eerder aangewezen om de vlakken te vervaardigen uit een materiaal met een open structuur. Stalen roosters werden reeds veelvuldig toegepast bij voetgangersbruggen (figuur 4.17 tot 4.19) en kunnen ook in dit ontwerp aangewend worden. Ze zijn bovendien lichter dan glas waardoor de stalen profielen van het geraamte slanker kunnen uitgevoerd worden. De open structuur zorgt voor een fysiek contact met de buitenomgeving. Dit heeft als nadeel dat de voetgangers niet beschermd zijn tegen weer en wind maar de detaillering wordt op die manier wel eenvoudiger.



Figuur 4.17 Promenade langs boomtoppen - Arcadus (Staal_Acier 17, december 2007, p.38)



Figuur 4.18 Passerelle over de Ourthe te Hotton < Ney & Partners (www.ney.be)



Figuur 4.19 Voetgangersbrug Bois du Cazier < Atelier d'architecture Dore & Sobczak (Staal_Acier 13, december 2006, p. 206)

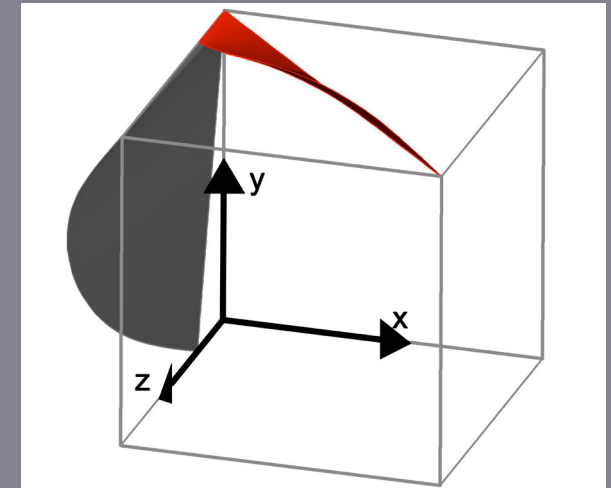
4.2.2 AANDRIJFSYSTEEM

In de simulaties werd de beweging veroorzaakt door de lengte van de diagonaalafstand te reduceren. Het is dus de bedoeling om na te gaan welke aandrijfmechanismen, rechtstreeks of onrechtstreeks, een invloed hebben op die afstand en aldus de beweging tot stand brengen. In wat volgt worden vier mogelijke aandrijfsystemen besproken en geïllustreerd met technische tekeningen en snapshots. Er werd gekozen om slechts twee van de vier zijvlakken te voorzien van een aandrijfsysteem; instabiliteit wordt voorkomen door de aanwezigheid van vlakken, die echter niet op de figuur zijn weergegeven. De technische uitrusting die noodzakelijk is kan in een kelder in de kade geplaatst worden.

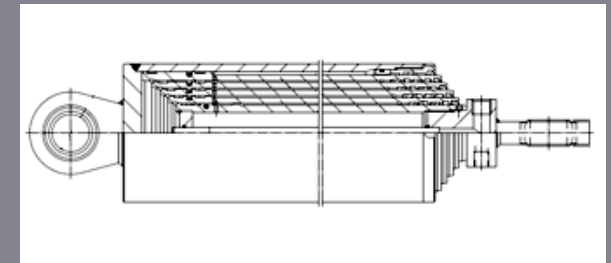
1. 5-delige telescopische cilinder

In een eerste systeem wordt de diagonaalafstand gereduceerd door middel van een 5-delige telescopische cilinder (figuur 4.20: rood). Dit impliceert dat er beperkingen worden opgelegd aan de meest compacte vorm van de module: de vierkante kaders zullen zich steeds op minstens 1/5 van de diagonaalafstand uit elkaar bevinden. In geopende toestand is de telescopische cilinder volledig uitgeschoven, waardoor het aandrijfsysteem zichtbaar aanwezig is. (figuur 4.22)

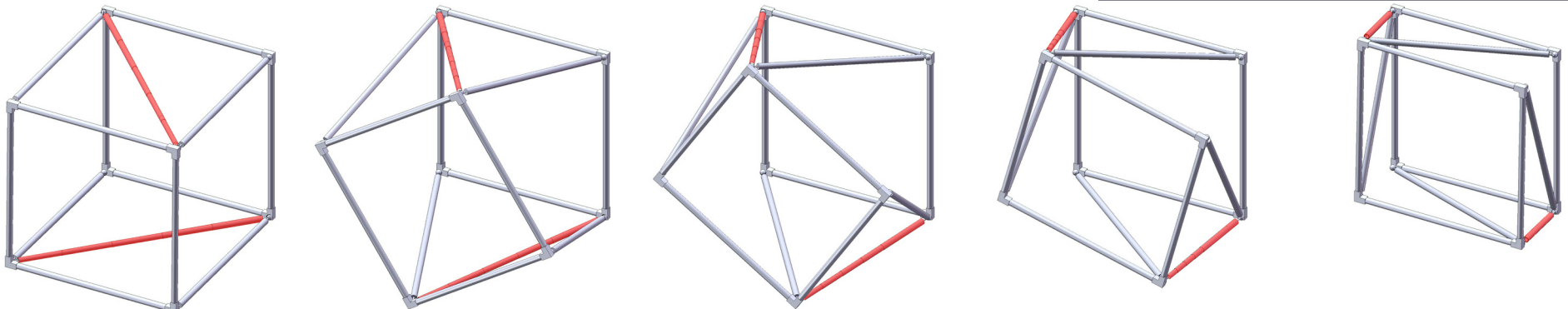
Aangezien lucht het nadeel heeft samendrukbaar te zijn, lijkt het mij meest aangewezen om te kiezen voor een hydraulische aandrijving. Voor toepassingen van die techniek kan verwezen worden naar kiepwagens, kranen,...



Figuur 4.20_Schema aandrijving met 5-delige telescopische cilinder (Autocad)



Figuur 4.21_Voorbeeld 5-delige telescopische cilinder (www.modenflex.com)



Figuur 4.22_Module met 5-delige telescopische cilinder (SolidWorks)

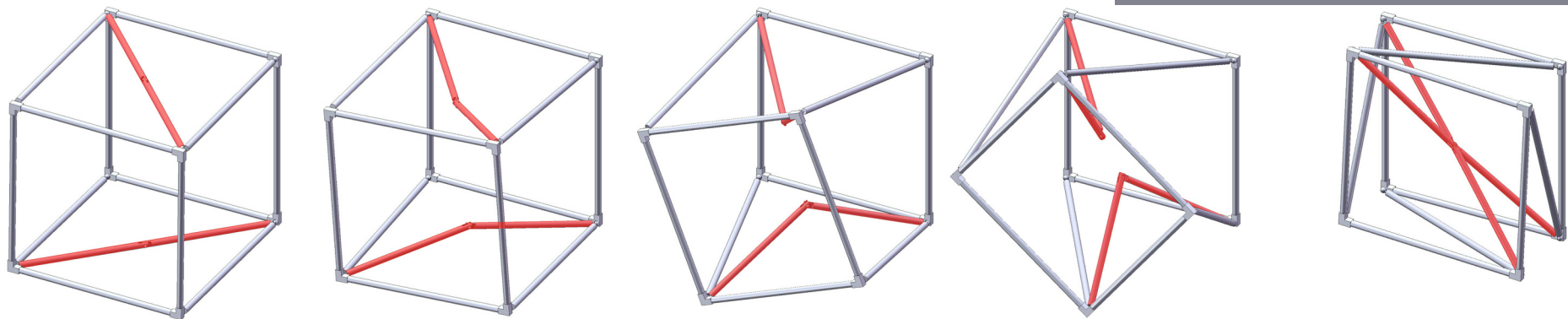
De technische brochures hieromtrent tonen aan dat hydraulische telescopische cilinders kunnen weerstaan aan een belasting van 50 ton en meer ²⁰, wat zou volstaan binnen de toepassing van deze brug (de maximale kracht in de diagonaalstaaf bedraagt immers 265,64 kN). Er dient echter opgemerkt te worden dat de hydraulische telescopische cilinders in bovenstaande voorbeelden hoofdzakelijk op druk belast worden, in tegenstelling tot de belastingstoestand in het voorgestelde ontwerp waar ze zowel aan druk als trek onderworpen worden.

De toevoerleidingen zouden via het holle vierkant kader en de verbindingstaven de telescopische cilinders kunnen bereiken. Om rekening te houden met de beweging van de staven is het aangewezen enige speling te voorzien ter hoogte van de hoekpunten. Hoewel het uitgebreide leidingnet het systeem vrij complex en duur maakt, biedt hydraulica het grote voordeel dat verschillende cilinders met een constante snelheid kunnen aangedreven worden, ongeacht de belasting waaraan ze onderworpen zijn.

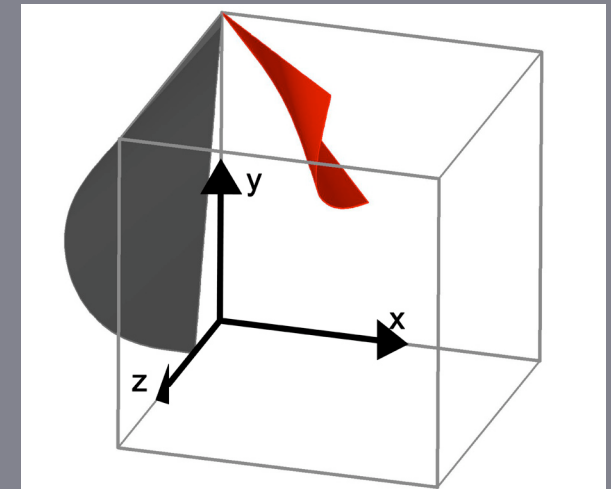
2. Schaarsysteem

In dit systeem bestaat de diagonaalstaaf uit twee scharnierende delen die in open positie een hoek van 180° vormen. Door de hoek tussen beide staven te verkleinen, worden de verbonden hoekpunten dichterbij elkaar gebracht. Door de staven naar binnen te laten bewegen vormen zij geen storend element aangezien ze de positie van de vlakken volgen. (figuur 4.25)

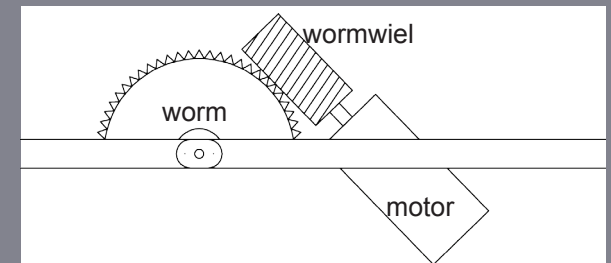
20 www.hyva.com



Figuur 4.25_Module met schaarsysteem (SolidWorks)



Figuur 4.23_Schema aandrijving met schaarsysteem (Autocad)



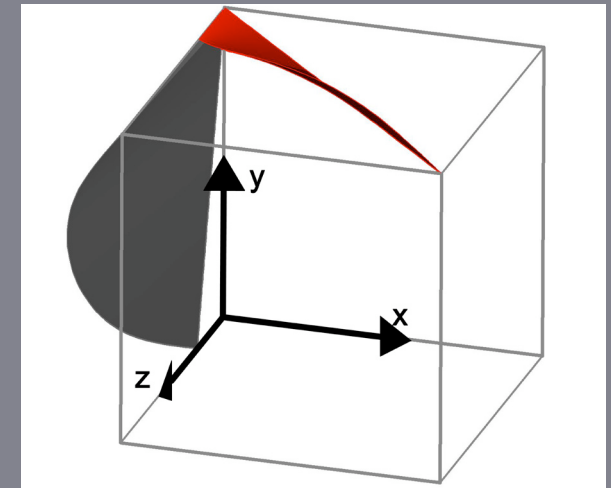
Figuur 4.24_Voorbeeld worm en wormwiel (Autocad)

Om de grootte van de hoek te laten variëren zou gebruik kunnen gemaakt worden van een worm met wormwiel (figuur 4.24). Dit mechanisch principe bestaat uit een tandwielsector die bevestigd is op één van beide scharnierende staven en een motor met wormwiel, bevestigd aan het andere scharnierende deel. Het wormwiel, aangedreven door de elektromotor, beweegt over de tanden van de worm waardoor beide scharnierende staven dicht bij elkaar worden gebracht en de hoek ertussen kleiner wordt. De aandrijving door middel van afzonderlijke elektromotoren heeft als nadeel dat de continue aandrijving van de verschillende tandwielen minder gegarandeerd is dan bij een hydraulisch systeem. Bovendien kunnen de motoren vrij moeilijk in het geheel opgenomen worden waardoor ze in alle posities zichtbaar aanwezig zullen zijn.

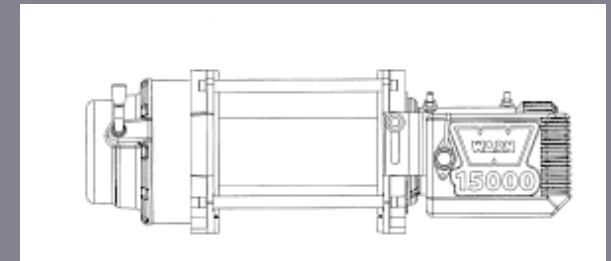
3. Kabelsysteem

In een derde systeem worden twee diagonaal tegenover elkaar liggende hoekpunten naar elkaar toe getrokken door middel van een kabel. Aangezien een kabel in staat is om de torsie, die het tijdens de beweging ondervindt, op te nemen, kan de bevestiging aan het vierkant kader eenvoudiger uitgevoerd worden. Om de stabiliteit te garanderen wordt gerekend op de stijfheid van de vlakken. (figuur 4.28)

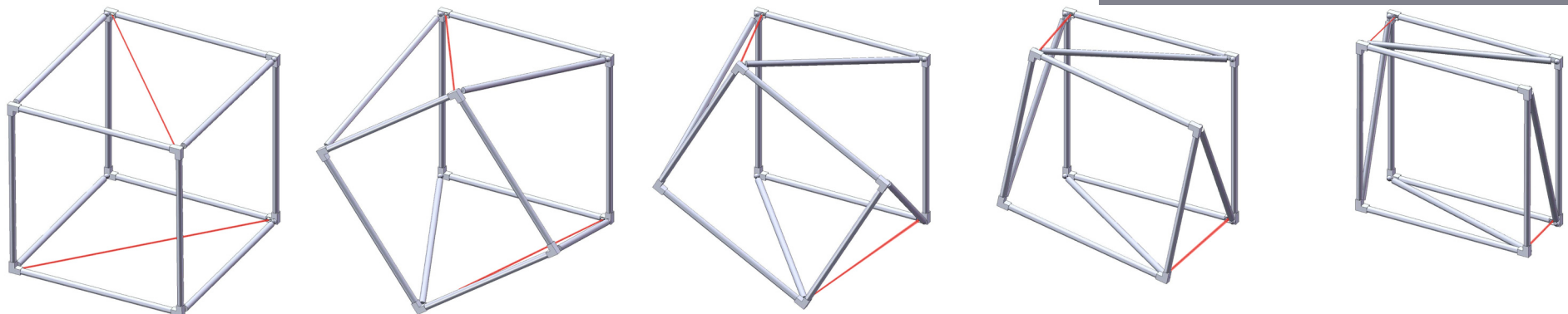
De diagonaalafstand kan enerzijds gereduceerd worden door gebruik te maken van een winchsysteem (zie figuur 4.27) waarbij de kabel op gemotoriseerde wijze rond een spoel wordt gewonden die in het kader ingewerkt is. Omwille van bovengenoemde voordelen zou anderzijds voor een hydraulische aandrijving kunnen gekozen worden. Hierbij is het kabeluiteinde verbonden aan een hydraulische cilinder die zich in het vierkante kader bevindt.



Figuur 4.26_Schema aandrijving met kabelsysteem (Autocad)



Figuur 4.27_Voorbeeld winchsysteem (www.winchbuyerguide.com)



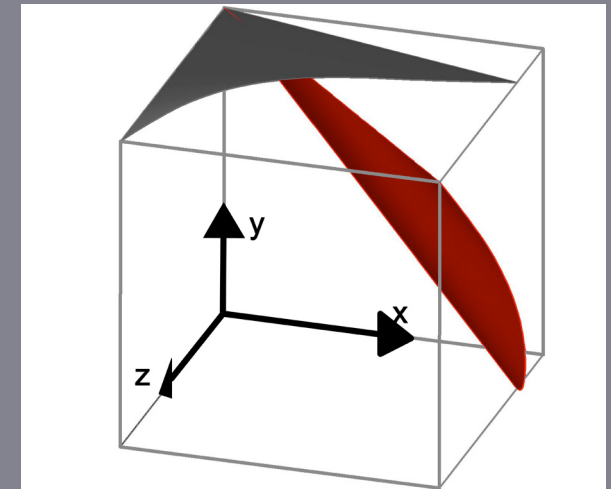
Figuur 4.28_Module met kabelsysteem (SolidWorks)

Aangezien een kabel geen druk kan uitoefenen, is er geen zekerheid dat bij verlenging de diagonaalafstand toeneemt. Vandaar dat ter hoogte van de ribben van twee 'gepaarde' roosters scharnieren kunnen geplaatst worden die door een veersysteem de neiging hebben om de roosters onder een hoek van 180° te brengen. In vergelijking met voorgaande aandrijfsystemen moet er dus gebruik gemaakt worden van een bijkomend element om de beweging te garanderen.

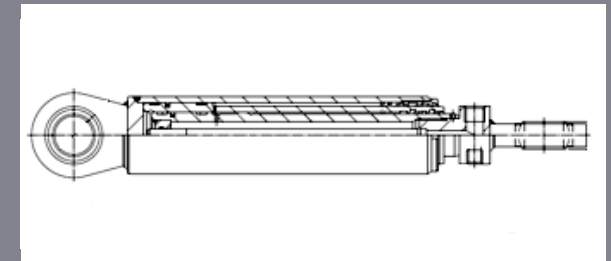
4. 2-delige cilinder

Bij een vierde systeem wordt de diagonaalafstand onrechtstreeks gereduceerd door de andere diagonaal. Tijdens de beweging transformeren de zijvlakken namelijk tot een ruit waarbij één diagonaal verkort en de andere diagonaal aanvankelijk verlengt om vervolgens terug te verkorten tot haar oorspronkelijke lengte. De maximale lengte van deze laatste wordt bereikt bij een hoekverdraaiing van 45° en dient daarna gereduceerd te worden. Dit kan echter leiden tot het openen óf sluiten van het volume. Naast een 2-delige hydraulische cilinder om de lengteverandering op te nemen, zal dus een extra mechanisme noodzakelijk zijn om de beweging in de ene dan wel in de andere richting te laten gebeuren. Net als in voorgaand systeem wordt ook hier de dynamiek dus bekomen door een combinatie van twee systemen.

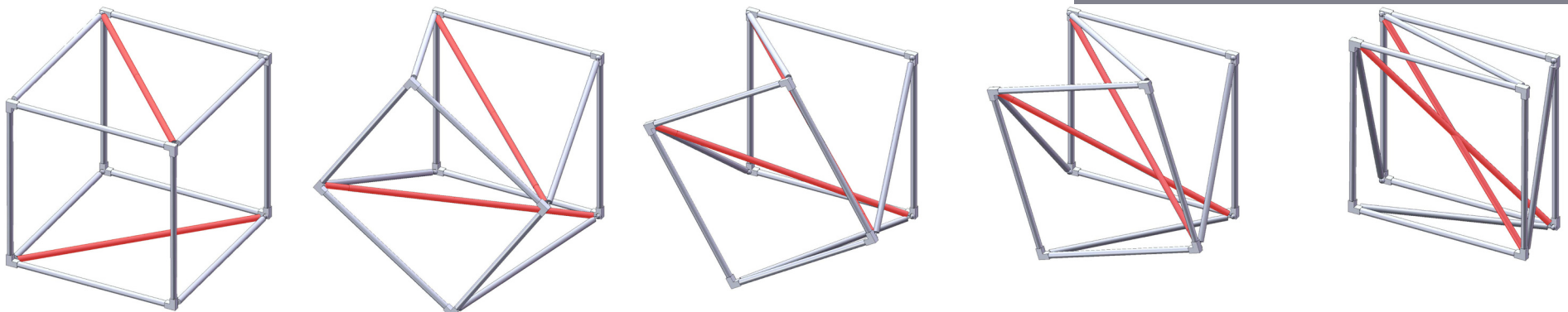
Op esthetisch vlak biedt dit systeem als voordeel dat de hydraulische cilinders in gesloten en in open toestand volledig zijn ingeschoven waardoor het aandrijfmechanisme pas zichtbaar wordt wanneer de brug in beweging komt. Bovendien valt nog op te merken dat de diagonaalstaven naar binnen bewegen en in gesloten toestand nog nauwelijks aanwezig zijn. Het voorgaande impliceert wel dat de staven in conflict kunnen komen met elkaar en met de verbindingstaven. (figuur 4.31)



Figuur 4.29_Schema aandrijving met 2-delige cilinder (Autocad)



Figuur 4.30_Voorbeeld 2-delige telescopische cilinder (www.modenflex.com)

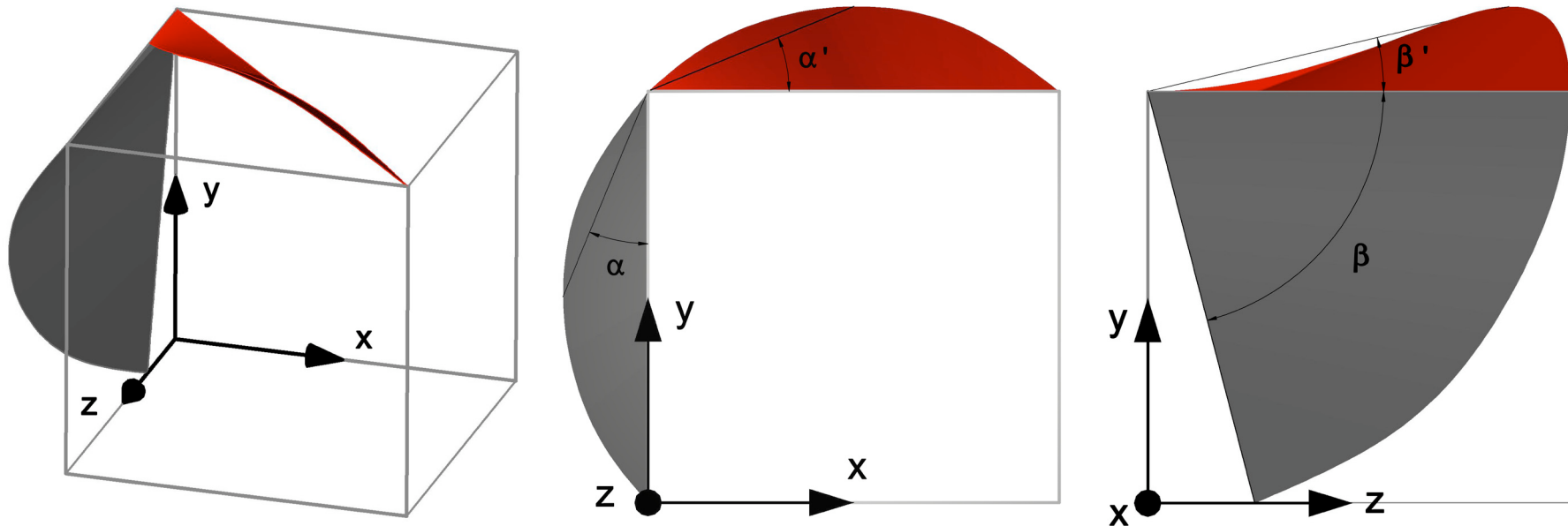


Figuur 4.31_Module met 2-delige cilinder (SolidWorks)

4.2.2 MECHANISCHE COMPONENTEN

VERBINDING STAAF_VIERKANT

Indien de beweging wordt ingezet, blijven de hoekpunten van twee opeenvolgende vierkanten verbonden door verbindingstaven. Om die staven te bevestigen aan de vierkanten volstaan gewone scharnieren niet. Om de geschikte mechanische componenten in de hoekpunten te selecteren moeten de noodzakelijke vrijheidsgraden van de staven, die aan die componenten bevestigd worden, gekend zijn. Een grafische analyse (figuur 4.32) kan hier meer duidelijkheid scheppen. Tijdens de beweging beschrijft de verbindingstaf een vaste baan die op de figuur in het grijs is weergegeven. Het vooraanzicht illustreert de relatieve rotatie α van de verbindingstaf ten opzichte van haar oorspronkelijke positie. Uit het bovenaanzicht blijkt dat er eveneens een relatieve rotatie β bestaat. Hetzelfde zou kunnen aangetoond worden voor het andere staafuiteinde. Aan de hand van voorgaande grafische analyse kan dus vastgesteld worden dat per staafuiteinde twee vrijheidsgraden (R_y - R_z) noodzakelijk zijn om de beweging van de module toe te laten. In wat volgt worden twee mechanische verbindingen, die mogelijk over die vereiste vrijheidsgraden beschikken, meer in detail bekeken.

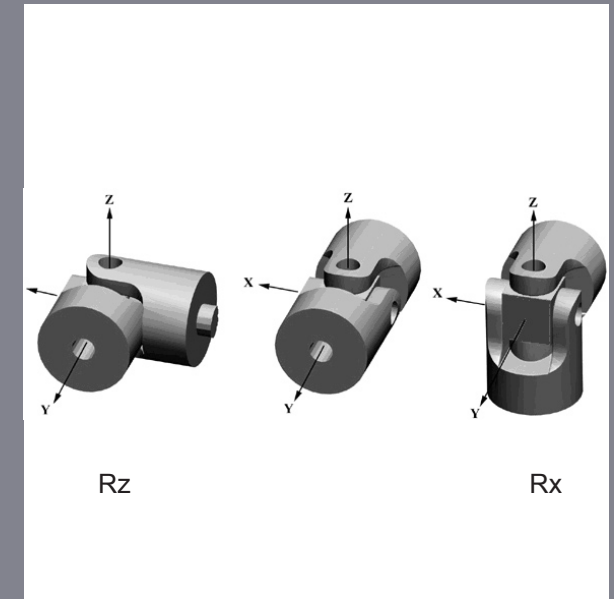


Figuur 4.32_Grafische analyse
(Autocad)

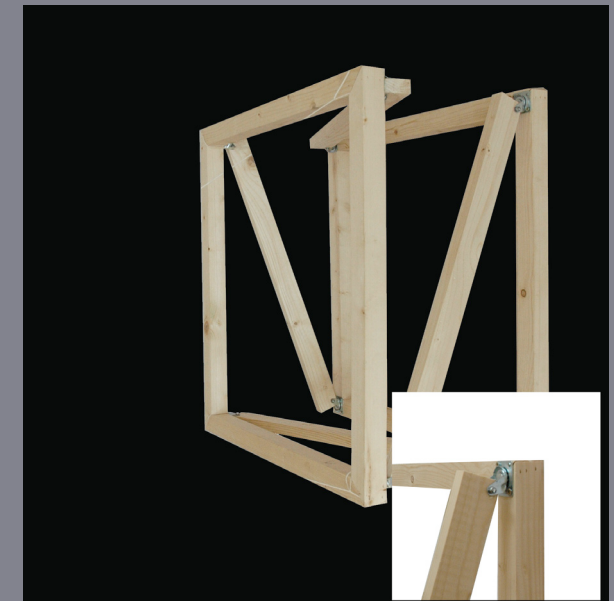
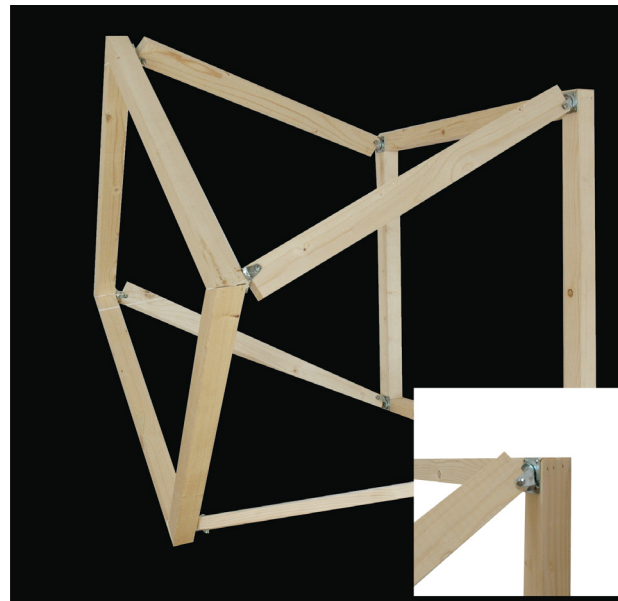
a. Cardanische koppeling

Deze scharnierende verbinding, genoemd naar de renaissancewetenschapper Girolamo Cardano, kan koppels overbrengen van assen die niet in elkaars verlengde liggen. De cardanverbinding heeft twee vrijheidsgraden: er worden relatieve rotaties toegelaten rond de x-as en z-as (figuur 4.33). Een simulatie in SolidWorks toonde echter aan dat een toepassing van de cardan hier niet volstaat: de aanwezigheid van een cardanscharnier aan beide uiteinden van de staven is niet verzoenbaar met de torsie die de staven tijdens de beweging ondervinden.

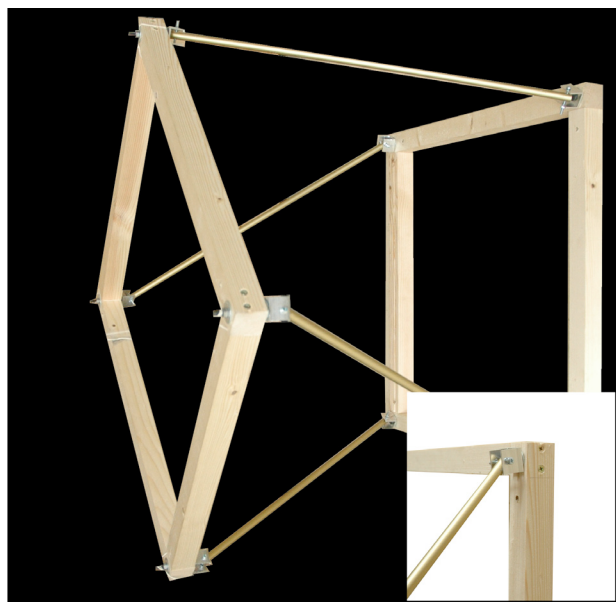
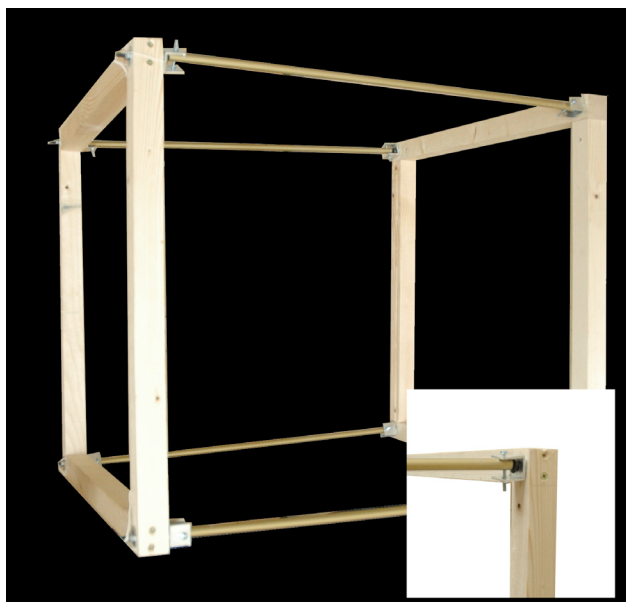
Een variant van het cardanscharnier werd in maquette uitgevoerd door gebruik te maken van wieltjes. Die wieltjes draaien, net als de cardan, rond 2 assen, maar bij een wiel staat één van de assen loodrecht op het bevestigingsoppervlak, m.n. het vierkante kader. De rotatie rond die as gebeurt door kogels in een lagersysteem. Het probleem bij de hierboven beschreven toepassing is echter dat de tweede as, nl. de spil waarop het staafuiteinde gemonteerd wordt, excentrisch staat ten opzichte van de andere as. (figuur 4.34) Daarom werd een alternatief systeem uitgewerkt waarbij een U-vormig element met een bout op het vierkant kader bevestigd wordt. Door gebruik te maken van ringen, die dienst doen als afstandshouder, wordt de wrijving verminderd waardoor



Figuur 4.33_Cardanscharnier
(Korkmaz 2004)



Figuur 4.34_Maquette met variante
cardanscharnier versie 1



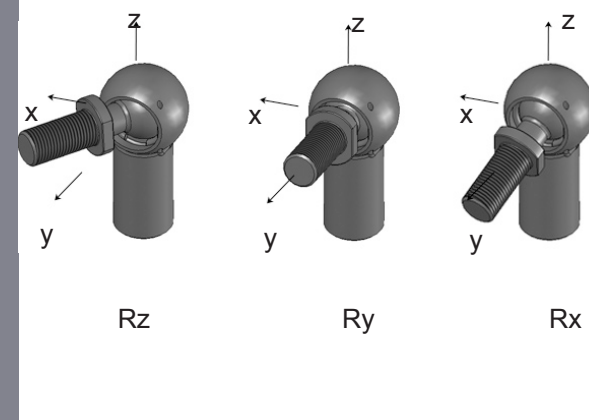
Figuur 4.35_Maquette met variante cardanscharnier versie 2

bijgevolg rotatie rond de as van de bout mogelijk wordt. In het U-vormig element wordt vervolgens een tweede bout geplaatst waarrond het staafuiteinde kan draaien. (figuur 4.35)

2. Bolscharnier

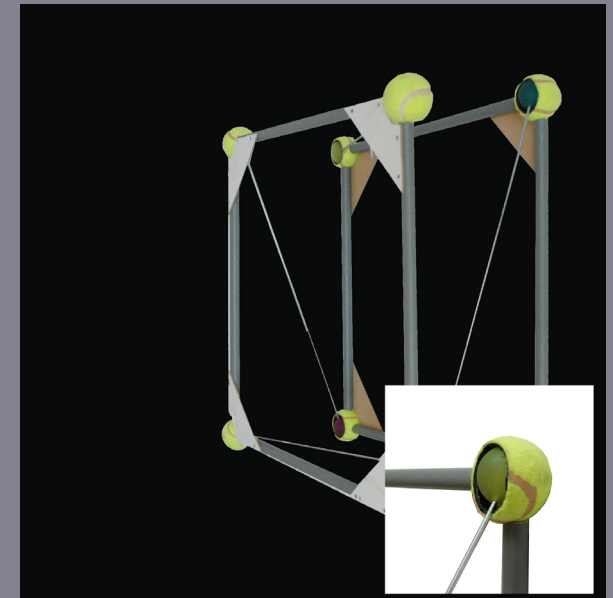
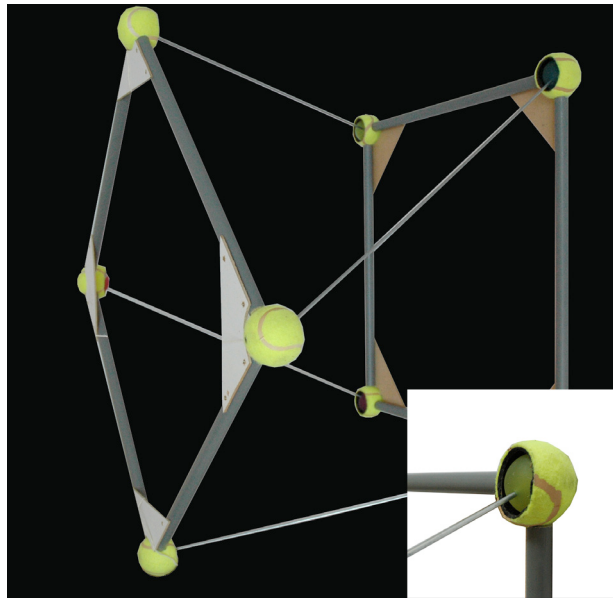
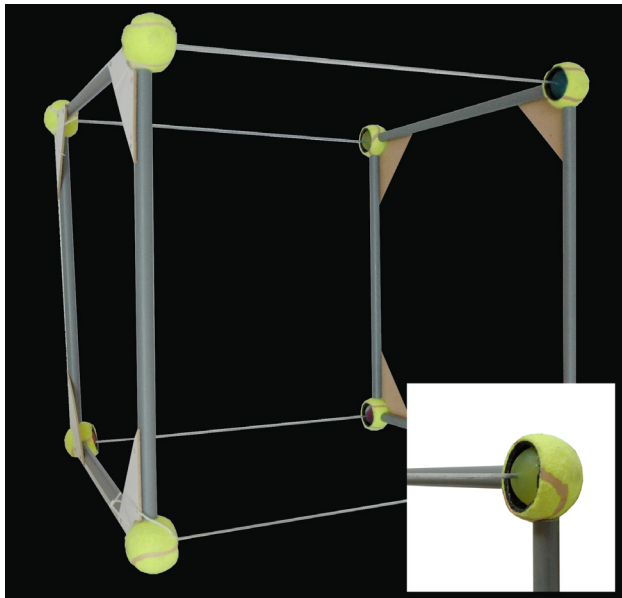
Dit scharnier, ook wel kogelgewricht genoemd, is een verbinding tussen twee constructie-elementen die rotaties in drie dimensies toelaat (figuur 4.36) Die verbinding bestaat uit een bolvormige kom waarin een kogel vrij kan ronddraaien. De kogel zorgt ervoor dat de staaf zowel naar voren, naar achteren, alsook naar opzij kan bewegen. Bovendien kunnen kogelgewrichten krachten opnemen in alle richtingen, wat hen geschikt maakt voor deze toepassing.

Aan de hand van het '4.1.2 Mathematisch model' kan bepaald worden dat elke verbindingssstaaf maximaal een hoek α van $11,75^\circ$ en β van 80° moet kunnen draaien. De standaardkogelscharnieren, waarbij in elke richting een hoekverdraaiing van 18° ²¹ mogelijk is, volstaan dus niet voor deze toepassing. Vandaar dat op zoek gegaan werd naar een aangepaste uitvoering van het kogelscharnier, om op die manier de gewenste rotaties te realiseren.



Figuur 4.36_Kogelscharnier (SolidWorks)

21 *The big green book*, Norelem, Duitsland, 2006, p. 610



Figuur 4.37_Maquette met kogelscharnier versie 1

In maquette werd het kogelscharnier uitgevoerd met behulp van twee ballen van verschillende diameter (figuur 4.37). Een opengesneden tennisbal doet dienst als bolvormige kom waarin een bal met een iets kleinere diameter, de kogel, wordt geplaatst. Het uiteinde van de staven wordt bevestigd aan de kogel die met behulp van smeermiddel vrij kan ronddraaien in de kom. Met de 3D-printer kon een kogelscharnier worden vervaardigd op maat van het ontwerp: de uitsparing in de kom is aangepast aan de beweging van de staven (figuur 4.38). Hierdoor worden de vereiste rotaties mogelijk terwijl de kom de kogel toch voldoende blijft 'omarmen' om de krachten over te brengen.

In de Maeslantkering werden, met een kogeldiameter van 10 meter, de grootste kogelgewrichten ter wereld toegepast. “ De beide bolscharnieren moeten ervoor zorgen dat de deuren in alle richtingen kunnen bewegen, zowel horizontaal (bij het uitvaren) als verticaal (bij het afzinken). Daarnaast moeten de deuren bij het sluiten en openen ook nog eens kunnen meedelen op de golven. Het enige scharnier dat al die bewegingen kan maken, is het bolscharnier. Dit bolscharnier, dat te vergelijken is met een heup- of schoudergewricht, moet bovendien in staat zijn de enorme druk van het water op de deuren over te brengen op de fundering.”²² Dit voorbeeld toont aan dat het mogelijk is om bolscharnieren op grotere schaal te vervaardigen en dat er behoorlijk grote krachten

²² <http://www.keringhuis.nl>



Figuur 4.38_Maquette met kogelscharnier versie 2

kunnen overgebracht worden.

Uit bovenstaande beschouwingen volgt dat zowel een aangepaste versie van het cardanscharnier als een kogelscharnier in aanmerking komen om de verbindingstaven te bevestigen op het vierkante kader. De scharnieren kunnen gedeeltelijk ingewerkt worden in het kader om de visuele impact ervan te beperken. Figuur 4.39 en 4.40 tonen een schematische voorstelling van de bevestiging van de staaf aan respectievelijk het cardan- en het kogelscharnier. In het eerste geval zit de staaf volledig rond het scharnier dat bestaat uit twee assen waarvan de draaizin op de figuur is aangeduid. Een half-cirkelvormige uitsparing in de staaf laat toe de module te transformeren tot haar meest compacte vorm zonder in conflict te komen met de draaias in het kader. In het tweede geval neemt de diameter van het staafuiteinde geleidelijk aan af om bevestiging aan de kogel mogelijk te maken. Dit kegelvormige deel kan, in tegenstelling tot de holle staaf, volledig uit staal vervaardigd zijn om de geringere diameter te compenseren.

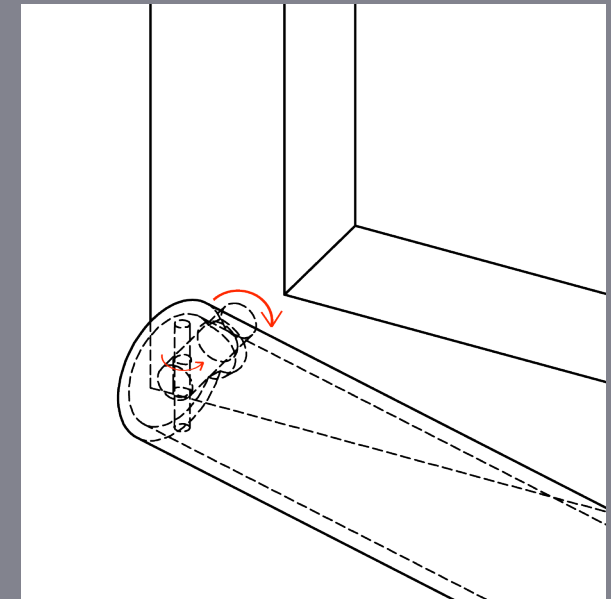
Een belangrijke factor in de keuze tussen beide scharnieroplossingen en in de technische uitwerking zal onder meer de krachtsoverdracht zijn. Dit vraagt echter een uitgebreide kennis, vandaar dat mijn analyse beperkt blijft tot schematische voorstellen.

De aandrijfsystemen voorgesteld onder 4.2.2 impliceren dat er naast de aanhechting van de verbindingstaven een tweede bevestiging noodzakelijk is ter hoogte van de hoekpunten van de vierkanten. De grafische analyse van figuur 4.32 toont voor één type aandrijfsysteem (rood) aan dat dezelfde vrijheidsgraden, namelijk relatieve rotaties α' en β' , vereist zijn als voor de bevestiging van de verbindingstaven (grijs). Zowel het cardan- als het kogelscharnier kunnen dus ook voor die verbinding toegepast worden. Er werden vier verschillende mogelijkheden uitgewerkt om beide bevestigingen in één hoekpunt te voorzien.

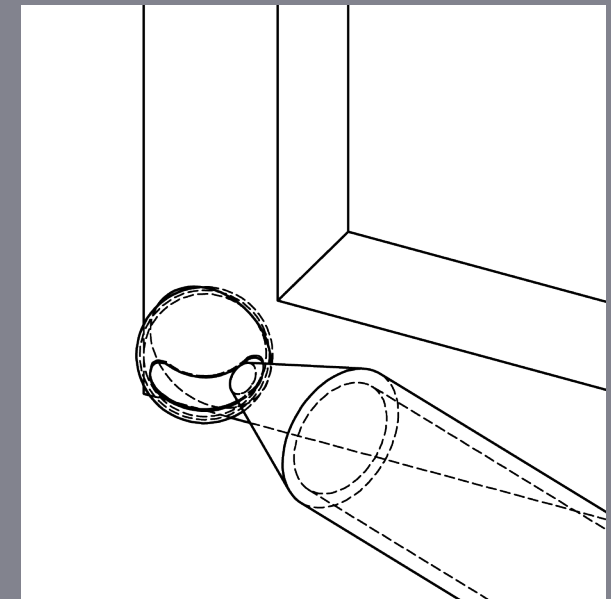
In een eerste systeem wordt de bevestiging van het aandrijfsysteem op het vierkant kader geplaatst, excentrisch ten opzichte van het hoekpunt (figuur 4.42.A). Om in open toestand de aanwezigheid van de roosters te verzoenen met het aandrijfsysteem, dienen uitsparingen voorzien te worden in de vlakken.

Figuur 4.42.B toont de bevestiging van het aandrijfsysteem gelegen buiten het vierkante kader; er in zou het gebruik van het brugdek immers onmogelijk maken. Dit systeem heeft het grote voordeel dat het aandrijfsysteem buiten de module ligt waardoor in de roosters geen uitsparingen moeten gemaakt worden. Dit heeft echter gevolgen op esthetisch vlak: in open toestand is de module geen symmetrisch en afgelijnd geheel meer.

Een derde mogelijkheid is in figuur 4.42.C weergegeven. Hier worden beide bevestigingen in de as van het hoekpunt geplaatst, maar niet in hetzelfde vlak. Dit heeft als gevolg dat de ribbe, waarrond de vlakken scharnieren,



Figuur 4.39_Bevestiging staaf aan variante cardanscharnier (SolidWorks)



Figuur 4.40_Bevestiging staaf aan kogelscharnier (SolidWorks)

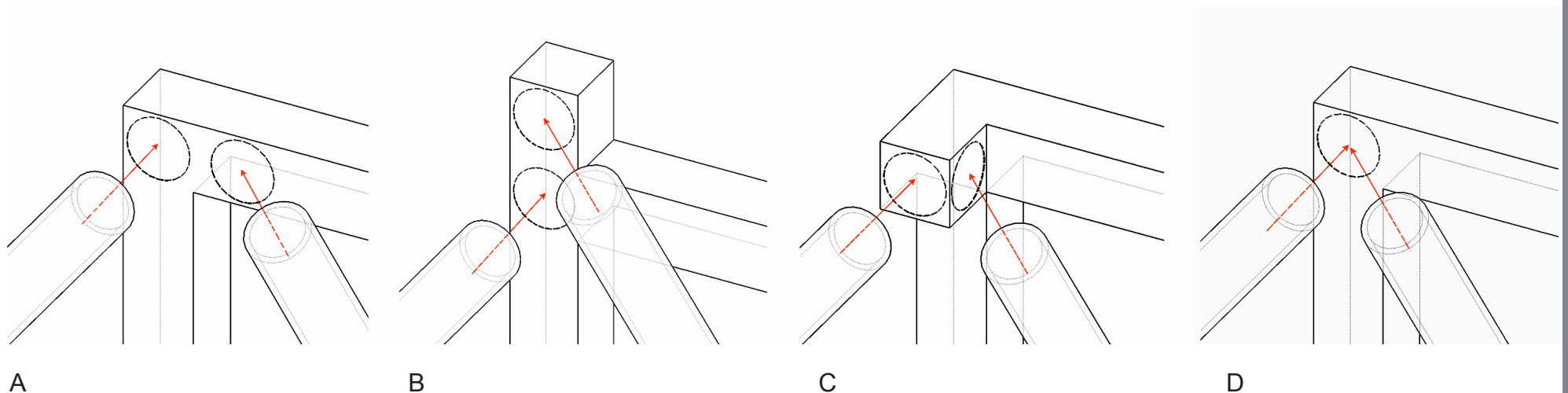
niet meer samenvalt met de diagonaal, wat zowel technische als esthetische consequenties met zich meebrengt. Uitsparingen in de roosters moeten het mogelijk maken om in open toestand het aandrijfsysteem en de roosters in hetzelfde vlak te laten vallen.

De meest esthetische oplossing is waarschijnlijk een systeem waarbij alle staven in hetzelfde punt op het vierkant kader bevestigd worden (figuur 4.42.D). Dit kan mogelijk gemaakt worden door de ontwikkeling van een dubbel kogelscharnier waarbij de kogel, waarop het aandrijfsysteem bevestigd is, beweegt in de kogel van de verbingsstaaf, die op zijn beurt draait in een kom (figuur 4.41). Om de uitsparing in de kogel van de verbingsstaaf te bepalen is het noodzakelijk om de baan die het aandrijfsysteem beschrijft uit te drukken in functie van de baan van de verbingsstaaf. Voor één type aandrijfsysteem werd de exacte wiskundige vergelijking afgeleid door middel van een coördinatentransformatie (zie bijlage 7). Ook hier dienen uitsparingen voorzien te worden in de roosters.

Op bijhorende cd-rom wordt een overzicht gegeven van de verschillende aandrijfsystemen en mechanische verbindingen die besproken werden. Simulaties in SolidWorks laten zien dat niet alle combinaties mogelijk zijn.



Figuur 4.41_Dubbel kogelscharnier
(3D-printer)



Figuur 4.42_Voorstellen bevestiging van
verbingsstaaf en diagonaalstaaf aan het
vierkante kader (SolidWorks)

VERBINDING VLAK_VLAK

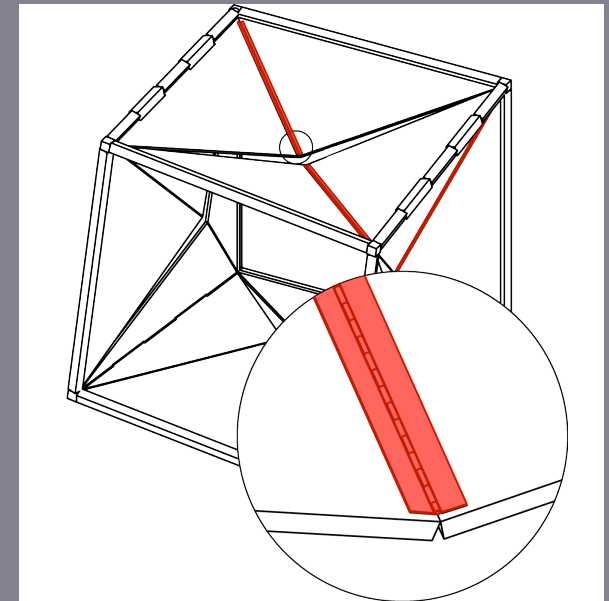
De vorm van de vlakken werd bepaald zodat 2 eisen vervuld waren. Enerzijds moeten de vlakken in open toestand een brugdek en balustrade vormen, anderzijds mogen de vlakken niet interfereren tijdens de beweging. Tijdens die beweging transformeren de zijvlakken van vierkanten tot ruiten. Dit impliceert dat één diagonaal korter wordt en de andere langer. Vandaar werd geopteerd om de vierkante zijvlakken op te vullen met driehoekige panelen die 2 per 2 verbonden zijn zoals op de figuur aangeduid. Tijdens de verandering van de kinetische structuur vouwen de panelen die aan beide kanten van de kleine diagonaal gelegen zijn samen, terwijl ertussen een opening ontstaat.

De panelen vouwen samen met behulp van pianoscharnieren zoals op figuur 4.43 wordt weergegeven. Deze lange, smalle scharnieren worden over de gehele lengte van beide vlakken bevestigd, waardoor de belasting verdeeld wordt opgenomen. Er bestaan pianoscharnieren in verschillende maten en lengtes. Zware pianoscharnieren worden onder meer toegepast voor het openen en sluiten van de laadklep van een vrachtwagen.

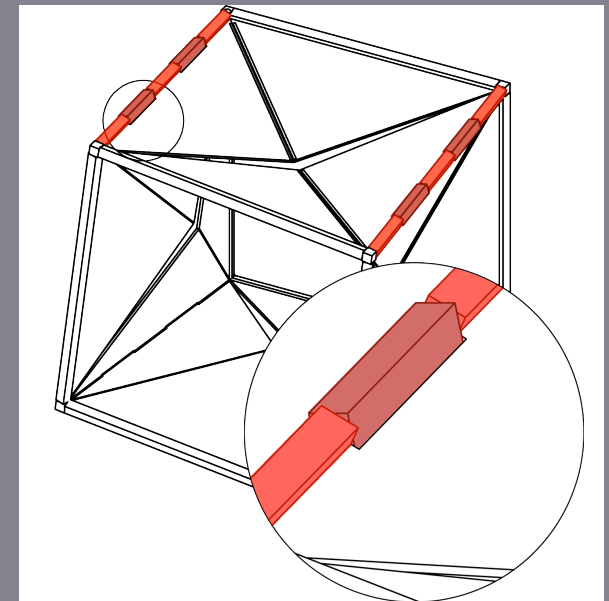
VERBINDING STAAF_VLAK

Na een bespreking van de verbinding tussen de staven en de vlakken onderling, wordt aandacht besteed aan de mechanische bevestiging van de vlakken aan de staven. Elk vlak moet aan het geraamte bevestigd worden zodat de beweging van de structuur op geen enkel ogenblik verstoord wordt. Uit proefondervindelijk onderzoek aan de hand van maquettes bleek dit niet zo eenvoudig te zijn als aanvankelijk gedacht werd. Bij de beweging ondervinden de staven die de vierkanten verbinden namelijk torsie. Daarom worden alle staven van het frame als ronde buizen uitgevoerd zodat de vlakken er vrij kunnen rond draaien.

Een ander belangrijk element waarmee rekening moet gehouden worden is, dat er per verbingsstaaf twee vlakken bevestigd zijn. Aangezien die twee vlakken elk in een tegenovergestelde richting draaien, worden beiden afzonderlijk rond de staven bevestigd zoals op figuur 4.44 wordt weergegeven.



Figuur 4.43_Pianoscharnier als verbinding tussen de vlakken onderling (SolidWorks)



Figuur 4.44_Afzonderlijke bevestiging van de vlakken aan de verbingsstaven (SolidWorks)

BESLUIT

5

Tijdens het ontwerp van de “Twisting Bridge” werd ik vooreerst geconfronteerd met de moeilijkheid om een bewegende structuur te visualiseren en te presenteren. Het bleek niet vanzelfsprekend te zijn om de twistbeweging van de brug te simuleren. Het softwarepakket SolidWorks biedt weliswaar de mogelijkheid om het model te visualiseren maar geeft geen uitsluitsel over het al dan niet stabiel zijn van de structuur in haar verschillende standen. Dergelijke vaststellingen gebeurden dan ook experimenteel aan de hand van maquettes.

Aangezien het ontwerp gekenmerkt wordt door een combinatie van een rotatie en een lineaire verplaatsing, kon er geen beroep gedaan worden op standaardscharnieren of –aandrijfsystemen. Er was dan ook enige vindingrijkheid vereist om een functionerend schaalmodel te maken. De 3D-printer, die de school sinds kort ter beschikking stelt, bleek uitermate geschikt om die zelfontworpen technische componenten te testen.

Dankzij I-Theses en SCIA heb ik gebruik kunnen maken van rekensoftware om het ontwerp te dimensioneren. Het dynamisch karakter van het ontwerp bracht ook hier enkele moeilijkheden met zich mee: de brug wordt immers onderworpen aan verschillende belastingssituaties ten gevolge van de wijzigende geometrie. Met behulp van SCIA Engineer kon de meest nadelige toestand van de brug bepaald worden om haar vervolgens op statische wijze te dimensioneren.

Bij de technische uitwerking van het ontwerp stuitte ik op de grenzen van het vakgebied architectuur. Het was bijgevolg nodig om verschillende disciplines buiten de architectuuropleiding aan te spreken. Dit bleek echter niet zo eenvoudig aangezien de technologische ontwikkelingen binnen vakgebieden als mechanica en de werktuigkunde voortdurend evolueren. Er bestaan geen algemene overzichtswerken waarin terug te vinden is wat er allemaal bestaat. Zelfs al zou dit bestaan, dan nog zou de kans klein zijn dat er pasklare oplossingen bestaan die op de “Twisting Bridge” kunnen toegepast worden. Het was dus noodzakelijk om zelf voorstellen te doen, op basis van bestaande scharnier- en aandrijfsystemen. Wegens mijn gebrek aan ervaring is het echter vrij moeilijk in te schatten of de gedane voorstellen realistisch zijn.

Kortom, met deze masterproef heb ik getracht om, aan de hand van het ontwerp van een beweegbare brug, het domein van de kinetic architecture nader te bestuderen. Naast het simuleren en dimensioneren van het ontwerp heb ik zoveel als mogelijk aandacht besteed aan de detaillering. Wegens mijn beperkte kennis omtrent kogelscharnieren, hydraulische cilinders,... is het echter niet gelukt het ontwerp uit te werken in al haar technische componenten. Daarom werd geopteerd om een aantal voorstellen uit te werken die de beweging van de brug eventueel mogelijk kunnen maken. Er kan aldus geconcludeerd worden dat kinetic architecture een aangepaste ontwerpaanpak behoeft, waarbij op zoek moet gegaan worden naar manieren om het ontwerp te modelleren en te berekenen. Een pluspunt van het interdisciplinaire karakter van kinetic architecture is zeker dat ik kennis uit verschillende onderzoeksgebieden heb opgedaan.

BIJLAGEN

6

BIJLAGE 1

Mits de vermelde aannames kan de windbelasting bepaald worden met behulp van deel '7.11 Lattice structures and scaffoldings' van EN 1991-1-4:2005.

ALGEMENE GEGEVENS

In de Nationale Bijlage van de Eurocode worden voor het Verenigd Koninkrijk volgende waarden weergegeven:

$$v_{b,0} = 22 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad c_{\text{dir}} \leq 1,05 \quad c_{\text{tem}} \leq 1 \quad c_{\text{alt}} = 1 + 0,001 \cdot a_s$$

Op basis van de inplanting van de "Rolling Bridge" wordt gekozen voor een terreincategorie II:

Terrain category	z_0 m	z_{min} m
II Area with low vegetation such as grass and isolated obstacles (trees, buildings) with separations of at least 20 obstacle heights	0,05	2

Basiswindsnelheid $v_b = c_{\text{dir}} \cdot c_{\text{tem}} \cdot v_{b,0} = 1,05 \cdot 1 \cdot 22 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 23,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Basiswinddruk $q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 23,1^2 = 333,51 \text{ N}$

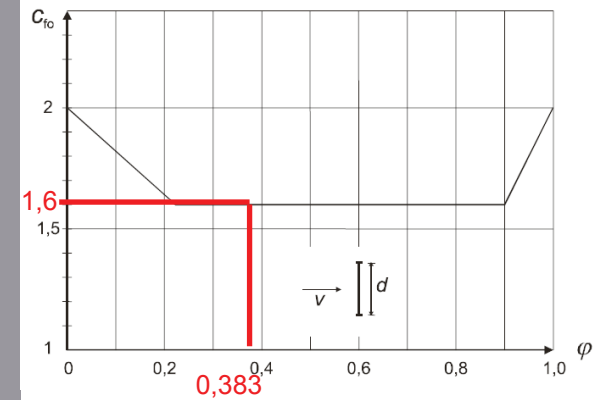
BEREKENING VAN DE KRACHTCOËFFICIËNT

Volheidsgraad $\varphi = \frac{A}{Ac}$

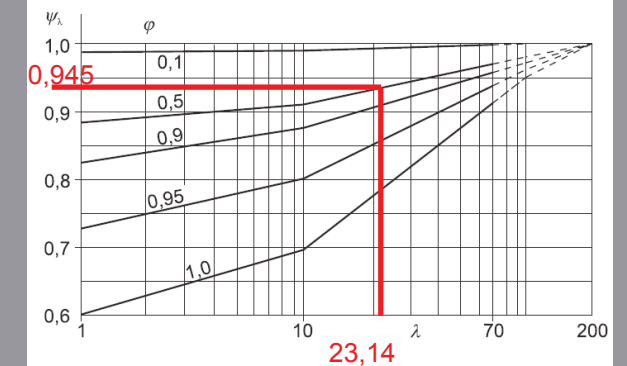
$$= \frac{0,10 \cdot 1,2123 \cdot 16 + 0,10 \cdot 0,692 \cdot 8 + 0,10 \cdot 1,05 \cdot 7 + 0,10 \cdot 0,4692 \cdot 16 + 0,10 \cdot 1,62 \cdot 8}{12,96 \cdot 1,12 - 1,12 \cdot 0,4639 - 3,5 \cdot 0,9278 \cdot 0,07}$$

$$= 0,383$$

Krachtcoëfficiënt $c_{f,0} = 1,60$ (zie figuur 6.1)



Figuur 6.1_Krachtcoëfficiënt $c_{f,0}$ voor een vlakke vakwerkstructuur met staven als functie van de volheidsgraad φ (EN 1991-1-4:2005, p. 79)



Figuur 6.2_Slankheid reductiefactor ψ_s als functie van de volheidsgraad φ en de slankheid λ (EN 1991-1-4:2005, p. 84)

Effectieve slankheid $\lambda = \min(2 \cdot \frac{l}{b}; 70) = 2 \cdot \frac{12,96}{1,12} = 23,14$

Slankheid reductiefactor $\psi_\lambda = 0,945$ (zie figuur 6.2)

Krachtcoëfficiënt $c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 1,60 \cdot 0,945 = 1,512$

STAAFKRACHTEN

$$P_1 = c_f \cdot q_b \cdot A_1 = 1,512 \cdot 333,51 \cdot 0,6922 = 349,05 \text{ N}$$

$$P_2 = P_9 = c_f \cdot q_b \cdot A_2 = 1,512 \cdot 333,51 \cdot 1,623 = 818,53 \text{ N}$$

$$P_3 = P_4 = P_8 = c_f \cdot q_b \cdot A_4 = 1,512 \cdot 333,51 \cdot 1,2123 = 611,32 \text{ N}$$

$$P_5 = P_7 = 1,512 \cdot 333,51 \cdot 0,4692 = 236,60 \text{ N}$$

$$P_6 = 1,512 \cdot 333,51 \cdot 1,12 = 564,78 \text{ N}$$

KNOOPKRACHTEN

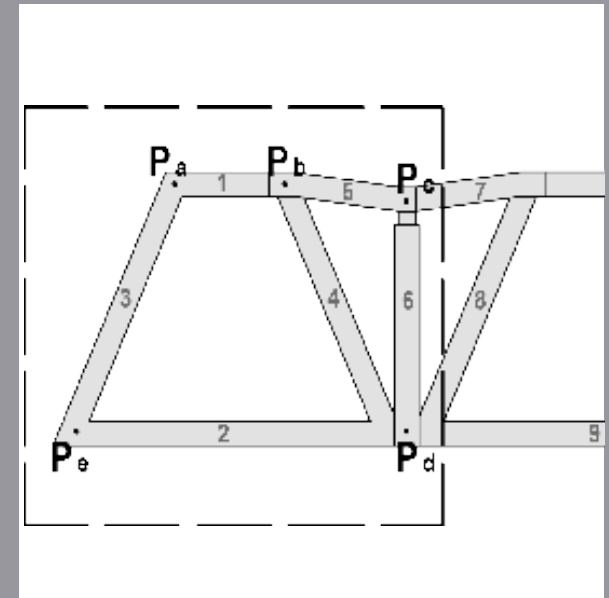
$$P_a = \frac{P_1}{2} + \frac{P_3}{2} = \frac{349,05}{2} + \frac{611,32}{2} = 480,19 \text{ N}$$

$$P_b = \frac{P_1}{2} + \frac{P_4}{2} + \frac{P_5}{2} = \frac{349,05}{2} + \frac{611,32}{2} + \frac{236,60}{2} = 598,49 \text{ N}$$

$$P_c = \frac{P_5}{2} + \frac{P_6}{2} + \frac{P_7}{2} = \frac{236,60}{2} + \frac{564,78}{2} + \frac{236,60}{2} = 519,00 \text{ N}$$

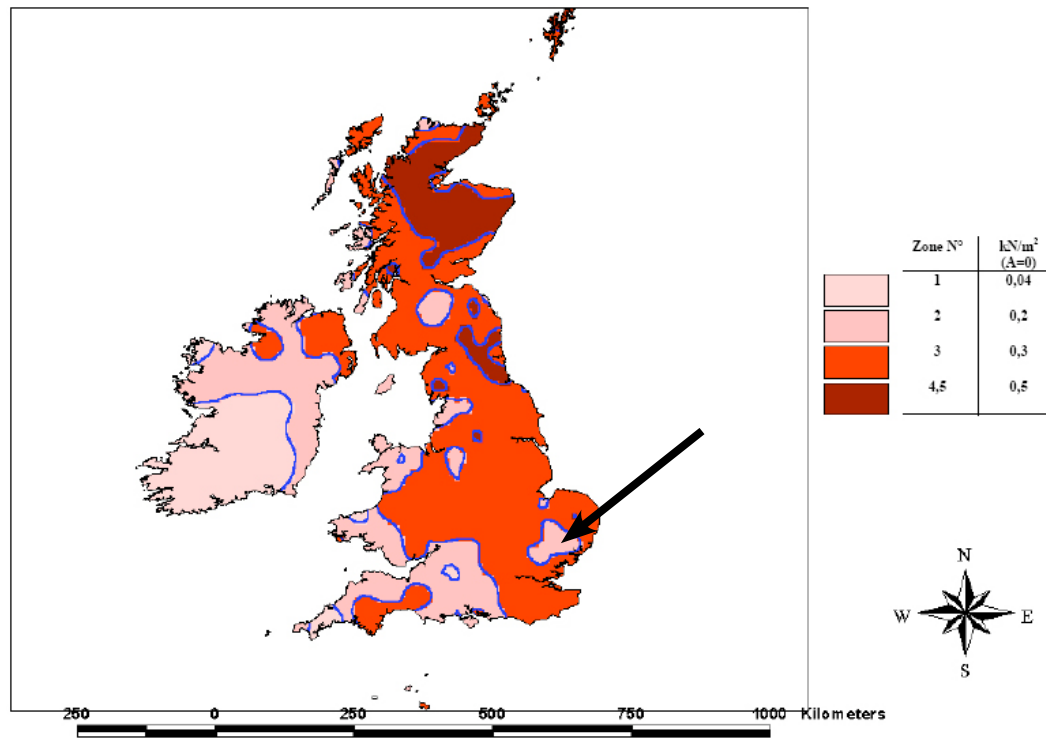
$$P_d = \frac{P_2}{2} + \frac{P_4}{2} + \frac{P_6}{2} + \frac{P_8}{2} + \frac{P_9}{2} = \frac{818,53}{2} + \frac{611,32}{2} + \frac{564,78}{2} + \frac{611,32}{2} + \frac{818,53}{2} = 1712,24 \text{ N}$$

$$P_e = \frac{P_2}{2} + \frac{P_3}{2} = \frac{818,53}{2} + \frac{611,32}{2} = 714,93 \text{ N}$$



Figuur 6.3_Aanduiding staaf- en knooppnummers (Autocad)

BIJLAGE 2



Figuur 6.4_Groot-Britannië en Ierland: zonenummer en sneeuwbelastingen op zeeniveau (EN 1991-1-3:2003, p. 48)

<i>Climatic Region</i>	<i>Expression</i>
UK, Republic of Ireland	$s_k = 0,140Z - 0,1 + \frac{A}{501}$

Figuur 6.5_Relatie hoogteligging-sneeuwbelasting (EN 1991-1-3:2003, p. 40) met:

- s_k karakteristieke sneeuwbelasting (kN/m²)
 A hoogte boven zeeniveau (m)
 Z zonenummer (zie kaart)

BIJLAGE 3

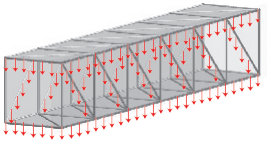
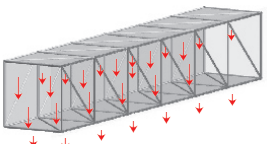
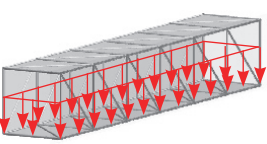
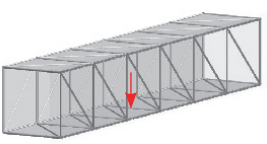
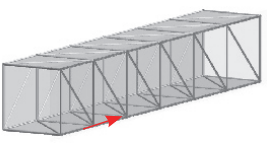
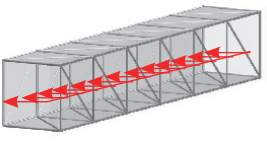
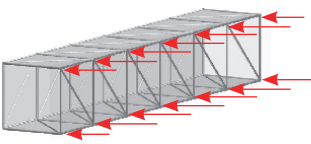
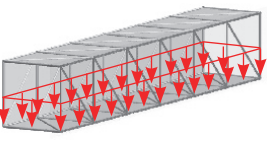
ROR		Stahlrohre nahtlos oder geschweisst					Tubes en acier sans soudure ou soudés				
		Normallängen 5–7 m * nach VSM 11500 bzw. ISO R 336 nicht genormt Formeln für die Näherungs- berechnung der statischen Werte siehe Seite 9					Longueurs normales 5–7 m * pas normalisés selon VSM 11500, et ISO R 336 resp. Formules approximatives pour les valeurs statiques voir page 9.				
		Statische Werte Valeurs statiques					Oberflächen Surfaces		Abmessungen Dimensions		
D · t mm	m kg/m	A mm²	I mm⁴ x 10⁸	W mm³ x 10⁴	i mm		U _e m²/m	U _i m²/t	D mm	d mm	t mm
38 - 2,3 2,6 5,0	2,04 2,29 4,07	258 289 518	0,0413 0,0488 0,0722	2,17 2,40 3,80	12,6 12,5 11,8		0,110 0,120 0,133	58,3 62,0 29,2	38	33,4 32,8 28,0	2,3 2,6 5,0
42,4 - 2,3 2,6 6,3	2,29 2,57 5,62	290 325 714	0,0584 0,0648 0,120	2,76 3,05 5,66	14,2 14,1 13,0		0,133 0,140 0,152	58,1 61,9 29,8	42,4	37,8 37,2 29,8	2,3 2,6 6,3
44,5 - 2,3 2,6 6,0	2,41 2,70 4,87	306 342 620	0,0581 0,0754 0,123	3,06 3,39 6,63	14,9 14,8 14,1		0,140 0,152 0,160	58,1 61,9 29,8	44,5	38,8 38,3 34,5	2,3 2,6 6,0
48,3 - 2,3 2,6 6,0	2,63 2,95 5,34	332 373 680	0,0881 0,0978 0,162	3,65 4,06 8,69	16,3 16,2 16,4		0,162 0,170 0,180	57,8 61,9 29,8	48,3	43,7 43,1 38,3	2,3 2,6 6,0
51 - 2,6 2,9 6,0	3,12 3,44 5,67	396 436 723	0,118 0,127 0,193	4,56 4,99 7,88	17,1 17,0 16,4		0,180 0,190 0,200	51,3 56,5 29,3	51	45,8 44,2 41,0	2,6 2,9 6,0
* 54 - 2,6 2,9 6,0	3,32 3,68 6,04	420 466 770	0,138 0,152 0,233	5,16 5,65 8,64	18,2 18,1 17,4		0,170 0,180 0,190	51,3 56,5 29,3	54	48,8 46,2 44,0	2,6 2,9 6,0
57 - 2,6 2,9 6,0	3,52 3,90 5,41	444 493 817	0,158 0,181 0,273	5,78 6,35 9,78	19,3 19,2 18,6		0,179 0,190 0,200	50,9 55,0 27,9	57	51,8 51,2 47,0	2,6 2,9 6,0
60,3 - 2,6 2,9 6,3	4,14 4,82 8,42	523 668 1070	0,216 0,338 0,398	7,16 11,1 13,1	20,3 19,6 19,2		0,189 0,200 0,210	45,7 47,7 22,5	60,3	54,5 50,3 47,7	2,6 2,9 6,3
63,5 - 2,6 2,9 6,3	4,36 4,81 8,91	552 618 1130	0,254 0,388 0,488	8,00 12,5 14,8	21,4 20,8 20,3		0,199 0,210 0,220	45,6 47,6 22,3	63,5	57,7 53,5 47,7	2,6 2,9 6,3
70 - 2,6 2,9 6,3	4,83 5,01 9,92	611 620 1260	0,348 0,542 0,648	9,86 15,5 16,4	23,7 23,0 22,8		0,220 0,230 0,239	45,6 47,6 22,3	70	64,2 60,0 57,4	2,6 2,9 6,3
76,1 - 2,6 2,9 6,3	5,28 5,77 10,9	667 712 1380	0,447 0,709 0,848	11,8 18,6 22,3	25,8 25,2 24,8		0,239 0,250 0,259	45,3 47,3 21,9	76,1	70,3 66,1 63,5	2,6 2,9 6,3
82,5 - 3,2 6,0 10,0	6,31 9,66 17,9	797 1220 2280	0,628 0,916 1,62	15,2 22,2 37,0	28,1 27,6 26,9		0,259 0,270 0,279	41,1 47,1 14,5	82,5	78,1 72,6 62,5	3,2 6,0 10,0
88,9 - 3,2 6,0 10,0	6,81 10,3 19,5	862 1320 2480	0,792 1,16 1,96	17,8 26,2 44,1	30,3 29,7 28,1		0,279 0,290 0,300	41,0 47,1 14,3	88,9	82,5 78,9 68,9	3,2 6,0 10,0
* 95 - 3,2 6,0 10,0	7,25 11,1 21,0	923 1410 2670	0,973 1,44 2,45	20,6 30,2 51,5	32,6 31,9 30,3		0,299 0,310 0,320	41,1 47,1 14,2	95	86,8 80,0 75,0	3,2 6,0 10,0
101,6 - 3,6 6,0 10,0	8,76 11,9 22,6	1110 1520 2880	1,33 1,77 3,06	26,2 34,9 50,1	34,7 34,2 32,6		0,319 0,330 0,339	38,4 44,3 14,1	101,6	94,4 81,6 81,6	3,6 6,0 10,0
108 - 3,6 6,0 10,0	9,33 12,7 24,2	1180 1620 3080	1,51 2,15 3,73	29,8 39,8 59,2	36,9 36,5 34,8		0,339 0,350 0,359	38,3 44,3 14,0	108	100,6 88,0 88,0	3,6 6,0 10,0
114,3 - 3,6 6,0 12,5	9,90 12,7 25,7	1250 1620 3280	1,62 2,15 3,73	31,6 39,8 59,2	39,2 37,0 36,3		0,359 0,370 0,379	38,3 44,3 14,0	114,3	107,1 94,3 88,3	3,6 6,0 12,5
* 121 - 4,0 6,0 12,5	11,5 12,7 27,4	1470 1620 4280	2,52 2,94 5,25	41,5 49,5 89,5	41,4 39,4 38,6		0,389 0,400 0,410	32,0 37,9 11,3	121	113,0 101,0 98,0	4,0 6,0 12,5
127 - 4,0 6,0 12,5	12,2 12,7 28,9	1550 1620 4500	2,93 3,34 5,66	46,1 54,1 94,1	43,5 41,6 40,7		0,409 0,420 0,430	32,7 37,9 11,2	127	118,0 107,0 102,0	4,0 6,0 12,5

Figuur 6.6_Meest courante afmetingen voor stalen buizen ("Tables pour la construction métallique", SZS, Zürich, 1987, p. 38)

ROR			Statische Werte Values staticues				Oberflächen Surfaces		Abmessungen Dimensions		
	D + t mm	m kg/m	A mm²	I mm⁴	W mm³	i mm	U _m m²/m	U _e m²/t	C mm	c mm	t mm
				x 10⁶	x 10⁶						
133	4,0	12,8	1620	3,38	50,8	45,6	0,418	32,7	129	125	4,0
	10,0	30,3	3860	7,38	111	43,6		13,8		113	10,0
	12,5	37,4	4730	8,88	131	42,8		11,2		109	12,5
139,7	4,0	13,5	1710	3,83	56,2	49,0	0,438	32,5	139,7	131,7	4,0
	10,0	32,0	4070	8,82	123	45,0		13,7		113,7	10,0
	12,5	39,5	5000	10,20	146	45,2		11,1		114,7	12,5
152,4	4,5	16,4	2080	5,72	75,1	52,3	0,478	28,2	152,4	143,4	4,5
	10,0	35,1	4470	11,40	150	53,5		13,7		132,4	10,0
	12,5	43,4	5480	13,55	178	49,7		11,0		127,4	12,5
159	4,5	17,1	2180	6,52	82,0	54,6	0,500	28,2	159	150	4,5
	10,0	36,7	4680	13,25	154	52,8		13,8		139	10,0
	12,5	45,4	5750	15,55	186	52,0		11,0		134	12,5
165,1	4,5	17,8	2270	7,23	88,7	58,6	0,518	28,2	165,1	155,1	4,5
	10,0	38,8	4870	14,71	178	54,9		13,4		145,1	10,0
	12,5	47,4	5980	17,56	213	54,1		11,0		140,1	12,5
168,3	4,5	18,1	2320	7,77	92,4	57,9	0,526	28,2	168,3	159,3	4,5
	10,0	39,0	4970	15,84	186	55,1		13,6		148,3	10,0
	12,5	48,4	6120	18,88	222	55,3		10,9		143,3	12,5
177,8	5,0	21,3	2710	10,14	114	61,1	0,556	26,2	177,8	167,8	5,0
	10,0	41,4	5270	18,82	209	59,4		13,5		157,8	10,0
	12,5	51,3	6490	22,30	251	58,6		10,9		152,8	12,5
183,7	5,4	25,0	3180	14,17	146	65,6	0,595	24,4	183,7	182,9	5,4
	10,0	46,3	5770	24,42	252	63,0		13,4		173,7	10,0
	12,5	56,2	7120	28,34	300	64,2		10,9		168,7	12,5
219,1	5,9	31,0	3950	22,47	205	75,4	0,688	22,2	219,1	207,3	5,9
	10,0	51,6	6570	38,98	328	74,0		13,3		198,1	10,0
	12,5	64,1	8110	43,45	387	73,2		10,7		194,1	12,5
244,5	6,3	37,1	4710	33,66	274	84,2	0,766	20,7	244,5	231,9	6,3
	12,5	72,0	9110	61,47	503	82,1		10,7		218,5	12,5
	16,0	89,8	11500	78,33	616	81,0		8,55		212,5	16,0
267	6,3	40,6	5160	43,86	329	92,2	0,836	20,7	267	254,4	6,3
	12,5	79,0	9990	81,11	608	89,1		10,6		242	12,5
	16,0	98,6	12600	99,78	747	88,9		8,51		235	16,0
273	6,3	41,6	5280	46,85	344	94,3	0,858	20,6	273	260,4	6,3
	12,5	80,9	10200	86,87	637	92,2		10,6		246	12,5
	16,0	101	12900	107,10	784	91,0		8,50		241	16,0
298,5	7,1	51,1	6500	69,03	460	103,0	0,936	18,4	298,5	284,5	7,1
	12,5	88,8	11200	118,10	771	101,0		10,6		273,5	12,5
	16,0	111	14200	142,10	952	100,0		8,45		266,5	16,0
323,9	7,1	55,6	7070	88,89	548	112,0	1,02	18,3	323,9	308,7	7,1
	12,5	96,7	12700	148,50	917	110,0		10,6		298,9	12,5
	16,0	121	15500	183,30	1136	109,0		8,43		291,9	16,0
355,6	8,0	58,3	8740	132,00	742	123,0	1,12	16,4	355,6	338,6	8,0
	12,5	107	13900	198,50	1117	121,0		10,5		330,6	12,5
	16,0	133	17100	246,80	1387	120,0		8,42		323,6	16,0
406,4	8,8	85,9	11000	217,30	1059	141,0	1,28	14,9	406,4	388,8	8,8
	12,5	122	15500	300,30	1478	139,0		10,5		381,4	12,5
	16,0	153	19600	374,50	1843	138,0		8,37		374,4	16,0
419	10,0	101	12800	268,80	1283	145,0	1,32	13,7	419	399	10,0
	12,5	126	16000	330,00	1575	144,0		10,5		394	12,5
	16,0	158	20300	411,90	1866	143,0		8,35		387	16,0
457,2	10,0	110	14000	351,40	1537	158,0	1,44	13,7	457,2	437,2	10,0
	12,5	136	17500	432,00	1890	157,0		10,4		432,2	12,5
	16,0	173	22200	540,30	2384	156,0		8,32		425,2	16,0
	20,0	216	27500	637,70	2877	155,0		6,67		417,2	20,0

Figuur 6.7_Meest courante afmetingen voor stalen buizen ("Tables pour la construction métallique", SZS, Zürich, 1987, p. 39)

BIJLAGE 4

	EIGENGEWICHT permanent / gelijkmatig verdeelde belasting z-richting
	GEWICHT VLAKKEN permanent 1,17 kN/m ² gelijkmatig verdeelde belasting z-richting (berekening op basis van www.dejo.nl)
	GEBRUIKSBELASTING veranderlijk 5 kN/m ² gelijkmatig verdeelde belasting z-richting
	PLAATSELIJKE BELASTING veranderlijk 10 kN puntlast op vierkant oppervlak (0,10m ²) z-richting
	HORIZONTALE BELASTING veranderlijk 0,5 kN puntlast y-richting
	BELASTING BALUSTRADE veranderlijk 1 kN/m ² gelijkmatig verdeelde belasting x-richting
	WINDBELASTING wind zie bijlage 5 puntlast x-richting
	SNEEUWBELASTING sneeuw 0,4 kN/m ² gelijkmatig verdeelde belasting z-richting

Figuur 6.8_Belastingen die inwerken op de
"Twisting Bridge"

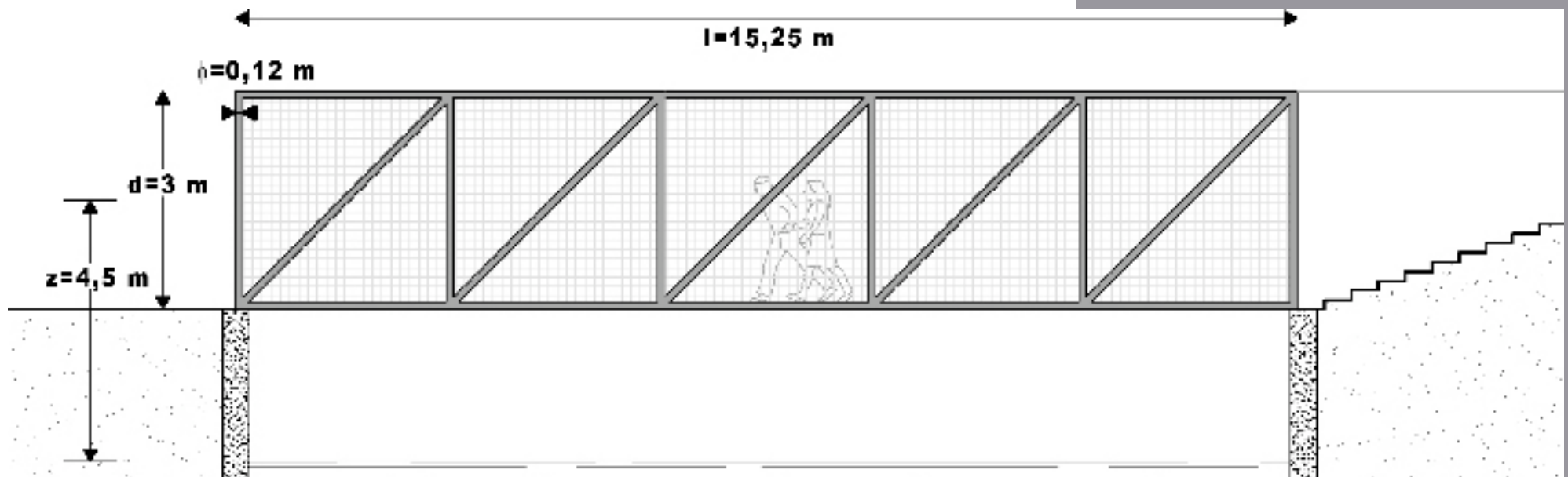
BIJLAGE 5

Aangezien de windbelasting op de roosters verwaarloosd kan worden, wordt enkel het stalen frame in rekening gebracht. Er zal bijgevolg beroep gedaan worden op het onderdeel '7.11 Lattice structures and scaffoldings' van EN 1991-1-4:2005. In figuur 6.9 is een situatieschets van de brug weergegeven. Er valt op te merken dat er enkele aannames gemaakt werden voor wat betreft de vrije hoogte onder de brug en de profieldoorsnede. Om de knoopkrachten te berekenen zullen eerst enkele algemene waarden berekend worden.

ALGEMENE GEGEVENS

In de Nationale Bijlage van de Eurocode worden voor België volgende waarden weergegeven:

$$v_{b,0} = 26,2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad c_{\text{dir}} \leq 1 \quad c_{\text{tem}} \leq 1 \quad c_{\text{alt}} = 1$$



Figuur 6.9 – Situatieschets
(Autocad)

Naar analogie met The Rolling Bridge wordt gekozen voor een terreincategorie II:

Terrain category		z_0 m	z_{min} m
II	Area with low vegetation such as grass and isolated obstacles (trees, buildings) with separations of at least 20 obstacle heights	0,05	2

Basiswindsnelheid $v_b = c_{dir} \cdot c_{tem} \cdot v_{b,0} = 1 \cdot 1 \cdot 26,2 \frac{m}{s} = 26,2 \frac{m}{s}$

Ruwheidscoëfficiënt $c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,19 \cdot \left(\frac{0,05}{0,05}\right)^{0,07} \cdot \ln\left(\frac{4,5}{0,05}\right) = 0,855$

Topografische coëfficiënt $c_0(z) = 1$

Hoofdwindsnelheid $v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b = 0,855 \cdot 1 \cdot 26,2 \frac{m}{s} = 22,4 \frac{m}{s}$

Basiswinddruk $q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 26,2^2 = 429,025 \frac{N}{m^2}$

BEREKENING VAN DE KRACHTCOËFFICIËNT

Volheidsgraad $\varphi = \frac{A}{Ac} = \frac{15,25 \cdot 2 \cdot 0,12 + 6 \cdot 3 \cdot 0,12 + 5 \cdot \sqrt{3,05^2 + 3^2} \cdot 0,12}{15,25 \cdot 3} = 0,1833$

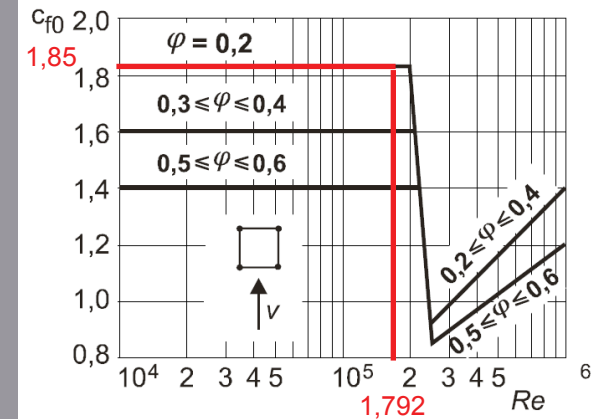
Reynoldsgetal $Re = \frac{b \cdot v_m(z_e)}{v} = \frac{0,120m \cdot 22,4 \frac{m}{s}}{15 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 1,792 \cdot 10^5$

Krachtcoëfficiënt $c_{f,0} = 1,85$ (zie figuur 6.10)

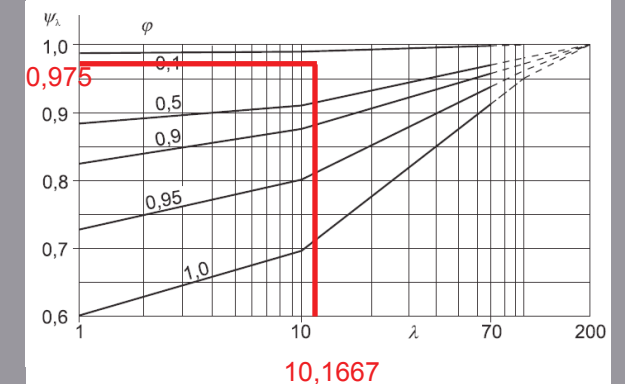
Effectieve slankheid $\lambda = \min\left(2 \cdot \frac{l}{b}; 70\right) = 2 \cdot \frac{15,25}{3} = 10,1667$

Slankheid reductiefactor $\psi_\lambda = 0,975$ (zie figuur 6.11)

Krachtcoëfficiënt $c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 1,85 \cdot 0,975 = 1,80$



Figuur 6.10 Krachtcoëfficiënt $c_{f,0}$ voor vlakke en drie-dimensionale vakwerkstructuren met staven van cirkelvormige doorsnede (EN 1991-1-4:2005, p. 80)



Figuur 6.11 Slankheid reductiefactor ψ_λ als functie van de volheidsgraad ϕ en de slankheid λ (EN 1991-1-4:2005, p. 84)

STAAFKRACHTEN

$$P_1 = P_3 = P_6 = P_8 = c_f \cdot q_b \cdot l_1 = 1,80 \cdot 429,025 \cdot 3,05 = 2355,35\text{N}$$

$$P_2 = P_7 = c_f \cdot q_b \cdot l_2 = 1,80 \cdot 429,025 \cdot 4,278 = 3303,66\text{N}$$

$$P_4 = P_5 = c_f \cdot q_b \cdot l_4 = 1,80 \cdot 429,025 \cdot 3 = 2316,74\text{N}$$

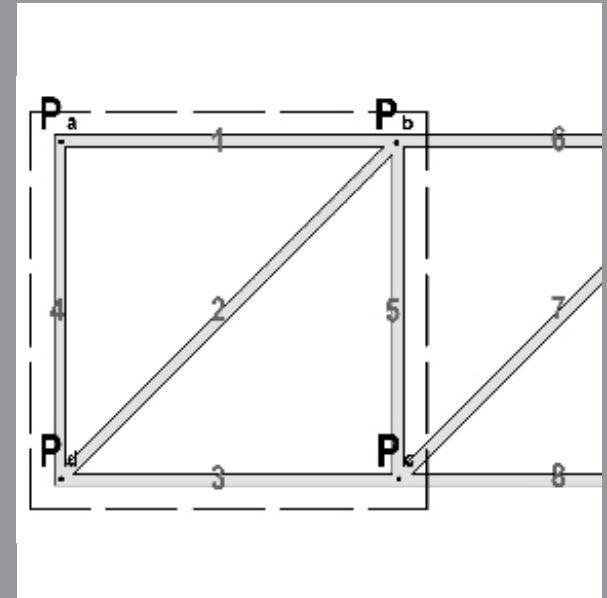
KNOOPKRACHTEN

$$P_a = \frac{P_1}{2} + \frac{P_4}{2} = \frac{2355,35}{2} + \frac{2316,74}{2} = 2336,05\text{N}$$

$$P_b = \frac{P_1}{2} + \frac{P_2}{2} + \frac{P_5}{2} + \frac{P_6}{2} = \frac{2355,35}{2} + \frac{3303,66}{2} + \frac{2316,74}{2} + \frac{2355,35}{2} = 5165,55\text{N}$$

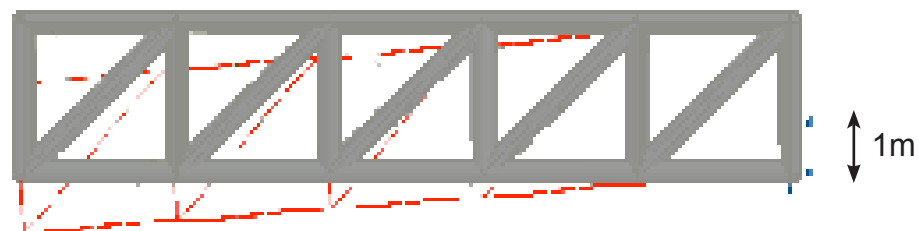
$$P_c = \frac{P_3}{2} + \frac{P_5}{2} + \frac{P_7}{2} + \frac{P_8}{2} = \frac{2355,35}{2} + \frac{2316,74}{2} + \frac{3303,66}{2} + \frac{2355,35}{2} = 5165,55\text{N}$$

$$P_d = \frac{P_2}{2} + \frac{P_3}{2} + \frac{P_4}{2} = \frac{3303,66}{2} + \frac{2355,35}{2} + \frac{2316,74}{2} = 3987,88\text{N}$$

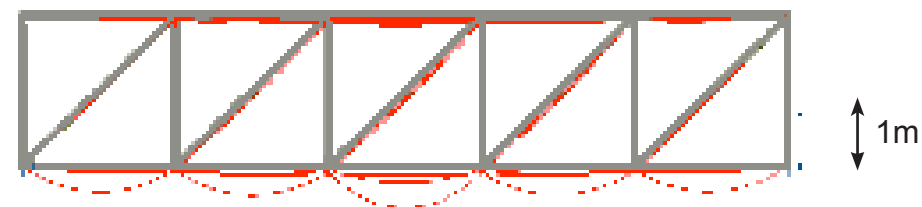


Figuur 6.12_Aanduiding staaf- en knoopnummers (Autocad)

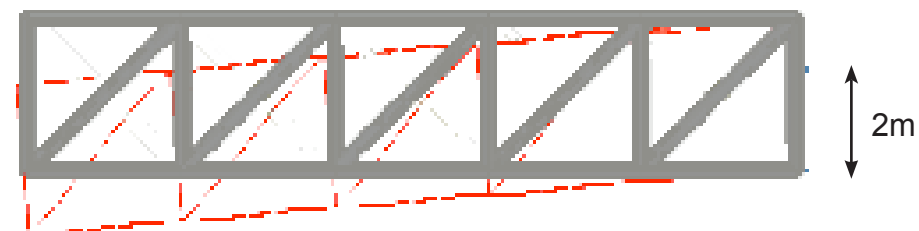
BIJLAGE 6



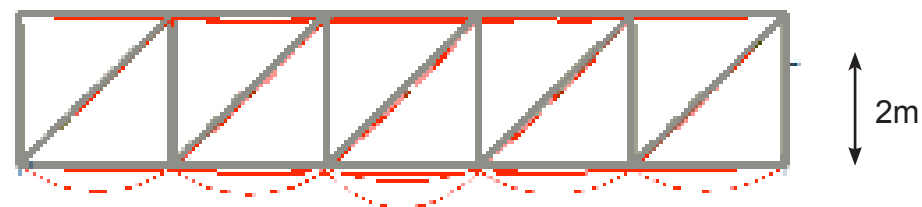
profiel: 457,2 x 20 ; $u_{z \min} = 135 \text{ mm}$



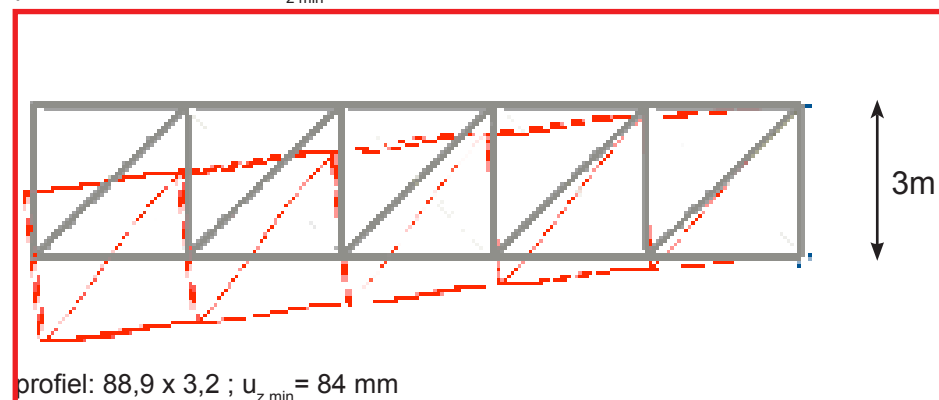
profiel: 127 x 12,5 ; $u_{z \min} = 52 \text{ mm}$



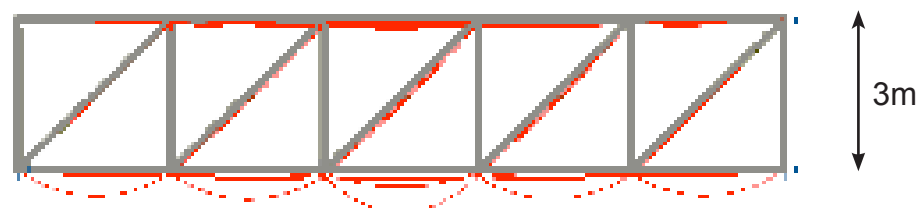
profiel: 323,9 x 12,5 ; $u_{z \min} = 98 \text{ mm}$



profiel: 127 x 12,5 ; $u_{z \min} = 54 \text{ mm}$



profiel: 88,9 x 3,2 ; $u_{z \min} = 84 \text{ mm}$



profiel: 127 x 12,5 ; $u_{z \min} = 54 \text{ mm}$

Figuur 6.13 Brug in uitkraging: doobuiging $< l/150 = 101,7 \text{ mm}$ (Robot Structural Analysis)

Figuur 6.14 Brug op twee steunpunten: doobuiging $< l/250 = 61 \text{ mm}$ (Robot Structural Analysis)

BIJLAGE 7

De baan die het aandrijfsysteem (rood) beschrijft in functie van de baan van de verbingsstaaf (grijs) kan gevonden worden door het uitvoeren van een coördinatentransformatie. Hierbij wordt het assenstelsel geroteerd zodat de z-as samenvalt met de richting van een punt op de grijze curve. De coördinatentransformatie zal in twee stappen gebeuren. Een eerste stap betreft de rotatie om de x-as in het YZ-vlak over een hoek α_1 . Vervolgens wordt het assenstelsel gedraaid om de y-as (in het X'Z'-vlak) met een hoek α_2 . De vergelijkingen van de grijze en rode curve zijn respectievelijk:

$$x(\vartheta) = \cos(225^\circ - \vartheta) \cdot \frac{3}{\sqrt{2}} + 1,5$$

$$y(\vartheta) = \sin(225^\circ - \vartheta) \cdot \frac{3}{\sqrt{2}} + 1,5$$

$$z(\vartheta) = \sqrt{3,05^2 - (3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\frac{\vartheta}{2}))^2}$$

$$x(\vartheta) = \cos(315^\circ - \vartheta) \cdot \frac{3}{\sqrt{2}} + 1,5$$

$$y(\vartheta) = \sin(315^\circ - \vartheta) \cdot \frac{3}{\sqrt{2}} + 1,5$$

$$z(\vartheta) = \sqrt{3,05^2 - (3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\frac{\vartheta}{2}))^2}$$

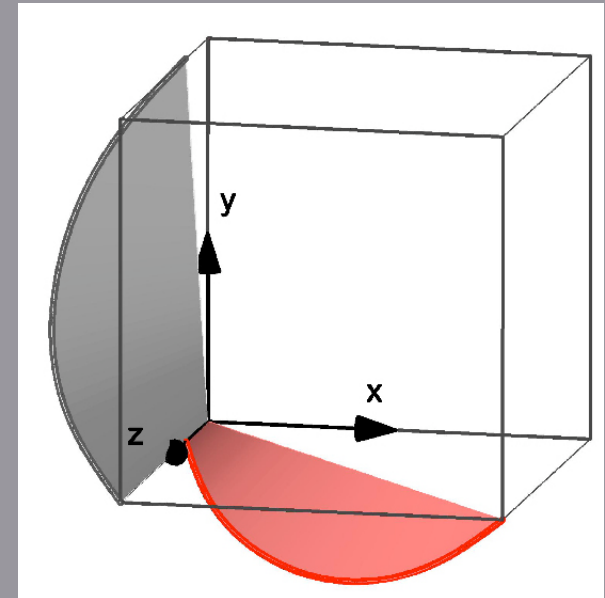
STAP 1

$$\begin{bmatrix} x^1(\vartheta) \\ y^1(\vartheta) \\ z^1(\vartheta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_1) & -\sin(\alpha_1) \\ 0 & \sin(\alpha_1) & \cos(\alpha_1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(\vartheta) \\ y(\vartheta) \\ z(\vartheta) \end{bmatrix}$$

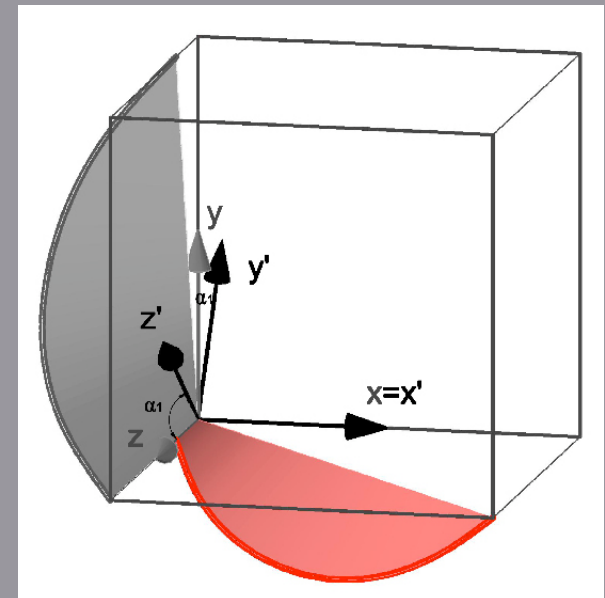
$$x^1(\vartheta) = x(\vartheta)$$

$$y^1(\vartheta) = \cos(\alpha_1) \cdot y(\vartheta) - \sin(\alpha_1) \cdot z(\vartheta)$$

$$z^1(\vartheta) = \sin(\alpha_1) \cdot y(\vartheta) + \cos(\alpha_1) \cdot z(\vartheta)$$



Figuur 6.15_Oorspronkelijk assenstelsel (Autocad)



Figuur 6.16_Assenstelsel na rotatie om x-as in het YZ-vlak (Autocad)

STAP 2

$$\begin{bmatrix} x''(\vartheta) \\ y''(\vartheta) \\ z''(\vartheta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_2) & 0 & \sin(\alpha_2) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\alpha_2) & 0 & \cos(\alpha_2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x'(\vartheta) \\ y'(\vartheta) \\ z'(\vartheta) \end{bmatrix}$$

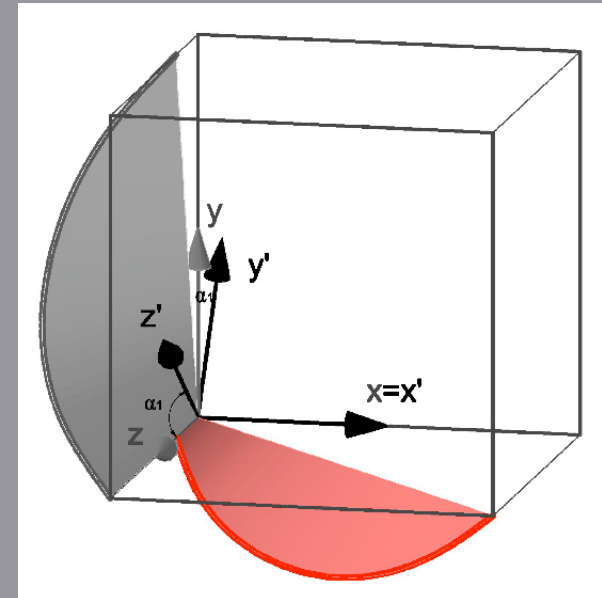
$$x''(\vartheta) = \cos(\alpha_2) \cdot x'(\vartheta) + \sin(\alpha_2) \cdot z'(\vartheta)$$

$$y''(\vartheta) = y'(\vartheta)$$

$$z''(\vartheta) = -\sin(\alpha_2) \cdot x'(\vartheta) + \cos(\alpha_2) \cdot z'(\vartheta)$$

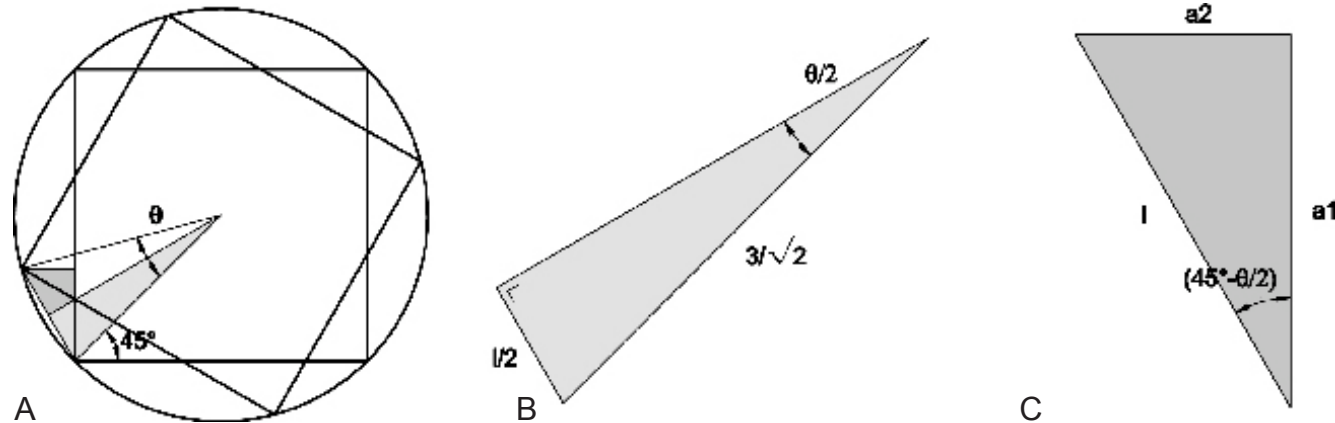
STAP 1 + 2

$$\begin{aligned} x''(\vartheta) &= \cos(\alpha_2) \cdot x(\vartheta) + \sin(\alpha_2) \cdot [\sin(\alpha_1) \cdot y(\vartheta) + \cos(\alpha_1) \cdot z(\vartheta)] \\ &= \cos(\alpha_2) \cdot \left[\cos(315^\circ - \vartheta) \cdot \frac{3}{\sqrt{2}} + 1,5 \right] + \sin(\alpha_2) \cdot \left[\sin(\alpha_1) \cdot \left[\sin(315^\circ - \vartheta) \cdot \frac{3}{\sqrt{2}} + 1,5 \right] + \cos(\alpha_1) \cdot \sqrt{3,05^2 - (3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\frac{\vartheta}{2}))^2} \right] \\ y''(\vartheta) &= \cos(\alpha_1) \cdot y(\vartheta) - \sin(\alpha_1) \cdot z(\vartheta) \\ &= \cos(\alpha_1) \cdot \left[\sin(315^\circ - \vartheta) \cdot \frac{3}{\sqrt{2}} + 1,5 \right] - \sin(\alpha_1) \cdot \sqrt{3,05^2 - (3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\frac{\vartheta}{2}))^2} \\ z''(\vartheta) &= -\sin(\alpha_2) \cdot x(\vartheta) + \cos(\alpha_2) \cdot [\sin(\alpha_1) \cdot y(\vartheta) + \cos(\alpha_1) \cdot z(\vartheta)] \\ &= -\sin(\alpha_2) \cdot \left[\cos(315^\circ - \vartheta) \cdot \frac{3}{\sqrt{2}} + 1,5 \right] + \cos(\alpha_2) \cdot \left[\sin(\alpha_1) \cdot \left[\sin(315^\circ - \vartheta) \cdot \frac{3}{\sqrt{2}} + 1,5 \right] + \cos(\alpha_1) \cdot \sqrt{3,05^2 - (3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\frac{\vartheta}{2}))^2} \right] \end{aligned}$$



Figuur 6.17_Assenstelsel na rotatie om y-as in het X'Z'-vlak (Autocad)

Vervolgens kunnen, aan de hand van onderstaande figuren, de hoeken α_1 en α_2 uitgedrukt worden in functie van de hoekverdraaiing θ



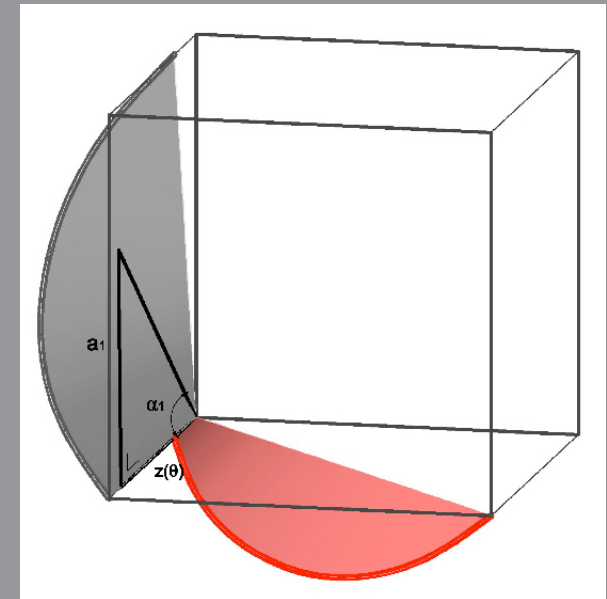
Figuur 6.18_Afleiding hoeken α_1 en α_2 in functie van de hoekverdraaiing θ (Autocad)

Uit figuur 6.18.B en C volgt respectievelijk:

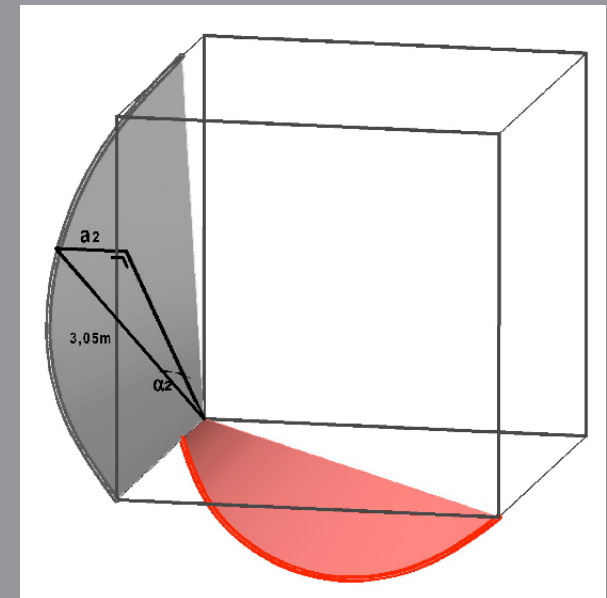
$$\begin{aligned} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) &= \frac{l \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot 3} & \longrightarrow & \quad l = 3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \cos\left(45^\circ - \frac{\theta}{2}\right) &= \frac{a_1}{l} & \longrightarrow & \quad a_1 = 3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos\left(45^\circ - \frac{\theta}{2}\right) \\ \sin\left(45^\circ - \frac{\theta}{2}\right) &= \frac{a_2}{l} & \longrightarrow & \quad a_2 = 3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\left(45^\circ - \frac{\theta}{2}\right) \end{aligned}$$

$$\tan(\alpha_1) = \frac{a_1}{z(\theta)} \quad \longrightarrow \quad \alpha_1 = \text{Arc tan} \left[\frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos\left(45^\circ - \frac{\theta}{2}\right)}{\sqrt{3,05^2 - (3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right))^2}} \right]$$

$$\sin(\alpha_2) = \frac{a_2}{3,05} \quad \longrightarrow \quad \alpha_2 = \text{Arcsin} \left[\frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\left(45^\circ - \frac{\theta}{2}\right)}{3,05} \right]$$



Figuur 6.19_Afleiding α_1 in functie van a_1 (Autocad)



Figuur 6.20_Afleiding α_2 in functie van a_2 (Autocad)

Tot slot worden enkele waarden in tabelvorm weergegeven.

θ	α_1	α_2	$x''(\theta)$	$y''(\theta)$	$z''(\theta)$
0	0,00	0,00	3,00	0,00	3,05
10	5,35	4,47	2,94	-0,52	2,77
20	11,52	7,96	2,76	-1,01	2,46
30	18,48	10,37	2,47	-1,42	2,11
40	26,12	11,60	2,08	-1,73	1,76
50	34,33	11,60	1,63	-1,90	1,39
60	43,08	10,37	1,16	-1,90	1,03
70	52,50	7,96	0,71	-1,72	0,69
80	63,31	4,47	0,31	-1,33	0,38
90	79,61	0,00	0,00	-0,54	0,10

BIBLIOGRAFIE

7

1. KINETIC ARCHITECTURE

Akgün Yenal, "Transformations from planar geometries tot hypersurfaces: a proposal for a new scissor structure", PhD Proposal, 2007

Calatrava Santiago, <http://www.calatrava.com>, 2009

Coole David, "A typological study of a kinetic architecture: culture + commerce mill", in Canadian architect, december 2006, pp. 50-51

Drmm Architecture, <http://www.drmm.co.uk>, 2009

Fisher David, <http://www.dynamicarchitecture.net>, 2009

Fox & Yeh, "Intelligent Kinetic Systems", paper, Massachussts Institute of Technology-Department of Architecture, Cambridge, 1999

Hoberman Chuck, <http://hoberman.com>, 2009

Hoyos Luis, "Adaptation of the Built Environment to its Surrounding Context", ARC 403 Lecture, Houston Drum, 2007

Kinetic Architecture, <http://kineticarchitecture.net>, 2009

Korkmaz Koray, "An Analytical Study of the Design Potentials in Kinetic Architecture", PhD Thesis, Izmir Institute of Technology, Izmir, 2004

Kronenburg Robert, "Flexible: Architecture that Responds to Change", Laurence King Publishers, Londen, 2007

Kronenburg Robert, "Portable Architecture: Design and Technology", Birkhäuser, Basel, 2008

MIT Kinetic Design Group, <http://www.robotecture.com/kdg>, 2009

Randl Chad, "Revolving Architecture", Princeton Architectural Press, New York, 2008

Schneider Ulrich, "Kengo Kuma-Breathing Architecture: The Teahouse of the Museum of Applied Arts Frankfurt / Das Teehaus des Museums für Angewandte Kunst Frankfurt", Birkhäuser, Basel, 2008

Siegal Jennifer, "Mobile_the art of portable architecture", Princeton Architectural Press, New York, 2002

Zuk & Clark, "Kinetic Architecture", Van Nostrand Reinhold Press, New York, 1970

2. BEWEEGBARE BRUGGEN

Baus & Schlaich, "Footbridges", Birkhäuser, Basel, 2007

Bennett David, "The architecture of bridge design", Thomas Telford, Londen, 1997

Bentley Systems, <http://www.bentley.com>, 2009

Brown Jeff L., "Rolling London Footbridge Surprises Spectators", in Civil Engineering, maart 2005, pp. 16-18

Buro Happold, http://www.burohappold.com/BH/PRJ_INF_paddington_helix_bridge.aspx, 2009

Christiaens Caroline, "Software voor staalbouw in België" in Staal_Acier, 15, juni 2007, pp52-61

Dietmar Feichtinger Architects, Volledige studieopdracht voor de realisatie van voetgangers- en fietsbruggen in het kader van het project 'Oude Dokken' in Gent, www.vlaams-bouwmeester.be, 2009

De Jong & Muyen, "2000 jaar Beweegbare Bruggen", Elmar, Rijswijk, 1995

Eurocode 1, "Actions on structures – Part 1-3 : General actions : Snow loads", EN 1991-1-3:2003

Eurocode 1, "Actions on structures – Part 1-4 : General actions : Wind loads", EN 1991-1-4:2005

Eurocode 1, "Actions on structures – Part 2-5 : Traffic loads on bridges : Actions on footways, cycle tracks and footbridges", prEN 1991-2:2002

Janberg Nicolas, <http://www.structurae.de>, 2009

Jones Alan, "Rolling Bridge", in *Nyheter om stålbyggnad*, 1, 2006, pp. 30-33

Kinetic Architecture, <http://kineticarchitecture.net>, 2009

Packman Lucas structural design, <http://www.packmanlucas.com>, 2009

Pegasus bridge, <http://www.pegasusbridge.fr>, 2009

R.G., "Roll with it", in *Architectural Review*, vol. 218, no. 1306, dec 2005 ., pp. 56-57

Reina Peter, "This London Bridge doesn't fall down, it does a backbend", in *Architectural Record* 192(12), december 2004, pp.230-232

Schlaich Bergermann and Partners, <http://www.sbp.de>, 2009

Segers Marie, 'Rolling Bridge', in *Staal_Acier*, 11, juni 2006, p. 16

Smeltz Andrew, "Engineering Bridges", in *Research/Penn State*, Vol. 19, no. 3, september 1998

The South East London Meccano Club, http://www.selmec.org.uk/article_0009_the_heatherwick_rolling_bridge.aspx, 2009

Thomas Heatherwick Studio, <http://www.heatherwick.com>, 2009

Van Berkel Ben, <http://www.unstudio.com/projects/name/E/1/109>, 2009

Van Bogaert Philippe, "Bruggenbouw vol I: onderbouw, betonnen bruggen", Academia Press, Gent, 2005

Van Bogaert Philippe, "Bruggenbouw vol II: stalen bruggen", Academia Press, Gent, 2005

3. DESIGN OF A TWISTING STEEL BRIDGE

Binnendijk S., “Werktuigonderdelen”, Technische uitgeverij H. Stam N.V., Keulen, 1968

Eurocode 1, “Actions on structures – Part 1-3 : General actions : Snow loads”, EN 1991-1-3:2003

Eurocode 1, “Actions on structures – Part 1-4 : General actions : Wind loads”, EN 1991-1-4:2005

Eurocode 1, “Actions on structures – Part 2-5 : Traffic loads on bridges : Actions on footways, cycle tracks and footbridges”, prEN 1991-2:2002

Hyva Hydraulics, <http://www.hyva.com>, 2009

Knuivers J.G., “Techniek en landbouw “, Stam-Robijns, Keulen, 1973 vierde druk, eerste druk 1957

Mabie & Ocvirk, “Mechanisms and Dynamics of Machinery”, John Wiley and Sons Inc., New York, 1966 tweede druk, eerste druk 1957

Maeslantkering, <http://www.keringhuis.nl>, 2009

Modenflex, <http://www.modenflex.com>, 2009

Norelem, “The big green book”, Norelem, Markgröningen, 2006

Polak Peter, “Engineering Design Elements”, McGraw-hill book company, Londen, 1991

Staalinfocentrum, <http://www.infosteel.nl>, 2009

Terzidis Kostas, <http://www.gsd.harvard.edu/people/faculty/terzidis/index.html>, 2009

Thomas P., “Inleiding tot de sterkteleer”, Faculteit toegepaste wetenschappen, Universiteit Gent, 1999

Walterscheid Jean, « Transmissions à cardan et limiteurs de couple (débrayages de surcharge) pour machines agricoles et speciales », Walterscheid, Lohmar, 1967

