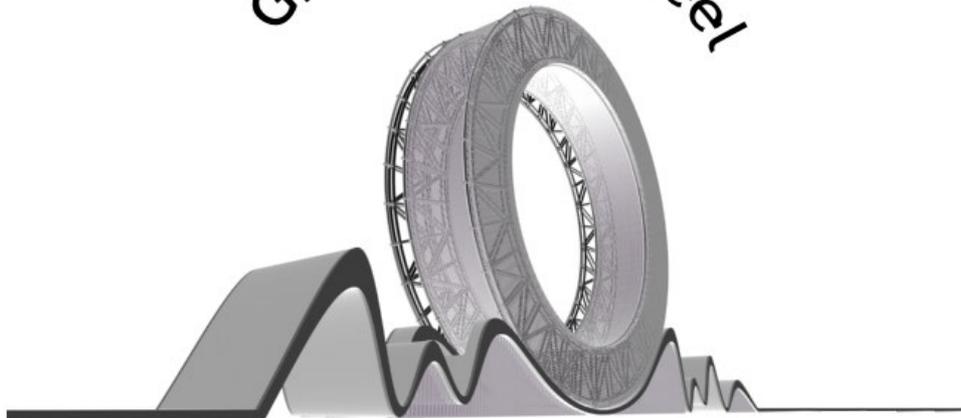


Great Dubai Wheel



De constructieve haalbaarheid van 's werelds eerste
multifunctionele spaakloze reuzenrad



Contactgegevens

Commissie:

Afstudeervoorzitter:

Prof. Dipl.-Ing. J.N.J.A Vamberský

CT-S2 1.49

T | 015 278 5488

E | J.N.J.A.Vambersky@tudelft.nl

Commissieleden:

Dr. Ing. A. Romeijn

CT-S2 2.55

T | 015 278 3705

E | A.Romeijn@tudelft.nl

Ir. K.C. Terwel

CT-S2 1.54

T | 015 278 1512

E | K.C.Terwel@tudelft.nl

Dr. Ir. P.C.J. Hoogenboom

CT-HG 6.48

T | 015 278 8081

E | P.C.J.Hoogenboom@tudelft.nl

Afstudeerder:

J.A.N.Bolleboom (Sjors)

Trompstraat 68

2266 KL Leidschendam

T | 070 327 3267

06 1530 1598

E | sjorsbolleboom@gmail.com



Voorwoord

Dit rapport is tijdens het zesdejaar van mijn studie Civiele Techniek geschreven als het eindrapport van mijn afstudeerwerk met als onderwerp het Great Dubai Wheel. In dit rapport zal de haalbaarheid van het innovatieve reuzenradontwerp van het 185 meter hoge Great Dubai Wheel zal in dit rapport beschreven worden.

Dit rapport is geschreven door een zesdejaars student Civiele Techniek in het kader van het afstudeerwerk.

Lezers die geïnteresseerd zijn in het ontwerp van het reuzenrad zullen dit in hoofdstuk 2 en 3 terugvinden. Hoofdstuk 4 en 5 tonen de uitgangspunten voor de verdere analyse van de constructieve haalbaarheid, welke plaatsvindt in hoofdstuk 6 t/m 9.

Ik wil graag de leden van mijn afstudeercommissie bedanken voor hun bijdrage aan dit afstudeerproject. Daarnaast worden de medewerkers van Corsmit bedankt voor hun hulp en de goede werksfeer.

Rijswijk, 2008

Sjors Bolleboom



Inhoudsopgave

Contactgegevens.....	I
Voorwoord	III
Samenvatting.....	IX
1 Inleiding	1
1.1 Project.....	2
1.2 Reuzenraden.....	8
1.3 Structuur	15
2 Ontwerp	17
2.1 Architectonisch ontwerp.....	18
2.2 Functioneel ontwerp	19
2.3 Constructief ontwerp.....	21
2.4 Basisontwerp	28
3 Ontwerp; functionele aspecten	29
3.1 Capsules	29
3.2 Liftsysteem	39
3.3 Oplegging.....	43
3.4 Aandrijving.....	49
3.5 Knooppunten.....	52
3.6 Profielen	54
3.7 Aanbeveling.....	55
4 Belastingen	57
4.1 Permanente belasting	58
4.2 Veranderlijke belastingen	61
4.3 Rotatie belastingen	66
4.4 Belastingen uit opgelegde vervormingen	69
4.5 Overzicht belastingen	70

5	ESA-model	73
5.1	Berekeningsmethode	73
5.2	Materiaal	74
5.3	Elementen	74
5.4	Belastingen	80
6	Statische- en vermoeiingssterkte	83
6.1	Reactiekrachten in de opleggingen.....	84
6.2	Normaalkracht.....	90
6.3	Momenten	96
6.4	Dwarskracht	101
6.5	Invloed uitkragende bevestiging capsules.....	102
6.6	Vermoeiingssterkte	108
6.7	Aanpassingen met betrekking tot de vermoeiingssterkte	112
6.8	Conclusie	138
7	Stijfheid	139
7.1	Globaal vervormingsgedrag huidig ontwerp.....	140
7.2	Initiële vervorming, ten gevolge van permanente belasting	142
7.3	Bijkomende vervormingen, ten gevolge van veranderlijke belasting	149
7.4	Overzicht.....	156
7.5	Conclusie.....	157
8	Stabiliteit.....	159
8.1	Globale stabiliteit.....	160
8.2	Lokale stabiliteit	170
8.3	Conclusie	177
9	Dynamisch gedrag	179
9.1	Eigenfrequentie	180
9.2	Windtrillingen	185
9.3	Dynamische vergrotingsfactor (Φ_1).....	188
9.4	Conclusie	189
10	Conclusies en aanbevelingen	191
10.1	Conclusie	191
10.2	Aanbevelingen.....	192



Bronnenlijst.....	197
Bijlage A: Tekeningen.....	199
Bijlage B: Belastingen.....	201
B.1 Uitleg bepaling eigen gewicht capsule.....	201
B.2 Grondeigenschappen	205
Bijlage C: ESA-model.....	209
Bijlage D: Sterkte	211
Bijlage E: Stijfheid	213
E.1 Invloed hoogte axiale oplegging op stijfheid.....	213
E.2 Invloed opleglengte op de verticale vervorming t.g.v. eigen gewicht	215
Bijlage F: Stabiliteit	219
F.1 Dwarsdoorsnede.....	219
F.2 Kantelinstabiliteit.....	220
F.3 Lokale stabiliteit	227
Bijlage G: Rolopleggingen	228
Bijlage H: Bouwmethode	230

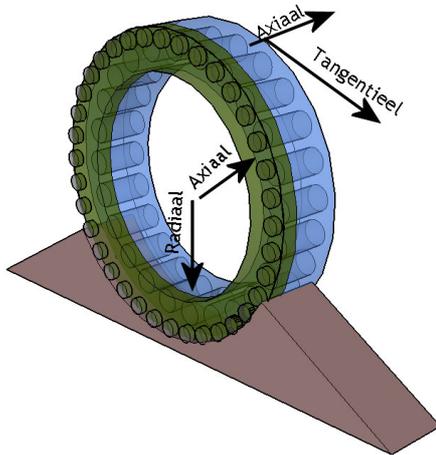


Samenvatting

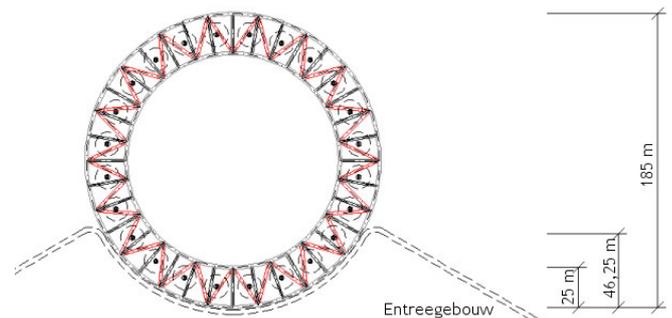
Om in Dubai ook na het opdrogen van de olievoorraad voldoende inkomsten te genereren zal in de komende jaren veel geld worden geïnvesteerd in grootschalige projecten op het gebied van handel en toerisme. Eén van de plannen is de ontwikkeling van Dubailand, 's werelds grootste attractiepark. Een eyecatcher van zowel Dubai als Dubailand zal het Great Dubai Wheel worden, een 185 meter hoog multifunctioneel reuzenrad, dat in tegenstelling tot de reeds bestaande reuzenraden geen spaken heeft.

Het rad bestaat uit drie functionele ringen met elk een andere rotatietijd, variërend van enkele minuten voor de transportring, een half uur voor de zichtring, tot zes uur voor de hoofdring en de hoofddragconstructie. In figuur 1 zijn de functionele ringen getoond, waarbij de blauwe ring de plaats aangeeft van de hotelring, de groene ring die van de transportring en de grijze ring geeft de plaats van de zichtring aan.

Het rad is opgebouwd uit drie vakwerkringen, welke de vorm hebben van een verstijfd Warren-vakwerk. De ondersteuning van het rad zal aan de voet plaatsvinden, waar het rad op een glijoplegging wordt geplaatst. Tevens zal hier de aandrijving van het rad plaatsvinden.



Figuur 1 - Richtingen rad



Figuur 2 - Constructief ontwerp Great Dubai Wheel

De vraag is of het concept van het nieuwe spaakloze reuzenrad constructief haalbaar is. Hiertoe is een constructieve haalbaarheidsanalyse uitgevoerd, waarin gekeken wordt naar de constructieve aspecten van het huidige ontwerp, zoals de sterkte, stijfheid, stabiliteit en het dynamisch gedrag. Verder zijn mogelijke aanpassingen aan het huidige ontwerp om het rad haalbaar te maken onderzocht.

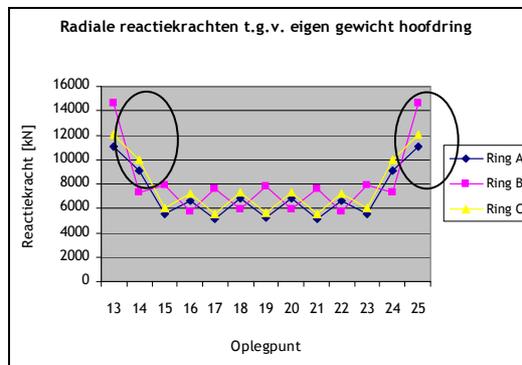
Voor de statische sterkte kan het volgende geconcludeerd worden:

- In het reactiekrachtverloop over de opleggingen ontstaat ter plaatse van de hoogste oplegging een piek welke zeer ongunstig is voor het ontwerp van de opleggingen.
- Deze piek is ook terug te vinden in het krachtsverloop in de vakwerkring van het rad. Zowel het verloop van de normaalkracht, het moment als de dwarskracht in de elementen van de vakwerkring, vertonen een piek ter plaatse van de hoogste oplegging.
- Als gevolg van deze piek zal in het rad, wanneer deze door zowel permanente belasting als windbelasting wordt belast, een spanning optreden welke de vloeispanning van 355 N/mm^2 , overschrijdt.

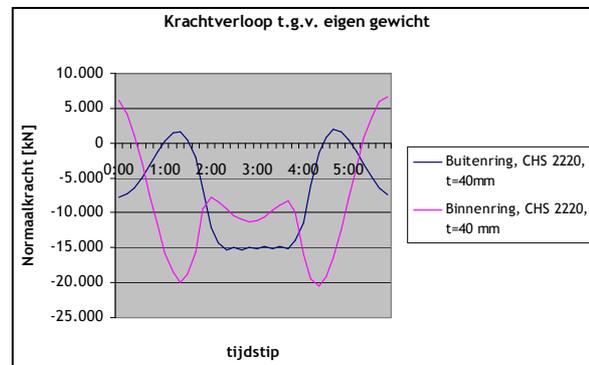
- De piek zal gereduceerd moeten worden om aan de statische sterkte-eis te voldoen.

Het rad zal echter niet stilstaan, maar roteren, waardoor het ontwerp naast de statische sterkte tevens op vermoeiingssterkte moet worden gecontroleerd. Met betrekking tot de vermoeiingssterkte kan het volgende geconcludeerd worden:

- Door het optreden van de spanningswisseling zal het niet voldoende zijn om de optredende spanningen lager dan de vloeispanning te houden. De spanningswisselingen nabij de knooppunten zullen lager moeten zijn dan de vanuit vermoeiing toelaatbare spanningswisseling van ongeveer 100 N/mm^2
- De toelaatbare spanningswisseling wordt overschreden. Het ontwerp van het rad zal aangepast moeten worden zodat de spanningswisselingen afnemen. Mogelijke aanpassingen zijn het vergroten van de profieldoorsnede van CHS 2200 naar CHS 3000, het aanpassen van de knooppunten, om de spanningsconcentraties weg te nemen, en het aanpassen van de opleggingen, om zodoende de piekspanning boven de hoogste oplegging weg te nemen.



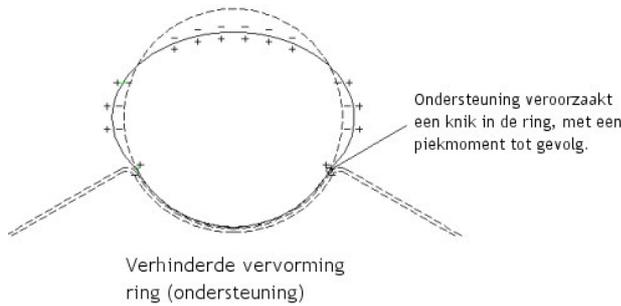
Figuur 3 - Verloop radiale reactiekrachten, ten gevolge van eigen gewicht



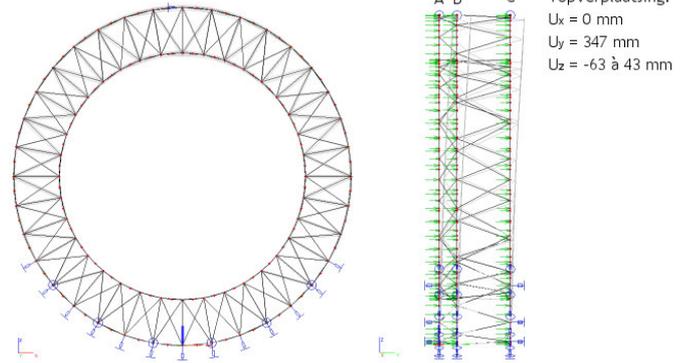
Figuur 4 - Verloop normaalkracht in de buiten- en binnenring van ring C, ten gevolge van eigen gewicht hoofdraagconstructie

De constructie voldoet aan de stijfheidseis; de bijkomende scheefstand uit veranderlijke belastingen is kleiner dan $1:500 h_{\text{totaal}}$. Het is dan ook niet noodzakelijk de stijfheid van het huidige ontwerp aan te passen. Geconcludeerd kan worden dat:

- De constructie zich onder verticale belastingen tot een ovaal zal willen vervormen. Deze vervorming wordt echter verhinderd door de opleggingen, waardoor ter plaatse van de hoogste oplegging een knik in de vervorming optreedt. Deze knik veroorzaakt de spanningspieken in het hoofdtraag.
- De zwaartelijn van de belasting en de stijfheid voor de permanente belastingen niet samen valt. Hierdoor vervormt de constructie als een buiglijger en ontstaat een initiële scheefstand, welke eventueel weggesteld kan worden.
- De vervorming ten gevolge van de windbelasting afhankelijk is van de locatie van het hoogste steunpunt.



Figuur 5 - Gedrag constructie onder verticale belasting



Figuur 6 - Vervorming constructie onder axiale windbelasting

	δ_z verticaal	δ_y horizontaal
Eigen gewicht hoofdraagconstructie	-100 mm	20 mm
Eigen gewicht hoofdcapsule	-56 mm	80 mm
Eigen gewicht zichtcapsule	1 mm	-18 mm
Veranderlijk vloerbelasting	-16 mm	23 mm
Axiale wind	-63 mm	347 mm

Tabel 1 - Overzicht topverplaatsing, ring C

Naast stijfheid speelt tevens het dynamische gedrag van de constructie een belangrijke rol voor het comfort van de passagiers. Geconcludeerd kan worden dat:

- De constructie, gezien de lage eigenfrequentie van ongeveer 0,37 Hz, gevoelig zal zijn voor windtrillingen.
- De maximale versnelling van de constructie voldoende laag is. De optredende versnelling bedraagt $0,13 \text{ m/s}^2$, waar een maximale versnelling van $0,15 \text{ m/s}^2$ is toegestaan.
- De bijkomende versnelling van de capsules ten gevolge van windbelasting nader onderzocht zal moeten worden.

De stabiliteit van de constructie voldoet op globale stabiliteit, maar niet op lokale stabiliteit. Het volgende kan geconcludeerd worden:

- De dwarsdoorsnede heeft de vorm van een ongeschoord raamwerk, de stabiliteit wordt verkregen uit de buigstijfheid van de constructieve elementen en de rotatiestijfheid van de knooppunten.
- Door de plaatsing van de axiale opleggingen op meerdere niveaus zal de constructie niet kantelen onder windbelasting. Het huidige ontwerp waarbij de axiale opleggingen over de gehele opleglengte zijn verdeeld, is stabiel.
- Doordat de opleggingen zich op meerdere niveaus bevinden, zal de constructie niet kantelen ten gevolge van de axiale windbelasting.
- Het tweede orde effect van de constructie is lager dan 10%. Deze waarde is vergelijkbaar met de voor hoogbouw gebruikelijke waarden, welke tussen de 0 en 20% liggen.



1 Inleiding

In navolging van het succesvolle reuzenrad in Londen, worden er over de hele wereld plannen gemaakt en uitgevoerd voor de bouw van nieuwe steeds grotere reuzenraden. Deze nieuwe reuzenraden zullen als icoon dienen voor de diverse wereldsteden.

Ook in Dubai zijn er plannen voor de ontwikkeling van een nieuw 185 meter hoog reuzenrad. In tegenstelling tot de reeds ontwikkelde reuzenraden waarbij gebruik is gemaakt van het 'spakenwiel-concept', zullen in het Great Dubai Wheel geen spaken worden gebruikt. Door het verdwijnen van de spaken zal de constructie niet meer bevestigd zijn aan een centrale as, maar de constructie van het Great Dubai Wheel zal roteren over roloplegging aan de voet. De wijziging van het ontwerpprincipes zal grote gevolgen hebben voor het constructieve gedrag van het rad.

In tegenstelling tot de reeds bestaande reuzenraden is in het ontwerp van het Great Dubai Wheel gekozen voor een afwijkend ontwerp zonder spaken.

Niet alleen is de constructie van het Great Dubai Wheel innovatief van karakter, ook de gebruiksfuncties van het rad zijn uniek. Waar in de conventionele raden de capsules enkel als zichtcapsules worden gebruikt zullen in het Great Dubai Wheel verschillende capsules met verschillende functies aanwezig zijn, zoals verblijffunctie (hotel), transportfunctie (lift) en zichtfunctie (zichtcapsules). De verschillende functies zullen elk specifieke eisen stellen aan het ontwerp van zowel de capsules als het rad.

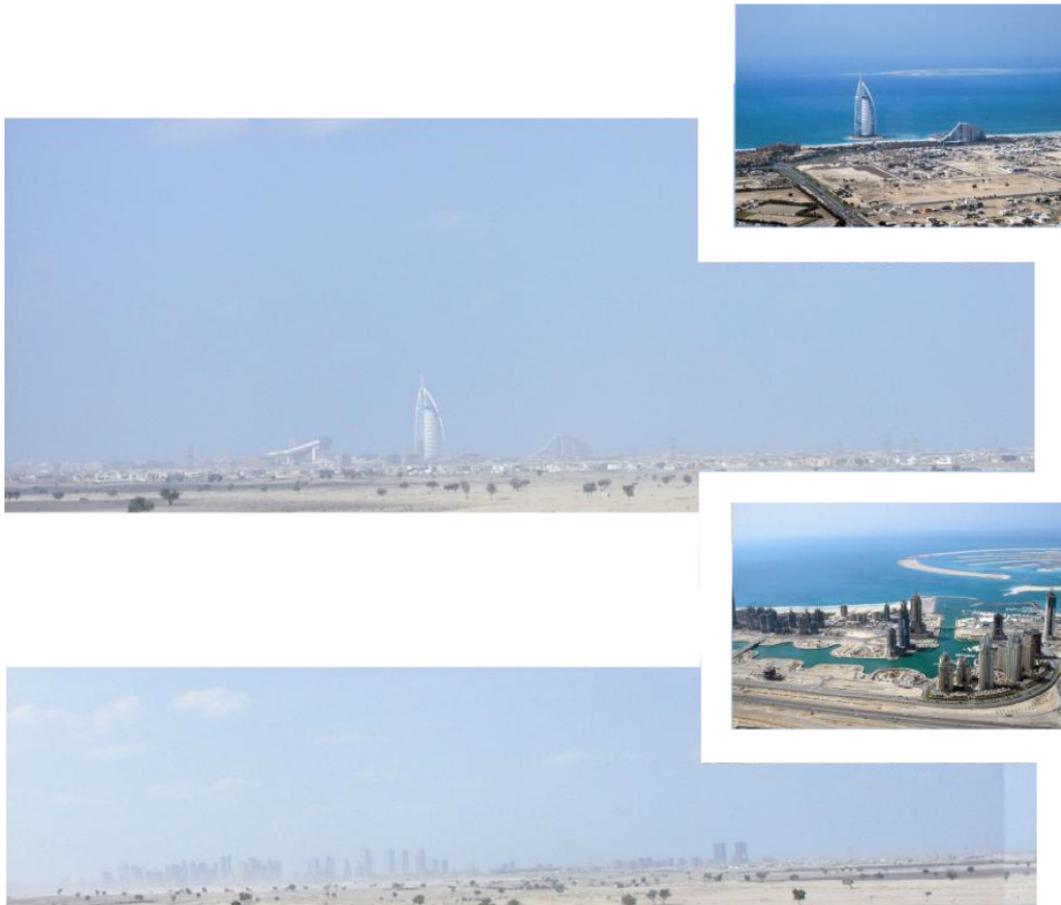
Vanwege het innovatieve karakter van het ontwerp van het Great Dubai Wheel zal de huidige kennis op het gebied van conventionele reuzenraden (spakenwiel) niet toereikend zijn. Om een haalbaar ontwerp te realiseren zal het functionele ontwerp en het daaruit voortvloeiend constructieve ontwerp van het rad haalbaar moeten zijn. In dit rapport zal de haalbaarheid van zowel het functionele, als het constructieve ontwerp worden geanalyseerd.

Het doel van deze afstudeeropdracht is het onderzoeken van de functionele en constructieve haalbaarheid van het huidige conceptuele ontwerp van het Great Dubai Wheel.

1.1 Project

Het 'Great Dubai Wheel' zal het nieuwe icoon van Dubai worden. Het reuzenrad is een onderdeel van het nieuw te ontwikkelen gebied Dubailand, waarvan in 2003 de plannen zijn gepresenteerd.

Voor de ontwikkeling van het 'Great Dubai Wheel' werd in 2005 de 'Great Wheel Corporation' gecontracteerd. De 'Great Wheel Corporation' is betrokken bij de realisatie van reuzenraden in diverse wereldsteden, waaronder Peking, Singapore en Dubai.



Figuur 9 - Huidig uitzicht vanuit het 'Great Dubai Wheel' ('Burj El Arab', boven en de haven, onder)

1.1.1 Het 'Great Dubai Wheel'

Het ontwerp van het Great Dubai Wheel kan opgedeeld worden in twee fasen. Gestart werd, in mei 2005, met het ontwerp van een conventioneel (spakenwiel) rad. Om van het rad echter een echte blikvanger voor Dubai te maken werd in 2007 een prijsvraag uitgeschreven. Door de gebruikelijke spaken uit het ontwerp weg te nemen ontstond het huidige innovatieve ontwerp.

Eerste ontwerp

De start van het ontwikkelen van het 'Great Dubai Wheel' vond plaats op 12 mei 2005. In februari 2007 werd het eerste masterplan voor het 'Great Dubai Wheel' gepresenteerd.

Het eerste ontwerp was gebaseerd op het veelgebruikte 'spakenwiel'-principe, waarbij de buitenring wordt voorgespannen via spaken, welke tevens de buitenring aan het centraal



gelegen draaipunt bevestigen. Het ontwerp vertoonde grote overeenkomsten met reuzenraden als het 'London Eye' en het 'Beijing Wheel'.



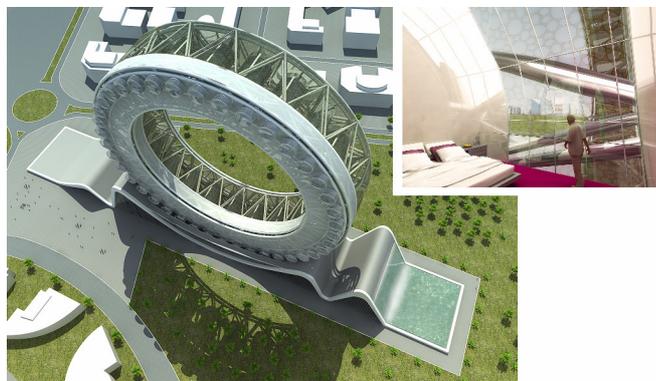
Figuur 10 - Eerste ontwerp 'Great Dubai Wheel' en ontwerp 'Beijing Wheel' (inzet)

Het ontworpen rad heeft een hoogte van 185 meter en bevat 18 capsules (uitbreidbaar tot 36). De rotatietijd bedraagt 34 minuten.

Omdat het eerste ontwerp niet speciaal genoeg was en veel overeenkomsten had met andere reuzenraden werd, in 2007, besloten tot het uitschrijven van een prijsvraag.

Huidig ontwerp

Om tot een innovatief ontwerp te komen is, in het winnende ontwerp van Royal Haskoning, besloten om het 'spakenwiel'-concept los te laten. In het rad, met een hoogte van 185 meter, zijn de spaken weggelaten, waardoor een opening ontstaat met een diameter van 135 meter (even groot als het totale 'London Eye').



Figuur 11 - Huidig ontwerp 'Great Dubai Wheel'

De stijfheid van het rad wordt, door het weglaten van spaken, enkel verkregen uit de stijfheid van de ring, welke een dikte heeft van 25 meter.

Het rad wordt aan de voet ondersteund en gestabiliseerd. Om voldoende stabiliteit te verkrijgen is ervoor gekozen om de breedte te vergroten tot 40 meter en de ondersteuning tot $\frac{1}{4}$ van de hoogte te laten doorlopen.

In tegenstelling tot de conventionele reuzenraden bevinden zich in dit ontwerp niet enkel observatiecapsules, maar ook hotel-, bijeenkomst- en liftcapsules. De rotatietijd van de diverse capsules zal verschillen van enkele minuten (liftcapsules) tot zes uur (hotel- en bijeenkomstcapsules).

De rotatie van het rad levert een aanzienlijke spanningswisseling op. Gelet op de vermoeiingssterkte is het aantal spanningswisselingen, over de ontwerplevensduur van 50 jaar, gelimiteerd door de rotatietijd op 6 uur te stellen.

1.1.2 Locatie

Het 'Great Dubai Wheel' zal onderdeel uitmaken van het nieuw te ontwikkelen gebied Dubailand, gelegen in Dubai. In deze paragraaf wordt zowel het land Dubai, als het megaproject Dubailand kort beschreven.

Dubai

Het moderne Dubai (Arabisch: دبيّ, uitspr.: Dubāīy) is gesticht in 1971, als onderdeel van de Verenigde Arabische Emiraten.

Dubai deelt de politieke, militaire en economische functies met de andere emiraten binnen een federaal raamwerk. Elke emiraat heeft jurisdictie over zijn regelgeving en het verzorgen van lokale faciliteiten.

Dubai heeft de grootste bevolkingsomvang van de Verenigde Arabische Emiraten en het op één na grootste oppervlak.

Het grootste deel van de inkomsten van Dubai komt uit handel (Jebel Ali Free Zone Authority) en in toenemende mate van het toerisme en de dienstverlenende bedrijven. De inkomsten uit olie en natuurlijke gassen dragen slechts voor 3% bij aan de economie van Dubai.

Dankzij de innovatieve bouwprojecten en sportevenementen heeft Dubai een wereldwijde uitstraling.



Figuur 12 - Locatie Dubai



Geografie

Dubai is gelegen aan de Perzische Golf en grenst aan de emiraten Abu Dhabi, Sharjah en het sultanaat Oman. Dubai ligt in de Arabische woestijn en heeft geen natuurlijke rivieren of oases. Dubai heeft echter wel een natuurlijke baai, de Dubai Creek. Deze baai is uitgediept om toegang te verlenen aan grote schepen.

Een groot gedeelte van de vastgoedontwikkelingen vindt plaats ten westen van de Dubai Creek.

Seismisch gezien ligt Dubai in een zeer stabiele zone, het dichtstbijzijnde breukvlak, Het Zargos breukvlak, in Iran, ligt op 120 km van de Verenigde Arabische Emiraten. De invloed van dit breukvlak op Dubai is zeer klein. Ook de kans op een tsunami is zeer klein omdat de Perzische Golf niet diep genoeg is om een tsunami te veroorzaken.

Het klimaat in Dubai is warm en vochtig (60%) (droger tijdens extreme hitte), met temperaturen van boven de 40°C. De regenval is laag, ongeveer 150 mm per jaar, waarvan het merendeel valt tijdens de maanden januari, februari en maart.

Economie

Het bruto nationaal product van Dubai wordt geschat op 46 miljard Amerikaanse dollars. Oorspronkelijk was de economie van Dubai gebaseerd op de nationale olie reserves. Maar naar schatting zullen deze olie reserves rond 2010 uitgeput zijn.

De economie is diensgevolge veranderd van een olie economie naar een economie gebaseerd op handel en dienstverlening (ICT, financiën). Door het creëren van een gunstig belastingsklimaat hebben veel westerse bedrijven zich in Dubai gevestigd. Verder is een groot deel van de handel in edelmetalen in handen van Dubai.

De verschuiving van een economie gebaseerd op de olievoorraad naar een economie gebaseerd op handel en dienstverlening heeft ertoe bijgedragen dat tegenwoordig is de bijdrage van olie aan het bruto nationaal product slechts 3% bedraagt.

Ontwikkeling

De verandering van een olie afhankelijke economie naar een economie gebaseerd op dienstverlening en toerisme heeft de vastgoedontwikkeling een enorme stimulans gegeven. Op grote schaal worden nieuwe projecten gerealiseerd, met als gevolg dat Dubai de snelst groeiende stad ter wereld is geworden.

De enorme groei van de stad wordt gestimuleerd door enkele megaprojecten. Deze projecten zijn mede door gebuik van ultra moderne architectuur een weerspiegeling van de aspiraties van de huidige leider sjeik Mohammed bin Rashid Al Maktoum. De financiering van deze projecten is veelal afkomstig van internationale investeerders.

Enkele voorbeelden van megaprojecten zijn in figuur 13 t/m figuur 15 getoond.



Figuur 13 - Grootschalige kunstmatige landwinningprojecten Dubai



Figuur 14 - Dubailand, 's werelds grootste themapark



Figuur 15 - Business Bay, een nieuw handelscentrum gebouwd op een kunstmatig eiland

Dubailand

Het Great Dubai Wheel zal onderdeel uitmaken van het Dubailand project. Dubailand is een nieuw te realiseren gebied voor zowel toerisme als entertainment in Dubai, Verenigde Arabische Emiraten. Het idee voor Dubailand is afkomstig van de huidige leider van Dubai sjeik Mohammed Ben Rashid Al Maktoum en werd op 23 oktober 2003 officieel aangekondigd.

Het doel van de ontwikkeling van Dubailand is het verzekeren van Dubai als de belangrijkste toeristische bestemming van het Midden Oosten. Op korte termijn, dat wil zeggen in 2010, is het streven om ongeveer 15 miljoen toeristen naar Dubai te trekken. Dit doel zal bereikt worden door het creëren van een toeristische bestemming, die bezoekers uit de gehele wereld zal aantrekken.

Het project omvat de realisatie van 45 mega projecten en meer dan 200 subprojecten. De kosten voor het project worden geschat op \$20 miljard (ongeveer 14 miljard Euro). Naar schatting is het gehele project afgerond tussen 2015 en 2018.

Het Dubailand project beslaat een totaal oppervlakte van maar liefst 278 km². De oppervlakte zal tweemaal zo groot zijn als Disney World, Florida, momenteel 's werelds grootste thema park.



Figuur 16 - Locatie Dubailand en het Great Dubai Wheel

De zes hoofdthema's (werelden) van Dubailand zijn:

- Attractions & Experience World (13,9 km²): Het attractiepark van Dubailand.
- Sports & Outdoor World (32,9 km²): Het sportcomplex van Dubailand.
- Eco-Tourism World (130 km²): Het gebied gericht op natuur en wetenschap.
- Themed Leisure & Vacation World (29,7 km²): Het gebied met de hotels van Dubailand.
- Downtown (1,8 km²): Het internationale woon en winkelcentrum van Dubailand.
- Retail & Entertainment World (4 km²): Het gebied voor entertainment en winkelen.

Het Great Dubai Wheel zal zich in het noord westen van Dubailand bevinden, in het gebied Downtown. Het subthema van het gebied zal Athenopolis zijn. Het gebied refereert aan de Grieks Romeinse tijd. In zowel het ontwerp van de infrastructuur, als van de gebouwen zijn invloeden uit deze tijd te zien. Zo is het ontwerp onder andere gebaseerd op de Acropolis, het Colloseum, het Pantheon enz.



Figuur 17 - Overzicht Athenopolis

1.2 Reuzenraden

Het ontwerp van reuzenraden kenmerkt zich zowel in het heden als in het verleden door een om een centrale as roterende constructie. Dit in tegenstelling tot het Great Dubai Wheel, waar het rad over een lijnvormige oplegging rolt.

In deze paragraaf zal allereerst een overzicht worden gegeven van de historische ontwikkeling van het reuzenrad. Vervolgens worden enkele hedendaagse reuzenraden behandeld.

1.2.1 Historische ontwikkeling van het reuzenrad (eng: Ferris Wheel)

De ontwikkeling van het reuzenrad zoals wij dit nu kennen begint volgens velen rond het einde van de 19^{de} eeuw. Het principe van het verticaal roteren van personen is echter reeds in de 17^{de} eeuw gedocumenteerd door Peter Mundy (1608-1667). In zijn boek 'The travels of Peter Mundy', over zijn reizen door Europa en Azië, beschrijft hij reeds de voorloper van het reuzenrad.



Figuur 18 - 17^{de}-eeuwse voorloper van het reuzenrad

Beginjaren

De ontwikkeling van de hedendaagse reuzenraden begon aan het eind van de 19^{de} eeuw, toen door George Ferris (1859-1896) een reuzenradontwerp werd gemaakt voor de 'World's Columbian Exposition' in Chicago, het 'Ferris Wheel'. Het 80 meter hoge rad werd ontworpen als rivaal van de in 1889 in Parijs gebouwde Eiffeltoren.

Dit eerste reuzenrad bestond uit 36 capsules die elk plaatsboden aan maximaal 60 personen. Het rad draaide in 20 minuten tweemaal rond.

Het ontwerp van het rad bestond uit een buitenring welke via voorgespannen spaken met de as werd verbonden. Het principe van het voorspannen van de ring wordt nog steeds toegepast in het ontwerp van de huidige reuzenraden.

Na de tentoonstelling werd het Ferris Wheel, afgebroken en herbouwt in St. Louis. In 1906 werd het rad definitief gesloopt.



Figuur 19 - Het originele 'Ferris Wheel', Chicago, 1893

Gebaseerd op het ontwerp van Ferris werden eind 19^{de}, begin 20^{ste}-eeuw reuzenraden gebouwd in Londen (1895-1907) en Parijs (1900-1937).

Het oudste operationele reuzenrad werd in 1897 in Wenen gebouwd. Het originele ontwerp had een diameter van 61 meter, hierin bevonden zich 30 capsules. Tijdens de herbouw na de Tweede Wereldoorlog werd het aantal capsules gereduceerd tot vijftien.

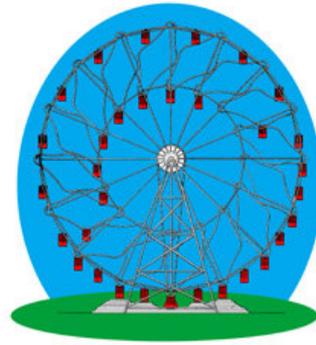


Figuur 20 - Het 'Riesenrad Vienna', Wenen, 1897

20^{ste} eeuw

In de loop van de 20^{ste} eeuw verloor het reuzenrad zijn status als blikvanger en werd het rad meer en meer een attractie op kermissen en in attractieparken.

In de jaren 20 werd een reuzenrad ontwikkeld met onafhankelijk beweegbare capsules, het 'Wonder Wheel'. In het rad bevinden zich 24 capsules, waarvan er zestien kunnen bewegen tussen de buiten- en binnenring. Deze capsules zullen zich als gevolg van de zwaartekracht over een rail tussen de binnenste en buitenste ring bewegen.



Figuur 21 - 'Wonder Wheel', Coney Island, 1920

Rond 1970 werd het oorspronkelijke concept van de reuzenraden gewijzigd om het in en uitstappen van de raden te versnellen. De ontwikkeling vond plaats in Amerika. In het originele ontwerp van de reuzenraden zal het gehele rad stoppen met roteren om mensen in en uit te laten stappen. Het nieuwe concept maakt gebruik van twee of drie afzonderlijk roterende raden welke aan een arm bevestigd zijn. Voor het in en uitstappen wordt het rad horizontaal geroteerd, hierdoor kan het gehele rad in één keer worden gevuld.



Figuur 22 - Triple Wheel, Marriott's Great America, 1976



Figuur 23 - Double Wheel, Zodiac, Kings Island

De ontwikkelingen in de twintigste eeuw waren voornamelijk gericht op het reuzenrad als attractie en minder op het reuzenrad als blikvanger.

Tegenwoordig

Aan het eind van de 20^{ste} en het begin van de 21^{ste}-eeuw neemt de belangstelling voor de bouw van reuzenraden wederom toe. De diameter van de reuzenraden neemt toe tot meer dan honderd meter en de nieuwe reuzenraden worden gezien als blikvanger van de stad. Door de toename van de diameter bieden de raden een uitstekend uitzicht over de omgeving.

Een bekend voorbeeld van de hedendaagse reuzenraden is het 'London Eye'. Het ontwerp werd gemaakt ter gelegenheid van het nieuwe millennium. Ten tijde van de ingebruikname was het 'London Eye', met een diameter van 135 meter, het hoogste reuzenrad ter wereld.

De populariteit van het London Eye was voor vele steden de aanleiding tot het ontwerp van reuzenraden. Inmiddels is het London Eye overtroffen door 'The star of Nanchang' (160 meter) en de 'Singapore Flyer' (165 meter). De ontwikkeling van reuzenraden is nog in volle gang en zo ook de toename van hoogte. In de toekomst zullen waarschijnlijk zelfs reuzenraden groter dan 200 meter worden gebouwd. Het 'Beijing Wheel' zal met zijn geplande hoogte van 208 meter alle huidige records moeten breken.



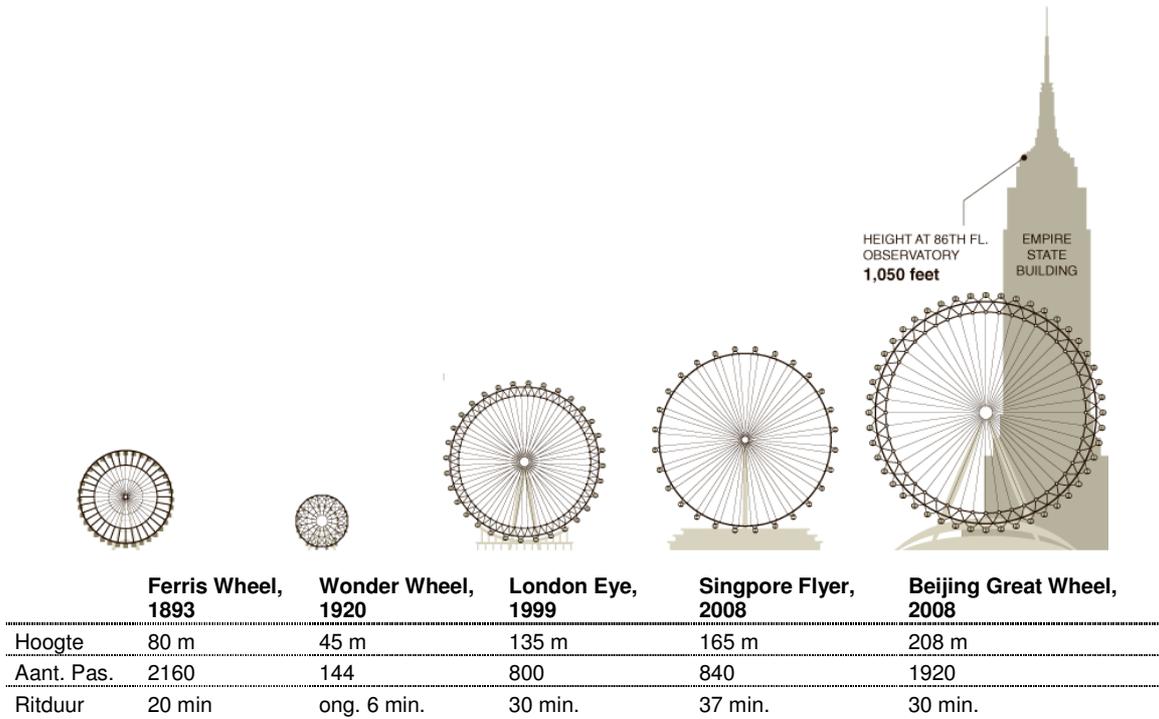
Figuur 24 - London Eye, 135 m, 2000



Figuur 25 - Singapore Flyer, 165 m, 2008



Figuur 26 - Beijing Wheel, 208 m



Figuur 27 - Ontwikkeling hoogte reuzenraden

1.2.2 Referentieprojecten

London Eye, Londen, 2000, 135 meter

Het London Eye wordt gezien als het omslagpunt van het reuzenrad als attractie naar blikvanger voor een stad. Het rad was onderdeel van een groot aantal projecten ter gelegenheid van het nieuwe millennium. Ten tijde van de ingebruikname van het rad in 2000 was het rad met een hoogte van 135 meter het grootste rad ter wereld. Aan het wiel zijn 32 capsules bevestigd welke elk plaats biedt aan 25 passagiers.



Figuur 28 - London Eye

De constructie van het rad is gebaseerd op het ‘spakenwiel-principe, waarbij de velg middels voorgespannen spaken aan een centrale naaf is bevestigd. De velg heeft de vorm van een 3D-vakwerk, en kan torsiekrachten opnemen. De uiteindelijke locatie van het ‘London Eye’, boven de rivier, maakte een dubbelzijdige ondersteuning van het rad erg moeilijk. Gekozen is om het rad slechts aan één zijde te ondersteunen en over de rivier uit te laten kragen.

De verticale belasting op het wiel zal in de naaf worden opgenomen. Om de horizontale belastingen op te nemen en om het rad langs het instapplatform te geleiden wordt het rad aan de voet zijdelings gesteund ter plaatse van de aandrijfmotoren. Bij windsnelheden hoger dan 20 m/s, op 10 meter boven de grond, wordt het rad gesloten.

De lage eigenfrequentie van 0,25 Hz leidde tot te grote versnellingen onder windbelasting. Om het comfort van de passagiers te verbeteren zijn op het rad tuned-mass dempers aangebracht.

Als gevolg van de beperkte ruimte op het land en de eindlocatie boven de rivier werd als bouwmethode gekozen om het rad horizontaal boven de Theems op te bouwen en vervolgens in de verticale eindpositie te brengen. De ring werd opgedeeld in vier delen welke over het water zijn aangevoerd.



Figuur 29 - Bouwmethode, London Eye



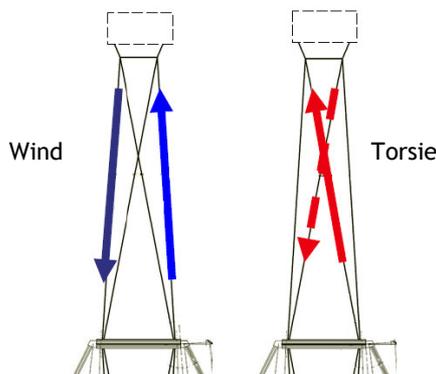
Singapore Flyer, Singapore, 2008, 165 meter

Met zijn diameter van 150 meter en een totale hoogte van 165 meter is de ‘Singapore Flyer’ momenteel het hoogste reuzenrad ter wereld. Aan het rad zijn 28 capsules bevestigd. Elke capsule (28 m^2) biedt plaats aan 28 passagiers.



Figuur 30 - Singapore Flyer

Zoals in vele hedendaagse reuzenraden wordt ook in de ‘Singapore Flyer’ gebruik gemaakt van het spakenwiel-principe. Waar in vele hedendaagse reuzenraden de velg uit een 3D-vakwerk bestaat, dat de torsie opneemt, is in de ‘Singapore Flyer’ gekozen voor een 2D-vakwerk. De torsiestijfheid wordt verkregen uit de ordening van de spaken.



Figuur 31 - Ordening van de spaken, reactie op windbelasting en torsie



Figuur 32 - Bouwmethode, Singapore Flyer

Het comfort van de passagiers vormde een belangrijk ontwerpuitgangspunt. Vanwege de lage eigenfrequentie (0,2 Hz) en het relatief lage eigen gewicht bleek de versnelling te hoog te zijn. Als maatregel werd aan de voet van het rad demping aangebracht. Verder is ervoor gekozen om het rad bij windsnelheden hoger dan 13 m/s, op 10 meter boven de grond, te sluiten.

Als bouwmethode van het rad is vanwege de beperkte ruimte gekozen voor een verticale bouwmethode. De onderdelen van het rad worden in delen gemonteerd, waarna het rad wordt geroteerd en het volgende deel gemonteerd kan worden.

Beijing Wheel, 208 meter

Het 'Beijing Wheel' zal met een hoogte van 208 meter het hoogste reuzenrad ter wereld worden. Aan het rad worden 48 capsules bevestigd, met elk ruimte voor 40 personen.



Figuur 33 - Beijing Wheel, Peking

De velg van het wiel is, net als het 'London Eye' opgebouwd uit een 3D-vakwerk welke via voorgespannen spaken aan een centrale as verbonden is, welke Het rad wordt evenals de 'Singapore Flyer' aan beide zijden ondersteund.

Om de passagiers van voldoende comfort te voorzien is gebruik gemaakt van tuned-mass dempers. Verder is besloten om het rad bij windsnelheden hoger dan 15 m/s, op 10 meter boven de grond, te sluiten.

Big O, Tokyo, 2003, 60 meter

De Big O bevindt zich in het attractiepark Dome City in Tokyo. Het rad werd in 2003 gebouwd. Het rad is het eerste en, met een diameter van 60 meter, tevens het grootste spaakloze reuzenrad ter wereld. Het rad heeft een diameter van 60 m.

Het rad bestaat uit een stilstaande binnenring waarlangs 40 capsules over een rails bewegen. De capsules bieden elk plaats aan 4 personen. Door gebruikt te maken van een stilstaande binnenring zal de grootte van de spanningswisselingen in de elementen beperkt blijven.



Figuur 34 - Big O, Tokyo



1.3 Structuur

Om de constructieve haalbaarheid van het ontwerp te onderzoeken zal allereerst een duidelijk beeld moeten worden gekregen van het ontwerp van de constructie. Dit gebeurt in hoofdstuk 2 en 3.

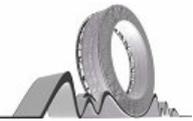
In hoofdstuk 2 wordt het huidige ontwerp van het Great Dubai Wheel beschreven. Ingegaan wordt op het architectonische, het functionele pakket van eisen en het constructieve ontwerp.

Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 ingegaan op de elementen in het ontwerp, onder andere op de functionele elementen, zoals de voor de verschillende functies noodzakelijke capsules, het liftstelsel, de aandrijving van het rad. Ook zal worden ingegaan op de meer constructieve elementen als de opleggingen, de knooppunten en de te gebruiken profielen.

Voor de analyse van het Great Dubai Wheel zal het rad worden gemodelleerd, en zullen de belastingen op het rad bepaald worden. Allereerst zal in hoofdstuk 4 de belasting worden bepaald. Vervolgens wordt in hoofdstuk 5 het voor de analyse gebruikte ESA-model gepresenteerd.

De werkelijke analyse van de constructieve haalbaarheid van het Great Dubai Wheel zal plaatsvinden in hoofdstuk 6 t/m 9. Achtereenvolgens wordt ingegaan op de volgende constructieve aspecten: de statische en vermoeiingsterkte (hoofdstuk 6), de stijfheid (hoofdstuk 7), de stabiliteit (hoofdstuk 8) en het dynamisch gedrag (hoofdstuk 9). Per hoofdstuk zal gekeken worden of het huidige ontwerp voldoet aan de gestelde constructieve eisen. Wanneer de constructie niet aan de eisen voldoet zullen aanpassingen aan het ontwerp uitgevoerd moeten worden, de noodzaak tot aanpassingen en de mogelijke aanpassingen zullen per aspect worden behandeld.

De conclusie en de aanbevelingen om het huidige ontwerp constructief haalbaar te maken zullen in hoofdstuk 10 gepresenteerd worden.



2 Ontwerp

Het ontwerp van het Great Dubai Wheel, zoals in figuur 35 getoond, is een artist-impression. Daar het ontwerp van het rad zich nog in een pril stadium bevindt, dient het getoonde ontwerp enkel als basis voor het verdere ontwerpproces. In het ontwerp kunnen nog wijzigingen plaatsvinden in zowel het architectonische, als het functionele, als het constructieve ontwerp.

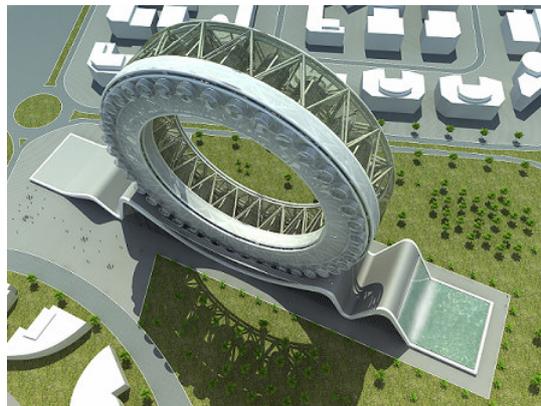
Het huidige ontwerp van het Great Dubai Wheel omvat een 185 meter hoog ronddraaiend rad, dat één van de eyecatchers van Dubailand zal worden. De buitendiameter bedraagt 185 meter, de dikte van de ring 25 meter en de diepte bedraagt 40 meter.

In het ontwerp ontbreken de voor conventionele reuzenraden gebruikelijke spaken. Waar in conventionele rad spaken fungeren om het gewicht naar het rotatiepunt te brengen, de stijfheid van de constructie te verhogen en het rad voor te spannen, moet het Great Dubai Wheel de stijfheid verkrijgen uit de constructie van de ring. Om een voldoende stijve ring te verkrijgen heeft de ring een dikte van 25 meter. Een toename van de dikte van de ring zal de grootte van de spanningswisselingen verlagen en daarmee de vermoeiingslevensduur vergroten.

Om de vermoeiingslevensduur van het rad verder te vergroten is het aantal rotaties van het rad en hierdoor tevens het aantal spanningswisselingen verlaagd. Om een ontwerplevensduur van 50 jaar te bereiken, is gekozen om het rad slechts vier rotaties per dag te laten maken. Hierdoor ontstaat een lange rotatietijd van zes uur per rotatie, waardoor het noodzakelijk wordt de capsules als semi-permanente verblijfruimtes in te richten. Dit was één van de redenen om te kiezen voor capsules met een hotelfunctie.

In het huidige ontwerp zijn verschillende belangrijke aspecten, zoals de oplegging, het aandrijvingmechanisme, de bevestiging van de capsules, etc., nog niet exact gedefinieerd. Het uiterlijk van het rad staat min of meer vast, maar de hoofddragconstructie bevindt zich nog in een fase waarin aanpassingen mogelijk zijn.

In dit hoofdstuk zullen het architectonische, het functionele en het constructieve ontwerp van het Great Dubai Wheel behandeld worden. Daarnaast zullen enkele varianten voor het functionele en constructieve ontwerp worden getoond.



Figuur 35 - Artist-impression, Great Dubai Wheel

2.1 Architectonisch ontwerp

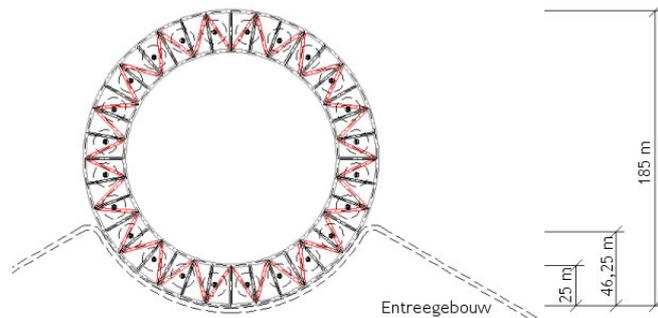
Het ontwerp van het rad wordt gekenmerkt door de ronde vorm en de grote opening in het midden, die volledig is vrijgehouden van elementen. Hierdoor ontstaat een voor reuzenraden uniek ontwerp.

Voor het uiterlijk van het Great Dubai Wheel speelt, zoals bij alle reuzenraden, de hoofdconstructie een belangrijke rol. Gestreefd is om een ruimtelijke constructie te creëren, die ontstaat door gebruik te maken van vakwerken, opgebouwd uit ronde buisprofielen.

In het huidige ontwerp, getoond in figuur 36 en figuur 37, is gekozen om het rad op te bouwen uit drie verticaal geplaatste vakwerkringen, opgedeeld in 36 stukken. Om de overspanning van de hoofdcapsule te beperken tot 30 meter en de totale breedte van het rad op 40 meter te houden, is ervoor gekozen om een extra tussenliggende vakwerkkring toe te voegen, die excentrisch geplaatst is. De extra ring vormt verder de scheiding tussen de hoofdtring (hotel en bijeenkomst) en de liftring. De toevoeging van de extra ring voorkomt dat het uiterlijk van het rad te eentonig wordt en geeft het rad een uniek uiterlijk.



Figuur 36 - Overzicht Great Dubai Wheel

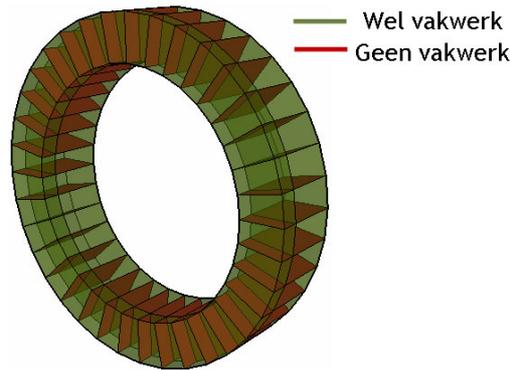
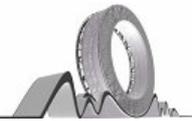


Figuur 37 - Huidige ontwerp ring

In het huidige ontwerp wordt de liftring afgedekt, wat de excentrische plaatsing van de vakwerkringen benadrukt en tevens als zonnewering voor de liftring fungeert. De afdekking kan gerealiseerd worden met een lichtgewicht membraan constructie.

De ring waarin de hoofdcapsules zich bevinden blijft open, waardoor het ruimtelijke beeld van het rad gewaarborgd blijft en het uitzicht niet belemmerd wordt door een eventuele afdichting. Wanneer de openingen gevuld zouden worden met bijvoorbeeld glas, zal een hulpconstructie noodzakelijk zijn vanwege de afmetingen van het glas. De klimaatscheiding zal verzorgd worden in de capsules. De gevel van de capsules zal grotendeels uit glas bestaan, hierdoor ontstaat een wijds uitzicht.

Door aan de binnenzijde van het rad geen vakwerken te plaatsen, blijft niet enkel het uitzicht vrij, ook komt dit de vrije indeelbaarheid van de ring ten goede en kan intern transport middels liften ongehinderd plaats vinden. Een nadeel van het weglaten van interne vakwerken is dat dit de stijfheid van de dwarsdoorsnede reduceert. In hoofdstuk 7, Stijfheid, wordt verder ingegaan op de stijfheid van de dwarsdoorsnede. In figuur 38 zijn de mogelijke locaties voor plaatsing van vakwerken getoond.



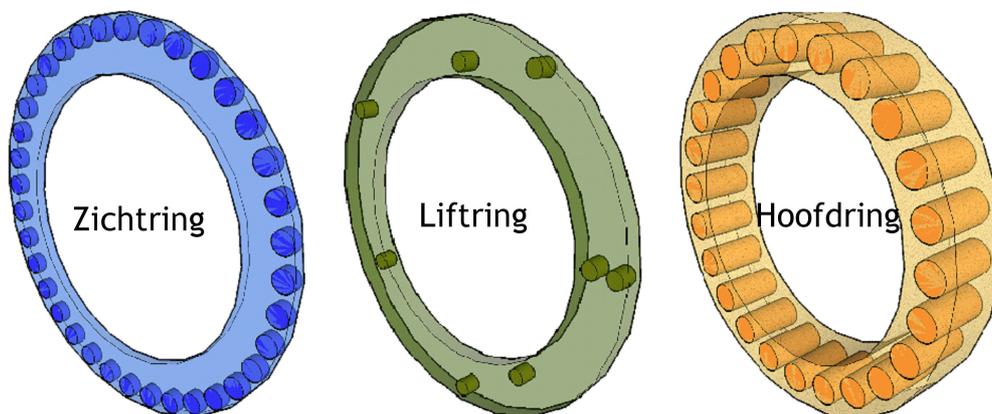
Figuur 38 - Mogelijke plaatsing vakwerken

2.2 Functioneel ontwerp

In het rad zijn onder andere een verblijffunctie (hotel), een transportfunctie (lift) en een zichtfunctie (zichtcapsules) ondergebracht, die het architectonische ontwerp beïnvloeden. De verschillende functies kunnen op verschillende manieren over de dwarsdoorsnede worden verdeeld. In deze paragraaf worden enkele indelingen getoond.

Huidig ontwerp

Het huidige ontwerp van het rad is opgebouwd uit drie functionele ringen, met elk een eigen functie. In figuur 39 zijn de verschillende functies getoond.



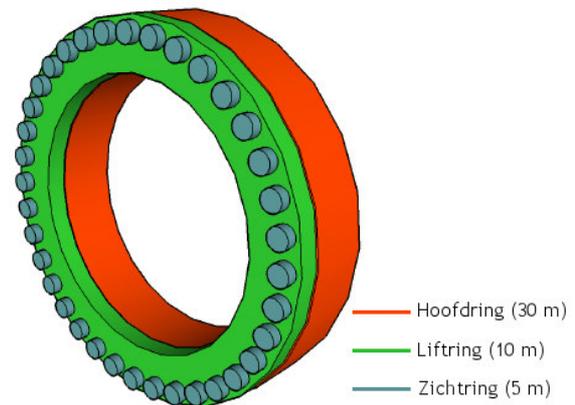
Figuur 39 - Functies in het rad

In het huidige ontwerp zijn de verschillende functies naast elkaar geplaatst. De functionele indeling van het rad wordt in figuur 41 getoond. De drie functionele ringen waaruit het rad is opgebouwd hebben dikten van 5, 10 en 30 meter. Binnen deze ringen bevinden zich verschillende functies (zichtrad = blauw, liftstelsel = groen en hotel = oranje).

In het huidige ontwerp is een zichtrad te vinden dat bestaat uit 36 capsules waar toeristen in korte tijd, 30 minuten, een rit kunnen maken. Daarnaast bestaat het ontwerp uit een snel roterend liftstelsel, voor het vervoer van en naar de hotelcapsules, en een hotelring, met 24 capsules met elk 16 kamers. In het huidige ontwerp zijn de hoofdcapsules (hotel) van de zichtcapsules gescheiden door de liftring. Hierdoor zal de overlast van de zichtcapsules (geluid en zicht) op gebruikers van de hoofdcapsules minimaal zijn.



Figuur 40 - Overzicht Great Dubai Wheel

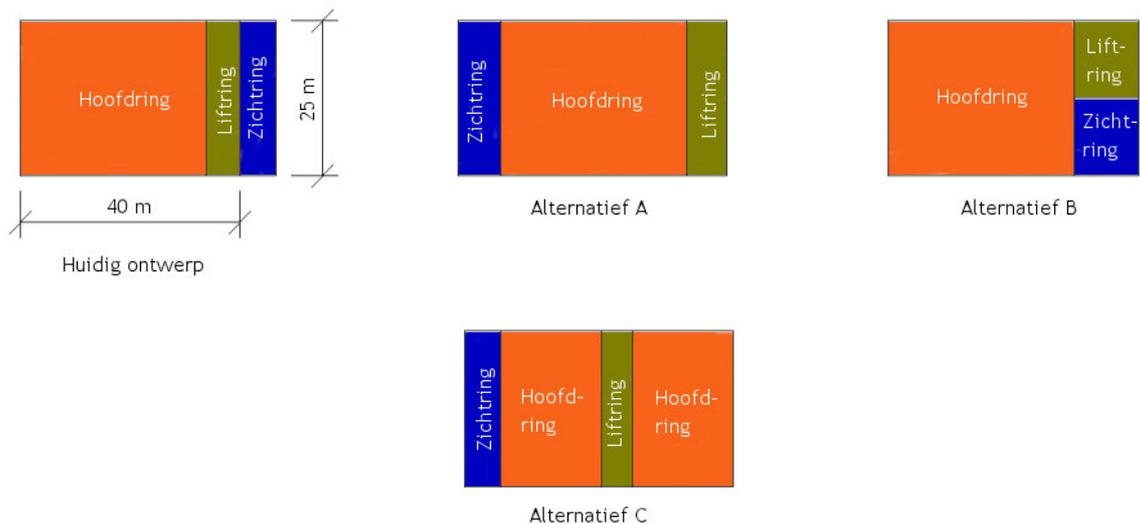


Figuur 41 - Overzicht functies Great Dubai Wheel

Alternatieven voor de functionele indeling

De indeling en de breedtes van de ringen, zoals deze getoond zijn in de bovenstaande figuur, zijn nog niet definitief. Zo zal het nog mogelijk zijn om bijvoorbeeld het zichtrad te verplaatsen naar de andere zijde van het rad om zodoende meer symmetrie in het rad te creëren. Een andere mogelijkheid om het ontwerp meer symmetrisch te maken, is de hoofdring op te splitsen en de liftring centraal te plaatsen. In het laatste geval zal de constructie en het uiterlijk van de ring ingrijpend gewijzigd worden.

Ook het aantal capsules en de afmetingen van de capsules kunnen nog gewijzigd worden.



Figuur 42 - Mogelijke functionele indelingen rad

Aanpassing van het huidige functionele ontwerp is vanuit constructief oogpunt niet noodzakelijk. Ook het aantal capsules zal ongewijzigd kunnen blijven. Het constructieve gedrag zal in H6 t/m H9 worden behandeld.

In dit rapport is uitgegaan van het huidige ontwerp, met de huidige functionele indeling.



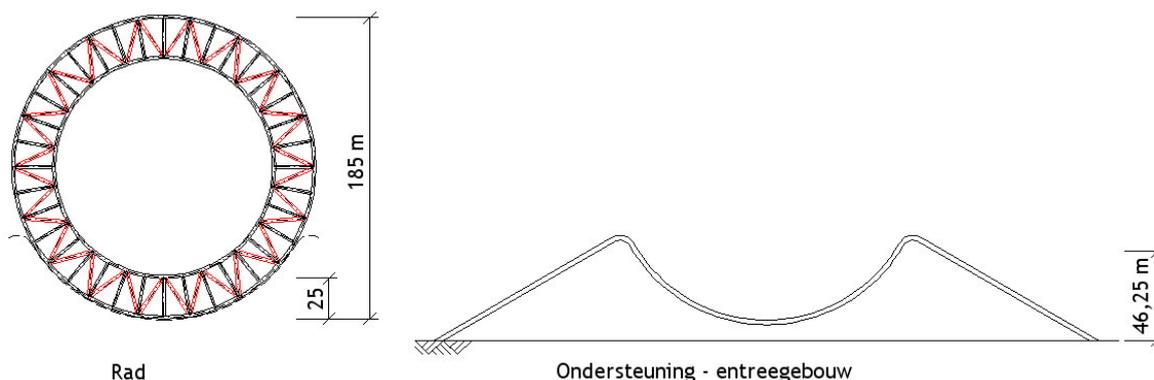
2.3 Constructief ontwerp

Het constructieve ontwerp van het Great Dubai Wheel moet zorgen voor voldoende sterkte, stijfheid en stabiliteit in de constructie. Tevens zal het constructieve ontwerp zodanig gedimensioneerd moeten worden dat het levensduur van het rad niet mogen beperken.

Om aan de bovenstaande eisen te voldoen is in het huidige ontwerp gekozen om het rad op te bouwen uit drie vakwerkkringen, welke onderling verbonden zijn met behulp van verbindingsdiagonalen in de wand.

Het constructieve gedrag wordt echter niet enkel bepaald door het ontwerp van het hoofdtrad. In het geval van het Great Dubai Wheel is ervoor gekozen om de hoofdconstructie op te leggen op het entreegebouw. Het ontwerp van de ondersteuningsconstructie in het entreegebouw zal de sterkte, stijfheid en stabiliteit van de constructie beïnvloeden.

Het constructieve ontwerp van zowel het rad als de onderbouw (entreegebouw) bevat vele variabelen, welke samen de constructieve eigenschappen van de constructie bepalen. In deze paragraaf wordt kort ingegaan op het ontwerp van het rad en de ondersteuning. In hoofdstuk 6 t/m 9 zullen de constructieve eigenschappen van de constructie nader beschouwd worden.



Figuur 43 - Constructieve hoofdelementen Great Dubai Wheel

2.3.1 Rad

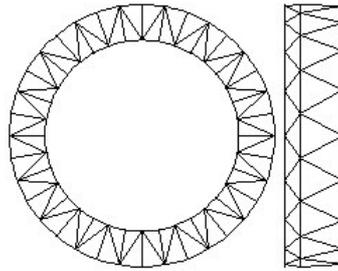
Het ontwerp van de hoofdconstructie is van invloed op het constructieve gedrag van Het Great Dubai Wheel.

Vakwerktype

Huidig ontwerp

Het constructieve ontwerp van het rad wordt gedomineerd door het gebruik van drie vakwerkkringen, waarvoor is gekozen vanwege de beperkte belemmering van het uitzicht, in vergelijking met een constructie opgebouwd uit gesloten schijven. Verder is een vakwerkconstructie aanzienlijk stijver dan een vierendeelconstructie en zullen er hierdoor lagere buigende momenten optreden in de knooppunten.

Het huidige ontwerp is opgebouwd uit een langzaam roterende hoofdtring, waaraan het zichtring en het liftring bevestigd zijn. Deze ringen hebben een rotatiesnelheid die onafhankelijk is van de rotatiesnelheid van de hoofdtring.

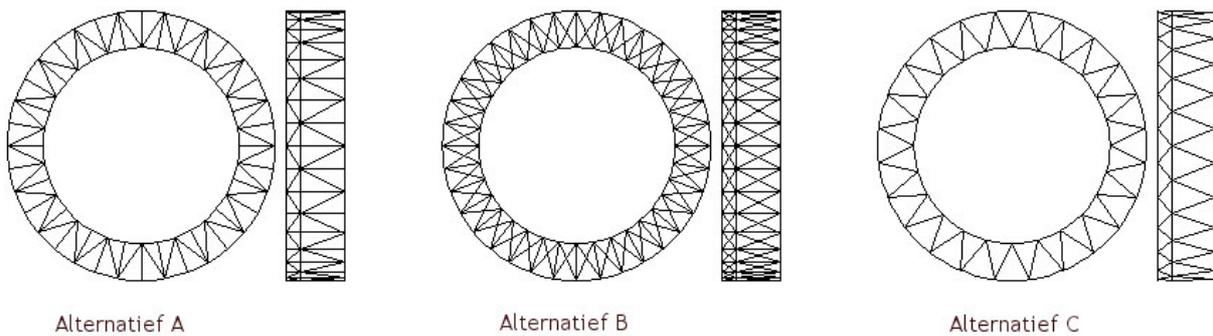


Figuur 44 - Huidig ontwerp rad

In het huidige ontwerp voor de ring is gekozen voor een Warren-vakwerk aangevuld met verticalen. De extra verticalen zorgen voor een afname van de lokale buiging in het randprofiel. De drie afzonderlijke vakwerkringen van het rad zijn onderling eveneens middels een Warren-vakwerk verbonden

Alternatief ontwerp

Het huidige ontwerp biedt nog de mogelijkheid tot het wijzigen van de vorm van het vakwerk. Mogelijkheden zijn het toevoegen van extra diagonalen, of het verhogen/verlagen van het aantal knooppunten. Enkele mogelijke veranderingen zijn in de onderstaande figuren te zien.



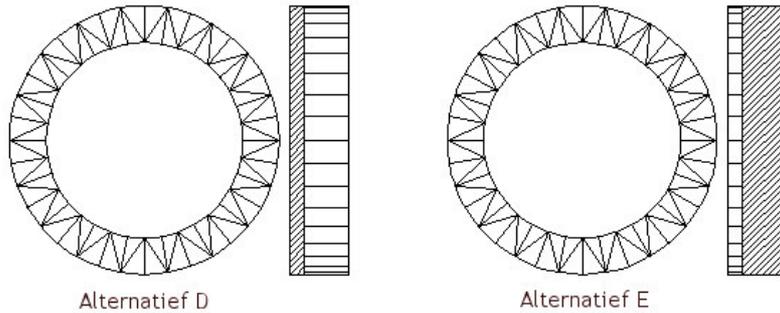
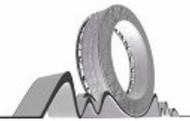
Figuur 45 - Verandering vakwerkform

Bij alternatief A is de dwarsdoorsnede verstijfd, door het toevoegen van horizontale staven.

Bij alternatief B is zowel de ring als de dwarsdoorsnede van het rad aangepast door een kruisverband toe te voegen. Een mogelijkheid in dit alternatief is het aanspannen van de diagonalen waardoor de verhouding van de spanningswisselingen zal verkleinen. Wanneer echter gelaste verbindingen worden gebruikt, zal dit voorspannen geen effect hebben op de vermoeiingslevensduur van het rad.

Bij zowel vakwerk A, als B wordt het uitzicht in sterke mate belemmerd door de toegevoegde elementen. Beide alternatieven zijn voornamelijk gebaseerd op het verhogen van de stijfheid.

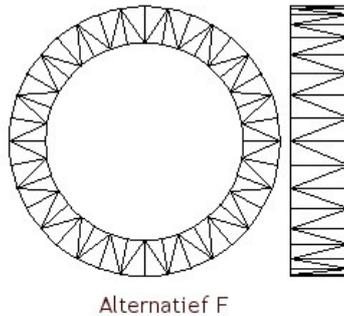
Bij alternatief C zijn de verticalen in het Warren-vakwerk weggelaten. Door het ontbreken van deze verticalen zal de stijfheid van de ring iets afnemen, de knooppunten zullen echter eenvoudiger worden, doordat er minder staven samenkomen.



Figuur 46 - Gedeeltelijke verstijving dwarsdoorsnede

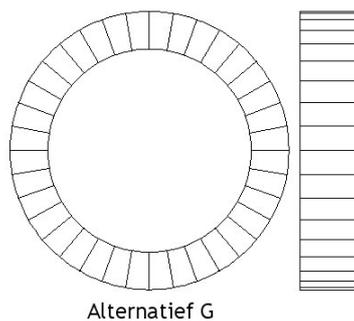
Bij de alternatieven D en E zal een deel van de dwarsdoorsnede de stijfheid in dwarsrichting verzorgen, vergelijkbaar met het gebruik van schijfwanden in een gebouw. Bij de aandrijving van deze alternatieven zal ervoor gezorgd moeten de ringen met een gelijke snelheid roteren.

De breedte van de schijf is afhankelijk van de benodigde stijfheid en de breedte van de ringen waarin het rad is opgedeeld. De schijven mogen niet gesloten zijn, omdat dit het uitzicht teveel zou beperken. Voor de schijf kan ook een vakwerk gebruikt worden.



Figuur 47 - Verandering aantal ringen

Bij alternatief F is gekozen om het wiel op te bouwen uit slechts twee ringen, waarin en waaraan zich de diverse functies bevinden. Door het weglaten van een ring zullen echter de overgebleven ringen zwaarder belast worden.



Figuur 48 - Toepassing Vierendeelconstructie

Een andere mogelijkheid is geen gebruik te maken van vakwerken, maar een Vierendeelconstructie te ontwerpen. In de knooppunten zullen nu naast normaalkrachten ook momenten optreden. De stijfheid van het wiel zal lager zijn dan bij de eerdergenoemde alternatieven. Een voordeel van het gebruik van een vierendeelconstructie is de beperkte belemmering van het uitzicht.

De getoonde alternatieven bieden de mogelijkheid tot variatie. Zo kan een zijaanzicht van alternatief C gecombineerd worden met een vooraanzicht van alternatief F.

Voor de analyse van het rad is uitgegaan van het huidige ontwerp, waarin de vakwerkringen de vorm hebben van een Warren-vakwerk.

Aanpassingen van het ontwerp van de vakwerkkring zijn in dit rapport niet rekentechnisch onderzocht.

De aanpassingen van de vakwerkdoorsnede zullen enkel noodzakelijk zijn wanneer na de analyse blijkt dat het huidige ontwerp niet voldoet op de aspecten sterkte, stijfheid, en/ of stabiliteit.

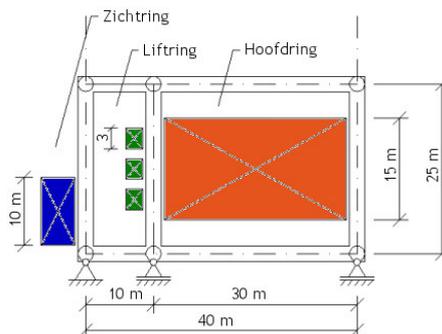
Dwarsdoorsnede en oplegsysteem

Ook de configuratie van de dwarsdoorsnede van het rad biedt nog de mogelijkheid tot variatie. Mogelijke variaties zijn het loskoppelen van de ringen, het opleggen van enkel het hotelrad, enz., zoals te zien is in de onderstaande figuren.

Bij het ontwikkelen van de alternatieven zijn intern geen constructieve elementen toegevoegd. Hoewel toevoegen van deze elementen het rad stijver zal laten reageren, is het vanuit architectonisch oogpunt niet toegestaan, zoals in paragraaf 2.1 getoond is.

Huidig Ontwerp

In het huidige ontwerp wordt onder elke ring een serie van opleggingen geplaatst. De belasting zal per oplegging verschillen, vanwege de asymmetrische plaatsing en het verschil van belasting afkomstig uit de verschillende ringen.



Figuur 49 - Huidig ontwerp opleggingen rad

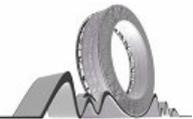
De huidige constructie is op drie plaatsen opgelegd en is daarmee uitwendig meervoudig statisch onbepaald. Ongelijke zettingen in de opleggingen zullen leiden tot een verandering van het krachtverloop in de ringen. De veerstijfheid van de ondersteuning zal van invloed zijn op het krachtsverloop in de constructie.

Alternatief ontwerp

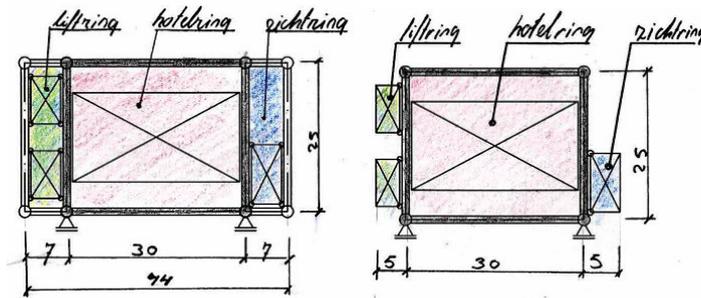
Indien het huidige ontwerp van de dwarsdoorsnede niet voldoet aan de constructieve eisen, zal het ontwerp aangepast moeten worden. In de hieronder getoonde aanpassingen is de dwarsdoorsnede vrij gehouden van constructieve elementen. De getoonde aanpassingen zullen het uiterlijk en de functionele indeling van het rad wijzigen.

De hierna getoonde wijzigingen zijn dan ook enkel ter indicatie van mogelijke alternatieve dwarsdoorsneden voor toekomstige raden.

Een mogelijk alternatief voor het huidige dwarsdoorsnede ontwerp is het plaatsen van opleggingen enkel onder de zwaarst belaste hoofdring, zoals in figuur 50 getoond is. De hoofdring zal bestaan uit een zware draagconstructie, waaraan lichtere ringen worden bevestigd voor de lift- en zichtring.



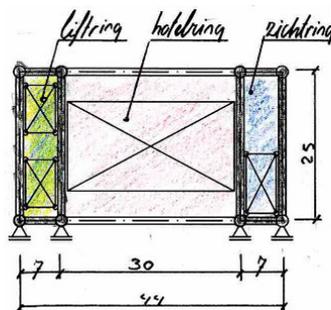
Dit ontwerp is statisch bepaald in axiale richting. De symmetrische doorsnede zorgt ervoor dat de initiële uitbuiging van de constructie onder het eigen gewicht beperkt blijft.



Figuur 50 - Oplegging onder hotelring, uitkragende zicht- en liftring

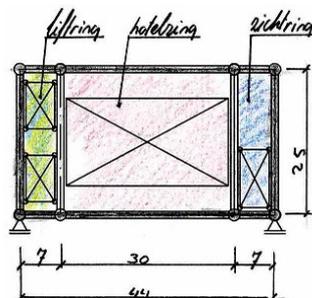
Een ander mogelijk alternatief is het plaatsen van opleggingen onder de lift- en zichtring welke wordt getoond in figuur 51, de hotelcapsules zullen tussen de vakwerkringen worden opgehangen. Deze ringen zullen voor de stijfheid van het rad zorgen, voornamelijk stijfheid in verticale zin. Indien beide ringen worden aangedreven bij de opleggingen zal het, met het oog op rotatie van het rad, niet noodzakelijk zijn om de ringen te verbinden. Een verbinding tussen de ringen zal het vervormingsgedrag van de constructie onder windbelasting positief beïnvloeden.

Dit ontwerp is net als het huidige ontwerp statisch onbepaald. Vanwege de symmetrische doorsnede zal de initiële uitbuiging van de constructie onder het eigen gewicht beperkt blijven.



Figuur 51 - Oplegging onder zicht- en liftring, hotelring opgehangen

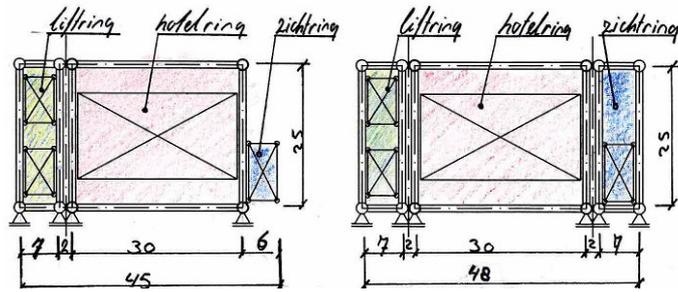
Een derde alternatief is het creëren van een ring waarbinnen alle functies worden ondergebracht, zoals in figuur 52 getoond is. De ring zal enkel op de hoekpunten worden opgelegd. Bij deze variant worden de opleggingen symmetrisch belast.



Figuur 52 - Oplegging gehele rad op hoekpunten

Het is eventueel ook mogelijk om de ringen onafhankelijk van elkaar op te leggen en te laten draaien, dit alternatief is in figuur 53 getoond. Men creëert dan drie raden die naast elkaar geplaatst zijn. Wanneer de ringen onafhankelijk van elkaar roteren met verschillende snelheden zullen er in het zicht- en liftrad meer spanningswisselingen

optreden met als gevolg meer problemen met de vermoeiing. De onafhankelijke ringen zullen wanneer ze door wind belast worden elkaar steunen.



Figuur 53 - Onafhankelijke oplegging lift- en hotelring

In dit rapport is voor de analyse van het rad uitgegaan van het huidige ontwerp van de dwarsdoorsnede, als ongeschoord raamwerk.

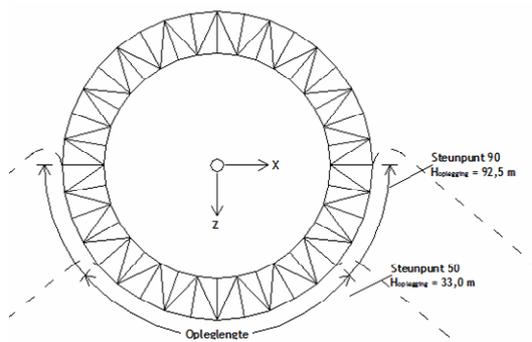
2.3.2 Ondersteuning - entreegebouw

De plaats en de wijze van ondersteuning van de constructie zal van grote invloed zijn op het uiteindelijke constructieve gedrag van het Great Dubai Wheel.

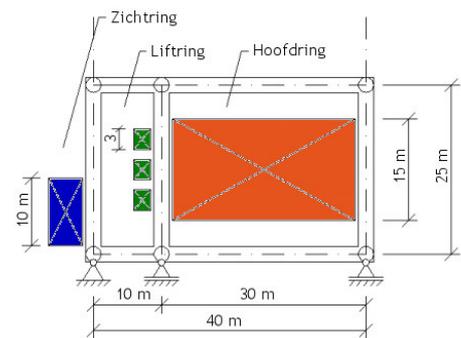
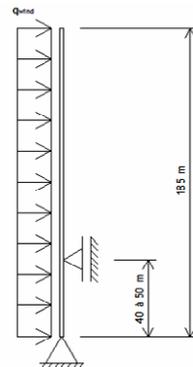
Oplegglengte

In het huidige ontwerp is als oplegconfiguratie gekozen voor een serie opleggingen onder elke ring tot een hoogte van 40 à 50 meter ($\approx \frac{1}{4} h_{\text{totaal}}$). Een reden om de opleghoogte te beperken tot $\frac{1}{4} h_{\text{totaal}}$ is het minimaliseren van de belemmering van het uitzicht door het entreegebouw.

Voor de opname van axiale krachten, zoals windbelasting zullen axiale steunpunten worden toegevoegd. Ook deze steunpunten zijn aan de voet van de dwarsdoorsnede geplaatst en lopen door tot een hoogte van 40 à 50 meter.



Figuur 54 - Huidig ontwerp oplegglengte rad



Figuur 55 - Huidig ontwerp opleggingen rad

Huidig ontwerp

De oplegglengte is afhankelijk van de hoogte van de ondersteuning. In het huidige ontwerp is een hoogte aangenomen van 40 à 50 meter. Deze hoogte wordt noodzakelijk geacht om de kantelstabiliteit van de constructie onder windbelasting te waarborgen en zal in hoofdstuk 8 over stabiliteit gecontroleerd worden. De hoogte van 40 à 50 meter is door de architect als uitgangspunt gebruikt voor het ontwerp van het entreegebouw.



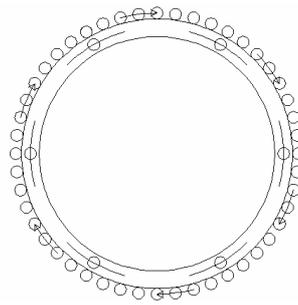
De stijfheid (en vervorming) van de constructie wordt sterk beïnvloed door de opleglengte. Een grotere opleglengte zal de vervormingen reduceren, mits de oplegging voldoende stijf is.

Big O

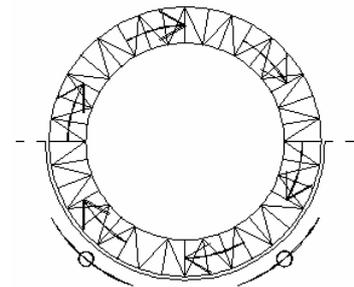
Een extreem voorbeeld van het vergroten van de opleglengte is te zien in figuur 56 en figuur 57, de Big O. De Big O is een reuzenrad dat grotendeels bestaat uit een stilstaande ring. Rond de stilstaande ring draaien de capsules. De stijfheid wordt niet uit het roterende deel van het rad gehaald, zoals bij het Great Dubai Wheel, maar uit de stilstaande ring. In dit voorbeeld is de stilstaande ring te beschouwen als de oplegging van het roterende rad. De opleglengte bedraagt hier dan ook de gehele omtrek van de stilstaande ring.



Figuur 56 - De Big O, Tokyo, 2005



Figuur 57 - Draaiprincipe Big O



Figuur 58 - Draaiprincipe Great Dubai Wheel

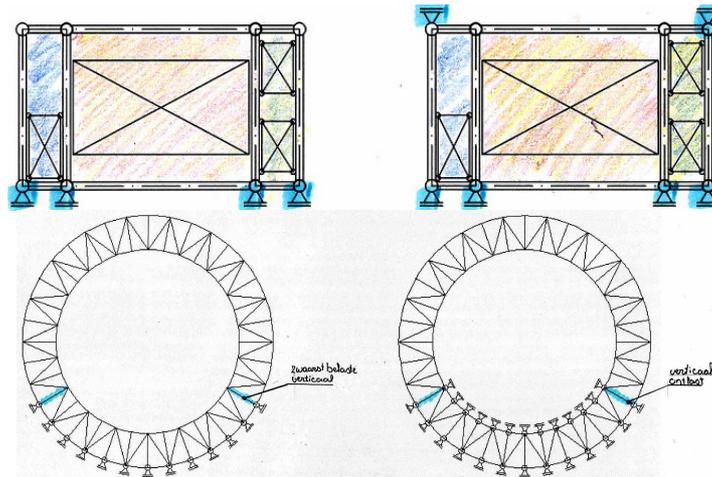
Het gebruik van een stilstaande ring, met roterende capsules is in het Great Dubai Wheel niet toe te passen, omdat in het Great Dubai Wheel de hoofdconstructie dient te roteren. Dit is in The Big O niet het geval, hier roteren enkel de capsules.

Positie radiale ondersteuning

In het huidige ontwerp is aangenomen dat de ondersteuning van het rad enkel aan de onderzijde van de dwarsdoorsnede plaatsvindt. Het is echter ook mogelijk om de bovenzijde van de dwarsdoorsnede te gebruiken als oplegpunt. Het rad zal dan worden opgehangen en in plaats van druk zal er trek in de verticalen optreden.

Het opleggen van de constructie aan de bovenzijde van de dwarsdoorsnede zal gecompliceerder zijn dan een ondersteuning aan de onderzijde. Dit omdat bij een ondersteuning aan de onderzijde de krachten direct, via contactdruk uit de profielen in de ondersteuning worden opgenomen. Bij een oplegging aan de bovenzijde zal een overdrachtsconstructie noodzakelijk zijn, aangezien de overdacht via contactdruk zal plaatsvinden.

Het effect van de locatie van de opleggingen op de krachtverdeling in de elementen zal in hoofdstuk 6 worden behandeld.



Figuur 59 - Combinatie oplegging onder- en bovenzijde

2.4 Basisontwerp

Voor de verdere analyse van het rad zal uitgegaan worden van het huidige ontwerp. Het geanalyseerde rad zal opgebouwd zijn uit drie onderling verbonden vakwerkringen. De ondersteuning zal plaatsvinden onder elke ring en zal voor elke ring een gelijke veerstijfheid hebben.

De vakwerkringen hebben de vorm van een verstijfd Warren-vakwerk en zullen elk verdeeld zijn in 36 stukken.

De dwarsdoorsnede heeft de vorm van een ongeschoord raamwerk. De knooppunten van de vakwerkring zullen de stabiliteit van het raamwerk moeten garanderen. Deze knooppunten worden als oneindig stijf aangenomen.

Het rad wordt ondersteund door het entreegebouw tot een hoogte van 40 à 50 meter. Deze ondersteuning vindt zowel plaats in radiale, als in axiale richting.

Het voor de analyse gebruikte model zal in hoofdstuk 5, ESA-model, worden beschreven. De voor de analyse gebruikte belastingen worden in hoofdstuk 4, Belastingen, behandeld.



3 Ontwerp; functionele aspecten

Het ontwerp van het Great Dubai Wheel bestaat niet enkel uit het ontwerp van de hoofddraagconstructie en het oplegebouw. Om het rad te laten functioneren is het onmogelijk om enkel rekening te houden met constructieve eigenschappen. In dit hoofdstuk zal gekeken worden naar deze functionele aspecten van het ontwerp.

Gekeken wordt naar het ontwerp van de capsule, waaraan vanwege de verschillende gebruiksfuncties verschillende eisen worden gesteld. Gelet zal worden op de afmetingen, de bevestiging en de aandrijving.

Verder wordt ingegaan op het liftstelsel, vanwege de ronde vorm van het rad zal het niet mogelijk zijn om gebruik te maken van conventionele (verticale) liftsystemen. De liftcapsules zullen de ronde vorm van het rad moeten volgen.

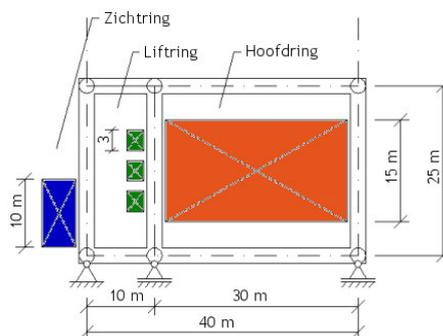
De oplegging en aandrijving van het rad zal van groot belang zijn. In paragraaf 3.3 en 3.4 worden achtereenvolgens de opleggingen en de aandrijving van het rad behandeld. Bij het ontwerp van de opleggingen zal gelet moeten worden op aspecten als wrijving en slijtage. De aandrijving van het rad zal de in de opleggingen ontstane krachten uit o.a. de wrijving, de wind en een excentrische belasting moeten kunnen overwinnen om een rotatie van het rad mogelijk te maken.

De in dit hoofdstuk behandelde aspecten zijn slechts oppervlakkig bekeken. Voor het definitieve ontwerp zullen deze aspecten nader onderzocht moeten worden.

3.1 Capsules

De verschillende functies van het rad zijn ondergebracht in capsules. In het rad zijn vanwege de diverse functies ook verschillende capsuletypen noodzakelijk. Een doorsnede van het huidige ontwerp van het rad, inclusief de verschillende capsules, is in figuur 60 te getoond. In deze paragraaf zullen de bij de diverse functies behorende capsules getoond worden.

Van de verschillende capsules is in Bijlage A, tekening nummer 1.2, een overzicht getoond.



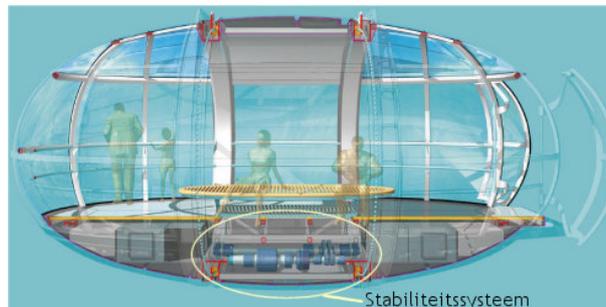
Figuur 60 - Huidig functioneel ontwerp rad (maten slechts indicatief)

Het interieur van de capsules zal van de buitenwereld zijn afgesloten. Met behulp van installaties, zoals zonnewering, airconditioning, etc., wordt een comfortabel binnenklimaat gerealiseerd.

De bevestiging van de capsules aan de hoofdconstructie moet, om de vloeren horizontaal te houden, een rotatie van de capsule ten opzichte van de hoofdconstructie toestaan. Om het comfort (horizontaal houden vloeren, voorkomen schommelingen in capsule, etc.) in de capsules te garanderen, kan een speciaal stabiliteitssysteem worden toegevoegd. Dit stabiliteitssysteem zal onder de vloer van de capsule gemonteerd worden, om zodoende de ligging van het zwaartepunt van de capsules zo laag mogelijk te houden.

London Eye

Figuur 61 toont een doorsnede van de zichtcapsule zoals gebruikt in het London Eye. Voor deze capsule is een speciaal stabiliteitssysteem ontwikkeld. Tevens zijn de capsules voorzien van airconditioning. Deze systemen maken het mogelijk om het comfort van de passagiers tijdens de rit te garanderen.



Figuur 61 - Zichtcapsule London Eye

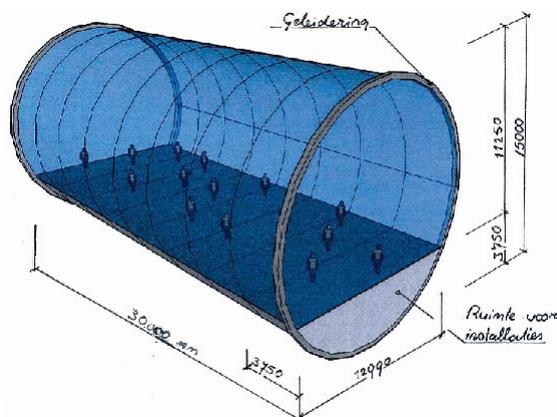
3.1.1 Capsuletypen

In het rad bevinden zich verschillende capsuletypen om plaats te bieden aan de verschillende functies. Er zijn drie capsuletypen te onderscheiden, te weten: hoofdcapsule (hotel en restaurant), liftcapsule (transport) en een zichtcapsule (recreatie).

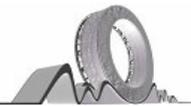
Hoofdcapsules

De 24 hoofdcapsules zijn plaatsvast bevestigd aan de roterende hoofdconstructie. De rotatietijd is gelijk aan de rotatietijd van de hoofdconstructie en bedraagt 6 uur.

De hoofdcapsules bevinden zich in de hoofdconstructie, tussen ring B en C. De capsules hebben een lengte van ongeveer 30 meter en een diameter van 15 meter.



Figuur 62 - Afmetingen hoofdcapsules

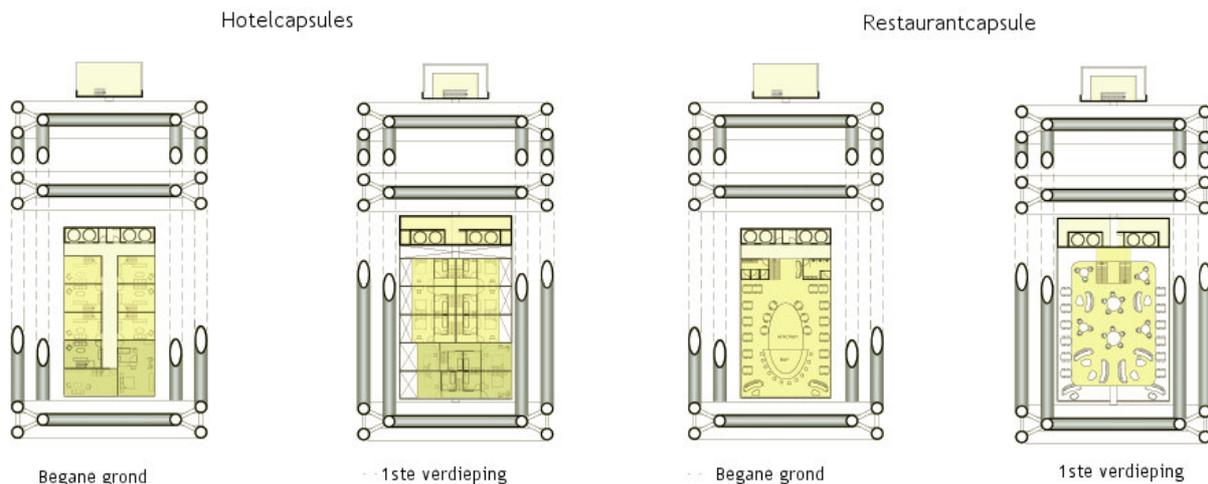


Vanwege de lange rotatietijd is het noodzakelijk om de hoofdcapsules als semi-permanente verblijfsruimtes in te richten. De capsules worden zodanig ingericht dat ook een verblijf van langer dan 6 uur mogelijk is. De eisen gesteld aan comfort in de capsules (bijv. versnelling) zullen hierdoor strenger zijn dan voor de capsules in conventionele reuzenraderen waar de verblijftijd aanzienlijk korter is.

De capsules zullen deels zelfvoorzienend zijn, de elektriciteit zal bijvoorbeeld uit zonnecellen verkregen worden, en deels moeten worden bevoorradad (bijv. waterbehoefte). De bevoorrading van de capsules kan aan de voet van het rad plaatsvinden. De bevoorrading mag het roteren van het rad niet verhinderen.

In het rad bevinden zich 24 hoofdcapsules, met elk een lengte van 30 meter en een diameter van 15 meter. De hoofdcapsules zijn vanwege de lange rotatietijd (6 uur) ingericht als semi-permanente verblijfsruimtes. De capsules zullen deels zelfvoorzienend zijn.

Gekozen is om de capsules in te richten als hotelcapsules en restaurantcapsules. Deze verschillende functies zullen verschillende variabele belastingen veroorzaken, hierdoor treedt een asymmetrische belasting van het wiel op. Concept indelingen van de hoofdcapsules zijn in figuur 63 te zien.



Figuur 63 - Concept indeling hoofdcapsules

De hoofdcapsules zullen een laag eigen gewicht moeten hebben om zodoende de belasting op de hoofdconstructie laag te houden. Het eigen gewicht van één hoofdcapsule is geschat op ongeveer 360 ton. De uitgebreide bepaling van het eigen gewicht van de hoofdcapsule is te vinden in hoofdstuk 4, Belastingen.

Liftcapsules

Zowel de lift- als de zichtcapsules hebben een rotatiesnelheid die onafhankelijk is van de hoofdconstructie. De capsules worden via een rail aan de hoofdconstructie bevestigd. Deze liftcapsules zullen zich over een geleiderail bewegen, deze rail is plaatsvast aan de hoofdconstructie bevestigd. De liftcapsules kunnen onafhankelijk van elkaar bewegen. Een voorbeeld van de bevestiging van onafhankelijk bewegende capsules is te zien in figuur 64.



Figuur 64 - Geleiderail capsule, the Big O, Tokyo, 2005

De liftcapsules bevinden zich tussen ring A en B. De ruimte tussen deze ringen is groter dan nodig voor de liftcapsules. De extra ruimte naast de liftcapsules wordt aan de voet van het rad gebruikt worden als wachtplatform voor de liften.

De afmetingen van de liftcapsules zijn gebaseerd op afmetingen van reeds bestaande liftsystemen. De interne afmetingen van capsules geproduceerd door KONE BV. zijn te vinden in de onderstaande tabel 2 t/m tabel 4.

De liftcapsules zijn noodzakelijk voor het interne transport in het rad. Ze hebben een diameter van 2,5 à 3 meter en een lengte van 1,7 à 2,5 meter.

Wanneer uitgegaan wordt van een liftcapaciteit van 13 personen zal de afmeting van de capsule 1,6 x 1,4 m² bedragen. In het liftstelsel is ook een brancardlift aanwezig, de afmeting van een brancardlift bedraagt 1,1 x 2,1 m².

	Cabine afmetingen van rolstoeltoegankelijke liften (b x d) [mm]				
Hefvermogen [kg]	630	800	1000	1275	1600
Doorgangsbreedte liftdeuren [mm]	900	900	900/1100	1100	1100
Hotel	1100 x 1400	1350 x 1400	1600 x 1400	2000 x 1400 (1950 x 1400)	2100 x 1600 (1950 x 1750)

Tabel 2 - Afmetingen personenlift

	Brancardlift	Cabine afmetingen van beddenliften (b x d) [mm]			
Hefvermogen [kg]	1000	1275	1600	2000	2500
Doorgangsbreedte liftdeuren [mm]	900	1100	1300	1300	1300/1400
Hotel	1100 x 2100				

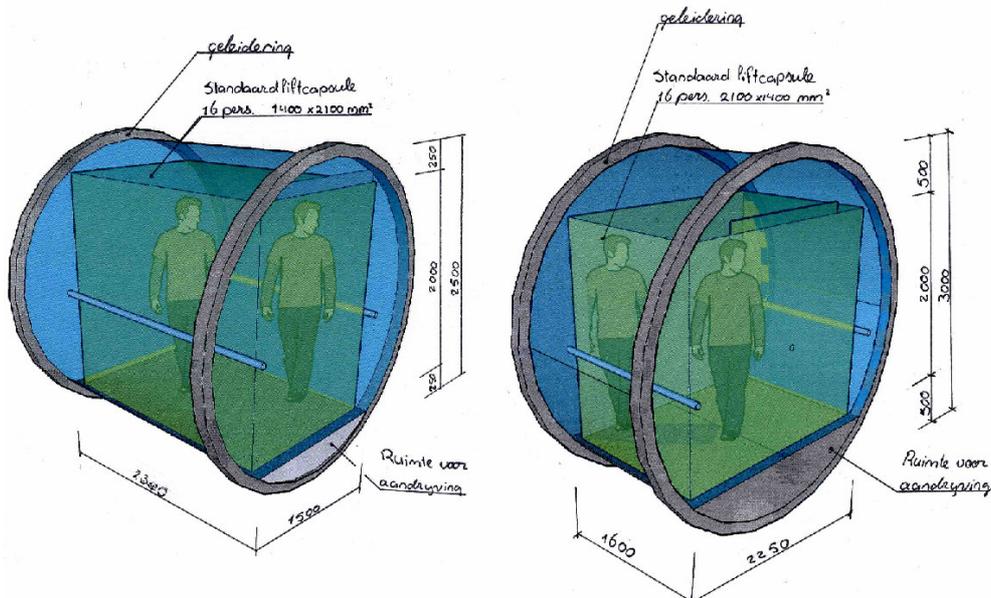
Tabel 3 - Afmeting Brancardlift



	Cabine afmetingen van goederenliften (b x d) [mm]				
	Rolcontainer (800 x 1000)	Euro pallet (800 x 1000)	Pallet (1000 x 1200)	Pallet (1200 x 1200)	
Hefvermogen [kg]	630	800	1000	1275	1600
Doorgangsbreedte liftdeuren [mm]	900	900	1100	1300	1300
Hotel	1100 x 1400	1350 x 1400	1600 x 1400	2000 x 1400 (1950 x 1400)	2100 x 1600 (1950 x 1750)

Tabel 4 - Afmetingen goederenlift

De getoonde afmetingen zijn afmetingen voor standaardliften in standaardgebouwen. In het rad zal echter geen sprake zijn van een standaard liftstelsel. Het vloeroppervlak van een liftcapsule zal 1400 x 2100 mm² bedragen. Bij deze afmeting kan de lift worden gebruikt als personenlift, brancardlift en goederenlift.



Figuur 65 - Afmetingen liftcapsule

Het eigen gewicht van één liftcapsule is geschat op ongeveer 2,1 ton. Een uitgebreide bepaling van het eigen gewicht is te vinden in hoofdstuk 4, Belastingen.

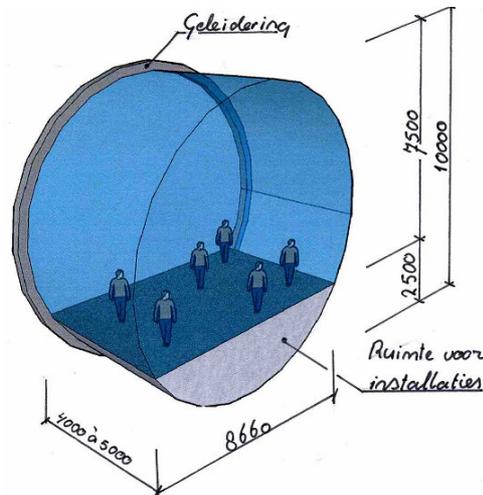
Zichtcapsule

Voor de bezoekers die in korte tijd een rit willen maken in het Great Dubai Wheel zijn aan de buitenzijde van het wiel de zichtcapsules toegevoegd. Deze capsules bieden de bezoekers de mogelijkheid om in 30 minuten een volledige omwenteling te maken.

Het zichtrad bestaat uit 36 cilindervormige zichtcapsules, welke onafhankelijk van het hoofdtrad roteren. De zichtcapsules zullen aan een doorgaand profiel bevestigd worden, dit profiel wordt glijdend aan de hoofdconstructie bevestigd. In het huidige ontwerp zijn de capsules uitkragend aan de hoofdconstructie bevestigd.

De capsules hebben een lengte van vier à vijf meter en een diameter van 10 meter. Iedere capsule biedt plaats aan maximaal 40 personen.

Aan de zijkant van het rad bevinden zich 36 zichtcapsules, met elk een lengte van 4 meter en een diameter van 10 meter. Elke zichtcapsule biedt plaats aan maximaal 40 passagiers die een korte (30 minuten) rit willen maken.



Figuur 66 - Afmetingen zichtcapsules, enkelzijdig opgelegd

Het eigen gewicht van één zichtcapsule is geschat op ongeveer 27 ton. Een uitgebreide bepaling van het eigen gewicht is te vinden in hoofdstuk 4, Belastingen.

3.1.2 Bevestiging capsule

Hoofdcapsule

De hoofdcapsules zijn direct bevestigd aan de roterende hoofddragconstructie en ondergaan net als het rad vier rotaties per dag.

Om de capsules horizontaal te houden kan deze om de lengtes moeten roteren. Dit rotatiemechanisme wordt aan de vakwerkeringen bevestigd. Voorbeelden van rotatiemechanismen zijn in de figuur 67 en figuur 68 te zien. Bij deze voorbeelden roteren de capsules binnen een ring. Naast het roteren van de capsules binnen een ring is het ook mogelijk om de capsules aan een rotatie as te bevestigen.



Figuur 67 - Falkirk Wheel, Schotland, 2002

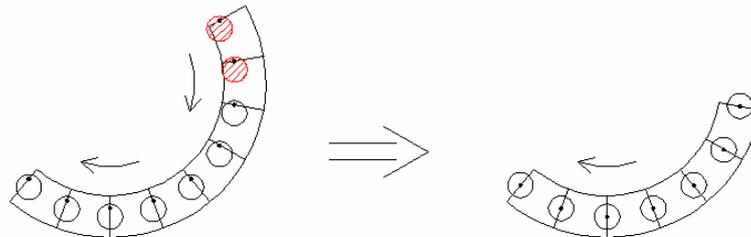


Figuur 68 - London Eye, Engeland, 1999



Rotatie as

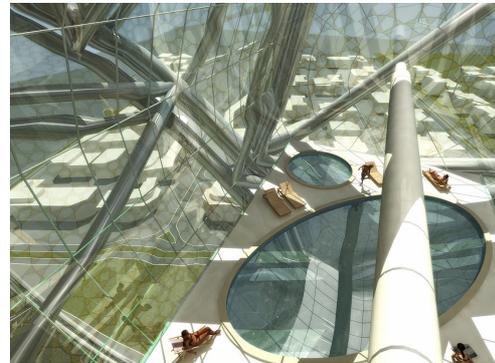
In het eerste ontwerp van het rad is gekozen om de capsules om een as te laten roteren. Deze as zal centraal door de capsule moeten lopen om de capsule op een vaste plaats in de constructie te houden. Het gebruik van een as voor de ophanging van een capsule is te zien in figuur 70 en figuur 71.



Figuur 69 - Probleem bij excentrische plaatsing as en oplossing



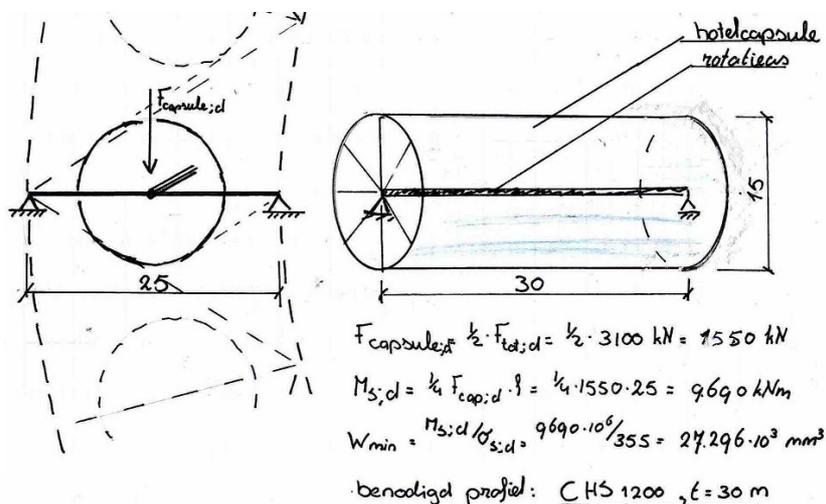
Figuur 70 - The Big O, Tokyo, 2005



Figuur 71 - Interieur Great Dubai Wheel met centrale as

Het nadeel van het gebruik van een centrale as als ophanging van de capsules is dat deze een obstakel vormt in de capsule.

De rotatie as zal bevestigd worden aan de verticalen. Deze verticalen zullen nu naast een normaalkracht ook worden belast door een buigend moment, ten gevolge van de belasting komende uit de hoofdcapsules. De grootte van het moment varieert per verticaal, als gevolg van de rotatie van het rad. Het grootste moment zal optreden wanneer de verticalen zich in een horizontale positie bevinden. Dit is in figuur 72 getoond.

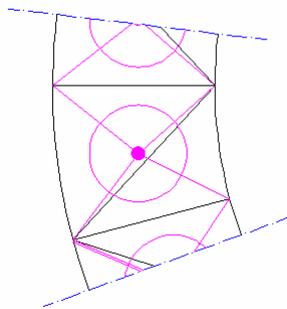


Figuur 72 - Positie rotatie as en berekening

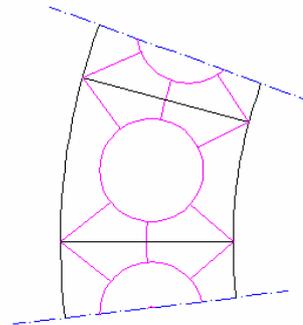
Voor de opname van het moment, ten gevolge van de belasting komende uit de hoofdcapsules, zal minimaal een buisprofiel met een diameter van 1200 mm en een dikte van 30 mm noodzakelijk zijn. Deze afmeting is minimaal en zal groter worden omdat vanwege de rotatie een spanningswisseling (vermoeiing) in het profiel plaatsvindt. Verder is in deze berekening enkel gekeken naar de sterkte en is de stijfheid niet meegenomen. Ook de in het profiel aanwezige normaalkracht, ten gevolge van het eigen gewicht van het rad, is in deze berekening niet meegenomen. De profieldiameter toename benodigd voor de bevestiging van de rotatie as zal verder toenemen en zal waarschijnlijk de in het model gebruikte buisdiameter (CHS 1440, $t=40$ mm) benaderen.

Gebruik van een rotatie as zal de vrije indeelbaarheid van de capsule belemmeren.

Een mogelijkheid om het moment uit de verticalen weg te nemen is het ophangen van de rotatie as in een afzonderlijk frame. De belastingen afkomstig uit de capsules worden als normaalkrachten op de knooppunten afgedragen. Een nadeel is dat het toevoegen van de extra elementen de transparantie van de constructie en het vrije zicht zal beïnvloeden. In figuur 73 en figuur 74 zijn de verschillende ophangmogelijkheden getoond.



Figuur 73 - Bevestiging hotelcapsule in een frame



Figuur 74 - Bevestiging hotelcapsule in een ring

Ophangring

Een veelgebruikte methode voor de bevestiging van roterende capsules is het gebruik van een ring rond de capsule. Dit principe is reeds toegepast in het Falkirk Wheel, de capsule van de London Eye en de capsule van Great Beijing Wheel.

Het voordeel van het gebruik van externe ring boven een rotatie as is de vrije indeelbaarheid van de capsules.

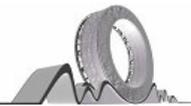
Voor de bevestiging van de capsule aan de hoofddraagconstructie zullen extra elementen worden toegevoegd. Deze elementen zullen de krachten uit de ring als normaalkrachten aan de knooppunten afdragen.

Gebruik van een rotatiering zal de vrije indeelbaarheid van de capsule niet belemmeren.

Aanbeveling

Voor de bevestiging van de hoofdcapsules aan de hoofddraagconstructie is het gebruik van een ophangring, welke een vrije indeelbaarheid van de capsules mogelijk maakt, aan te bevelen.

De ophangring zal in de knooppunten van de vakwerkstructuren aan de hoofddraagconstructie bevestigd worden, hierdoor wordt het optreden van extra momenten in de elementen van



de vakwerkeringen voorkomen. Om de bevestiging mogelijk te maken zullen de ophangringen in een frame worden geplaatst.

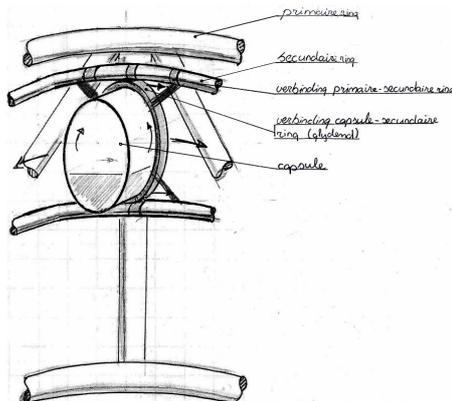
In de modellering van het rad, welke in hoofdstuk 4 over het ESA-model wordt getoond, is aangenomen dat de belasting komende uit de hoofdcapsules uniform over de knooppunten wordt verdeeld. De werkelijke belasting van het rad zal afhankelijk van het ontwerp van de bevestiging kunnen afwijken. In de definitieve controle van het ontwerp zal dan ook rekening worden gehouden met de bevestiging.

Liftcapsule

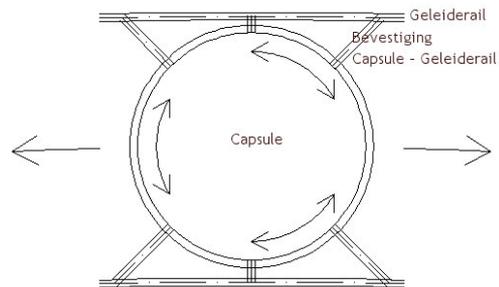
De liftcapsules worden via een geleiderail aan de hoofddragconstructie bevestigd. Op deze rail zullen de liftcapsules onafhankelijk van de hoofddragconstructie en ten opzichte van elkaar bewegen. De geleiderail zal plaatsvast aan het rad bevestigd worden, zoals te zien is in figuur 76 en figuur 77.



Figuur 75 - Geleiderail capsule, the Big O, Tokyo, 2005



Figuur 76 - Bevestiging geleiderail - rad



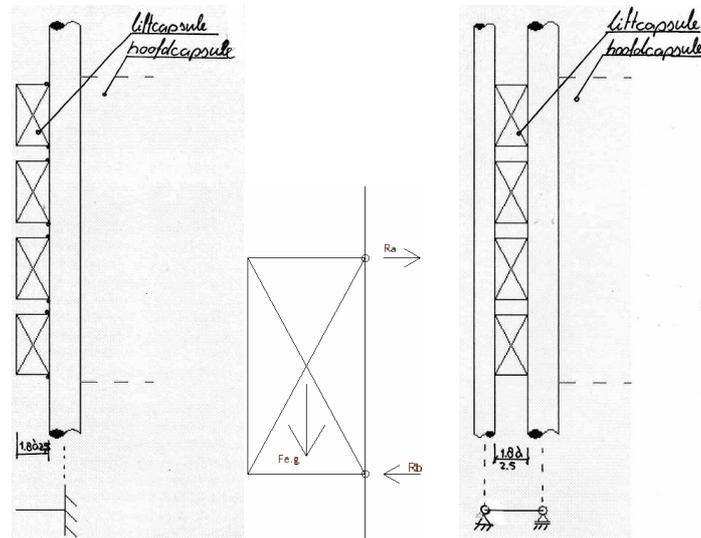
Figuur 77 - Bevestiging Liftcapsule - geleiderail

De bevestiging van de liftcapsules aan de hoofddragconstructie zal van invloed zijn op de belasting op de elementen van de hoofddragconstructie. De capsule kan zowel enkelzijdig als dubbelzijdig aan het rad bevestigd worden, zoals in Figuur 78 is getoond.

In het geval van een uitkragende bevestiging zal er in de verticalen, waar de geleiderail op is bevestigd een extra moment optreden als gevolg van de excentriciteit van het zwaartepunt van de capsule. Dit extra moment zal het grootst zijn wanneer de diameter van de capsule 2,5 meter is, bij deze diameter is de uitkraging immers het grootst (2,3 m).

De extra normaalkrachten en momenten afkomstig uit de uitkragende bevestiging zijn in vergelijking met de reeds aanwezige momenten en normaalkrachten in de elementen verwaarloosbaar klein. In paragraaf 6.5 zijn deze extra optredende momenten en normaalkrachten berekend.

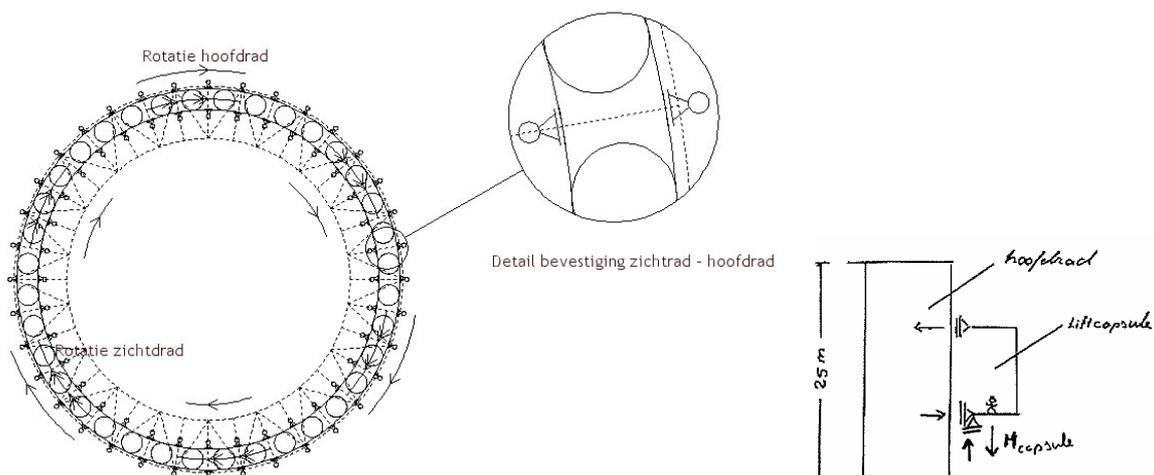
De invloed van een uitkragende bevestiging op het krachtsverloop in de hoofddraagconstructie en de constructieve elementen is verwaarloosbaar klein.



Figuur 78 - Bevestiging liftcapsule - rad

Zichtcapsule

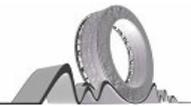
De zichtcapsules worden plaatsvast aan een roterende rail bevestigd, welke via een glijdende verbinding aan het hoofdtrad bevestigd worden. Door de ring aan alle verticaal van de vakwerkingring te bevestigen zijn de spanningswisselingen in het zichtrad minimaal, wat gunstig is voor de vermoeiingslevensduur van het rad.



Figuur 79 - Bevestiging hoofdtrad - zichtrad

De verbinding van het zichtrad met het hoofdtrad is een glijdende verbinding, welke als voordeel heeft dat de elementen waar het zichtrad op bevestigd enkel door een normaalkracht in radiale richting en een dwarskracht in axiale richting wordt belast.

De bevestiging van de zichtcapsules aan de hoofddraagconstructie kan evenals het liftstelsel op meerdere manieren. De capsule kan enkelzijdig (uitkragend), als dubbelzijdig aan het rad worden bevestigd. In het huidige ontwerp zijn de zichtcapsules enkelzijdig (uitkragend) bevestigd. Een enkelzijdige bevestiging van het zichtrad zal de



voorkeur genieten boven een dubbelzijdige bevestiging, vanwege het vrije zicht. In het geval van een dubbelzijdige oplegging zal een vakwerk het vrije zicht belemmeren.

De invloed van de uitkragende bevestiging van het zichtrad op de extra normaalkrachten en momenten in de constructie is in paragraaf 6.5 onderzocht. Deze invloed bleek laag te zijn, in de voor de verticalen toegepaste profielen, respectievelijk een CHS 1440 en een CHS2220, $t = 40$ mm, zal de extra belasting nauwelijks tot een spanningstoename leiden.

3.2 Liftsysteem

In het rad is een liftsysteem noodzakelijk voor het vervoer van gasten van en naar de hotelkamers en eventueel voor evacuatie in geval van calamiteiten. In het geval van een calamiteit zal naast een liftsysteem ook een vluchttrap noodzakelijk zijn voor het geval dat bijvoorbeeld het liftsysteem uitvalt. Een voorbeeld van een dergelijke vluchttrap is in figuur 80 getoond.

Het liftsysteem is ondergebracht tussen vakwerkkring A en B, in een ring met een breedte van 10 meter en een hoogte van 25 meter. De rotatie van de liftcapsules vindt onafhankelijk van de rotatie van de hoofd draagconstructie plaats, tevens kunnen de capsules onafhankelijk van elkaar roteren. De capaciteit van het liftsysteem zal voldoende moeten zijn om de maximaal 768 hotelgasten in hun behoefte te voorzien. Het aantal gasten is gebaseerd op de aanname dat in elk van de vierentwintig capsules zich zestien hotelkamers bevinden, elke kamer biedt plaats aan twee personen. Het exacte aantal gasten zal nader bepaald moeten worden.

Het liftsysteem bevindt zich in de ruimte tussen ring A en B (10 meter). De capaciteit zal voldoende moeten zijn om de hotelgasten in hun behoefte voorzien.



Figuur 80 - Vluchttrap London Eye

3.2.1 Schatting aantal liften

Het hotelrad bestaat uit 24 capsules, met elk 16 kamers. Aangenomen is dat bij een volledige bezetting van het hotel er 768 hotelgasten aanwezig zijn.

Voor een eerste schatting van het aantal liften is de volgende vuistregel¹ gebruikt:

Tot 200 personen en 6 stopplaatsen kan worden volstaan met 1 lift (13 personen, 1000 kg), hierboven zijn er 2 of meerdere liften noodzakelijk.

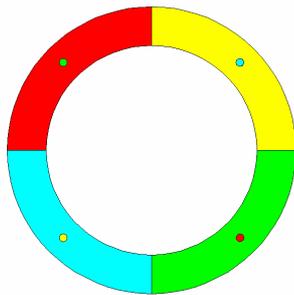
¹ Bron: www.kone.com

In het hotel bevinden zich ongeveer 800 mensen (hotelgasten en personeel). In het hotel bevinden zich 24 capsules waar de lift een stopplaats zal moeten hebben.

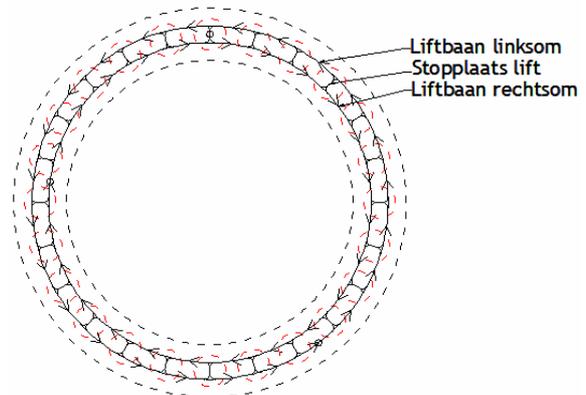
Wanneer het aantal liften gebaseerd wordt op het aantal mensen, dan zullen er minimaal vier liften noodzakelijk zijn. Het grotere aantal stopplaatsen (24) zal het aantal benodigde liften doen toenemen. Aangenomen is dat er in het rad acht liften aanwezig zullen zijn.

Als eerste schatting van het aantal liften zal aangenomen worden dat er acht liften aanwezig zijn, met elk een minimale capaciteit van 13 personen.

Het aantal liftcapsules kan, afhankelijk van het gekozen liftstelsel, nog wijzigen. Een mogelijk voor het liftstelsel is het indelen van het rad in secties en gebruik te maken van expresliften. Als stopniveau voor de expreslift kunnen vaste capsules gekozen worden zoals de capsules met bijeenkomstfunctie. Een andere mogelijkheid is het gebruik van een intelligent liftstelsel.



Figuur 81 - Indeling rad in secties, met expresliften



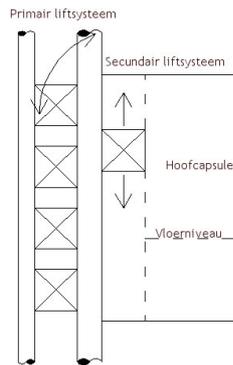
Figuur 82 - Intelligent liftstelsel

3.2.2 Verschillende typen liftstelselen

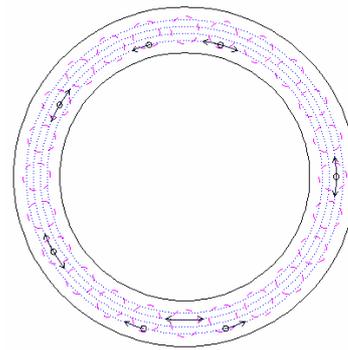
Conventionele liftstelselen

In veel gebouwen wordt gebruik gemaakt van een liftstelsel waarbij één schacht plaats biedt aan één liftcapsule. Dit principe is ook toepasbaar op het liftstelsel van het Great Dubai Wheel. De liftcapsules zullen over de hoogte van de ring verdeeld worden en langs een vaste baan bewegen.

Een nadeel van het toepassen van een conventioneel liftstelsel is dat de stopplaats per hoofdcapsule zal verschillen als gevolg van het roteren van het rad. Er zal dus een secundair liftstelsel noodzakelijk zijn voor het transport van de passagiers naar het vloerniveau van de capsule. Tevens is de uitbreidbaarheid van dit systeem moeilijk, de liftbanen bieden slechts plaats aan één, of twee capsules. Wanneer extra capaciteit gewenst is zal een extra liftbaan moeten worden toegevoegd.



Figuur 83 - Overzicht conventioneel liftstelsysteem



Figuur 84 - Beweging liftcapsules

In een conventioneel liftstelsysteem beweegt elke liftcapsule zich over één baan. De stopplaats zal zich niet in het rotatiecentrum van de hoofdcapsule bevinden, waardoor in deze capsules een secundair liftstelsysteem noodzakelijk is.

Wanneer slechts één liftbaan wordt toegepast zal de liftcapsule altijd in het rotatiecentrum van de hoofdcapsule stoppen. Een nadeel van deze oplossing is dat wachtende en lege liften de hoofdbaan blokkeren, dit zal vertraging opleveren. Verder zullen er ongebruikte liften door het rad moeten roteren om rotatie van andere liftcapsules mogelijk te maken.

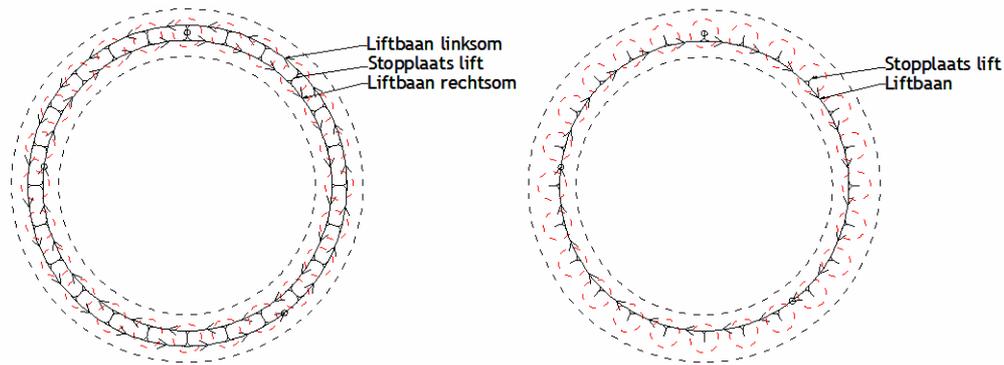
Een verbetering van het liftstelsysteem kan bereikt worden door het toepassen van een intelligent liftstelsysteem.

Intelligente liftsystemen

Momenteel is veel onderzoek gaande naar het toepassen van intelligente liftsystemen in gebouwen. Deze liftsystemen zullen in tegenstelling tot de conventionele liftsystemen gebruik maken van schachten waarin meerdere liften zich tegelijk zullen voortbewegen. Hierdoor zal het aantal liftschachten in hoge gebouwen afnemen.

Gebruik van een intelligent liftstelsysteem zal het aantal liftschachten doen afnemen, doordat meerdere liftcapsules zich over één baan verplaatsen. De stopplaats bevindt zich naast deze doorgaande baan in het centrum van de hoofdcapsule.

Een intelligent liftstelsysteem zou ook toegepast kunnen worden in het liftontwerp voor het Great Dubai Wheel. Het liftstelsysteem zal, afhankelijk van de benodigde capaciteit en toelaatbare reistijd, bestaan uit één of twee doorgaande liftbanen. De liftcapsules zullen zich over deze liftbaan naar de plaats van bestemming begeven waarna zij zullen stoppen en eventueel wachten op een stopplaats. De stopplaats bevindt zich naast de liftbaan, zodat het overige liftverkeer niet gehinderd wordt door het stilstaan van wachtende. De stopplaats bevindt zich in het rotatiecentrum van de hoofdcapsule, hierdoor zal er in de hoofdcapsule geen extra lift noodzakelijk zijn, de in- en uitstapplaats is immers gefixeerd in het rotatiecentrum.



Figuur 85 - Toepassing van intelligente liftsystemen in het Great Dubai Wheel

Wanneer de intelligente liftsystemen commercieel toepasbaar zijn, zal dit systeem in het Great Dubai Wheel de voorkeur verdienen boven de conventionele liftsystemen.

3.2.3 Aandrijving liftcapsules

De aandrijving van de liftcapsules zal de mogelijkheid moeten bieden om de capsules onafhankelijk van elkaar te laten bewegen. Het is in dit geval niet mogelijk om net als in het hoofdrad gebruik te maken van één centrale aandrijving.

Kabelaandrijving

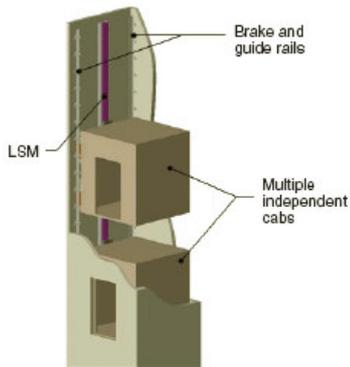
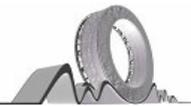
Een mogelijkheid om de capsules onafhankelijk van elkaar te laten bewegen is het gebruik van kabels. Deze kabels zouden dan de ronde baan van het rad moeten volgen, dit zal een extra inwaarts gerichte kracht in het rad veroorzaken. De aandrijving kan aan de voet van het hoofdrad plaatsvinden, wanneer het liftstelsel zit ingesloten in een ring zal deze aandrijving echter niet door de hoofdconstructie kunnen gaan, maar zich in de hoofdconstructie moeten bevinden.

Tandwielaandrijving

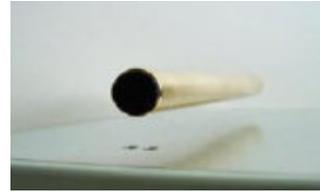
Een andere mogelijkheid om de liftcapsules zonder kabels te laten bewegen is het gebruik van wielen aan de zijden van de lift. Door het roteren van de wielen zal de capsule langs de rails omhoog kruipen. Voor de aandrijving van de wielen zal zich in elke liftcapsule een aandrijfmotor bevinden. Hierdoor neemt het gewicht van de liftcapsule toe.

Lineaire aandrijving (magnetisme)

Een derde mogelijkheid voor de aandrijving van de liftcapsules zonder kabel is het gebruik van lineaire aandrijving (magnetisme). Voordelen van dit systeem zijn het ontbreken van kabels, de mogelijkheid tot het plaatsen van meerdere capsules op één rail, hoge snelheden, gecombineerd met een hoge energie efficiency, een geruisloos en comfortabel vervoer. Verder zal het mogelijk zijn om de capsules van baan te laten wisselen.



Figuur 86 - conceptueel ontwerp maglev-aandrijving (Magnemotion, Inc.)



Figuur 87 - Basisprincipe van de maglev-techniek

In de bovenstaande afbeelding wordt de lift geleid door een rail. Het is ook mogelijk om de rail ook te vervangen door magneten, de lift hangt in dit geval volledig vrij van de geleiderail (Toshiba Elevator and Building Systems, TELC).

Lineaire aandrijving maakt het mogelijk de liftcapsules onafhankelijk van elkaar op één rail te laten bewegen, waardoor het goed toepasbaar is voor een intelligent liftstelsel.

De ontwikkelingen van de maglev liftsystemen is momenteel in volle gang. Elevator and Building Systems, TELC, meldde eind 2007 dat in het voorjaar van 2008 begonnen wordt met de verkoop van het systeem. Magnemotion, Inc. hoopt in 2010 de eerste liftsystemen op de markt te brengen.

3.3 Oplegging

De oplegging van het rad is nog niet exact gedefinieerd. Voor het opleggen van het rad zijn diverse mogelijkheden. In deze paragraaf wordt gekeken naar het gebruik van teflon als oplegmateriaal, het gebruik van rolopleggingen en lopende banden.

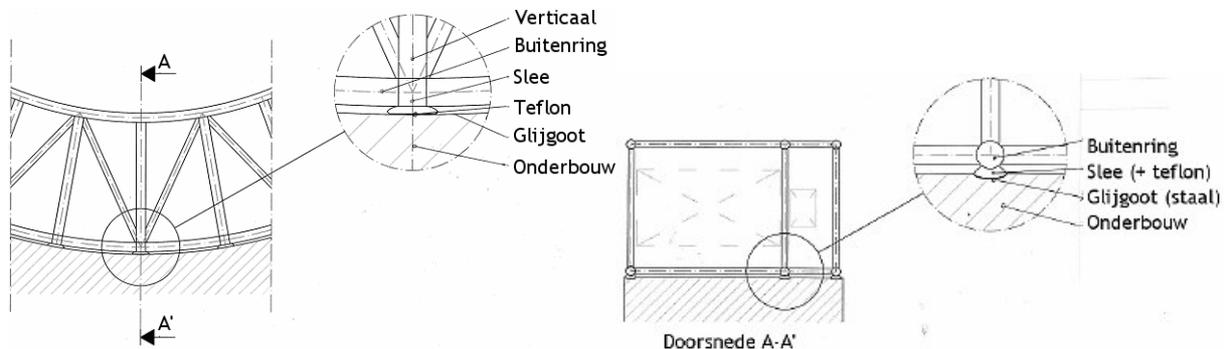
Een uitgangspunt bij de oplegging dient te zijn dat deze zo min mogelijk weerstand biedt tegen de rotatie van het rad. Verder is het verstandig om krachten uit de oplegging in te leiden bij de knooppunten van de vakwerken, zodat er geen momenten uit de oplegging in de randstaaf zullen ontstaan, de extra momenten zullen het constructieve gedrag van het rad negatief beïnvloeden. Het gebruik van de gehele lengte van de buitenring zal de oplegspanningen verlagen en zal de oplegconstructie gunstiger belasten. Tevens zal de slijtage van het gekozen opleggingstype beperkt moeten zijn.

3.3.1 Teflon glijpanelen

Een mogelijkheid voor de oplegging van het rad is het gebruik van teflon glijpanelen onder de knooppunten. De oplegging zal door een goot op het entreegebouw glijden, om de wrijving te verminderen is het mogelijk om in de goot smering (bijv. olie) aan te brengen.

De slijtage van teflon glijpanelen zal hoog zijn. Bovendien is de wrijving hoger dan bij een rolplegging.

Een nadeel van deze oplossing is dat de slijtage van de teflonpanelen hoog zal zijn. Indien de keuze wordt gemaakt voor teflon glijpanelen zal deze slijtage nauwkeurig onderzocht dienen te worden. Ook zal er een mogelijkheid moeten bestaan om reparaties uit te voeren aan de teflonpanelen.



Figuur 88 - Oplegging wiel op teflon

Eigenschappen

Teflon is een veel gebruikt materiaal vanwege een groot aantal gunstige eigenschappen. De volgende eigenschappen zijn van toepassing op de oplegging van het rad:

- Teflon wordt niet aangetast door vele chemicaliën.
- Teflon degradeert niet ten gevolge van weer en UV straling.
- Teflon heeft een lage wrijvingcoëfficiënt ($\mu_w=0,05 - 0,2$).
- Teflon vertoont vrijwel geen adhesie met andere materialen.
- Teflon behoudt zijn eigenschappen onder extreme temperaturen (-73C - +204C).
- Teflon slijt snel onder hoge druk, hierdoor kan spoorvorming in het staal optreden.

De mechanische eigenschappen, (druksterkte en stijfheid) van teflon zijn laag in vergelijking met andere kunststoffen. Deze eigenschappen kunnen worden verbeterd door het toevoegen van vulstoffen. De vulstoffen verbeteren naast de mechanische eigenschappen ook de stabiliteit en de slijtage van het materiaal. De maximale drukspanning varieert tussen de 4,1 MPa en 24,1 MPa, afhankelijk van de gebruikte vulstoffen.

Vanwege de hoge krachten die uit het rad op het teflon rusten zal het teflon uitvloeien (vervormen), een eigenschap die alle kunststof oplegmateriaal vertonen. De onderhoudsfrequentie van een teflon oplegging zal aanmerkelijk hoger zijn dan van bijvoorbeeld een roloplegging. Verder is de wrijving in de teflonoplegging aanzienlijk hoger dan in een roloplegging.

Wrijving (statische en kinetische wrijving)

In de opleggingen zal wrijving optreden. De wrijving is van vele factoren afhankelijk, zoals het type oplegging, de rotatiesnelheid, de belasting, mate van smering, etc. Bij een oplegging op teflon zal vlakwrijving optreden. De grootte van de wrijving is afhankelijk van de grootte van de reactiekracht.

De oplegging wordt belast door een radiale belasting. Om de wrijving te minimaliseren is een oplegmateriaal gekozen met een lage wrijvingscoëfficiënt, namelijk staal en teflon.



Enkele wrijvingscoëfficiënten van veelgebruikte materialen zijn te vinden in de onderstaande tabel 5².

De wrijving wordt met de volgende formule berekend:

$$F_w = \mu_w \cdot F$$

F_w Wrijvingskracht

F Radiale (of axiale) kracht

μ_w Wrijvingscoëfficiënt

Materiaal 1	Materiaal 2	Wrijvingscoëfficiënt			
		Droog		Vet	
		Statisch	Kinetisch	Statisch	Kinetisch
Aluminium	Aluminium	1,05-1,35	1,4	0,3	
Aluminium	Mild Steel	0,61	0,47		
Steel	Aluminium Bros	0,45			
Steel (Mild)	Steel (Mild)	0,74	0,57		0,09-0,19
Steel(Hard)	Steel (Hard)	0,78	0,42	0,05 -0,11	0,029-,12
Teflon	Steel	0,04 - 0,2		0,04 - 0,2	0,04 - 0,2
Teflon	Teflon	0,04 - 0,2		0,04 - 0,2	0,04 - 0,2

Tabel 5 - Wrijvingscoëfficiënt voor enkele veelgebruikte materialen

3.3.2 Roloplegging

Een andere optie voor de oplegging van het rad is het rad op een aantal rollen te leggen. Door een plaat (slee) onder de knooppunten te bevestigen zal de constructie enkel in de knooppunten met de rollerbaan in aanraking komen, dit is te zien in de onderstaande figuur. Het is ook mogelijk om het systeem om te keren en in plaats van de rollen op de onderbouw te bevestigen de rollen aan het rad te bevestigen.

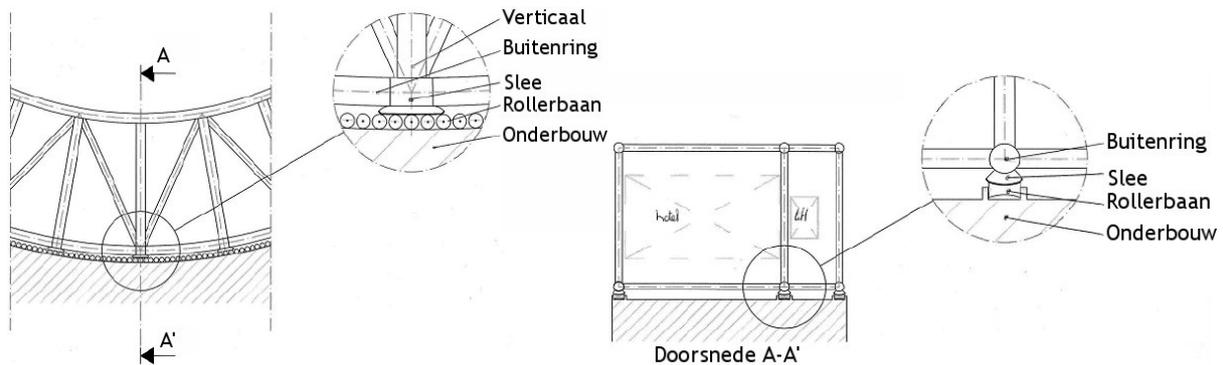
Een roloplegging heeft een lagere wrijvingsweerstand dan een teflonoplegging. Bovendien is de slijtage van rolopleggingen aanzienlijk lager, wat de onderhoudskosten van de opleggingen zal doen afnemen.

Een roloplegging zal een lage wrijvingsweerstand hebben. Bovendien zal de slijtage laag zijn.

Het nadeel van een oplegging op rollen is dat over de gehele opleglenge rollen nodig zijn. Dit zal een zware extra belasting op de onderbouw veroorzaken. Ook zal het waarschijnlijk kostbaar zijn om de rollen te produceren, wanneer voor elke rol (buis) twee rolopleggingen noodzakelijk zijn. Bovendien zullen, vanwege de hoge belastingen, de

² Bron: <http://www.roymech.co.uk>

afmetingen van de rolpleggingen aanzienlijk zijn. Waarschijnlijk zullen diameters van rond de 1,0 meter noodzakelijk zijn.



Figuur 89 - Oplegging wiel op rollen

Wrijving

In de opleggingen zal wrijving optreden. In geval van oplegging op rollen zal er een rolweerstand optreden. De grootte van de rolweerstand afhankelijk van de grootte van de reactiekracht komende uit de hoofd draagconstructie.

De rolplegging wordt belast door een radiale belasting, van ongeveer 8.000 kN uit het eigen gewicht, deze waarde zal toenemen wanneer tevens de veranderlijke vloerbelasting en windbelasting worden aangebracht. Voor opleggingen met enkel een radiale belasting zijn cilindrische rolpleggingen het meest geschikt.

Een eerste schatting van de wrijving kan gemaakt worden met de volgende formule:

$$M_r = F \cdot f \cdot (D/2)$$

F Radiale (of axiale) kracht

f Wrijvingcoëfficiënt van een rolplegging

f 0,0011 (rolplegging met inkassing)

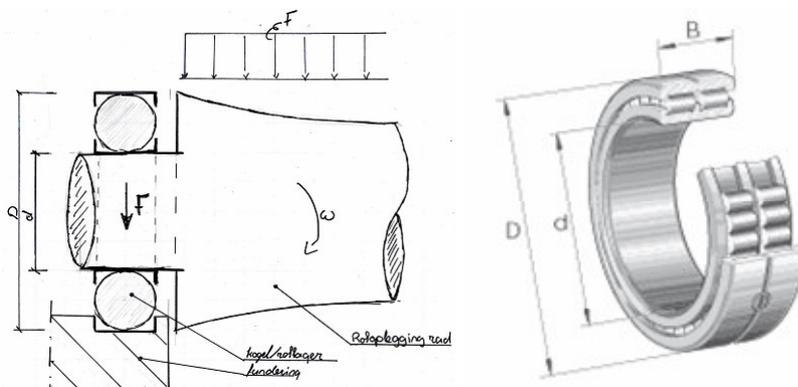
f 0,0020 (rolplegging zonder inkassing)

D Diameter van de oplegging

$$F_r = M_r / (D/2) = F \cdot f$$

F_r Wrijvingskracht

M_r Wrijvingsmoment/ weerstandsmoment



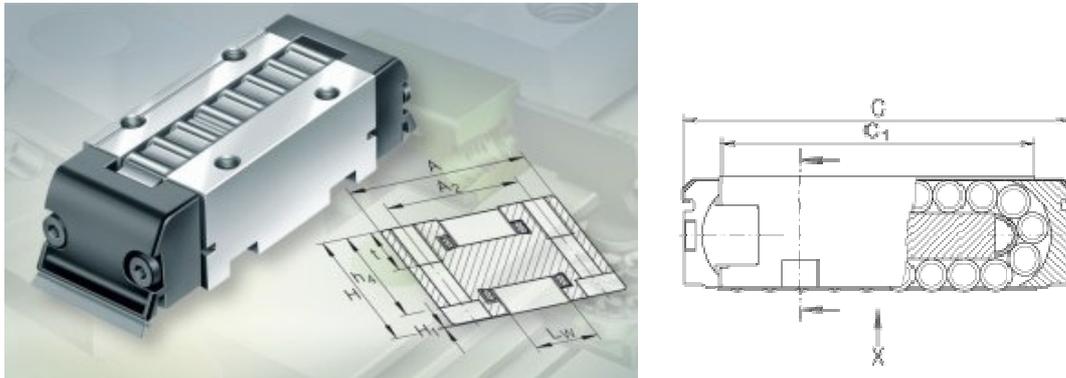
Figuur 90 - Detail oplegging op rollen



Voor een nauwkeurigere bepaling van de wrijving in een roloplegging zal naast de radiale belasting ook rekening moeten worden gehouden met de smering en de rotatiesnelheid.

Alternatief Roloplegging

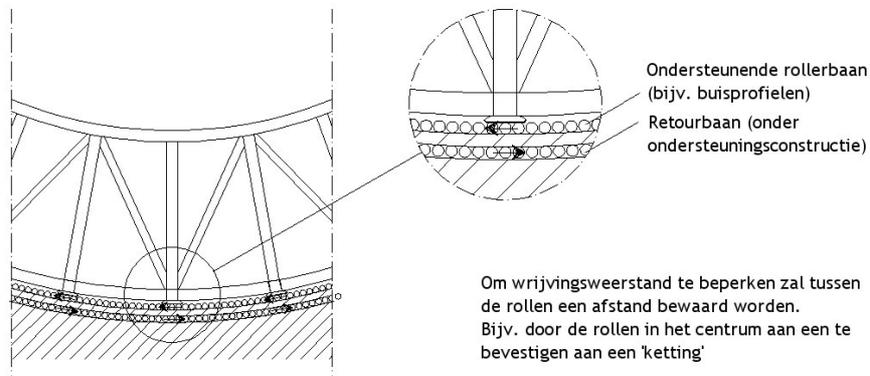
Naast cilindrische rolopleggingen zijn er diverse alternatieven op de markt. Een voorbeeld hiervan is de lineaire recirculatie oplegging.



Figuur 91 - Lineaire recirculatie oplegging

De lineaire recirculatie oplegging verkrijgbaar tot een maximale draagkracht van 800 kN, bij een afmeting van 101,6 x 264 x 76,2 mm (L x B x H) en een gewicht van 14 kg.

Door het compacte formaat zal het mogelijk zijn om de belasting komende uit het rad over meerdere opleggingen te verdelen. Een andere optie is om het principe van het roteren te verwerken in de ondersteuning op het entreegebouw, zie figuur 92. De rollen in de oplegging zullen van ronde buisprofielen gemaakt kunnen worden.



Figuur 92 - Recirculatie roloplegging in het entreegebouw

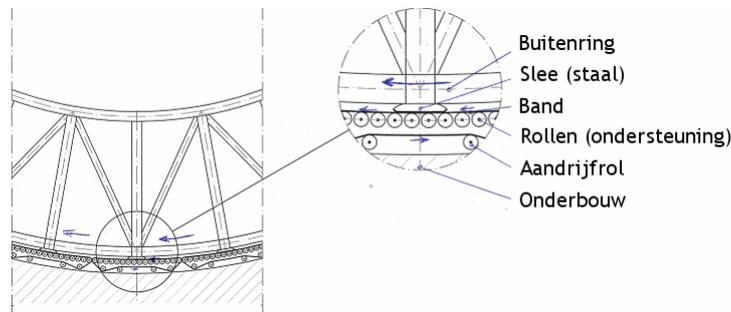
Een voordeel van dit systeem is de verhouding tussen het gewicht en de draagkracht (57 kN/kg, of $17,5 \cdot 10^{-3}$ kg/kN). Verder zal de belasting over meerdere rollende cilinders worden verdeeld.

3.3.3 Lopende band

Bij zowel de keuze voor een oplegging op teflon als bij het gebruik van een roloplegging zal er vanwege de wrijving een extra kracht in de constructie ontstaan. Deze wrijvingskracht zal opgeheven moeten worden door middel van een extern aandrijvingmechanisme.

Het is ook mogelijk om de oplegfunctie te combineren met een aandrijffunctie. Door deze combinatie zullen de wrijvingskrachten in het rad niet tot extra krachten lijden. Om deze

combinatie te bereiken zal er gebruik kunnen worden gemaakt van een aantal lopende banden welke het rad aandrijven en ondersteunen. De wrijvingskrachten zullen in dit geval reactiekrachten in de lopende banden en op de onderbouw veroorzaken. Verder zullen de oplegreacties door het gebruik van een band gespreid worden over meerdere rollen.



Figuur 93 - Oplegging wiel op lopende band

Een lopende band oplegconstructie heeft naast rollen ook een bandconstructie. Er zijn dus meer onderdelen noodzakelijk, wat tot hogere kosten en meer onderhoud kan leiden.

Vanwege de hoge belasting komende uit de ring is het noodzakelijk om in de band een zeer grote voorspankracht. Deze voorspankracht zal leiden tot een zeer zware band. Het gebruik van een lopende band als steunpunt en aandrijving is niet haalbaar.

Combinatie van aandrijving en oplegging middels een lopende band is niet haalbaar. Vanwege de hoge reactiekrachten uit het rad zal een zeer zware band noodzakelijk zijn

3.3.4 Conclusie

De roloplegging is vanwege zijn lage, snelheidsafhankelijke rolweerstand en lage slijtage goed bruikbaar als oplegging van het rad. Vanwege de hoge belasting komende uit het rad is een combinatie van oplegging met aandrijving in één (lopende band) niet mogelijk, de aandrijving zal niet door de grote oplegkracht belast mogen worden. Om de wrijvingskracht in de buitenring te beperken zal de aandrijving over de opleglengte worden verdeeld.

Door de belasting komende uit het rad over meerdere opleggingen te verdelen kunnen de rolopleggingen lichter worden uitgevoerd.

Ter bepaling van de definitieve oplegtype zal een nader onderzoek noodzakelijk zijn

Nader onderzoek

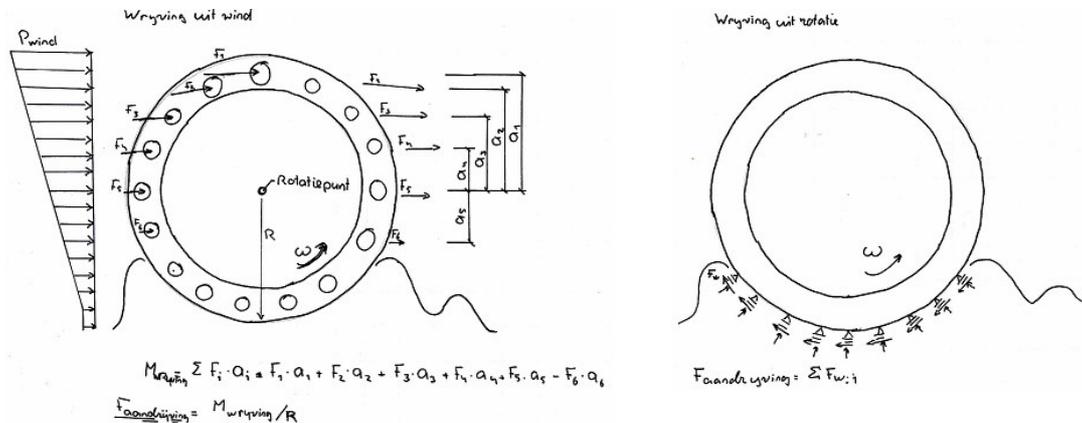
In deze paragraaf is enkel een eerste onderzoek gedaan naar de mogelijkheden voor de opleggingen van het rad. Voor het definitieve ontwerp van de opleggingen zal nader onderzoek noodzakelijk zijn.

In dit onderzoek zal een oplegsysteem moeten worden ontwikkeld dat onder andere de hoge belasting kan dragen, een rotatie van het rad mogelijk maakt en een lage wrijvingsweerstand heeft.



3.4 Aandrijving

Om het rad te laten roteren, zal de wrijvingskracht overwonnen moeten worden. Deze wrijvingskracht is afkomstig uit de wrijving in de opleggingen en de wrijving ten gevolge van de windbelasting. Er zal een aandrijving noodzakelijk zijn voor het hoofdrad, het zichtrad en de liftcapsules (individueel).



Figuur 94 - Wrijvingskrachten in het rad

Wanneer het rad stilstaat en geborgd is zal voorkomen moeten worden dat het aandrijfmechanisme belast wordt.

De aandrijving is noodzakelijk voor het overwinnen van de volgende krachten: wrijving in de opleggingen, windbelasting en asymmetrische belasting van de ring

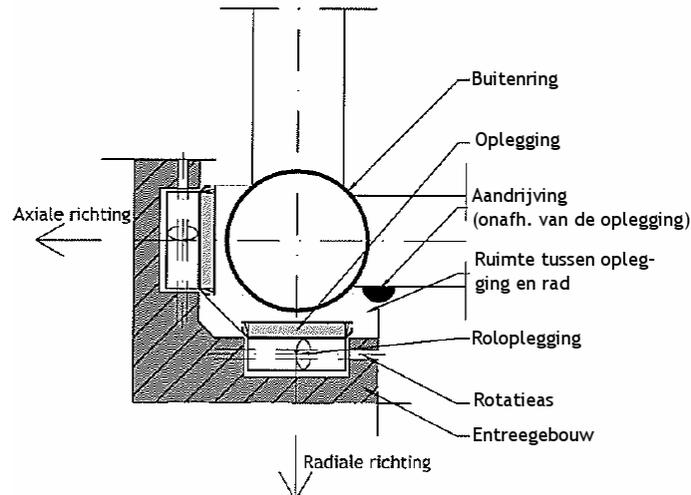
3.4.1 Verschillende onderdelen

Hoofdring

De aandrijving van het hoofdrad zal plaatsvinden op de randprofielen van het vakwerk. De aandrijving kan zowel plaatsvinden op het randprofiel van de binnenring (kleine diameter) als op het randprofiel van de buitenring (grote diameter). De aandrijving zal onafhankelijk moeten zijn van de opleggingen.

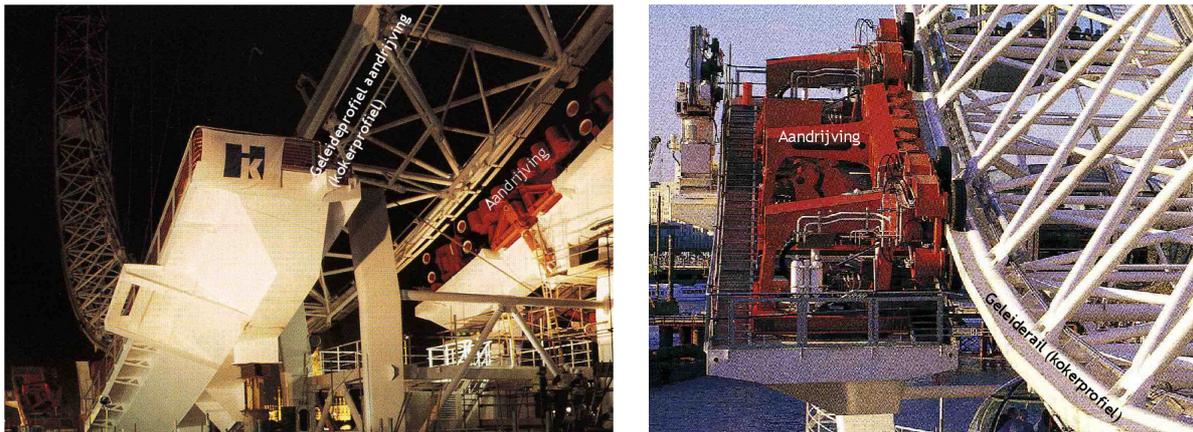
Aandrijving van de hoofdring zal hoogstwaarschijnlijk plaatsvinden door middel van roterende wielen op een geleiderail. Deze geleiderail zal naast het randprofiel (buitenring) geplaatst worden. De aandrijving zal onafhankelijk van de oplegging zijn.

Het is wellicht verstandiger om de aandrijving te laten plaatsvinden naast de randprofielen (zie figuur 95). Door de aandrijving niet op de randprofielen te laten aangrijpen, zal het ontwerp van deze profielen en van de aandrijving vereenvoudigd worden. De aandrijving zal plaatsvinden op een extra toegevoegd profiel.



Figuur 95 - Locatie aandrijving, onafhankelijk van de oplegging

Een mogelijkheid voor de aandrijving van het rad is het aandrijven van het rad door middel van roterende wielen op een geleiderail. Dit principe is gebruikt voor de aandrijving van het London Eye. Naast 'gladde' wielen is het ook mogelijk om tandwielen te laten roteren. Een nadeel van het gebruik van tandwielen is dat wanneer de aandrijving overbelast wordt geen slip zal optreden, waardoor schade aan de tandwielen zal ontstaan.



Figuur 96 - Aandrijfmechanisme London Eye

Een andere aandrijvingmethode is het gebruik van een lopende band. Deze lopende band zal het rad enkel aandrijven en niet ondersteunen, ondersteuning van het rad zal vanwege de grote belasting op de opleggingen niet mogelijk zijn ($F_{w;wind} \approx 6.000 \text{ kN}$).

Liftcapsule

De liftcapsules zullen onafhankelijk van de hoofdtring worden aangedreven. De aandrijving kan op verschillende manieren plaatsvinden. Zo kan er gebruik worden gemaakt van een kabel aandrijving, een tandwielaandrijving, of een lineaire aandrijving (magnetisme). De diverse aandrijvingmethoden zijn in paragraaf 3.2.3 behandeld.

Zichtcapsule

Ook de zichtcapsules zullen onafhankelijk van de hoofddraagconstructie worden aangedreven. Als aandrijving kan gebruik worden gemaakt van zowel de aandrijfprincipes voor de hoofdtring (roterende wielen) als van de aandrijfprincipes voor de liftcapsules (lineaire aandrijving).



3.4.2 Benodigd aandrijfvermogen

Het vermogen voor de aandrijving van het rad zal groot genoeg moeten zijn om de wrijvingsweerstand te overwinnen en het rad een acceleratie te kunnen geven.

De benodigde aandrijfkracht bedraagt:

$$F_{\text{aandrijving}} = \Sigma F_{\text{wrijving}} + m \cdot a$$

$$\Sigma F_{\text{wrijving}} = F_{w;\text{wind}} + F_{w;\text{oplegging}}$$

Het benodigde vermogen bedraagt:

$$P_{\text{aandrijving}} = F_{\text{aandrijving}} \cdot v$$

Voor de aandrijving van de hoofdring (exclusief capsules en variabele belasting) bedraagt het benodigde vermogen 17,1 kW, wanneer enkel de wrijving in de opleggingen wordt meegenomen. Het werkelijke vermogen zal hoger liggen, aangezien in deze berekening enkel is gekeken naar het eigen gewicht van de hoofddraagconstructie en niet naar de totale verticale belasting. Verder is de wrijving uit de windbelasting niet meegenomen. De windbelasting zal het benodigde aandrijfvermogen aanzienlijk doen toenemen.

- $m = 23103$ ton Massa hoofdraagconstructie rad
- $F_R = 312.000$ kN Totale reactiekracht
- $\mu_w = 0,002$ (roloplegging) Wrijvingscoëfficiënt
- $v = 0,027$ m/s Rotatiesnelheid
- $a = 3,88 \cdot 10^{-4}$ m/s² Acceleratie

(bij een acceleratie tijd van 1 minuut, aangenomen)

Wanneer deze berekening wordt toegepast op het London Eye bedraagt het benodigde effectieve vermogen 13,9 kW.

- $m = 1900$ ton
- $\mu_w = 0,002$ (roloplegging)
- $v = 0,24$ m/s
- $a = 0.01$ m/s²

(bij een acceleratie tijd van 4 minuten, aangenomen)

Vanwege de lagere rotatiesnelheid van het Great Dubai Wheel zal het benodigde relatieve aandrijfvermogen, ter overwinning van de wrijving, (P/m) lager zijn dan bij het London Eye. Wanneer ook de wind wordt meegenomen zal het benodigde aandrijfvermogen voor het Great Dubai Wheel aanzienlijk toenemen.

Nader onderzoek

De aandrijving van het rad zal plaatsvinden op het opleggebouw. De exacte aandrijfmethode dient nader onderzocht te worden. Ook de aandrijving van de andere functies, te weten het zichtrad en de liftcapsules zal nader bepaald moeten worden.

3.5 Knooppunten

Net als bij het ontwerp van de oplegging en de bevestiging van de capsules is ook in het huidige ontwerp nog niet exact gekeken naar de manier waarop de profielen in de knooppunten bij elkaar zullen komen. In het huidige ontwerp komen per knooppunt uit maximaal negen richtingen en minimaal uit 3 richtingen profielen bij elkaar. Gekozen kan worden om speciale knooppunten te ontwerpen waar de profielen aangelast worden, of om de wandprofielen (verticalen en diagonalen) rechtstreeks op de doorgaande randligger (buiten- en binnenring) te bevestigen.

In het ontwerp van de knooppunten zal vermoeiing een belangrijke rol spelen.

Gegoten verbindingen

Bij een eerste berekening ter bepaling van de profielafmetingen op vermoeiing is uitgegaan van gegoten knooppunten. Het voordeel van deze gegoten knooppunten is dat er een homogene verbinding wordt gecreëerd. De verbinding kan zodanig geoptimaliseerd worden dat er geen spanningsconcentraties in de verbinding zullen optreden. Ook zullen in deze verbindingen geen restspanningen optreden, zoals het geval zou zijn bij een gelaste verbinding.

De verbinding zal zodanig ontworpen moeten worden dat de aansluiting van de profielen op het knooppunt (bijv. gelast) maatgevend is voor de vermoeiing.

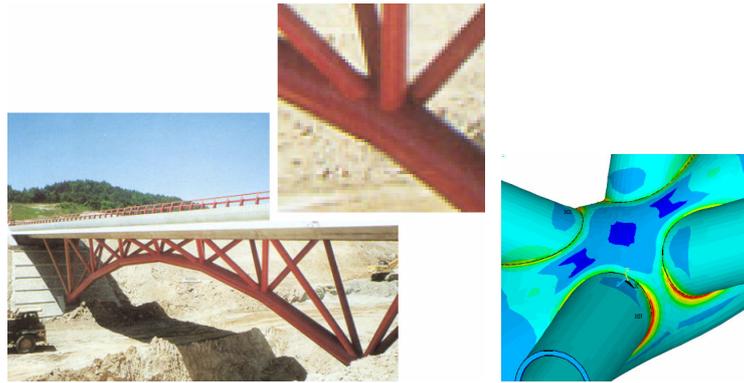


Figuur 97 - Gegoten knooppunten

Gelaste Verbinding

De knooppunten zullen ook opgebouwd kunnen worden uit buisprofielen welke verstijfd worden met behulp van aangelaste platen. Verder is het mogelijk om de wandprofielen rechtstreeks op de randprofielen te lassen. Deze rechtstreekse bevestiging zal echter leiden tot een aanzienlijk lagere toelaatbare spanningswisseling dan bij gebruik van een verstijfd knooppunt, figuur 98 toont een dergelijke verbinding.

In het ontwerp zullen altijd lasverbindingen noodzakelijk zijn. Ook wanneer gekozen wordt voor een gegoten knooppunt zullen de staafelementen via een lasverbinding aan de knooppunten worden bevestigd.

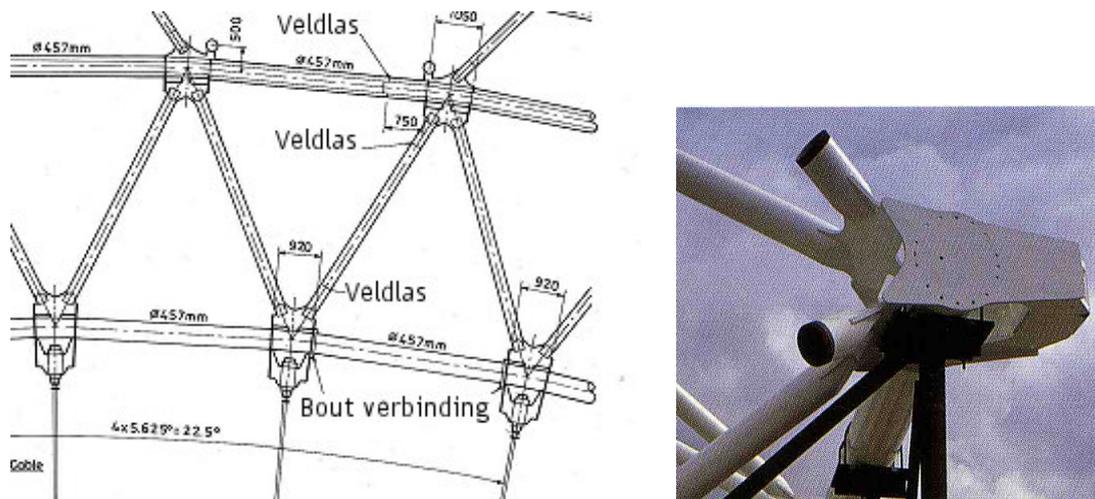


Figuur 98 - Gelast knooppunt

Geboute verbindingen

Indien het rad niet als een geheel gemaakt wordt kan het noodzakelijk zijn om de losse segmenten te verbinden, deze verbinding kan zowel gelast, als gebout worden. Deze wijze van verbinden is bijvoorbeeld in het London Eye toegepast, zie figuur 99.

Om in de geboute verbinding ook weerstand tegen vermoeiing te creëren zal er in de verbinding enkel contactdruk op mogen treden. Om te voorkomen dat er trek in de verbinding ontstaat, zullen de bouten moeten worden voorgespannen zodat de krachten altijd via contactdruk worden overgebracht.



Figuur 99 - Geboute verbinding London Eye

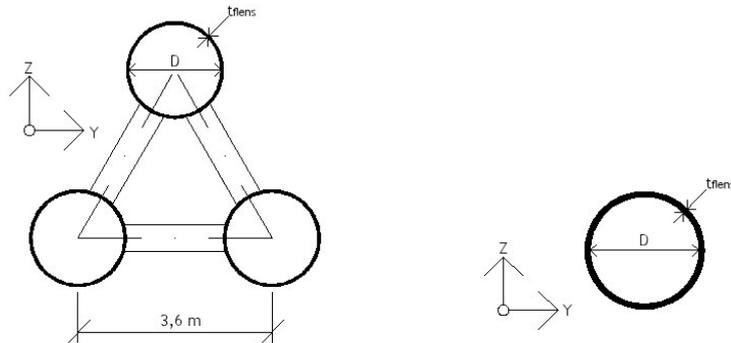
Conclusie

Bij het ontwerp van de knooppunten zal vermoeiing een belangrijke rol spelen.

Door het knooppunt zodanig te ontwerpen dat er weinig tot geen spanningconcentraties ontstaan, zal de vermoeiingslevensduur van de constructie gunstig beïnvloed worden. Niet het knooppunt, maar de aansluiting van het profiel op het knooppunt zal nu maatgevend zijn voor de vermoeiing.

3.6 Profielen

De definitieve profielkeuze voor het rad is nog niet gemaakt. In het huidige ontwerp is gebruikgemaakt van samengestelde profielen, deze zijn opgebouwd uit buisprofielen. De profielen gebruikt voor de eerste berekening hebben een diameter van 1,2 á 1,8 meter en een wanddikte van 16 mm. Voor de hart op hart afstand tussen de profielen is 3,6 meter aangenomen. De buizen zijn onderling verbonden, waardoor de stijfheid van het samengestelde profiel toeneemt. De profielen zullen een staalsoort S355 hebben.



Figuur 100 - Geometrie profiel, huidig profiel en alternatief

De profielafmetingen zoals in het huidige ontwerp worden gehanteerd zullen problemen opleveren wanneer naar vermoeiing wordt gekeken. De verhouding tussen de wanddikte en de diameter van de randstaaf (2γ) zal slechts 75 á 112,5 zijn, terwijl een waarde van 20 á 25 in geval van op vermoeiing belaste profielen de voorkeur heeft. In het profiel zullen meerdere verbindingen noodzakelijk zijn, dit beïnvloedt de vermoeiing negatief. Ook zullen de huidige profielafmetingen het vrije uitzicht negatief beïnvloeden.

Als alternatief kan er gekozen worden voor het gebruik van één profiel met een grotere wanddikte en eventueel ook een iets grotere diameter. Bijvoorbeeld profielen met een diameter van 1400 respectievelijk 2200 mm, maar met een wanddikte van 40 mm. De verhouding tussen de wanddikte en de diameter van de randstaaf (2γ) zal in dit geval 35 á 55 bedragen, wat gunstiger is voor het vermoeiingsgedrag van de constructie.

De profielen in het ontwerp van het Great Dubai Wheel zullen bij voorkeur de vorm van een enkel buisprofiel hebben.

Het enkele buisprofiel zal het vrije zicht beperkt belemmeren en zal bovendien gunstiger zijn vanuit het oogpunt van vermoeiing.

Een nadeel van de keuze voor een enkel buisprofiel is dat het traagheidsmoment laag is. Dit zal de elementen van de constructie gevoeliger voor lokale instabiliteit maken. De controle van de profieldoorsnede op stabiliteit en sterkte zal plaatsvinden in hoofdstuk 6 en 8.

Nader onderzoek

In het ontwerp zijn slechts twee profielafmetingen toegepast. Deze profieldoorsneden zullen niet allemaal volledig belast worden, door meerdere profielafmetingen toe te passen zullen de profielen efficiënter belast worden en kan misschien zelfs het eigen gewicht van de constructie worden teruggebracht. Een andere mogelijkheid om het eigen gewicht te doen afnemen en het materiaal efficiënter te gebruiken, is het variëren van de wanddikte van over de lengte van een profiel, waardoor het materiaal zich daar bevindt waar het nodig is.



3.7 Aanbeveling

Capsules

Om de verschillende functies in het rad onder te brengen is het noodzakelijk om per functie een capsule te ontwerpen. In het ontwerp zal onder andere rekening moeten worden gehouden met de verblijftijd in de capsule, de bevestiging van de capsule en de aandrijving van de capsules.

De 24 hoofdcapsules hebben elk een lengte van 30 meter en een diameter van 15 meter. De hoofdcapsules zullen vanwege de lange rotatietijd (6 uur) ingericht worden als semi-permanente verblijfruimtes. De capsules worden deels zelfvoorzienend. De capsules zullen middels een rotatiering aan de hoofdtring bevestigd worden.

De liftcapsules zijn noodzakelijk voor het interne transport in het rad. Ze hebben een diameter van 2,5 à 3 meter en een lengte van 1,7 à 2,5 meter. De capsules zullen onafhankelijk van elkaar en van de hoofdtraagconstructie kunnen bewegen, zij zullen aangedreven worden door een lineaire aandrijving.

De 36 zichtcapsules hebben elk een lengte van 4 meter en een diameter van 10 meter. De zichtcapsules bieden elk plaats aan maximaal 40 passagiers die een korte (30 minuten) rit willen maken. De capsules zullen onafhankelijk van de hoofdtraagconstructie kunnen bewegen.

Oplegging

De oplegging van het rad zal de rotatie moeten toestaan. Vanwege de grote reactiekrachten in de opleggingen is het gebruik van teflon niet mogelijk. Gebruik van een roloplegging zal vanwege zijn lage wrijvingsweerstand en slijtage de voorkeur verdienen. Deze rolopleggingen zullen vanwege de hoge reactiekrachten aanzienlijke afmetingen hebben ($D > 1,0$ m). Voor het definitieve ontwerp van de oplegging zal verder onderzoek noodzakelijk zijn.

Aandrijving

De aandrijving van het rad zal onafhankelijk van de opleggingen plaatsvinden middels roterende wielen. Ook voor het definitieve aandrijfsysteem is een dieper onderzoek noodzakelijk.

Knooppunten

De knooppunten zullen niet maatgevend mogen zijn voor de vermoeiingslevensduur van de constructie. Door het knooppunt zodanig te ontwerpen dat er weinig tot geen spanningconcentraties ontstaan, zal de vermoeiingslevensduur van de constructie gunstig beïnvloed worden. Niet het knooppunt, maar de aansluiting van het profiel op het knooppunt zal nu maatgevend zijn voor de vermoeiing. Het ontwerp van een knooppunt dat niet gevoelig is voor vermoeiing zal nader onderzocht moeten worden.

Profielen

De profielen in het ontwerp van het Great Dubai Wheel zullen bij voorkeur de vorm van een enkel buisprofiel hebben. Het enkele buisprofiel zal het vrije zicht beperkt belemmeren en zal bovendien gunstiger zijn vanuit het oogpunt van vermoeiing.



4 Belastingen

Op de constructie van het Great Dubai Wheel zullen diverse belastingen werken, die zowel verticaal, als horizontaal (axiaal) werken.

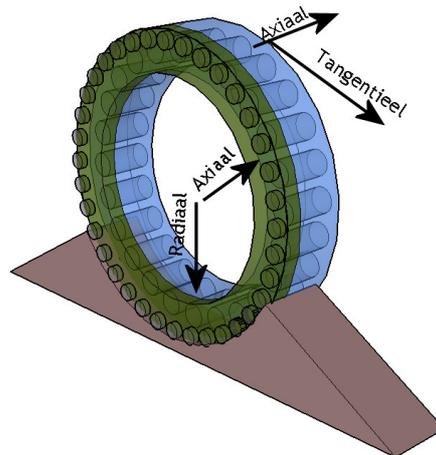
Belangrijke verticale belastingen zijn afkomstig uit het eigen gewicht van de hoofddraagconstructie en de capsules. Ook zal de veranderlijke vloerbelasting een bijdrage leveren aan de uiteindelijke verticale belasting werkende op de constructie.

Naast de verticaal gerichte krachten werken er op de constructie ook axiale gerichte krachten. Deze belastingen zullen slechts incidenteel op de constructie werken. Voorbeelden van deze axiale belastingen zijn windbelastingen en aardbevingsbelastingen.

Door het roteren van het rad zal in de opleggingen wrijving optreden. De wrijvingskracht zal horizontaal op de constructie werken en de normaalkracht in de randprofielen afhankelijk van de locatie van de aandrijving verhogen, of verlagen. Als gevolg van het roteren van het rad zullen tevens acceleratiekrachten in radiale en tangentiële richting ontstaan.

Vanwege de configuratie van de ondersteuning van het rad zullen vervormingen niet ongehinderd kunnen optreden. Uitzettingen van de constructie ten gevolge van bijvoorbeeld de temperatuursverschillen zullen leiden tot extra krachten in de profielen.

In dit hoofdstuk zullen de diverse belastingen die op de constructie werken gepresenteerd worden.



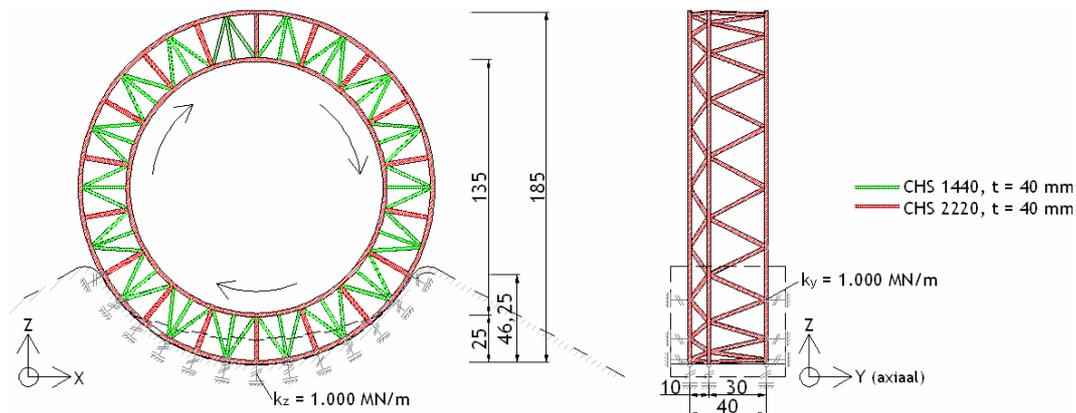
Figuur 101 - Richtingen rad

4.1 Permanente belasting

De permanent op de constructie aanwezige belasting zal bestaan uit zowel het eigen gewicht van de hoofddraagconstructie, als het eigen gewicht van de capsules. Vanwege de roterende beweging zal de permanente belasting een belangrijke bijdrage aan de vermoeiing van de constructie leveren.

4.1.1 Eigen gewicht hoofddraagconstructie

Voor een eerste benadering van het gewicht van de hoofddraagconstructie is uitgegaan van het huidige ontwerp met drie vakwerkringen onderling verbonden via wandstaven.



Figuur 102 - Overzicht huidig ontwerp rad

Het eigen gewicht van het huidige ontwerp van de hoofddraagconstructie van het rad bedraagt ongeveer **23.200 ton**.

4.1.2 Eigen gewicht capsules

In het rad bevinden zich verschillende functies. Voor de verschillende functies zullen verschillende capsules vereist zijn. In het rad zijn drie type capsules te onderscheiden: de hoofdcapsules, met een hotel- en bijeenkomstfunctie, de liftcapsules, voor het interne transport, en de zichtcapsules.

Hoofdcapsule

De hoofdcapsules hebben een lengte van 30 meter en een diameter van 15 meter en zijn excentrisch geplaatst tussen vakwerkkring A en B. Hierdoor zal de constructie reeds een initiële scheefstand hebben.

In de hoofdcapsules bevinden zich verschillende functies. Naast hotelcapsules zullen enkele capsules ingericht worden voor een bijeenkomstfunctie, bijv. een restaurant. Ter bepaling van het eigen gewicht van de capsules is aangenomen dat het gewicht van elke capsule gelijk is.

De permanente belasting zal afhankelijk zijn van het vloeroppervlak, het wandoppervlak en de oppervlakte van de gevel.

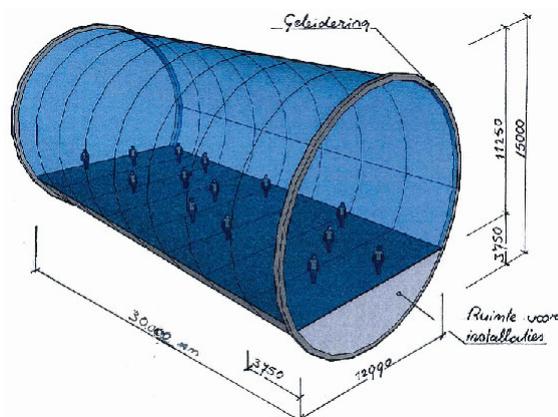
Voor een hotelcapsule met een vloeroppervlak van 450 m^2 (1 verdieping), een wandoppervlak van 2000 m^2 en een geveloppervlak van 1400 m^2 zal de totale permanente belasting 3600 kN ($\approx 360 \text{ ton}$). In deze berekening is aangenomen dat de wanden over de



gehele hoogte van de capsule doorgaan. Door de wandhoogte, of het aantal wanden te beperken zal het gewicht van de capsule aanzienlijk verminderd kunnen worden.

Belastingen	
Vloer + afwerklaag	1,40 kN/m ²
Leidingen, plafond, e.d.	0,50 kN/m ²
Staal (constructie)	1,00 kN/m ²
	2,90 kN/m ²
Lichte scheidingswanden	0,80 kN/m ²
Façade	0,50 kN/m ²

Tabel 6 - Belastingen op de hoofdcapsule



Figuur 103 - Overzicht hoofdcapsule

In de gewichtsberekening is enkel gekeken naar een hotelcapsule. In het rad bevinden zich echter ook capsules met een bijeenkomstfunctie, waarin het wandoppervlak lager zal zijn. Voor het onderzoek van het constructieve gedrag van het Great Dubai Wheel is echter aangenomen dat alle hoofdcapsules een gelijk gewicht hebben.

In de gewichtsberekening is besloten een verticale geluidisolerende scheiding tussen de hotelkamers aan te brengen. Zodoende wordt voorkomen dat zware vloeren gebruikt moeten worden om aan de geluidseisen te voldoen.

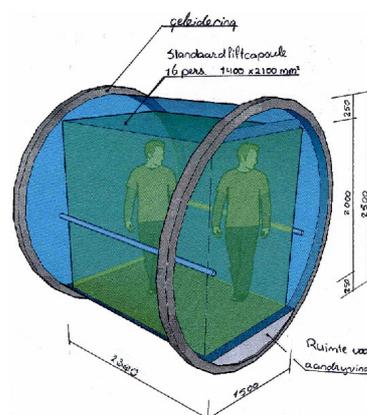
Een uitleg van de gebruikte waarden ter bepaling van het eigen gewicht van de hoofdcapsule is te vinden in Bijlage B.1.

Liftcapsule

De afmeting van de liftcapsule zijn nog niet definitief bepaald. Het minimale vloeroppervlak zoals is bepaald in het hoofdstuk over het liftstelsel bedraagt 1,4 x 2,1 m². Bij deze vloerafmeting biedt de lift plaats aan 16 personen. De belastingen zijn in het onderstaande overzicht getoond.

Belastingen	
Vloer + afwerklaag	1,25 kN/m ²
Leidingen, plafond, e.d.	0,50 kN/m ²
Staal (constructie)	0,50 kN/m ²
	2,25 kN/m ²
Façade	0,50 kN/m ²

Tabel 7 - Belastingen op de liftcapsule



Figuur 104 - Overzicht liftcapsule

Wanneer de liftcapsule een lengte heeft van 2,25 meter en een diameter van 2,5 meter, bedraagt de permanente belasting uit het eigen gewicht 20,8 kN (\approx 2,1 ton). Bij een

lengte van 1,5 meter en de diameter van 3 meter bedraagt de permanente belasting ook ongeveer 20,8 kN ($\approx 2,1$ ton).

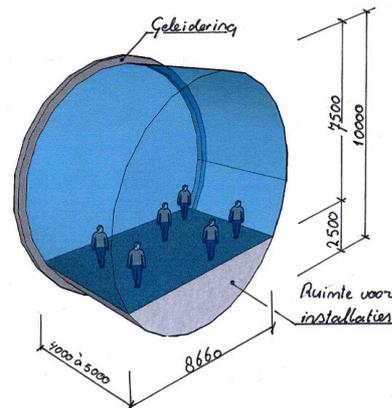
De belasting komende uit de liftcapsules is relatief klein en zal in het vervolg van de analyse van het rad niet worden meegenomen.

Zichtcapsule

Net als voor de afmetingen van de liftcapsules zijn de afmetingen van de zichtcapsules nog niet vastgelegd. De belastingen zijn in het onderstaande overzicht getoond. De zichtcapsule biedt plaats aan maximaal 40 personen.

Belastingen	
Vloer + afwerklaag	1,25 kN/m ²
Leidingen, plafond, e.d.	0,50 kN/m ²
Staal (constructie)	0,50 kN/m ²
	2,25 kN/m²
Façade	0,50 kN/m ²

Tabel 8 - Belastingen op de zichtcapsule



Figuur 105 - Overzicht zichtcapsule

Bij een liftcapsule met een lengte van 5 meter en een diameter van 10 meter bedraagt de totale permanente belasting uit een capsule ongeveer 270 kN (≈ 27 ton).

4.1.3 Overzicht

In tabel 9 is een overzicht getoond van alle aanwezige permanente belastingen. De totale permanente belasting bedraagt ongeveer 33.000 ton. De totale permanente belasting wordt voornamelijk bepaald door het eigen gewicht van de hoofdconstructie (70,5 %). De bijdrage uit de zicht- en liftcapsules aan de permanente belasting is klein.

Permanente belastingen				
onderdeel	aantal	belasting	totale belasting	percentage t.o.v. totale permanente belasting
hoofddraagconstructie	1	230.000 kN	230.000 kN	70,5%
Capsules:				
Hoofdcapsule	24	3.600 kN	86.400 kN	26,5%
Liftcapsule	8	21 kN	168 kN	0,05%
Zichtcapsule	36	270 kN	9.720 kN	3,0%
			326.288 kN	

Tabel 9 - Overzicht permanente belasting

De in tabel 9 getoonde waarden zijn belastingen zonder belastingfactoren. Voor de sterkte en stabiliteitsberekening zullen de waardes nog met een belastingfactor worden vermenigvuldigd.



Vergelijking met reeds bestaande raden

De totale permanente belasting komende uit het eigen gewicht van de constructie is in vergelijking met reuzenraden als het London Eye en het Beijing Wheel hoog. Het Great Dubai Wheel heeft in tegenstelling tot de andere raden echter een heel andere functie en constructie. In de vergelijking zal naast de permanente belasting ook naar de veranderlijke vloerbelasting gekeken moeten worden.

Great Dubai Wheel	33.000 ton
Beijing Wheel	2.800 ton
London Eye	1.900 ton

Tabel 10 - Vergelijking gewicht Great Dubai Wheel met bestaande reuzenraden

4.2 Veranderlijke belastingen

De veranderlijke bestaat uit de veranderlijke vloerbelasting in de capsule, de windbelasting en aardbevingsbelasting. De eerste twee zullen in deze paragraaf worden bepaald. De belasting komende uit aardbevingen wordt niet exact bepaald. De veranderlijke belastingen zijn deels afgeleid van de NEN 6702 en deels zelf bepaald.

4.2.1 Veranderlijke belasting capsules

De verschillende capsules zullen verschillende veranderlijke vloerbelastingen hebben. De in deze paragraaf getoonde veranderlijke belastingen zijn de veranderlijke belastingen exclusief de momentaan- en belastingfactor.

De veranderlijke vloerbelasting van de capsules zal het benodigde aandrijfvermogen van het rad beïnvloeden. Wanneer in het rad sprake is van een asymmetrische vloerbelasting, bijvoorbeeld doordat de helft van de capsules gevuld is, zal er in de constructie een roterend moment ontstaan. Dit moment kan zowel positief, als negatief voor het aandrijfvermogen werken.

Hoofdcapsule

In de hoofdcapsule bevinden zich verschillende functies, ter bepaling van de veranderlijke vloerbelasting is gebruik gemaakt van de NEN 6702. De veranderlijke vloerbelasting is bepaald voor een woonfunctie (hotel) en een bijeenkomstfunctie (restaurant). In tabel 11 is de veranderlijke vloerbelasting per functie te zien.

<u>Veranderlijke Belastingen</u>		
Woonfunctie	$\psi=0,4$	1,75 kN/m ²
Bijeenkomst	$\psi=0,25$	5 kN/m ²

Tabel 11 - Belastingen op de hoofdcapsule, NEN 6702

De veranderlijke belasting is afhankelijk van het vloeroppervlak en de functie van de capsule. Bij een vloeroppervlak van 15 x 30 m² bedraagt de veranderlijke belasting 788 kN (\approx 79 ton) voor de hotelcapsules en 2.250 kN (\approx 225 ton) voor de restaurantcapsules.

Wanneer wordt aangenomen dat zich in het rad 20 hotelcapsule en 4 restaurantcapsules bevinden zal de totale veranderlijke belasting 24.760 kN (\approx 2.500 ton) bedragen.

Liftcapsule

De liftcapsule biedt plaats aan 16 personen. Voor liften van 16 personen zal de maximaal toelaatbare veranderlijke belasting 1.275 kg (\approx 1,3 ton) bedragen.

Zichtcapsule

In de zichtcapsule worden maximaal 40 personen toegelaten. Indien als veranderlijke belasting 1,0 kN/m² wordt aangenomen zal elke persoon 125 kg kunnen wegen. De belastingen zijn in het onderstaande overzicht getoond.

De veranderlijke belasting per capsule bedraagt 50 kN (\approx 5 ton). In totaal bevat het rad 36 zichtcapsules de totale veranderlijke belasting bedraagt 1800 kN (\approx 180 ton).

Overzicht

Veranderlijke vloerbelastingen			
onderdeel	aantal	belasting	totale belasting
Hoofdcapsule	20	788 kN	15.760 kN
	4	2.250 kN	9.000 kN
Liftcapsule	8	13 kN	104 kN
Zichtcapsule	36	50 kN	1.800 kN
			26.664 kN

Tabel 12 - Overzicht veranderlijke vloerbelasting

Wanneer de veranderlijke vloerbelastingen niet gelijkmatig over het rad zijn verdeeld zal er in het rad een asymmetrische belasting ontstaan.

4.2.2 Wind

Het windklimaat is ongeveer vergelijkbaar met het windklimaat aan de Nederlandse kust. Voor een benadering van de windbelasting is het dan ook mogelijk om gebruik te maken van de Nederlandse norm. De windbelasting op het Great Dubai Wheel is bepaald met behulp van de Nederlandse norm NEN 6702.

Bepaling stuwdruk

Ter bepaling van de stuwdruk op het rad is gebruik gemaakt van de volgende formules, afkomstig uit de NEN6702:

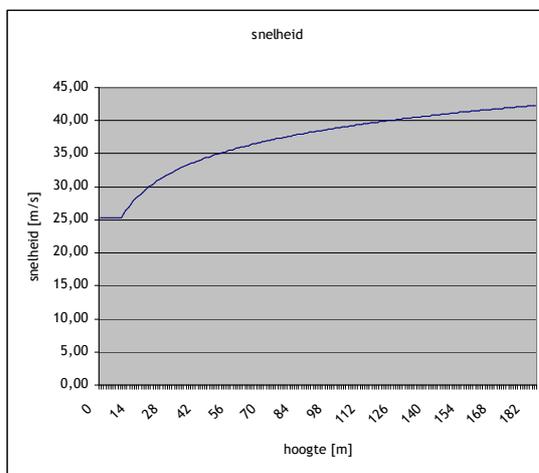
$$\rho_w = (1 + 7 I(z)) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_w^2(z) \quad I(z) = \frac{k}{\ln\left(\frac{z - d_w}{z_0}\right)} \quad v_w(z) = 2,5 \cdot u^* \cdot \ln\left(\frac{z - d_w}{z_0}\right)$$



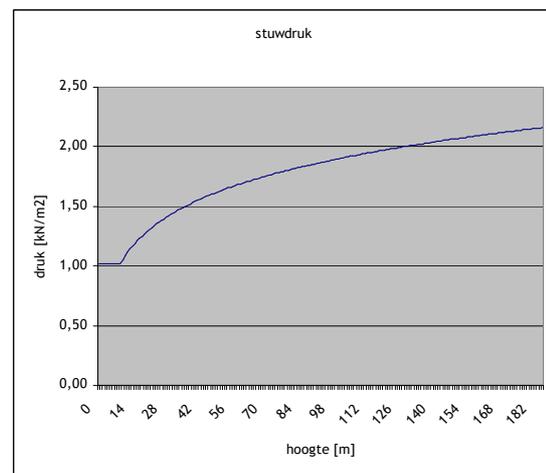
	Onbebouwd			Bebouwd		
	I	II	III	I	II	III
u^*	2,25	2,3	2,25	3,08	2,82	2,6
z_0	0,1	0,2	0,3	0,7	0,7	0,7
d_w	0	0	0	3,5	3,5	3,5
k	1	1	1	0,9	0,9	0,9

Tabel 13 - Karakteristieken van de gestandaardiseerde windomgeving, volgens NEN 6702 [bijlage A.1]

Uitgegaan is van een gebouw aan de kust, gebied I, in een onbebouwd gebied. Wanneer de waarden van tabel 13 worden ingevoerd in de bovenstaande formules kan het verloop van de windsnelheid en -druk over de hoogte worden bepaald. Het verloop over de hoogte is in figuur 106 en figuur 107 te zien. Op een hoogte van 185 meter bedraagt de windsnelheid 42,3 m/s en de stuwdruk 2,16 kN/m².



Figuur 106 - Verloop snelheid over de gebouwhoogte



Figuur 107 - Verloop stuwdruk over de gebouwhoogte

De gevonden windsnelheid op 185 meter hoogte is vergelijkbaar met de windsnelheid, zoals is toegepast in het ontwerp van de Burj Al Arab. In dit ontwerp is gebruik gemaakt van een windsnelheid van 45 m/s.



Figuur 108 - Burj Al Arab

Totale windbelasting

Voor de verdere analyse van het gebouw zal het verloop van de winddruk over de hoogte als uniform worden aangenomen. De waarde die over de gehele hoogte wordt aangehouden bedraagt $p_w(185) = 2,16 \text{ kN/m}^2$.

Ter bepaling van de totale windbelasting is de buitenring van het rad als geheel gesloten aangenomen. Er zal dus geen wind tussen de profielen en de capsules doorstromen. Dit zal waarschijnlijk een te hoge windbelasting opleveren. De werkelijke windbelasting op het rad, inclusief de vormfactoren zal met behulp van een windtunnelonderzoek bepaald moeten worden.

Ter bepaling van de totale windbelasting is uitgegaan van een uniforme drukverdeling over de hoogte en verder is het rad als een volledig gesloten ring benaderd.

De totale windbelasting op de ring wordt bepaald met de volgende formule:

$$W_i = A_i \times p_w$$

$$, \text{ waarin: } p_w = C_{dim} \times C_{index} \times C_{eq} \times \Phi_1 \times p_w(z)$$

C_{dim} , factor afhankelijk van de gebouwafmeting, deze is bij standaard hoge gebouwen veelal lager dan 1,0, volgens NEN 6702, bijlage A.2 . Het Great Dubai Wheel is echter geen standaard gebouw, daarom is een conservatieve waarde aangenomen van:

[1,0]

C_{index} , de windvormfactor bedraagt

[0,8, stuwdruk loefzijde]

[0,4, zuiging lijzijde]

[0,04, wrijving zijvlak]

C_{eq} , drukvereffeningscoëfficiënt

[1,0]

Φ_1 , dynamische vergrotingsfactor, zal gecontroleerd worden in paragraaf 9.3

[1,1]

A_i , het getroffen oppervlak bedraagt:

[12.566 m², oppervlak aangewaaid]

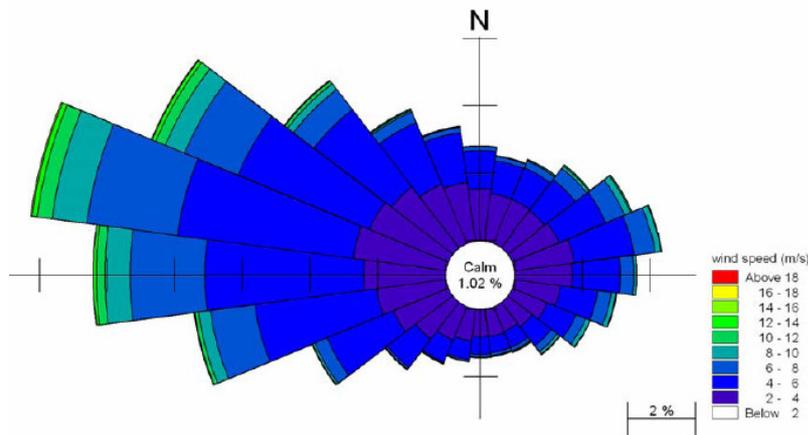
[40.212 m², wrijvingoppervlak]

$$W_i = A_{\text{frontaal}} \times (\sum C_{index} \times \Phi_1 \times p_w(z)) + A_{\text{zij}} \times (\sum C_{index} \times \Phi_1 \times p_w(z))$$

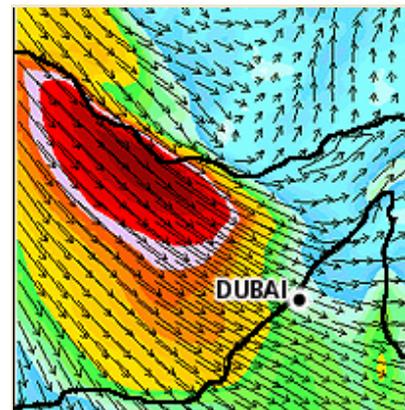
$$W_i = 12\,566 \times ((0,8 + 0,4) \times 1,1 \times 2,16) + 40\,212 \times (0,04 \times 1,1 \times 2,16) \approx 39.500 \text{ kN}$$

Aanbeveling

In de hierboven berekende windbelasting is aangenomen dat de wind uit alle richtingen een gelijke windbelasting veroorzaakt. In werkelijkheid komt de wind in Dubai hoofdzakelijk uit noordwestelijke richting. Door bij de situering van het gebouw rekening te houden met de overheersende windrichting kan de windbelasting op het gebouw gunstig beïnvloedt worden.



Figuur 109 - Windroos Dubai, op 10 m boven het maaiveld



Figuur 110 - Windveld van een Shamal windstorm (1988)

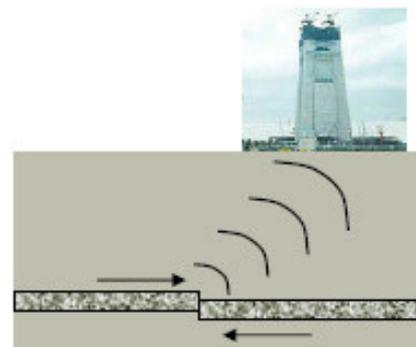
Bij de bepaling van de totale windbelasting is aangenomen dat deze uniform over de hoogte is verdeeld. Over de gehele hoogte van het rad is de windsnelheid op een hoogte van 185 meter aangebracht. In werkelijkheid zal het windprofiel logaritmisch over de hoogte verlopen, hierdoor zal de totale windbelasting op het rad aanzienlijk lager zijn dan voor de analyse is toegepast. Door dit logaritmische verloop in een vervolgonderzoek in meet te nemen zal het constructieve gedrag beter benaderd kunnen worden, het ontwerp zal dan efficiënter worden.

4.2.3 Aardbeving

Als gevolg van onderlinge verschuiving van twee tektonische platen langs elkaar ontstaat een trilling van de ondergrond. Deze trilling zal, wanneer het gebouw niet van de ondergrond geïsoleerd is, een horizontale belasting op het gebouw veroorzaken. In het ontwerp van een gebouw zal voorkomen moeten worden dat er bij een gemiddelde aardbeving schade optreedt aan de draagconstructie.



Figuur 111 - Schade ten gevolge van een aardbeving, Taiwan 1999



Figuur 112 - Voortplanting van een aardbeving door de grond

Dubai heeft een gemiddeld aardbevingsrisico. De bevingen zullen ontstaan in een gordel tussen het Oman-gebergte in het oosten en het Zagros-gebergte in het zuidoosten van Iran.

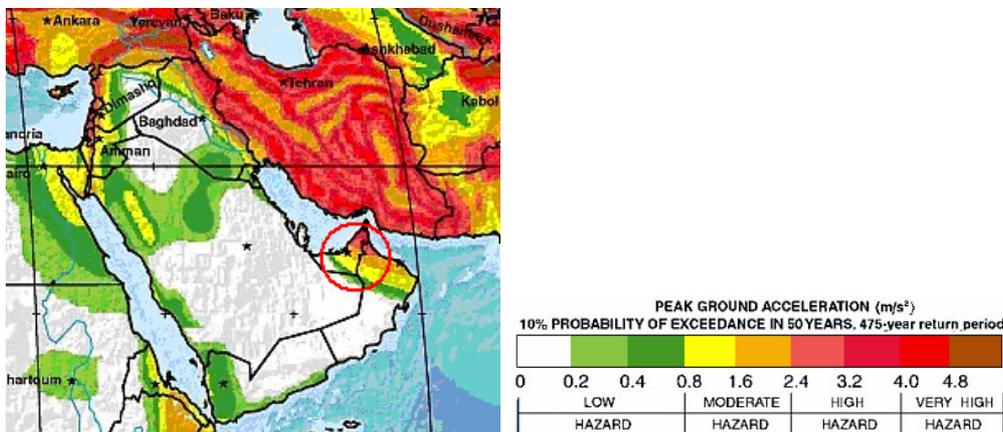
Dubai heft een gemiddeld aardbevingsrisico. Wanneer een gebouw hoger is dan 100 m, is het noodzakelijk om het gebouw zo te ontwerpen dat het aardbevingen zonder schade kan doorstaan.

Volgens de regelgeving in Dubai is het noodzakelijk dat gebouwen hoger dan 100 meter zo ontworpen worden dat aardbevingen zonder schade kunnen worden doorstaan. Onder deze categorie valt ook het Great Dubai Wheel.

Voor de controle van het gebouw op aardbevingsbestendigheid kan gebruik worden gemaakt van de Uniform Building Code 97 (UBC97). Dubai is in deze norm ingedeeld in seismische regio 2a, met een zonefactor $Z=0,15$ en een grondprofiel S_c (zachte rots).

Nader onderzoek

In dit onderzoek zal er geen controle van het gebouw op aardbevingsbestendigheid worden uitgevoerd. Omdat het gebouw echter hoger is dan 100 meter en het eigen gewicht erg hoog is zal een nader onderzoek noodzakelijk zijn. In dit onderzoek zal inzicht verkregen in de spanningen die ten gevolge van een aardbeving in de constructie ontstaan. De spanningen zullen niet tot een plastische vervorming van de constructie mogen leiden, omdat dit het roteren en hierdoor het functioneren van het rad kan verhinderen.



Figuur 113 -Seismic Hazard map, Midden Oosten

4.3 Rotatie belastingen

Als gevolg van de roterende beweging van het rad zullen er in het rad extra krachten optreden. Zo zal aan de voet van het rad in de opleggingen een wrijvingskracht ontstaan, vanwege de verplaatsing van de oplegpunten. Ter plaatse van de roterende capsules zal een acceleratiekracht in radiale en tangentiële richting ontstaan. In deze paragraaf worden beide belastingen afzonderlijk behandeld.

4.3.1 Wrijving belasting

De grootte van de wrijvingskracht in de opleggingen is afhankelijk van de gekozen oplegmethode en zal het laagst zijn wanneer gekozen wordt voor een roloplegging ($f_{\max} = 0,0020$).

De som van de reactiekrachten uit het eigen gewicht van de hoofd draagconstructie bedraagt ongeveer 300.000 kN. De totale wrijving in de opleggingen is in dit geval:

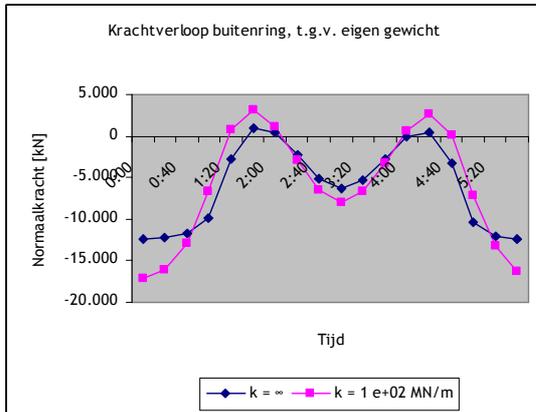
$$F_w = M_r / (D/2) = \sum F_{\text{reactie}} \times f_{\max}$$

$$F_w = 300.000 \times 0,0020 = 600 \text{ kN (200 kN/ring)}$$

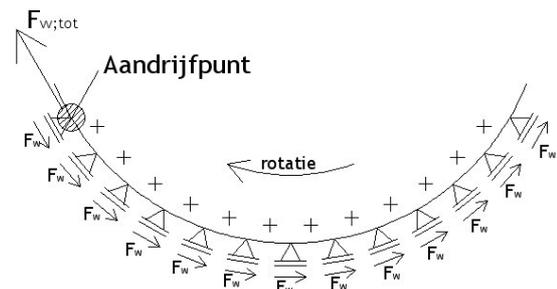


De wrijvingskracht is het laagst wanneer een roloplegging gebruikt wordt, $f_{ax} = 0,002$.

Afhankelijk van de locatie van de aandrijving resulteert de wrijvingskracht in trek, of druk in de buitenring. De grootte van de spanningstoename ten gevolge van wrijving zal relatief klein zijn in vergelijking met de optredende spanningen in de buitenring, zie figuur 114. In de analyse van het rad wordt de wrijvingskracht dan ook niet meegenomen worden.



Figuur 114 - Krachtsverloop in de buitenring, ten gevolge van eigen gewicht hoofddraagconstructie



Figuur 115 - Invloed rotatiepunt op krachtsverloop buitenring

De extra belasting in het rad ten gevolge van wrijving is relatief klein en zal in de verdere analyse van het rad niet worden meegenomen.

4.3.2 Acceleratie belasting

Het wiel is opgebouwd uit ringen met verschillende functies. De eisen aan de acceleratie voor de verschillende functies zal variëren.

De belasting voortkomend uit acceleratie kan beschreven worden met de algemene formule:

$$F_{acc} = - m \cdot a_G$$

m [kg] massa van het versnelde object

a_G [m/s²] versnelling

Vanwege de roterende beweging van het rad zal ook de versnelling een cirkelvormige baan volgen. De versnelling zal uit twee componenten bestaan een normale component (a_G)_N en een tangentiële component (a_G)_T.

$$(a_G)_N = \omega^2 \cdot r_G$$

(a_G)_N [m/s²] normaal versnelling

ω [rad/s] hoeksnelheid

r_G [m] straal

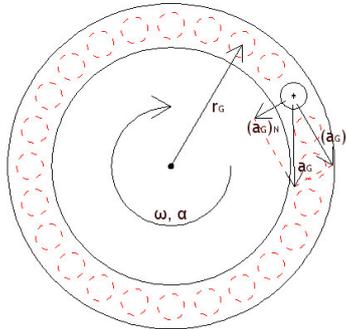
$$(a_G)_T = \alpha \cdot r_G$$

(a_G)_T [m/s²] tangentiële versnelling

Great Dubai Wheel

$\alpha = d\omega/dt$ [rad/s²] hoekversnelling

r_G [m] straal



Figuur 116 - Richtingen rotatieversnellingen capsule

In de onderstaande tabellen zijn de versnellingen en de acceleratiekrachten van de verschillende raden en capsules getoond.

						versnelling	
	rotatietijd	acceleratie-tijd	straal (gemiddeld)	hoeksnelheid	hoekversnelling	normaal	tangentieel
hoofdrad	6 uur	60 s	80 m	2,91E-04 rad/s	4,85E-06 rad/ s ²	6,77E-06 m/s ²	3,88E-04 m/ s ²
zichtrad	30 minuten	60 s	86,25 m	3,49E-03 rad/s	5,82E-05 rad/ s ²	1,05E-03 m/s ²	5,02E-03 m/s ²
liftcapsule	2 minuten	6 s	80 m	5,24E-02 rad/s	8,73E-03 rad/ s ²	2,19E-01 m/s ²	6,98E-01 m/s ²

Tabel 14 - Overzicht versnellingen

		kracht	
	gewicht	normaal	tangentieel
hoofddraagconstructie (verdeeld over de gehele ring)	23.000.000 kg	156 N	8.961 N
hoofdcapsule (excl. veranderlijke belasting)	360.000 kg	2 N	140 N
zichtcapsule	27.000 kg	30 N	150 N
liftcapsule	3.000 kg	27 N	2.100 N

Tabel 15 - Overzicht acceleratiekrachten per capsule

De acceleratiekracht komende uit de hoofdcapsules zijn relatief klein in vergelijking met de acceleratiekrachten komende uit de liftcapsule. Wanneer deze krachten worden vergeleken met de staafkrachten in de ring (≈ 10.000 kN) zijn de acceleratiekrachten klein.

De definitieve versnellingen zijn nog niet exact gedefinieerd. Zo kan de acceleratietijd, of de rotatietijd van de diverse onderdelen nog afwijken. De acceleratiekrachten zijn echter dusdanig klein dat een hoger gewicht, of een grotere acceleratie slechts geringe invloed heeft op het krachtsverloop in het rad.



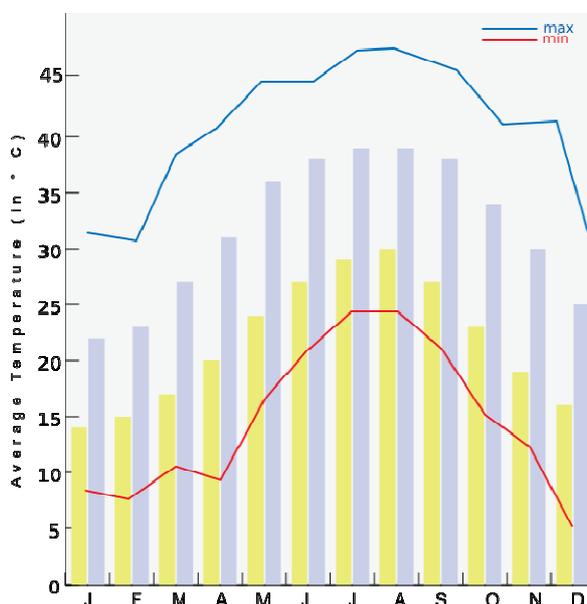
De extra belasting in het rad ten gevolge van de acceleratie is klein en zal in de verdere analyse van het rad niet worden meegenomen.

4.4 Belastingen uit opgelegde vervormingen

Omdat de constructie statisch onbepaald is zullen vervormingen in de constructie en in de opleggingen tot extra spanningen in de elementen leiden. Voorbeelden van opgelegde vervormingen zijn zettingen van de fundering en vervorming ten gevolge van temperatuurswisselingen. In de analyse van het Great Dubai Wheel is geen rekening gehouden met krachten komende uit opgelegde vervormingen ten gevolge van temperatuurswisselingen.

Om de vervorming van de fundering in de analyse van het rad mee te nemen zijn de opleggingen als verend gemodelleerd. De veerstijfheid van de opleggingen bedraagt 1.000 MN/m, wat overeenkomt met de elastische stijfheid van tien prefab betonpalen met een lengte van 10 m. De veerstijfheid zal bepaald worden door zowel het opleggebouw, als de grondeigenschappen.

Opgelegde vervormingen zullen echter wel invloed hebben op het krachtenspel in de constructie. Zo zal de afmeting van de ring over het jaar en per dag verschillen, vanwege de temperatuurf fluctuatie. De jaarlijkse temperatuurf fluctuatie in Dubai is in figuur 117 getoond.



Figuur 117 - Jaarlijks verloop temperatuur in Dubai

De grondeigenschappen op de locatie van het Great Dubai Wheel zijn reeds onderzocht. De fundering kan zowel op staal als met behulp van palen. Bij een fundering op staal bedraagt de maximaal toelaatbare drukspanning 225 kPa. Bij gebruik van een paalfundering kan een paal met een lengte van 22 meter en een diameter van 1,5 meter een maximale drukkracht van 9.200 kN opnemen. Een samenvatting van het gehele onderzoek is te vinden in bijlage B.2.

Nader Onderzoek

De opgelegde vervormingen zijn in dit onderzoek niet meegenomen. In het definitieve ontwerp zal echter wel rekening gehouden moeten worden met deze opgelegde vervormingen, zoals de temperatuurverschillen, de zettingen van de grond en de veerstijfheid van het opleggebouw. Deze vervormingen zullen daarom nader onderzocht moeten worden.

4.5 Overzicht belastingen

4.5.1 Verticale belastingen

Een overzicht van alle verticaal werkende belastingen is te zien tabel 16 en tabel 17.

		Permanente belastingen		
onderdeel	aantal	belasting	totale belasting	percentage t.o.v. totale permanente belasting
hoofddraagconstructie	1	230.000 kN	230.000 kN	70,50%
Capsules:				
Hoofdcapsule	24	3.600 kN	86.400 kN	26,50%
Liftcapsule	8	21 kN	168 kN	0,04%
Zichtcapsule	36	270 kN	9.720 kN	3,00%
			326.288 kN	

Tabel 16 - Overzicht permanente belasting

Veranderlijke vloerbelastingen			
onderdeel	aantal	Belasting	totale belasting
Hoofdcapsule	20	788 kN	15.760 kN
	4	2.250	9.000 kN
Liftcapsule	8	13 kN	104 kN
Zichtcapsule	36	50 kN	1.800 kN
			26.664 kN

Tabel 17 - Overzicht veranderlijke vloerbelasting

De belastingen komende uit de liftcapsules zijn relatief klein en zal in de verdere analyse van het rad niet worden meegenomen. Ook de belastingen voortkomend uit de zichtcapsules zijn klein en zullen niet in de gehele analyse worden meegenomen.

Vergelijk verhouding eigen gewicht - veranderlijke belastingen

Great Dubai Wheel

Het totale eigengewicht van de ring inclusief de capsules bedraagt:

$$23\ 103 + 24 \times 360 + 8 \times 2,1 + 36 \times 27 \approx 32\ 732 \text{ ton } (\approx 326,2 \text{ MN})$$

De maximale veranderlijk vloerbelasting bedraagt:

$$20 \times 79 + 4 \times 225 + 8 \times 1,3 + 36 \times 5 \approx 2670 \text{ ton } (\approx 26,6 \text{ MN})$$



Het totale gewicht zonder belastingfactoren en momentaanfactoren zal maximaal 35 402 ton bedragen. Het percentage veranderlijke belasting zal 7,7 % bedragen. De veranderlijke belasting is grotendeels afhankelijk van de veranderlijke vloerbelasting in de hoofdcapsule

Vanwege de roterende beweging zal het eigengewicht van de constructie beschouwd worden als vermoeiingsbelasting. Dit in tegenstelling tot bijv. brugconstructies, waar de veranderlijke belasting de belangrijkste vermoeiingsbelasting vormt.

Betonbouw

Als eerste schatting voor het eigen gewicht van een betonnen gebouw kan als vuistregel 500 kg/m^3 worden aangehouden. In deze waarde zit zowel het eigengewicht van het gebouw als de veranderlijke belasting.

Wanneer wordt uitgegaan van een verdiepingshoogte van 3,5 meter zal de oppervlaktebelasting $1750 \text{ kg/m}^2 = 17,5 \text{ kN/m}^2$. Voor een kantoorfunctie geldt een vloerbelasting van $2,5 \text{ kN/m}^2$, met een momentaanfactor van 0,5.

De veranderlijke belasting zal dit geval maximaal 7,1 % van het totaalgewicht (eigengewicht en veranderlijk) bedragen.

De bovenstaande waarde geldt voor betonbouw in het geval van staalskeletbouw zal het aandeel van de veranderlijke belasting toenemen.

London eye

Het totaalgewicht van de constructie van het London Eye bedraagt ongeveer 1900 ton, dit is exclusief de veranderlijke belasting.

Het London Eye biedt plaats aan maximaal 800 personen. Indien deze personen een gemiddeld gewicht hebben van 100 kg (misschien iets te hoog) zal de veranderlijke belasting van het rad 80 ton bedragen. Het percentage veranderlijke belasting zal ongeveer 4 % bedragen.

Great Beijing Wheel

Het totaalgewicht van het Great Beijing Wheel zal ongeveer 2800 ton bedragen, exclusief de veranderlijke belasting.

Het Great Beijing Wheel biedt plaats aan maximaal 1920 passagiers. Bij een gemiddeld gewicht van 100 kg zal de veranderlijke belasting 192 ton bedragen. Het percentage veranderlijke belasting bedraagt ongeveer 6,4 %.

Conclusie

Het Great Dubai Wheel is een relatief lichte radconstructie.

Wanneer gekeken wordt naar het percentage veranderlijke belasting ten opzichte van de totale verticale belasting ligt dit percentage hoger dan in andere reuzenraden. Dit is te verklaren vanwege het grotere vloeroppervlak en het multifunctionele gebruik, dat een hogere veranderlijke belasting veroorzaakt.

Wanneer het percentage vergeleken wordt met betonbouw is het percentage ook hoger. Het betreft hier echter niet een gebouw in beton, maar een constructie in staal.

Wanneer we het Great Dubai Wheel vergelijken met een conventioneel stalen constructie zal het percentage veranderlijke belasting - totaal gewicht lager liggen in het Great Dubai Wheel. Dit is niet verwonderlijk aangezien we hier ook niet met een conventioneel gebouw te maken hebben.

De relatief hoge veranderlijke vloerbelasting zal in een nader uit te voeren onderzoek naar het vermoeiingsgedrag van de constructie meegenomen moeten worden.

	Belasting			percentage veranderlijke belasting
	Permanent	Veranderlijk	Totaal	
Great Dubai Wheel	27 330 ton	2 670 ton	300 000 ton	7,7%
Great Beijing Wheel	2 800 ton	192 ton	2 992 ton	6,4%
London Eye	1 900 ton	80 ton	1 980 ton	4,0%
Betonbouw		1,25 kN/m ²	17,5 kN/m ²	7,1%

Tabel 18 - Overzicht eigengewicht - veranderlijke belasting

4.5.2 Horizontale (axiale) belastingen

De in de analyse meegenomen horizontale belasting bestaat enkel uit de windbelasting. In tabel 19 is een overzicht van de windbelasting getoond

Stuwdruk	Oppervlakte		Fwind
	Aangeblazen ($C_{index} = 0,4$ en $0,8$)	Wrijving ($C_{index} = 0,04$)	
2,16 kN/m ²	12.566 m ²	40.212 m ²	39.500 kN

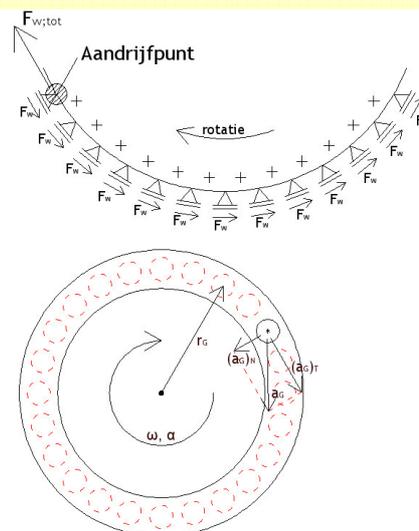
Tabel 19 - Overzicht windbelasting

4.5.3 Rotatie belastingen

De extra belastingen op het rad ten gevolge van de rotatie van het rad zijn klein in vergelijking met de overige belastingen op de ring. In de verdere analyse van het rad zullen deze belastingen niet meegenomen worden.

Rotatie belastingen		
Wrijving		
Totale wrijvingskracht	600 kN	
Acceleratie		
	normaal	tangenteel
hoofddraagconstructie (verdeeld over de gehele ring)	156 N	8.961 N
hoofdcapsule (excl. veranderlijke belasting)	2 N	140 N
zichtcapsule	30 N	150 N
liftcapsule	27 N	2.100 N

Tabel 20 - Overzicht belastingen ten gevolge van rotatie van het rad



4.5.4 Belasting ten gevolge van opgelegde vervormingen

De belasting uit de verhinderde vervorming van het rad is niet meegenomen in de analyse van het rad. De invloed van deze belastingen zal nader onderzocht moeten worden.

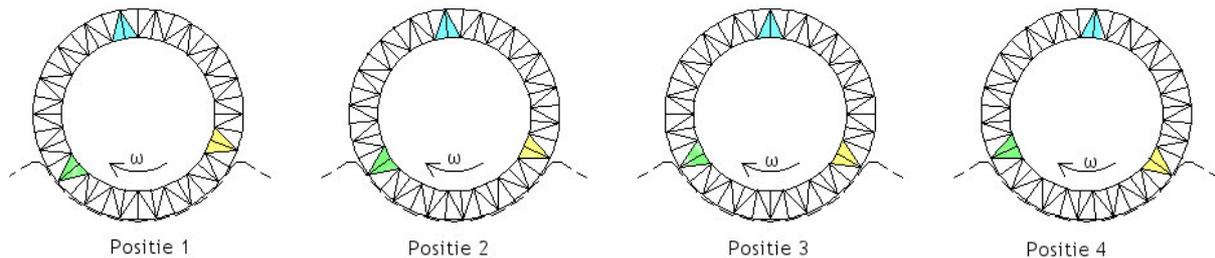


5 ESA-model

Voor de analyse van het huidige ontwerp is gebruik gemaakt van het eindige elementen programma ESA PT 2007.1. In dit hoofdstuk wordt het gebruikte basismodel beschreven. Ook de oplettingen, de gebruikte elementen en de belastingen worden beschreven.

Het hieronder beschreven model beschrijft slechts één positie van het rad. Om een juist beeld te krijgen van de krachten in de elementen zal het roteren van het rad echter gesimuleerd moeten worden. De rotatie wordt gesimuleerd door het rad in vier verschillende posities te bekijken, zie figuur 118.

Om deze vier posities te onderzoeken worden de rotatie van een element gesimuleerd in stapjes van 5° . Deze vier posities geven enkel een juiste simulatie van de rotatie wanneer de verticale belasting symmetrisch per ring is verdeeld



Figuur 118 - Onderzochte posities rad

5.1 Berekeningsmethode

Met behulp van het ESA-model is zowel een lineaire, als een niet-lineaire berekening uitgevoerd.

Lineaire berekening

Om een indruk te krijgen het gedrag van de constructie is een lineair elastische berekening uitgevoerd. In deze berekening is geen rekening gehouden met het tweede orde effect. In deze lineaire berekening is de veerstijfheid van de oplettingen meegenomen.

Met behulp van deze berekening is een indruk gekregen van de grootte van de krachten in de elementen en de vervormingen van de constructies.

Niet-lineaire berekening

Om een exacte indruk te krijgen van de krachten, vervormingen en stabiliteit van de constructie is een geometrische niet-lineaire berekening uitgevoerd. De niet-lineaire berekening is gebaseerd op het 'Timoshenko'-algoritme.

Het 'Timoshenko'-algoritme is gebaseerd op de exacte Timoshenko oplossing van een ligger. De normaalkracht is als constant tijdens de vervorming aangenomen. De methode is toepasbaar voor constructies waar het verschil tussen de eerste- en tweede orde berekening is te verwaarlozen, wat het geval is voor het rad.

De methode neemt kleine vervormingen, rotaties en rekken aan.

De methode heeft slechts twee stappen nodig. De eerste stap is de oplossing van de normaalkracht. De tweede stap gebruikt de bepaalde normaalkracht voor de Timoshenko nauwkeurige oplossing.

In deze niet-lineaire berekening is het tweede orde effect meegenomen en tevens de niet-lineariteit van de oplettingen (enkel druk). Door het meenemen van de niet-lineariteit van de oplettingen is het mogelijk de kantelstabiliteit te bepalen.

In de niet-lineaire berekening is enkel gebruik gemaakt van geometrische niet-lineariteit, fysische niet-lineariteit (vloeien van staal) is niet meegenomen.

5.2 Materiaal

De hoofddragconstructie is volledig opgebouwd uit stalen profielen. De staalkwaliteit van alle profielen in het model is S355. De specifieke materiaaleigenschappen zijn in tabel 21 getoond.

Materiaal eigenschap	Staalkwaliteit: S355	
Volumieke massa	ρ_{rek}	7850 kg/m ³
Elasticiteitsmodulus	E_{rep}	$210 \cdot 10^3$ N/mm ²
rekenwaarde vloeigrens	$f_{y;d}$	355 N/mm ²
rekenwaarde treksterkte	$f_{t;d}$	510 N/mm ²
Rekgrens	$\epsilon_{y;d}$	1,69 %
Afschuifmodulus (elastisch)	G_{rep}	$8,1 \cdot 10^4$ N/mm ²
Uitzettingscoëfficiënt	α	$12 \cdot 10^{-6}$ K ⁻¹

Tabel 21 - Materiaaleigenschappen staalkwaliteit S 355

5.3 Elementen

5.3.1 Opletting

Aan de voet wordt het rad verend ondersteund in zowel de axiale als in de radiale richting. De veerstijfheid in beide richtingen bedraagt $1 \cdot 10^3$ MN/m. Deze veerstijfheid komt ongeveer overeen met de stijfheid van een paalfundering bestaande uit 10 palen en zal voornamelijk beïnvloed worden door de stijfheid van het entreegebouw (ondersteuning).

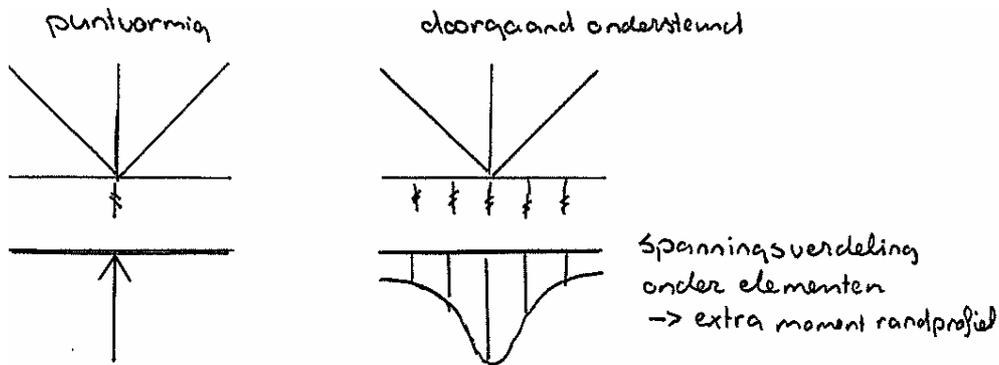


De veerstijfheid van de ondersteuning in zowel radiale, als axiale richting bedraagt $1 \cdot 10^3$ MN/m.

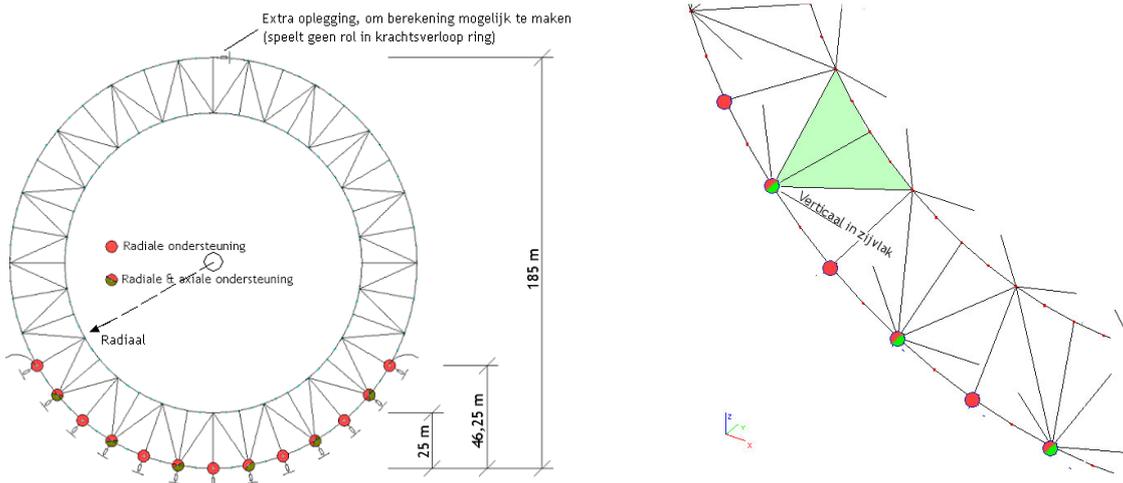
Om het werkelijke gedrag van de constructie onder windbelasting beter te benaderen zijn de opleggingen voor de lineaire berekening vervangen door niet-lineaire opleggingen die enkel druk opnemen.

De radiale ondersteuning bevinden zich ter plaatse van de knooppunten van de buitenste ring en lopen door tot een hoogte van 46.25 m ($1/4 h_{\text{totaal}}$). De ondersteuning in axiale richting bevinden zich enkel op de door de verticalen in het zijvlak gesteunde knooppunten.

De opleggingen bevinden zich enkel onder de steunpunten om zodoende extra momenten uit de opleggingen in de randprofielen te voorkomen. Deze extra momenten zouden de vermoeiingseigenschappen van de constructie nadelig beïnvloeden. Bovendien zal een oplegging enkel in de knooppunten het onderhoud aan de rolopleggingen vergemakkelijken, dit is te zien in bijlage A, tekening nummer 1.3.



Figuur 119 - Spanningsverdeling onder de steunpunten



Figuur 120 - Locatie radiale en axiale ondersteuning

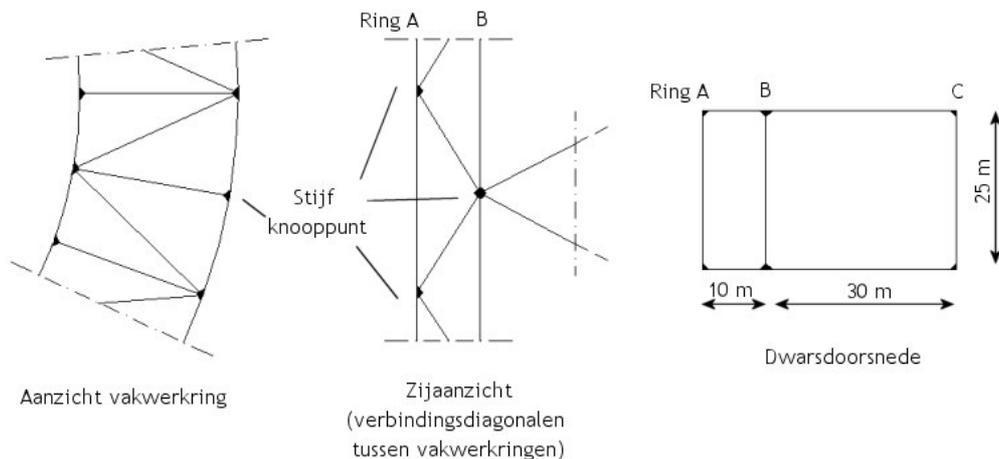
Aan de top van het rad is een extra oplegging in tangentiële richting toegevoegd. Dit steunpunt neemt bij een belasting in verticale richting (z-richting) en in axiale richting (y-richting) geen krachten op. Dit steunpunt is enkel toegevoegd om de berekening mogelijk te maken (zwaartelijnen steunpunten niet door één punt). Deze oplegging kan eventueel ook aan de van het rad worden geplaatst, zodat de vervorming ten gevolge van wind in de tangentiële richting (x-richting) niet wordt verhinderd

In eerste instantie is gebruik gemaakt van steunpunten die zowel druk- als trekkrachten kunnen opnemen. Voor de bepaling van de stabiliteit van de constructie onder windbelasting zullen deze lineaire steunpunten vervangen worden door niet-lineaire steunpunten die enkel druk op kunnen nemen en bij trek loskomen van de ondersteuning. Deze aanpassing geeft een betere benadering van de werkelijkheid.

5.3.2 Knooppunten

De staven in het model zijn in de knooppunten stijf verbonden. Deze stijve verbindingen zijn noodzakelijk om een stabiele constructie te creëren.

In het model is aangenomen dat de knooppunten naast een normaalkracht tevens een moment en dwarskracht overdragen. Verder is aangenomen dat alle knooppunten een oneindig grote rotatiestijfheid hebben. In werkelijkheid zal de verbinding zich als een rotatieveer gedragen, waardoor de constructie minder stijf reageert en de verbindingen minder momenten naar zich toe zullen trekken. Gelet op sterkte is de keuze voor een oneindig stijf knooppunt een veilige keuze. Wanneer gekeken wordt naar de vervorming van het rad zal de vervorming in werkelijkheid groter zijn vanwege het optreden van een rotatie in de knooppunten.



Figuur 121 - Statisch schema elementen en knooppunten

De rotatiestijfheid van het knooppunt zal bepaald moeten worden. Bij een lagere rotatiestijfheid van het knooppunt trekt het knooppunt minder momenten naar zich toe, waardoor een constanter spanningsbeeld ontstaat (bijdrage buigspanning vermindert). De stijfheid van de constructie zal echter afnemen bij een lagere veerstijfheid, waardoor de vervormingen toenemen. In het meest extreme geval ontstaat een scharnier, in dit geval ontstaat een instabiele ongeschoorde dwarsdoorsnede.

In het ESA-model is gebruik gemaakt van oneindig stijve knooppunten. De hartlijnen van de aansluitende staven komen samen in één punt, waardoor er geen extra excentriciteitsmoment zal ontstaan. In de knooppunten zullen de staven elkaar deels overlappen.

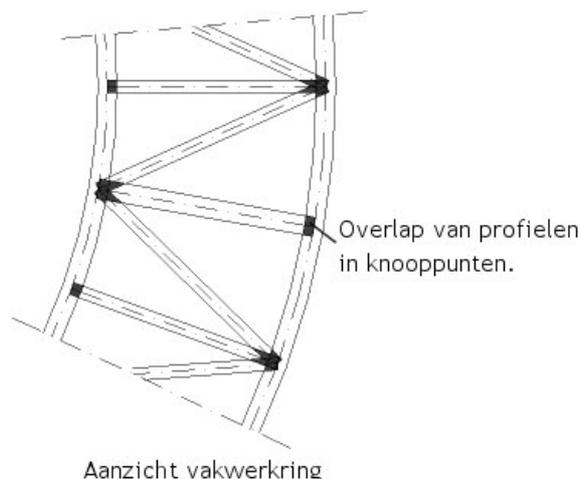
In dit onderzoek is aangenomen dat de knooppunten oneindig stijf zijn. Verder is aangenomen dat er geen excentriciteiten in de knooppunten aanwezig zijn. Het exacte gedrag van de knooppunten zal nader bepaald moeten worden.

In het ESA-model is de constructie van het rad gemodelleerd door staven in de knooppunten momentvast te verbinden. De staven zijn 2D elementen met enkel een lengte



en geen dikte. In werkelijkheid zullen de staven echter wel degelijk een dikte hebben, hierdoor ontstaan in het model overlappings van de profielen in de knooppunten. In werkelijkheid zullen deze overlappings niet optreden. In de berekening van het rad is geen rekening gehouden met fysisch niet-lineair gedrag van de knooppunten, als plastische vervormingen. Deze modellering zal dan ook geen grote invloed hebben op de uiteindelijke resultaten van de berekening.

In het ESA-model komen de hartlijnen van de staven samen in één punt, er is dus geen excentriciteitsmoment. De uiteindelijke detaillering van de knooppunten zal bepalend zijn voor het wel, of niet aanwezig zijn van excentriciteiten in de knooppunten.

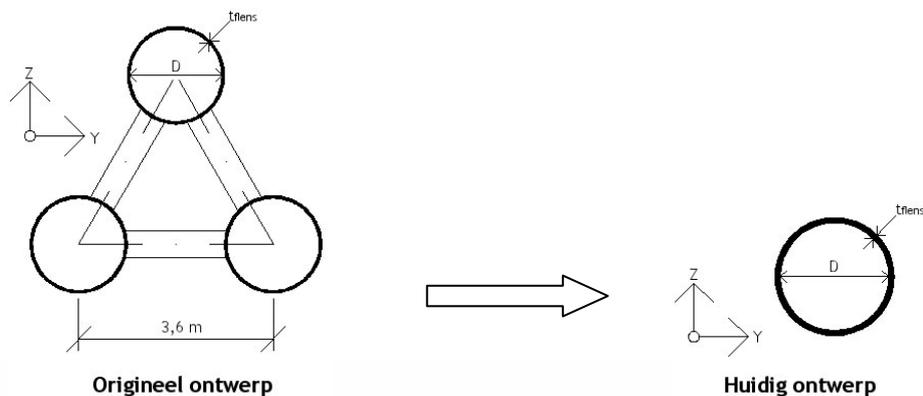


Figuur 122 - Overlap van de profielen in de knooppunten

5.3.3 Profielen

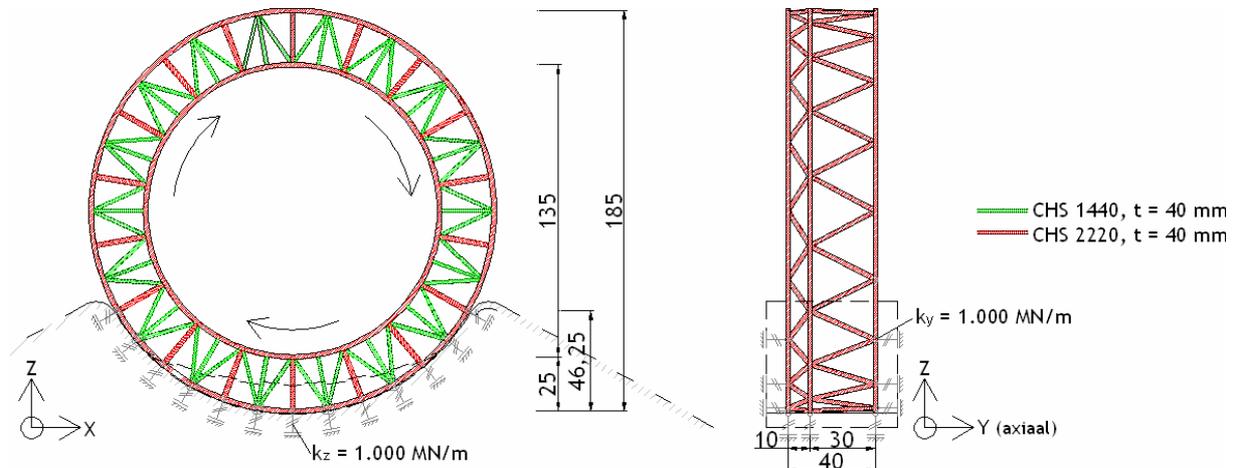
Voor de profielen in het ESA-model is gekozen om holle ronde buisprofielen (CHS) toe te passen. Om het model eenvoudig te houden zijn slechts twee verschillende staafdoorsneden toegepast. De afmetingen van de profielen zijn gebaseerd op het reeds eerder uitgevoerde onderzoek naar profielafmetingen door Royal Haskoning. In afwijking van het originele ontwerp is geen gebruik gemaakt van samengestelde profielen met een hoge verhouding tussen diameter en wanddikte, maar van enkele buisprofielen met een lagere verhouding.

De wijziging van profielafmetingen is voornamelijk gedaan vanuit het oogpunt van vermoeiing. Wanneer naar de lokale stabiliteit van de elementen wordt gekeken, zullen de samengestelde profielen, vanwege de hogere stijfheid, de voorkeur hebben.



Figuur 123 - Toegepaste profieldoorsnede

De gebruikte buisprofielen hebben een diameter van respectievelijk 1440 mm en 2220 mm, de wanddikte van de profielen bedraagt 40 mm. De locatie van de profielen in het model is te zien in figuur 124. In tabel 22 zijn de eigenschappen van de gebruikte profielen te vinden.



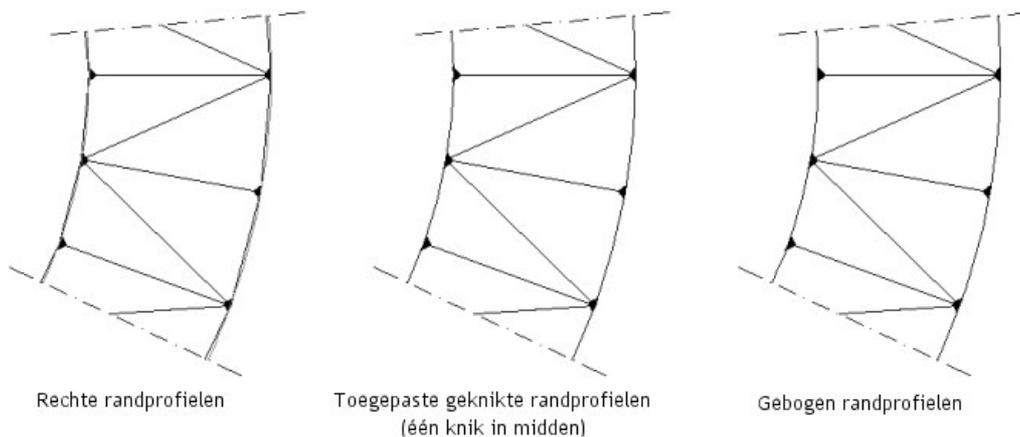
Figuur 124 - Overzicht gebruikte profielen in ESA-model

	origineel		huidig		origineel		huidig	
D	3 * 1200	mm	1440	mm	3 * 1800	mm	2220	mm
t _{flens}	16	mm	40	mm	16	mm	40	mm
A	178.543	mm ²	175.929	mm ²	269.021	mm ²	273.947	mm ²
I _y = I _z *	3,01E+11	mm ⁴	4,31E+10	mm ⁴	5,14E+11	mm ⁴	1,63E+11	mm ⁴
2γ = D/t	75	[-]	36	[-]	112,5	[-]	55,5	[-]

*bij de bepaling van I_y en I_z is voor de originele profielen een reductie van de Steiner bijdrage van 30 % aangenomen

Tabel 22 - Eigenschappen van de gebruikte profielen

Om de ronde vorm van de binnen- en buitenring te benaderen is de staaf tussen de knooppunten in twee delen opgeknipt. De staven zijn onder een hoek van 175° aan de uiteinden verbonden. Door de kromming in de staaf zal er in deze staven een excentriciteit ontstaan, waardoor een extra moment ontstaat.

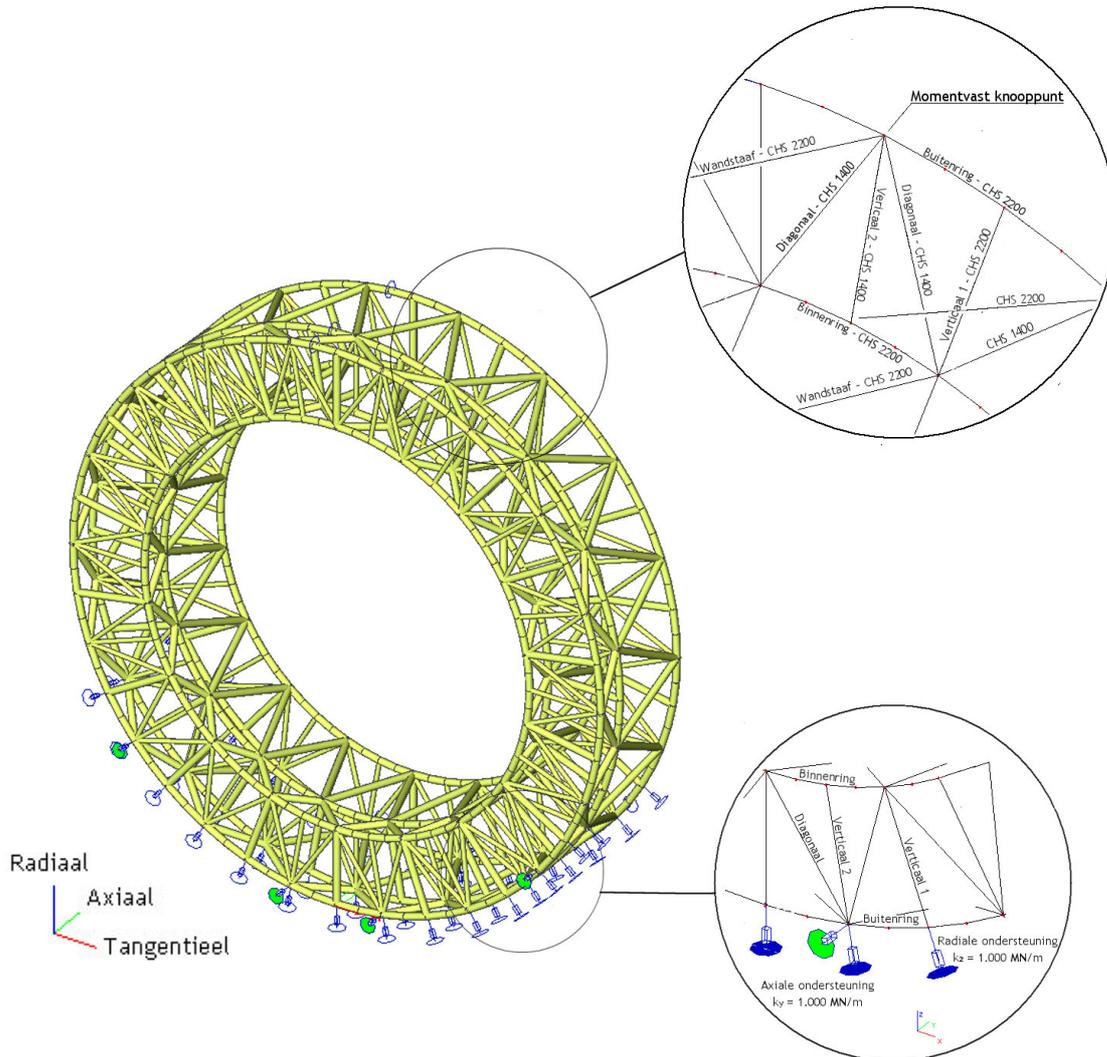


Figuur 125 - Randprofiel in relatie tot ronde vorm rad



5.3.4 Overzicht

In figuur 126 is een overzicht van het gebruikte ESA-model getoond.



Figuur 126 - Overzicht ESA model

Afwijking basismodel ten opzichte van het originele ontwerp

- Ring opgedeeld in 36 delen in plaats van 40 delen
- Profielen van samengesteld profiel (3D-vakwerk) naar enkel buisprofiel, met grotere wanddikte, waardoor een lagere spanning ontstaat
- Oplegstijfheid radiale steunpunten van $2 \cdot 10^2$ MN/m naar $1 \cdot 10^3$ MN/m
- Oplegstijfheid axiale ondersteuning van oneindig stijf naar $1 \cdot 10^3$ MN/m
- Radiale en axiale ondersteuning bevonden zich in het originele ESA-model over de gehele opleglengte. In het huidige model bevinden de axiale steunpunten zich enkel op de door de diagonalen in het zijvlak gesteunde punten

5.4 Belastingen

Belastinggevallen

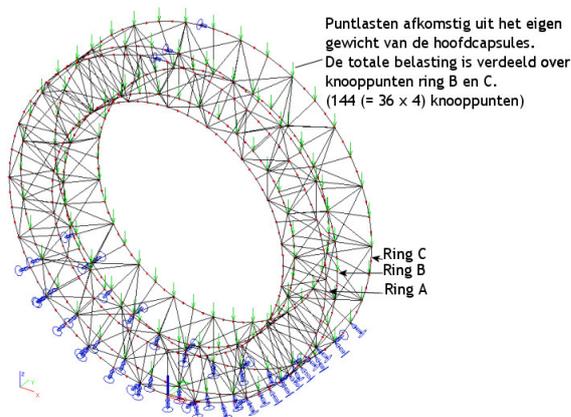
In het ESA-model zijn de volgende belastingen geanalyseerd:

- Eigen gewicht draagconstructie (P.B: 230.000 kN)
- Eigen gewicht en veranderlijke belasting hoofdcapsules (P.B: 86.400 kN, V.B: 25.000 kN)
- Eigen gewicht zichtcapsules (P.B: 9.720 kN)
- Wind in axiale richting (y-richting) (V.B: 39.500 kN)

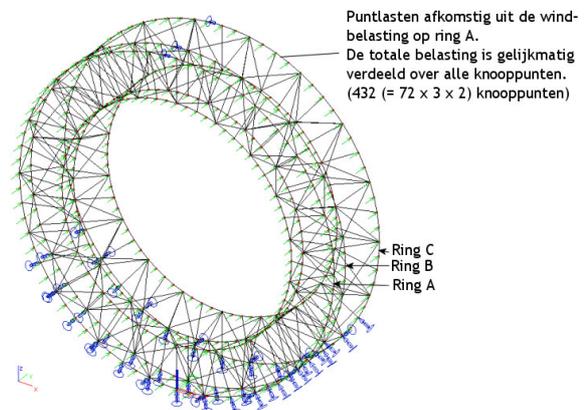
De grootte van de belastingen is bepaald in hoofdstuk 4.

Alle belastingen, met uitzondering van het eigen gewicht van de draagconstructie grijpen aan als puntlasten in de knooppunten van de constructie.

De puntlasten komende uit de hoofdcapsules grijpen aan in de knooppunten van ring B en C. De puntlasten komende uit het zichtrad grijpen aan in de knooppunten en op de staven van ring A.



Figuur 127 - Puntlasten uit hoofdcapsules



Figuur 128 - Puntlasten uit wind op ring A

Voor de windbelasting is aangenomen dat de totale windbelasting gelijkmatig over de knooppunten verdeeld wordt.

Om een nauwkeurig beeld van de spanningen in de constructie te krijgen zijn de verschillende belastinggevallen gecombineerd en vermenigvuldigd met de in de NEN 6702 genoemde belastingfactoren.

De gebruikte belastingfactoren zijn:

- $\gamma_{per} = 0,9$ (gunstig werkend, UGT)
1,2 (ongunstig werkend, UGT)
1,35 (enkel permanenten belasting, UGT)
1,0 (vervorming, BGT)
- $\gamma_{ver} = 1,5$ (UGT)
1,0 (BGT)



Lineaire belastingcombinaties

De gebruikte lineaire belastingcombinaties zijn in tabel 23 getoond. In dit overzicht ontbreekt de belastingcombinatie wind extreem en veranderlijk momentaan aangezien het niet erg waarschijnlijk is dat onder de extreme windbelasting het rad nog in gebruik is en de veranderlijke belasting dus waarschijnlijk niet aanwezig is. Mocht het rad ook onder extreme windbelastingen in gebruik blijven, dan zal deze belastingcombinatie moeten worden toegevoegd.

Lineaire belastingcombinatie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10*	11*
Eigen gewicht hoofdraagconstructie	1	1,35	1	1	0,9	0,9	0,9	1,2	1,2	1	1,2
Eigen gewicht hoofdcapsule	1	1,35	1	1			0,9	1,2	1,2	1	1,2
Veranderlijke belasting hoofdcapsules											1,5
Eigen gewicht zichtcapsules										1	1,2
Vanuit ring A			1		1,5			1,5			
Wind Vanuit ring C				1		1,5	1,5		1,5		
	BGT	UGT	BGT		UGT - kantelen			UGT - maximale druk		BGT	UGT

* Belastinggeval 10 en 11 zijn enkel toegepast ter bepaling van de invloed van deze belasting op de sterkte en stijfheid van de constructie. Deze bleek laag te zijn.

Tabel 23 - Overzicht gebruikte lineaire belastingcombinaties, inclusief belastingfactoren

Niet-lineaire belastingcombinaties

De gebruikte lineaire belastingcombinaties zijn in tabel 24 getoond. In dit overzicht zijn minder belastingcombinaties getoond, dan de lineaire belastingcombinaties, aangezien het verschil in krachtsverloop tussen een lineaire en een niet-lineaire berekening minimaal was. Het gebruik van een lineaire berekening had in dit geval de voorkeur vanwege de kortere berekeningstijd.

Niet-lineaire belastingcombinatie	1	2	3	4	5	6
Eigen gewicht hoofdraagconstructie	1	1	1	1,2	0,9	0,9
Eigen gewicht hoofdcapsule	1	1	1	1,2		0,9
Eigen gewicht zichtcapsules	1					
Vanuit ring A		1		1,5		
Wind Vanuit ring C			1		1,5	1,5
	BGT			UGT - maximale druk ring C		UGT - kantelen

Tabel 24 - Overzicht gebruikte niet-lineaire belastingcombinaties, inclusief belastingfactoren



6 Statische- en vermoeiingssterkte

Het rad zal zodanig ontworpen moeten worden dat er tijdens de levensduur van (50 jaar) geen noemenswaardige schade aan de constructie ontstaat ten gevolge van de belasting. Wanneer het rad als een statische constructie wordt beschouwd, zal de constructie, waarin gebruik wordt gemaakt van de staalsoort S355, moeten voldoen aan de sterkte eis: $\sigma_d \leq f_{y;d}$. Het rad zal echter roteren, hierdoor zal vermoeiing de levensduur beïnvloeden. De toelaatbare spanningswisseling zal vanwege het gevaar van vermoeiing aanzienlijk lager liggen dan de voor S355 geldende vloeispanning van 355 N/mm^2 .

In het Great Dubai Wheel zal de fluctuerende spanning voornamelijk veroorzaakt worden door de verticaal werkende krachten (eigen gewicht en veranderlijke vloerbelasting). Deze belasting zal als gevolg van de rotatie van het rad viermaal per dag een volledige spanningscyclus doorlopen. Naast de rotatie van het rad zullen ook andere belastingen fluctuerende spanningen veroorzaken, zo zal ook de windbelasting fluctuerend van aard zijn en de vermoeiing kunnen beïnvloeden. Aangezien de rotatie van het rad altijd aanwezig is en het aantal spanningswisselingen ten gevolge van deze rotatie het grootst is, zal de rotatie de grootste bijdrage aan de vermoeiing van het rad hebben.

In dit hoofdstuk zal allereerst ingegaan worden op de verschillende krachten in de constructie, zoals de reactiekrachten, normaalkrachten, dwarskrachten en momenten. De verdeling van deze krachten en de grootte zal worden behandeld.

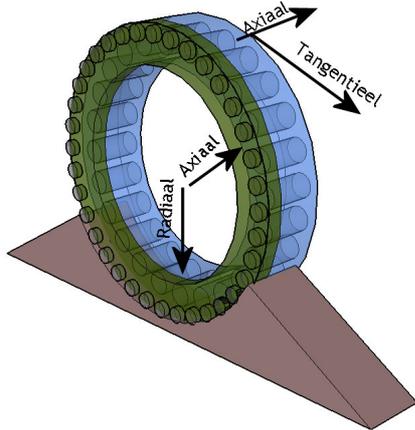
Vervolgens zal ingegaan worden op de vermoeiingssterkte van de constructie. Het aspect vermoeiing zal van grote invloed zijn op de toelaatbare spanningswisselingen in de constructie en zal dan ook bepalend zijn voor de sterkte van de constructie. Tot slot worden de mogelijke aanpassingen ter verbetering van het vermoeiingsgedrag behandeld.

Gebruik wordt gemaakt van de in hoofdstuk 4 bepaalde belastinggevallen. Voor de bepaling van de reactiekrachten in de opleggingen en de staafelementen is gebruik gemaakt van het in hoofdstuk 5 getoonde ESA-model.

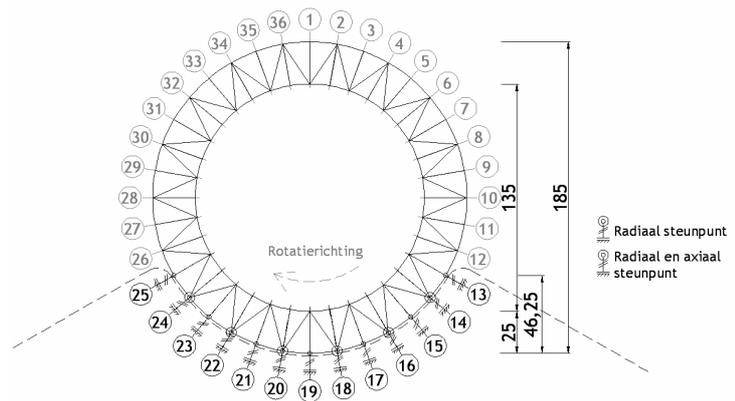
6.1 Reactiekrachten in de opleggingen

De reactiekrachten in de fundering zullen vanwege het roteren van het rad in de tijd variëren. Ook zal de verdeling van de belasting over de oplegpunten niet gelijk verdeeld zijn. Zo zullen bij een veerstijfheid per oplegging van $1 \cdot 10^3$ MN/m de hoogste oplegpunten een aanzienlijk hogere reactiekracht te verwerken krijgen dan de lager gelegen punten.

De opleggingen steunen het gebouw in twee richtingen, de radiale en axiale richting. In het basisonwerp is aangenomen dat de veerstijfheid in beide richtingen $1 \cdot 10^3$ MN/m bedraagt.



Figuur 129 - Richtingen rad



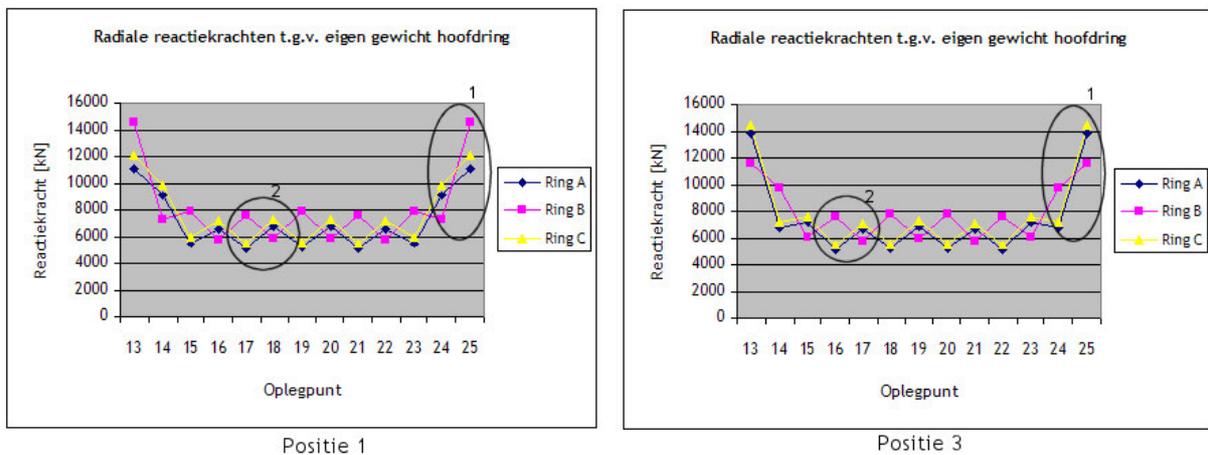
Figuur 130 - Overzicht rad en nummering steunpunten

6.1.1 Globaal verloop

Om inzicht te krijgen in het globale verloop van de reactiekrachten is een lineaire berekening uitgevoerd in ESA. Gekeken is enkel naar de reactiekrachten afkomstig uit het eigen gewicht van de hoofddragconstructie. De belastingfactoren zijn in deze eerste berekening niet meegenomen.

Radiale richting

In figuur 131 zijn de radiale reactiekrachten getoond die op de ondersteuningsconstructie werken ten gevolge van het eigen gewicht van de hoofddragconstructie (23.200 ton).

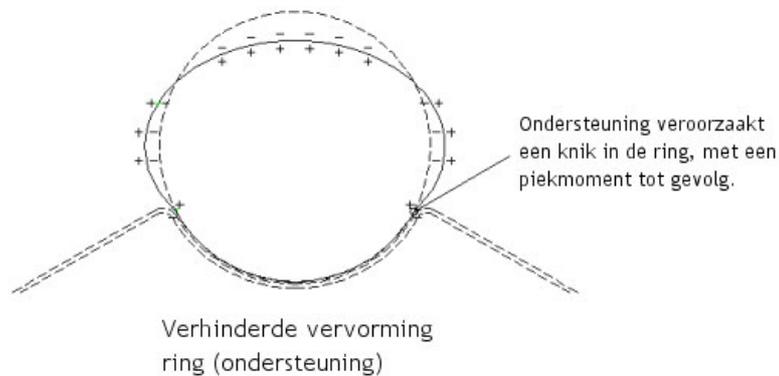


Figuur 131 - Verloop radiale reactiekrachten, ten gevolge van eigen gewicht



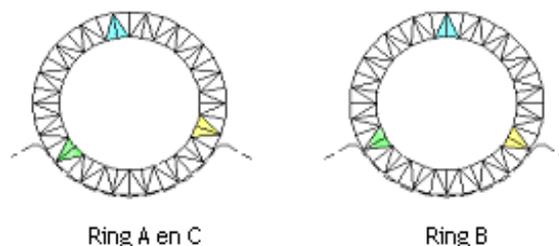
Op de buitenste steunpunten werkt een grotere radiale belasting dan op de middelste steunpunten. Dit is het gevolg van de vervorming van het rad. Boven de buitenste steunpunten zal het rad van een ovale vorm (ongesteunde ring) naar een ronde vorm (vorm oplegging) vervormen. Deze vervorming veroorzaakt een piek in de reactiekrachten van zowel de opleggingen, als de staafelementen. De piek in de reactiekrachten van de staafelementen zal de vermoeiingslevensduur van het rad nadelig beïnvloeden. Aanpassingen aan de constructie van de opleggingen (veerstijfheid) ter vermindering van de pieken zullen gewenst zijn.

De piek in het verloop van de reactiekrachten is niet gewenst. Het huidige oplegsysteem zal zodanig aangepast moeten worden dat deze pieken verdwijnen, dan wel verminderen, waardoor de vermoeiingslevensduur van zowel het rad, als de opleggingen zal toenemen.



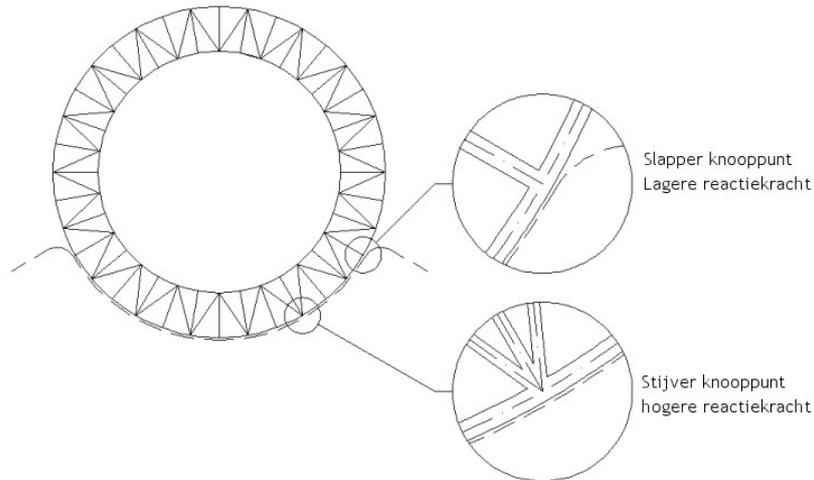
Figuur 132 - Vervorming constructie onder verticale belasting

De reactiekrachten in Ring A en C vertonen een overeenkomstige vorm terwijl in Ring B een afwijkende (tegenovergestelde) vorm waarneembaar is. Deze afwijkende vorm van de reactiekrachten in ring B is het gevolg van de configuratie van de ringen in het rad. Ring B is 10° geroteerd ten opzichte van ring A en C. Deze variatie zal kunnen worden opgenomen door de oplegging.



Figuur 133 - Geroteerde positie ring B, ten opzichte van ring A en C

Ter plaatse van de hoogste opleggingen vertoont het reactiekrachten verloop een opvallend verschil tussen ring B en ring A en C (cirkel 1). Dit verschil is het gevolg van de vakwerkconfiguratie in de vakwerkringen. Gekozen is om gebruik te maken van een verstijfd 'Warren'-vakwerk. In de knooppunten van de buitenste ring zullen ten gevolge van deze vakwerkform twee verschillende stijfheden ontstaan. De twee toegepaste knooppuntconfiguraties zijn in figuur 134 te zien.



Figuur 134 - Configuratie knooppunten vakwerkkring

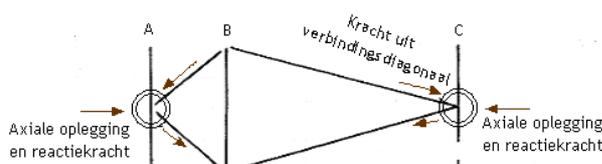
De reactiekrachten in de lager gelegen steunpunten (punt 16 t/m 22) vertonen voor ring A en C een tegenovergesteld verloop als het verloop van ring B (cirkel 2). Dit is het gevolg van de rotatie van de ring B, ten opzichte van ring A en C, waardoor de stijfheid van de knooppunten verschilt

Axiale richting

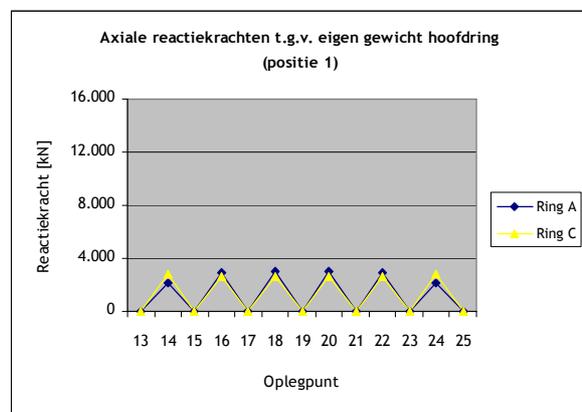
Naast een radiale belasting zal in de oplegging tevens een axiale kracht (in richting rotatie as, zie figuur 129) ontstaan. Deze kracht kan zowel afkomstig zijn uit het uitbuigen als gevolg van verticale belastingen (bijv. eigen gewicht), als uit axiale belastingen (bijv. wind).

In figuur 135 en figuur 136 is te zien hoe de axiale reactiekrachten ontstaan ten gevolge van het eigen gewicht. Bij een verticale belasting zal een klein deel van de belasting worden herverdeeld over de ringen. Deze herverdeling vindt plaats via de verbindingsdiagonalen tussen de ringen, hierdoor zal het rad willen vervormen in axiale richting, zie figuur 135. In de axiale opleggingen wordt het rad gesteund en zal de vervorming verhinderd worden. Een deel van de krachten uit de verbindingsdiagonalen wordt overgedragen naar de opleggingen.

Wanneer de initiële axiale vervorming ten gevolge van het eigen gewicht in de oplegging ongehinderd op kan treden zal de axiale reactiekracht in de opleggingen ten gevolge van de verticale belasting afnemen en enkel veroorzaakt worden door de veranderlijke vloerbelastingen in de capsules.



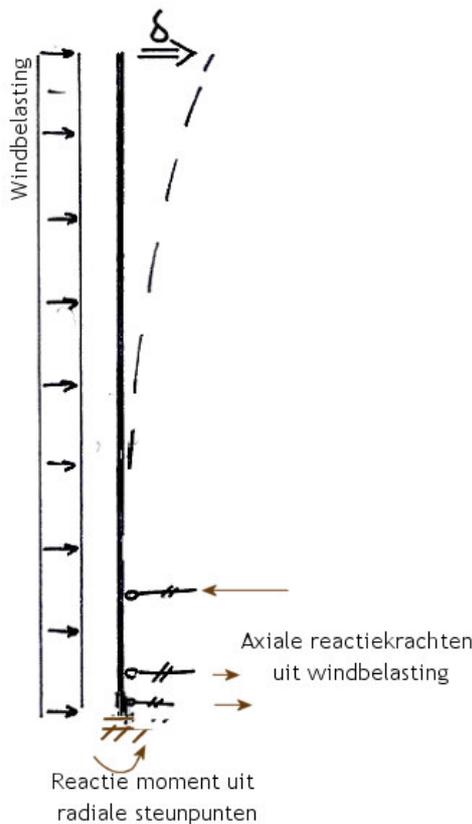
Figuur 135 - Principe van ontstaan axiale reactiekrachten



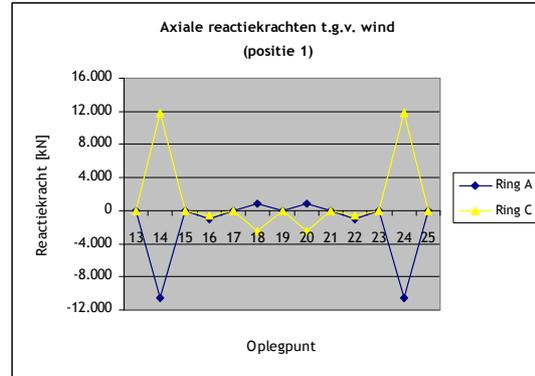
Figuur 136 - Axiale reactiekrachten, ten gevolge van eigen gewicht



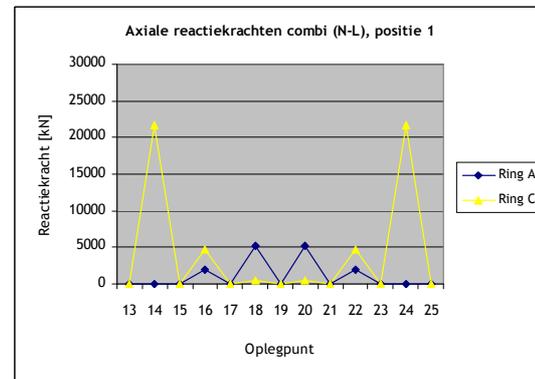
De windbelasting zal resulteren in een kantelmoment. Dit moment wordt opgenomen in zowel de radiale als de axiale opleggingen. De weerstand tegen de windbelasting wordt in de axiale steunpunten geleverd door de axiale opleggingen. De hoogste opleggingen zullen de grootste drukkracht opnemen. En in de onderste opleggingen zal de reactiekracht van richting veranderen, zie figuur 137 en figuur 138.



Figuur 137 - Schematisatie constructie onder windbelasting.



Figuur 138 - Axiale reactiekrachten, ten gevolge van wind



Figuur 139 - Niet-lineaire axiale reactiekrachten, ten gevolge van eigen gewicht en wind

In de opleggingen zijn naast drukkrachten (positieve krachten), ook trekkrachten (negatieve krachten) aanwezig, zie figuur 138. Deze trekkrachten zullen in werkelijkheid niet kunnen optreden, in de opleggingen zal de krachtsoverdracht enkel via contactdruk plaatsvinden. De trekkrachten zullen dus in werkelijkheid bij de positieve krachten (van de andere ring) moeten worden opgeteld. De contactdruk in oplegpunt 14 zal ongeveer: 12.000 (druk) + 10.000 (trek) = 22.000 kN bedragen (exclusief belastingfactoren).

6.1.2 Rekenwaarde reactiekracht

Voor het ontwerp van de opleggingen (zoals de rollagers) is het noodzakelijk om de belastingen te bepalen. Tevens zal er, vanuit het oogpunt van stabiliteit, naar gestreefd moeten worden om in de opleggingen de drukkracht te behouden.

Ter bepaling van de rekenwaarde van de oplegreacties zijn de volgende belastingfactoren toegepast, volgens NEN 6702:

- Permanent (eigen gewicht): $\gamma_{per} = 1,35$
- $\gamma_{per} = 1,2$ (ongunstig)
- $\gamma_{per} = 0,9$ (gunstig)

- Veranderlijk (wind): $\gamma_{ver} = 1,5$

In deze paragraaf zullen de maximale en minimale reactiekrachten onder elke vakwerkingring getoond worden. De reactiekrachten treden op in zowel radiale, als axiale richting. Aangezien het verloop van de reactiekracht reeds in paragraaf 0 is bepaald, worden in deze paragraaf enkel de resultaten, inclusief belastingfactoren, getoond.

Permanente belasting

De permanente belasting zal grotendeels bestaan uit het eigen gewicht van de hoofddragconstructie en de hoofdcapsule. Ter bepaling van de reactiekracht ten gevolge van alleen de permanente belasting is een belastingfactor toegepast van: $\gamma_{per} = 1,35$.

		Ring A	Ring B	Ring C
Radiaal	$R_{max;d}^*$	25.660 kN	23.650 kN	34.930 kN
	$R_{min;d}$	8.040 kN	10.580 kN	11.260 kN
Axiaal	$R_{max;d}$	6.440 kN	- kN	6.490 kN
	$R_{min;d}$	1.630 kN	- kN	3.830 kN

* maximum ter plaatse van de hoogste oplegging

Tabel 25 - Reactiekrachten, ten gevolge van permanente belasting, $\gamma_{per} = 1,35$

De maximale reactiekracht treedt op onder ring C, ter plaatse van de hoogste oplegging. De opleggingen zullen zodanig ontworpen worden dat deze kracht opgenomen kan worden. Om de roloplegging te ontlasten zal de belasting over meerdere rollen verdeeld worden (bij bijv. 5 rollen, 7.000 kN/rol).

De maximale druk in de opleggingen ten gevolge van de permanente belasting bedraagt, inclusief de belastingfactor, 34.930 kN.

Deze druk wordt over meerdere opleggingen verdeeld.

Een belasting van ongeveer 7.000 kN is opneembaar door rolopleggingen zie bijlage G, FAG sheet met opneembare spanningen per roloplegging

Permanente belasting en windbelasting

Maximale druk

De maximale druk in de opleggingen zal plaatsvinden wanneer de wind vanuit de richting van ring A komt. De windbelasting zal resulteren in een verhoging van de druk onder ring C en een verlaging van de druk onder Ring A en B. Ter bepaling van de reactiekracht zijn de volgende belastingfactoren toegepast: $\gamma_{per} = 1,2$ en $\gamma_{ver} = 1,5$.

		Ring A	Ring B	Ring C		
Radiaal	$R_{max;d}^*$	7.430 kN	17.590 kN	50.150 kN	Ring A	Ring C
	$R_{min;d}$	2.420 kN	8.940 kN	14.960 kN	7.430 kN	50.150 kN
Axiaal	$R_{max;d}$	6.860 kN	- kN	22.740 kN	2.420 kN	14.960 kN
	$R_{min;d}^{**}$	-13.650 kN	- kN	-351 kN	7.211 kN	36.390 kN
					0 kN	0 kN

* maximum ter plaatse van de hoogste oplegging

** geen trek in oplegging -> herverdeling

Tabel 26 - Reactiekrachten ten gevolge van permanente belasting en windbelasting, $\gamma_{per} = 1,2$ en $\gamma_{ver} = 1,5$



De maximale druk onder ring C zal toenemen tot 50.150 kN. Deze maximale druk zal zelden voorkomen. In het ontwerp van de rolopleggingen zal besloten moeten worden of het rad ook onder extreme windbelasting zal moeten blijven roteren, of dat het rad bij een extreme windbelasting verankerd wordt en ondersteund wordt door een secundaire constructie. Een secundaire constructie zal de oplegging ontlasten.

Voor de bepaling van de maximale druk in de opleggingen is aangenomen dat de veranderlijke vloerbelasting in de capsules niet aanwezig is, wanneer de maximale windbelasting op het rad werkt. Het rad zal bij extreme windbelastingen niet gebruikt worden.

De maximale druk in de opleggingen bedraagt 50.150 kN en is het gevolg van de permanente belasting en windbelasting.

In tabel 26 is te zien dat in de axiale steunpunten een trekkracht ontstaat. De opleggingen kunnen echter geen trekkrachten opnemen, er zal dus een herverdeling plaatsvinden. Waarbij de trekkracht in de steunpunten van ring A resulteert in een extra drukkracht in de steunpunten van ring A en omgekeerd.

Minimale druk -> trek

De minimale druk in de opleggingen zal plaatsvinden wanneer de wind vanuit de richting van ring C komt. De windbelasting zal kunnen resulteren in een trekkracht onder ring C, welke niet door de ondersteuning kan worden opgenomen. De constructie zal in de UGT (inclusief belastingfactoren) los kunnen komen van de oplegging. In de BGT (excl. belastingfactoren) zal het loskomen van de constructie voorkomen worden door het eigen gewicht van de hoofd draagconstructie.

Ter bepaling van de reactiekracht zijn enkel het eigen gewicht van de hoofd draagconstructie en de windbelasting meegenomen. Het gewicht van de hoofdcapsules is niet meegenomen. De volgende belastingsfactoren worden toegepast: $\gamma_{per} = 0,9$ en $\gamma_{ver} = 1,5$.

		Ring A	Ring B	Ring C		
Radiaal	$R_{max;d}^*$	29.430 kN	15.240 kN	-120 kN	7.430 kN	50.150 kN
	$R_{min;d}$	8.840 kN	5.560 kN	-4.300 kN	2.420 kN	14.960 kN
Axiaal	$R_{max;d}$	16.660 kN	- kN	6.150 kN	31.300 kN	6.150 kN
	$R_{min;d}^{**}$	4.070 kN	- kN	-14.640 kN	4.070 kN	0 kN

* maximum ter plaatse van de hoogste oplegging

** geen trek in oplegging -> herverdeling

Tabel 27 - Reactiekrachten ten gevolge van eigen gewicht en windbelasting, $\gamma_{per} = 0.9$ en $\gamma_{ver} = 1,5$

Onder ring C zal een contactloze situatie ontstaan, welke niet door de ondersteuning kan worden opgenomen. De constructie zal rekentechnisch los komen van de oplegging.

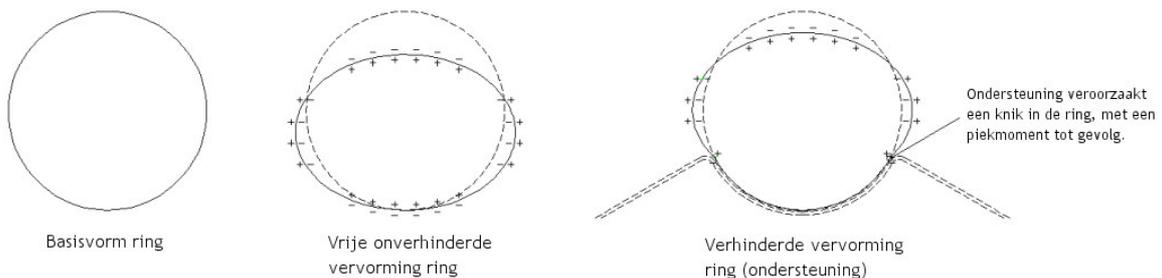
Wanneer de constructie wordt belast door het eigen gewicht van de hoofd draagconstructie en de windbelasting (vanuit ring C) in de UGT (inclusief veiligheidsfactoren) zal er rekentechnisch trek in de opleggingen optreden. In de BGT (excl. veiligheidsfactoren) wordt het loskomen van de constructie voorkomen door het eigen gewicht van de hoofd draagconstructie.

Het loskomen van de constructie van de opleggingen zal echter enkel rekentechnisch optreden wanneer enkel het eigen gewicht van de hoofd draagconstructie in rekening wordt

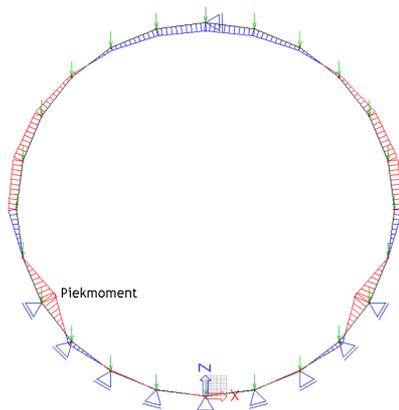
gebracht. Wanneer ook het eigen gewicht van de hoofdcapsules wordt meegenomen zal er geen trek meer in de radiale opleggingen ontstaan. In de gebruiksfase van de constructie zal er onder windbelasting altijd druk in de opleggingen aanwezig zijn.

6.2 Normaalkracht

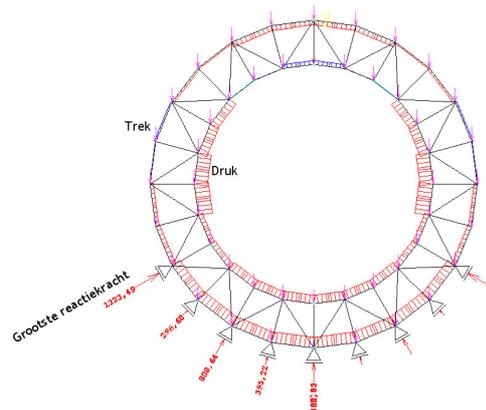
Als gevolg van de vervorming van het rad onder het eigen gewicht zullen in de vakwerkringen trek- en drukkrachten ontstaan. De vervorming van de constructie onder verticale belastingen is in figuur 140 te zien. Vanwege het roteren van het rad zullen de spanningen in de elementen fluctueren van positief naar negatief.



Figuur 140 - Gedrag constructie onder verticale belasting



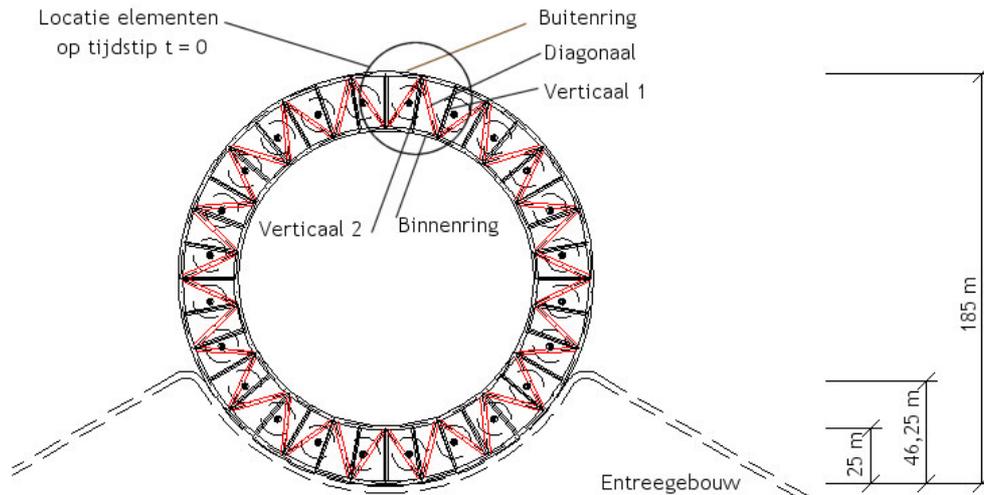
Figuur 141 - Momentverloop ring



Figuur 142 - Normaal- en Reactiekrachtverloop vakwerkkring

In deze paragraaf zullen de normaalkrachten die in de vakwerkringen ontstaan getoond worden. Voor de aanduiding van de elementen is gebruik gemaakt van de in figuur 143 getoonde termen.

Voor de berekening van de normaalkrachten wordt enkel gekeken naar de elementen in vakwerkkring C, omdat onder deze ring de grootste radiale reactiekrachten ontstaan en de grootste normaalkrachten dus ook in deze ring te vinden zijn. Vanwege het kleine verschil in de radiale reactiekrachten tussen de lineaire berekening en de niet-lineaire berekening is besloten om enkel een lineaire berekening uit te voeren, waarin de veerstijfheid van de opleggingen is meegenomen.

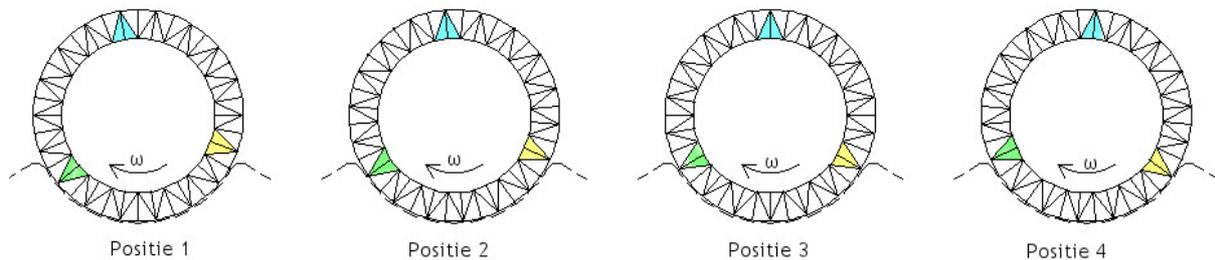


Figuur 143 - Overzicht rad

6.2.1 Globaal verloop normaalkrachten

Om inzicht te krijgen in het globale verloop van de normaalkrachten in de elementen is een lineair berekening uitgevoerd in ESA. Gekeken is naar het verloop van de normaalkrachten in de elementen gedurende een rotatie, ten gevolge van het eigen gewicht. De belastingfactoren zijn in deze eerste berekening niet meegenomen.

Ter bepaling van de normaalkrachten is het roteren van het rad gesimuleerd door het rad in 4 posities te bekijken. Deze posities zijn elk 5° ten opzicht van elkaar gedraaid. In figuur 144 zijn de onderzochte posities getoond.



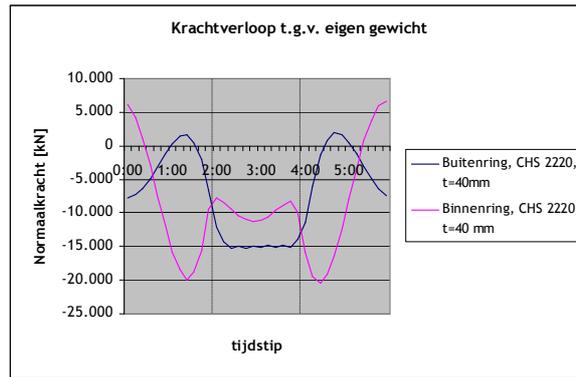
Figuur 144 - Onderzochte posities rad

Normaalkrachten ten gevolge van het eigen gewicht hoofddraagconstructie

Het verloop van de normaalkracht in de elementen is in figuur 145 t/m figuur 147 getoond. De getoonde waarden zijn exclusief de belastingfactoren.

Randstaven

Ten gevolge van het eigen gewicht fluctueert de normaalkracht in de buitenring tussen +2.000 kN (trek) en -15.000 kN(druk) en in de binnenring tussen +6.000 kN en -20.000 kN. De normaalkracht boven de opleggingen (2:00 tot 4:00) is voor de buitenring constant.



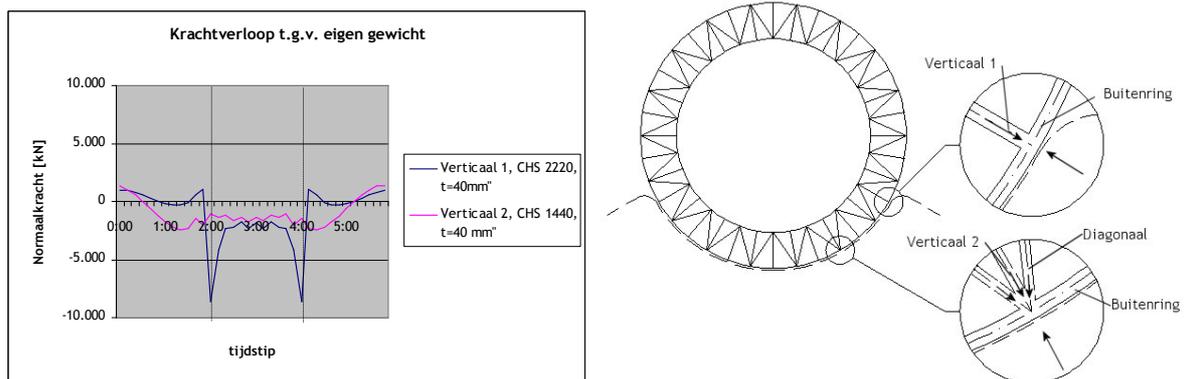
Figuur 145 - Normaalkracht verloop buiten- en binnenring van ring C, ten gevolge van eigen gewicht hoofddraagconstructie

Wandstaven

Het normaalkracht verloop in de verticalen verschilt sterk per verticaal. Dit is het gevolg van de configuratie van de knooppunten. De radiale reactiekracht zal in de knooppunten van verticaal 1 volledig door verticaal 1 moeten worden opgenomen. Bij de knooppunten van verticaal 2 wordt er een deel van de reactiekracht opgenomen door de verticaal en een deel door de verticalen, hierdoor ontstaat er geen piekspanning in verticaal 2. In verticaal 1 treedt dan ook een piek op, op het tijdstip dat deze verticaal de hoogste oplegging bereikt. Verlaging van deze piek zal het vermoeiingsgedrag van de constructie ten goede komen.

Het toevoegen van extra diagonalen die zowel trek als druk kunnen opnemen zal een positieve invloed hebben op het wegnemen van een piekspanning uit verticaal 1. Het krachtsverloop van verticaal 1, verandert naar het verloop van verticaal 2. Het toevoegen van deze diagonalen zal echter het uiterlijk van het rad sterk veranderen. Een te ingrijpende uiterlijke verandering, zoals toevoeging van diagonalen, zal niet toegestaan zijn.

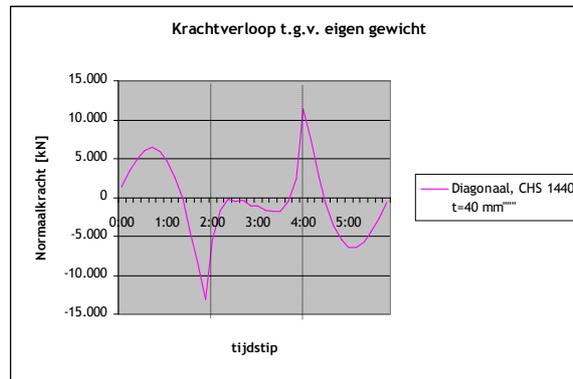
Ten gevolge van het eigen gewicht fluctueert de normaalkracht in verticaal 1 tussen +1.000 en -8.000 kN(druk) en in de verticaal 2 tussen +1.500 kN en -2.500 kN.



Figuur 146 - Normaalkracht verloop Verticaal 1 en 2 van ring C, ten gevolge van eigen gewicht hoofddraagconstructie



In de diagonalen fluctueert het normaalkracht verloop tussen +11.000 kN en -12.000 kN. De piekspanningen treden beide op in de elementen naast de hoogste radiale oplegging



Figuur 147 - Normaalkracht verloop Buiten- en binnenring van ring C, ten gevolge van eigen gewicht hoofddraagconstructie

Verbindingsstaven tussen de vakwerkeringen

De vakwerkeringen zijn onderling verbonden met staven. In deze staven zullen ook normaalkrachten optreden.

De normaalkrachten die optreden ten gevolge van het eigen gewicht van de hoofddraagconstructie zijn relatief klein (-1.800 tot +600 kN). Wanneer de constructie wordt belast door een windbelasting zullen de normaalkrachten toenemen tot: -6.800 tot +8.100 kN.

6.2.2 Rekenwaarde normaalkrachten en krachtwisselingen

Wanneer we de constructie op sterkte willen controleren is het noodzakelijk om het werkelijk krachtsverloop in de profielen te weten inclusief de belastingsfactoren.

De volgende belastingsfactoren zijn toegepast, volgens NEN 6702:

- Permanent (eigen gewicht): $\gamma_{per} = 1,35$
 $\gamma_{per} = 1,2$
- Veranderlijk (wind): $\gamma_{ver} = 1,5$

In de constructie is gebruik gemaakt van de staalkwaliteit S355, met een vloeispanning van 355 N/mm². Vanwege het roteren van het Great Dubai Wheel zal naast de vloeispanning tevens de grootte van de spanningswisseling van belang zijn i.v.m. vermoeiing. Aangenomen is dat de toelaatbare spanningswisseling 100 N/mm² bedraagt.

In het ontwerp zijn twee profieldoorsneden gebruikt, te weten:

- CHS 1440, t = 40 mm, A = 176 · 10³ mm²
- CHS 2220, t = 40 mm, A = 274 · 10³ mm²

De vorm van het normaalkrachtverloop over de ring zal geen noemenswaardige verandering ondergaan, ten gevolge van de verhoogde belastingen. De waarden van de gevonden normaalkrachten variëren echter wel degelijk.

In deze paragraaf zal de normaalspanning in de elementen bepaald worden met de volgende formule:

$$\Delta\sigma_{N;d} = N_d / A$$

Permanente belasting

De permanente belasting zal bestaan uit het eigen gewicht van de hoofddragconstructie en de hoofdcapsules. Voor de bepaling van de normaalkrachten is een belastingsfactor toegepast van: $\gamma_{per} = 1,35$.

CHS 2220, t = 40 mm							
Buitenring			Binnenring		Verticaal 1		
N_d		σ_d	N_d	σ_d	N_d	σ_d	
$N_{max;d}$	5.850 kN	$\sigma_{N;max;d}$	21,4 N/mm ²	16.430 kN	60,2 N/mm ²	3.280 kN	12,0 N/mm ²
$N_{min;d}$	-34.660 kN	$\sigma_{N;min;d}$	-127,0 N/mm ²	-46.410 kN	-170,0 N/mm ²	-21.160 kN	-77,5 N/mm ²
		$\Delta\sigma_{N;d}$	148,4 N/mm ²		230,2 N/mm ²		89,5 N/mm ²

CHS 1440, t = 40 mm					
Verticaal 2			Diagonaal		
N_d		σ_d	N_d	σ_d	
$N_{max;d}$	3.480 kN	$\sigma_{N;max;d}$	19,8 N/mm ²	19.240 kN	109,3 N/mm ²
$N_{min;d}$	-5.510 kN	$\sigma_{N;min;d}$	-31,3 N/mm ²	-21.650 kN	-123,0 N/mm ²
		$\Delta\sigma_{N;d}$	51,1 N/mm ²		232,3 N/mm ²

Tabel 28 - Normalspanningen in ring C, ten gevolge van permanente belasting, $\gamma_{per} = 1,35$

De normalspanningen in de profielen van ring C ten gevolge van de permanente belasting zijn voor alle elementen kleiner dan de vloeispanning ($f_{y;d} = 355 \text{ N/mm}^2$). Wanneer echter gekeken wordt naar de spanningswisselingen, ten gevolge van normalspanning, blijken deze voor de buitenring, de binnenring en de verticalen groter te zijn dan 100 N/mm^2 . De spanningswisselingen zullen zelfs nog toenemen doordat er naast een normalspanning tevens een buigspanning in de elementen en knooppunten aanwezig zal zijn, deze extra spanningscomponent wordt in paragraaf 6.3 behandeld

Bij gebruik van de huidige profielen zal de constructie zeer gevoelig zijn voor vermoeiingsschade. Er zullen maatregelen genomen moeten worden om de spanningswisselingen te verlagen.



Permanente en windbelasting

Voor de bepaling van de normaalkrachten zijn belastingsfactoren toegepast van: $\gamma_{per} = 1,2$ en $\gamma_{ver} = 1,5$.

CHS 2220, t = 40 mm							
Buitenring				Binnenring		verticaal 1	
N_d		σ_d		N_d	σ_d	N_d	σ_d
$N_{max;d}$	7.890 kN	$\sigma_{N;max;d}$	28,9 N/mm ²	26.290 kN	96,3 N/mm ²	5.640 kN	20,7 N/mm ²
$N_{min;d}$	-56.300 kN	$\sigma_{N;min;d}$	-206,2 N/mm ²	-62.590 kN	-229,3 N/mm ²	-28.070 kN	-102,8 N/mm ²
		$\Delta\sigma_{N;d}$	235,1 N/mm ²				123,5 N/mm ²

CHS 1440, t = 40 mm						
Verticaal 2			Diagonaal			
N_d		σ_d	N_d		σ_d	
$N_{max;d}$	4.400 kN	$\sigma_{N;max;d}$	25,0 N/mm ²	25.530 kN	145,1 N/mm ²	
$N_{min;d}$	-7.310 kN	$\sigma_{N;min;d}$	-41,5 N/mm ²	-26.930 kN	-153,0 N/mm ²	
		$\Delta\sigma_{N;d}$	66,5 N/mm ²			298,1 N/mm ²

Tabel 29 - Normaalspanningen in ring C, ten gevolge van permanente belasting en windbelasting, $\gamma_{per} = 1,2$ en $\gamma_{ver} = 1,5$

De normaalspanningen in de profielen van ring C ten gevolge van de permanente belasting zijn voor alle elementen kleiner dan de vloeispanning ($f_{y;d} = 355 \text{ N/mm}^2$). Er zal echter naast een normaalspanning tevens een buigspanning in de elementen aanwezig zijn. De totale spanning zal hierdoor in de buiten- en binnenring hoger zijn dan de vloeispanning (zie bijlag A, tekening nummer. 2.4)

Bij gebruik van de huidige profielen zal de constructie onder permanente belasting en windbelasting onvoldoende veiligheid tegen bezwijken bieden. In de elementen van de buiten- en de binnenring zal de vloeispanning van het staal bereikt worden.

Het ontwerp zal moeten worden aangepast om te voldoen aan de sterkte eisen. De spanningen in de profielen zullen verlaagd moeten worden. Zowel voor de sterkte (vloeispanning), als voor de vermoeiing (spanningswisselingen).

De spanningswisselingen, ten gevolge van normaalspanning zijn groter dan 100 N/mm^2 . De toegepaste windbelasting op de constructie is echter de extreme waarde. Het overgrote deel van de windbelastingen zal bestaan uit een lagere belasting. De gevonden spanningswisselingen ten gevolge van de windbelasting is dan ook een te hoge waarde. De vermoeiing zal waarschijnlijk voor het grootste deel bepaald worden door spanningswisseling ten gevolge van de rotatie en de permanente belasting op de constructie

Verbindingsstaven tussen de vakwerken

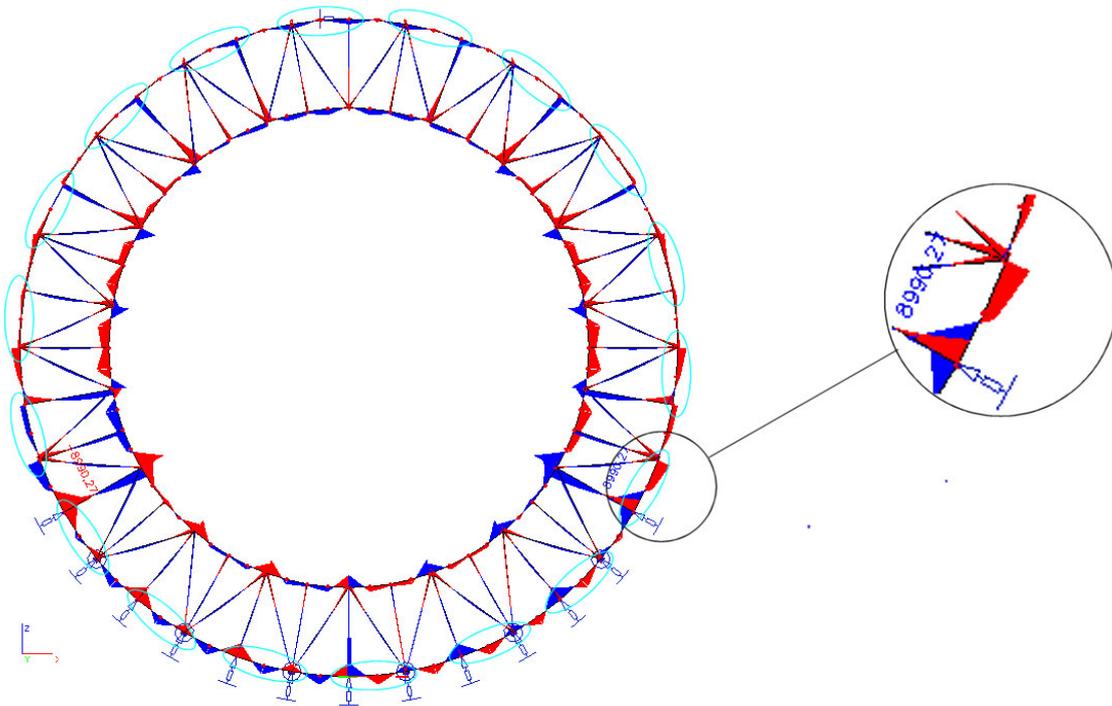
Bij een combinatie van het totale eigen gewicht en de wind, inclusief belastingsfactoren bedraagt de totale normaalkracht: -15.800 tot 15.900 kN.

Voor de controle van de verbindingstaven op sterkte zal de constructie onder windbelasting maatgevend zijn.

6.3 Momenten

Naast de normaalkrachten zullen de momenten in de profielen een aanzienlijke bijdrage leveren aan de spanningswisselingen in de profielen. Het momentverloop (M_y) in vakwerkkring C ten gevolge van het eigen gewicht van de hoofddraagconstructie is in figuur 148 te zien. De grootste momenten treden op in de binnen en buitenring van het vakwerk, ter plaatse van de hoogste oplegging.

De momenten in het vlak van de vakwerkkring (M_y , radiaal) zijn wanneer het rad door het eigen gewicht wordt belast vele malen groter dan de momenten in de axiale richtingen. Wanneer het rad echter naast de permanente belasting tevens door een axiale windbelasting wordt belast, zal het moment in axiale richting niet meer te verwaarlozen zijn.



Figuur 148 - Momentenverloop in ring C, positie 1, ten gevolge van eigen gewicht hoofddraagconstructie

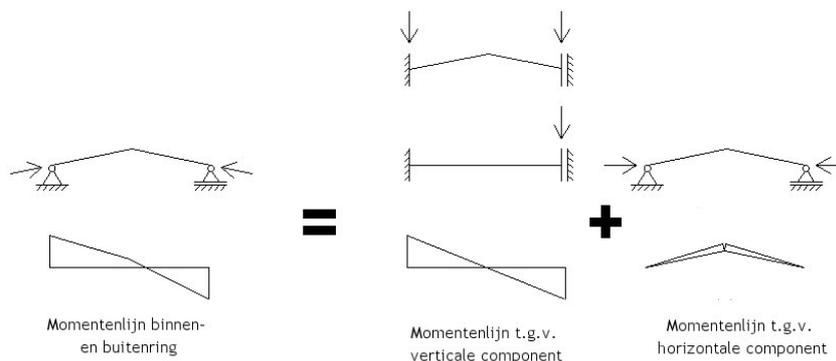
Het maximale moment treedt op wanneer het rad zich in positie 2 bevindt. Deze piek zal zich boven de hoogste oplegging bevinden, op het punt waar in de vervorming van het rad een knik aanwezig is. Voor de elementen in de binnenring, buitenring, verticaal 1 en verticaal 2 zal de spanning die ontstaat uit dit moment de spanningswisseling sterk beïnvloeden. Een verlaging van dit piekmoment door bijvoorbeeld een aanpassing van de veerstijfheden van de opleggingen zal een aanzienlijke verlaging van de spanningswisseling betekenen en een aanzienlijke verhoging van de vermoeingssterkte.



Het momentverloop toont een duidelijke piek ter plaatse van de hoogste oplegging. Het aandeel van deze momentenpiek op de spanningswisseling is zeer groot. Verlaging van deze piek zal het vermoeingsgedrag van de constructie ten goede komen.

Door de ronde vorm van de binnen- en buitenring is de vorm van momentenlijn een combinatie van een afschuiflijger gecombineerd met de momentenlijn ten gevolge van boogwerking. Wanneer rechte staven gebruikt zouden worden ontstaat enkel een momentenlijn met de vorm van een afschuiflijger.

Uit nader onderzoek is inmiddels gebleken dat het piekmoment bij gebruik van rechte staven met ongeveer 30% afneemt



Figuur 149 - Verklaring moment in binnen- en buitenring

Aanbeveling

Het gebruik van rechte staven zal het piekmoment verlagen, aangezien er in dit geval enkel een moment ontstaat uit de afschuifvervorming. Uit nader onderzoek is inmiddels gebleken dat het piekmoment bij gebruik van rechte staven met ongeveer 30% afneemt.

6.3.1 Rekenwaarde momenten

Net als de normaalkracht zal het moment leiden tot een spanningstoename in de profielen. Het maximale moment treedt op boven de hoogste oplegging en zal het vermoeingsgedrag van de constructie verslechteren.

De volgende belastingsfactoren zijn toegepast, volgens NEN 6702:

- Permanent (eigen gewicht): $\gamma_{per} = 1,35$
 $\gamma_{per} = 1,2$
- Veranderlijk (wind): $\gamma_{ver} = 1,5$

In deze paragraaf zal de buigspanning in de elementen bepaald worden met de volgende formule:

$$\Delta\sigma_{M;d} = M_d / W$$

Permanente belasting

De permanente belasting zal bestaan uit het eigen gewicht van de hoofddragconstructie en de hoofdcapsules. Voor de bepaling van de momenten is een belastingsfactor toegepast van: $\gamma_{per} = 1,35$.

CHS 2220, t = 40 mm							
Buitenring				Binnenring		verticaal 1	
M_d		σ_d		M_d	σ_d	M_d	σ_d
$M_{max;d}$	20.940 kNm	$\sigma_{M;max;d}$	142,7 N/mm ²	19.740 kNm	134,6 N/mm ²	11.450 kNm	78,1 N/mm ²

CHS 1440, t = 40 mm					
Verticaal 2			Diagonaal		
M_d		σ_d	M_d	σ_d	
$M_{max;d}$	4.000 kNm	$\sigma_{M;max;d}$	66,8 N/mm ²	2.720 kNm	45,4 N/mm ²

Tabel 30 - Buigspanningen in ring C, ten gevolge van permanente belasting, $\gamma_{per} = 1,35$

De momentpieken boven de hoogste opleggingen zullen een belangrijke bijdrage leveren aan de spanningen in de profielen. De vermoeiing zal dan ook voor een groot deel bepaald worden door deze momentpieken. Verlaging van deze pieken zal de vermoeiing ten goede komen.

De spanningen ten gevolge van de momenten zullen een belangrijke bijdrage leveren aan de spanningswisseling in de elementen.

Bij de analyse van de constructie op vermoeiingssterkte zullen de momenten dan ook niet verwaarloosd mogen worden.

Permanente en windbelasting

Voor de bepaling van de momenten zijn belastingsfactoren toegepast van: $\gamma_{per} = 1,2$ en $\gamma_{ver} = 1,5$.

CHS 2220, t = 40 mm							
Buitenring				Binnenring		verticaal 1	
M_d		σ_d		M_d	σ_d	M_d	σ_d
$M_{max;d}$	30.230 kNm	$\sigma_{M;max;d}$	206,1 N/mm ²	30.000 kNm	204,5 N/mm ²	15.180 kNm	103,5 N/mm ²

CHS 1440, t = 40 mm					
Verticaal 2			Diagonaal		
M_d		σ_d	M_d	σ_d	
$M_{max;d}$	4.630 kNm	$\sigma_{M;max;d}$	77,3 N/mm ²	2.950 kNm	49,2 N/mm ²

Tabel 31 - Buigspanningen in radiale richting in ring C, ten gevolge van permanente belasting en windbelasting, $\gamma_{per} = 1,2$ en $\gamma_{ver} = 1,5$

Naast de in tabel 31 getoonde buigspanningen in radiale richting ontstaat er onder axiale windbelasting tevens een moment in axiaal moment, wat resulteert in een axiale buigspanning. In tegenstelling tot de axiale buigspanningen onder het eigen gewicht is deze buigspanning ten gevolge van de windbelasting niet te verwaarlozen. De axiale



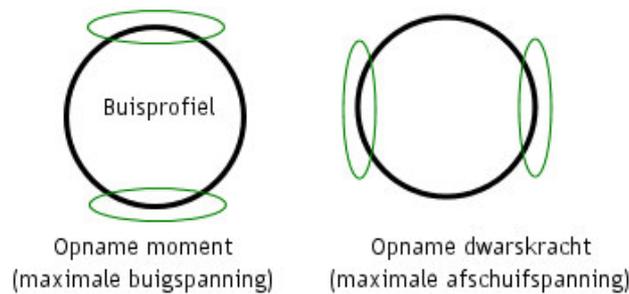
buigspanning zal in de binnen- en buitenring resulteren in een spanningstoename van ongeveer 30 N/mm² en in verticaal 1 een toename van ongeveer 80 N/mm².

6.3.2 Rekenwaarde normaalkrachten en momenten

In deze paragraaf worden de maximale spanningen ten gevolge van zowel de buigspanning, als de normaalspanning getoond. Een uitgebreid overzicht van de spanningen is in bijlage A, tekening nummer 2.3 en 2.4 te zien.

De maximale spanning in de profielen zullen in alle gevallen lager moeten zijn dan de vloeispanning.

$$\sigma_d = \sigma_{N;d} + \sigma_{M;d} = N_d / A + M_d / W \leq f_{y;d} = 355 \text{ N/mm}^2$$



Figuur 150 - Spanningsverdeling buisprofiel (elastische berekening)

De maximale schuifspanning zal niet samenvallen met de maximale buigspanning en normaalspanning. Ook de waarde van deze schuifspanning is lager dan de waarde uit de buigspanning.

Wanneer de afschuifspanning volgens de volgende formule wordt bepaald:

$$\tau_d \approx (3 \cdot V) / (2 \cdot A)$$

Dan zal de afschuifspanning in de randligger (buitenring, CHS 2220) maximaal: $(3 \cdot 1.750 \text{ kN}) / (2 \cdot 273,9 \cdot 10^3 \text{ mm}^2) \approx 10 \text{ N/mm}^2$ bedragen uit het eigen gewicht. Deze spanning is vele malen lager dan de buig- en normaalspanningen. De bijdrage van de dwarskracht aan de totale spanning wordt in deze paragraaf verwaarloosd.

Permanente belasting

De permanente belasting zal bestaan uit het eigen gewicht van de hoofdconstructie en de hoofdcapsules. Voor de bepaling van de spanningen is een belastingsfactor toegepast van: $\gamma_{per} = 1,35$.

	Permanente belasting					Spanning uiterste vezel (excl. dwarskracht)	
	N _{x;d} (kN)	$\sigma_{N;d}$ (N/mm ²)	M _{y;d} (kNm)	$\sigma_{M;y;d}$ (N/mm ²)			
Buitenring	-27.397	-100,0	20.935	± 142,7	M _{max}	42,7	-242,7
Binnenring	-33.590	-122,6	19.736	± 134,5	M _{max}	11,9	-257,2
Verticaal 1	-21.160	-77,3	-9.108	± 62,1	N _{max}	-15,2	-139,3
Verticaal 2	-3.438	-19,5	-3.995	± 66,7	M _{max}	47,2	-86,2
Diagonaal	-21.646	-123,1	-2.717	± 45,4	N _{max} & M _{max}	-77,7	-168,4

Tabel 32 - Spanningen in ring C, ten gevolge van permanente belasting, $\gamma_{per} = 1,35$

De spanningen in uiterste vezel zullen, wanneer enkel naar de permanente belasting gekeken wordt, de vloeispanning niet overschrijden.

Het rad zal echter niet stilstaan maar roteren, waardoor de spanning in de uiterste vezel zal variëren. Vanwege het optreden van de spanningswisselingen zal de toelaatbare spanning in de profielen afnemen, dit wordt in paragraaf 6.6, Vermoeiingssterkte, behandeld. Om aan de eis die wordt gesteld aan de vermoeiingssterkte te voldoen moet de spanningswisseling in de profielen, nabij de knooppunten lager zijn dan 100 N/mm^2 .

In paragraaf 6.2.1, Normaalkracht, is de variatie van de normaalkracht getoond. De variatie van de normaalspanning is reeds groter dan 100 N/mm^2 . Ook het moment zal variëren gedurende de rotatie van het rad, hierdoor neemt de spanningswisseling verder toe. De constructie zal ondanks dat de spanning in de uiterste vezel lager is dan de vloeispanning, toch niet voldoen aan de vermoeiingssterkte eis.

Permanente en windbelasting

Voor de bepaling van de spanningen zijn belastingsfactoren toegepast van: $\gamma_{\text{per}} = 1,2$ en $\gamma_{\text{ver}} = 1,5$.

	Eigengewicht & wind					Spanning uiterste vezel (excl. dwarskracht)	
	$N_{x;d}$ (kN)	$\sigma_{N;d}$ (N/mm ²)	$M_{y;d}$ (kNm)	$\sigma_{M;y;d}$ (N/mm ²)			
Buitenring	-47.322	-172,8	30.234	± 206,1	M_{max}	33,3	-378,9
Binnenring	-50.854	-185,7	29.797	± 203,1	M_{max}	17,4	-388,8
Verticaal 1	-28.073	-102,5	-11.845	± 80,7	N_{max}	-21,8	-183,2
Verticaal 2	-4.913	-17,9	-4.626	± 31,5	M_{max}	13,6	-49,5
Diagonaal	-26.929	-98,3	-2.950	± 20,1	$N_{\text{max}} \& M_{\text{max}}$	-78,2	-118,4

Tabel 33 - Spanningen in ring C, ten gevolge van permanente belasting en windbelasting, $\gamma_{\text{per}} = 1,2$ en $\gamma_{\text{ver}} = 1,5$

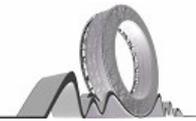
De spanningen in de uiterste vezel van zowel de buiten-, als de binnenring overschrijden de vloeispanning van 355 N/mm^2 . De sterkte van deze profielen is onvoldoende, aanpassing van de profieldoorsnede, of aan de grootte van de windbelasting zullen noodzakelijk zijn.

Vanwege de overschrijding van de vloeispanning zal de constructie naast de sterkte eis ook niet voldoen aan de eis voor de lokale stabiliteit van de constructieve elementen.

De spanningen ten gevolge van het moment en normaalkracht zullen een belangrijke bijdrage leveren aan de spanningswisseling in de elementen. De spanningswisselingen in de elementen zijn groter dan 100 N/mm^2 . De constructie zal niet voldoen op het gebied vermoeiingssterkte.

Wanneer de constructie door de permanente en windbelasting wordt belast zullen de spanningen in de binnen en buitenring hoger zijn dan de vloeispanningen. De constructie voldoet in dit geval niet aan de statische sterkte eis. Aanpassing van de profieldoorsnede, of aan de grootte van de windbelasting zullen noodzakelijk zijn

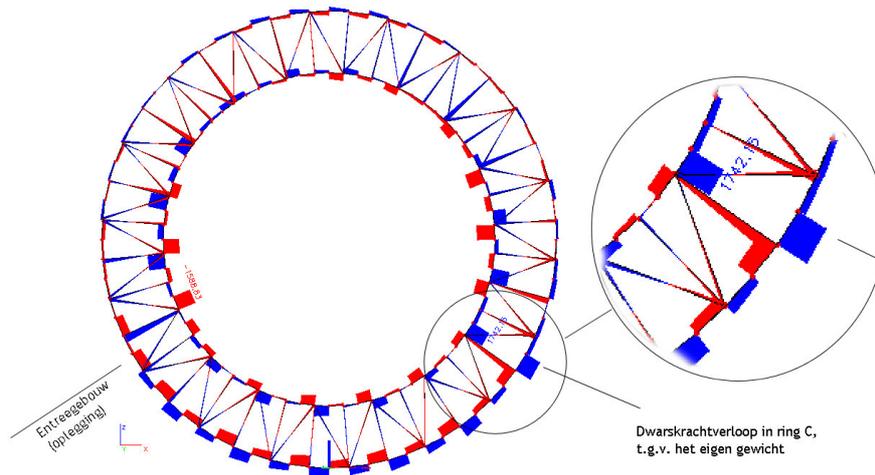
De spanningen zullen omlaag moeten vanuit het oogpunt van de statische en vermoeiingssterkte, zie paragraaf 6.6.



6.4 Dwarskracht

Naast normaalkrachten en momenten komen er in de constructie tevens dwarskrachten voor. De grootte van de dwarskrachten is vele malen kleiner dan de normaalkrachten in de elementen en zal dan ook niet in detail beschouwd worden.

De maximale dwarskracht treedt op ter plaatse van de hoogste oplegging in de binnenring en bedraagt ongeveer 1.750 kN ($\approx 10 \text{ N/mm}^2$). In vergelijking wordt met de normaalkracht in de binnenring (-20.500 kN) is deze waarde relatief laag. Bij de beschouwing van de maximaal optredende spanningen zijn de dwarskrachten niet meegenomen.

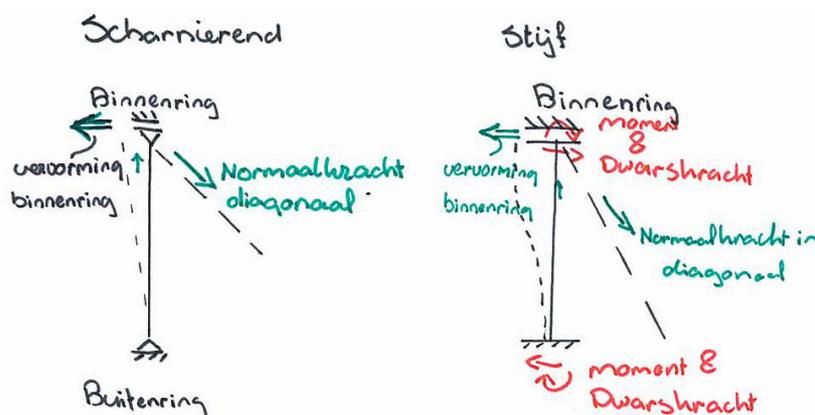


Figuur 151 - Dwarskrachtverloop ring C, ten gevolge van eigen gewicht

Het dwarskrachten verloop in de binnen en buitenring wordt gekenmerkt door een sprong in het midden van de elementen. Deze sprong wordt veroorzaakt door de geknikte vorm van deze elementen. De sprong in het dwarskrachtenverloop kan afgeleid worden uit de vorm van het momentenverloop in deze staven, zie figuur 149.

De grootte van de dwarskracht in de constructie is relatief laag in vergelijking met de normaalkrachten.

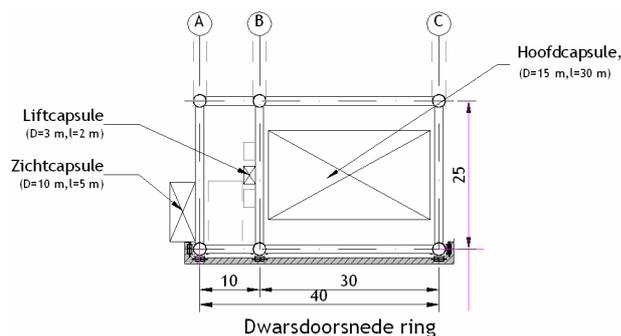
Ook in de verticalen en diagonalen zal een dwarskracht optreden. Vanwege de stijve knooppunten zal het vervormingsverschil tussen de binnen- en buitenring niet enkel resulteren in een normaalkracht, maar zal tevens een deel opgenomen worden als afschuifkracht, hierdoor zal de dwarskracht in deze elementen iets hoger liggen. In de huidige knooppunten van de verticaal treedt naast een normaalkracht ook een moment en een dwarskracht op, zie figuur 152



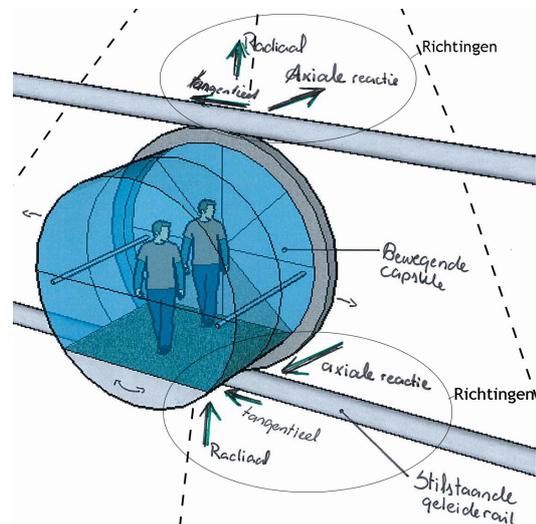
Figuur 152 - Opname vervormingsverschil tussen binnen- en buitenring door de verticalen

6.5 Invloed uitkragende bevestiging capsules

Naast de hoofdcapsules bevinden zich in het rad ook zicht- en liftcapsules. De bevestiging van deze capsules aan het rad zal in tegenstelling tot de hoofdcapsule uitkragend zijn. Deze uitkragende bevestiging veroorzaakt een extra belasting van de elementen van het rad. De invloed van deze extra belasting op de lokale krachten in de elementen zal in deze paragraaf worden behandeld.



Figuur 153 - Dwarsdoorsnede hoofdring (afmetingen in meters)

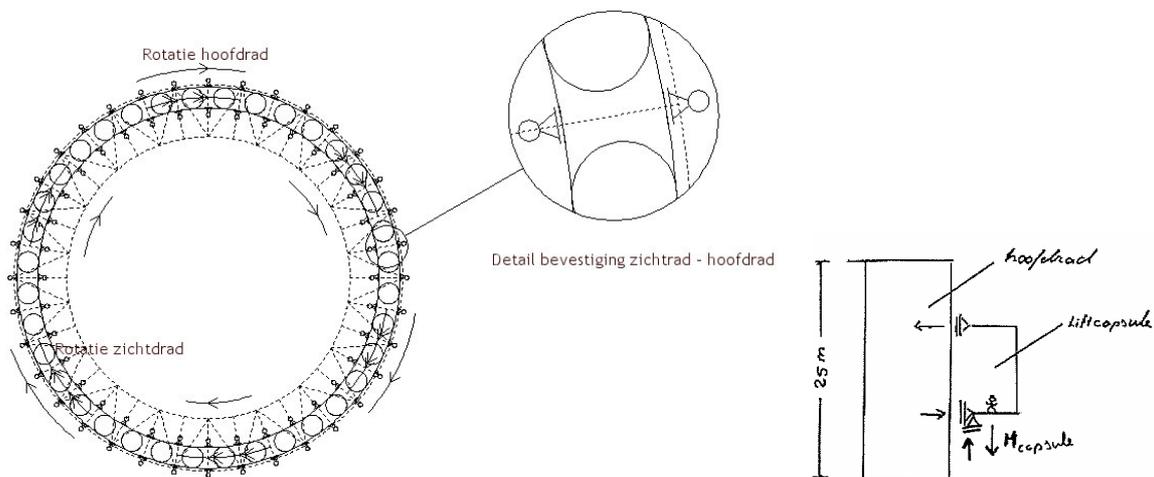


Figuur 154 - Uitkragende bevestiging liftcapsule aan geleiderail (hoofdconstructie), soortgelijke bevestiging voor de zichtring

6.5.1 Zichtcapsule

De uitkragende bevestiging van het zichtrad aan de buitenzijde van de hoofdring zal het krachtenspel in de hoofdring beïnvloeden.

Om inzicht te krijgen in de grootte van de belastingen op de hoofdconstructie, afkomstig uit het zichtrad is gebruik gemaakt van een ESA-model, zie figuur 156. In dit ESA-model is enkel het zichtrad gemodelleerd. Het zichtrad zal aan de verticalen van vakwerkkring A bevestigd worden. Voor de veerstijfheden van de bevestigingen zijn de volgende waarden aangenomen: $k_z = 1 \cdot 10^3 \text{ MN/m}$, in de richting van de staafas, $k_x = 10 \text{ MN/m}$, radiaal op de staafas.

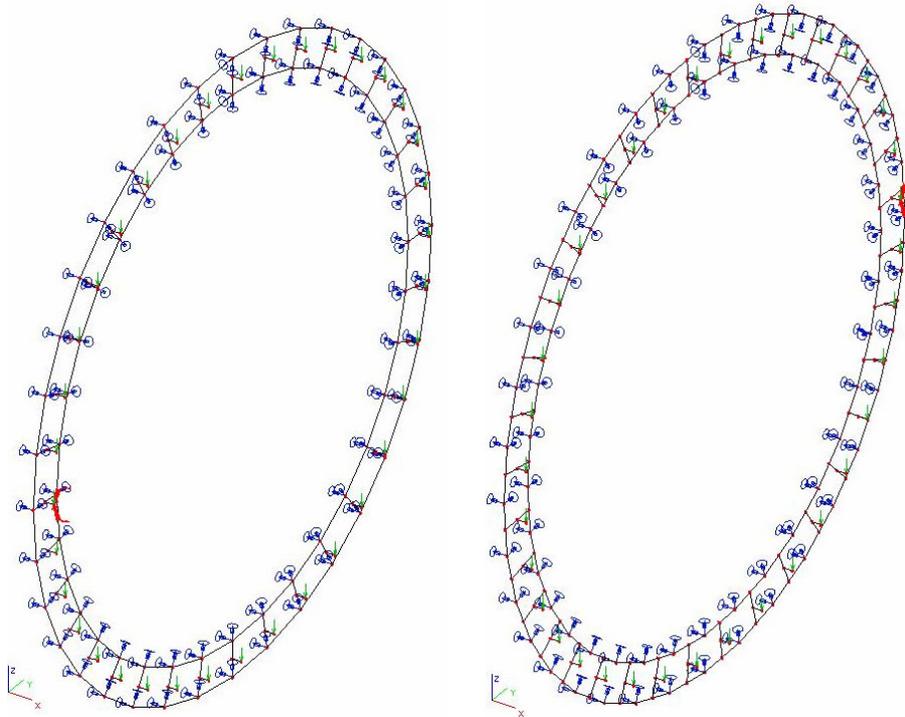


Figuur 155 - Bevestiging hoofdtrad - zichtrad



De reactiekrachten komende uit de zichtring op de verticalen zullen bestaan uit een kracht in de axiale richting en een kracht in de radiale richting van het rad, zie figuur 154/figuur 160. Er zal geen grote kracht in de tangentiële richting van het rad ontstaan, omdat het zichtrad zal roteren en hierdoor over de oplegging zal glijden (zeer kleine wrijvingskracht).

De reactiekrachten komende uit de zichtring zijn op twee posities bekeken, de zichtcapsules ter hoogte van de opleggingen en de zichtcapsules tussen de steunpunten. Deze verschillende posities zijn te zien in figuur 156. Het verschil in reactiekracht op de oplegging tussen de twee posities was zeer klein.



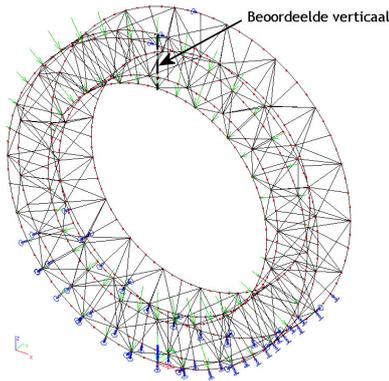
Figuur 156 - ESA model van het zichtrad (verticalen hoofdtrad zijn opleggingen)

Lokale invloed

Om de lokale invloed van de excentrische plaatsing van de zichtcapsules te onderzoeken zijn de reactiekrachten bepaald.

Uit een analyse van de reactiekrachten bleek de reactiekracht op de topverticaal maatgevend te zijn. Deze verticaal is verder onderzocht. Gekeken is naar het moment en de normaalkracht in de verticaal ten gevolge van de excentrische plaatsing van het zichtrad. Er worden verschillende plaatsingen van de capsule over de verticaal bekeken.

De reactiekrachten ten gevolge van het eigen gewicht van de zichtcapsule op de beoordeelde verticaal zijn in tabel 34 getoond. De reactiekrachten aan de onder- en bovenzijde van de liftcapsule zijn niet gelijk en tegengesteld. Dit verschil is het gevolg van de herverdeling van de belasting over meerdere verticalen.

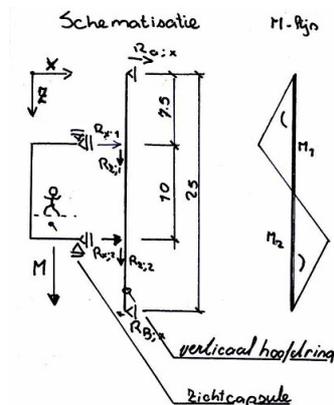


Figuur 157 - Overzicht hoofdrad

	R _x [kN]	R _y [kN]	R _z [kN]
R _{1;x}	-93,56	0	353,36
R _{2;x}	82,44	0	354,64

Tabel 34 - Reactiekrachten uit zichtrad op topverticaal

Extra moment ten gevolge van zichtcapsule geplaatst in het midden van de verticaal:



$$R_{A;x} = (R_{x;1} \cdot 17,5 + R_{x;2} \cdot 7,5) / 25 \quad (\sum T|B=0)$$

$$R_{B;x} = R_{x;1} + R_{x;2} - R_{A;x} \quad (\sum F_x=0)$$

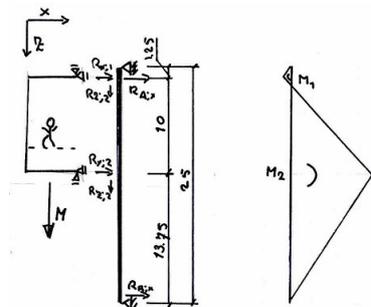
$$M_1 = R_{A;x} \cdot 7,5$$

$$M_2 = R_{B;x} \cdot 7,5$$

R _{a;x}	-40,76	kN
R _{b;x}	29,64	kN
M ₁	-305,7	kNm
M ₂	222,3	kNm
W _{extra;1}	-861.127	mm ³
W _{extra;2}	626.197	mm ³
N	708	kN
A _{extra}	1.994	mm ²

CHS 323,9
t = 12,5 mm

Zichtcapsule geplaatst tegen de buitenring/ buitenring:



$$R_{A;x} = (R_{x;1} \cdot 23,75 + R_{x;2} \cdot 13,75) / 25 \quad (\sum T|B=0)$$

$$R_{B;x} = R_{x;1} + R_{x;2} - R_{A;x} \quad (\sum F_x=0)$$

$$M_1 = R_{A;x} \cdot 13,75$$

$$M_2 = R_{B;x} \cdot 13,75$$

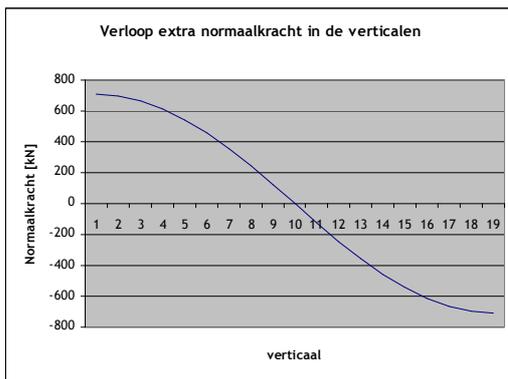
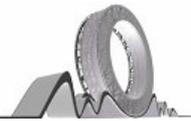
R _{a;x}	-43,54	kN
R _{b;x}	32,42	kN
M ₁	-54,4	kNm
M ₂	445,8	kNm
W _{extra;1}	-153.310	mm ³
W _{extra;2}	1.255.704	mm ³
N	708	kN
A _{extra}	1.994	mm ²

CHS406
t = 16 mm

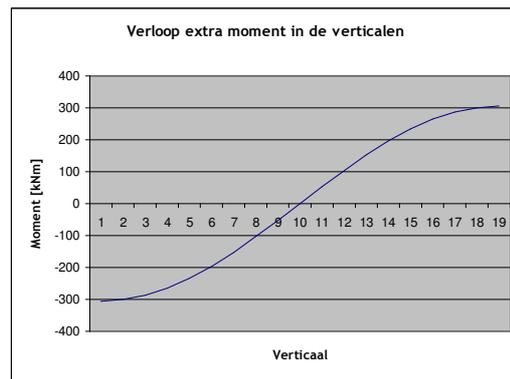
Wanneer de zichtcapsule vanuit het midden naar de eindpunten van de verticalen wordt verplaatst neemt het moment dat optreedt in de verticalen toe. Het bij de huidige modellering maximaal optredende moment bedraagt 445 kNm en leidt in de huidige profieldoorsnede (CHS 1440) tot een spanningstoename van ongeveer 7 N/mm².

Bij de bepaling van de extra momenten in de verticalen is uitgegaan van een scharnierende verbinding aan de uiteinden. In werkelijkheid zal deze verbinding stijf zijn, hierdoor zal het optredende extra moment in de elementen verder afnemen.

Vanwege de rotatie van de hoofddraagconstructie zullen ook de extra momenten en normaalkrachten als gevolg van de belasting uit de liftcapsule resulteren in een kleine spanningswisseling.



Figuur 158 - Verloop extra normaalkracht



Figuur 159 - Verloop extra moment

Conclusie

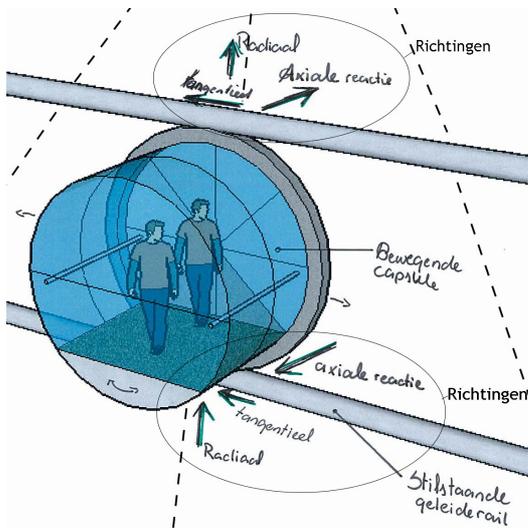
De invloed van de uitkragende bevestiging van de zichtcapsules op het lokale krachtsverloop in de elementen is zeer klein. In de voor de verticalen toegepaste profielen, CHS 1440 en 2220, zullen de extra belastingen nauwelijks tot een spanningstoename leiden.

Ook het globale krachtsverloop zal nauwelijks beïnvloedt worden door de uitkragende bevestiging van de zichtcapsules. De reactiekrachten afkomstig uit de capsules (belasting hoofdtrad) zijn zeer klein in vergelijking met bijvoorbeeld het eigen gewicht van het rad en de hoofdcapsules.

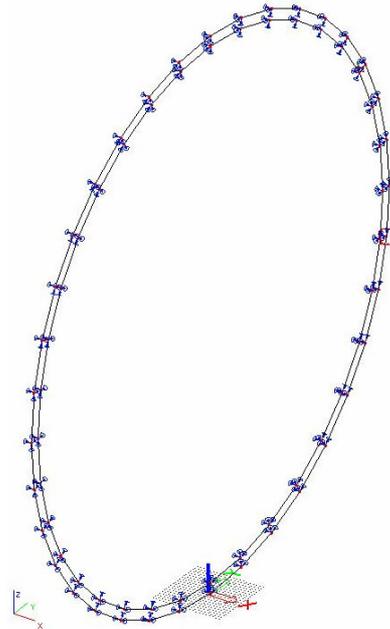
6.5.2 Liftcapsule

Ook de uitkragende bevestiging van de liftcapsules aan de binnenzijde van de hoofdtring zal van invloed kunnen zijn op het krachten spel in de hoofdtring. Om inzicht te krijgen in de krachten afkomstig uit het zichtrad is gebruik gemaakt van een ESA-model, waarin enkel het liftrad is weergegeven. Het liftrad is opgebouwd uit twee vaste ringen (de geleiderails) waartussen de liftcapsules bewegen. In tegenstelling tot de zichtring is de geleiderail plaatsvast aan de hoofdtring bevestigd. De verticale belasting zal nu tevens een moment tot gevolg hebben. De exacte bevestiging van de capsules aan de geleiderail is nog niet bekend.

De reactiekrachten komende uit de zichtring op de diagonalen zullen bestaan uit een kracht in de axiale richting (eigen gewicht en veranderlijke vloerbelasting), de radiale richting (eigen gewicht en veranderlijke vloerbelasting) en in de tangentiële richting (eigen gewicht, veranderlijke vloerbelasting en acceleratie) van het rad, zie figuur 160.



Figuur 160 - Krachten uit de liftcapsule op de geleiderail

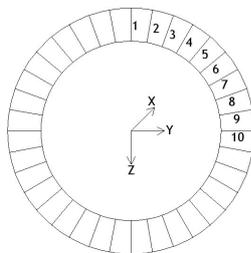


Figuur 161 - ESA model liftring

Lokale invloed

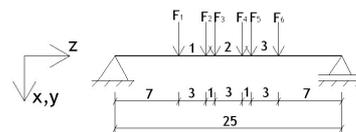
Om de lokale invloed van de belasting komende uit de lift te bepalen zijn de reactiekrachten bepaald. In het ESA-model zijn op verschillende punten belastingen aangebracht (zie figuur 162) hieruit werd de extra belasting op de elementen bepaald.

Aangenomen is dat er per verticaal maximaal drie liftcapsules geplaatst kunnen worden. De verdeling van de capsules over de verticaal is te zien in figuur 163.

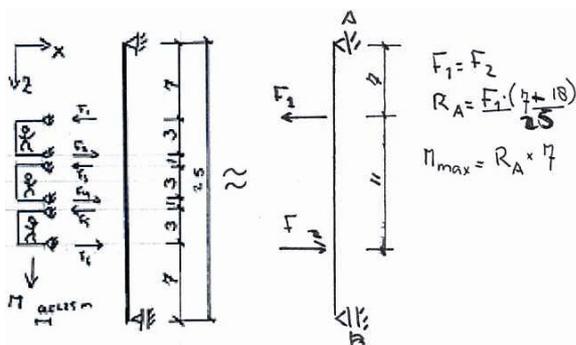


Figuur 162 - onderzochte locaties liftcapsule

Voor het moment in de axiale richting (uit het vlak) blijkt verticaal 1 maatgevend, wanneer drie capsules boven elkaar geplaatst worden. De invloed van capsules geplaatst op naastgelegen verticaal (2 en 3) op de belasting van verticaal 1 in de axiale richting is minimaal.



Figuur 163 - verdeling liftcapsule over de verticaal

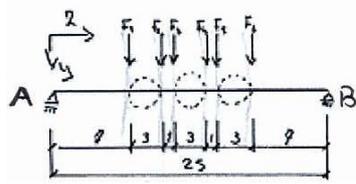


F_{oneven}	-18 kN
F_{even}	18 kN
M_{min}	-45,45 kNm
M_{max}	45,45 kNm
$W_{\text{extra,min}}$	-128.028 mm ³
$W_{\text{extra,max}}$	128.028 mm ³
N	132 kN
A_{extra}	372 mm ²

CHS168,3
t = 8 mm



Voor het moment in de tangentiële richting (in het vlak) bleek verticaal 10 (midden) maatgevend. Wanneer zich ter hoogte van verticaal 10 drie liftcapsules bevinden zal dit de volgende belasting van verticaal 10 opleveren.



$$R_A = R_B = \frac{\sum F}{2}$$

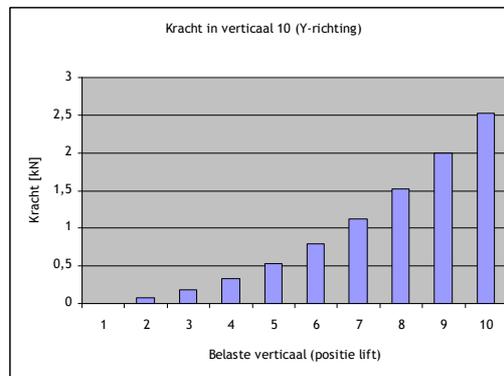
$$M_{max} = R_A \cdot 12.5$$

$$F_i \cdot (1.5 + 2.5 + 3.5)$$

F_{oneven}	2,5 kN
F_{even}	2,5 kN
M_{max}	70 kNm
$W_{extra,max}$	197.183 mm ³
N	0 kN
A_{extra}	0 mm ²

CHS193,7
t = 8 mm

Bij de bepaling van de extra belasting in de verticalen uit de liftcapsules zal de invloed van capsules geplaatst op naastgelegen verticalen (8 en 9), op de belasting van verticaal 10 in de tangentiële richting, worden meegenomen. Zo zal een capsule op verticaal 9 de belasting met 2,0 kN doen toenemen en een capsule op verticaal 8 met 1,6 kN. Naarmate de capsule zich op verder gelegen verticalen bevinden zal de invloed van deze capsules verminderen.



Figuur 164 - Invloed van capsules geplaatst op naastgelegen verticalen op de belasting van verticaal 10 in de tangentiële richting

Wanneer verticaal 9 en 10 beide volledig zijn belast, dan zal in verticaal 10 een moment van 126 kNm in de axiale richting optreden. Het optreden van dit belastinggeval zal echter niet erg waarschijnlijk zijn. Bovendien zal een extra moment van 126 kNm in de verticalen (CHS 1440), tot zeer kleine spanningsverhoging van ongeveer 2 N/mm².

Conclusie

Het moment ten gevolge van de uitkragende bevestiging van de liftcapsules is vele malen lager dan het moment dat ontstaat ten gevolge van de uitkragende bevestiging van het zichtrad. De gebruikte profielen in het vakwerk hebben een dusdanig grote afmeting dat dit moment opneembaar is zonder grote spanningstoename.

Wanneer gekeken wordt naar de sterkte van de verticalen van de hoofdtring is het mogelijk om het liftstelsel uitkragend te bevestigen.

Ook het globale krachtsverloop zal nauwelijks beïnvloed worden door de uitkragende bevestiging van de liftcapsules.

6.6 Vermoeingssterkte

Wanneer het rad als een statische constructie wordt beschouwd, zal de constructie, bij gebruik van de staalsoort S355, niet voldoen aan de statische sterkte eis ($\sigma_d \leq f_{y;d}$).

De constructie van het rad zal echter niet stilstaan, maar roteren. Als gevolg van de rotatie zullen de spanningen in de profielen variëren in de tijd. Niet de vloeispanning van het staal is maatgevend, maar de vermoeingssterkte van de knooppunten zal nu maatgevend zijn.

De constructie zal, wanneer het rad als een statische constructie wordt beschouwd, niet voldoen aan de statische sterkte eis (permanent en wind, UGT).

De toelaatbare spanning zal vanwege de rotatie verder afnemen. De optredende spanningswisselingen zullen de levensduur van de constructie sterk beïnvloeden aanzien er vermoeïng op zal treden.

De toelaatbare spanningswisseling in de knooppunten zal aanzienlijk lager liggen dan de vloeispanning van het staal (geen 355 N/mm^2 [$f_{y;d}$], maar $\pm 100 \text{ N/mm}^2$ [$\Delta\sigma_{\max}$]). De spanningswisselingen in de profielen zijn echter enkele malen groter dan toelaatbaar vanuit het oogpunt van vermoeïng (bijv. elementen buitenring: $\Delta\sigma \approx 280 \text{ N/mm}^2$, verticaal 1: $\Delta\sigma \approx 230 \text{ N/mm}^2$, uit permanente belasting [$\gamma_G = 1,35$]). Het verschil tussen de spanningswisselingen in de knooppunten en de toelaatbare spanningswisselingen maakt het noodzakelijk het ontwerp van de constructie aan te passen.

De spanningswisselingen in het 'Great Dubai Wheel' worden onder andere veroorzaakt door de rotatie van het rad en de veranderlijke windbelasting. De spanningswisseling ten gevolge van de rotatie van het rad zal gedurende de gehele levensduur van het rad aanwezig zijn. Het rad zal per dag viermaal roteren, bij een levensduur van 50 jaar zal het rad in totaal 73.050 maal roteren (= aantal spanningscycli). De windbelasting zal incidenteel aanwezig zijn, de windbelasting zal niet constant zijn, maar kent een stochastisch verloop in de tijd. Ook het spanningsverloop in de profielen zal variëren in de tijd. De maximale windbelasting zal vrijwel nooit op de constructie aanwezig zijn, de optredende belasting is meestal lager dan de ontwerpwaarde. Voor de spanningsvariatie is enkel rekening gehouden met de spanningsvariatie ten gevolge van verticale belasting.



Figuur 165 - Mogelijk verloop windbelasting over de tijd

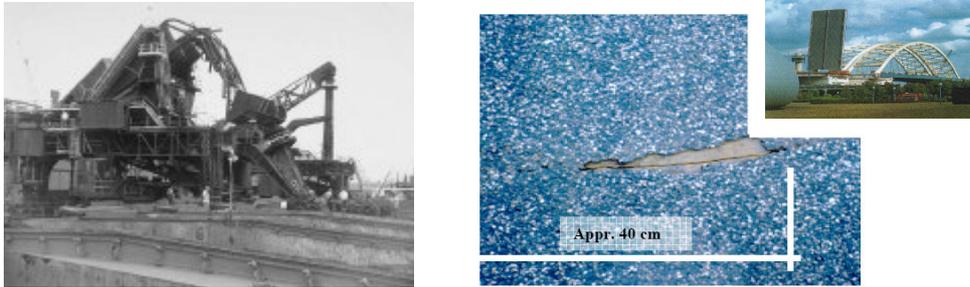
6.6.1 Algemeen

Vermoeïng is een verschijnsel waarbij een materiaal bezwijkt onder wisselende, zeer lang aanhoudende belasting. Onder wisselende belasting treedt reeds bij spanningen ver onder de vloeispanning, scheurvorming op. De scheurvorming zal optreden op plaatsen waar zich spanningsconcentraties bevinden. Punten waar zich spanningsconcentraties bevinden zijn



verbindingen en gaten. Deze punten zullen in het ontwerp van een vermoeiingsgevoelige constructie extra aandacht vragen.

Het vermoeiingsgedrag van de constructie wordt voornamelijk bepaald door de belasting en de vorm van de verbindingen.



Figuur 166 - Vermoeiingsschade aan constructie, kraan bezweken ten gevolge van scheurgroei (links) en scheurgroei in een basculebrug (rechts)

6.6.2 Mogelijke berekeningsmethode toelaatbare spanningswisseling

Een mogelijke methode ter bepaling van de toelaatbare spanningswisseling in de elementen is de $\Delta\sigma$ -N methode ('hot spot stress' methode). Met behulp van deze methode wordt de toelaatbare spanningswisseling in de elementen bepaald. Deze methode is toepasbaar voor de controle van de verbindingen van het Great Dubai Wheel op vermoeiingssterkte.

In deze paragraaf wordt een voorbeeldberekening gegeven van deze methode. Deze berekening geldt voor de wandstaven van de constructie, maar is niet volledig. Gebruik wordt gemaakt van de volgende formule:

$$\sigma_{\max. \text{nom. brace}} = \frac{\Delta\sigma_{\text{geom}}}{\gamma_{Mf} \cdot C \cdot (1-R) \cdot SCF}$$

Geometrische spanningswisseling ($\Delta\sigma_{\text{geom}}$)

De geometrische spanning is de geëxtrapoleerde hoofdspanning in de las. Voor 10^3 tot 5×10^6 spanningswisselingen kan de geometrische spanningswisseling ($\Delta\sigma_{\text{geom}}$) bepaald worden met behulp van de volgende formule:

$$\log(\Delta\sigma_{\text{geom}}) = \frac{1}{3} \left\{ [12,476 - \log(N)] + \frac{6}{100} \log(N) \cdot \log(16/t) \right\} \cdot \left(\frac{16}{t} \right)^{0,40}$$

N	146.100 [-]
t	40 mm
$\Delta\sigma_{\text{geom}}$	172 N/mm ²

Tabel 35 - Parameters ter bepaling geometrische spanningswisseling

N Is het aantal spanningswisselingen

Het Great Dubai Wheel zal per dag 4 maal roteren, per rotatie treden twee spanningswisselingen op ten gevolge van de rotatie van het eigen gewicht tot gevolg heeft. Bij een levensduur van 50 jaar zullen in het rad 73.050 (=50 x 365,25 x 4) spanningscyclussen ten gevolge van de rotatie optreden. Per spanningscyclus treedt tweemaal een piekspanning op, $N_f = 73.050 \times 2 \approx 146.100$

t Is de wanddikte van het profiel, in mm. t = 40 mm.

Toelaatbare spanningswisseling

Ter bepaling van de toelaatbare spanningswisseling zal de geometrische spanning moeten worden omgerekend naar een nominale spanning, dit gebeurt met behulp van de volgende formule:

$$\sigma_{\max, \text{nom. brace}} = \frac{\Delta\sigma_{\text{geom}}}{\gamma_{Mf} \cdot C \cdot (1-R) \cdot SCF}$$

$\Delta\sigma_{\text{geom}}$	172 N/mm ²
γ_{Mf}	1,0 -
C	1,0 -
R	0 -
SCF	1,0 -

Tabel 36 - Parameters ter bepaling toelaatbare spanningswisseling

γ_{Mf} Is de veiligheidsfactor, aangenomen is dat het Great Dubai Wheel een bezwijkveilige constructie is, met de mogelijkheid voor een periodieke controle. De veiligheidsfactor zal in dit geval **1,0** bedragen.

C Is een factor die het tweedeorde moment in de verbinding in rekening brengt. Dit tweede orde moment wordt veroorzaakt door de excentriciteiten in de knooppunten en toevallige inklemmingen. Aangenomen is dat de knooppunten geen excentriciteit hebben, verder zijn de knooppunten als stijf gemodelleerd (inklemmingsmomenten reeds bepaald), hierdoor is **C = 1,0**.

R Geeft de verhouding tussen de maximale en minimale spanningen weer, deze verhouding zal per element bepaald moeten worden, volgens:

$$R = \frac{\sigma_{\min.}}{\sigma_{\max.}}$$

De factor (1-R) in de bovenstaande formule speelt in het geval van een gelaste verbinding geen rol.

SCF Is de spanning concentratie factor. De spanning concentratie factor (SCF) geeft de verhouding weer tussen geometrische piekspanningen in de verbinding en de nominale spanning in een element. De SCF is van vele factoren afhankelijk, zoals:

- Het type verbinding, onderscheid kan worden gemaakt tussen bijv. gelaste, geboute, of gegoten verbindingen. Gegoten verbindingen zullen een dusdanige vorm hebben dat de spanningsconcentraties in de verbindingen minimaal zijn.
- De geometrie van de verbinding (bijv. T-vormig, of K-vormig).
- De verhouding tussen de diameter van de randstaaf (d_0) en de diameter van de wandstaaf (d_1). Gebruik bij voorkeur hoge, of lage β -waarden, zie figuur 168

$$\beta = \frac{d_1}{d_0}$$

- De verhouding tussen de diameter en de wanddikte. Gebruik bij voorkeur een zo laag mogelijke waarde.

$$2\gamma = \frac{D_{\text{wandstaaf}}}{t_{\text{randstaaf}}}$$

- De verhouding tussen de wanddikte van de rand- en wandstaaf.

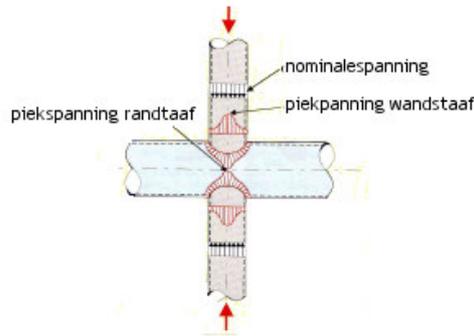
$$\tau = \frac{t_{\text{wandstaaf}}}{t_{\text{randstaaf}}}$$



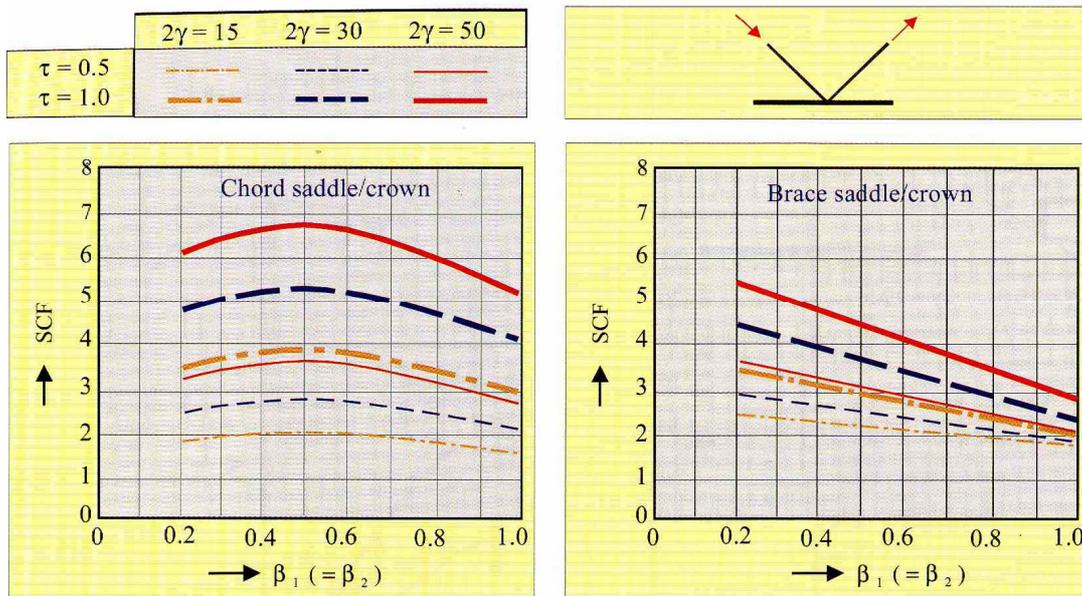
- De hoek tussen de aangesloten profielen.

Bepaling van de SCF-factor is zeer gecompliceerd. In deze berekening is aangenomen dat niet het knooppunt maatgevend is voor de vermoeing, maar de aansluiting van de elementen op het knooppunten. $SCF_{knooppunt} = 1,0$

De invloed van de verschillende factoren op de SCF, van een willekeurige verbinding, is in figuur 168 te zien.



Figuur 167 - Indicatie spanningsverdeling rond een willekeurige verbinding (illustratief)



Figuur 168 - Indicatie verloop SCF, voor een willekeurige gelaste K-verbinding, in relatie tot: De verhouding tussen de diameter van de randstaaf en de diameter van de wandstaaf (β) en de verhouding tussen de buisdiameter en de wanddikte (2γ)

Resultaat

De toelaatbare spanningswisseling in de wandstaven zal, wanneer er geen spanningsconcentraties in de knooppunten bevinden 172 N/mm^2 .

6.6.3 Conclusie

De toelaatbare spanningswisseling in de wandstaven zal, wanneer er zich geen spanningsconcentraties in de knooppunten bevinden 172 N/mm^2 . Deze waarde zal echter afnemen, door het optreden van spanningsconcentraties in de knooppunten. Om inzicht krijgen in de spanningsverdeling rond de knooppunten zal een nader onderzoek uitgevoerd moeten worden. Voor een eerste analyse is aangenomen dat de spanningswisseling in de profielen lager moet zijn dan 100 N/mm^2 .

Vanwege de lage toelaatbare spanningswisselingen en de relatief hoge optredende spanningswisselingen moet in het ontwerp van het Great Dubai Wheel zodanig aangepast worden dat deze spanningswisselingen zullen afnemen. Enkele aanpassingen aan het huidige ontwerp om de spanningen te verlagen worden in paragraaf 6.7 behandeld.

Nader onderzoek

Voor een volledige analyse van de vermoeiingssterkte van de knooppunten van het rad zal een nader onderzoek noodzakelijk zijn. In dit onderzoek zullen de knooppunten zodanig moeten worden ontworpen dat deze niet gevoelig zijn voor vermoeiing.

6.7 Aanpassingen met betrekking tot de vermoeiingssterkte

De in de constructie optredende spanningswisselingen zijn groter dan de vanuit het oogpunt van vermoeiing toelaatbare spanningswisselingen. Om de constructie ook aan de sterkte-eisen (vermoeiing) te laten voldoen zal het ontwerp aangepast moeten worden. Deze aanpassingen kunnen zowel betrekking hebben op het ontwerp van het rad, als op het ontwerp van de oplegging.

In deze paragraaf worden achtereenvolgens aanpassingen aan de profieldoorsnede en knooppunten, aan het statisch schema en aan de opleggingen behandeld.

6.7.1 Profieldoorsnede en knooppunten

Een voor de hand liggende keuze om de spanningen in de profielen te verlagen is het vergroten van de profieldoorsnede. Hierdoor neemt zowel het oppervlak, als het traagheidsmoment van de profielen toe. Toename van de profieldoorsnede zal echter leiden tot een verhoging van het eigen gewicht van de hoofddraagconstructie van het rad. Hierdoor neemt de normaalspanning nauwelijks af, maar als gevolg van de toename van het weerstandsmoment zal de buigspanning wel afnemen. Om de gewichtstoename te verlagen zullen de profielen enkel bij de knooppunten te verzwaren.

De krachtsverdeling in het rad zal veranderen bij wijziging van de profieldoorsneden. Zo zal wanneer enkel de randstaven (binnen- en buitenring) worden verzwared, de wandstaven (verticalen en diagonalen) relatief minder belast worden.

Gelet op het verloop van de momenten zal wijziging van de locatie van de verbinding tevens de spanningswisseling ter plaatse van de aansluiting van de buisprofielen op de knooppunten verlagen. De knooppunten zullen in dit geval echter zodanig ontworpen moeten worden dat ook hier geen vermoeiing optreedt.

In deze paragraaf worden de mogelijke wijzigingen aan de profieldoorsnede en de knooppunten getoond.

Verandering profieldoorsnede

Vergroting van de profieldoorsnede zal het oppervlak en het traagheidsmoment van de profielen doen toenemen. Deze toename zal leiden tot een afname van de spanningen in de profielen. De spanningswisselingen in de profielen van ring C, ten gevolge van het eigen gewicht, wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door het eigen gewicht van de hoofddraagconstructie (64 %) en van de hoofdcapsules (36 %, hotel & restaurant). Door de

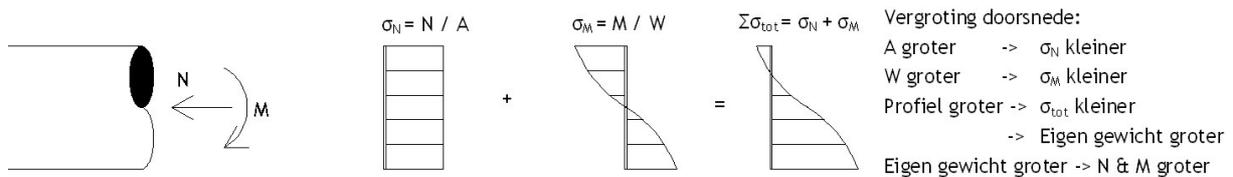


profielen te vergroten (en het eigen gewicht) zal het aandeel van de belasting komende uit de hoofddraagconstructie toenemen.

Toename van de profieldoorsnede is een goede manier om de spanningen in de profielen te verlagen.

Het eigen gewicht van de constructie zal echter toenemen, wat zal leiden tot een toename van de krachten in de constructie.

De spanningswisseling in de profielen wordt door zowel de normaalkracht, als het moment veroorzaakt. Door de diameter van het profiel te vergroten zal de buigspanning afnemen, ook de optredende normaalspanning zal deels afnemen.



Figuur 169 - Spanningsverloop in huidige buisprofielen

Om de huidige spanningswisseling in de elementen van de buitenring te verlagen tot $\Delta\sigma \leq 100 \text{ N/mm}^2$ ($N = -29.000 \text{ kN}$, $M_{y,max} = 21.000 \text{ kNm}$ en $N = -16.800 \text{ kN}$, $M_{y,min} = -4.600 \text{ kNm}$, $\Delta M_y = 25.600 \text{ kNm}$), zal het huidige buisprofiel; CHS 2220, $t=40 \text{ mm}$, toenemen tot een buisprofiel met een minimale doorsnede van; $D=3.000 \text{ mm}$, $t=50\text{mm}$.

Bij de bepaling van deze toename van de profieldoorsnede is de toename van het eigen gewicht niet meegenomen. Door de toename van het eigen gewicht zal de benodigde vergroting van de profieldoorsnede verder toenemen. Het eigen gewicht van de buitenring neemt toe met 70 %, van 2.150 kg/m (CHS220) naar 3.640 kg/m (CHS3000). Het eigen gewicht van de hoofddraagconstructie zal, als gevolg van de toegenomen profieldoorsnede, toenemen met 3.100 ton (13 %), van 23.100 ton naar 26.200 ton. Het percentage eigengewicht van de hoofddraagconstructie ten opzichte van het totale eigengewicht neemt toe tot ongeveer 73 %. Het totale eigen gewicht en dus ook de spanningswisselingen ten gevolge van het eigen gewicht neemt toe met ongeveer 10% (van 32.700 ton, naar 35.800 ton).

In het bovenstaande voorbeeld is enkel gekeken naar de elementen in de buitenring in werkelijkheid zullen ook de overige elementen van het rad moeten worden verzwakt om te voldoen aan de eisen gesteld aan de spanningswisselingen. Het uiteindelijke eigen gewicht van de constructie zal dan ook met meer dan de bovengenoemde 10 % toenemen. Verder is in deze berekening enkel gekeken naar de permanente belasting, inclusief een belastingfactor van 1,35.

Het maximale moment en normaalkracht treden niet in dezelfde locatie in de vakwerking op. In een nader onderzoek dient de gecombineerde spanningswisseling, waarin normaal- en buigspanningen gesommeerd worden en hierdoor per een exact beeld wordt verkregen.

Door de profieldoorsnede van de buitenring te vergroten, van een profiel met een diameter van 2220 mm en een wanddikte van 40 mm, naar een profiel met een diameter van 3000 mm en een wanddikte van 50 mm, zal de buigspanningwisseling afnemen van 174 N/mm^2 naar 84 N/mm^2 , de normaalspanningwisseling neemt af van 146 N/mm^2 naar 95 N/mm^2 .

Vergroting van de profieldoorsnede is noodzakelijk om de spanningen en de spanningswisselingen in de profielen te verlagen. Deze verlaging is noodzakelijk voor zowel de sterkte als de vermoeiing.

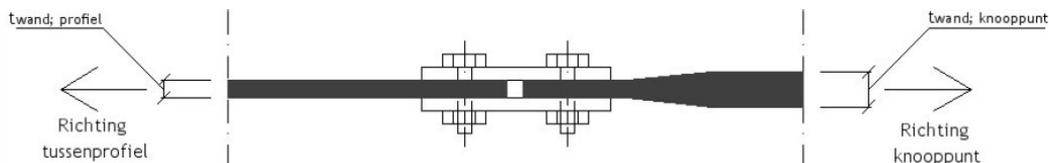
Nader onderzoek

Om de optimale profieldoorsnede per element van de vakwerking te bepalen zal nader onderzoek noodzakelijk zijn. In dit onderzoek zal per elementgroep, zoals buitenring, binnenring, etc. gekeken worden welke profieldoorsnede aan de gestelde spanningswisselingseis voldoet.

Verandering profieldoorsnede over de staaf lengte

Vergroting van de profieldoorsnede zal leiden tot een toename van het eigen gewicht. Als gevolg van deze gewichtstoename zullen de normaalkracht en het moment toenemen, waardoor de spanningsafname lager uit zal vallen. De gewichtstoename zal de krachten in de elementen verder doen toenemen. Door de profieldoorsnede enkel bij de knooppunten te vergroten zal de toename van het eigen gewicht van de constructie beperkt blijven. Het materiaal wordt nu enkel toegevoegd op de plaatsen waar het vanuit constructief oogpunt (krachtsverloop) noodzakelijk is.

De profielen zullen met elkaar verbonden moeten worden. Om deze verbinding mogelijk te maken zal enkel de wanddikte van de profielen variëren en zal de diameter gelijk blijven. De verbinding tussen de verschillende profielelementen kan als een lasverbinding plaatsvinden, of als een geboute verbinding, zie figuur 170. De lasverbinding zal hierbij de voorkeur verdienen, aangezien voor een geboute verbinding extra gaten in de profielen noodzakelijk zijn, rond deze gaten zullen spanningsconcentraties optreden. De uitvoerbaarheid, van een profiel met variërende wanddiktes, zal nader onderzocht moeten worden.



Figuur 170 - Plaatselijke verdikking profiel met behulp van een LP- plate



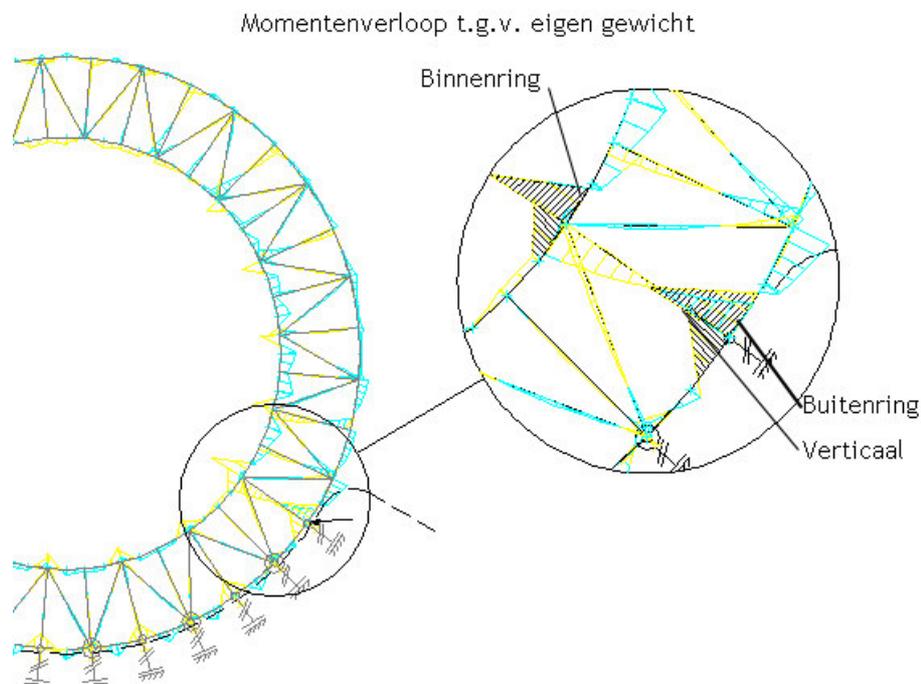
Het toepassen van profielen met verschillende wanddikten zal de gewichtstoename van het rad beperken. Bovendien wordt het materiaal efficiënter benut.

Het aantal verbindingen zal echter toenemen, waarmee ook het aantal plaatsen waar vermoeiingsschade kan optreden toeneemt. De extra verbindingen zullen echter buiten het invloedsgebied van het knooppunt vallen, waardoor de toelaatbare spanningswisseling hoger is.

Een gedeeltelijke toename van de dwarsdoorsnede zal gezien de beperkte gewichtstoename een grotere spanningsafname in de profielen nabij de knooppunten veroorzaken. Het gebruik van profielen met verschillende wanddikten is een aantrekkelijk alternatief, tegenover het toepassen van uniforme profielendoorsneden.

Wijziging krachtsverloop

Het ontwerp van het Great Dubai Wheel is statisch onbepaald en opgebouwd als een raamwerk, met stijve knooppunten. Door de stijfheden van de elementen te variëren kan het krachtsverloop in de elementen gewijzigd worden. Door bijvoorbeeld de elementen in de binnen- en buitenring (randstaven) stijver te maken (grotere doorsnede met groter traagheidsmoment) dan de diagonalen en de verticalen (wandstaven) zullen de momenten in de diagonalen en de verticalen relatief afnemen en de momenten in de binnen- en buitenring toenemen.



Verhoging Stijfheid binnen- en buitenring -> Verhoging Momentpiek, binnen- en buitenring
 -> Verlagings Momentpiek, Verticaal en diagonaal

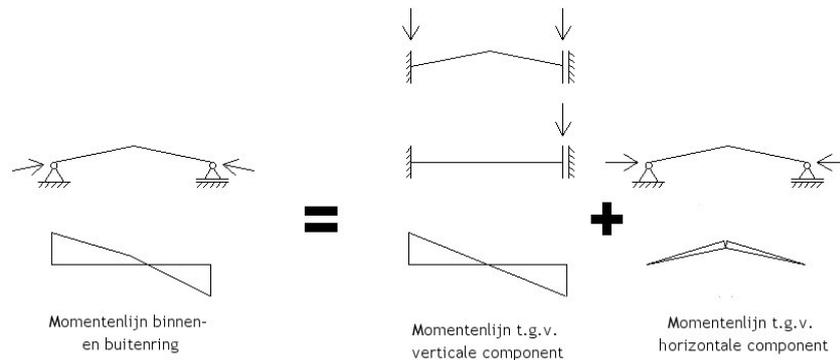
Figuur 171 - Momentenverloop in de constructie ten gevolge van het eigen gewicht

Verandering vorm profiel van geknikt naar een rechte staaf

Door de ronde vorm van de binnen- en buitenring is de vorm van momentenlijn een combinatie van een afschuiflijger gecombineerd met de momentenlijn ten gevolge van boogwerking. Wanneer rechte staven gebruikt zouden worden ontstaat enkel een momentenlijn met de vorm van een afschuiflijger.

Uit nader onderzoek is gebleken dat het piekmoment boven de hoogste opleggingen met ongeveer 30% afnemen. Hierdoor zal tevens de component van de buigspanning van de spanningswisseling in de binnen- en buitenring met 30% afnemen.

Uit nader onderzoek is gebleken dat het piekmoment bij gebruik van rechte staven met ongeveer 30% afneemt

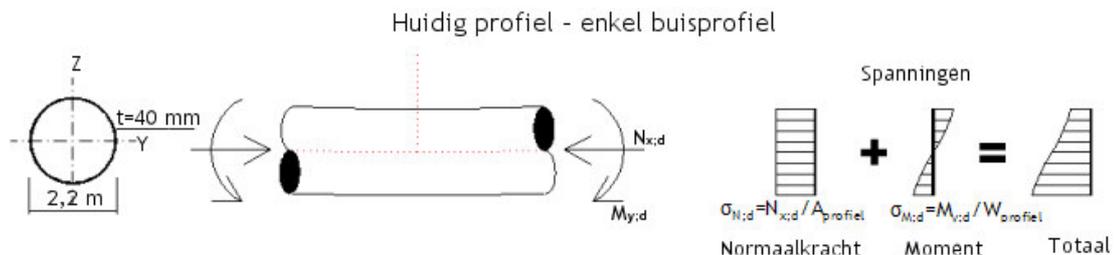


Figuur 172 - Verklaring moment in binnen- en buitenring

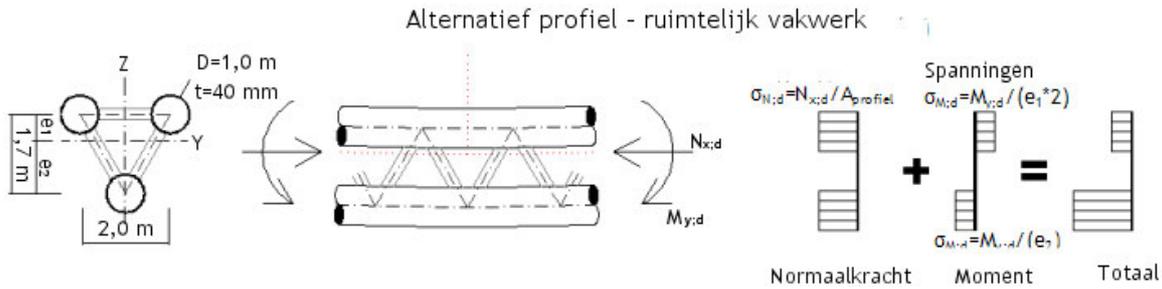
Verandering vorm profieldoorsnede

Om de spanningswisselingen ten gevolgen van de buigspanningen in de profielen te verminderen kan gekozen worden om het profiel als een als een ruimtelijk vakwerk uit te voeren. In dit ruimtelijk vakwerk zal geprobeerd worden de momenten als normaalkrachten in de randprofielen in te leiden en zodoende enkel normaalspanningen in de profielen te laten optreden. Om dit 'optimale' krachtsverloop in de samengestelde ligger (enkel druk, of enkel trek) mogelijk te maken, zal een oneindig stijve afschuifverbinding tussen de liggers gerealiseerd moeten worden, wat vrijwel onmogelijk is, waardoor in de profielen een buigend moment zal ontstaan.

Een ander nadeel van de samengestelde profielen is dat het aantal verbindingen toeneemt. Deze verbindingen zullen gevoelig zijn voor vermoeiing. Verder zal het maken van deze verbindingen arbeidsintensief zijn.



Figuur 173 - Spanningsverloop huidig buisprofiel



Figuur 174 - Spanningsverloop samengesteld profiel, bij een oneindig stijve verbinding tussen profielen

Het aanpassen van de vorm van de profieldoorsnede is vanuit constructief oogpunt niet noodzakelijk.

Bovendien zal de verbetering in het spanningsverloop middels het wegnemen van buigspanningen moeilijk realiseerbaar zijn.

Verandering locatie verbinding tussen het buisprofiel en het knooppunt

Bij de bepaling van de krachten is uitgegaan van het in hoofdstuk 5 gepresenteerde ESA model. In dit model komen de elementen samen in het hart van de knooppunten. De bepaalde momenten en normaalkrachten zijn dan ook de momenten en normaalkrachten in het hart van het knooppunt.

knooppunt

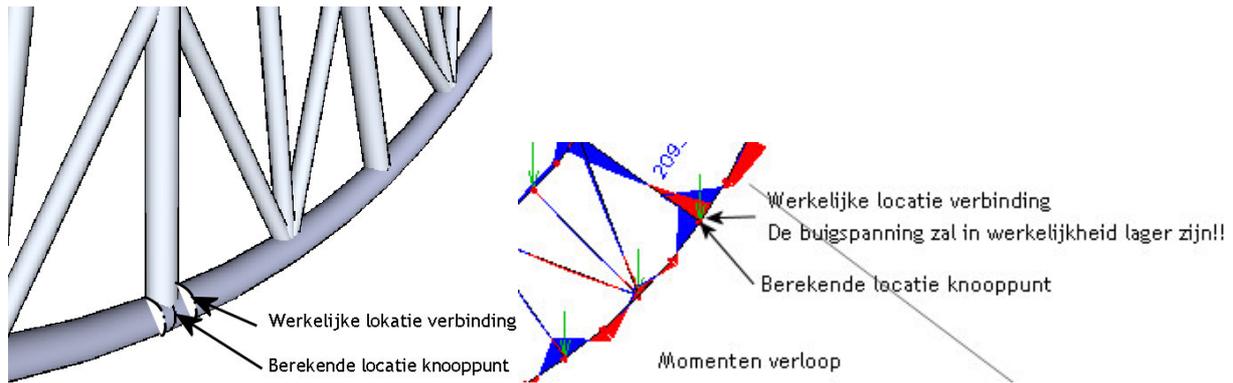
Het knooppunt zal dan ook zodanig ontworpen moeten worden dat het mogelijk is de momenten en normaalkrachten op te nemen. In het ontwerp van het knooppunt kan bijvoorbeeld gebruik gemaakt worden van buisprofielen met een grotere wanddikte dan de aansluitende elementen. Verder is het mogelijk het knooppunt te verstijven met behulp van staalplaten.

Verbinding tussen het buisprofiel en het knooppunt

De plaats waar de meeste kans op vermoeiingsschade is, is wanneer het knooppunt goed ontworpen is ter plaatse van de verbinding tussen het buisprofiel en de knooppunten. De krachten en in het bijzonder het moment ter plaats van de werkelijke verbinding, welke bijvoorbeeld 1,5 meter uit het hart van het knooppunt ligt, zullen aanzienlijk lager zijn dan in het hart van het knooppunt.

In figuur 175 is de theoretische (berekende) en de werkelijke locatie van het knooppunt getoond.

Wanneer gebruik wordt gemaakt van speciaal voor vermoeiing ontworpen knooppunten, dan zal de verbinding tussen het knooppunt en het buisprofiel maatgevend zijn voor vermoeiing. Deze verbinding zal niet in het hart van het knooppunt plaatsvinden, maar op enige afstand, hierdoor zal het moment, en hiermee de buigspanningswisseling, aanzienlijk afnemen ten opzichte van het piekmoment in de constructie.



Figuur 175 - Berekende locatie spanningen (ESA model) en werkelijke locatie verbinding

Conclusie

Om de spanningswisseling op te kunnen nemen zal het veranderen van de oorspronkelijke profieldoorsneden noodzakelijk zijn. Deze veranderingen zullen niet alleen de sterkte eigenschappen beïnvloeden, maar tevens de eigenschappen van stijfheid en stabiliteit.

Als gevolg van de verandering van de profieldoorsneden zal het eigen gewicht van de constructie toenemen. Om deze toename te beperken zal gekozen kunnen worden om de wanddikte van de buisprofielen over de staaflengte te variëren.

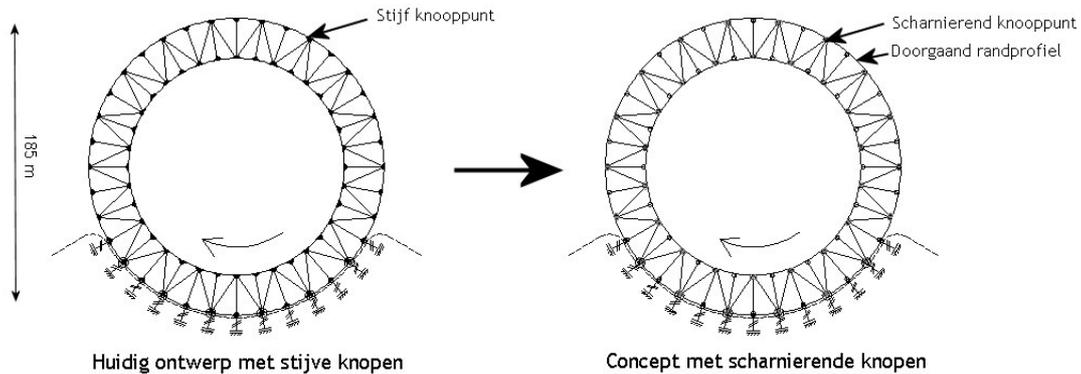
Het huidige buisprofiel van de binnen- en buitenring heeft een geknikte vorm. Door deze staaf recht te maken zal het piekmoment hierdoor ook de buigspanning met 30% reduceren.

Verder kan ter beperking van de toename van de profieldoorsnede de afstand van de werkelijke verbinding van de staaf aan het knooppunt tot de hartlijn van het knooppunt in rekening worden gebracht. De knooppunten zullen speciaal voor vermoeiing moeten worden ontworpen, dit geldt ook voor de verbinding. Het in de verbinding optredende moment zal aanzienlijk afnemen ten opzichte van het piekmoment.



6.7.2 Statisch schema, van stijve- naar scharnierende knooppunten

Bij het bepalen van het krachtsverloop in de constructie is in het huidige ontwerp uitgegaan van een raamwerkconstructie. In de knooppunten worden naast normaalkrachten, ook dwarskrachten en momenten overgedragen. Door de verticalen en diagonalen scharnierend aan de doorgaande randstaven te bevestigen zullen in deze elementen geen noemenswaardige momenten meer optreden, wat de spanningswisselingen in deze elementen aanzienlijk verlaagt.

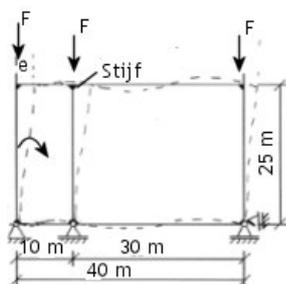


Figuur 176 - Aanpassing statische schema van het rad

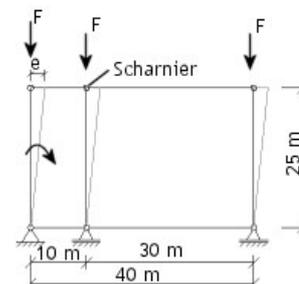
Het veranderen van het statisch schema door vervanging van de stijve knooppunten zal het ontwerp ingrijpend veranderen. In deze paragraaf worden de consequenties van deze verandering behandeld. Allereerst zal gekeken worden naar de stabiliteit van de dwarsdoorsnede, vervolgens naar het effect van deze aanpassing op het krachtsverloop, ten slotte wordt het realiseren van een scharnier behandeld.

Instabiliteit -> schoorconstructie

De huidige constructie van het rad heeft een dwarsdoorsnede in de vorm van een ongeschoord raamwerk. De constructie dankt zijn stabiliteit aan de stijve knooppunten, wanneer deze knooppunten vervangen worden door scharnierende knooppunten ontstaat een instabiele constructie. Om de dwarsdoorsnede te stabiliseren zal het raamwerk geschoord moeten worden.



Figuur 177 - Huidige dwarsdoorsnede ongeschoord raamwerk

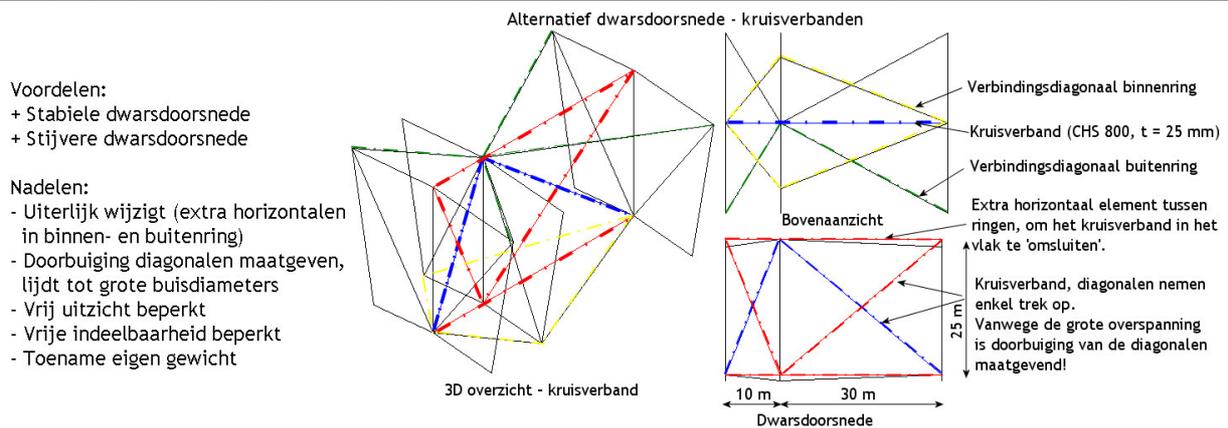


Figuur 178 - Instabiele dwarsdoorsnede met scharnierende knooppunten

Voor het creëren van een geschoord raamwerk zijn meerdere mogelijkheden. Zo zal door toevoeging van een kruisverband een stabiele dwarsdoorsnede ontstaan. Het concept van het creëren van een geschoorde dwarsdoorsnede middels een kruisverband is in figuur 179 getoond.

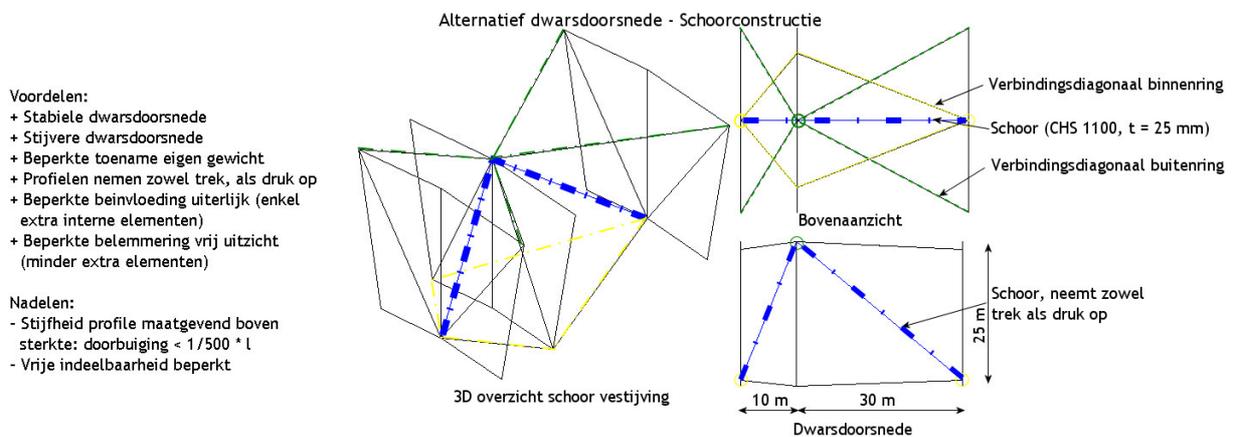
Gekozen is om de dwarsdoorsnede intern te schoren en geen gebruik te maken van een extra extern steunpunt, bijv. een steunpunt aan bovenzijde dwarsdoorsnede. Een extern steunpunt zal het uiterlijk van het rad en entreegebouw ernstig aantasten.

Great Dubai Wheel



Figuur 179 - Concept toevoeging intern kruisverband

Het toevoegen van een intern kruisverband zal het uiterlijk van het rad en vrije zicht uit de capsules in grote mate aantasten. Het aantal extra elementen is te beperken door gebruik te maken van één enkele schoor die zowel trek, als druk opneemt. Dit concept is in figuur 180 getoond.



Figuur 180 - Concept toevoeging schoor

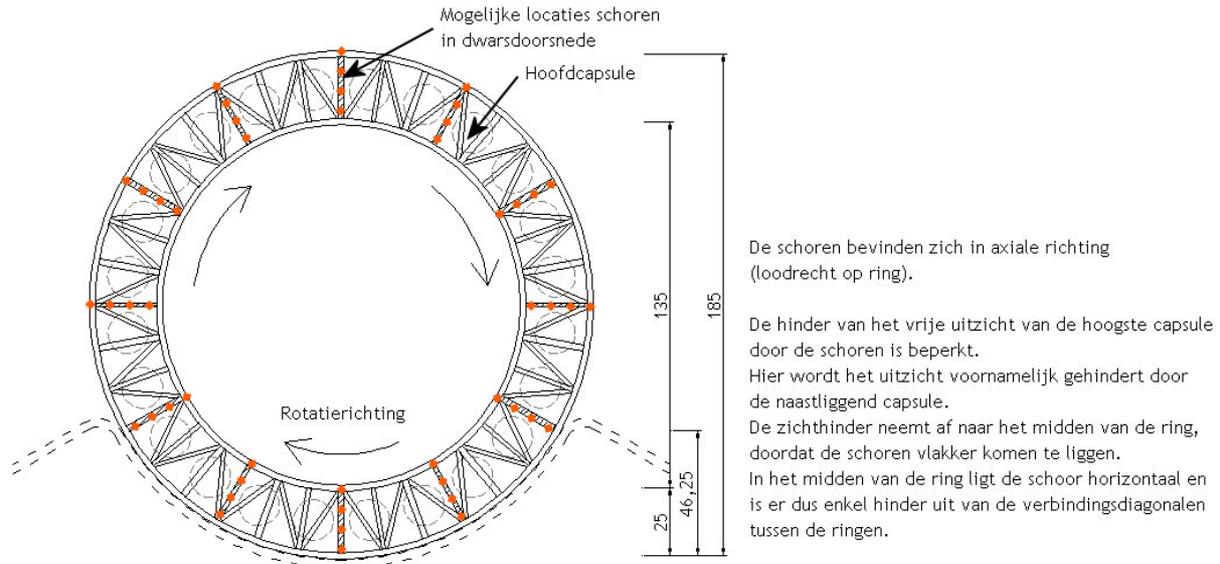
Het concept met de enkele schoor zal vanwege de beperkte aantasting van het uiterlijk van het rad en vrije zicht uit de capsules de voorkeur verdienen boven het concept met het kruisverband.

Locatie schoor

De plaatsing van de schoren in de dwarsdoorsnede zal niet in elke doorsnede mogelijk zijn, vanwege de aanwezigheid van de hoofdcapsules. Het is ook niet noodzakelijk om de schoren in elke doorsnede te plaatsen. De verbindingsdiagonalen tussen de ringen (in de zijvlakken) zullen de verschillende dwarsdoorsneden via schijfwerking verbinden.

In het ontwerp is de vakwerkring opgedeeld in 36 delen (10° tussen de verticalen). Het aantal hoofdcapsules in het rad bedraagt 24 (om de 15°). De hoek tussen de schoren zal dan ook minimaal 30° bedragen. Afhankelijk van het aantal benodigde schoren kan de hoek tussen de schoren met waarden van 30° verhoogd worden (bijv. 60° , 90° , enz.)

De mogelijke locaties van de schoorconstructie zijn in figuur 181 getoond.



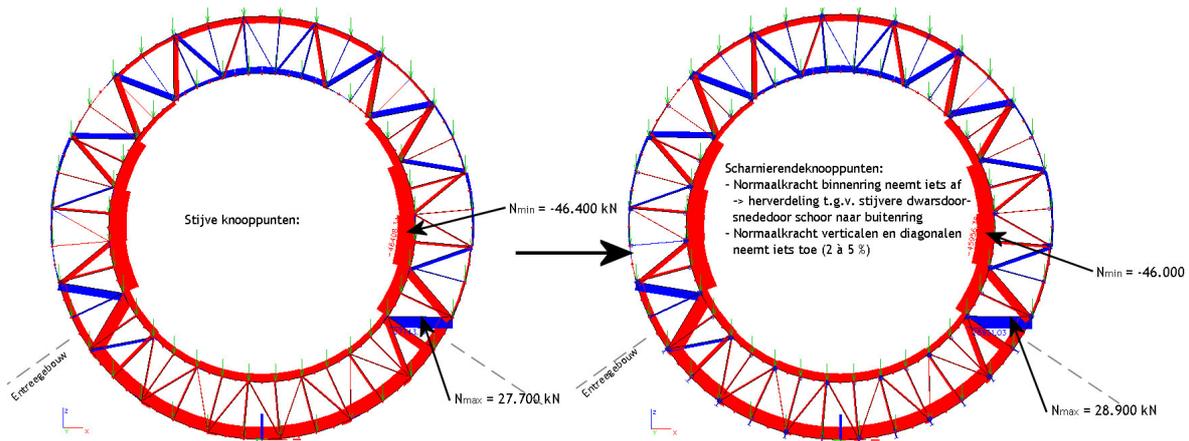
Figuur 181 - Mogelijke locaties schoorconstructies

Effect Scharnierende verbinding in combinatie met een schoorconstructie op het krachtsverloop

Het belangrijkste gevolg van het toevoegen van scharnierende knooppunten is uiteraard het verdwijnen van de momenten in de wandstaven (verticalen en diagonalen). Door het verdwijnen van deze momenten zal de spanningswisseling in deze elementen aanzienlijk dalen (ong. 50 %, ten gevolge van het verdwijnen van momenten, $\sigma_M = M/W$). Deze daling zorgt ervoor dat bijvoorbeeld de elementen van de verticalen voldoen aan de eis gesteld aan de spanningswisseling ($\Delta\sigma \leq 100 \text{ N/mm}^2$).

Het realiseren van scharnierende knooppunten heeft een zeer kleine stijging van de normaalkrachten in de elementen tot gevolg. Deze stijging bedraagt slechts enkele procenten en is vrijwel verwaarloosbaar.

Normaalkrachten in ring C, ten gevolge van het eigen gewicht hoofdconstructie en capsules (veiligheidsfactor = 1,35, NEN 6702)

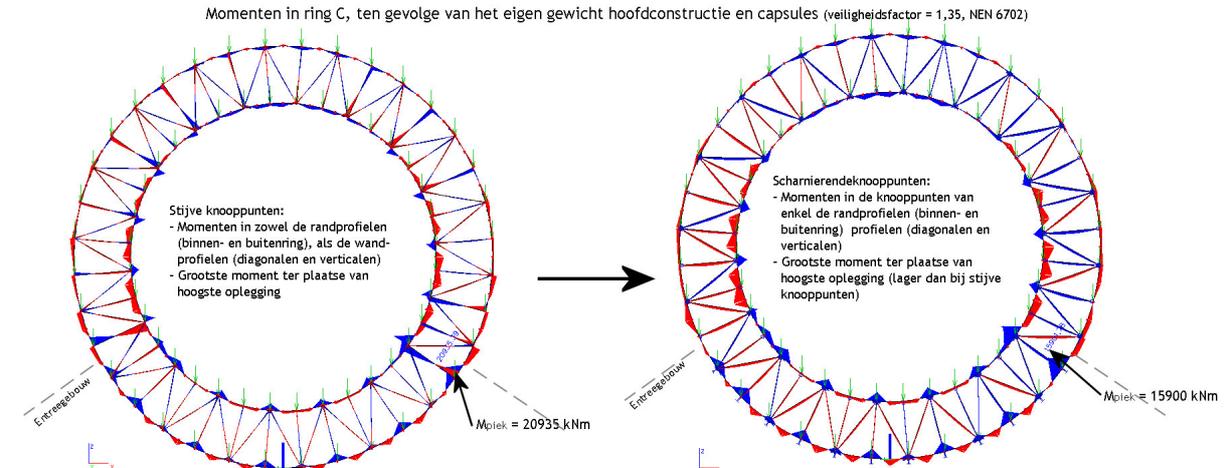


Figuur 182 - Verloop normaalkrachten in ring C, ten gevolge van het eigen gewicht ($\gamma_c=1,35$)

De momenten in de wandstaven zullen nu enkel veroorzaakt worden door het eigen gewicht van de elementen en bedraagt maximaal: $M_{max} = 1/8 q l^2$.

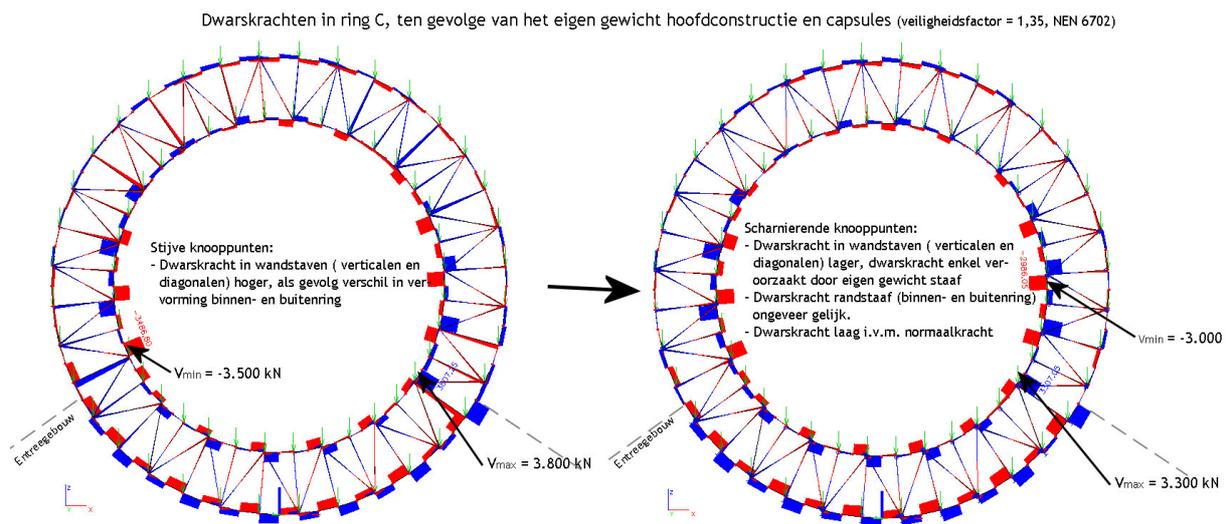
De momenten in de elementen van de buitenring zullen afnemen, deze afname is het gevolg van de hogere stijfheid van de dwarsdoorsnede. Het moment zal nu voor een groter deel door de binnenring worden opgenomen, hierdoor zal het moment in de binnenring toenemen.

De spanningen in de elementen van de buiten/ en binnenring waren onder windbelasting al hoger dan de vloeispanning. Deze elementen zullen ook verzaamd moeten worden wanneer scharnieren worden toegevoegd.



Figuur 183 - Verloop momenten in ring C, ten gevolge van het eigen gewicht ($\gamma_G=1,35$)

De dwarskracht in de wandstaven zal afnemen. Het verschil in vervorming tussen de binnen- en buitenring zal enkel tot een extra normaalkracht in de wandstaven leiden.



Figuur 184 - Verloop dwarskrachten in ring C, ten gevolge van het eigen gewicht ($\gamma_G=1,35$)

Een overzicht van de krachten in de elementen in zowel het huidige ontwerp (stijve knooppunten), als het aangepaste ontwerp (scharnierende knooppunten) is te vinden in bijlage A, tekening nummer 2.3 - 2.5.

Toevoeging van scharnieren in de knooppunten zal leiden tot een afname van de momenten en dientengevolge een afname van de spanningswisselingen in de knooppunten.



Fysische mogelijkheden voor het realiseren van een scharnier

De verlaging van de spanningswisseling in de verticalen en diagonalen door het wegnemen van de momenten in de verbinding kan enkel gerealiseerd worden wanneer de knooppunten zich als een echt scharnier gedragen. Het realiseren van een knooppunt dat zich als een zuiver scharnier gedraagt, zal zeer kostbaar zijn (denk aan materiaal, slijtage, enz.). In de praktijk wordt veelal een verbinding gerealiseerd met een lage rotatiestijfheid, in de verbinding zal in dit geval een toevallig inklemmingsmoment ontstaan.



Figuur 185 - Voorbeelden 'volledig' scharnierende verbindingen

In het verleden werden voor grote constructies de scharnieren als echte scharnieren uitgevoerd. Tegenwoordig is deze manier van het realiseren van scharnierende verbindingen verdwenen. Volledig scharnierende verbindingen worden tegenwoordig enkel nog gebruikt in verbindingen tussen kleine 'lichte' profielen, zie figuur 185.

Verbindingen tussen grote buisprofielen worden veelal gelast en zullen zich niet als volledig scharnierende verbindingen gedragen, zie figuur 186. De grootte van de momenten in de knooppunten worden bepaald door de rotatiestijfheid van de verbinding, welke afhankelijk is van de dimensies van de aangesloten buisprofielen.



Figuur 186 - Voorbeelden gebruikelijke verbindingen buisprofielen, met een zekere rotatiestijfheid

De elementen in het Great Dubai Wheel hebben dusdanig grote afmetingen dat de rotatiestijfheid van een verbinding waarschijnlijk dichterbij een oneindig stijve verbinding liggen dan een scharnierende verbinding. Om de rotatiestijfheid van de verbinding te verlagen zal het ontwerp van de profielen/ knooppunten aangepast moeten worden.

Het realiseren van een volledig scharnierende verbinding zal in de praktijk een vrijwel onmogelijke opgave zijn. De verbindingen zullen altijd een zekere rotatiestijfheid hebben.

Aanpassingen knooppunten

Om de knooppunten toch enigszins als een scharnier te laten reageren, zal de rotatiestijfheid van het knooppunt omlaag moeten. Wanneer er geen fysiek scharnier wordt toegevoegd, zullen de buigstijfheden van de aansluitende staven maatgevend worden voor de rotatiestijfheid van het knooppunt.

Door aansluitende staven te versmallen bij de oplegging zal de buigstijfheid van het profiel ter plaatse van het knooppunt afnemen. Indien de randligger (binnen- en buitenring) over de gehele lengte één onveranderde buigstijfheid bezit en de wandliggers (verticalen en diagonalen) nabij het knooppunt in buigstijfheid afnemen, zullen de profielen van de wandliggers minder moment naar zich toetrekken, de aansluiting gedraagt zich nu min of meer als een scharnier.

Om 'scharnierende' knooppunten te realiseren is het mogelijk om de buigstijfheid van de aansluitende staven ter plaatse van het knooppunt te verlagen.

De aansluiting van de verslaptte staven dient voldoende rotatiecapaciteit te bezitten om plastische vervorming, wat leidt tot een lagere vermoeiingslevensduur, te voorkomen.

Een belangrijke eis die aan de verslapping van de profielen gesteld dient te worden is dat deze verbindingen voldoende rotatiecapaciteit moeten bezitten. Tijdens de vervorming van de knooppunten zal voorkomen moeten worden dat er een plastische vervorming optreedt, wat lastig realiseerbaar is. Een plastische vervorming zal leiden tot een lagere levensduur van de op vermoeiing belaste knooppunten. Het aanpassen van de knooppunten middels een versmalling is dan ook geen goed alternatief voor het creëren van een knooppunt.



Figuur 187 - Mogelijkheid 'scharnierende' verbinding



Conclusie

Het realiseren van een scharnierende verbinding tussen de rand- (binnen- en buitenring) en de wandstaven (verticalen en diagonalen) kan een efficiënte manier om de spanningswisselingen in de wandstaven te verlagen.

Het maken van een zuiver scharnier is echter een zeer kostbare zaak. In het ontwerp van het scharnier zal niet enkel rekening moeten worden gehouden met de krachten, maar tevens met zaken als slijtage en vervormingcapaciteit. Het scharnier zal immers niet de levensduur van de constructie mogen verkorten.

De meest gebruikelijke methode voor het verbinden van buisprofielen is deze rechtstreeks aan elkaar te bevestigen, met behulp van lassen. De knooppunten zullen nu een zekere rotatiestijfheid bezitten en hierdoor momenten veroorzaken. Deze methode vergt iets meer materiaal, maar voorkomt het gebruik van scharnierende knooppunten.

Voor het Great Dubai Wheel is het verstandig om de knooppunten niet als zuivere scharnieren uit te voeren. Het realiseren van scharnieren zal weliswaar de spanningen in de wandstaven doen afnemen, de realisatie van deze scharnieren is echter onmogelijk. Het is verstandiger om de extra momenten ten gevolge van een stijve verbinding op te nemen middels een toename van de

6.7.3 Aanpassing opleggingen

Een belangrijke parameter voor het ontwerp van het Great Dubai Wheel is de veerstijfheid van de oplegging. Deze veerstijfheid heeft niet alleen invloed op de sterkte van de constructie (krachtsverloop), maar zal tevens de stijfheid en stabiliteit beïnvloeden.

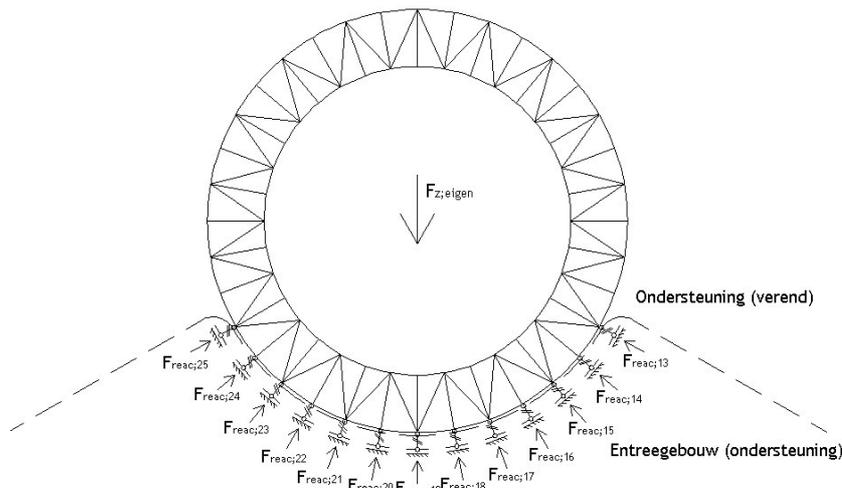
In deze paragraaf wordt allereerst de invloed van de veerstijfheid op het krachtverloop in de constructie bekeken. Achtereenvolgens is gekeken naar de invloed van de stijfheid op de reactiekrachten, de normaalkrachten en de momenten. De veerstijfheid van de opleggingen wordt door diverse factoren beïnvloed, zoals de stijfheid van de bodem (fundering), de stijfheid van de ondersteuningsconstructie (entreegebouw) en de stijfheid van opleggingen.

Vervolgens wordt gekeken naar de invloed van de opleglocatie op het normaalkrachtenverloop in de elementen van een vakwerking.

Invloed veerstijfheid op de reactiekrachten in de opleggingen

In deze paragraaf zal gekeken worden hoe het verloop van de reactiekrachten over de oplegglengte beïnvloedt wordt door de stijfheid van de oplegging. De onderzochte reactiekrachten zijn in figuur 188 getoond. Er is enkel gekeken naar de reactiekrachten wanneer het rad zich in positie 1 bevindt.

Als basis is gebruik gemaakt van het in hoofdstuk 5 gepresenteerde ESA-model. In dit model is als veerstijfheid van de opleggingen een waarde van $1 \cdot 10^3$ MN/m aangenomen, deze veerstijfheid zal variëren.



Figuur 188 - Overzicht onderzocht reactiekrachten

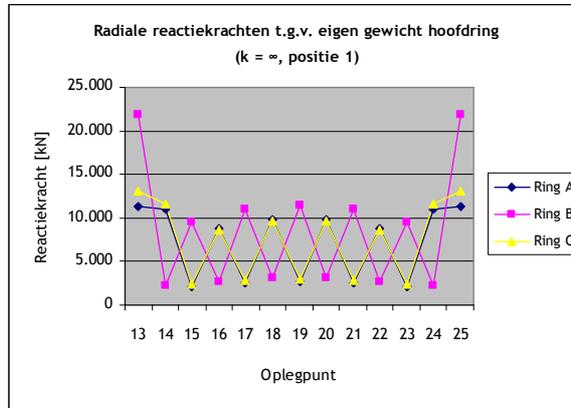
Volledig stijve opleggingen ($k_z = \infty$)

Wanneer de ring volledig stijf is opgelegd zal de reactiekracht per oplegpunt sterk variëren. Deze variatie is het gevolg van de variatie van de stijfheid, per knooppunt, in de buitenring, zoals in figuur 134 getoond is. De grootste reactiekracht treedt op in de hoogste opleggingen, deze kracht is groter dan voor een verend opgelegde ring. De piek in de reactiekracht boven de hoogste oplegging zal tevens resulteren in een piek in het krachtsverloop in de ring, hierdoor zal het vermoeiingsgedrag van de constructie negatief beïnvloedt worden.

Verlaging van de piek is noodzakelijk om de vermoeiingslevensduur te verbeteren. Om de piek te verlagen zal de veerstijfheid van de opleggingen moeten variëren.



De in deze paragraaf getoonde reactiekrachten voor een oneindig stijve oplegging zullen in werkelijkheid niet kunnen optreden er zal in de constructie immers altijd een veerstijfheid aanwezig zijn. Aanpassingen aan de veerstijfheid van de opleggingen zullen het krachtsverloop in het rad beïnvloeden.



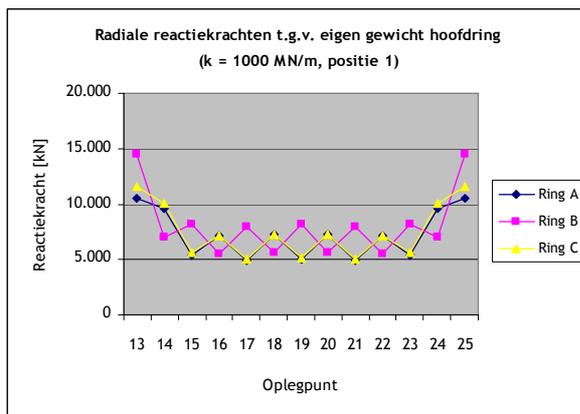
Figuur 189 - Verloop reactiekrachten $k = \infty$

Verende opleggingen

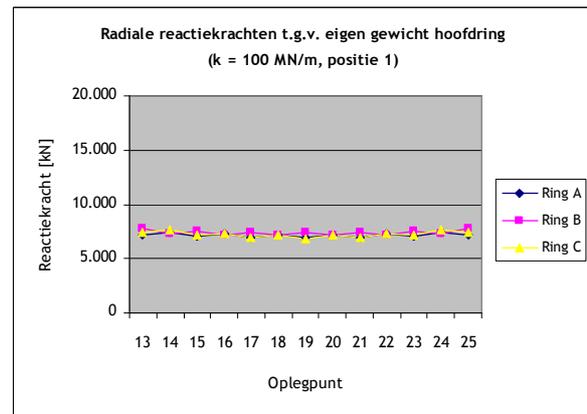
Wanneer de oplegging van de ring als verend wordt gemodelleerd, zal afhankelijk van de veerstijfheid, de variatie per oplegpunt minder sterk variëren. Tevens zal de optredende variatie geleidelijker optreden en zal de piek in de reactiekrachten in de hoogste oplegpunten afnemen. Een verlaging van de veerstijfheid van de opleggingen gaat gepaard met een verlaging van de stijfheid, het is dan ook niet mogelijk om de opleggingen oneindig slap te maken.

In het ESA-model is uitgegaan van een veerstijfheid van $k = 1.10^3$ MN/m. In

figuur 190 is het verloop van de reactiekracht bij deze stijfheid getoond. De reactiekracht in de hoogste oplegging zal minder groot zijn dan wanneer de veerstijfheid van de opleggingen volledig stijf is. De bovenste oplegging zal vervormen, hierdoor zal de 'knik' in de vervorming van het rad ter plaatse van de hoogste oplegging over meerdere opleggingen gespreid worden. Met het afnemen van de piek in de reactiekracht zullen tevens de piekspanningen in de elementen afnemen, wat de vermoeingssterkte van de constructie ten goede komen.



Figuur 190 - Verloop reactiekrachten $k = 1.10^3$ MN/m

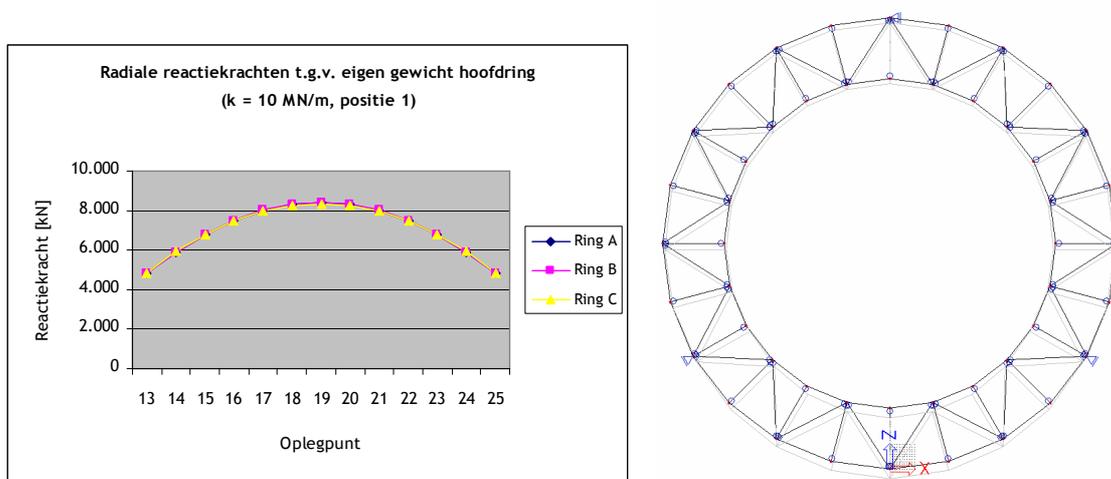


Figuur 191 - Verloop reactiekrachten $k = 1.10^2$ MN/m

Wanneer de veerstijfheid wordt verlaagde tot 1.10^2 MN/m, zal de reactiekracht in al de oplegpunten ongeveer dezelfde waarde hebben, dit is in

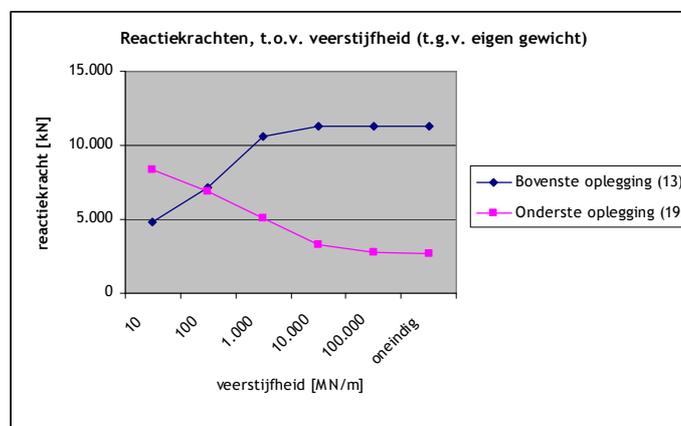
figuur 191 getoond. Een veerstijfheid van $1 \cdot 10^2$ MN/m komt ongeveer overeen met de stijfheid van een éénpaals fundering.

De vervorming aan de voet is onder een belasting van het eigen gewicht onder elke ring ongeveer gelijk, $\delta_{\text{voet}} = 8 \cdot 10^3$ [kN] / $100 \cdot 10^3$ [MN/m] = 80 mm. Wanneer de reactiekrachten echter variëren over de breedte, zoals onder windbelasting, zal de rotatie aan de voet aanzienlijk zijn, deze rotatie zal doorwerken in de topverplaatsing van het rad. Wanneer aangenomen wordt dat deze topverplaatsing maximaal 370 mm ($1:500 h_{\text{tot}}$) mag bedragen en voor de helft wordt veroorzaakt door de fundering, dan mag het verschil in zakking van de fundering slechts: $370 \text{ mm} \cdot 40 \text{ m} / 185 \text{ m} \approx 40 \text{ mm}$ bedragen, wat overeenkomt met een verschil van 4.000 kN over de breedte van het rad. In paragraaf 6.1.2 zijn de radiale reactiekrachten onder de ringen getoond, het verschil in reactiekracht ten gevolg van windbelasting is enkele malen groter dan 4.000 kN. In werkelijkheid zal de constructie aan de voet stijver moeten reageren om de totale vervormingen van de constructie te beperken.



Figuur 192 - Verloop reactiekrachten $k = 1 \cdot 10^1$ MN/m

Hoe lager de veerstijfheid, des te geleidelijker de variatie in reactiekrachten zal plaatsvinden. De variatie van de reactiekrachten bij een 'theoretische' veerstijfheid van $1 \cdot 10^1$ MN/m is getoond in figuur 192. Bij deze waarde zullen de middelste opleggingen meer vervormen dan de buitenste opleggingen. De reactiekrachten en de vervorming zijn voor elke ring gelijk. De constructie van het rad gedraagt zich nu stijf in relatie tot de oplegging, waardoor de vervorming in de fundering lineair zal verlopen, als oneindig stijve wand op verende steunpunten. De vervorming van de fundering zal bij deze zeer lage stijfheid echter aanzienlijk zijn, $\delta_{\text{voet}} = 8 \cdot 10^3$ [kN] / $10 \cdot 10^3$ [MN/m] = 800 mm



Figuur 193 - Verloop reactiekrachten afhankelijk van de veerstijfheid



Conclusie

Wanneer de oplegging van de ring als verend wordt gemodelleerd zal, afhankelijk van de veerstijfheid, de variatie in reactiekracht per oplegpunt lager zijn. Dit maakt het mogelijk om gebruik te maken van een roloplegging met rollen van gelijke sterkte.

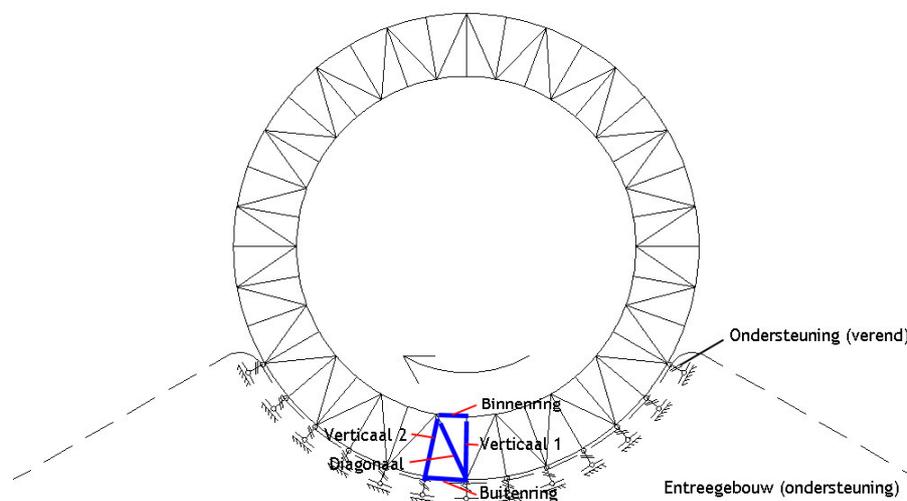
Ook zal de variatie in reactiekrachten geleidelijker optreden en zal de piek in de reactiekrachten in de hoogste oplegpunten afnemen, tengevolge van het spreiden van deze waarde over meerdere steunpunten.

Een lagere veerstijfheid zal echter tevens een grotere vervorming aan de voet en aan de top van het rad tot gevolg hebben.

Invloed veerstijfheid op de normaalkracht in de elementen

Om een indruk te krijgen van de invloed van de veerstijfheid op de normaalkracht in de elementen, is enkel gekeken naar krachtwisselingen in één ring, ten gevolge van enkel het eigen gewicht. De gehanteerde veerstijfheid van de oplegging bedraagt $1 \cdot 10^2$ MN/m. Deze veerstijfheid komt ongeveer overeen met de stijfheid van één paal, deze stijfheid is niet realistisch, de werkelijke stijfheid van de fundering zal waarschijnlijk hoger liggen. Om inzicht te krijgen in de invloed van de veerstijfheid op de krachtwisseling is deze 'theoretische' waarde echter wel toepasbaar.

Een overzicht van de elementen op tijdstip 0:00 uur is te zien in figuur 194.



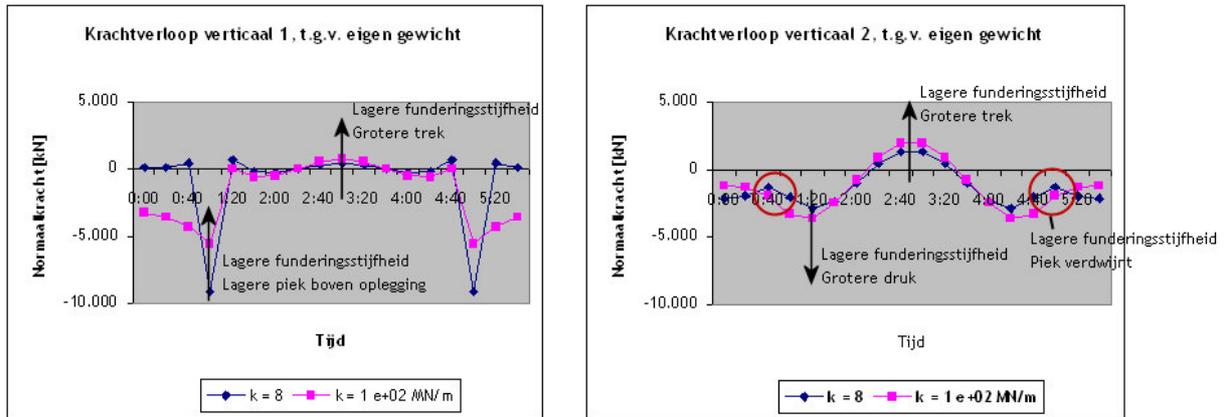
Figuur 194 - Locatie onderzochte elementen op $t=0$

In figuur 195 t/m figuur 197 is het normaalkracht verloop voor de verschillende elementen getoond.

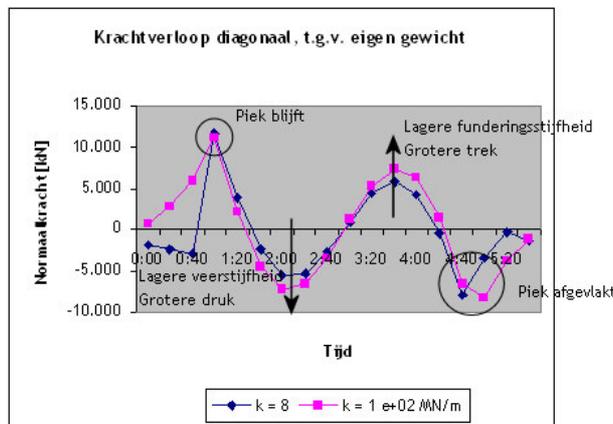
De pieken in het verloop zullen bij een lagere veerstijfheid afzwakken, of verdwijnen. De krachtwisseling zal toenemen, deze wisseling zal, vanwege de verdeling van de 'knik' over meerdere opleggingen, geleidelijker optreden. Door de vermindering van het aantal pieken zal het vermoeingsgedrag van de constructie verbeteren wanneer de veerstijfheid van de constructie verlaagd wordt.

De veerstijfheid zal echter niet onbeperkt kunnen worden verlaagd. Er zal immers ook rekening moeten worden gehouden met de vervorming van de constructie. Een minimale veerstijfheid van ongeveer $1 \cdot 10^3$ MN/m zal vanuit het oogpunt van stijfheid noodzakelijk

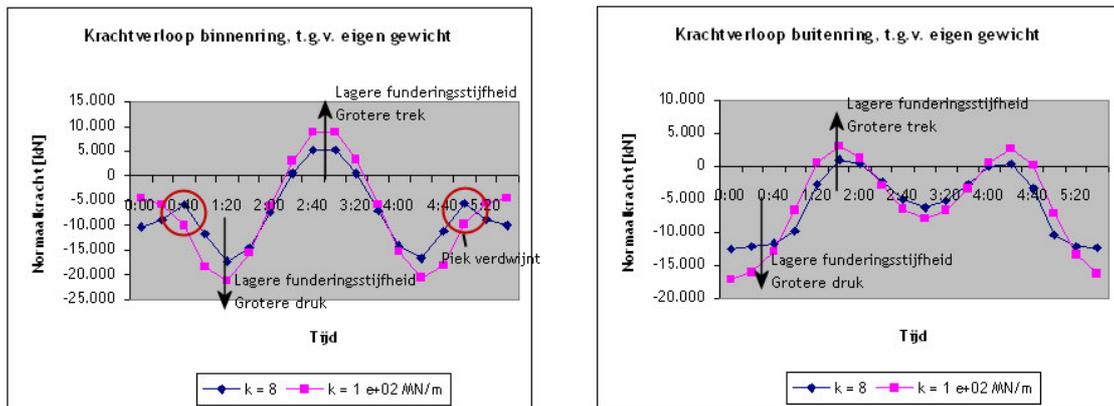
zijn. De bijkomende vervorming aan de top ten gevolge van windbelasting zal 347 mm bedragen, deze waarde is lager dan de geeiste $1/500 h_{\text{totaal}} (\approx 370 \text{ mm})$



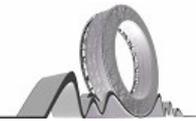
Figuur 195 - Krachtsverloop in de verticalen ten gevolge van eigen gewicht



Figuur 196 - Krachtsverloop in de diagonalen ten gevolge van eigen gewicht



Figuur 197 - Krachtsverloop in de buiten- en binnenring ten gevolge van eigen gewicht



Conclusie

Wanneer de veerstijfheid van de oplegging afneemt zal de vervorming van het rad toenemen. Dit veroorzaakt een toename van de normaalkrachtswisseling in de elementen.

Een afname van de veerstijfheid zal echter de ‘knik’ van het rad boven de hoogste opleggingen over een groter aantal opleggingen spreiden. Hierdoor zal de verandering van het normaalkrachtsverloop geleidelijker verlopen en neemt het piekmoment af.

De afname van het piekmoment heeft echter meer invloed op de totale spanningswisseling dan de toename van de normaalkracht.

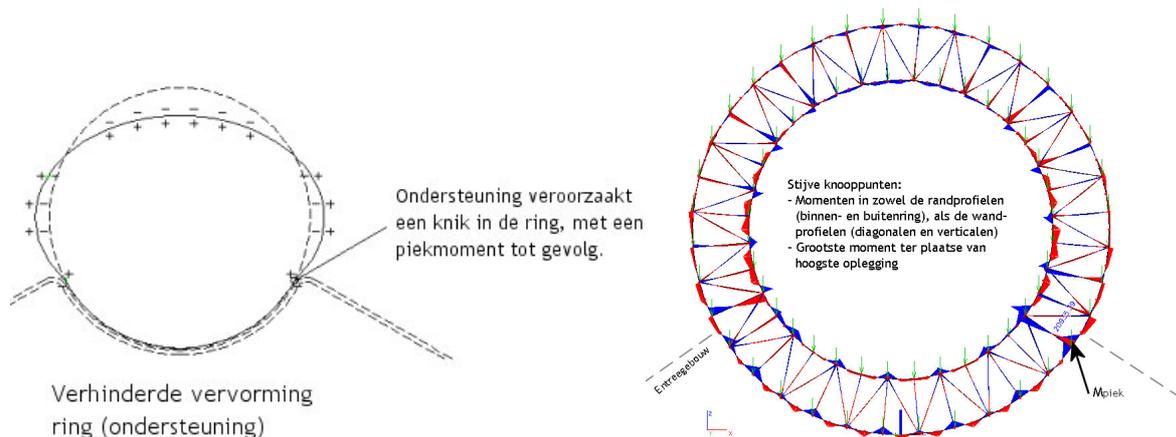
Invloed verloop veerstijfheid op het piekmoment boven de hoogste oplegging

De spanningswisselingen in de profielen worden voor een groot deel bepaald door de spanningen ten gevolge van de piekmomenten boven de hoogste oplegging. Dit piekmoment is het gevolg van de ‘knik’ in de vervorming van de constructie boven deze oplegging, zoals in figuur 198 getoond wordt.

De verhinderde vervorming van het rad door de hoogste opleggingen veroorzaakt een piek in het krachtsverloop van zowel de reactiekracht, de normaalkracht, als het moment van de constructie.

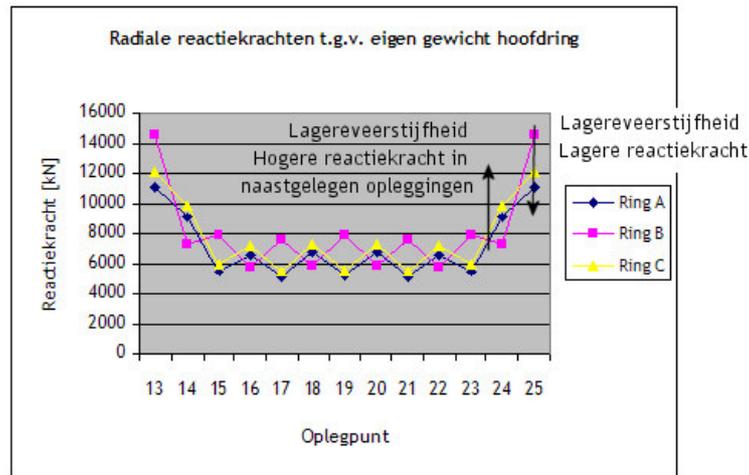
Deze pieken zijn ongunstig voor het vermoeiingsgedrag van de constructie.

Door de verhinderd van het ovaliseren door de opleggingen te verminderen zal het piekmoment afnemen. De afname van het piekmoment zal gepaard gaan met een kleine toename van de normaalkrachten in de profielen. Het constructieve gedrag wordt verbeterd door de stijfheid van met name de hoogste opleggingen aan te passen aan de vervorming van het rad en hierdoor de ‘knik’ te minimaliseren.

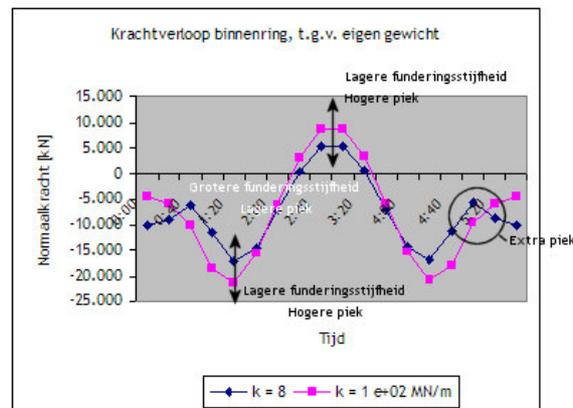


Figuur 198 - Ontstaan piekmoment (M_{piek}) ter plaatse van hoogste oplegging

Naast een piek in het momentenverloop is deze piek ook waarneembaar in het verloop van de reactiekrachten, deze pieken bevinden zich boven de hoogste opleggingen. Deze piek in de reactiekrachten houdt verband met de piek in het momentenverloop. De hoogste opleggingen zijn dus in feite de meest ongunstige opleggingen, doordat deze vervorming van de constructie tegenwerkt, wat een piekmoment en dus ook piekspanning in de elementen veroorzaakt.



Figuur 199 - Verloop radiale reactiekracht, ten gevolge van eigen gewicht en invloed verandering veerstijfheid over de opleglengte



Figuur 200 - Invloed veerstijfheid op krachtsverloop in de buitenring ten gevolge van eigen gewicht

Aanpassing veerstijfheid oplegging (entreegebouw)

Door verlaging van de veerstijfheid van bijvoorbeeld de hoogste oplegging (piek) zal de knik in de constructie over meerdere steunpunten worden verdeeld. De piek in de reactiekracht in deze steunpunten en de momenten in de profielen nemen af. De normaalkracht in de elementen zal iets toenemen. Bij verlaging van de veerstijfheid zal tevens de vervorming enigszins toenemen.

De veerstijfheden van de opleggingen zullen op een dusdanige manier moeten worden verdeeld dat de pieken in het krachtsverloop boven de hoogste opleggingen verdwijnen.

Dit kan door verlaging van de veerstijfheid van de hoogste opleggingen of verhoging van de veerstijfheid van de overige opleggingen.

De verlaging van de veerstijfheid van de hoogste opleggingen heeft een gunstig effect op de spanningen in de profielen. In plaats van verlaging van de veerstijfheid in de hoogste opleggingen is het echter ook mogelijk om van de andere opleggingen de veerstijfheden te verhogen, zodoende zal de vervorming van het rad niet toenemen.

Door variatie van de veerstijfheden van de opleggingen is het mogelijk om de momentenpiek boven de hoogste opleggingen te minimaliseren en zodoende de spanningswisselingen te verlagen. Het vinden van de optimale veerstijfheid van de



opleggingen, waarbij rekening gehouden wordt met sterkte, stijfheid en stabiliteit zal nader onderzocht moeten worden. Dit onderzoek valt echter buiten het bereik van dit rapport.

Resultaat verandering veerstijfheid op normaalkrachten en momenten

Om een beeld te krijgen van de invloed van de wijziging van de funderingsstijfheid op de maximale reactiekrachten in de elementen is het in hoofdstuk 5 getoonde ESA-model gebruikt. De veerstijfheden van de opleggingen zijn gewijzigd en de constructie is enkel belast door het eigen gewicht.

Een relatieve verlaging van de veerstijfheid van de buitenste opleggingen zal de piek in het momentverloop en reactiekrachtverloop verlagen/ wegnemen.

In tabel 37 zijn de resultaten getoond van de wijziging van de maximale krachten in de elementen van de buitenring en verticaal 1.

Door de veerstijfheid aan te passen zal het moment in de buitenring afnemen, als gevolg van een betere spreiding van de ‘knik’ over de steunpunten. De toegenomen vervorming zorgt voor een toename van het maximum normaalkracht en een afname van het minimum normaalkracht. De spanningswisselingen ten gevolge van het piekmoment zullen afnemen, de spanningstoename tengevolge van de normaalkracht zal kleiner zijn.

In de Verticalen treedt een omgekeerde verandering op ten opzichte van de elementen in de buitenring. De normaalkracht neemt af en het moment neemt iets toe. De spanningsvermindering ten gevolge van de afname van de normaalkracht zal ongeveer in evenwicht moeten zijn met de spanningstoename uit het moment.

	Origineel, alle veerstijfheden 1.000 MN/m					
	N _{min} [kN]		N _{max} [kN]		M [kNm]	
BU	-15400		2300		9000	
V1	-8900		*		-4300	
	veerstijfheid buitenste opleggingen gehalveerd naar: 500 MN/m					
	ΔN _{min} [kN]		ΔN _{max} [kN]		ΔM [kNm]	
BU	-15900	-500	2800	500	7800	-1200
V1	-6500	2400	*		-4800	500
	veerstijfheid overige opleggingen verdubbelt naar: 2.000 MN/m					
BU	-15500	-100	2400	100	8500	-500
V1	-7600	1300	*		-4600	300

* Niet bekeken

Tabel 37 - Maximale krachten in elementen afhankelijk van veerstijfheden oplegging, ten gevolge van eigen gewicht

Conclusie

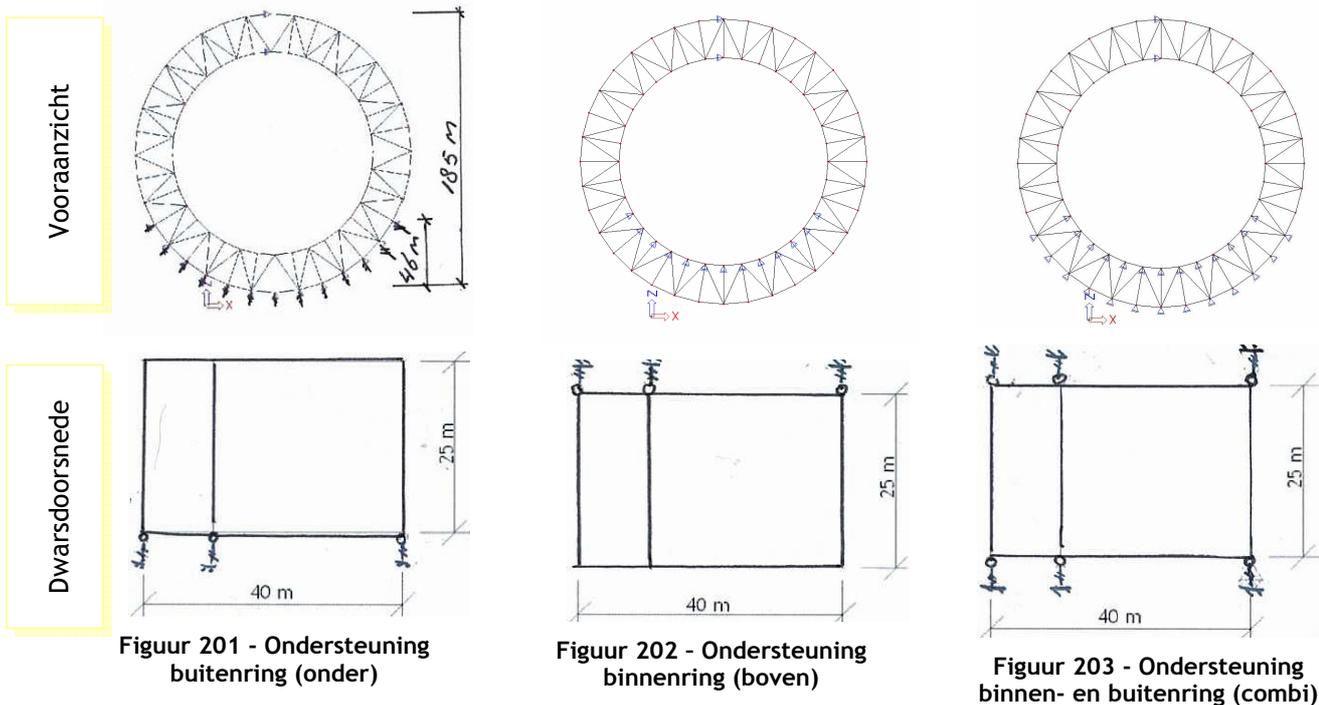
Een relatieve verlaging van de veerstijfheid van de buitenste opleggingen zal de piek in het momentverloop en reactiekrachtverloop verlagen. Deze verlaging zal de vermoeiingslevensduur van de constructie doen toenemen.

Invloed opleglocatie over dwarsdoorsnede

De radiale ondersteuning van het rad kan op verschillende posities over de dwarsdoorsnede plaatsvinden. In het eerste ontwerp is het rad ondersteund in de knooppunten van de buitenring.

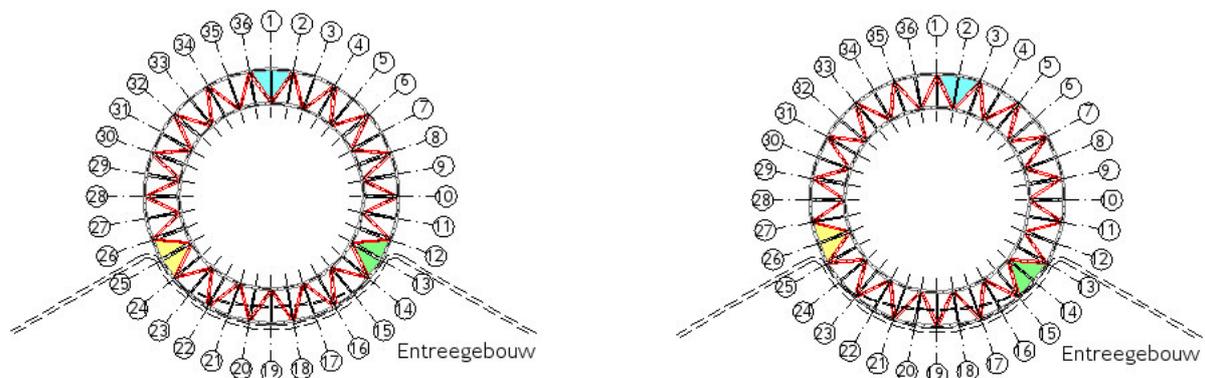
Mogelijke varianten op het basisonwerp zijn een ondersteuning in de knooppunten van de binnenring, of een ondersteuning in de knooppunten van zowel de buiten, als de binnenring. De mogelijke varianten zijn in figuur 201 t/m figuur 203 te zien.

In deze paragraaf zal het effect van een verplaatsing van de opleglocatie over de dwarsdoorsnede. Het effect op de reactiekrachten en de normaalkrachten zal bekeken worden.



Model

Om inzicht te krijgen in de invloed van diverse radiale oplegconfiguraties op de krachtswisseling in de elementen een ring van het rad, is het rad in ESA gemodelleerd als een verend ondersteund 2D-raamwerk. De veerstijfheid van de ondersteuning bedraagt 1.000 MN/m. De ring wordt belast door enkel het eigen gewicht van de elementen. Ter bepaling van de krachtswisseling zijn twee posities van de ring bekeken, de positie zijn in figuur 204 getoond.

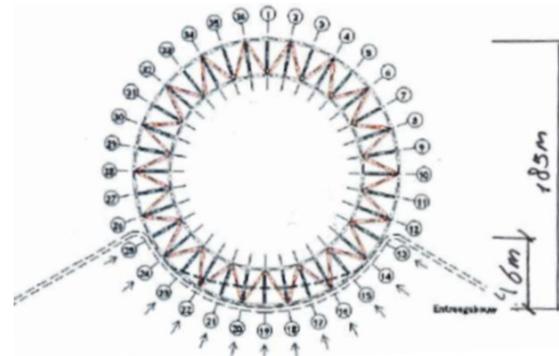
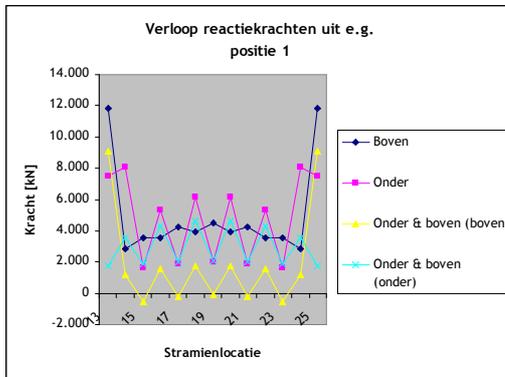


Figuur 204 - De onderzochte posities van het rad

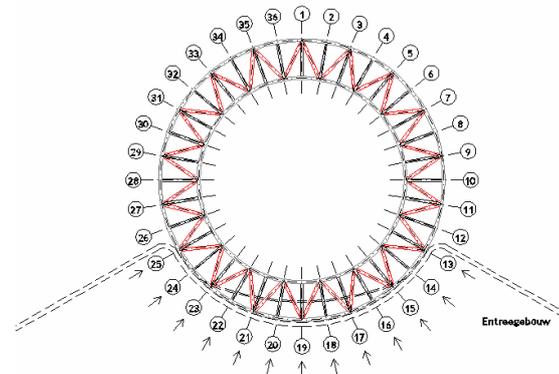
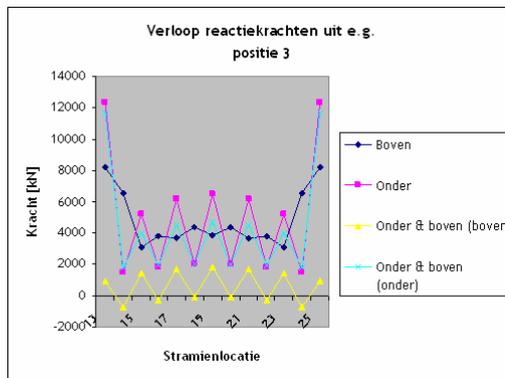


Reactiekrachten in de opleggingen

De oplegreacties komende uit het eigen gewicht van het wiel zijn in figuur 205 en figuur 206 te zien.



Figuur 205 - Oplegreacties ring uit eigen gewicht, positie 1



Figuur 206 - Oplegreacties ring uit eigen gewicht, positie 3

De grootte van de reactiekrachten is afhankelijk van de positie van het rad. Er treedt een piekkracht op in de buitenste oplegging. De grootte van deze kracht is afhankelijk van de positie van het rad. Wanneer het rad zich in positie 1 bevindt treedt de piekkracht op in de oplegging aan de bovenzijde van de dwarsdoorsnede. Voor positie 3 treedt een ongeveer gelijke piekkracht op in de opleggingen aan de onderzijde van de dwarsdoorsnede. De grootte van de piekkracht is voor alle opleggingconfiguraties ongeveer gelijk. Het optreden van de piek wordt niet voorkomen door de opleglocatie te wijzigen

De keuze voor een oplegging aan de boven-, en/of onderzijde van de dwarsdoorsnede zal geen invloed hebben op de grootte van de reactiekrachten in de oplegging. De maximale reactiekrachten blijven ongeveer gelijk.

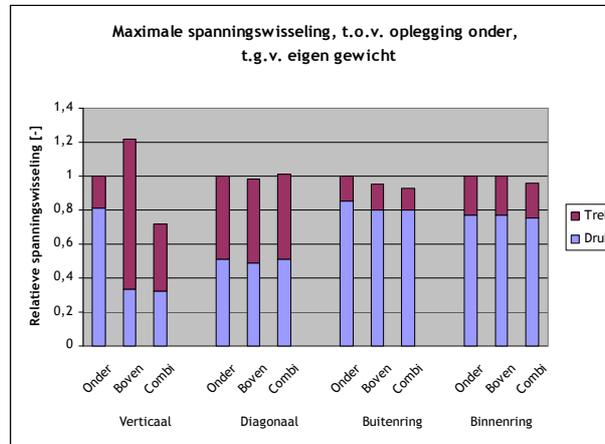
De huidige keuze voor een oplegging aan de onderzijde zal vanuit functioneel oogpunt de voorkeur verdienen.

Normaalkrachten in de elementen

In figuur 207 is te zien hoe de spanningswisseling, ten gevolge van normaalkracht, afhankelijk is van de positie van de ondersteuning van het rad. Tevens is het aandeel van de druk- en trekkracht te zien aan de totale spanningswisseling.

Gekozen is om de relatieve spanningswisseling te beschouwen. Dit maakt het mogelijk om snel inzicht te krijgen in de verhouding tussen de druk- en trekkrachten. Het basisontwerp met een ondersteuning ter plaatse van de buitenring is als referentie gebruikt.

$$\Delta\sigma_{\text{rel}} = \Delta\sigma_i / \Delta\sigma_{\text{onder}}$$



Figuur 207 - Relatieve spanningswisseling in de elementen, ten gevolge van eigen gewicht

De invloed van de keuze voor een oplegging aan de boven en/ of onderzijde van de dwarsdoorsnede blijft vooral beperkt tot de krachtswisseling in de verticalen.

Naast de grootte van de krachtswisseling zal voor de vermoeiing ook de verhouding tussen trek en druk van belang zijn (factor R).

De plaatsing van de ondersteuning aan zowel de boven als onderzijde zal de krachtswisseling in de verticalen doen afnemen. Het aandeel trekspanning neemt echter toe, waardoor de toelaatbare spanningswisseling afneemt, zie vermoeiing (R-waarde).

De invloed van de spanningswisseling op de overige elementen van de ring is slechts in kleine mate afhankelijk van de plaatsing van de radiale ondersteuning.

Vanuit het oogpunt van de spanningswisselingen, ten gevolge van normaalkracht, in de profielen zal het verplaatsen van de ondersteuning van de onder- naar de bovenzijde van de dwarsdoorsnede nauwelijks effect hebben.

Vanuit functioneel oogpunt is het verstandig om het rad enkel aan de onderzijde van de dwarsdoorsnede te ondersteunen. De plaatsing van de ondersteuning aan zowel de boven als onderzijde zal voor de ondersteuning tweemaal zoveel ondersteuning vragen. Ook zal er een oplossing moeten worden gevonden voor het aan de bovenzijde ondersteunen van het rad.

Conclusie

Het verplaatsen van de opleggingen van de boven naar de onderzijde levert, wanneer gekeken wordt naar de reactiekrachten en normaalkrachten, geen winst op.

Vanuit functioneel oogpunt verdient de plaatsing van de ondersteuning aan de voet van de dwarsdoorsnede de voorkeur.



Conclusie met betrekking tot de aanpassing van de opleggingen

De spanningswisselingen in de binnen en buitenring worden voor een groot deel bepaald door het piekmoment ter plaatse van de hoogste oplegging.

De piek wordt veroorzaakt door de 'knik' in de vervorming van het rad. Door deze 'knik' over meerdere steunpunten te verdelen worden het moment en diens gevolg de spanningswisseling in het rad aanzienlijk verlaagd. De verhoging van de normaalkracht zal beperkt blijven.

Het optimaliseren van de veerstijfheden van de opleggingen zal het krachtsverloop gunstig beïnvloeden, doordat de pieken worden weggenomen. Het vinden van de optimale veerstijfheid van de opleggingen, waarbij rekening gehouden wordt met sterkte, stijfheid, stabiliteit en uitvoering, zal nader onderzocht moeten worden. Dit onderzoek valt echter buiten het bereik van dit rapport.

De variatie van de veerstijfheid zal verkregen moeten worden uit het ontwerp van het entreegebouw. Een goed ontwerp van de verdeling van de veerstijfheden zal de constructieve eigenschappen van het rad gunstig beïnvloeden.

6.7.4 Aanpassing belastingen

Om de spanningen in de profielen te verminderen is het verlagen van de belasting op de constructie. Zo kan bijvoorbeeld de belasting worden verlaagd door het aantal capsules af te laten nemen. Ook de windbelasting kan afnemen door het verloop van deze belasting over de hoogte in de rekening te brengen.

Het verlagen van het aantal capsules is een zeer ingrijpende beslissing, in eerste instantie zal dit dan ook vermeden moeten worden.

Het aanpassen van de windbelasting door het verloop van de belasting over de hoogte in rekening te brengen zal echter geen invloed hebben op het ontwerp van het rad. De verdeling van de windbelasting over de constructie zal in beeld kunnen worden gebracht door een windtunnelonderzoek uit te voeren. De exacte windbelasting op het rad zal nader onderzocht moeten worden.

6.8 Conclusie

Het huidige ontwerp van het Great Dubai Wheel Voldoet niet aan de sterkte-eis.

De statische sterkte eis wordt overschreden wanneer de constructie door de permanente en windbelasting wordt belast. De spanningen in de binnen en buitenring zijn hoger dan de vloeispanningen.

De constructie zal echter niet enkel statisch zijn, maar tevens roteren. Hierdoor ontstaat er in de elementen een spanningswisseling op. Deze spanningswisselingen maken de constructie gevoelig voor vermoeiingsschade. Er zal zowel aan de statische-, als aan de vermoeiingssterkte-eis moeten worden voldaan.

Om aan de sterkte-eisen te voldoen zijn aanpassingen noodzakelijk.

Aanpassingen van de profielen en de verbindingen komen de vermoeiingssterkte ten goede en zullen bovendien relatief eenvoudig uitvoerbaar zijn. Om de spanningen te verlagen zullen de afmetingen van de profielen moeten toenemen, hiermee neemt ook het gewicht van de constructie toe. Om de gewichtstoename te beperken zal de wanddikte van de profielen over de lengte variëren. Verder kan door de geknikte vorm uit de randprofielen weg te nemen het moment in deze profielen worden verlaagd met ongeveer 30% en kan door het moment ter plaatse van de werkelijke aansluitlocatie van de elementen met de knooppunten te bepalen het moment verder afnemen.

Naast aanpassingen in de profielen van het rad zal aanpassing van de oplegging van het rad winst op leveren. De aanpassingen aan het ontwerp van het rad zal de piek in het krachtsverloop ter plaatse van de hoogste oplegging verlagen, wat de vermoeiingssterkte ten goede komt.

De verbetering van de vermoeiingssterkte middels een aanpassing van het statische schema van de constructie zijn moeilijker realiseerbaar. Het scharnierend verbinden van de elementen zal weliswaar de buigspanning uit de wandstaven wegnemen, het creëren van een zuiver scharnier is echter vrijwel onmogelijk.

Naast aanpassingen aan de constructie zal het ook mogelijk zijn om de belasting op de constructie te doen afnemen, waardoor tevens de spanningen in de elementen afnemen. Zo zal de windbelasting in werkelijkheid niet uniform over de hoogte zijn.

Vanuit het oogpunt van de vermoeiing en de reductie van de spanningen zal nader onderzoek uitgevoerd moeten worden naar de benodigde aanpassing van de profielen en knooppunten, het optimaliseren van de veerstijfheden van de opleggingen en de belastingen op de constructie.

Na aanpassing van het ontwerp van het rad en de oplegging, zal de constructie ook vanuit het oogpunt van statische- en vermoeiingssterkte haalbaar zijn.



7 Stijfheid

De vervorming van de totale constructie is van vele factoren afhankelijk. Zo wordt de vervorming beïnvloedt door de stijfheid van de constructie, veerstijfheid van de fundering en uiteraard de belasting op de constructie

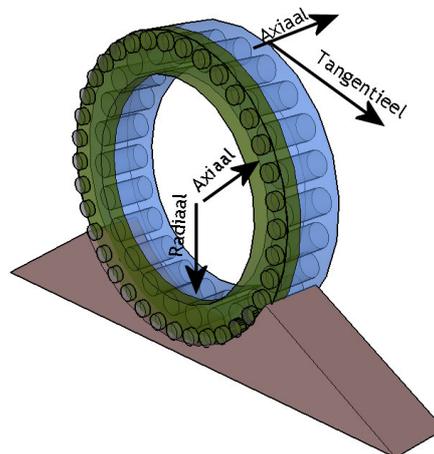
Om inzicht te krijgen in de stijfheideigenschappen van het rad wordt het rad enkel in positie 1 bekeken. Voor een volledig beeld van de vervorming van de constructie zullen de overige posities eveneens bekeken moeten worden

In dit hoofdstuk zal ingegaan worden op de stijfheideigenschappen van het Great Dubai Wheel. Allereerst wordt het globale vervormingsgedrag van het rad bekeken. Vervolgens wordt de exacte vervorming van de constructie onder zowel permanente, als veranderlijke belasting bepaald. Gekeken wordt naar de vervorming van het rad aan de voet en aan de top. De vervormingen zullen plaatsvinden in zowel de radiale (verticaal) en axiale (horizontaal) richting van het rad, welke in figuur 208 getoond zijn.

Er is gebruik gemaakt van het in hoofdstuk 5 beschreven ESA-model. De maximale radiale opleghoogte bedraagt 46 meter ($\approx \frac{1}{4} h_{\text{totaal}}$) en de axiale oplettingen zijn over de gehele opleg lengte verdeeld. De veerstijfheden van de oplettingen in zowel radiale, als axiale richting bedraagt: $1 \cdot 10^3$ MN/m. In het ESA-model zijn stijve knooppunten toegepast, waardoor een ongeschoorde dwarsdoorsnede ontstaat.

In dit hoofdstuk zijn de vervorming van het rad voor slechts één positie geanalyseerd. Het rad is als een statische constructie beschouwt. In werkelijkheid zal het rad roteren en met deze rotatie zal ook de vervorming van het rad variëren.

De in dit hoofdstuk gebruikte belastingen zijn in hoofdstuk 4 te vinden.



Figuur 208 - Richtingen rad

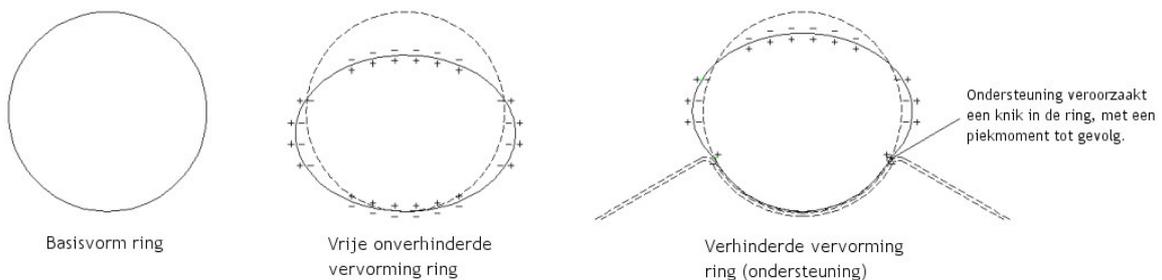
7.1 Globaal vervormingsgedrag huidig ontwerp

Het huidige ontwerp van het rad is opgebouwd uit drie vakwerkringen die onderling verbonden zijn via verbindingsdiagonalen in de wand, waarbij de tussenliggende vakwerkkring asymmetrisch geplaatst is. Op het rad werken naast de permanente belasting uit het eigen gewicht tevens veranderlijke belastingen, zoals windbelasting en veranderlijke vloerbelasting.

Verticale vervorming (radiale stijfheid)

Wanneer de ring belast wordt, vervormt de hoofddragconstructie van het Great Dubai Wheel tot een ovaal. Deze vervorming wordt verhinderd op de plaats van de oplegging op het entreegebouw, waar ter plaatse van de hoogste oplegging een knik in de vakwerkkring ontstaat.

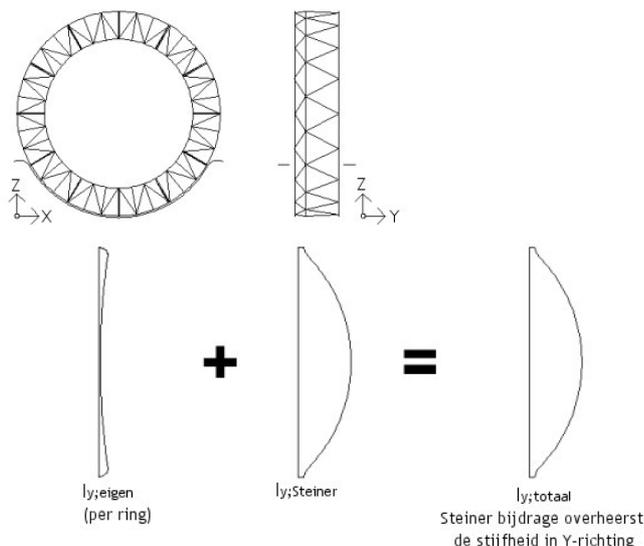
De knik boven de hoogste oplegging zal resulteren in een piek in het krachtsverloop boven deze opleggingen. Door deze knik over meerdere opleggingen te spreiden zal ook de piek in het krachtsverloop afvlakken.



Figuur 209 - Gedrag constructie onder verticale belasting

Asymmetrisch ontwerp

De asymmetrische plaatsing van de middelste vakwerkkring veroorzaakt een asymmetrische verdeling van de radiale (Z-richting) stijfheid van het rad in de axiale richting (Y-richting). De radiale stijfheid van de ring zal het hoogst zijn aan de zijde waar de vakwerkringen zich het dichtst bij elkaar bevinden, omdat de samenwerking tussen de buitenste en de binnenste vakwerkkring hier het hoogst is. De vervorming zal aan dezelfde zijde het laagst zijn, waardoor het rad scheef staat onder het eigen gewicht.



Figuur 210 - Verloop axiale stijfheid, over de hoogte



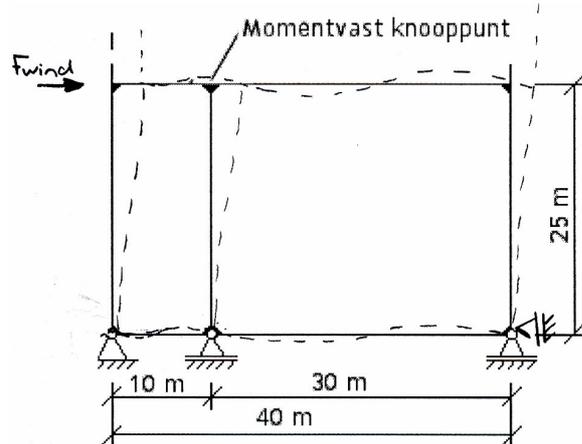
Axiale vervorming (Y-richting)

De ronde vorm van de constructie zal de axiale (Y-richting) stijfheid beïnvloeden. De verbindingsdiagonalen tussen de vakwerkringen zullen, vanwege de ronde vorm, elk een verschillende hoek maken met het verticale vlak. Deze variërende hoek is van invloed op het traagheidsmoment van de constructie in axiale richting, welke niet constant over de hoogte is. In figuur 210 is een vereenvoudigde weergave van het verloop van het traagheidsmoment in de axiale richting over de hoogte te zien.

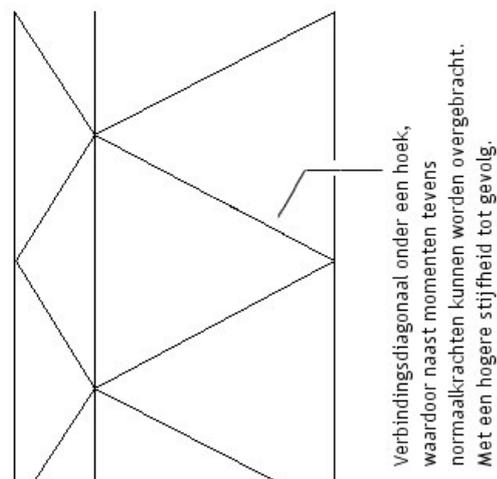
De axiale stijfheid aan de voet van het rad is laag en neemt toe tot een maximum op de halve hoogte van het rad, vervolgens neemt de stijfheid weer af. Dit verloop van stijfheid is het gevolg van de ronde vorm van het rad en de ongeschoorde dwarsdoorsnede.

Aan de voet en aan de top van het rad is de stijfheid laag. In dit gedeelte liggen de verbindingsdiagonalen zeer vlak, waardoor de samenwerking (Steiner bijdrage) tussen de vakwerkringen zeer laag is. De samenwerking tussen de ringen wordt in dit deel van het rad hoofdzakelijk verkregen uit een ongeschoord raamwerk. De stijfheid van dit raamwerk, waarin momenten in de knooppunten worden opgenomen, is laag in vergelijking met de stijfheid in het midden, waar een geschoord raamwerk de stijfheid verzorgt.

In het midden van het rad is de samenwerking tussen de vakwerkringen het grootst. De hoek tussen de verbindingsdiagonalen is groot, waardoor de samenwerking door normaalkrachten in de verbindingsdiagonalen gerealiseerd wordt.



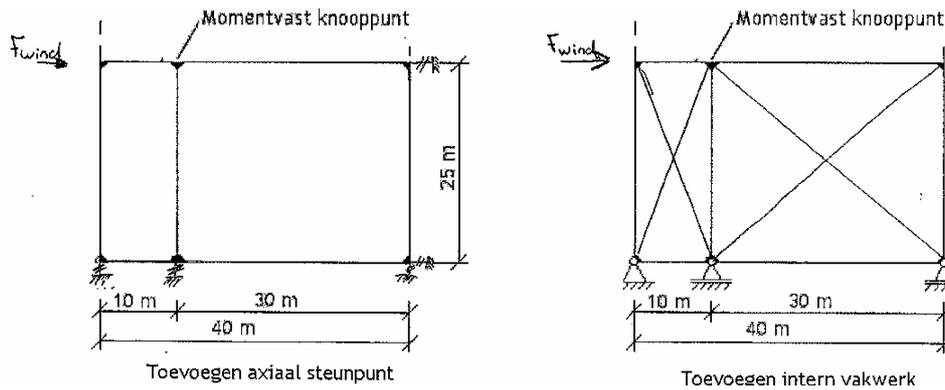
Figuur 211 - Dwarsdoorsnede constructie in radiale richting



Figuur 212 - Verbinding vakwerkringen in het midden van het rad

De in figuur 211 getoonde doorsnede met een lage stijfheid is het gevolg van de eis om geen interne constructie-elementen toe te passen.

Voor de ondersteuning van het rad zijn opleggingen gebruikt, welke enkel radiale en axiale krachten opnemen. Boven elke oplegging bevindt zich dus een relatief slappe dwarsdoorsnede. De vervorming aan de voet van het rad heeft een grote invloed op de totale vervorming van het rad. Het creëren van een stijvere doorsnede in radiale richting kan, wanneer de totale vervorming te groot is, de uiteindelijke vervorming positief beïnvloeden. Voorbeelden van verstijving van de dwarsdoorsnede aan de voet van het rad zijn in figuur 213 getoond. Verstijving van de dwarsdoorsnede is enkel noodzakelijk wanneer de totale vervorming van het rad te hoog is.

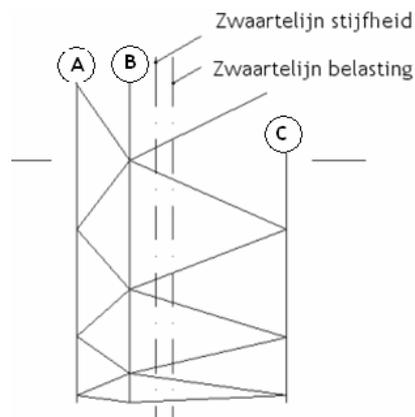


Figuur 213 - Verstijvingmogelijkheden dwarsdoorsnede

7.2 Initiële vervorming, ten gevolge van permanente belasting

Het asymmetrische ontwerp van het Great Dubai Wheel zal consequenties hebben voor de initiële vervorming van het rad. Zo is de stijfheid niet gelijkmatig verdeeld in de axiale richting en is ook de verdeling van de permanente belasting in de knooppunten van het rad niet gelijkmatig over de hoogte en breedte (axiale-richting).

De stijfheid aan de zijde van ring A is groter dan aan de zijde van ring C en de ring zal ten gevolge van het eigen gewicht willen vervormen in de richting van ring C. De zwaartelijnen van de belastingen valt bovendien niet samen met de zwaartelijnen van de stijfheid en er ontstaat een initiële uitbuiging.



Figuur 214 - Verplaatsing zwaartelijnen stijfheid

De initiële vervorming is het gevolg van de permanente belasting. De permanente belasting bestaat uit het eigen gewicht van de hoofddraagconstructie (het rad), de hoofdcapsules en de zichtcapsules. De vervorming ten gevolge van het eigen gewicht van de liftcapsules is in vergelijking met bovengenoemde eigen gewichten verwaarloosbaar klein.

7.2.1 Vervorming rad

Eigen gewicht hoofddraagconstructie

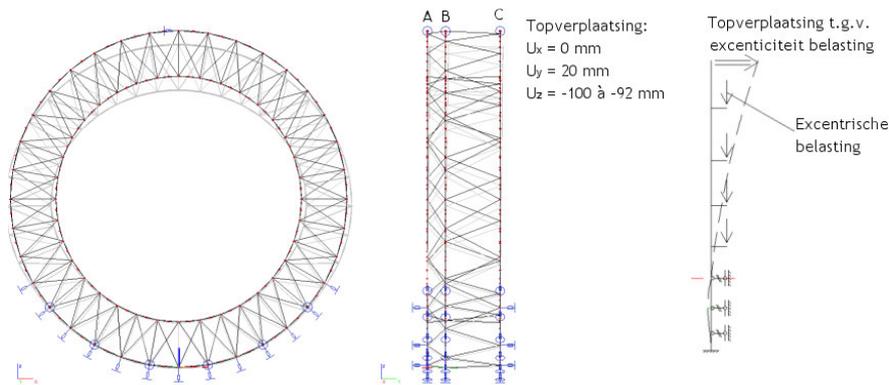
Onder het eigen gewicht zal de hoofddraagconstructie van het Great Dubai Wheel tot een ovaal willen vervormen. Deze vervorming wordt verhinderd ter plaatse van de oplegging op het entreegebouw, waar een knik in de constructie ontstaat. Het basisprincipe van de vervorming van de constructie onder verticale belasting is getoond in figuur 209. De knik in



de ring boven de hoogste opleggingen is als gevolg van de verende ondersteuning gespreid over een grotere opleglengte.

Het eigen gewicht van de constructie zal evenals de stijfheid het hoogst zijn bij ring A. Ondanks dat de belasting aan de zijde van ring A hoger is dan aan de zijde van ring C zal door de hogere stijfheid bij ring A de constructie axiaal vervormen naar de zijde met de lagere stijfheid, ring C.

In figuur 215 is de vervorming van het rad onder het eigen gewicht getoond. Naast het ovaliseren van het rad zal de constructie ten gevolge van het verschil in stijfheid een axiale verplaatsing ondergaan.



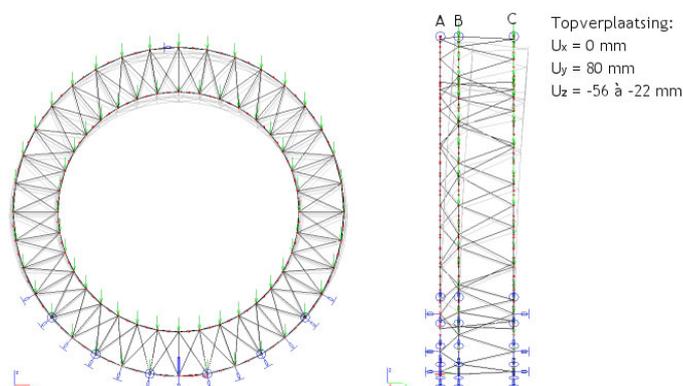
Figuur 215 - Vervorming constructie onder het eigen gewicht hoofdraagconstructie

Eigen gewicht hoofdcapsules

De vervorming van het rad ten gevolge van het eigen gewicht van de hoofdcapsule vertoont naast een ovalisering, tevens een axiale vervorming van het rad.

Doordat de hoofdcapsules zich tussen ring B en C bevinden, zal de belasting op de knooppunten van deze ringen aangrijpen. Hierdoor valt de zwaartelij van de belastingen niet samen met de zwaartelij van de stijfheid en ontstaat er een excentriciteit. Deze excentriciteit is aanzienlijk groter dan de excentriciteit ten gevolge van het eigen gewicht van de hoofdraagconstructie, de uitwijking in axiale richting is dan ondanks de lagere verticale belasting groter (80 mm [hoofdcapsule], tegen 20 mm [hoofdraagconstructie]).

In figuur 216 is de vervorming van het rad onder het eigen gewicht van de hoofdcapsules te zien. Naast het ovaliseren van het rad is er in het figuur een duidelijke vervorming in axiale richting zichtbaar.

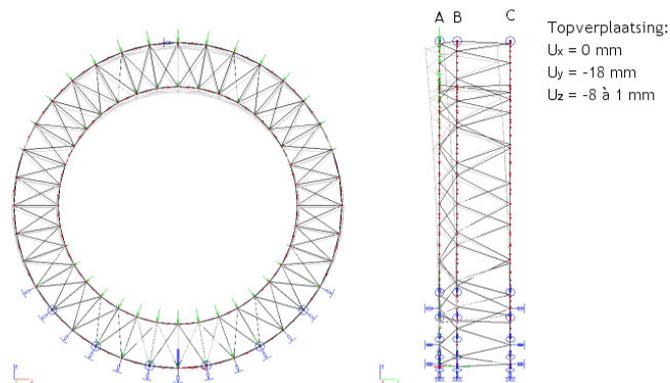


Figuur 216 - Vervorming constructie onder het eigen gewicht hoofdcapsules

Eigen gewicht zichtcapsules

De zichtcapsules bevinden zich aan de buitenzijde van het rad aan ring A. De capsules zijn als uitkragend aan ring A bevestigd. Wat een excentrische belasting oplevert.

De vervorming uit het eigen gewicht van de zichtcapsules vertoont overeenkomsten met de vervorming komende uit het eigen gewicht van de hoofdcapsules. Het rad zal ovaliseren en een axiale vervorming ondergaan. De vervorming en de grootte van de vervorming is te zien in figuur 217.



Figuur 217 - Vervorming constructie onder het eigen gewicht zichtcapsules

Overzicht

De initiële topverplaatsing van het rad wordt in tabel 38 getoond. De axiale vervorming aan de top zal ongeveer 80 mm bedragen. Deze vervorming is ongeveer 1:2250 van de totale hoogte. Aanpassingen aan het rad zijn gezien de relatief beperkte uitwijking niet noodzakelijk wanneer deze niet waarneembaar zijn (esthetische eis).

Het wegnemen van de initiële vervorming is vanuit esthetisch oogpunt niet noodzakelijk.

Afname van deze vervorming zal echter de totale vervorming van de constructie verlagen en zodoende de constructieve eigenschappen, bijvoorbeeld het tweede orde effect, verbeteren.

Aanpassingen in het constructieve zijn echter niet absoluut noodzakelijk om aan de stijfheidseisen te voldoen.

De totale vervorming van het rad, inclusief windbelasting, zal ongeveer 450 mm bedragen. Een verlaging van deze waarde met 80 mm (initiële vervorming) zal de constructieve eigenschappen verbeteren.

	U_x [mm]	U_y [mm]	U_z [mm]	axiale verplaatsing, percentage van de hoogte
e.g. hoofdconstructie	0	20	-100	0,011%
e.g. hoofdcapsule	0	80	-56	0,043%
e.g. zichtcapsule	0	-18	1	-0,010%
Totaal	0	82	-155	0,044%

Tabel 38 - Initiële vervorming rad, ring C, positie 1, lineaire berekening

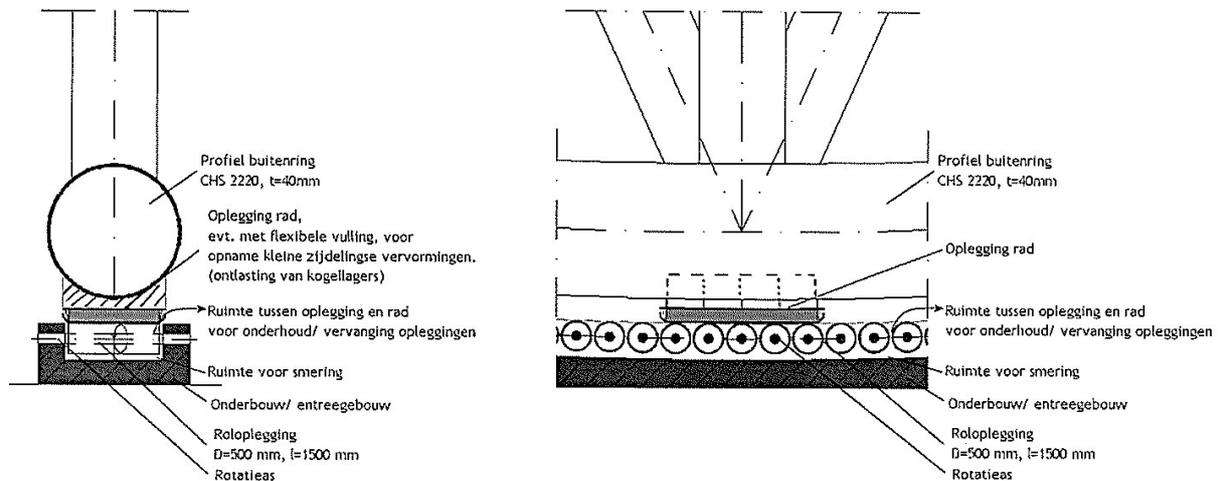


Aanpassingen aan de constructie om de initiële vervorming te verlagen zijn in paragraaf 7.2.3 getoond.

7.2.2 Vervorming fundering

Naast de vervorming aan de top zal de constructie, vanwege het gebruik van verende opleggingen ($k = 1 \cdot 10^3 \text{ MN/m}$), ook aan de voet een vervorming ondergaan. Deze vervorming vindt zowel in de axiale, als in de radiale richting plaats. De vervormingen moet in de fundering kunnen plaatsvinden zonder de rolopleggingen te beschadigen.

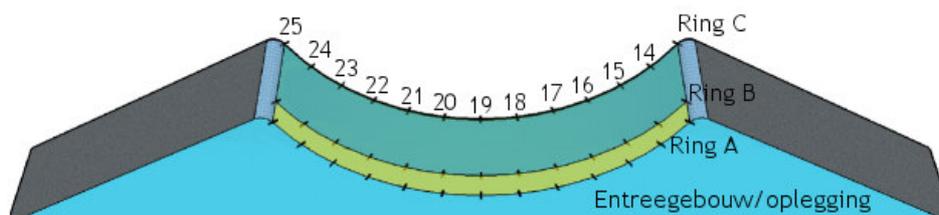
Wanneer de vervormingen in de axiale richtingen van de voet te groot worden kan schade aan de opleggingen ontstaan. Om deze schade te voorkomen is het loskoppelen van het rad ten opzichte van de ondersteuning een oplossing. In figuur 218 is een mogelijke oplossing getoond, die gebaseerd is op de opleggingen van bruggen.



Figuur 218 - Ondersteuning met zijdelingse vervormingscapaciteit

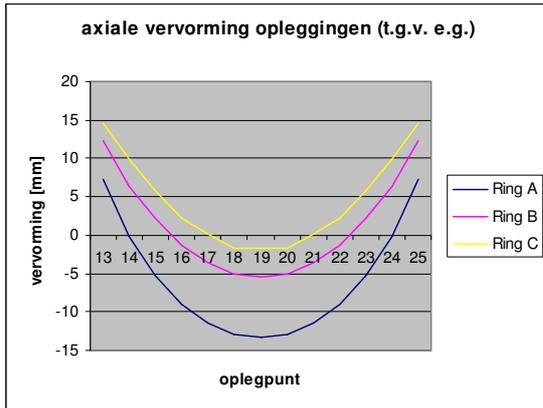
Axiale vervorming fundering

Voor het onderzoek naar de axiale vervormingen is gebruik gemaakt van het in hoofdstuk 5 getoonde ESA-model. In de getoonde grafieken zijn de opleggingen aangeduid zoals in figuur 219 getoond is.

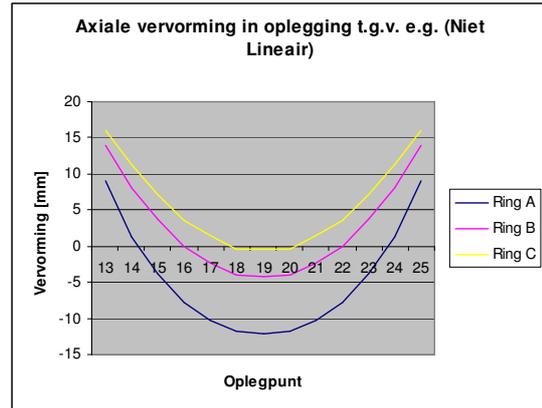


Figuur 219 - Aanduiding opleggingen

Wanneer de constructie enkel door het eigen gewicht wordt belast zal er in zowel radiale als axiale richting een vervorming ontstaan. De vervorming in axiale richting zal, wanneer deze vrij kan optreden, niet tot een reactiekracht leiden. Wanneer de axiale vervorming echter verhinderd wordt door de axiale opleggingen zal er in deze opleggingen een reactiekracht optreden. Deze optredende axiale vervormingen zijn in figuur 220 en figuur 221 getoond.



Figuur 220 - Axiale vervorming ten gevolge van het eigen gewicht (Lineair berekent)



Figuur 221 - Axiale vervorming ten gevolge van het eigen gewicht (Niet-lineair berekent)

Wanneer de vervormingen vrij kunnen optreden zullen de oplettingen enkel de bijkomende vervormingen uit de veranderlijke vloerbelastingen en windbelasting moeten opnemen.

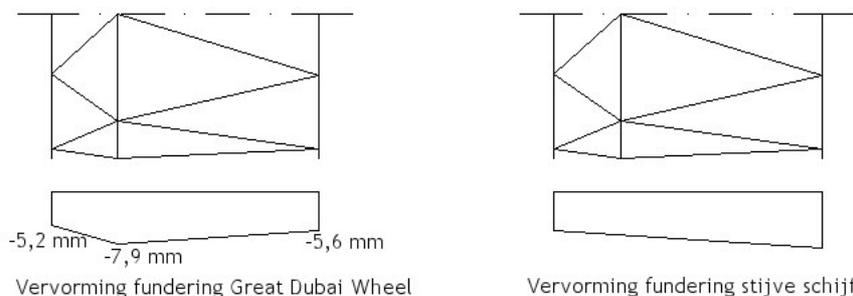
Door, middels het wegstellen van deze vervorming in de oplettingen, de initiële axiale vervorming toe te staan, zullen de axiale reactiekrachten verminderen.

In het ontwerp van de opletting kan rekening gehouden worden met de initiële vervormingen, bijvoorbeeld door een stelbaarheid in de axiale oplettingen te creëren. De initiële vervormingen ten gevolge van het eigen gewicht kunnen nu weggesteld worden, waardoor de reactiekrachten op de axiale oplettingen met ongeveer 1.500 à 5.000 kN (in de BGT) afnemen. De in hoofdstuk 6 bepaalde maximale reactiekracht ten gevolge van de permanente belasting en de windbelasting zal met ongeveer 20% afnemen.

Radiale vervorming fundering

Het verloop van de vervorming van radiale oplettingen onder het rad, zoals getoond is in figuur 222, is niet-lineair. De vervorming onder ring B is groter dan onder ring A en C. De constructie zal zich boven de oplettingen niet als een oneindig stijve schijf gedragen, waarbij het verloop van de radiale vervorming (zakking) lineair is.

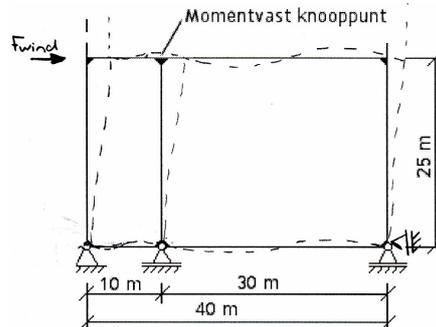
Het wegstellen van dit niet-lineaire verloop is, voor de initiële vervorming, mogelijk door bijvoorbeeld de middelste opletting enkele millimeters hoger te bouwen. Het wegstellen van het niet-lineaire verloop is echter niet noodzakelijk, omdat het verschil in vervorming onder de vakwerkeringen laag is; slechts enkele millimeters.



Figuur 222 - Radiale vervorming aan de voet van het rad, onder eigen gewicht (BGT)



De niet-lineaire vervorming aan de voet van de constructie is het gevolg van het ongeschoorde raamwerk, waarvoor gekozen is bij de dwarsdoorsnede boven de oplegging. De stijfheid benodigd voor de herverdeling van de belasting over de opleggingen is laag.



Figuur 223 - Dwarsdoorsnede ter plaatse van de oplegging

De constructie gedraagt zich boven de oplegging niet als een oneindig stijve schijf. Dit is het gevolg van de relatief slappe dwarsdoorsnede boven de opleggingen.

7.2.3 Aanpassingen

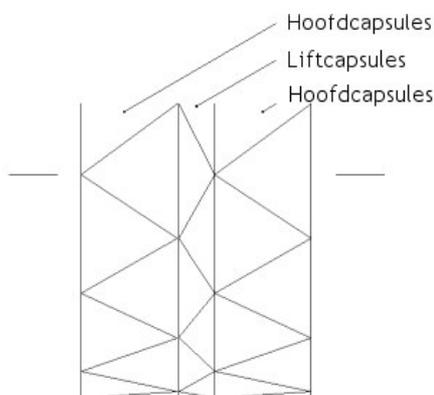
Om de initiële vervorming te verminderen zal de zwaartelij van de stijfheid naar de zwaartelij van de belastingen moeten verschuiven. Aanpassingen kunnen zowel plaatsvinden in het ontwerp van het rad, als in het ontwerp van de fundering. In deze paragraaf zullen een aantal mogelijke aanpassingen getoond worden.

Aanpassing ontwerp rad

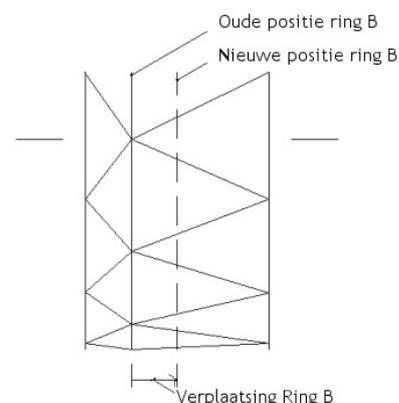
Asymmetrie -> symmetrie

Het huidige ontwerp wordt gekenmerkt door de asymmetrische plaatsing van de binnenring. Deze plaatsing veroorzaakt een asymmetrisch stijfheidsverloop en een asymmetrische belasting.

Het ontwerp zal symmetrisch gemaakt kunnen worden door de binnenring naar het midden van de constructie te verplaatsen, of door de een extra tussenring toe te voegen. Het stijfheidsverloop wordt symmetrisch. Wanneer tevens de belastingen symmetrisch op de constructie aangrijpen zal er geen initiële vervorming meer aanwezig zijn.



Figuur 224 - Symmetrische constructie, door toevoeging vakwerkkring

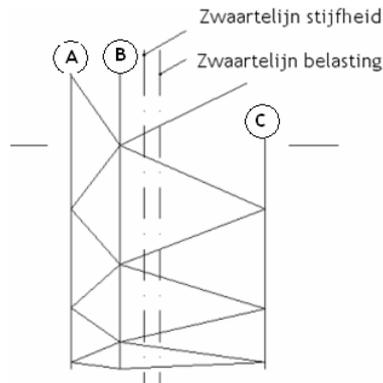


Figuur 225 - Symmetrisch constructie, dankzij verplaatsing vakwerkkring

Het creëren van een symmetrisch ontwerp, zal het uiterlijk van het rad sterk veranderen.

Verstijving Ring

Een subtielere manier om de zwaartelijijn van de constructie te verplaatsen is het verstijven van de slappere ring C. Momenteel werken ring A en B samen, waardoor aan deze zijde een hoger stijfheid aanwezig is dan aan de zijde van ring C. Door ring C te verstijven, bijvoorbeeld met behulp van grotere profielen, zal de zwaartelijijn verder naar ring C verschuiven.



Figuur 226 - Verplaatsing zwaartelijijn stijfheid

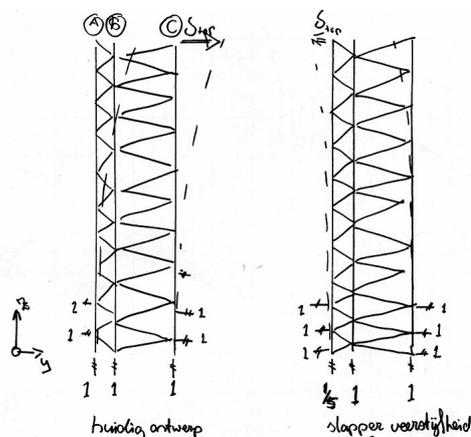
Toevoegen tegengestelde scheefstand

Een derde mogelijkheid om de initiële vervorming tegen te gaan is het enigszins scheef bouwen van het rad. De scheefstand van het rad zal de initiële vervorming opheffen en kan gerealiseerd worden in zowel het ontwerp van de fundering (verloop opleghoogte), als in het ontwerp van het rad (variëren ringdiameter).

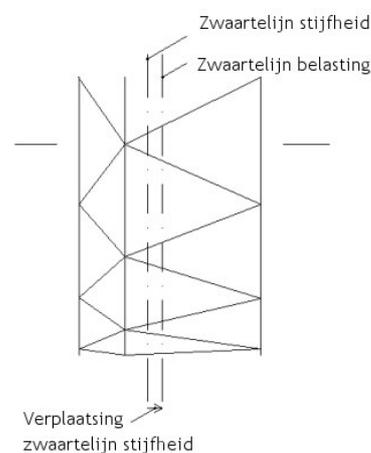
Aanpassing fundering

In het huidige ontwerp van de ring is aangenomen dat de veerstijfheid van de opleggingen onder elke ring ongeveer gelijk is.

Het zwaartepunt van de stijfheid komt niet overeen met het zwaartepunt van de belastingen (eigen gewicht), waardoor een initiële scheefstand van de constructie ontstaat. Door de stijfheid van de fundering per ring te variëren is het mogelijk om de zwaartelijijn van de stijfheid samen te laten vallen met de zwaartelijijn van de belasting en hierdoor de initiële scheefstand te verlagen.



Figuur 227 - Invloed funderingsstijfheid op de vervorming van de constructie.



Figuur 228 - Verplaatsing zwaartelijijn stijfheid



Iteratief proces

Indien de constructie zich als oneindig stijf gedraagt, is het mogelijk om de zwaartelijn van de funderingsstijfheid samen te laten vallen met de zwaartelijn van de belasting. Het huidige ontwerp van de constructie is echter niet als oneindig stijf op te vatten.

Via een iteratie proces is de stijfheid van de fundering aangepast om tot een verhouding te komen tussen de funderingsstijfheden. In dit proces is aangenomen dat de fundering onder ring B en C een gelijke stijfheid heeft, omdat zich op deze ringen de grootste belastingen bevinden (hoofdcapsules).

Bij de variatie van de veerstijfheid van de opleggingen onder ring A is begonnen met een tienmaal lagere veerstijfheid dan onder ring B en C. De richting van de initiële axiale vervorming blijkt in dit geval dusdanig verandert te zijn dat de constructie zal overhangen naar ring A. Vervolgens is voor de veerstijfheid onder ring A een waarde van $1/5$ van de veerstijfheid van ring B genomen. Nu bleek de initiële axiale vervorming bijna volledig verdwenen te zijn. Bij een veerstijfheid van $1/4$ was de initiële vervorming geheel verdwenen. Tabel 39 toont een overzicht van de axiale topverplaatsing.

Om de initiële axiale vervorming te laten verdwijnen, zal de veerstijfheid van ring A $1/4$ van de veerstijfheid van ring B en C moeten bedragen.

	Uy [mm]			
	Basis	Ka = 1/10 kb	ka = 1/5 kc	ka = 1/4 kc
e.g. hoofddraagconstructie	20	-92	-52	-40
e.g. hoofdcapsule	80	57	65	67
e.g. zichtcapsule	-18	-30	-25	-25
Totaal	82	-65	-12	2

Tabel 39 - Initiële topverplaatsing ten gevolge van eigen gewicht

7.3 Bijkomende vervormingen, ten gevolge van veranderlijke belasting

Naast de permanente belasting zal op de constructie ook een veranderlijke belasting werken. Deze belasting veroorzaakt de bijkomende vervorming van de constructie. De bijkomende vervorming zal afkomstig zijn uit de veranderlijke vloerbelasting in de capsules en de windbelasting op het rad.

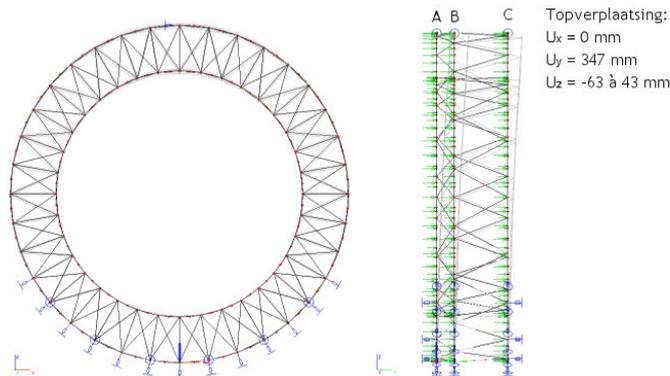
7.3.1 Vervorming rad

Wind

Wanneer de constructie door wind wordt belast, zal deze evenwijdig aan de windrichting vervormen. De vervorming ten gevolge van de windbelasting bedraagt 347 mm in axiale richting, deze vervorming is inclusief de vervorming van de fundering. De hoogte van het rad is 185 meter, de bijkomende vervorming ten gevolge van de windbelasting veroorzaakt een extra scheefstand van: 1:530. Deze scheefstand uit de bijkomende vervorming is lager dan de in de NEN6702 gestelde eis van 1:500.

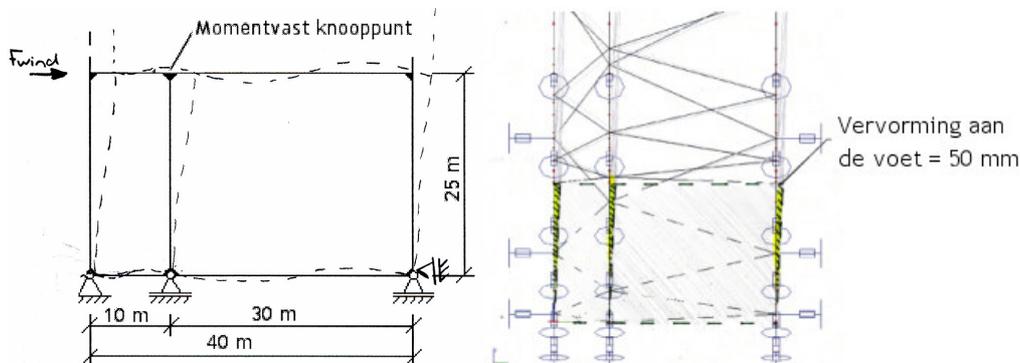
De constructie zal echter niet alleen aan de scheefstandeis moeten voldoen. In het geval van hoogbouw zal naast de scheefstandeis tevens gekeken moeten worden naar de optredende versnellingen, waarvan de controle in hoofdstuk 9 wordt uitgevoerd.

Onder een axiale windbelasting zal de constructie als een buiglijger vervormen. Zowel de stijfheid, als de belasting is vanwege de ronde vorm niet uniform over de hoogte verdeeld. Zo zal de axiale stijfheid in het midden van de constructie het hoogst zijn, terwijl op dit punt het door de wind aangeblazen oppervlak het kleinst is, hierdoor ontstaat een knik in de vervorminglijn, zie figuur 229.



Figuur 229 - Vervorming constructie onder axiale windbelasting

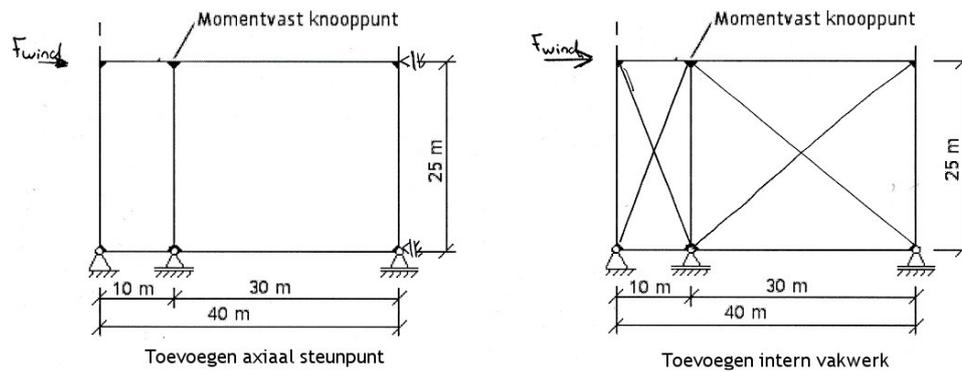
De stijfheid in de top en aan de voet van de constructie is laag. De stijfheid wordt aan de voet uit een ongeschoord raamwerk verkregen. Figuur 230 toont de vervorming aan de voet van het rad onder windbelasting. De binnenring zal in het huidige ontwerp slap reageren op axiale (wind)belastingen, zie figuur 230.



Figuur 230 - Doorsnede en vervorming aan de voet van het rad

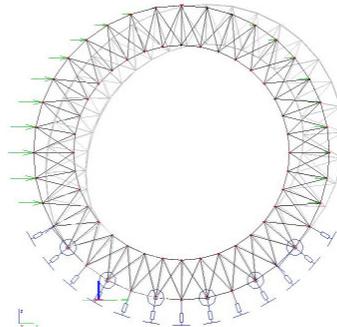
Aan de voet zal het rad onder windbelasting vervorming van ongeveer 50 mm ondergaan. De hoogte van de dwarsdoorsnede is 25 meter, de scheefstand bedraagt 1:500. In het ontwerp van de bevestiging van de capsules aan het rad zal rekening moeten worden gehouden met deze scheefstand.

Door de vervorming aan de voet van het rad te beperken zal tevens de totale vervorming van het rad verlaagd worden. Mogelijkheden om de dwarsdoorsnede aan de voet van het rad stijver te laten reageren zijn het toevoegen van een axiale ondersteuning in de top van de dwarsdoorsnede, of het toevoegen van een kruisverband in de dwarsdoorsnede. Het toevoegen van een internvakwerk zal, zoals reeds in hoofdstuk 2 is beschreven, uit architectonisch oogpunt niet toegestaan zijn. Het toevoegen van een extra axiaal steunpunt zal het ontwerp van het hoofdgebouw beïnvloeden. Voorbeelden hiervan zijn in figuur 231 getoond.



Figuur 231 - Verstijvingmogelijkheden dwarsdoorsnede

De wind zal echter niet uit slecht één richting komen, zo kan de constructie ook aangeblazen worden door een windbelasting evenwijdig aan de ring. Wanneer de wind het rad evenwijdig aan de ring aanblaast zal het rad zoals in figuur 232 getoond is vervormen. De stijfheid van de constructie in deze richting is hoger dan in axiale richting. Bovendien is het aangeblazen oppervlak kleiner en is het rad enigszins aerodynamisch van vorm, waardoor de windbelasting kleiner is. De vervorming evenwijdig aan de ring is dan ook voldoen aan de bijkomende scheefstandeis van $1:500 h_{tot}$.



Figuur 232 - Vervorming constructie onder evenwijdige windbelasting

Veranderlijke vloerbelasting

De vervorming ten gevolge van de veranderlijke vloerbelasting in de capsules zal qua vorm overeenkomen met de vervormingen ten gevolge van het eigen gewicht van de capsules. De grootte van de vervorming zal echter lager zijn dan de vervorming ten gevolge van het eigen gewicht. Voor de bepaling van de vervorming is gebruik gemaakt van een lineaire berekening.

De vervorming kan bepaald worden uit de eerder bepaalde vervorming van het rad ten gevolge van het eigen gewicht van de capsules, volgens:

$$\delta_{ver} = (F_{ver} / F_{per}) * \delta_{per}$$

Wanneer op alle hoofdcapsules een volledige veranderlijke vloer belasting werkt, heeft deze belasting een waarde van 25.000 kN (excl. momentaanfactor). Het eigen gewicht bedraagt 86.400 kN. De bijkomende vervorming bedraagt nu:

$$\delta_{\text{ver}} = (25.000 / 86.400) * \delta_{\text{per}} \Rightarrow$$

	U _x [mm]	U _y [mm]	U _z [mm]
δ _{per} , e.g. hoofdcapsule	0	80	-56
δ _{ver} , veranderlijk	0	23	-16

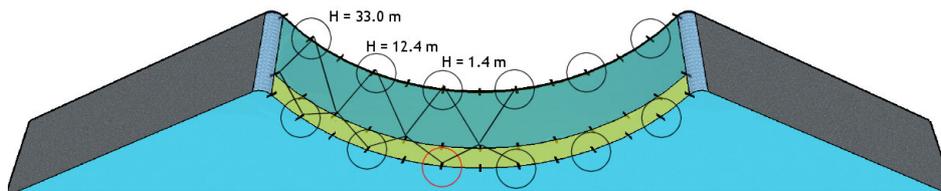
Tabel 40 - Vervorming ten gevolge van maximale veranderlijke vloerbelasting hoofdcapsule (excl. momentaanfactor)

De bijkomende vervorming uit de veranderlijke vloerbelasting van de hoofdcapsules is relatief klein in vergelijking met de vervorming ten gevolge van de windbelasting. (δ_{vloer} = 23 mm, δ_{wind} = 347 mm, δ_{bij;totaal} = 370 mm = 1/500 h_{totaal}).

7.3.2 Vervorming fundering

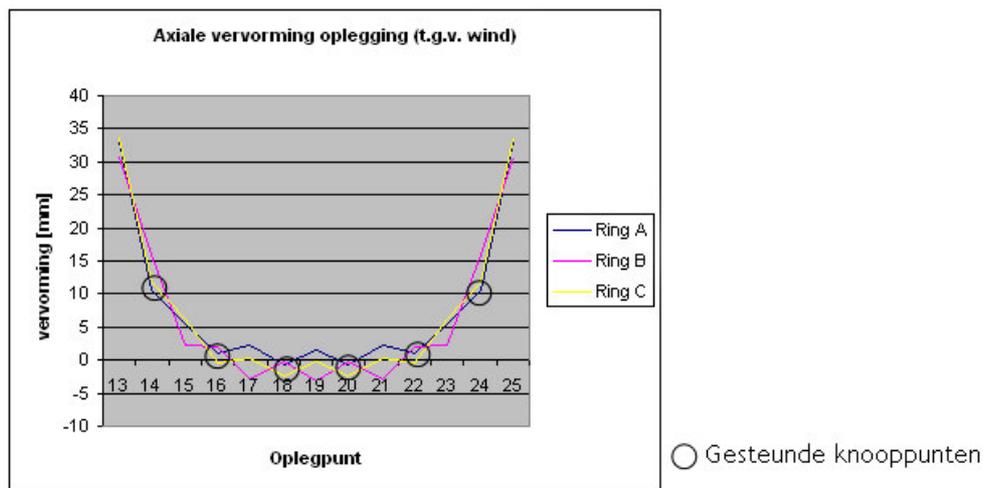
Axiale vervorming ten gevolge van windbelasting

Naast een axiale vervorming zal de windbelasting de vervorming aan de voet van de constructie doen toenemen. Om de axiale windbelasting op te nemen is het noodzakelijk om de constructie in axiale richting te steunen. De locaties van de van de axiale opleggingen zijn in figuur 233 te zien.



Figuur 233 - Locaties axiale steunpunten

De axiale vervorming ten gevolge van windbelasting bedraagt maximaal 32 mm, boven de ongesteunde hoogste opleggingen. De grootste vervorming vindt plaats aan de uiteinden van het ondersteuningsgebouw. De axiale vervormingen tussen de opleggingen blijft beperkt tot maximaal 15 mm (ring B).



Figuur 234 - Axiale vervorming ten gevolge van het wind (Lineair berekent)

De opleggingen zullen zodanig moeten worden ontworpen dat de axiale vervormingen in de opleggingen niet tot schade aan de rolopleggingen leidt.



7.3.3 Aanpassingen

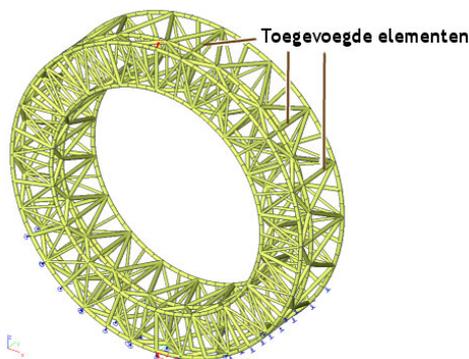
In het huidige ontwerp is aangenomen dat de dwarsdoorsnede van het rad een ongeschoord raamwerk is. De knooppunten dienen oneindig stijf te zijn. De uitwijking in axiale richting ten gevolge van de veranderlijke belastingen, bestaande uit windbelasting en veranderlijke vloerbelasting, bedraagt 370 mm. Hiermee is de totale bijkomende scheefstand van de constructie gelijk aan de gestelde eis van 1:500. Aanpassingen aan de constructie zijn vanuit het oogpunt van stijfheid dan ook niet noodzakelijk.

Het huidige ontwerp van het rad biedt echter nog wel ruimte voor verbeteringen op het gebied van stijfheid. In principe is het huidige ontwerp van de dwarsdoorsnede als een ongeschoord raamwerk een slappe dwarsdoorsnede. Door het gebruik van buisprofielen met grote doorsneden en stijfheid (buig en torsie), is het echter toch mogelijk geweest om de constructie van het ongeschoorde raamwerk voldoende stijf te maken. In het huidige ontwerp is gebruik gemaakt van twee verschillende profielafmetingen, te weten CHS 2220, $t=40\text{ mm}$ en CHS 1440, $t=40\text{ mm}$.

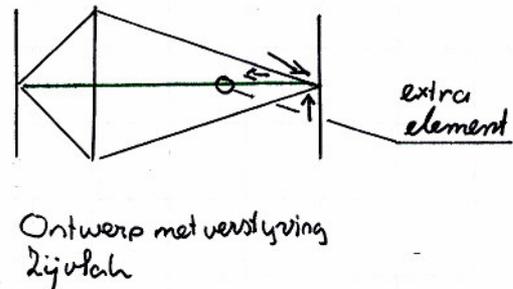
Toevoegen horizontalen tussen de ringen

Verstijving van de verbinding tussen de ringen door middel van extra horizontalen (bijv. CHS 2220, $t=40\text{ mm}$), zal enkel de stijfheid van het rad in het midden van de hoogte verhogen. De dwarsdoorsnede aan de voet blijft relatief slap en zal onder windbelasting flink vervormen. De vervorming ten gevolge van windbelasting neemt door toevoeging van de extra horizontalen nauwelijks af.

De toevoeging van horizontalen tussen de ringen heeft een minimaal effect op de beperking van de topverplaatsing. Door het toenemen van het eigen gewicht neemt de topverplaatsing zelfs toe.



Figuur 235 - Toevoegen horizontalen tussen de ring



Figuur 236 - Principe toevoegen horizontalen tussen de ringen

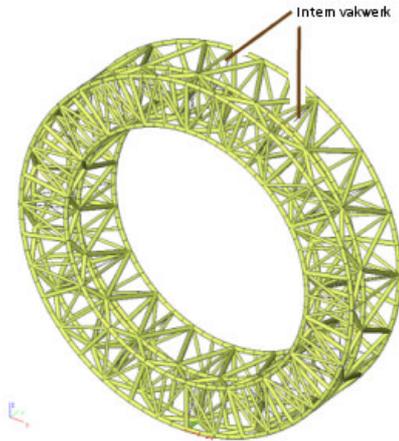
	Basisontwerp		
	U_x [mm]	U_y [mm]	U_z [mm]
e.g. hoofdraagconstructie	0	20	-100
e.g. hoofdcapsule	0	80	-56
wind	0	347	-64
Totaal	0	447	-220
+ e.g. zichtcapsule	0	-18	1
Totaal	0	429	-219

	Aangepast		
	U_x [mm]	U_y [mm]	U_z [mm]
	0	33	-111
	0	79	-55
	0	337	-62
Totaal	0	449	-228
	0	-18	1
Totaal	0	431	-227

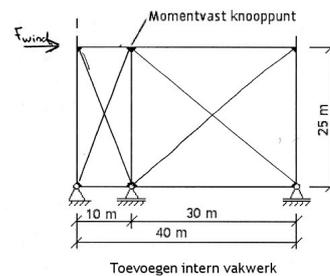
Tabel 41 - Topverplaatsing, in ring C, van het basis ontwerp en het aangepaste ontwerp

Toevoegen intern vakwerk/ schoorconstructie

Verstijving van de dwarsdoorsnede door middel van het toevoegen van een intern vakwerk, of een schoorconstructie zal de vervorming aan de voet aanzienlijk verlagen. De samenwerking tussen de vakwerkringen aan de voet zal worden verhoogd. Door de afname van de vervormingen aan de voet van de constructie zal tevens de totale vervorming van de constructie aanzienlijk afnemen.



Figuur 237 - Toevoeging intern vakwerk/ schoorconstructie



Figuur 238 - Verstijving dwarsdoorsnede met een intern vakwerk

	Basisontwerp		
	U _x [mm]	U _y [mm]	U _z [mm]
e.g. hoofddraagconstructie	0	20	-100
e.g. hoofdcapsule	0	80	-56
wind	0	347	-64
Totaal	0	447	-220
+ e.g. zichtcapsule	0	-18	1
Totaal	0	429	-219

Aangepast		
U _x [mm]	U _y [mm]	U _z [mm]
0	25	-106
0	74	-53
0	305	-54
0	404	-213
0	-16	0
0	388	-213

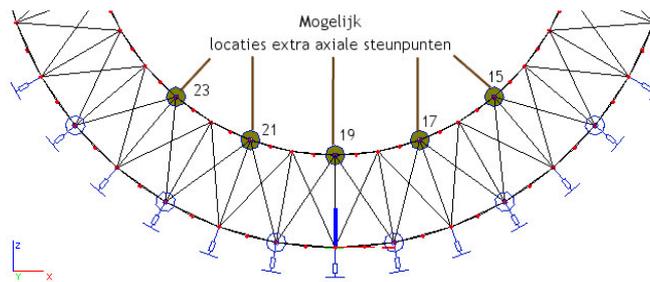
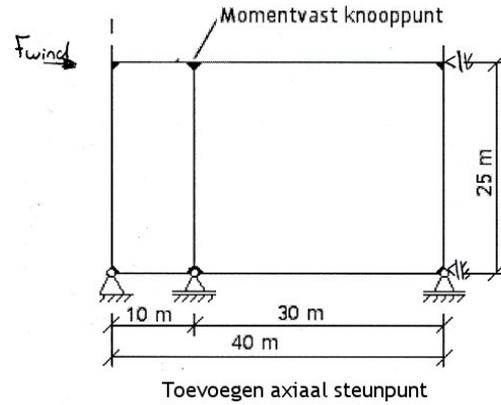
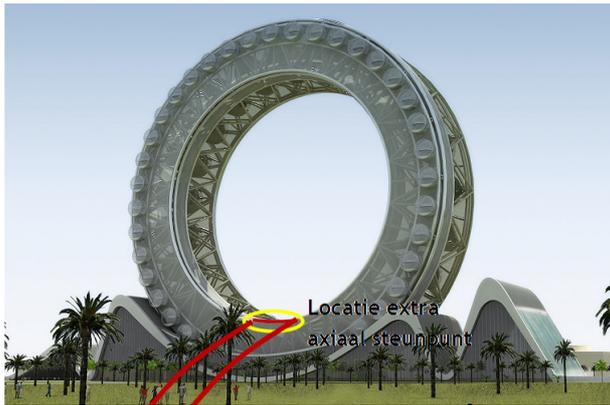
Tabel 42 - Topverplaatsing, in ring C, van het basis ontwerp en het aangepaste ontwerp

Wanneer de constructie verstijfd zou moeten worden zal de vervorming aan de voet beperkt moeten worden. Door toevoeging van een intern vakwerk zal de topverplaatsing aanzienlijk verminderen met 40 mm ($\approx 12\%$).

Het toevoegen van een intern vakwerk is echter in strijd met de architectonische eis voor een elementloze binnenruimte.

Toevoegen extra axiale ondersteuning

De uitwijking aan de voet kan ook beperkt worden door toevoeging van een extra axiaal steunpunt aan de bovenzijde van de dwarsdoorsnede. De veerstijfheid van de extra axiale opleggingen zal hoog moeten zijn (bijv. $1 \cdot 10^3$ MN/m). Deze stijfheid zal uit het ontwerp van het entreegebouw verkregen moeten worden.



Figuur 239 - Toevoeging extra axiale steunpunten

Een voordeel van het aanpassen van de oplegging van de constructie is dat deze aanpassingen geen grote invloed zullen hebben op de constructie van het rad, welke ongewijzigd kan blijven. Bovendien zullen er geen extra elementen aan de constructie worden toegevoegd, waardoor het eigen gewicht niet toeneemt en de spanningswisselingen ten gevolge van het eigen gewicht vrijwel gelijk blijven. De extra opleggingen veroorzaken wel een ander spanningsverloop ten gevolge van de windbelasting, welke nu deels in de extra axiale steunpunten wordt opgenomen.

Een nadeel is dat door het toevoegen van de extra axiale steunpunten het uiterlijk van het entreegebouw aangetast zal worden. Ook zullen de extra opleggingen een ander spanningsverloop veroorzaken ten gevolge van de windbelasting, welke nu ook deels in de extra axiale steunpunten wordt opgenomen.

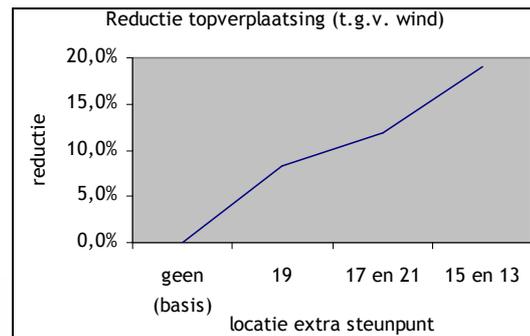
Resultaat

De topverplaatsing is voornamelijk afhankelijk van de positie van de hoogste axiale ondersteuning. Hoe hoger de axiale ondersteuning geplaatst wordt des te kleiner zal de uiteindelijke topverplaatsing zijn. Om de topverplaatsing te beperken zijn de lager gelegen axiale opleggingen niet van belang en kunnen deze eventueel weggelaten worden.

Een vergelijking van de reductie van de topverplaatsing bij verschillende ondersteuningshoogten is in tabel 43 te zien. In deze tabel is enkel gekeken naar de topverplaatsing ten gevolge van windbelasting.

		U _y [mm]	reductie
extra steunpunt	geen (basis)	347	
	19	318	8,4%
	17 en 21	306	11,8%
	15 en 23	281	19,0%

Tabel 43 - Topverplaatsing ten gevolge van windbelasting



Het toevoegen van extra axiale opleggingen is een effectieve methode om de stijfheid van de constructie te verhogen.

Voor het toevoegen van een extra axiale ondersteuning zal echter een aanpassing van het ondersteuningsgebouw noodzakelijk zijn. Dit zal het uiterlijk van de constructie aantasten en is dan ook niet gewenst.

Conclusie en aanbeveling

Gezien de relatief beperkte bijkomende scheefstand van het rad zijn de in deze paragraaf behandelde aanpassingen aan het constructief ontwerp vanuit het oogpunt van stijfheid niet noodzakelijk.

Mocht echter in een nader onderzoek blijken dat bijvoorbeeld de knooppunten zich minder stijf gedragen dan was aangenomen en hierdoor de stijfheid van de totale constructie afneemt zal de constructie verstijfd moeten worden. Het toevoegen van een intern vakwerk- schoorconstructie zal de stijfheid en vervormingeigenschappen van de constructie aanzienlijk verbeteren.

7.4 Overzicht

In de voorgaande paragrafen is de bepaling van de vervorming gebaseerd op een lineair elastische berekening. In deze berekening worden effecten als het tweede orde effect niet meegenomen. In werkelijkheid zullen deze niet-lineaire effecten echter wel degelijk optreden. Hierdoor zal de uiteindelijke vervorming hoger uitvallen dan de in de lineaire berekening bepaalde waarde.

Met behulp van het in hoofdstuk 5 getoonde ESA-model is zowel een lineair elastische berekening, als een geometrisch niet-lineaire berekening uitgevoerd. De resultaten zijn in tabel 44 en tabel 45 getoond.

Radiale/ verticale vervorming (δ_z)	Wind, ring A	Wind, ring C
Eigen gewicht hoofddraagconstructie	-100 mm	-100 mm
Eigen gewicht hoofdcapsule	-56 mm	-56 mm
Eigen gewicht zichtcapsule	1 mm	1 mm
Wind ring A	-63 mm	- mm
Wind ring C	- mm	43 mm
Totaal 1 ^e orde	-219 mm	-113 mm
inclusief zichtcapsule	-218 mm	-112 mm
Totaal 2 ^e orde	-220 mm	-112 mm

Tabel 44 - Radiale/ verticale vervorming rad, top ring C, positie 1



Axiale vervorming ($\bar{\delta}_Y$)	Wind, ring A	Wind, ring C
Eigen gewicht hoofddraagconstructie	20 mm	20 mm
Eigen gewicht hoofdcapsule	80 mm	80 mm
Eigen gewicht zichtcapsule	-18 mm	-18 mm
Wind ring A	347 mm	- mm
Wind ring C	- mm	-347 mm
Totaal 1 ^e orde	447 mm	-247 mm
inclusief zichtcapsule	429 mm	-265 mm
Totaal 2 ^e orde	478 mm	-270 mm
inclusief zichtcapsule	460 mm	-288 mm

Tabel 45- Axiale Vervorming rad, top ring C, positie 1

7.5 Conclusie

De totale vervorming van het rad onder permanente belasting en veranderlijke windbelasting bedraagt maximaal 478 mm (excl. eigen gewicht zichtcapsules). Bij deze uitwijking van de top zal de maximale scheefstand $478 : 185.000 \approx 1 : 390$ bedragen. De scheefstand is groter dan de vanuit de NEN 6702 gestelde eis van $1 : 500$.

Een aanzienlijk deel van deze scheefstand ($\approx 20\%$) wordt echter veroorzaakt door de permanente belasting van het rad. De bijdrage van de permanente belasting zal voor een deel kunnen worden weggesteld, zoals reeds in paragraaf 7.2.3 is getoond.

Aanpassingen aan het huidige ontwerp zijn vanuit het oogpunt van de stijfheid niet noodzakelijk.

Wanneer enkel gekeken wordt naar de bijkomende vervorming uit de windbelasting zal de bijkomende scheefstand kleiner zijn dan de eis van $1:500$. De constructie voldoet aan de stijfheidseisen, aanpassingen met betrekking tot de stijfheid van het huidige ontwerp zijn dan ook niet noodzakelijk.

De stijfheid van het huidige ontwerp zal bovendien nog verder toenemen, aangezien de profieldoorsneden zullen moeten toenemen om aan de vermoeiingssterkte eis te voldoen.



8 Stabiliteit

Om de eigenschappen van de sterkte en de stijfheid van de constructie te garanderen is het noodzakelijk dat de constructie stabiel is. Zo zal onder andere voorkomen moeten worden dat de constructie kantelt en dat de constructieve elementen voor het bereiken van de vloeispanning knikken.

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de diverse stabiliteitseigenschappen van het Great Dubai Wheel.

Allereerst wordt de globale stabiliteit van het gehele rad onderzocht. Hierbij wordt eerst gekeken naar de stabiliteit van de dwarsdoorsnede in relatie tot de stabiliteit van het gehele rad. Vervolgens wordt de veiligheid van de constructie tegen kantelen onderzocht. Ten slotte wordt er in dit hoofdstuk kort ingegaan op het tweede orde effect in de constructie.

Vervolgens wordt de lokale stabiliteit van de constructieve elementen onderzocht. De behandelde vormen van lokale instabiliteit zijn knik en plooi.

De stabiliteit van de constructie zowel de globale, als de lokale stabiliteit zijn van verschillende factoren afhankelijk. Deze factoren worden in bijlage F behandeld.

In dit hoofdstuk is gebruik gemaakt van de in hoofdstuk 4 bepaalde belastinggevallen. Ter bepaling van de kantelstabiliteit, het tweede orde effect en de krachten in de elementen is gebruik gemaakt van het in hoofdstuk 5 beschreven ESA-model.

8.1 Globale stabiliteit

Het basis ontwerp van het rad is opgebouwd uit drie vakwerkingen die onderling verbonden zijn door de verbindingsdiagonalen in de wand. Alle constructieve elementen bevinden zich aan de buitenzijde van de hoofddragconstructie.

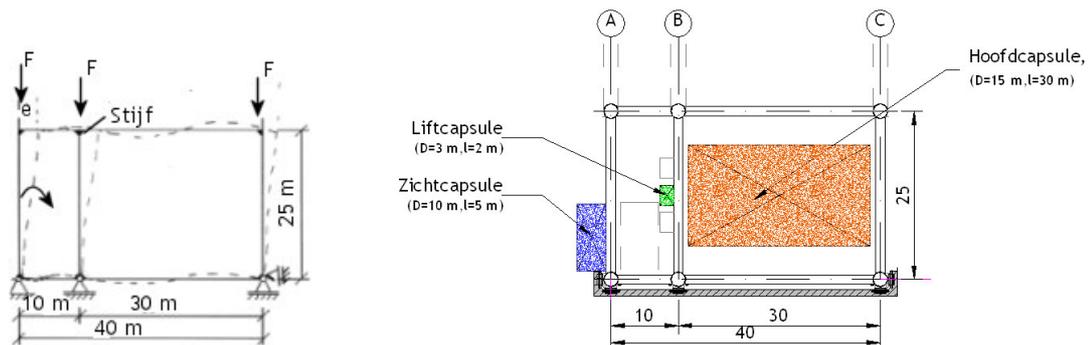
De globale stabiliteit is onder andere afhankelijk van de stabiliteit van de dwarsdoorsnede, de kantelveiligheid en het tweede orde effect.

In deze paragraaf zullen de aspecten die van invloed zijn op de globale stabiliteit behandeld worden.

8.1.1 Dwarsdoorsnede

De stabiliteit van het rad wordt voor een belangrijk deel bepaald door het ontwerp van de dwarsdoorsnede.

In het huidige ontwerp is de binnenzijde van het rad, met uitzondering van de vakwerking B, volledig vrij van constructieve elementen. De architectonische en functionele eis om de dwarsdoorsnede geheel vrij van elementen te houden leidt tot een dwarsdoorsnede met de vorm van een ongeschoord raamwerk. De stabiliteit van de dwarsdoorsnede zal verkregen worden uit de stijfheid van de knooppunten.

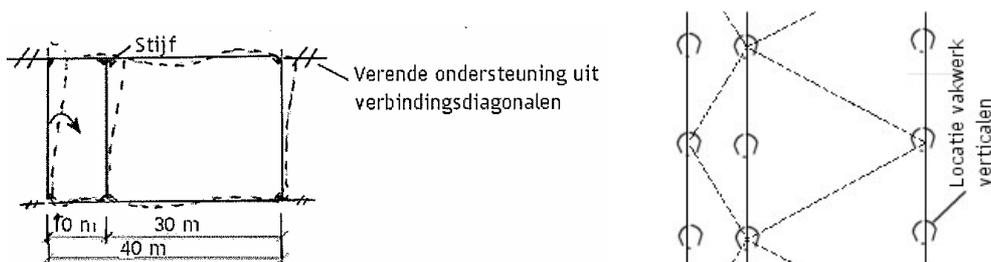


Figuur 240 - Dwarsdoorsnede rad heeft de vorm van een ongeschoord raamwerk

De krachten op de binnenring (bovenzijde dwarsdoorsnede) worden via een moment (buiging) en normaalkracht naar de gesteunde buitenring (onderzijde dwarsdoorsnede) afgevoerd, zie figuur 240. De buitenring wordt aan de voet van het rad gesteund.

De dwarsdoorsnede van het rad heeft de vorm van een ongeschoord raamwerk. De stabiliteit wordt verkregen uit de stijve knooppunten.

De gesteunde dwarsdoorsnede aan de voet van het rad zal, via de verbindingsdiagonalen tussen de vakwerkingen, de ongesteunde dwarsdoorsneden stabiliseren en hiermee de stabiliteit van het gehele rad waarborgen.



Figuur 241 - Verende ondersteuning dwarsdoorsnede door naastgelegen doorsneden (schijfwerking)



Stijve knooppunten

Om de stabiliteit van het rad te garanderen is het noodzakelijk dat de dwarsdoorsnede stabiel is. De stabiliteit van een ongeschoord raamwerk is enkel gegarandeerd wanneer de rotatiestijfheid van de knooppunten hoog is, waardoor het knooppunt zich als een stijf knooppunt gedraagt.

In het huidige ontwerp van het rad is gebruik gemaakt van buisprofielen. Wanneer deze buisprofielen in de knooppunten verbonden worden komt de rotatiestijfheid van de knooppunten ongeveer overeen met een oneindig stijf knooppunt. Het huidige ontwerp van de dwarsdoorsnede is stabiel.

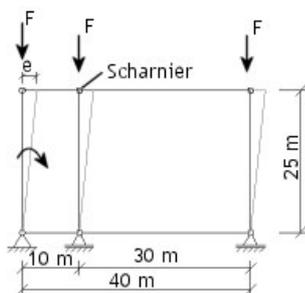
In het huidige ontwerp van het rad is gebruik gemaakt van buisprofielen. De rotatiestijfheid van verbindingen van deze buisprofielen benadert een oneindig stijf knooppunt.

Het huidige ontwerp van de dwarsdoorsnede is stabiel.

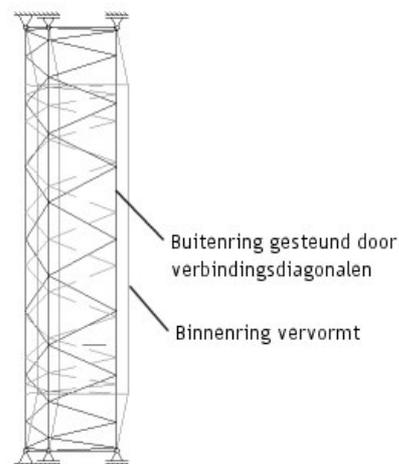
Onvoldoende rotatiestijfheid

In het huidige ontwerp is gebruik gemaakt van oneindig stijve knooppunten. Het huidige ontwerp met oneindig stijve knooppunten is stabiel. Wanneer echter door een wijziging in het ontwerp van de knooppunten de rotatiestijfheid van de knooppunten afneemt tot de stijfheid van een scharnier, dan ontstaat een instabiele dwarsdoorsnede.

Wanneer de knooppunten scharnierend zijn wordt enkel de buitenring van de constructie in axiale richting gesteund. De binnenring is ongesteund en zal in axiale richting vrij kunnen bewegen. Er ontstaat een instabiele constructie, zie figuur 242 en figuur 243.



Figuur 242 - Instabiele dwarsdoorsnede met scharnierende knooppunten



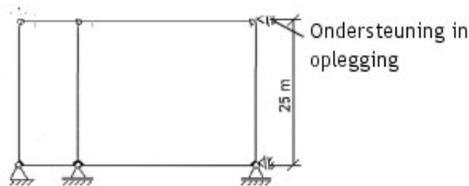
Figuur 243 - Globaal gedrag constructie in geval enkel scharnierende knooppunten (instabiel)

Wijziging van de knooppunten zal niet mogen leiden tot scharnierende knooppunten, waardoor de constructie instabiel wordt.

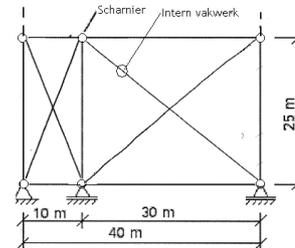
Om de stabiliteit van de constructie bij gebruik van scharnierende knooppunten te garanderen, zal het ontwerp van het rad moeten worden aangepast zodat ook de binnenring gestabiliseerd wordt. Als aanpassing kan een extra axiaal steunpunt, of een intern vakwerk/ schoorconstructie worden toegevoegd.

Toevoeging axiaal steunpunt

Door een extra axiaal steunpunt toe te voegen, wordt de binnenring gesteund en zal de dwarsdoorsnede stabiel zijn. De extra axiale oplegging zal slechts één knooppunt van de binnenring hoeven te steunen. Via de verbindingsdiagonalen zal een schijfwerking optreden, waardoor de gehele binnenring wordt gestabiliseerd. Toevoeging van een extra steunpunt zal het uiterlijk van het rad wijzigen.



Figuur 244 - Toevoeging axiaal steunpunt in de binnenring



Figuur 245 - Toevoeging intern vakwerk

Toevoeging intern vakwerk/ schoorconstructie

Door toevoeging van een intern vakwerk wordt een verbinding tussen de binnen- en buitenring gecreëerd. Hierdoor ontstaat een gesloten driehoek.

Het intern vakwerk kan tussen ring A en B, tussen ring B en C, of tussen zowel ring A en B en B en C geplaatst worden. Het is voor de stabiliteit niet noodzakelijk om de kruisverbanden tussen alle ringen te plaatsen. Door het kruisverband enkel tussen ring B en C (hoofdcapsules) te plaatsen zal de vrije ruimte tussen ring A en B behouden blijven, waardoor de liftcapsules geen hinder ondervinden van obstakels gedurende een rotatie. Toevoeging van een intern vakwerk zal de vrije indeelbaarheid van het rad nadelig beïnvloeden.

Conclusie

Het huidig ontwerp van de dwarsdoorsnede is stabiel. Aanpassingen aan het ontwerp zijn bij gebruik van stijve knooppunten niet noodzakelijk.

De ontworpen knooppunten moeten wat betreft de rotatiestijfheid als een stijf knooppunt te beschouwen zijn. Mocht de rotatiestijfheid van de knooppunten te laag zijn, dan zullen aanpassingen aan het ontwerp van de dwarsdoorsnede noodzakelijk zijn

8.1.2 Kantelinstabiliteit

Om het ontwerp van de opleggingen eenvoudig te houden is ervoor gekozen om de krachtsoverdracht enkel plaats te laten vinden door middel van contactdruk. In opleggingen waar geen contactdruk optreedt, zal in de oplegging geen kracht worden opgenomen. Wanneer de constructie door wind wordt aangeblazen is er een kans dat er in de radiale oplegging aan de loefzijde trek optreedt, waardoor de constructie zal loskomen van zijn opleggingen. Het loskomen van het rad zal van invloed zijn op zowel de sterkte, stijfheid en stabiliteitseigenschappen van de constructie.

De trekkracht in de oplegging is het grootst in opleggingen onder ring C, wanneer de wind vanuit de richting van ring C komt. De trekkracht in de fundering moet opgeheven worden door de drukkracht komende uit het eigen gewicht van het wiel.



Om te controleren of de constructie zich stabiel gedraagt, is zowel een lineaire, als een niet-lineaire berekening uitgevoerd. Gebruik is gemaakt van het in hoofdstuk 5 behandelde ESA-model.

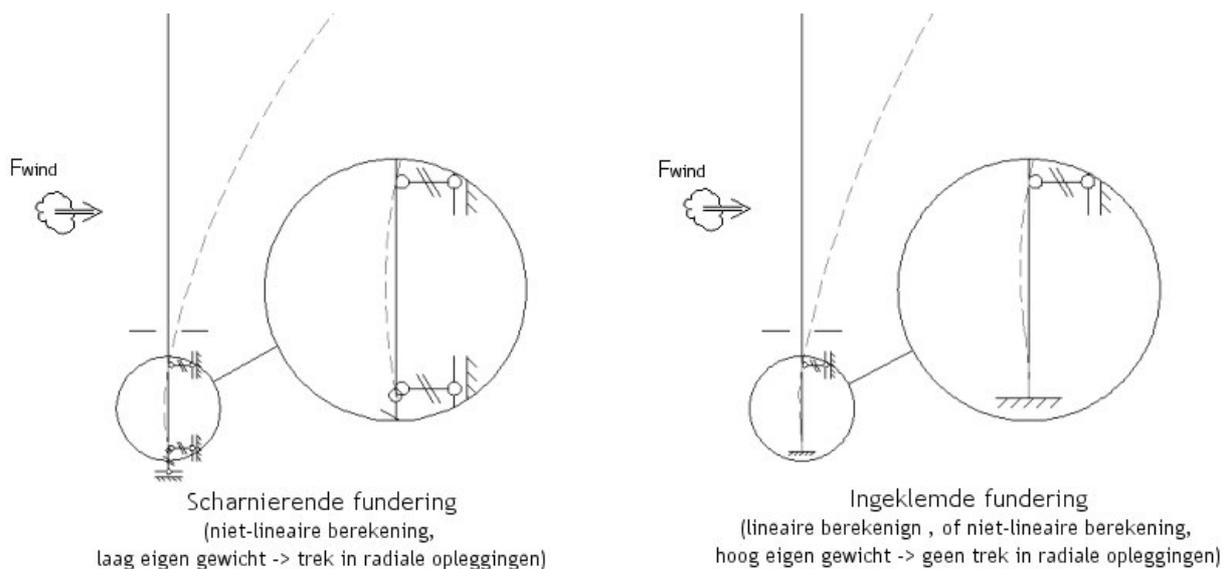
In deze paragraaf is gebruik gemaakt van de volgende belastingsfactoren, volgens NEN 6702:

- Permanent (eigen gewicht): $\gamma_{per} = 0,9$ (gunstig)
- Veranderlijk (wind): $\gamma_{ver} = 1,5$

Huidig ontwerp

In het huidige ontwerp van het Great Dubai Wheel is bevinden de radiale en axiale opleggingen zich over de gehele oplegglengte. De axiale opleggingen bevinden zich op meerdere niveaus, waardoor het kantelmoment afkomstig uit de windbelasting resulteert in een koppel in de axiale en de radiale steunpunten.

Om het aantal axiale steunpunten te beperken kan er ook voor gekozen worden om het rad op slecht op één niveau in axiale richting te steunen. In bijlage F is hiervan een uitgebreide beschouwing te vinden.



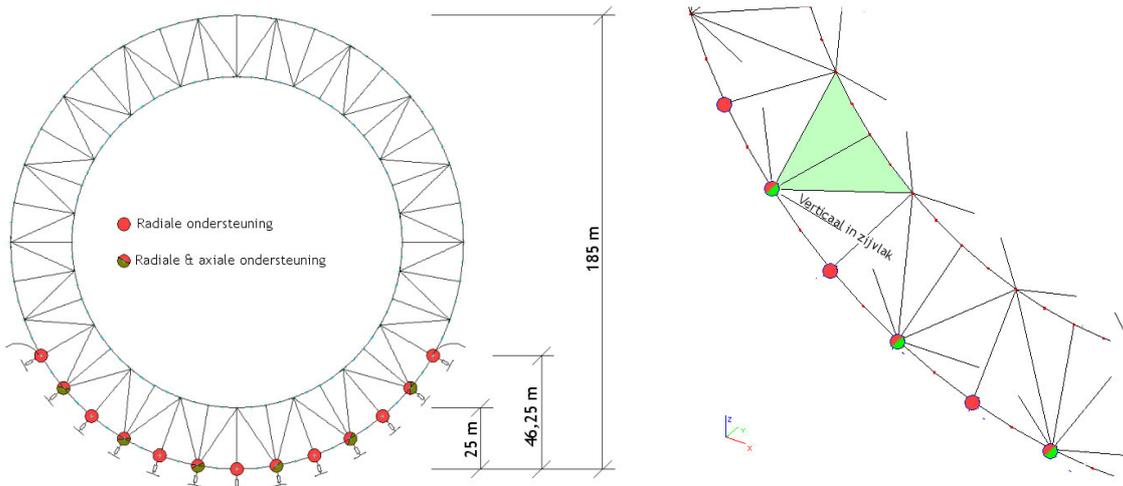
Figuur 246 - Schematisatie gedrag fundering in radiale richting

Om een koppel in de radiale steunpunten te laten optreden, is het noodzakelijk dat er onder de opleggingen van meer dan één vakwerkkring een drukkracht aanwezig is. Wanneer deze drukkracht niet aanwezig is zal er immers een contactloze situatie ontstaan. Er kan nu geen koppel worden gevormd en aan de voet van het rad zal een vrije rotatie optreden. Het wegvallen van de druk onder radiale steunpunten heeft consequenties voor zowel de sterkte, stijfheid en stabiliteit van de constructie, zie figuur 246.

De grootte van de axiale reactiekrachten is afhankelijk van het eigen gewicht van het rad. Indien het eigen gewicht laag is, zal het gehele kantelmoment opgenomen worden door een koppel van axiale reactiekrachten, de axiale reactiekrachten zijn in dit geval hoog. Wanneer het eigen gewicht echter voldoende hoog is, ontstaat er in de radiale opleggingen geen trek. In dit geval leveren ook de radiale reactiekrachten een bijdrage aan de opname van het kantelmoment en zullen de axiale krachten afnemen.

Het huidige ontwerp van het Great Dubai Wheel is ongevoelig voor kantelinstanteiteit. Door de axiale steunpunten op meerdere niveaus te plaatsen kan het kantelmoment in zowel radiale als axiale richting worden opgenomen. In geval van trek in de radiale oplettingen zal het koppel in axiale richting toenemen.

Voor de stabiliteit tegen kantelen is het niet noodzakelijk om trek in de radiale oplettingen te voorkomen. Om de vervormingen van de constructie onder windbelasting te beperken is het voorkomen van trek in de oplettingen aan te bevelen.



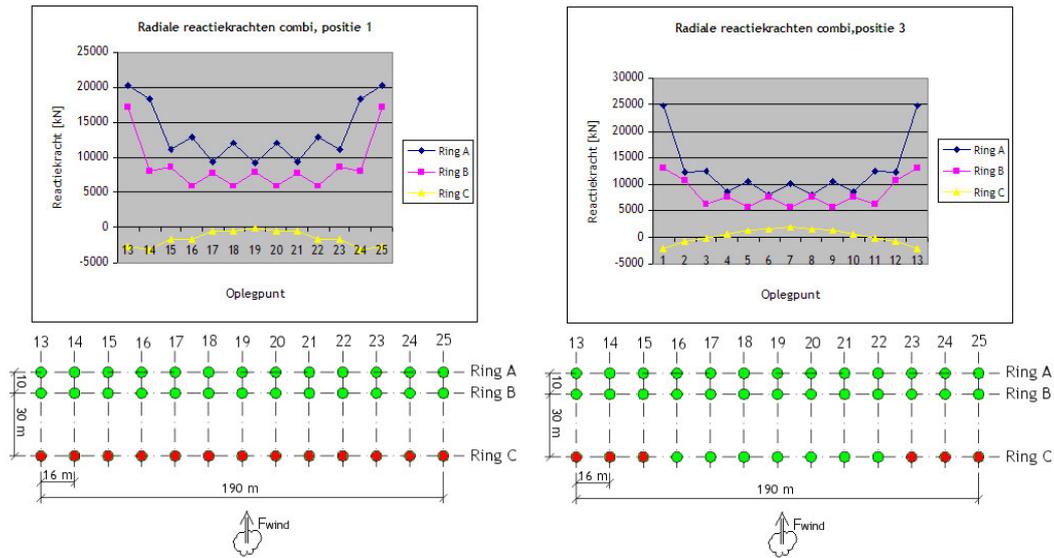
Figuur 247 - Locatie radiale en axiale ondersteuning, voor positie 1 ring C

In het huidige ontwerp bevinden de axiale oplettingen zich op meerdere niveaus. Het kantelmoment kan daardoor altijd opgenomen worden. Trek in de radiale oplettingen zal niet leiden tot kantelinstanteiteit, maar de vervorming van de constructie zal echter sterk toenemen wanneer er hier trek ontstaat. Het voorkomen van trek in de oplettingen heeft in het huidige ontwerp van het rad voornamelijk tot doel de vervorming van het rad te beperken.

Lineaire berekening

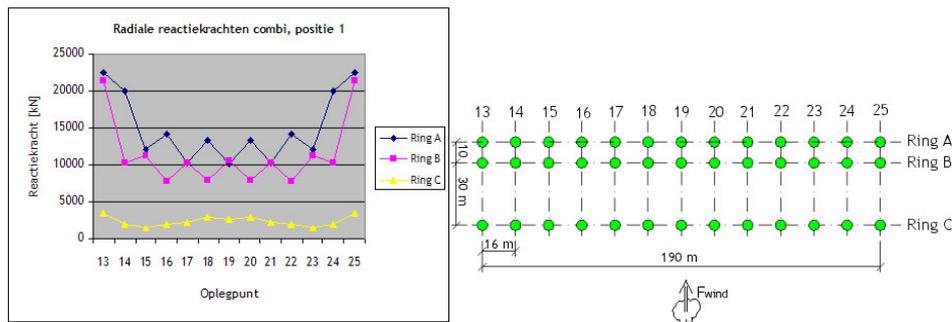
Om een eerste indruk te krijgen van het verloop van de reactiekrachten onder de ringen en het ontstaan van trek is een lineair elastische berekening uitgevoerd. De oplettingen nemen in dit geval zowel druk als trek op.

Wanneer enkel het eigen gewicht van de hoofddragconstructie en de windbelasting uit de richting van ring C in de berekening meegenomen, ontstaat er trek in de oplettingen. Om trek in de steunpunten te voorkomen zal het eigen gewicht met ongeveer 35 % moeten toenemen. Deze toename kan deels verkregen worden uit de toename van de profieldoorsnede, zie H6. Verder zal wanneer tevens het eigen gewicht van de hoofdcapsules wordt meegenomen het totale gewicht van de constructie toenemen.



Figuur 248 - Radiale reactiekrachten ten gevolge van eigen gewicht hoofddraagconstructie en windbelasting (inclusief belastingfactoren, rood = trek/ contactloos en groen = druk/ contact)

Door naast het eigen gewicht van de hoofddraagconstructie ook het eigen gewicht van de hoofdcapsules in de berekening mee te nemen, ontstaat in de opleggingen onder ring C een grotere drukkracht. Deze extra drukkracht voorkomt het ontstaan van trek in de radiale opleggingen.

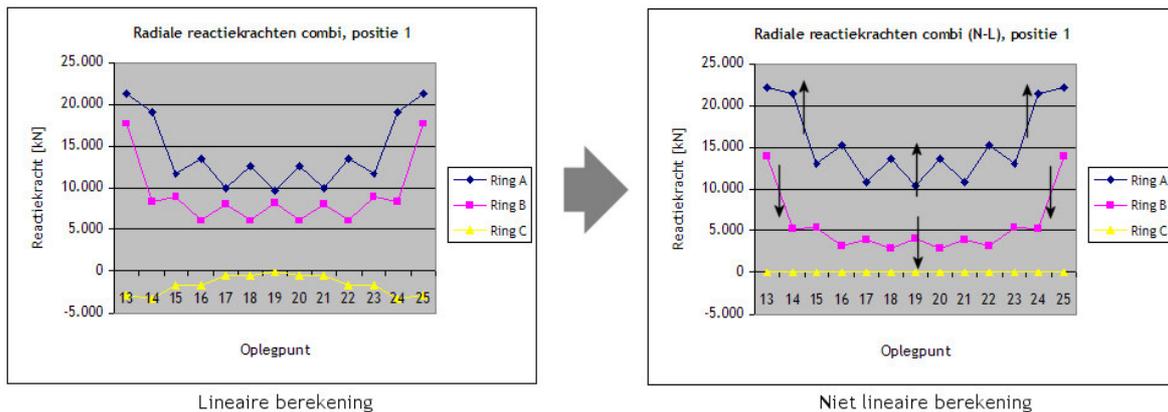


Figuur 249 - Radiale reactiekrachten ten gevolge van eigen gewicht hoofddraagconstructie, hoofdcapsules en windbelasting (inclusief belastingfactoren)

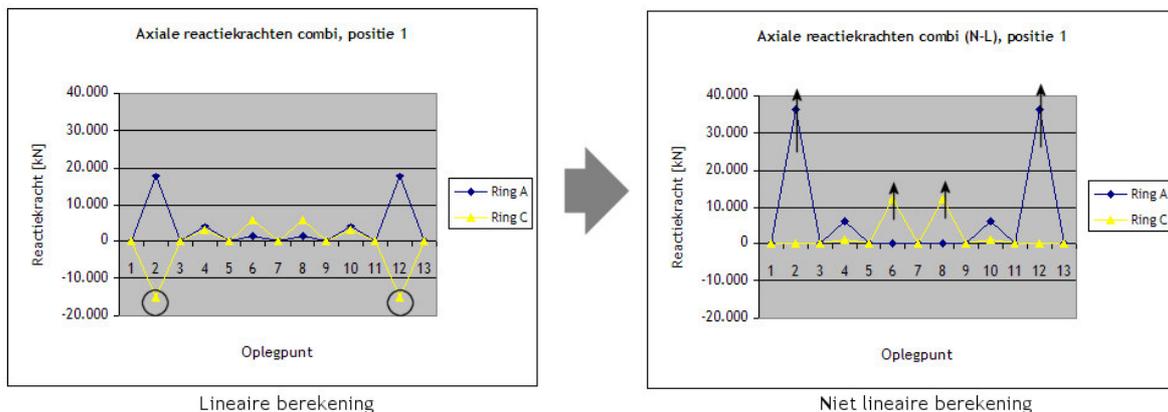
Niet-lineaire Berekening

Om een exact beeld te krijgen van het verloop van de reactiekrachten onder de ringen, na het ontstaan van trek, is een niet-lineair elastische berekening uitgevoerd. De opleggingen nemen in dit geval enkel drukkrachten op. De berekening is voor de belastingcombinatie eigen gewicht hoofddraagconstructie en wind uit richting ring C uitgevoerd.

In figuur 250 en figuur 251 zijn de reactiekrachten getoond voor zowel de lineaire berekening als de niet-lineaire berekening.



Figuur 250 - Vergelijk radiale reactiekrachten lineaire en niet-lineaire berekening



Figuur 251 - Vergelijk axiale reactiekrachten lineaire en niet-lineaire berekening

Als gevolg van het niet op kunnen nemen van de trek zal de constructie enkele centimeters loskomen van de oplegging (6 à 9 cm inclusief belastingfactoren). Trek in de opleggingen treedt enkel op in de UGT ($\gamma_{ver} = 1,5$) in de voor vervorming gebruikelijke BGT ($\gamma_{ver} = 1,0$) zal geen trek optreden en de constructie zal dan ook niet loskomen van de opleggingen.

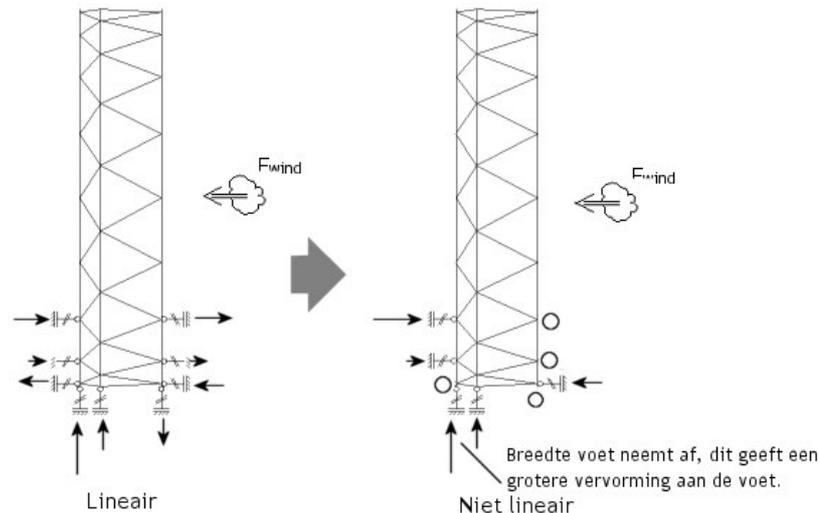
Verskil lineaire en niet-lineaire berekening

Het verloop van de reactiekrachten volgens de lineaire berekening vertoont een aantal verschillen met het krachtenverloop volgens de niet-lineaire berekening.

- Het grootste verschil is het wegvallen van de steunpunten waar trek in ontstaat. Hierdoor zal de verdeling van de momentopname door de koppels in radiale en axiale richting wijzigen. Het aandeel van het koppel in de radiale richting neemt af en het koppel in de axiale richting neemt toe.

De toename van het koppel in de axiale richting leidt tot een stijging van de axiale reactiekrachten.

- Door het wegvallen van het radiale steunpunt onder ring C zal de funderingsstijfheid afnemen. Hierdoor zal de rotatie van de constructie aan de voet toenemen. Waar bij de lineaire berekening sprake was van een inklemming aan de voet, zal de vervorming van de voet in het niet-lineaire geval (waar de ondersteuning onder ring C wegvalt) meer lijken op een scharnierende oplegging. Als gevolg van de toegenomen rotatie zal tevens de totale vervorming van de constructie toenemen.



Figuur 252 - Schematisatie gedrag constructie lineaire en niet-lineaire berekening

Conclusie

Door de plaatsing van de axiale opleggingen op meerder niveaus zal de constructie niet kantelen onder windbelasting. Het huidige ontwerp waarbij de axiale opleggingen over de gehele oplegglengte zijn verdeeld, is stabiel.

Wanneer de constructie enkel door het eigen gewicht van de hoofdconstructie en de wind wordt belast, zal in de UGT in de radiale opleggingen onder ring C een trekkracht ontstaan. Deze trek kan niet worden opgenomen, waardoor de opleggingen vervallen. Het kantelmoment zal vervolgens door de resterende radiale en axiale opleggingen worden opgenomen.

Door het wegvallen van de opleggingen zullen de vervormingen van de fundering en van het rad toenemen.

In werkelijkheid zal de permanente belasting op de constructie toenemen met het eigen gewicht van de hoofdcapsules. Wanneer ook van het eigen gewicht van de hoofdcapsules in de berekening wordt meegenomen, ontstaat er geen trek in de radiale steunpunten ontstaan.

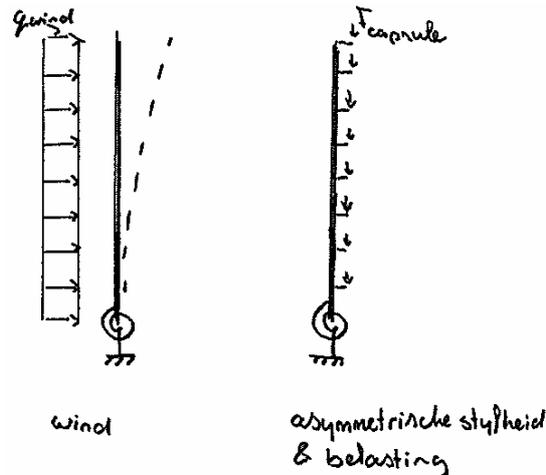
8.1.3 Tweede orde effect

In het ontwerp van de stabiliteitsconstructie voor hoogbouw is het tweede orde effect veelal niet te verwaarlozen. In veel gevallen zorgt de windbelasting voor een eerste orde uitbuiging, deze uitbuiging neemt als gevolg van de excentriciteit van de verticale belastingen verder toe.

De grootte van de tweede orde uitbuiging is afhankelijk van de stijfheid van de constructie en de grootte van de aanpendelende belastingen. Voor stabiliteit in hoogbouw zal de vergrotingsfactor ten gevolge van het tweede orde effect veelal tussen 1,0 en 1,2 liggen.

In het Great Dubai Wheel zal de eerste orde uitbuiging niet enkel door de windbelasting worden veroorzaakt. In het ontwerp zijn de vakwerken asymmetrisch geplaatst, hierdoor verschilt de stijfheid van de constructie in axiale richting. De asymmetrische

stijfheid gecombineerd met de asymmetrische plaatsing van de hoofdcapsules veroorzaakt een extra eerste orde uitbuiging.



Figuur 253 - Oorzaken eerste orde uitbuiging Great Dubai Wheel

Bepaling tweede orde effect

Het tweede orde effect wordt bepaald met behulp van het in hoofdstuk 5 getoonde ESA-model. Uit dit model wordt de uitbuiging bepaald ten gevolge van de asymmetrische belasting (eigen gewicht) in combinatie met de windbelasting. De uitbuiging wordt bepaald met behulp van een eerste orde lineaire berekening ($\delta_{1e\text{ orde}}$) en een tweede orde geometrisch niet-lineaire berekening ($\delta_{2e\text{ orde}}$). Het tweede orde effect ($n/(n-1)$) wordt bepaald met de volgende formule:

$$n/(n-1) = \delta_{2e\text{ orde}}/\delta_{1e\text{ orde}}$$

Voor de bepaling van het tweede orde effect wordt het rad als een statische constructie beschouwt. Er wordt slechts één positie bekeken.

	Wind, ring A	Wind, ring C
Eigen gewicht hoofdraagconstructie	20 mm	20 mm
Eigen gewicht hoofdcapsule	80 mm	80 mm
Wind ring A	347 mm	- mm
Wind ring C	- mm	-347 mm
Totaal 1^e orde	447 mm	-247 mm
Totaal 2^e orde	478 mm	-270 mm
Tweede orde effect	1,07	1,09

Tabel 46 - Bepaling tweede orde effect

De invloed van de tweede orde uitbuiging op de krachten in de constructie is lager dan 10%. Zo zal de normaalkracht met slechts 1 à 2% toenemen.

Het tweede orde effect van de constructie is kleiner dan 10%. Voor een hoogbouw dient deze factor tussen de 0 en 20% te liggen. De constructie voldoet aan de eisen gesteld aan het tweede orde effect.



8.1.4 Conclusie en aanbevelingen met betrekking tot globale stabiliteit

De globale stabiliteit van de constructie voldoet.

Om de globale stabiliteit te waarborgen is het allereerst noodzakelijk om een stabiele dwarsdoorsnede te ontwerpen. Het huidige ontwerp van de dwarsdoorsnede als ongeschoord raamwerk is stabiel. In het ontwerp zal de rotatiestijfheid van de knooppunt een oneindig stijf knooppunt benaderen.

Door de plaatsing van de axiale opleggingen op meerder niveaus zal de constructie niet kantelen onder windbelasting. Het huidige ontwerp waarbij de axiale opleggingen over de gehele opleglengte zijn verdeeld, is stabiel.

Het tweede orde effect van de constructie is kleiner dan 10%. Deze waarde is vergelijkbaar met de voor hoogbouw gebruikelijke waarden, welke tussen de 0 en 20% liggen

Aanpassingen aan het huidige ontwerp zijn vanuit het oogpunt van de globale stabiliteit niet noodzakelijk.

8.2 Lokale stabiliteit

Om de stabiliteit van de constructie te garanderen zal naast de globale stabiliteit tevens de lokale stabiliteit van de constructieve elementen getoetst moeten worden. Gecontroleerd dient te worden of de elementen niet uitknikken onder de belasting. Verder moet ook de plooiestabiliteit van de constructieve elementen gecontroleerd.

8.2.1 Knikinstabiliteit

De controle van de constructieve elementen kan niet enkel op sterkte plaatsvinden. Er zal tevens gekeken moeten worden naar de stabiliteit van de constructieve elementen. Zo moet voorkomen worden dat de elementen uitknikken.

In de constructieve elementen van het rad ontstaat naast een normaalkracht tevens een moment. Dit moment is het gevolg van de modellering van het rad met stijve knooppunten. Om de lokale stabiliteit van de constructieve elementen te garanderen is het noodzakelijk te voorkomen dat de elementen uitknikken onder de belasting.

Controle methode

Voor de controle van de stabiliteit van de constructieve elementen, waarin een normaalkracht en een moment optreedt, is gebruik gemaakt van de stabiliteitscontrole uit de NEN 6771, 'Staalconstructies - stabiliteit', art. 12.3.1.2.1.

De controle is gebaseerd op een eerste orde elastische berekening. In de controleformule is rekening gehouden met het optreden van een moment in twee richtingen. In het model zullen in twee richtingen momenten optreden, de grootste momenten zullen echter in de radiale richting optreden (M_y) de momenten in axiale richtingen (M_z) zijn over het algemeen lager.

Voor de controle van de constructie zijn de onderstaande formules gebruikt [NEN 6771]. In deze formules is rekening gehouden met zowel het optreden van een normaalkracht als moment.

$$\frac{N_{C;sd}}{N_{C;wd}} + \frac{n_y}{n_y - 1} \left(\frac{F_{y;tot;sd} \cdot e_y^*}{M_{y;wd}} + \frac{M_{y;equ;sd}}{\omega_{kip} \cdot M_{y;wd}} \right) + \frac{n_z}{n_z - 1} \cdot \frac{\chi_y \cdot M_{z;equ;sd}}{M_{z;wd}} \leq 1$$

$$\frac{N_{C;sd}}{N_{C;wd}} + \frac{n_y}{n_y - 1} \cdot \frac{\chi_z \cdot M_{y;equ;sd}}{\omega_{kip} \cdot M_{y;wd}} + \frac{n_z}{n_z - 1} \cdot \frac{M_{z;equ;sd} + F_{z;tot;sd} \cdot e_z^*}{M_{z;wd}} \leq 1$$

$N_{C;sd}$ Is de rekenwaarde van de normaalkracht in de staaf ten gevolge van de belasting

$N_{C;wd}$ Is de rekenwaarde van de normaalkracht met betrekking tot de capaciteit in de uiterste grenstoestand. (NEN 6770, art. 11.2.2)

n Is de verhouding tussen de Euler-kniklast en de belasting werkende op de beschouwde staaf;

$$n = \frac{F_{y;E}}{F_{y;tot;sd}}$$

$$F_{y;E} = \frac{\pi^2 \cdot E_d \cdot I_y}{l_{y;buc}^2}$$

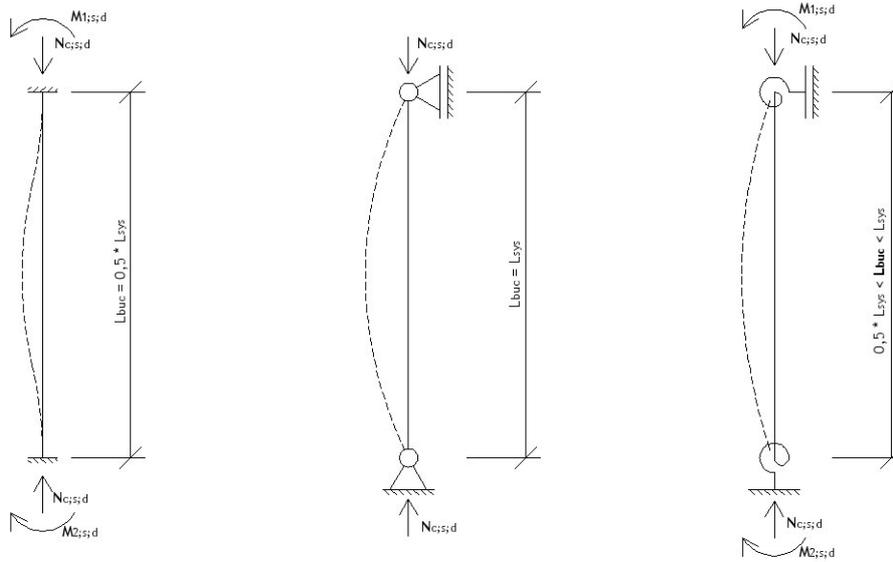
E_d Is de elasticiteitsmodulus



	I_y	Is het traagheidsmoment
	$l_{y;buc}^2$	Is de kniklengte
$F_{y;tot;s;d}$		Is de som van de normaalkrachten waarvoor de beschouwde staaf de stabiliteit waarborgt.
e_y^s		Is de imperfectieparameter, die het gecombineerde effect in rekening brengt van alle imperfecties, zoals initiële vooruitbuiging, restspanningen, inhomogeniteiten.
	$e_y^s = \alpha_k \cdot (\lambda_{y;rel} - \lambda_0) \cdot \frac{M_{y;mid}}{N_{c;mid}}$	
	$\lambda_{y;rel}$	Is de relatieve slankheid (art.12.1.1.2)
	α_k, λ_0	Zijn de factoren in de instabiliteitkromme (art. 12.1.1.4)
$M_{y;u;d}$		De rekenwaarde van het buigend moment met betrekking tot de capaciteit in de uiterste grenstoestand. (NEN 6770, art. 11.2.3) $M_{y;u;d} = W_{y;el} \cdot f_{y;d}$.
ω_{kip}		Is de kipfactor, waarmee de gevoeligheid voor torsieknik in rekening wordt gebracht (art.12.2.2) .
$M_{y;equ;s;d}$		Is de rekenwaarde van het equivalente moment om de y-as ten gevolge van de belasting waarmee het momentenbeeld in rekening is gebracht.
		Indien de staaf deel uitmaakt van een geschoord raamwerk en in het vlak van dat raamwerk wordt belast door momenten om de y-as, is $M_{y;equ;s;d}$ de grootste waarde van:
		$ 0,1 (M_{y;2;s;d} - M_{y;1;s;d}) + M_{y;mid;s;d} $ (12.3-4a)
		en
		$ 0,4 M_{y;2;s;d} $ (12.3-4b)
		als is aangehouden: $l_{y;buc} = l_{sys}$
		of
		$ 0,1 (M_{y;2;s;d} - M_{y;1;s;d}) + M_{y;mid;s;d} $ (12.3-5a)
		en
		$ 0,6 M_{y;2;s;d} $ (12.3-5b)
		als is aangehouden: $l_{y;buc} = l_{y;ef}$
χ_y, χ_z		factoren afhankelijk van de classificatie van het raamwerk.

Kniklengte

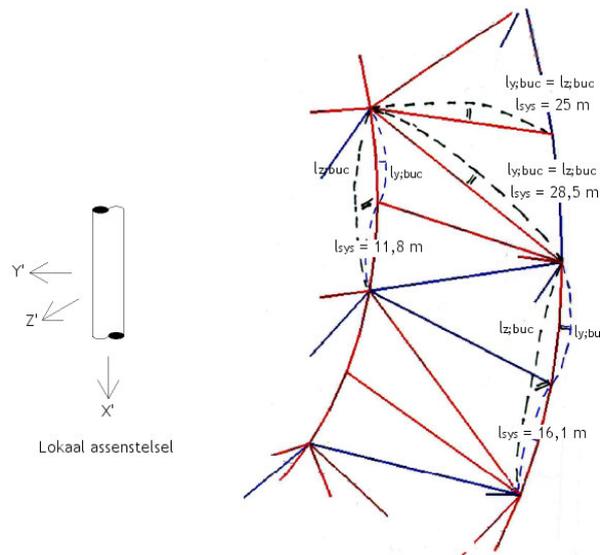
De te gebruiken **kniklengte** (l_{buc}) is afhankelijk van de gekozen verbinding. Wanneer de verbinding als volledig ingeklemd beschouwd kan worden, dan bedraagt de kniklengte de helft van de staaflengte. Bij een scharnierende verbinding is de kniklengte gelijk aan de staaflengte. In werkelijkheid zal in de verbinding noch volledige inklemming, noch een volledig scharnier ontstaan; de verbinding zal zich gedragen als een rotatieveer. De waarde voor de kniklengte zal tussen de twee eerder genoemde waarden liggen.



Figuur 254 - Knikvormen, resp. ingeklemde, scharnierende en verende knooppunten

Voor de toetsing van de elementen op stabiliteit is als kniklengte de systeemplengte vermenigvuldigt met een factor 0,9 aangehouden. ($l_{buc} = 0,9 \cdot l_{sys}$)

Momenteel is nog weinig bekend van de eigenschappen in de verbindingen. Om de constructie te toetsen op stabiliteit is ervoor gekozen om de systeemplengte te vermenigvuldigen met een factor 0,9. Dit is een veilige conservatieve aanname.



Figuur 255 - Knikvormen elementen Great Dubai Wheel

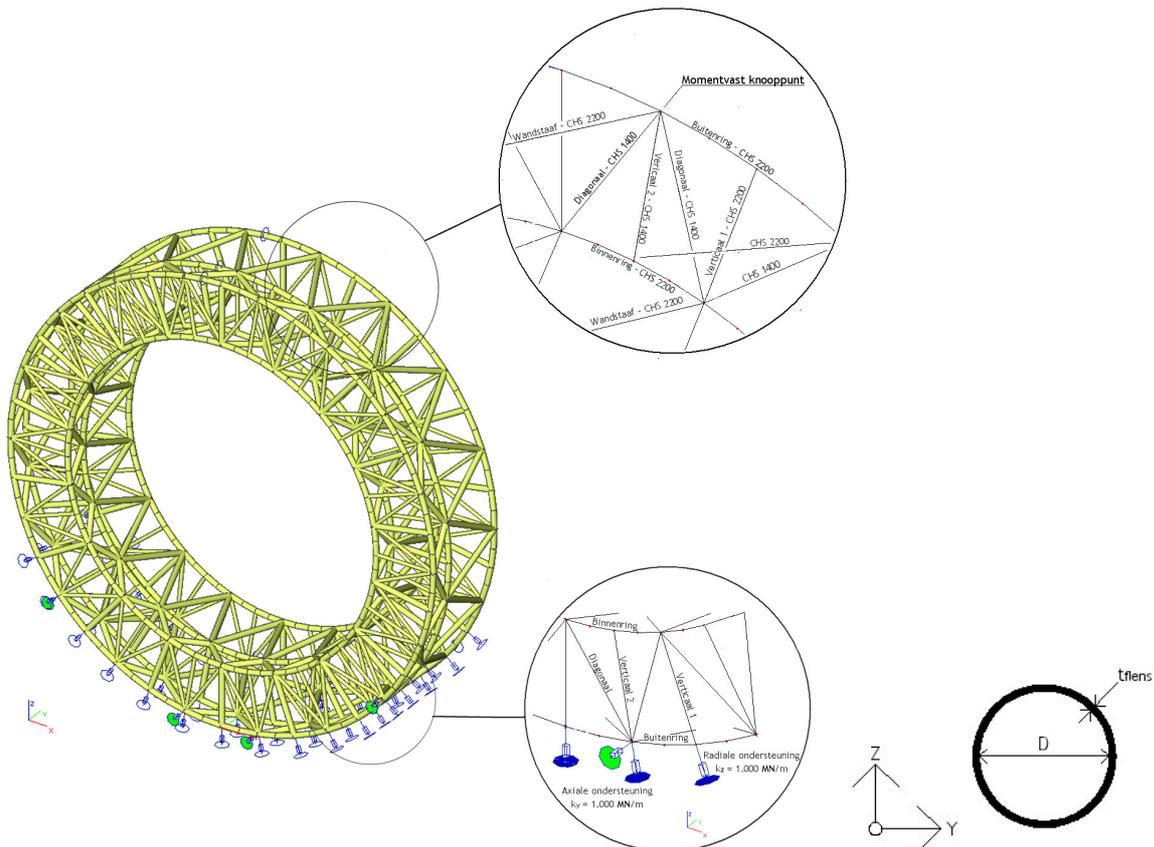
Elementen

Voor het Great Dubai Wheel zijn twee profielsoorten gebruikt. Voor de zwaarbelaste elementen in de buitenring, binnenring, verticaal 1 en de verbindingsdiagonalen is een buisprofiel toegepast met een diameter van 2,2 m en een wanddikte van 40 mm. Voor de overige elementen is de diameter van 1,4 m en een wanddikte van 40 mm toegepast.



	CHS 1440, t = 40	CHS 2220, t = 40
D	1440 mm	2220 mm
t _{flens}	40 mm	40 mm
A	175.929 mm ²	273.947 mm ²
I _y = I _z	4,31E+10 mm ⁴	1,63E+11 mm ⁴

Tabel 47 - gebruikte profielen



Figuur 256 - Overzicht elementen Great Dubai Wheel

Voor de controle van de knikstabiliteit van de elementen is uitgegaan van rechte randprofielen. In het ESA-model is echter uitgegaan van geknikte randprofielen, deze geknikte profielen zullen een lagere veiligheid tegen uitknikken hebben en bovendien een groter piekmoment veroorzaken, zie Hoofdstuk 6. Het gebruik van rechte elementen voor de randprofielen is efficiënter voor zowel de knikstabiliteit, als voor de optredende spanningen in deze profielen.

Gebruik van recht randprofielen zal zowel de stabiliteit, als sterkte eigenschappen gunstig beïnvloeden. Rechte randprofielen hebben de voorkeur boven gebogen, of geknikte randprofielen.

Belastingen

Voor de controle op stabiliteit is enkel gekeken naar de elementen in ring C.

De volgende belastingen zijn aangebracht:

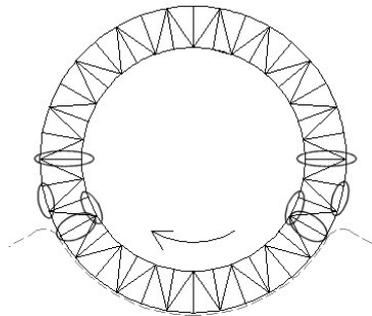
- Eigen gewicht constructie-elementen $\gamma_d = 1,2$
- Eigen gewicht van de hoofdcapsule $\gamma_d = 1,2$
- veranderlijke belasting hoofdcapsule $\gamma_d = 1,5$
- Windbelasting, vanuit de richting van ring A $\gamma_d = 1,5$

De invloed van de belasting komende uit de zichtcapsules op het krachtsverloop in ring C is zeer klein ($\ll 1\%$), deze belasting is dan ook niet meegenomen in de controle van de lokale stabiliteit van de elementen in ring C.

Bij de controle is enkel gekeken naar de stabiliteit van het element waarin de hoogste normaalkracht optreedt. Verder is het moment in axiale richting (M_z) niet meegenomen in de controle. Voor de definitieve controle van de knikstabiliteit zullen ook enkele andere elementen gecontroleerd moeten worden, waaronder de elementen met het grootste moment, ook zal het moment in axiale richting (M_z) meegenomen worden.

	N'_d	$M_{y;1;d}$	$M_{y;mid;s;d}$	$M_{y;2;d}$	$M_{y;equ;d}$	$l_{y;buc} = 0,9 l_{sys}$	$l_{z;buc} = 0,9 l_{sys}$
Buitenring (CHS 2220)	-57.000 kN	-7.150 kNm	9.300 kNm	-15.700 kNm	10.200 kNm	14,5 m	29,0 m
Buitenring (CHS 2220)	-62.000 kN	-6.600 kNm	-11.800 kNm	15.000 kNm	11.000 kNm	10,6 m	21,2 m
Verticaal 1 (CHS 2220)	-27.000 kN	10.850 kNm	0 kNm	-11.800 kNm	7.100 kNm	22,5 m	22,5 m
Verticaal 2 (CHS 1440)	-7.300 kN	-650 kNm	0 kNm	-700 kNm	400 kNm	22,5 m	22,5 m
Diagonaal (CHS 1440)	-41.000 kN	1.900 kNm	0 kNm	-2.600 kNm	1.600 kNm	25,8 m	25,8 m

Tabel 48 - Overzicht krachten ter plaatse van maximale normaalkracht



Figuur 257 - Locatie grootste normaalkracht, positie 1

Controle

De in tabel 48 getoonde waarden zijn aan de hand van de volgende formules gecontroleerd:

$$1. \frac{N_{C;1;d}}{N_{C;1;d}} + \frac{n_y}{n_y - 1} \left(\frac{F_{y;tot;1;d} \cdot e_y^*}{M_{y;1;d}} + \frac{M_{y;equ;1;d}}{\omega_{kip} \cdot M_{y;1;d}} \right) + \frac{n_z}{n_z - 1} \cdot \frac{X_y \cdot M_{z;equ;1;d}}{M_{z;1;d}} \leq 1$$

$$2. \frac{N_{C;1;d}}{N_{C;1;d}} + \frac{n_y}{n_y - 1} \cdot \frac{X_z \cdot M_{y;equ;1;d}}{\omega_{kip} \cdot M_{y;1;d}} + \frac{n_z}{n_z - 1} \cdot \frac{M_{z;equ;1;d} + F_{z;tot;1;d} \cdot e_z^*}{M_{z;1;d}} \leq 1$$

De uitkomsten van de controle zijn in te zien tabel 49.



	Controle			
	Toets 1	Toets 2		
Buitenring	0,8	0,63	< 1	Voldoet
Binnenring	0,85	0,66	< 1	Voldoet
Verticaal 1	0,43	0,29	< 1	Voldoet
Verticaal 2	0,15	0,13	< 1	Voldoet
Diagonaal	0,86	0,75	< 1	Voldoet

Tabel 49 - Veiligheid profielen tegen knikken

Doordat in de bovenstaande controle enkel is gekeken naar de profielen met de grootste normaalkracht is de lokale stabiliteitscontrole onvolledig. In de controle zal immers tevens gekeken moeten worden naar de stabiliteit ter plaatse van het grootste moment. In hoofdstuk 6 bleek dat de huidige profielen niet voldoe op statische sterkte, in de profielen van de binnen- en buitenring werd de vloeispanning, onder windbelasting en eigen gewicht, overschreden ter plaatse van het maximale moment. Deze elementen zullen dan ook niet voldoen aan de lokale stabiliteitseis

Conclusie

De toegepaste buisprofielen voldoen niet aan de eisen gesteld aan knikstabiliteit.

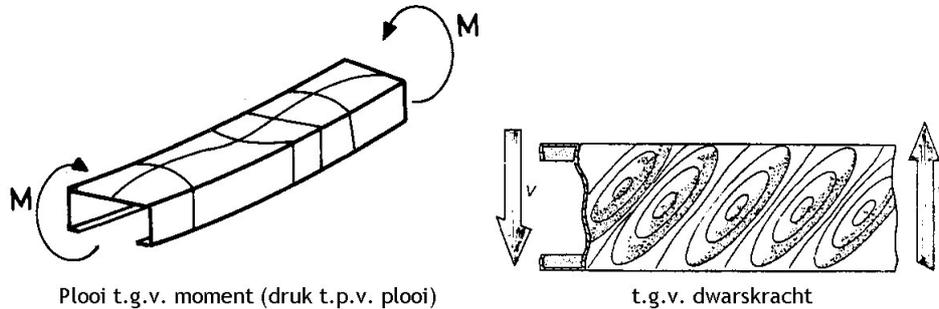
De veiligheidsmarge voor de elementen in de buitenring, binnenring en diagonalen is ter plaatse van de grootste normaalkracht erg klein. Ter plaatse van het grootste moment wordt in de binnen- en buiten ring de vloeispanning overschreden en zal een lokale instabiliteit optreden.

In de berekening zijn een aantal vereenvoudigingen uitgevoerd, waardoor de uitkomsten nog geverifieerd dienen te worden:

- Bij de controle van de profielen is uitgegaan van een volledig rechte profielen, de kromming van de randprofielen is niet als extra excentriciteit meegenomen. Hierdoor is de uiteindelijke veiligheid van deze elementen tegen knikken lager uitvallen dan de gevonden waarden.
- Het moment in axiale richting (M_z) is niet in de berekening meegenomen. Het is echter mogelijk dat dit moment in bijvoorbeeld de elementen van de buitenring de veiligheidsmarge verkleint, of geheel wegneemt.

8.2.2 Plooi instabiliteit

Naast knikinstabiliteit kan in de profielen een plooi instabiliteit optreden. Plooi treedt op bij relatief dunne, plaatvormige profieldelen die worden belast door een combinatie van druk, buiging en afschuiving in het vlak van de plaat, zie figuur 258.



Figuur 258 - Ontstaan plooi in profielen, profielen wijken af van profielen in Great Dubai Wheel

Het is niet nodig profielen van doorsnedeklasse 1,2 en 3 op plooi te controleren, profielen uit klasse 4 dienen daarentegen wel gecontroleerd te worden. De profielklasse is afhankelijk van de verhouding van de buisdiameter en de wanddikte.

	doorsnede klasse			
	1	2	3	4
D/t	33,1	46,3	59,6	>59,6

Tabel 50 - Verhouding D/t per doorsnedeklasse voor S355, volgen NEN 6770

Huidig ontwerp

In het huidige ontwerp van het Great Dubai Wheel is gebruik gemaakt van twee verschillende profieldoorsneden, te weten: CHS 2220, D = 2220 mm, t = 40 mm en CHS 1440, D = 1440 mm, t = 40 mm. De verhouding tussen de diameter en de wanddikte is 55, respectievelijk 36. Hiermee valt geen van de profielen in doorsnedeklasse 4 en is toetsing op plooi instabiliteit niet noodzakelijk.

Plooi zal bovendien enkel optreden wanneer de profielen tot nabij de vloeispanning worden belast. Vanuit het oogpunt van vermoeiing worden de profielen waarschijnlijk niet volledig belast, waardoor de spanning in de profielen lager ligt dan de vloeispanning. In de huidige profielen van de binnen- en buitenring zal de vloeispanning wel worden bereikt, maar deze zullen worden aangepast, zoals in H6 is beschreven. De spanningen nemen hierdoor af en er zal geen gevaar voor plooi zijn.

Toetsing op plooi instabiliteit is enkel noodzakelijk voor profielen welke volgens de NEN 6770 in doorsnedeklasse 4 vallen. De huidige profielen vallen niet in deze klasse. Controle op plooi instabiliteit is dan ook niet noodzakelijk.

Om plooi in de profielen te voorkomen is het noodzakelijk om de verhouding D/t laag te houden, bij de aanpassing van de profieldoorsnede om aan de sterkte en vermoeiingseisen te voldoen zal dan ook rekening met deze verhouding moeten worden gehouden.



8.2.3 Conclusie en aanbevelingen met betrekking tot lokale stabiliteit

De in het huidige ontwerp gebruikte elementen voldoen niet aan de lokale stabiliteitseisen.

In de huidige profielen van zowel de buiten, als de binnenring zal de vloeispanning overschreden worden, waardoor de constructie instabiel reageert.

Om ook op lokale stabiliteit te voldoen zijn aanpassingen aan de profieldoorsneden noodzakelijk. Wanneer de profieldoorsneden voor sterkte worden aangepast, zal rekening gehouden moeten worden met lokale stabiliteit. Bij de toename van de profieldoorsnede zal ter voorkoming van plooi instabiliteit de verhouding $D/t < 59,6$ moeten zijn. De toename van profieldoorsnede zal de veiligheid tegen knikinstabiliteit verhogen.

8.3 Conclusie

Het huidige ontwerp van het Great Dubai Wheel is stabiel. Zowel aan de eisen met betrekking tot de globale, als de lokale stabiliteit wordt voldaan. Vanuit het oogpunt van stabiliteit is het niet noodzakelijk op het ontwerp aan te passen.

Globale stabiliteit

De globale stabiliteit van de constructie voldoet.

Om de globale stabiliteit te garanderen is het allereerst noodzakelijk om een stabiele dwarsdoorsnede te ontwerpen. Het huidige ontwerp van de dwarsdoorsnede als ongeschoord raamwerk is stabiel. In het ontwerp van de knooppunten moet de rotatiestijfheid een oneindig stijf knooppunt benaderen.

De kantelstabiliteit wordt verkregen door de plaatsing van de axiale opleggingen op meerdere niveaus.

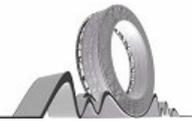
Het tweede orde effect van de constructie is kleiner dan 10 %. Deze waarde is vergelijkbaar met de voor hoogbouw gebruikelijke waarden, welke tussen de 0 en 20 % liggen.

Aanpassingen aan het huidige ontwerp zijn vanuit het oogpunt van de globale stabiliteit niet noodzakelijk.

Lokale stabiliteit

De in het huidige ontwerp gebruikte elementen voldoen niet aan de lokale stabiliteitseisen.

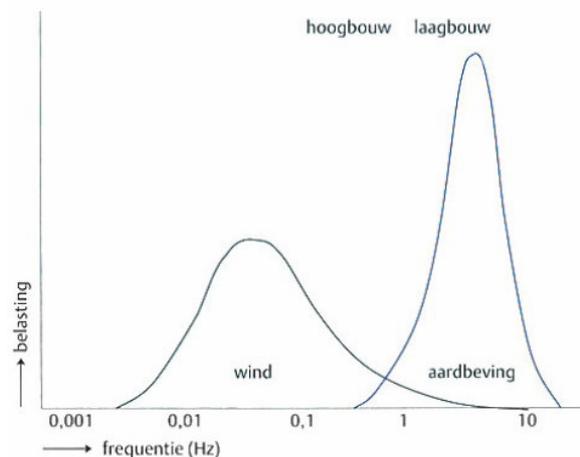
In de huidige profielen van zowel de buiten, als de binnenring zal de vloeispanning overschreden worden, waardoor lokale instabiliteit zal ontstaan. Om ook op lokale stabiliteit te voldoen zijn aanpassingen aan de profieldoorsneden noodzakelijk.



9 Dynamisch gedrag

Naast statische belastingen, welke relatief langzaam op de constructie aangrijpen en onveranderlijk van karakter zijn, zal de constructie tevens belast worden door dynamische belastingen. Deze belastingen worden plotseling aangebracht en veranderen snel van grootte en richting. De exacte aard en het gedrag van de constructie onder dynamische belasting is moeilijk vast te stellen.

Voorbeelden van de dynamische/ quasi-statische belastingen zijn wind en aardbevingsbelasting. De gevoeligheid van een bouwwerk voor de dynamische belasting is afhankelijk van de eigenfrequentie van het bouwwerk en de trillingsfrequentie van de dynamische belasting. De trillingsfrequentie van aardbevingen ligt over het algemeen tussen 1 en 10 Hz. De trillingsfrequentie voor windbelasting ligt tussen 0,1 en 1 Hz. De eigenfrequentie van hoogbouw ligt over het algemeen lager dan 1 Hz, waardoor hoogbouw gevoeliger is voor windtrillingen dan voor aardbevingstrillingen.

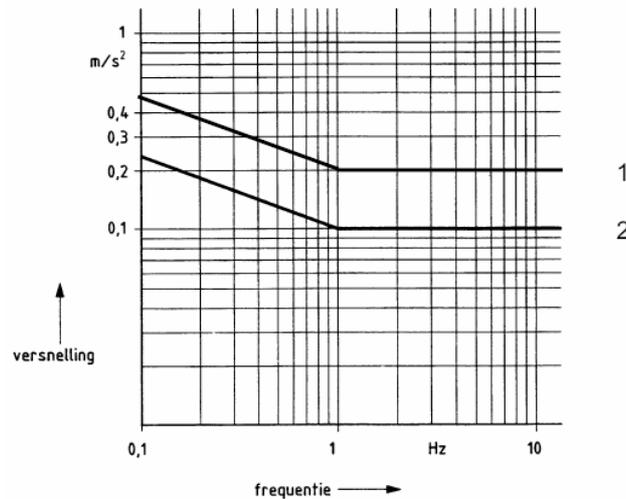


Figuur 259 - Belastingenspectrum voor wind en aardbeving

Onder invloed van dynamische belastingen kunnen zich in het gebouw onacceptabele trillingen voordoen. Diverse factoren zijn van invloed op hoe mensen op trillingen ervaren, zoals de richting van de beweging, de activiteit van de waarnemer, de tijdsduur van de beweging, hoe vaak de beweging zich voordoet, of de beweging hoorbaar of zichtbaar is, enz. De mate van comfort wordt niet bepaald door de uitwijking van het gebouw, maar door de versnelling van de beweging.

In NEN 6702 is een limiet gesteld aan de optredende versnelling, zie figuur 260. Voor gebouwen met een woonfunctie is de limiet gesteld op 0,2 voor een eigenfrequentie van 0,1 Hz. De toelaatbare versnelling neemt lineair af tot 0,1 m/s^2 voor een eigenfrequentie van 1,0 Hz en hoger.

Het dynamische gedrag van de constructie ten gevolge van windtrillingen zal de windbelasting op het gebouw doen toenemen. Deze toename wordt in rekening gebracht met de dynamische vergrotingsfactor (Φ_1). Voor de bepaling van de totale windbelasting is in hoofdstuk 5 een dynamische vergrotingsfactor van 1,1 toegepast. In paragraaf 9.3 wordt deze waarde gecontroleerd.



Figuur 260 - Begrenzingseis voor de versnelling door wind voor verblijfsruimten in gebouwen, 1 = wonen, 2 = kantoorfunctie (NEN 6702, figuur 21)

9.1 Eigenfrequentie

Om de gevoeligheid van het gebouw voor trillingen te onderzoeken is het noodzakelijk om de eigenfrequentie van het gebouw te weten. Ter bepaling van de eigenfrequentie van het rad is gebruik gemaakt van twee methoden.

Om een eerste benadering te krijgen van de eigenfrequentie van het rad is gebruik gemaakt van de NEN 6702 A.4. Vervolgens is het gehele model geanalyseerd met behulp van een eindig elementen programma, ESA PT, waarbij een nauwkeurig inzicht verkregen kon worden in de verschillende eigenfrequenties van het rad.

9.1.1 Bepaling eigenfrequentie volgens NEN 6702, A.4

Om een eerste indruk te krijgen van de eigenfrequentie van het bouwwerk is gebruik gemaakt van de formule gegeven in NEN6702, A.4.

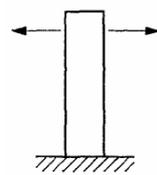
$$f_e = \sqrt{\frac{a}{\delta}}$$

, waarin:

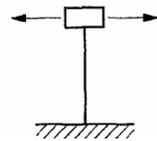
f_e = de eerste eigenfrequentie van de constructie, in Hz

δ = grootste uitbuiging van de constructie, belast door belastingen gecombineerd volgens de momentane belasting, in m

a = de trillingsversnelling loodrecht op het constructiedeel, afhankelijk van het statisch systeem en de verdeling van de massa in het systeem, te bepalen volgens figuur 261, in m/s^2 .



massa gelijkmatig verdeeld
over de hoogte: $a = 0,384 \text{ m/s}^2$



massa geconcentreerd aan
uiteinde: $a = 0,25 \text{ m/s}^2$

Figuur 261 - Voorbeelden ter bepaling van de factor a (NEN 6702, figuur A.17)

De formule is gebaseerd op de volgens de mechanica theorie geldende bepaling voor de eigenfrequentie, gebaseerd op de veerstijfheid en de effectieve massa.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m} (1 - D^2)} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\{ F = m \cdot a, F = k \cdot \delta, \rightarrow f_1 \approx (1 / 2\pi) \cdot \sqrt{((F / \delta) / (F/a))} = (1 / 2\pi) \cdot \sqrt{(a / \delta)} \}$$

De belasting ter bepaling van de uitwijking zal bestaan uit het eigen gewicht van de constructie aangevuld met veranderlijke vloerbelasting, volgens de formule:

$$F_{\Sigma \text{mom}; \text{ser}; d} = Y_{f;g; \text{ser}} \cdot G_{\text{rep}} + \sum_{i \geq 1}^n Y_{f;q; \text{ser}} \cdot \psi_k \cdot \psi_i \cdot Q_{i; \text{rep}}$$

, waarin:

$$Y_{f;g; \text{ser}} = 1,0$$

$$G_{\text{rep}} = G_{\text{permanent}} = 321 \text{ 1000 kN}$$

$$\psi_k = 1,0$$

$$\psi_i = 0,40 \quad (\text{voor hotelcapsule})$$

$$0,25 \quad (\text{voor bijeenkomstcapsule})$$

$$0,50 \quad (\text{voor lift- en zichtcapsule})$$

$$Q_{i; \text{rep}} = 775 \text{ kN} \quad (\text{x20, voor hotelcapsule})$$

$$2210 \text{ kN} \quad (\text{x 4, voor bijeenkomstcapsule})$$

$$12,7 \text{ kN} \quad (\text{x 6, voor liftcapsule})$$

$$49 \text{ kN} \quad (\text{x36, voor zichtcapsule})$$

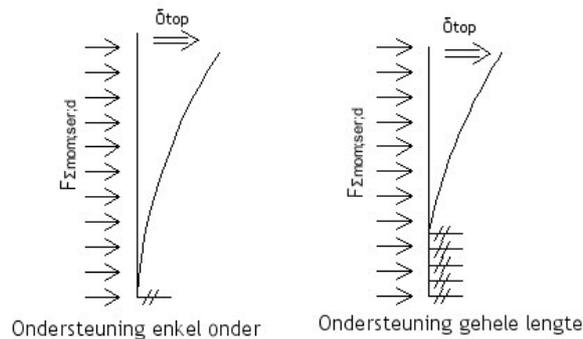
$$F_{\Sigma \text{mom}; \text{ser}; d} \approx 330,6 \cdot 10^3 \text{ kN}$$

In de NEN uitgegaan van een buiglijger (GA is oneindig). In werkelijkheid zal het Great Dubai Wheel echter niet enkel als een buiglijger vervormen, maar zal tevens deels als een afschuiflijger vervormen. Hierdoor neemt de stijfheid af en zal tevens de eigenfrequentie afnemen. Deze nauwkeuriger bepaling is in paragraaf 9.1.2 te vinden, in deze paragraaf zijn de eigenfrequenties van het rad voor twee verschillende posities bepaald.

De topuitwijking onder een momentane belasting is bepaald met behulp van het in hoofdstuk 5 getoonde ESA-model. De momentane belasting is als een axiale kracht (Y-richting) gelijkmatig over de knooppunten van de constructie verdeeld, waarna de topuitwijking is bepaald

Als trillingsversnelling loodrecht op het constructiedeel (a) wordt gekozen voor een gebouw met een gelijkmatig verdeelde massa over de hoogte, $a = 0,384 \text{ m/s}^2$.

De topuitbuiging van het rad is afhankelijk van de veerstijfheid van de opleggingen in radiale richting en het aantal opleggingen in de axiale richting, zie figuur 262.



Figuur 262 - Invloed ondersteuning axiale richting op δ_{top}

De eigenfrequentie voor verschillende ondersteuning en veerstijfheden is te zien in tabel 51. De eigenfrequentie is sterk afhankelijk van de configuratie van de axiale opleggingen, het huidige ontwerp zowel radiale, als axiale opleggingen over de gehele opleglengte heeft een eerste eigenfrequentie van ongeveer 0,36 Hz.

Er is zowel gekeken naar een constructie met een oneindig stijve oplegging, als met een verende oplegging, waarvan de veerstijfheid 1.000 MN/m bedraagt. Het verschil tussen in eigenfrequentie tussen beide veerstijfheden is zeer laag, dit is het gevolg van de hoge veerstijfheid in de opleggingen.

Oplegging axiale richting	gehele lengte	enkel onder	gehele lengte	enkel onder
veerstijfheid [MN/m]	∞		$1 \cdot 10^3$	
a [m/s ²]	0,384			
δ_{top} [m]	2,646	5,195	2,958	6,124
eigenfrequentie [Hz]	0,38	0,27	0,36	0,25

Tabel 51 - Overzicht eigenfrequentie per oplegtype

Vanwege de lage eerste eigenfrequentie ($< 1 \text{ Hz}$) zal in het ontwerp rekening gehouden moeten worden met de gevoeligheid voor windtrillingen. Het dynamische gedrag van het gebouw is in rekening gebracht bij de bepaling van de windbelasting, hier is een dynamische vergrotingsfactor toegevoegd.

9.1.2 Bepaling eigenfrequentie met behulp van ESA

Om een nauwkeuriger beeld te krijgen van de eigenfrequentie van de constructie is gebruik gemaakt van het eindige elementen programma ESA-PT. Gebruik is gemaakt van de in het programma aanwezige module ter bepaling van de eigenfrequentie.

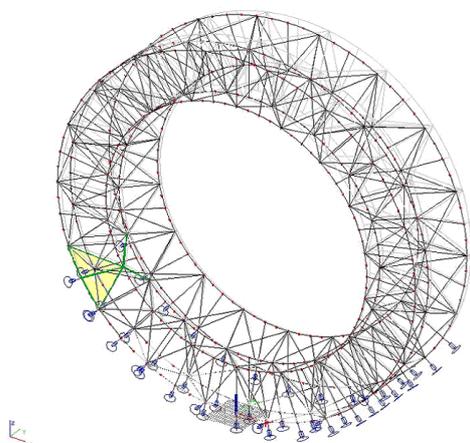


De volgende massa's zijn meegenomen voor de berekening van de eigenfrequentie:

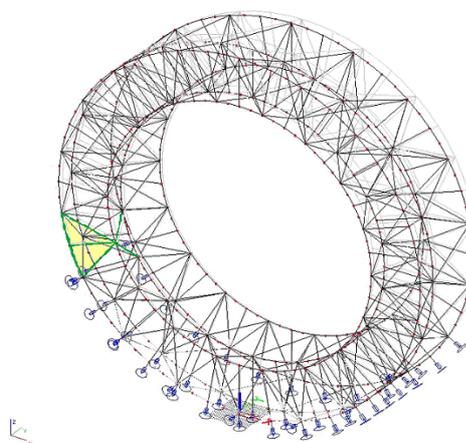
- Het eigengewicht, van de hoofdconstructie en de hoofdcapsules
- De veranderlijke belasting vermenigvuldigd met een momentaanfactor (ψ_i), van de hoofdconstructie en de hoofdcapsules

De massa's komende uit de lift- en zichtcapsules zijn niet meegenomen. De invloed van het meenemen van deze massa's op de eigenfrequenties van de constructie is klein (een $\pm 0,01$ Hz lagere eerste eigenfrequentie).

Bij de bepaling van de eigenfrequentie is gekeken naar het rad in twee posities, zie figuur 263 en figuur 264. Deze posities komen overeen met een rotatie van het rad van 10 graden. Bij de bepaling van de eigenfrequentie van het rad is gebruik gemaakt van het ESA-model zoals is beschreven in hoofdstuk 5.



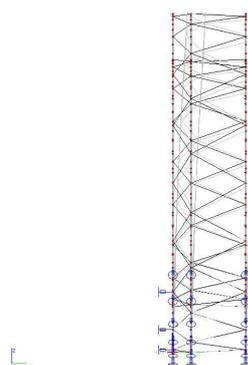
Figuur 263 - Rad positie 1



Figuur 264 - Rad positie 2 De verschillende eigenfrequenties zijn in tabel 52 getoond.

	Positie 1		Positie 2	
$f_{e;1}$	0,34	Hz	0,37	Hz
$f_{e;2}$	0,54	Hz	0,55	Hz
$f_{e;3}$	0,87	Hz	1,18	Hz
$f_{e;4}$	1,15	Hz	1,28	Hz
$f_{e;5}$	1,47	Hz	1,51	Hz
$f_{e;6}$	1,62	Hz	1,73	Hz
$f_{e;7}$	2,06	Hz	2,07	Hz
$f_{e;8}$	2,07	Hz	2,26	Hz

Tabel 52 - Eigenfrequenties rad



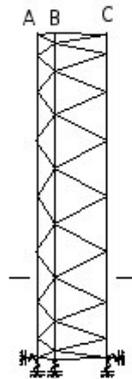
Figuur 265 - Vervorming rad $f_{e;1}$

De eerste eigenfrequentie van het rad treedt, afhankelijk van de positie van het rad, op bij een frequentie van 0,34 Hz à 0,37 Hz. Deze frequentie komt ongeveer overeen met de eigenfrequentie berekend volgens de NEN 6702.

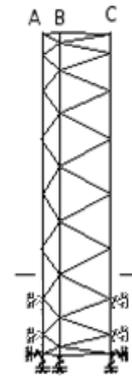
De constructie zal gevoelig kunnen zijn voor windtrillingen.

De berekende eigenfrequenties groter dan 1 Hz zullen enkel optreden ten gevolge van aardbevingen. Vervorming van de constructie bij de hogere orde eigenfrequentie zal meer energie vragen, het is dan ook niet waarschijnlijk dat deze vervormingen zullen optreden.

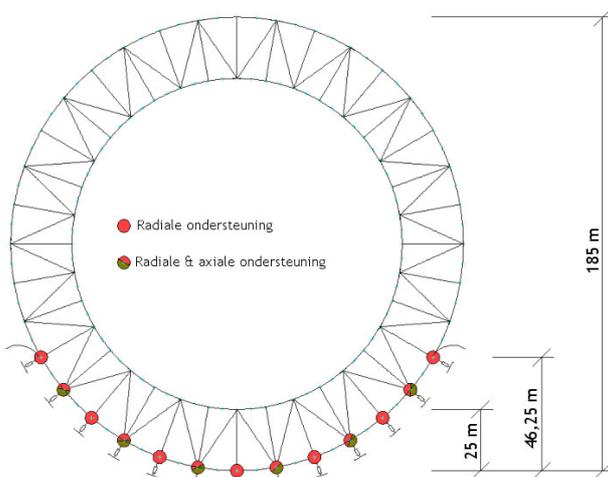
De verschillende vervormingen bij verschillende eigenfrequenties zijn op de in bijlage C, bijgevoegde CD ROM te vinden.



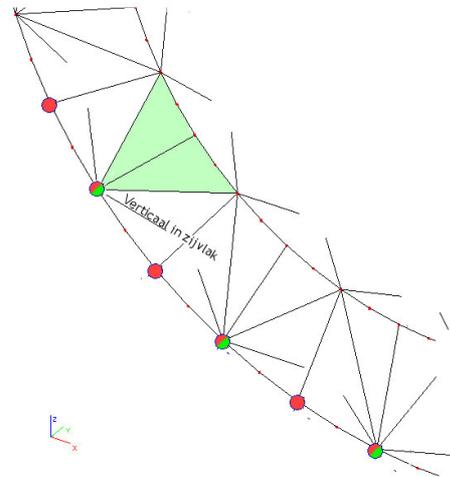
Figuur 266 - Axiale oplegging enkel onder



Figuur 267 - Axiale oplegging gehele lengte



Figuur 268 - Locatie radiale en axiale ondersteuning, voor positie 1



9.1.3 Conclusie

De waarde van de eerste eigenfrequentie van de constructie zal afhankelijk van de positie van het rad variëren tussen 0,34 Hz en 0,37 HZ.

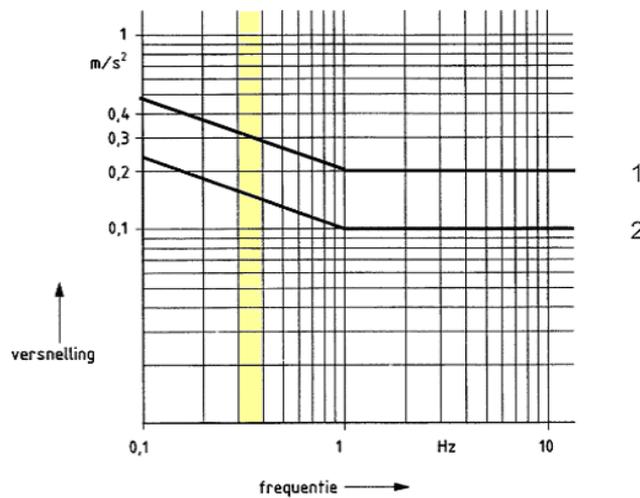
De lage eerste eigenfrequentie toont aan dat de constructie gevoelig kan zijn voor hinderlijke windtrillingen. Deze gevoeligheid zal afhankelijk zijn van de versnellingen in de constructie.

Onder de eerste eigenfrequentie vervormt de constructie als een buigligger.



9.2 Windtrillingen

Windtrillingen zijn hinderlijk voor personen die zich in een verblijfsruimte van een gebouw bevinden indien een versnelling (a) wordt overschreden. De toelaatbare versnelling is onder andere afhankelijk van de frequentie van optreden en de functie van de ruimte.



Figuur 269 - Begrenzingseis voor de versnelling door wind voor verblijfsruimten in gebouwen, 1 = wonen, 2 = kantoorfunctie (NEN 6702, figuur 21)

9.2.1 bepaling versnelling volgens NEN 6702, art 10.5.3

Ter bepaling van de versnelling is gebruik gemaakt van de formule gegeven in NEN 6702 art. 10.5.3.

$$1,6 \times \left[\frac{\phi_2 \cdot \tilde{p}_{w;l} \cdot C_t \cdot b_m}{\rho_l} \right] < a$$

, waarin:

a = begrenzingswaarde voor de versnelling volgens figuur 269, in m/s^2

ρ_l = massa van het gebouw inclusief de massa van de inboedel per strekkende meter hoogte, in kg/m

$$[(33,6 \cdot 10^6) / 9,81] / 185 = 182,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}$$

b_m = gemiddelde breedte bouwwerk loodrecht op de windrichting, in m

$$[40 \text{ m}]$$

C_t = som van de windvormfactoren C_{pe} voor druk en zuiging

$$[1,2]$$

$\tilde{p}_{w;l}$ = het variërende deel van de stuwdruk, in N/m^2

$$[683,0 \text{ N/m}^2]$$

$$\tilde{p}_{w;l} = 100 \ln \left(\frac{h}{0,2} \right)$$

h = gebouwhoogte, in m

$$[185 \text{ m}]$$

Φ_2 = dynamische vergrotingsfactor voor wind, veroorzaakt door trillingen

[0,41]

$$\phi_2 = \sqrt{\frac{0,0344 f_e^{-2/3}}{D \times (1 + 0,12 f_e h) \times (1 + 0,20 f_e b_m)}}$$

f_e = eigenfrequentie

[0,38 Hz]

D = de dempingsmaat van het gebouw

[0,01]

Met behulp van de formule wordt voor gebouwen met een gelijkmatig verdeelde belasting over de hoogte en voor trillingen in de richting van de wind de versnelling a geverifieerd.

Bij toepassing van de formule uit NEN6702 ter controle van de windtrillingen op het Great Dubai Wheel volgt bij een eigenfrequentie van 0,38 Hz:

$$1,6 \times \left[\frac{\phi_2 \cdot \tilde{p}_w \cdot 1 \cdot C_t \cdot b_m}{\rho_1} \right] < a$$

$$1,6 \times ((0,41 \times 683,0 \times 1,2 \times 40) / (182,2 \cdot 10^3)) < 0,15 \text{ m/s}^2$$

$$0,12 < 0,15 \text{ m/s}^2$$

Evenals bij de eigenfrequentie zal ook de versnelling afhankelijk zijn van de wijze van oplegging.

Aannamen

De constructie is aangenomen als een bouwwerk met een gelijkmatig verdeelde belasting over de hoogte. Vanwege de ronde vorm zal belasting komende uit de zwaartekracht verschillen over de hoogte van het bouwwerk.

Als massa ter bepaling van ρ_1 is het volledige eigen gewicht en de momentane veranderlijke belasting van de ring in rekening gebracht, exclusief de belastingfactoren.

Vanwege de gedane aannamen en de vereenvoudiging van het bouwwerk tot een bouwwerk met een gelijkmatig verdeelde belasting zal de werkelijke versnelling afwijken. De hier berekende waarde vormt slechts een indicatie.

Controle

Wanneer de versnelling wordt bepaald van de frequenties berekend in paragraaf 9.1.1 worden de volgende waarden gevonden, zie tabel 53.

Oplegging axiale richting	gehele lengte	enkel onder	gehele lengte	enkel onder
veerstijfheid (Z-richting) [MN/m]	∞		1 · 10 ³	
eigenfrequentie [Hz]	0,38	0,27	0,36	0,25
$a_{\text{optredend}}$ [m/s ²]	0,12	0,17	0,13	0,19
$a_{\text{toelaatbaar}}$ [m/s ²]	0,15	0,16	0,15	0,17

Tabel 53 - Overzicht versnelling per oplegtype

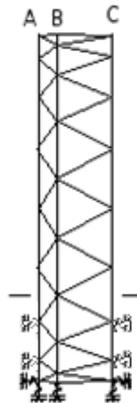
Bij een ondersteuning van het rad in de axiale richting over de gehele opleglengte ligt de optredende versnelling binnen de toelaatbare versnelling van 0,16 m/s².



Wanneer het rad enkel aan de onderzijde in de axiale richting wordt gesteund zal de optredende versnelling hoger liggen. De marge ten opzichte van de toelaatbare versnelling is geheel verdwenen.

Wanneer de constructie over de gehele opleglengte axiaal gesteund wordt, zullen er geen hinderlijke windtrillingen optreden.

Bij de frequenties berekend in paragraaf 9.1.2 is reeds uitgegaan van een axiale ondersteuning van het rad over de gehele opleglengte. Bij een frequentie van 0,34 Hz, respectievelijk 0,37 Hz is de toelaatbare versnelling $0,15 \text{ m/s}^2$. De optredende versnelling bedraagt $0,14 \text{ m/s}^2$ bij 0,34 Hz respectievelijk $0,12 \text{ m/s}^2$ bij 0,37 Hz. Beide versnellingen vallen binnen de aangegeven begrenzingen van $0,15 \text{ m/s}^2$.



Figuur 270 - Oplegging gehele lengte

Conclusie

Het huidige ontwerp van de constructie met axiale opleggingen over de gehele opleglengte zal geen hinder van windtrillingen ondervinden, aan de in de NEN 6702 gestelde begrenzingen wordt voldaan ($a_{\text{optredend}} = 0,13 \text{ m/s}^2$, $a_{\text{max}} = 0,15 \text{ m/s}^2$).

Bij een ondersteuning enkel aan de voet wordt niet aan de begrenzingen voldaan.

In vergelijking met conventionele reuzenraden, als het Beijing Wheel ($f_e=0,35 \text{ Hz}$, $a=0,9 \text{ m/s}^2$) is de versnelling relatief laag. Dit verschil wordt veroorzaakt door de vorm van bevestiging van de constructie en het hogere eigen gewicht van het rad.

9.3 Dynamische vergrotingsfactor (Φ_1)

Om de dynamische windbelasting om te zetten in een statische windbelasting wordt in de NEN 6702 een extra factor toegevoegd, de dynamische vergrotingsfactor (Φ_1).

$$p_w = C_{dim} \times C_{index} \times C_{eq} \times \Phi_1 \times p_w(z)$$

In hoofdstuk 4 is voor de bepaling van de windbelasting een dynamische vergrotingsfactor van 1,1 toegepast. In deze paragraaf zal deze waarde gecontroleerd worden.

Voor de bepaling van de dynamische vergrotingsfactor is gebruik gemaakt van de NEN 6702, bijlage A.4.

9.3.1 bepaling dynamische vergrotingsfactor (Φ_1) volgens NEN 6702, A.4

Voor de bepaling van de dynamische vergrotingsfactor is gebruik gemaakt van de volgende formule, afkomstig uit de NEN 6702, A.4.:

$$\phi_1 = \frac{1 + 7 \cdot I(h) \cdot \sqrt{(B+E)}}{1 + 7 \cdot I(h) \cdot \sqrt{B}}$$

$$B = \frac{1}{0,94 + 0,021h^{\frac{2}{3}} + 0,029b^{\frac{2}{3}}}$$

$$[h = 185 \text{ m}]$$

$$[b = 40 \text{ m}]$$

$$E = \frac{0,0394 \cdot f_e^{\frac{2}{3}}}{D \times (1 + 0,1f_e \cdot h) \times (1 + 0,16f_e \cdot b_m)}$$

$$[D = 0,01]$$

$$[b_m = 12566 / 185 = 68 \text{ m}]$$

$$I(h) = \frac{1}{\ln\left(\frac{h}{0,2}\right)}$$

Deze formule is net als de versnelling afhankelijk van de eigenfrequentie van de constructie en dus van de wijze van oplegging.

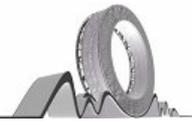
Wanneer de dynamische vergrotingsfactor wordt bepaald van de frequenties berekend in paragraaf 9.1.1 worden de volgende waarden gevonden, zie tabel 54.

Oplegging axiale richting	gehele lengte	enkel onder	gehele lengte	enkel onder
veerstijfheid [MN/m]	∞		$1 \cdot 10^3$	
eigenfrequentie [Hz]	0,38	0,27	0,36	0,25
dynamische vergrotingsfactor (Φ_1)	1,07	1,14	1,08	1,16

Tabel 54 - Overzicht dynamische vergrotingsfactor per oplegtype

De statische windbelasting zal afhankelijk van de ondersteuning toenemen met 7% à 16%.

Bij de frequenties berekend met behulp van ESA PT, paragraaf 9.1.2, is uitgegaan van een ondersteuning van het rad in de axiale richting over de gehele opleglengte. Bij een



frequentie van 0,34 Hz, respectievelijk 0,37 Hz bedraagt de dynamische vergrotingsfactor 1,09 respectievelijk 1,07.

Wanneer wordt uitgegaan van een axiale oplegging over de gehele oplegglengte zal de dynamische vergrotingsfactor kleiner zijn dan 1,1. De in hoofdstuk 4 toegepaste dynamische vergrotingsfactor, ter bepaling van de statische windbelasting, van 1,1 is een veilige aanname.

9.4 Conclusie

De waarde van de eerste eigenfrequentie van de constructie zal afhankelijk van de positie van het rad variëren tussen 0,34 Hz en 0,37 Hz. De lage eerste eigenfrequentie toont aan dat de constructie gevoelig kan zijn voor hinderlijke windtrillingen. Deze gevoeligheid zal afhankelijk zijn van de versnellingen in de constructie. Onder de eerste eigenfrequentie vervormt de constructie als een buigligger.

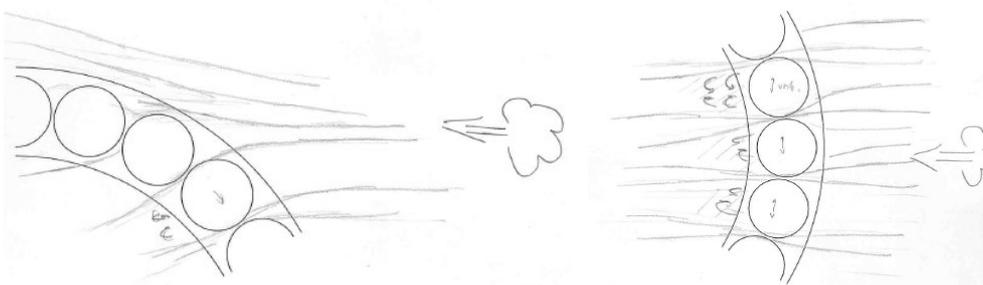
De constructie zal bij een ondersteuning in de axiale richting over de gehele oplegglengte, zoals in het huidige ontwerp, geen last hebben van windtrillingen, aan de in de NEN 6702 gestelde begrenzings eis wordt voldaan ($a_{\text{optredend}} = 0,13 \text{ m/s}^2 < a_{\text{max}} = 0,15 \text{ m/s}^2$). Bij een ondersteuning enkel aan de voet wordt niet aan de begrenzings eis voldaan.

In vergelijking met conventionele reuzenraden, als het Beijing Wheel ($f_e = 0,35 \text{ Hz}$, $a = 0,9 \text{ m/s}^2$), is de versnelling relatief laag. Dit verschil wordt veroorzaakt door vorm en bevestiging van de constructie en het hogere eigen gewicht van het rad.

Wanneer wordt uitgegaan van een oplegging over de gehele hoogte zal de dynamische vergrotingsfactor kleiner zijn dan 1,1. De in hoofdstuk 4 toegepaste dynamische vergrotingsfactor op de windbelasting van 1,1 is een veilige aanname.

Nader onderzoek

In dit hoofdstuk is enkel het dynamische gedrag van de hoofddraagconstructie geanalyseerd. Deze bleek te voldoen. Echter in de hoofddraagconstructie bevinden zich ook capsules, deze capsules zullen als gevolg van onder andere windbelasting onafhankelijk van de hoofddraagconstructie hinderlijk kunnen gaan trillen.



Figuur 271 - Windpatroon rond cabine

Het dynamisch gedrag van de gehele constructie voldoet, maar de mogelijkheid van het trillingen van het optreden van trillingen in de capsules zal nader onderzocht moeten worden.



10 Conclusies en aanbevelingen

10.1 Conclusie

De constructieve haalbaarheid van het Great Dubai Wheel zal afhankelijk zijn van zowel het ontwerp van het rad, als het ontwerp van de oplegging. In deze paragraaf zal naast de constructieve haalbaarheid gekeken worden naar de functionele haalbaarheid van het rad en de oplegging.

10.1.1 Constructie rad

Constructieve haalbaarheid

Het huidige ontwerp van de hoofddragconstructie voor het Great Dubai Wheel zal voldoen aan de stijfheidseisen ($\delta_{wind} \leq 1/500 h_{rad}$, $a_{max} \leq 0,1$ à $0,25 \text{ m/s}^2$) en globale stabiliteitseisen (kantelstabiliteit, tweede orde effect, etc.), maar niet aan de sterkte eisen en lokale stabiliteitseisen. Wanneer het rad als een statische constructie wordt beschouwd, zal de constructie, indien gebruik wordt gemaakt van de staalsoort S355, niet voldoen aan de sterkte eis ($\sigma_d \leq f_{y;d}$).

De constructie van het rad voldoet aan de constructieve eisen gesteld aan de stijfheid en globale stabiliteit. Aan de lokale stabiliteitseis en de sterkte eis wordt echter niet voldaan. Aanpassingen van de constructie om aan deze eis te voldoen zijn noodzakelijk.

De piek in het krachtsverloop ter plaatse van de hoogste opleggingen zal de vermoeiingslevensduur van het rad nadelig beïnvloeden.

De constructie van het rad zal echter niet statisch zijn, maar roteren. Als gevolg van de rotatie zullen de spanningen in de profielen variëren in de tijd. Niet de vloeispanning van het staal is maatgevend, maar de vermoeiingssterkte van de aansluitingen van de staven met de knooppunten. De toelaatbare spanningswisseling zal aanzienlijk lager liggen, geen 355 N/mm^2 ($f_{y;d}$), maar ongeveer 100 N/mm^2 ($\Delta\sigma_{max}$). In het huidige ontwerp zullen de spanningswisselingen in de profielen enkele malen groter zijn, dan toelaatbaar is vanuit het oogpunt van vermoeiing, zo geldt bijvoorbeeld voor de elementen van de buitenring: $\Delta\sigma \approx 280 \text{ N/mm}^2$, en voor de verticaal 1: $\Delta\sigma \approx 230 \text{ N/mm}^2$, uit permanente belasting, vermenigvuldigt met $\gamma_G = 1,35$. Om de constructie te laten voldoen aan de eisen gesteld aan de statische- en vermoeiingssterkte, zullen de spanningen en de spanningswisselingen in de profielen moeten worden gereduceerd.

Het krachtsverloop in de zowel de opleggingen als in de elementen van het rad heeft een piek ter plaatse van de hoogste opleggingen. Deze piek is het gevolg van de verhinderde vervorming van het rad. De piek zal het ontwerp van zowel de opleggingen, als de elementen van het rad nadelig beïnvloeden en zal moeten afnemen.

In een nader onderzoek zullen de knooppunten en profielen van het rad zodanig ontworpen moeten worden dat zowel aan de statische- en vermoeiingssterkte eisen wordt voldaan.

Functionele haalbaarheid

Om het rad te laten functioneren, zal nader onderzoek verricht moeten worden naar onder anderen het ontwerp van de capsules, het liftstelsel, de opleggingen, en de aandrijving. Zo zullen de hoofdcapsules deels zelfvoorzienend moeten zijn. Vanwege de ronde vorm van de liftbaan zal ook het gebruik van een conventioneel liftstelsel onmogelijk zijn. De opleggingen zullen de grote reactiekrachten naar de onderbouw moeten afvoeren en tegelijkertijd een rotatie van de ring toestaan, hiervoor zullen rolopleggingen kunnen worden gebruikt. De aandrijving van de verschillende ringen zal gezien de verschillende rotatietijden en belastingen ook een nader onderzoek vereisen.

10.1.2 Constructie oplegging (entreegebouw)

Constructieve haalbaarheid

Het ontwerp van het entreegebouw dient als ondersteuning voor het rad en zal mede bepalend zijn voor het constructieve gedrag (sterkte, stijfheid en stabiliteit) van het rad.

Wanneer voor de veerstijfheid in zowel radiale, als axiale richting een waarde van ongeveer 1.000 MN/m wordt aangenomen, wat overeenkomt met de stijfheid van ongeveer 10 betonnen funderingspalen, zal de stijfheid en globale stabiliteit van de huidige constructie gegarandeerd zijn. De stijfheid van de oplegging wordt in grote mate bepaald door het ontwerp van het entreegebouw. In het ontwerp van het entreegebouw zal dan ook met de benodigde veerstijfheden rekening moeten worden gehouden.

De constructie van het opleggings- en entreegebouw is mede bepalend voor het constructieve gedrag van het rad. Wijzigingen in bijvoorbeeld de veerstijfheid van de opleggingen zullen de spanningswisselingen in de profielen gunstig kunnen beïnvloeden.

Door in de opleggingen gebruik te maken van rolopleggingen kan de reactiekracht naar de onderbouw worden afgedragen en een rotatie worden toegelaten.

Naast stijfheid zullen het entreegebouw en de rolopleggingen de reactiekracht moeten kunnen opnemen. De maximaal optredende reactiekrachten, ten gevolge van permanente belasting en windbelasting (in UGT, volgen NEN6702) bevinden zich in het hoogste steunpunt en bedragen radiaal ongeveer 50.000 kN en axiaal 40.000 kN. Deze reactiekracht wordt opgenomen door meerdere rolopleggingen. Naast stijfheideisen moet het ontwerp van het entreegebouw en hiermee ook de rolopleggingen in staat zijn de reactiekrachten op te nemen. Verlaging van deze maximale reactiekracht zal het ontwerp van de opleggingen verbeteren.

10.2 Aanbevelingen

Om de constructie haalbaar te maken, zal deze ook aan de sterkte eisen moeten voldoen. Hiervoor zullen aanpassingen gedaan moeten worden met betrekking tot de statische- en vermoeiingssterkte, waardoor de spanningen en de spanningswisselingen in de profielen moeten afnemen. Aanpassingen zullen zowel aan het ontwerp van het rad, als aan het ontwerp van het entreegebouw moeten worden uitgevoerd. Verder zijn aanpassingen mogelijk aan de belasting op de constructie. In deze paragraaf worden enkel de meest efficiënte aanpassingen beschreven.



10.2.1 Constructie rad

Profieldoorsnede

Om de spanningen in de profielen van het Great Dubai Wheel af te laten nemen, zal allereerst de profieldoorsnede moeten worden aangepast. De diameter zal toenemen en om plooï van de profielen te voorkomen moet tevens de wanddikte toenemen. Toename van de profieldoorsnede zal naast het verbeteren van de vermoeiingslevensduur tevens de stijfheid van het rad verhogen. Om de spanningen in bijvoorbeeld de profielen in de buitenring tot een aanvaardbaar niveau te laten dalen zal de diameter toenemen van 2220 mm naar 3000 mm en de wanddikte van 40 mm naar 50 mm.

Ook het aantal verschillende profiel afmetingen zal moeten toenemen. In het huidige ontwerp zijn slechts twee verschillende profielafmetingen toegepast. Door nog meer profielafmetingen toe te passen zullen de profieldoorsneden efficiënter belast worden.

Toename van de profieldoorsnede zal leiden tot een hoger eigen gewicht van de constructie en hierdoor grotere krachten in de constructie. Om de gewichtstoename te beperken zal de wanddikte van de profielen over de lengte variëren om zodoende het materiaal optimaal te gebruiken.

De spanningen in de profielen zullen ook teruggebracht kunnen worden door de vorm van de randprofielen aan te passen. Momenteel wordt de ronde vorm van het rad benaderd door in het midden van de profielen een knik toe te voegen, welke het piekmoment ter plaatse van het knooppunt doet toenemen. Door tussen de knooppunten rechte profielen toe te passen, neemt het piekmoment af. Nader onderzoek heeft reeds aangetoond dat dit een momentafname van ongeveer 30% teweegbrengt.

Locatie verbinding elementen

Het vakwerk is opgebouwd uit losse buisprofielen welke aan speciaal vormgegeven knooppunten worden bevestigd.

De knooppunten kunnen zowel worden gegoten, als worden opgebouwd uit buisprofielen verstijfd middels extra schotten. De laatstgenoemde zal vanwege het geringe extra gewicht de voorkeur verdienen. De knooppunten zullen zodanig ontworpen moeten worden dat deze niet maatgevend zijn voor de vermoeiingslevensduur van het rad. De aansluiting van de staven aan de knooppunten zal maatgevend zijn.

De aansluiting van de staven aan de knooppunten zal op enige afstand van de hartlijn van het knooppunt bevinden. Door deze afstand in rekening te brengen bij de bepaling van het moment zal het in het piekmoment gereduceerd kunnen worden

10.2.2 Constructie oplegging (entreegebouw)

In het huidige ontwerp is het rad onder elke vakwerkkring gesteund. De ondersteuning zal enkel plaatsvinden in de knooppunten van de vakwerkkring (buitenring). Hierdoor wordt een extra moment in de vakwerkkring voorkomen en wordt tevens het onderhoud en de vervanging van de rolopleggingen mogelijk gemaakt.

Aangenomen is dat de veerstijfheid van de ondersteuning van het rad over de gehele opleglengte gelijk is. De waarde van alle steunpunten bedraagt 1.000 MN/m. Bij deze

waarde zal het rad voldoende stijfheid en globale stabiliteit hebben. Boven de hoogste oplegging treedt echter vanwege de verhinderde vervorming een piek op in het krachtsverloop, welke de vermoeiingslevensduur van het rad nadelig beïnvloedt.

Door de veerstijfheid van de opleggingen over de opleglengte te variëren, zal het piekmoment in de profielen afnemen en de vermoeiingslevensduur van het rad toenemen. In het ontwerp van het entreegebouw dient rekening te worden gehouden met de benodigde veerstijfheden van de opleggingen.

Het ontwerp van het entreegebouw en het optimale verloop van de veerstijfheid over de opleglengte zullen nader onderzocht moeten worden.

10.2.3 Belastingen

Om de spanningen in de profielen te verminderen is het verlagen van de belasting op de constructie. Zo kan bijvoorbeeld de belasting worden verlaagd door het aantal capsules af te laten nemen. Ook de windbelasting kan afnemen door het verloop van deze belasting over de hoogte in de rekening te brengen.

10.2.4 Nader onderzoek

In het huidige rapport is een eerste onderzoek gedaan naar de haalbaarheid van het ontwerp voor het Great Dubai Wheel. Een aantal aspecten in het ontwerp zijn in dit rapport niet, of slechts oppervlakkig behandeld en nader onderzoek naar deze aspecten zal noodzakelijk zijn. In deze paragraaf worden deze aspecten kort behandeld.

Ontwerp van het rad

Optimalisatie profielkeuze

In het huidige ontwerp van het Great Dubai Wheel is slechts gebruik gemaakt van twee verschillende buisprofielen, met een diameter van 1440 mm en 2220 mm en een wanddikte van 40 mm. De sterktecapaciteit van deze profielen wordt niet overal optimaal benut. Door meerdere profieldoorsneden toe te passen zullen de profielen optimaal benut worden. De te gebruiken profieldoorsneden zullen nader bepaald moeten worden.

Vorm randprofiel

Ook het ontwerp van de randprofielen zal verbeterd kunnen worden. Uit nader onderzoek is reeds gebleken dat door het verwijderen van de knik uit de profielen en dus gebruik te maken van rechte profielen tussen de knooppunten de piekmomenten in deze profielen met 30% zullen afnemen.

Ontwerp knooppunten

Aangezien de vermoeiing een belangrijke rol speelt in het ontwerp van het Great Dubai Wheel zal in het ontwerp geprobeerd moeten worden, de spanningsconcentraties in de knooppunten zo laag mogelijk te houden. Door de knooppunten zodanig te ontwerpen dat spanningsconcentraties worden vermeden zal de vermoeiingslevensduur toenemen. Niet de knooppunten, maar de aansluiting van de profielen op de knooppunten worden dan maatgevend.



Ontwerp opleggebouw

Verloop van de veerstijfheden

Door de veerstijfheden van de opleggingen over de opleglengte te laten verlopen, is het mogelijk de piek in het reactiekrachten- en spanningsverloop te beperken en hiermee de vermoeiingslevensduur van het rad te verlengen.

Een optimalisatie van het verloop van de veerstijfheid van het rad is echter nog niet gevonden en zal dan ook nog nader onderzocht moeten worden. Verder zal nader onderzocht moeten worden hoe deze veerstijfheden in het ontwerp van het opleggebouw gerealiseerd worden.

Naast de veerstijfheid van het opleggebouw zal tevens de veerstijfheid van de ondergrond in een vervolgonderzoek moeten worden meegenomen, onder andere de zettingen van de ondergrond zullen nader onderzocht moeten worden.

Ontwerp opleggingen

Naast het ondersteunen van het rad zal het noodzakelijk zijn dat de opleggingen een rotatie van het rad toestaan. In paragraaf 3.3 is reeds een eerste onderzoek gedaan naar de mogelijkheden voor de opleggingen van het rad. Dit onderzoek is echter zeer summier en een uiteindelijk ontwerp van de oplegging op het entreegebouw zal nader onderzocht moeten worden.

Ook de bevestiging van de verschillende losse raden aan het hoofdrad zal nader onderzocht moeten worden.

Ontwerp aandrijving

De aandrijving van het rad zal plaatsvinden op het opleggebouw. De exacte aandrijfmethode dient nader onderzocht te worden. Ook de aandrijving van de andere functies, te weten het zichtrad en de liftcapsules, zal nader bepaald moeten worden.

Dynamisch gedrag

In hoofdstuk 9 is een inleiding gegeven op het dynamisch gedrag van het rad. De hoofddragconstructie bleek aan de versnellingsseisen te voldoen. In het rad bevinden zich echter ook capsules welke onder windbelasting hinderlijk kunnen gaan trillen. Het dynamische gedrag van de constructie dient op dit punt nader onderzocht te worden. In dit onderzoek zal tevens rekening moeten worden gehouden met de luchtstromen rond het rad. Een windtunnelonderzoek zal hier inzicht in kunnen verschaffen.

Met behulp van een windtunnelonderzoek zal tevens de werkelijk optredende windbelasting op het gebouw bepaald kunnen worden.

Aardbeving

In het huidige onderzoek is het gedrag van de constructie onder aardbevingsbelasting niet geanalyseerd. Dubai ligt echter in een gebied met een gemiddeld aardbevingsrisico. Een aanvullend onderzoek zal noodzakelijk zijn, ook omdat het eigen gewicht van het Great Dubai Wheel hoog is en plastisch vervorming in het rad niet toelaatbaar is, omdat dit het roteren en functioneren zal verhinderen.

Liftsysteem

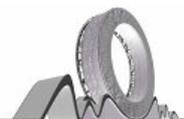
Ook het intern transport in het rad zal nog nader onderzocht moeten worden. In paragraaf 3.2 is globaal in beeld gebracht hoe het liftsysteem gerealiseerd zou kunnen worden. Om het liftsysteem echter te laten functioneren zullen nog enkele aspecten moeten worden

uitgezocht. Zo zal onder andere meer inzicht moeten worden verkregen in de aandrijving, de bevestiging van de liftcapsules aan het rad en de toegang tot de liftcapsules.

Capsules

Momenteel zijn de afmetingen van de capsules bekend, maar er zullen nog een aantal extra voorzieningen noodzakelijk zijn om de capsules te laten functioneren. Het ontwerp van de capsules zal dan ook nader onderzocht moeten worden. Zo zullen de hoofdcapsules deels zelfvoorzienend zijn en bevoorrad worden. Hoe dit gerealiseerd kan worden is nog onduidelijk.

Door de extra benodigde systemen zal het gewicht van de hoofdcapsules kunnen toenemen. Het definitieve gewicht van de capsules is dan ook nog niet vastgesteld.



Bronnenlijst

Boeken

Eldik, C.H. van, en Rolloos, A., *Overspannend staal: Dl. 3, Construeren B*, Rotterdam: Stichting Kennisoverdracht SG, 1996.

Hibbeler, R.C., *Mechanica voor technici: dynamica*, Schoonhoven: Academic Service, 1998.

Lambot, I., *Reinventing the Wheel: the construction of British Airways London Eye*, Haslemere: Watermarks Publications, 2000.

Man, G., en Eldik, C.H. van, *Overspannend staal: Dl. 2, Construeren A*, 3^e druk. Rotterdam: Bouwen met Staal, 2001.

Romeijn, A., *Fatigue*, Delft: TU Delft, 2006.

Spijkers, J.M.J., Vrouwenfelder, A.W.C.M., en Klaver, E.C., *Structural Dynamics: CT4140: Part 1, Structural Vibrations*, Delft: TU Delft, 2006

Verburg, W.H., *Overspannend staal: Dl. 1, Basisboek*, 3^e druk. Rotterdam: Stichting Kennisoverdracht SG, 1996.

Wardenier, J., *Hollow sections in structural applications*, Rotterdam: Bouwen met Staal, 2002.

Rapporten

Aaces, *Site Investigation proposed Great Dubai Wheel*, Dubai: 2006.

Corsmit Raadgevend Ing.bureau, *Great Dubai Wheel: Preliminary structural report*, Rijswijk: 2007.

Halcrow, *Athenopolis: stage 2, final report*, Dubai: 2005.

Lindschutte + Partner, *The Great Dubai Wheel UAE: Final Report*, Hamburg: 2006 .

Normen

NEN 6702: *Technische Grondslagen voor bouwconstructies: TGB 1990 - belastingen en vervormingen*, Delft: NNI, 2001

NEN 6770: *basiseisen en basisrekenregels voor overwegend statisch belaste constructies*, Delft: NNI 1997

NEN 6771: *Technische Grondslagen voor bouwconstructies: TGB 1990 - staalconstructies stabiliteit*, Delft: NNI, 2000

Internet

<http://en.wikipedia.org/>

<http://guide.themiratesnetwork.com/>

<http://www.dubailand.ae/>

<http://www.roymech.co.uk/>, Informatie wrijving rolopleggingen.

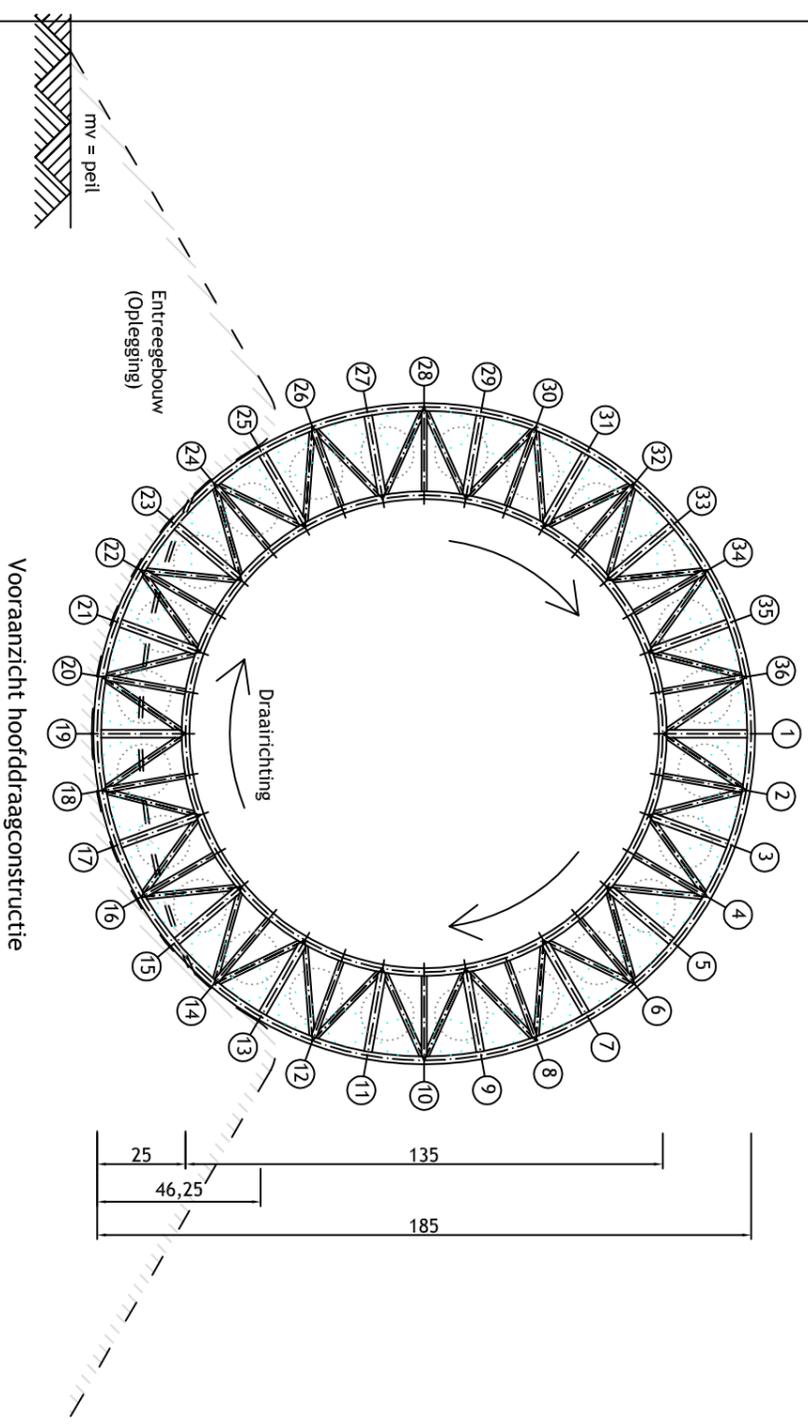
<http://www.fag.com/>, Fag Schaeffler, fabrikant rolopleggingen.



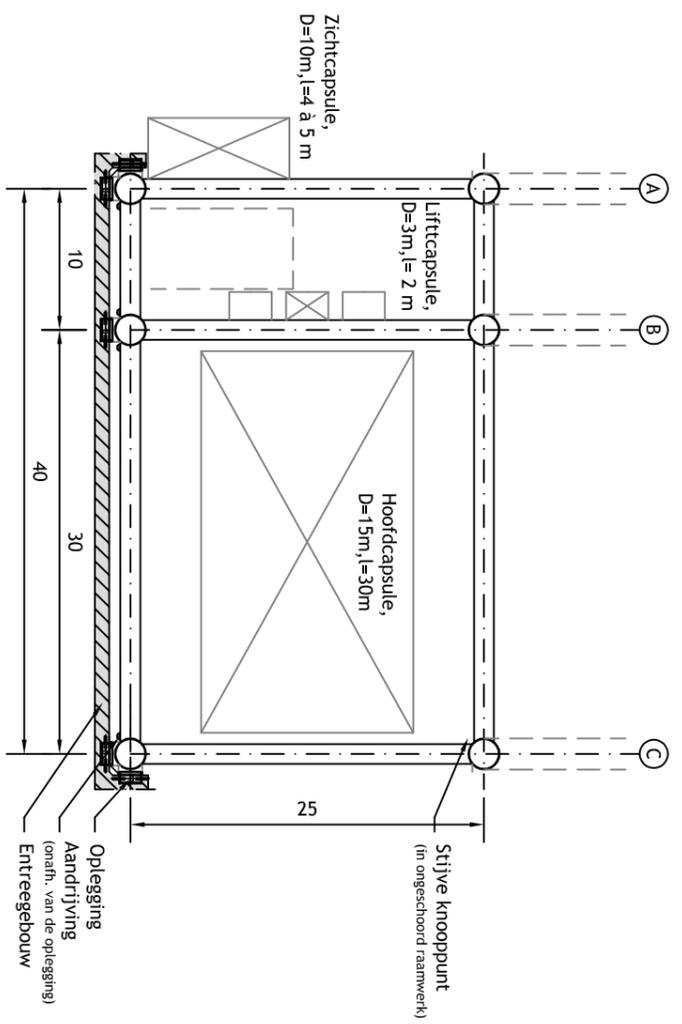
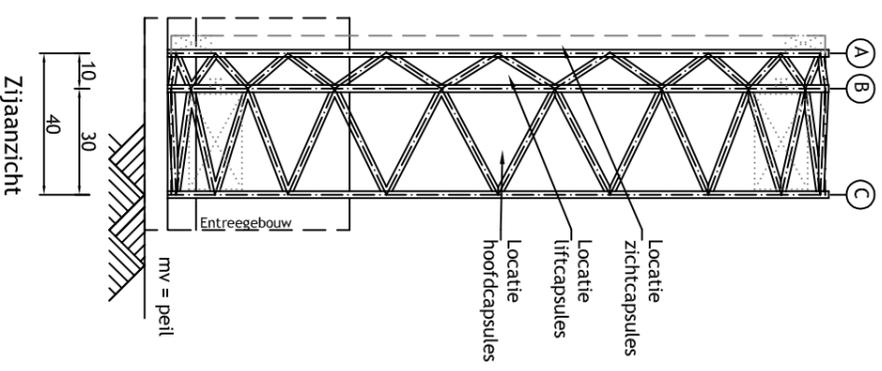
Bijlage A: Tekeningen

- Tekening nummer 1.1 - Overzicht hoofddraagconstructie Great Dubai Wheel
- Tekening nummer 1.2 - Overzicht capsule
- Tekening nummer 1.3 - Detail oplegging rad
- Tekening nummer 1.4 - Liftsysteem

- Tekening nummer 2.1 - Vervorming rad, positie 2
- Tekening nummer 2.2 - Krachtverloop ring C, t.g.v. permanente belasting
- Tekening nummer 2.3 - Krachtverloop ring C, t.g.v. permanente belasting
- Tekening nummer 2.4 - Krachtverloop ring C, t.g.v. permanent en wind
- Tekening nummer 2.5 - Aangepast krachtverloop ring C, t.g.v. permanente belasting (schoorconstructie en scharnieren)



Overzicht constructie (1:2.000)



Dwarsdoorsnede t.p.v. stramien 18 (Schaal 1:500)

Architectonisch ontwerp



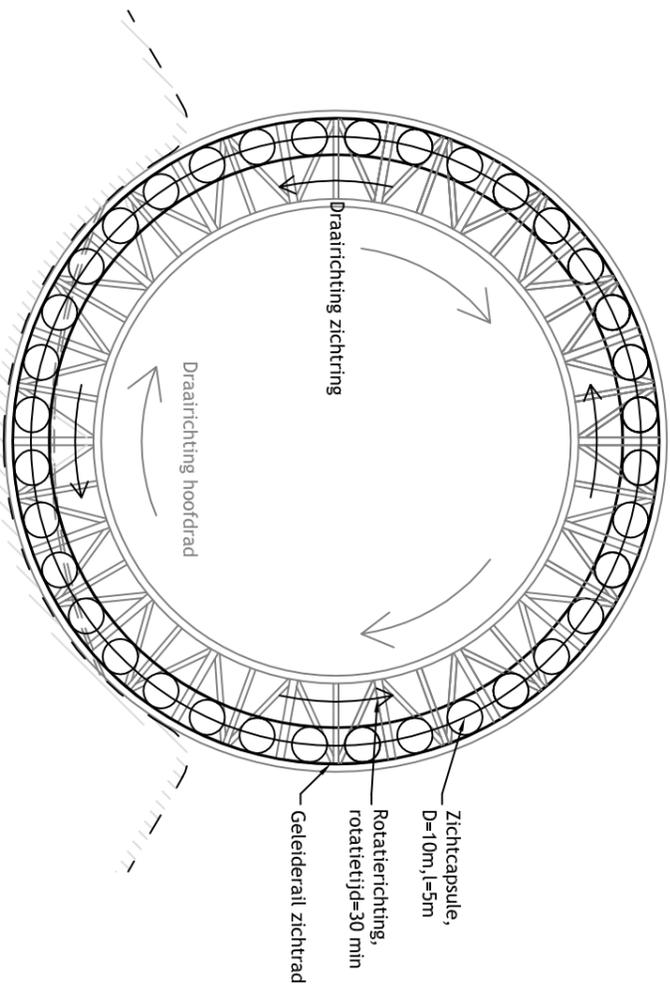
Locatie



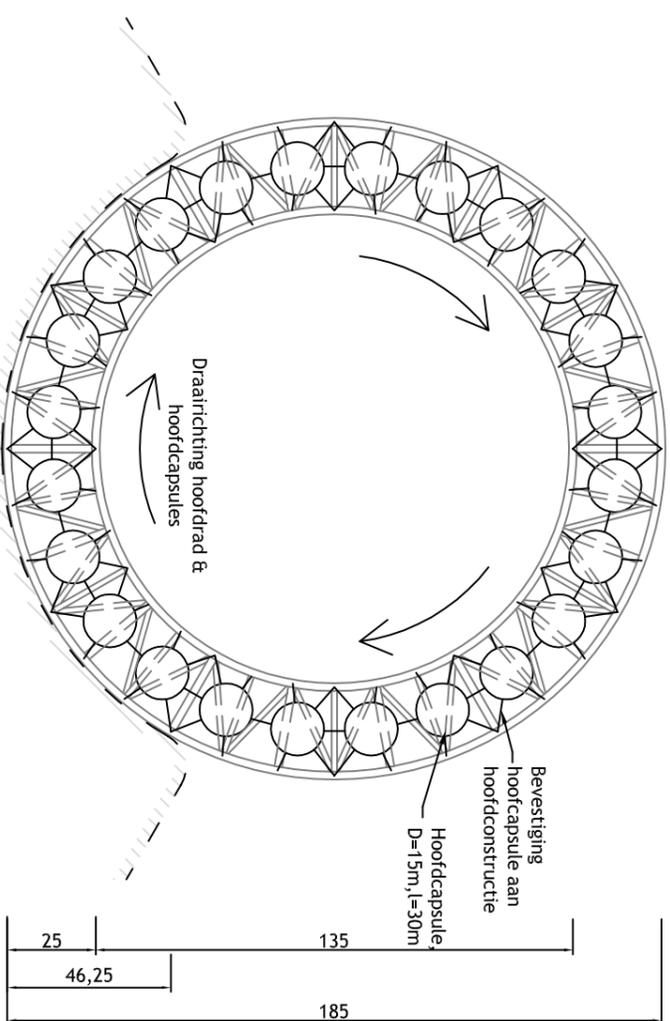
Opmerkingen:

- Staalkwaliteit: buisprofielen S355
- Zichtcapsules: aantal 36 rotatietijd 30 min
- Hoofdcapsules: aantal 24 rotatietijd: 6 uur (= rotatietijd rad)
- Dwarsdoorsnede heeft de vorm van een ongeschoord raamwerk. Stijve knooppunten zijn noodzakelijk voor de stabiliteit
- Steunpunten zullen een rotatie moeten toestaan, gekozen is voor rolopleggingen.
- Veerstijfheid van de knooppunten bedraagt 1.000 MN/m in zowel radiale, als axiale richting van het rad.

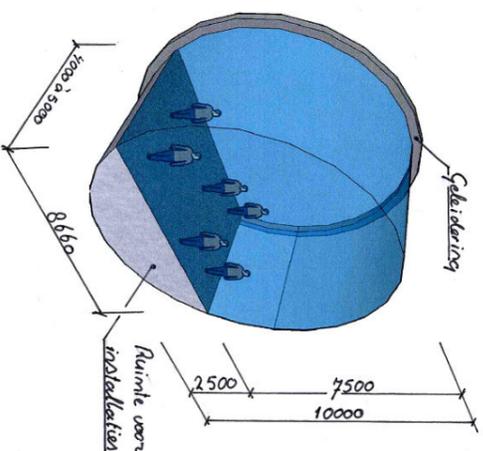
Project			
Great Dubai Wheel			
Titel			
Overzicht hoofd draagconstructie Great Dubai Wheel			
Tekenaar	Datum	Tek. nr.:	
Sjors Bolleboom	09-09-2008	1.1	
Formaat	Schaal	Eenheid	
A3	1:2000	m	



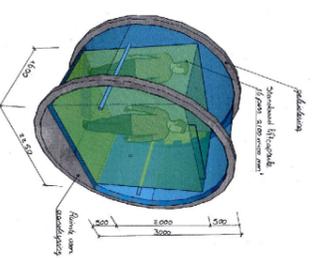
Aanzicht zichtcapsules
(zichtcapsules bevestigd aan ring A)
(Schaal 1:2.000)



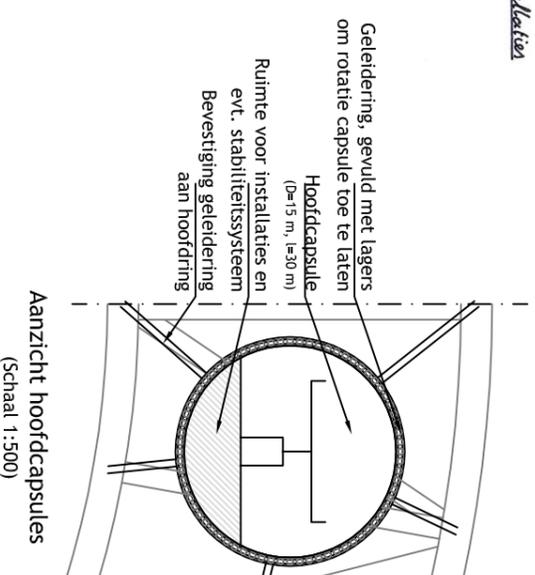
Aanzicht hoofdcapsules
(dwarsdoorsnede tussen ring B en C)
(Schaal 1:2.000)



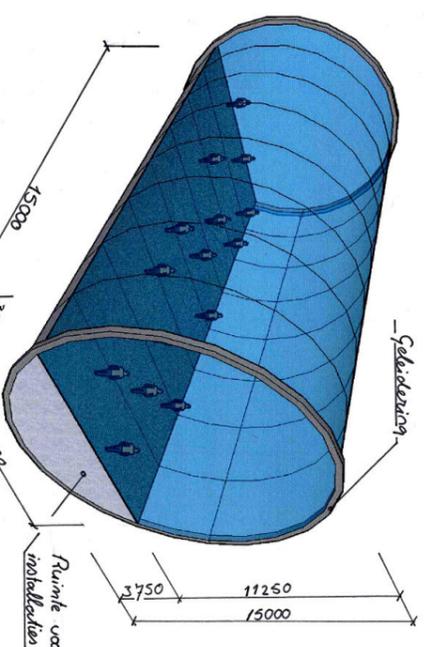
Zichtcapsule 3D



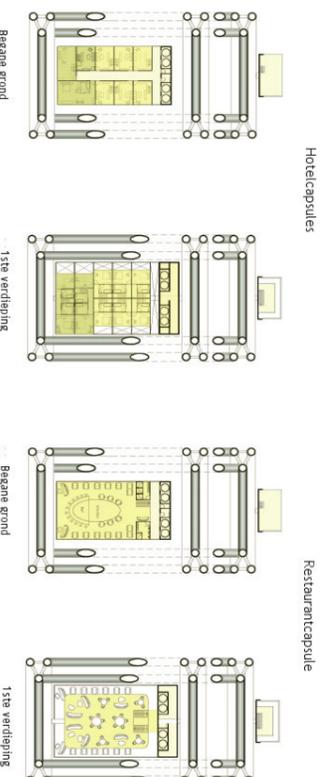
Liftcapsule 3D



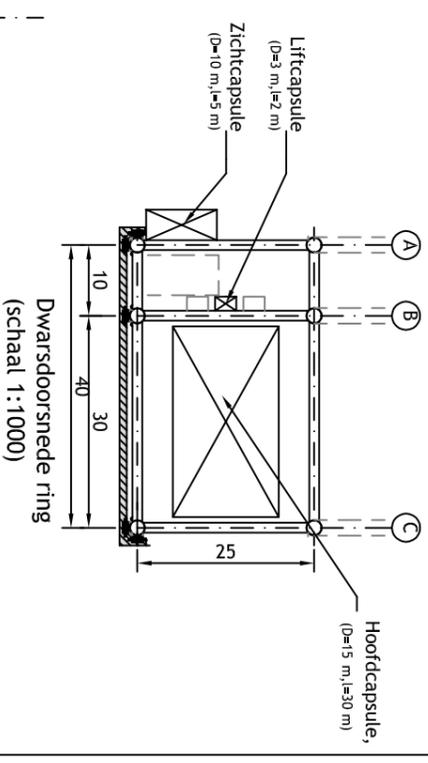
Aanzicht hoofdcapsules
(Schaal 1:500)



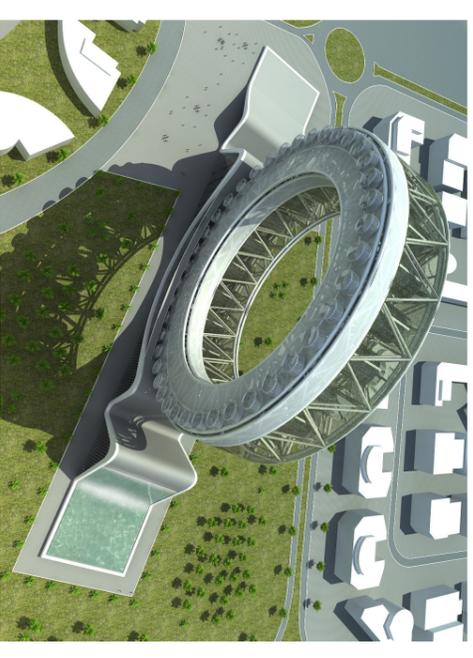
Hoofdcapsule 3D (excl. eerste verdieping)



Concept indeling hoofdcapsule



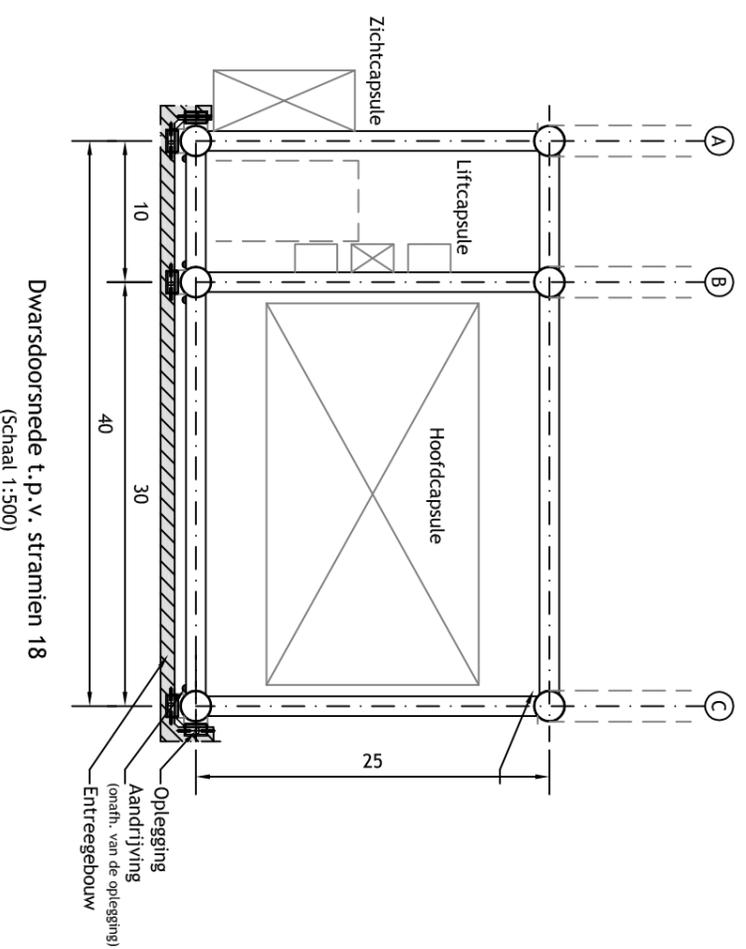
Dwarsdoorsnede ring
(schaal 1:1000)



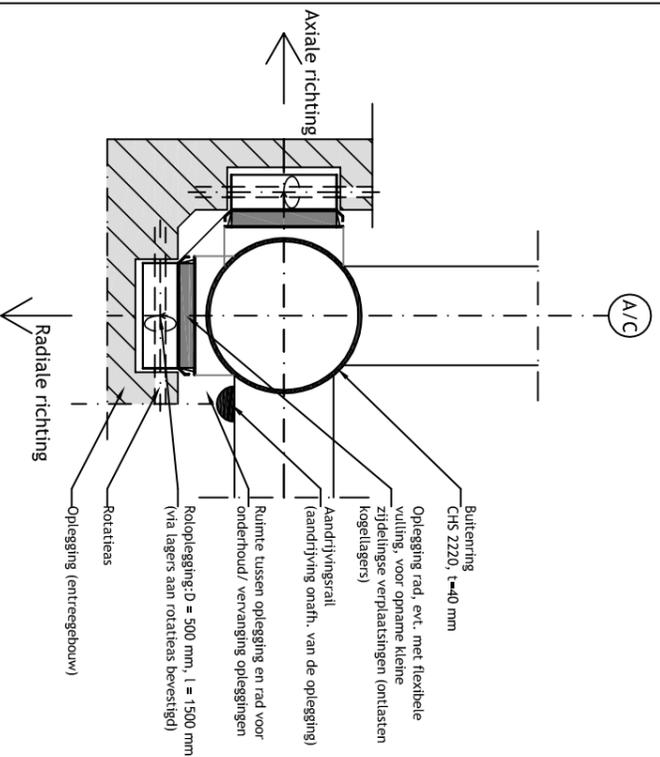
Opmerkingen:

- De hoofdcapsule heeft dezelfde rotatietijd als de hoofd draagconstructie (6 uur)
- Lift- en zichtcapsules roteren onafhankelijk van de hoofd draagconstructie en zullen een aandrijving hebben onafhankelijk van de hoofdconstructie.
- Capsules zijn via een geleidering aan het rad bevestigd, hierdoor kan de rotatieas weggelaten worden.

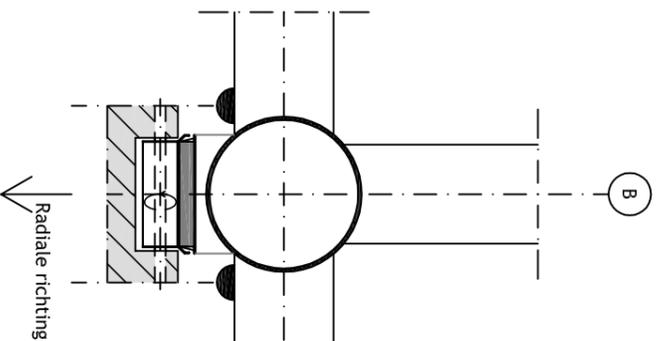
Project			
Great Dubai Wheel			
Titel			
Overzicht capsule			
Tekenaar	Datum	Tek. nr.	
Stors Bolleboom	09-09-2008	1.2	
Formaat	Schaal	Eenheid	
A3		m & mm	



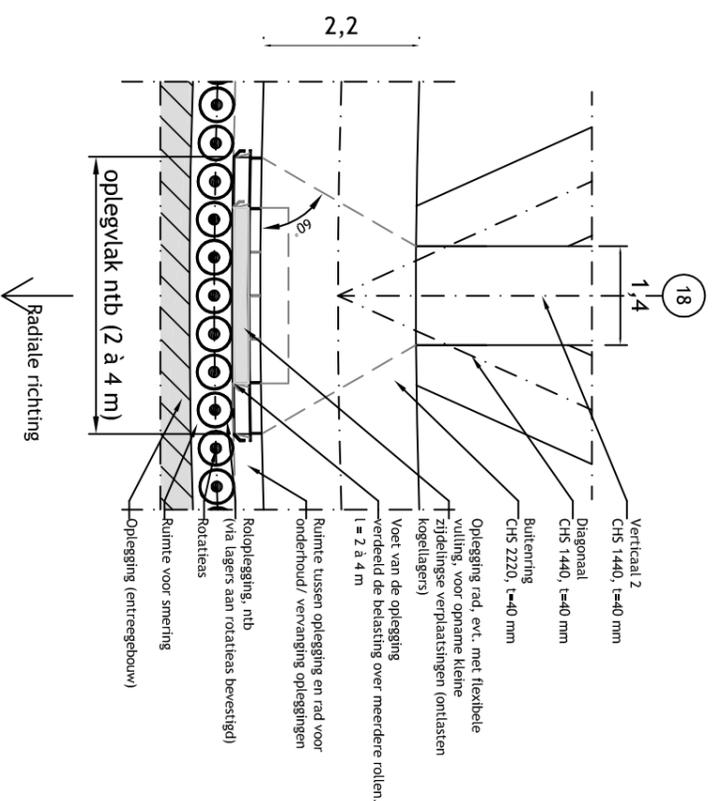
Dwarsdoorsnede t.p.v. stramien 18
(Schaal 1:500)



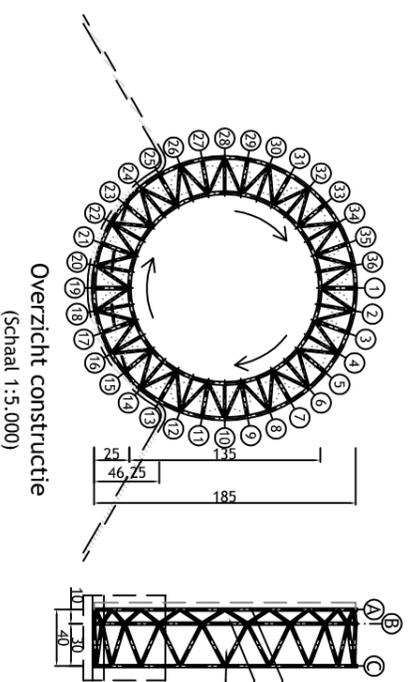
Detail oplegging Ring A en C
(Zowel radiaal als axiaal gesteund)
(Schaal 1:100)



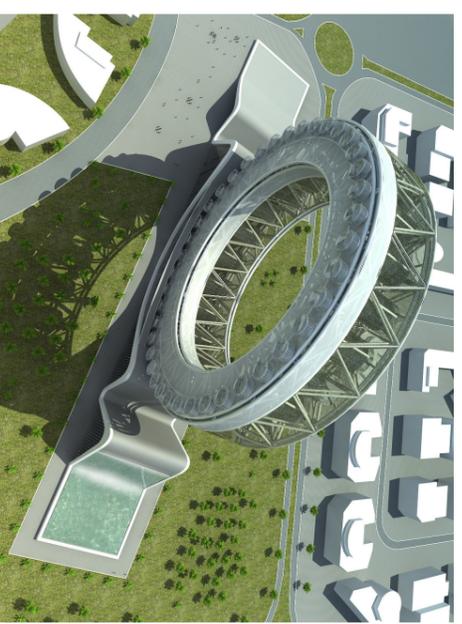
Detail oplegging Ring B
(Enkel radiaal gesteund)
(Schaal 1:100)



Zij aanzicht detail oplegging
(radiale richting)
(Schaal 1:100)



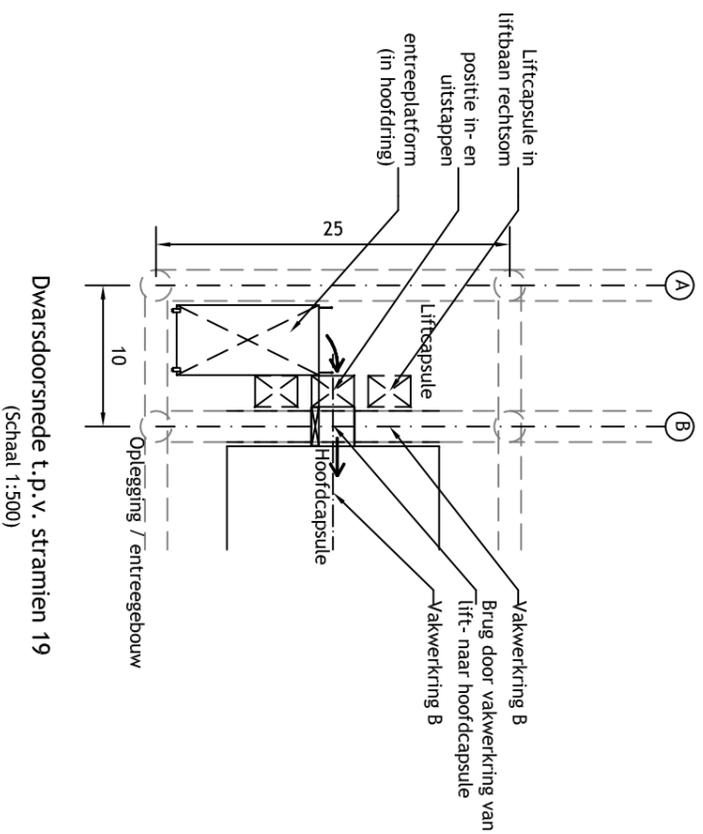
Overzicht constructie
(Schaal 1:5.000)



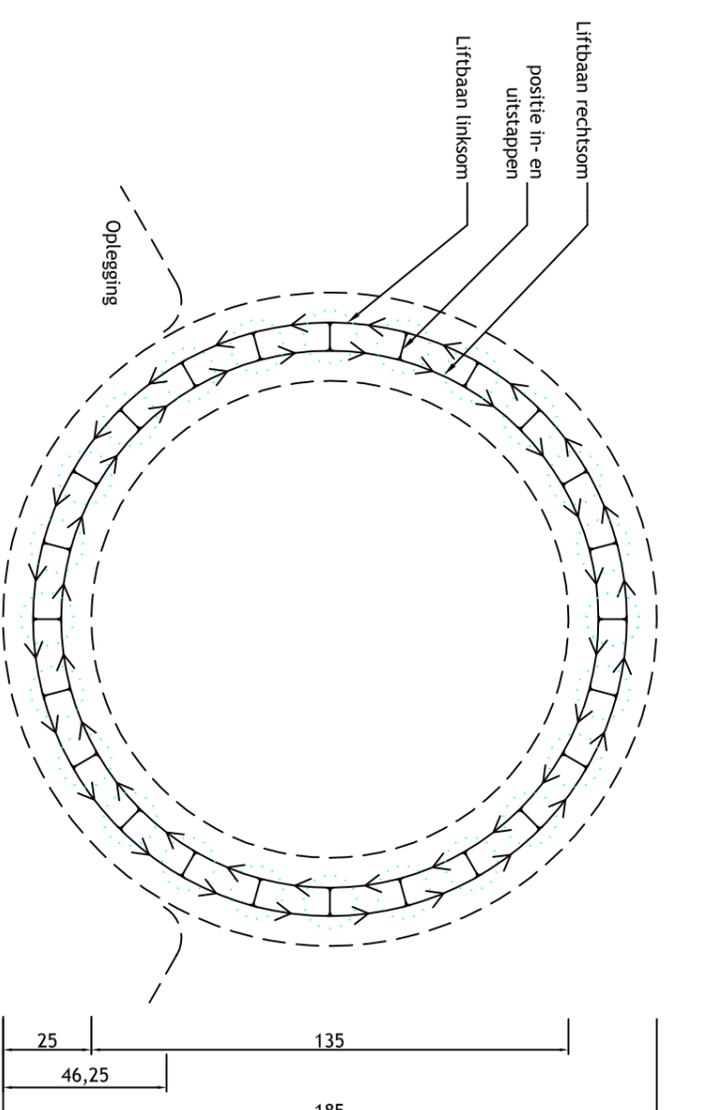
Opmerkingen:

- Als aandrijving kan bijv. gekozen worden voor een ketting aandrijving, een lopende band, of roterende wielen welke op de aandrijvingsrail aangrijpen.
- Maximale reactiekrachten (e.g. en wind in UGT), ter plaatse van hoogste ondersteuning:
Radiaal: 50.000 kN
Axiaal: 40.000 kN
- Om de reactiekrachten over meerdere steunpunten te spreiden is de voet van de oplegging vormgegeven als een slee.
- De afmetingen van de voet zullen nader bepaald worden en zijn o.a. afhankelijk van de draagkracht van de rolopleggingen

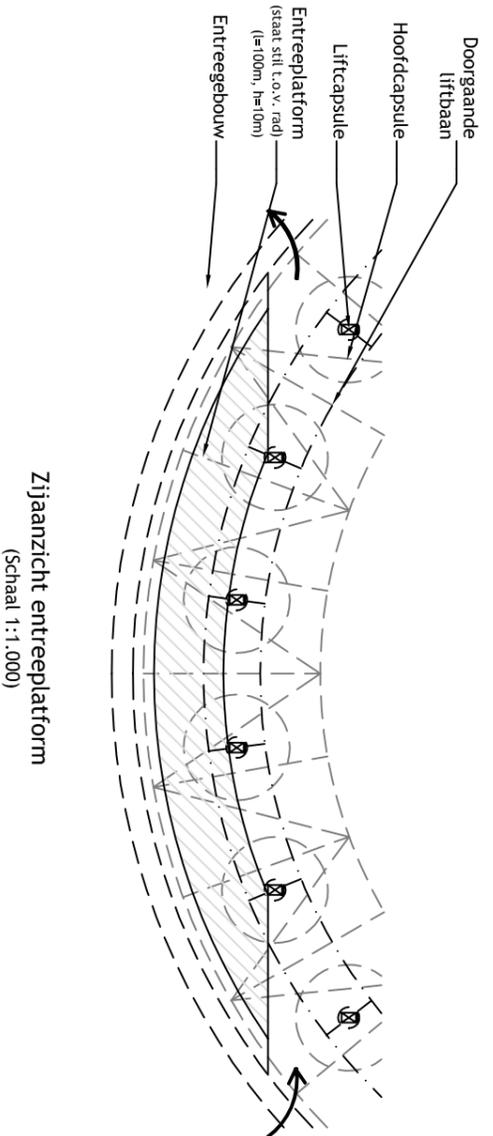
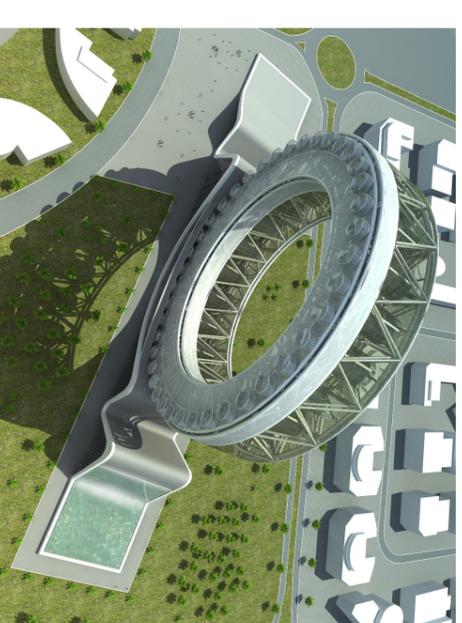
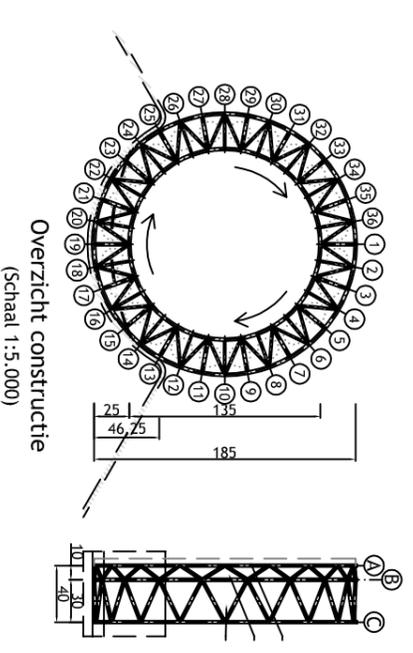
Project				Great Dubai Wheel	
Titel					
Detail oplegging rad					
Tekenaar	Sjors Bolleboom	Datum	09-09-2008	Tek. nr.:	1.3
Formaat	A3	Schaal	1:XX	Eenheid	m



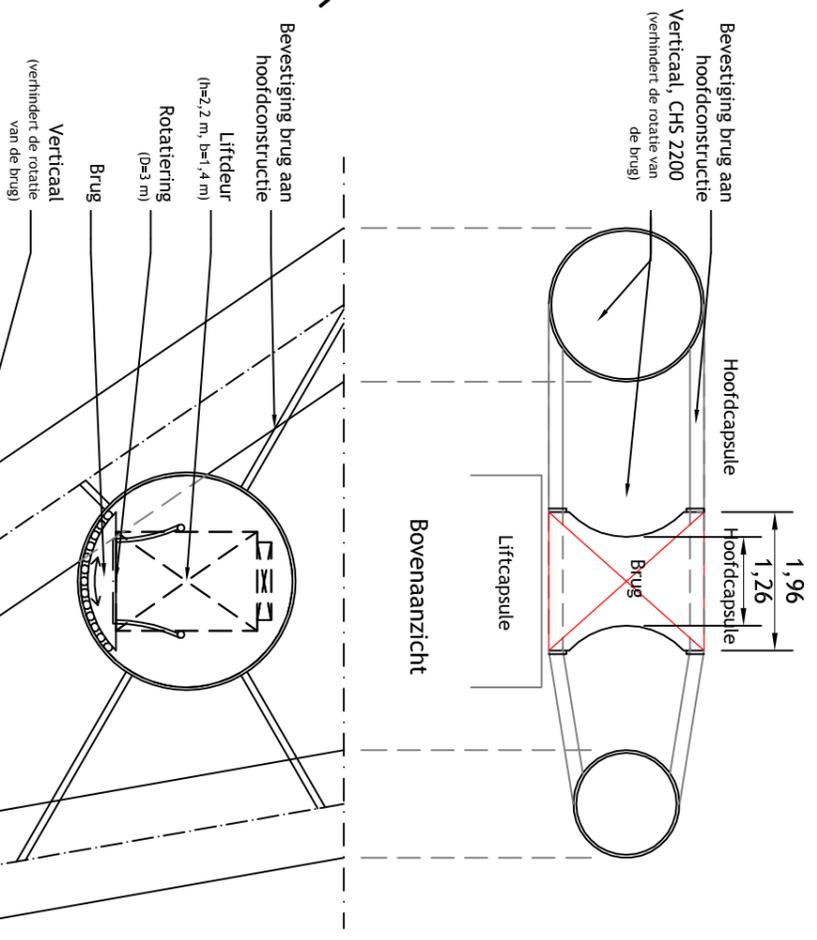
Dwarsdoorsnede t.p.v. stramien 19
(Schaal 1:500)



Overzicht verloop liftbanen
(Schaal 1:2.000)



Zijaanzicht entreeplatform
(Schaal 1:1.000)



Bovenaanzicht

Detail overgangsbbrug
Voorraanzicht
(Schaal 1:100)

Opmerkingen:

- Stopplaats lift in rotatiecentrum hoofdcapsule -> geen secundaire lift/systeem noodzakelijk in hoofdcapsule
- Tussen lift- en hoofdcapsule is een brug geplaatst (ter overbrugging dikke vakwerkringring B). Vloer van de brug roteert mee.
- De overgangsbbrug zal op enkel plaatsen door een verticaal van de hoofdconstructie gehinderd worden. De vorm van het brugdek zal hierop aangepast moeten worden.
- Stopplaats liftcapsule naast doorgaande liftbaan -> transport ondervindt geen hinder van stilstaande capsule.
- De liftcapsules zullen aan beide zijden deuren hebben.
- Het entreeplatform bevindt zich in de hoofdconstructie. De toegang tot dit platform wordt soms tijdelijk onmogelijk door passerende constructie elementen
- Lineaire aandrijving liftcapsule (magnetisme).

Project

Great Dubai Wheel

Titel

Liftsysteem

Tekenaar

Sjors Bolleboom

Datum

09-09-2008

Tek. nr.

1.4

Formaat

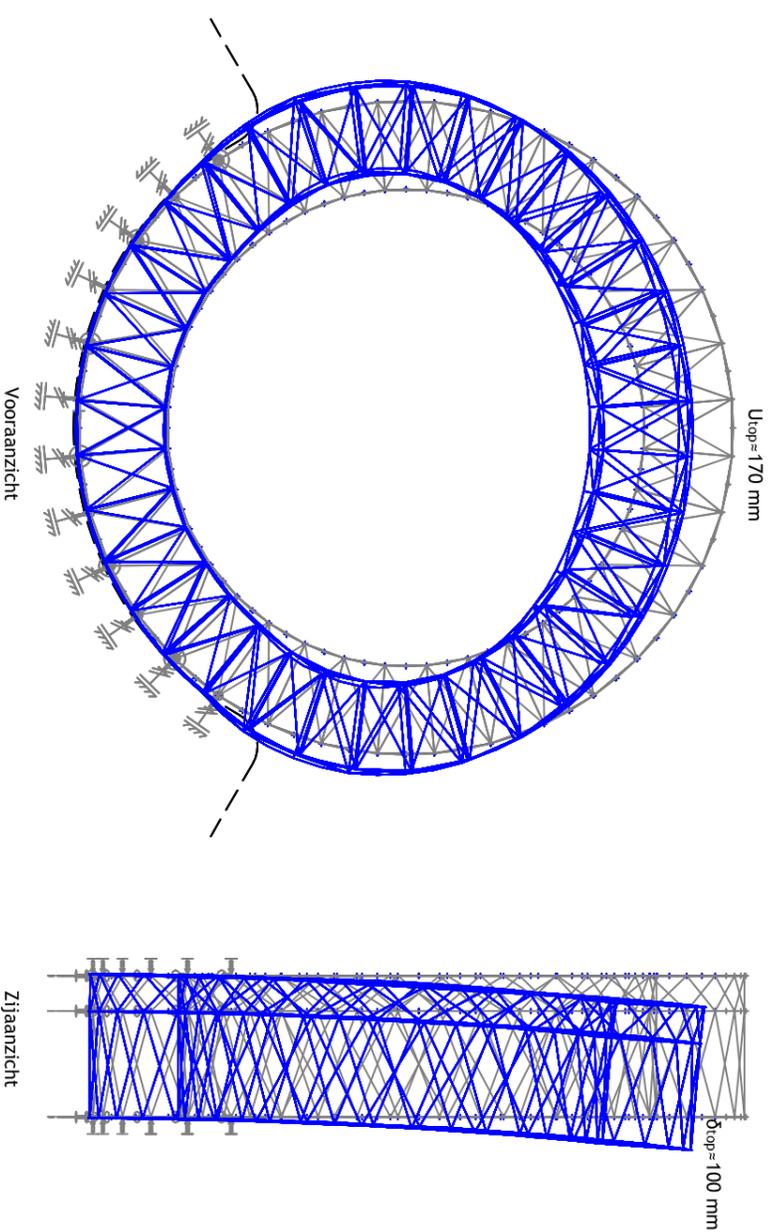
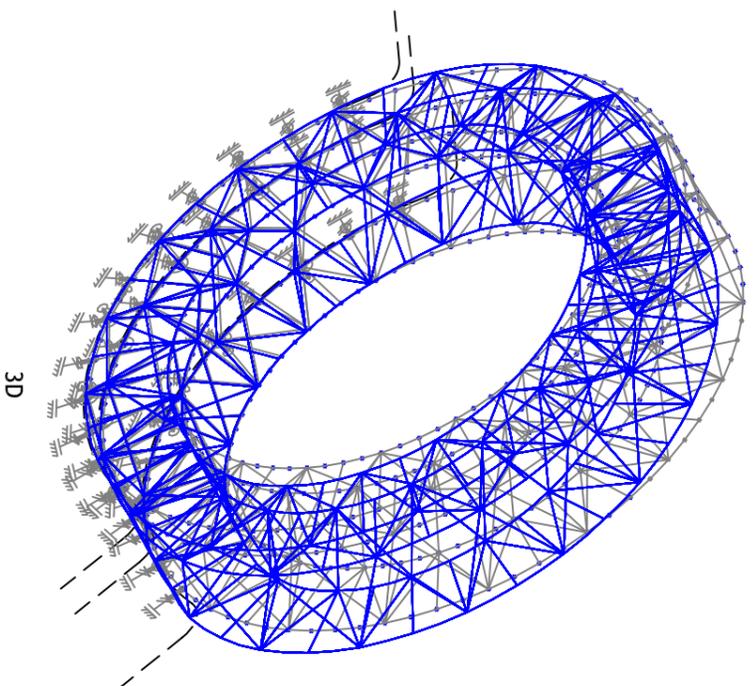
A3

Schaal

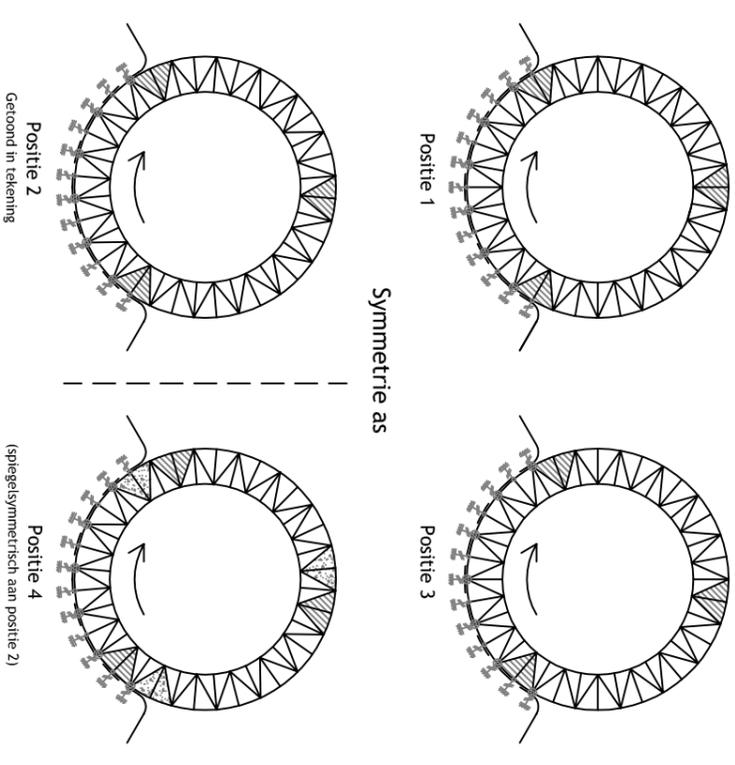
1:XX

Eenheid

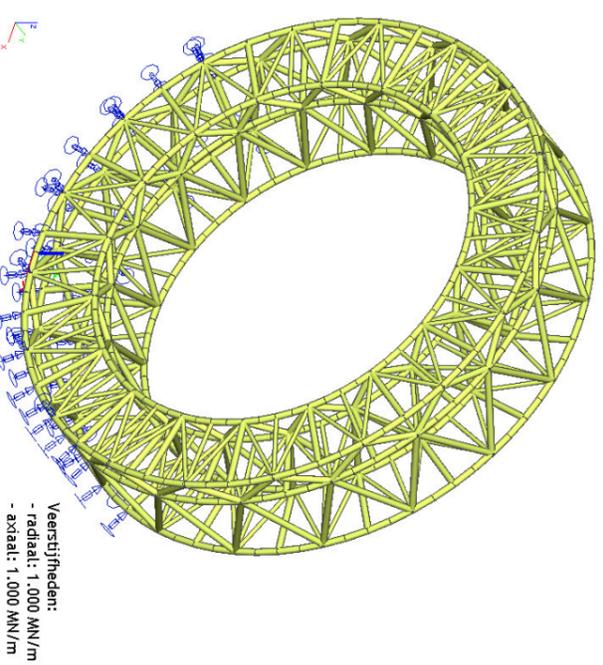
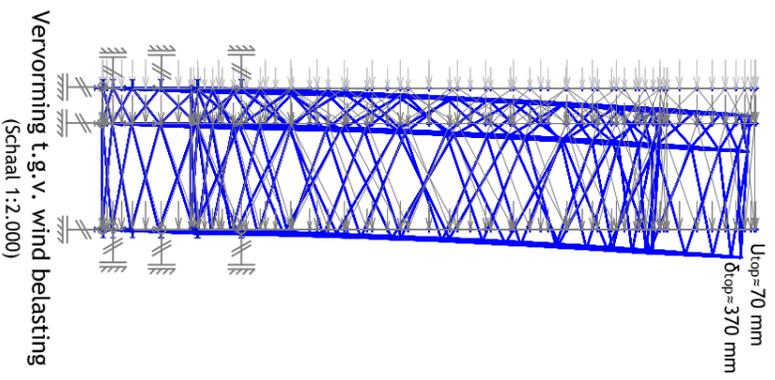
m



Vervorming t.g.v. permanente belasting
(Schaal 1:2.000)



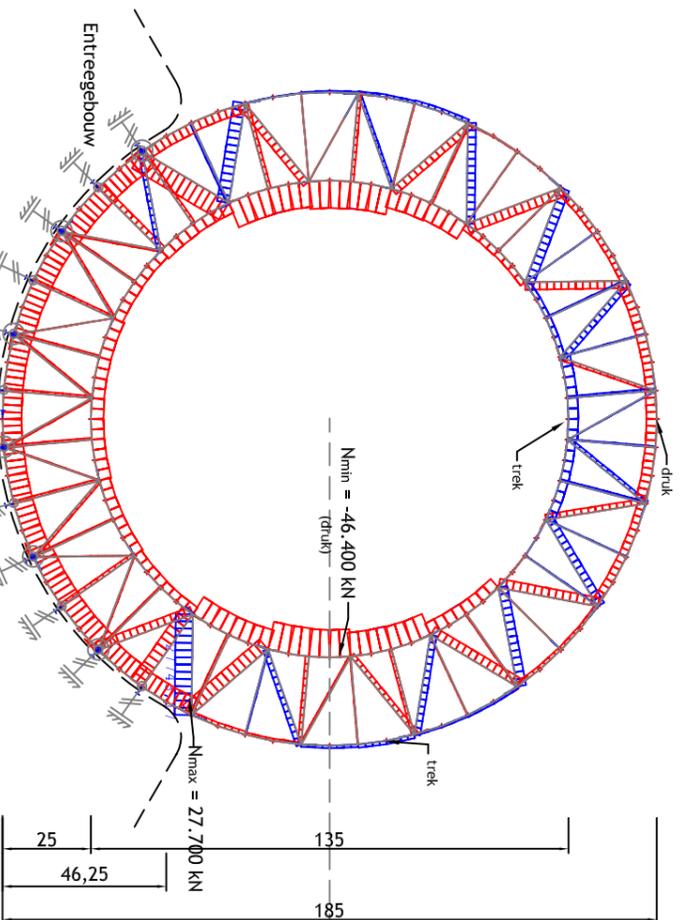
Onderzochte posities
(Schaal 1:5.000)



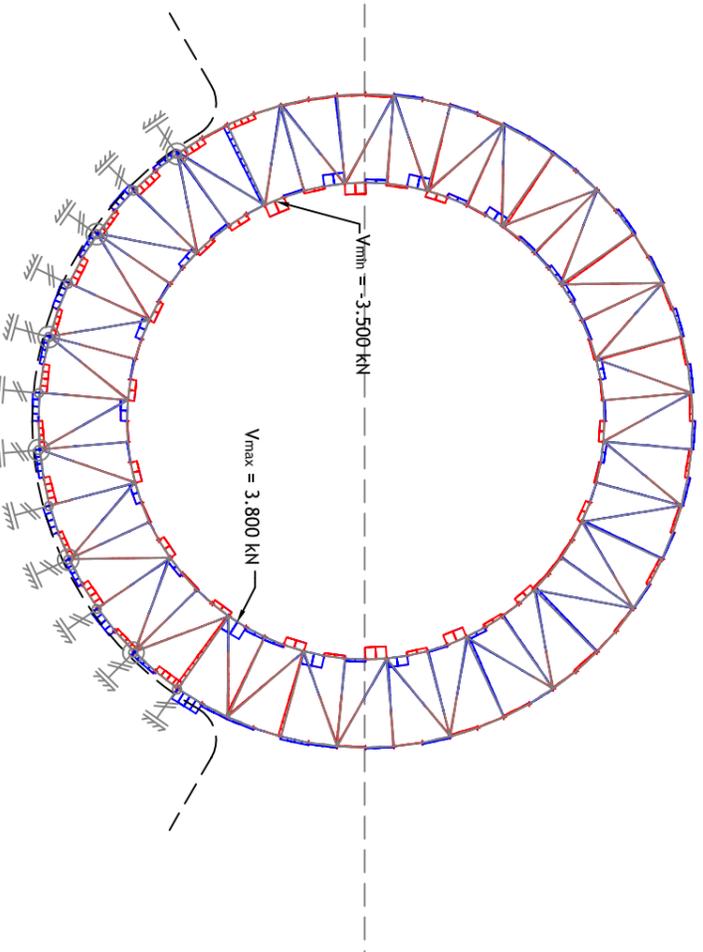
Opmerkingen:

- Positie 2 is maatgevend voor de vervorming.
- Positie 2 en 4 zijn spiegelsymmetrisch.
- Krachten ten gevolge van permanente belasting zijn afkomstig uit eigen gewicht hoofddraagconstructie en hoofdcapsule.
- Gebruikte belastingfactor: $\gamma_G = \gamma_Q = 1,0$ (NEN 6702, voor BGT).
- Windbelasting bedraagt totaal 39.150 kN en is uniform over de knooppunten verdeeld.
- Maximale bijkomende vervorming bedraagt: 1:500 h = 370 mm, hier wordt aan voldaan

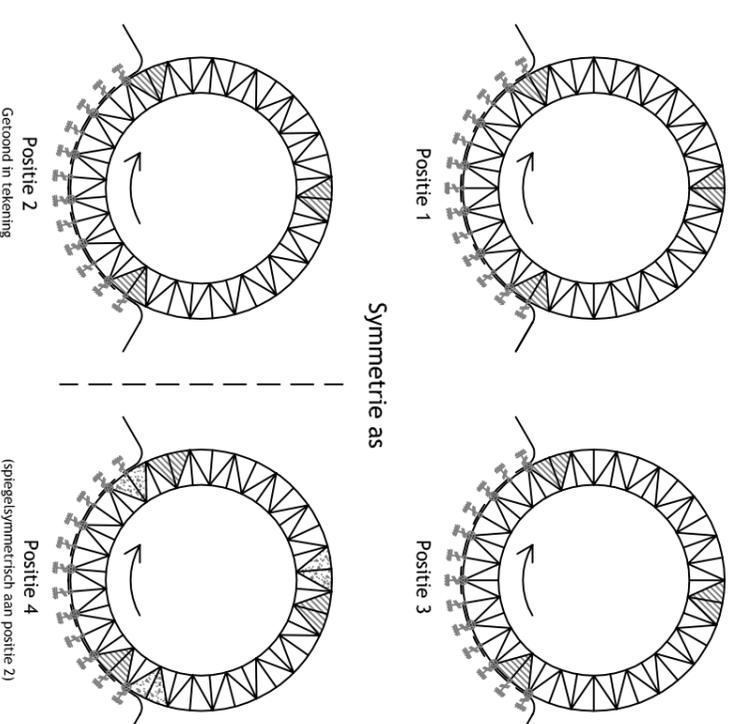
Project			
Great Dubai Wheel			
Titel			
Vervorming rad, positie 2			
Tekenaar	Datum	Tek. nr.	
Sjors Bolleboom	09-09-2008	2.1	
Formaat	Schaal	Eenheid	
A3	1:2.000	m	



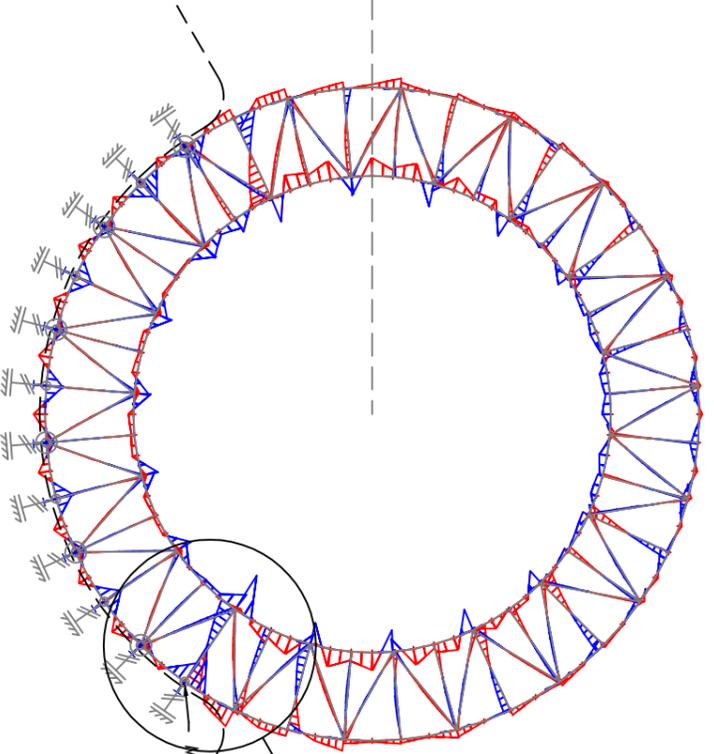
Verloop normalkracht ring C, positie 2
(Schaal 1:2.000)



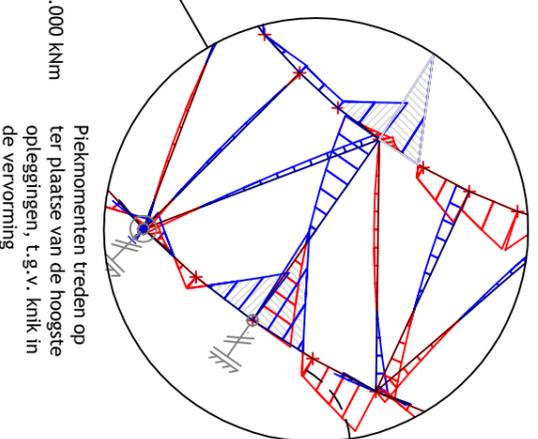
Verloop dwarskracht ring C, positie 2
(Schaal 1:2.000)



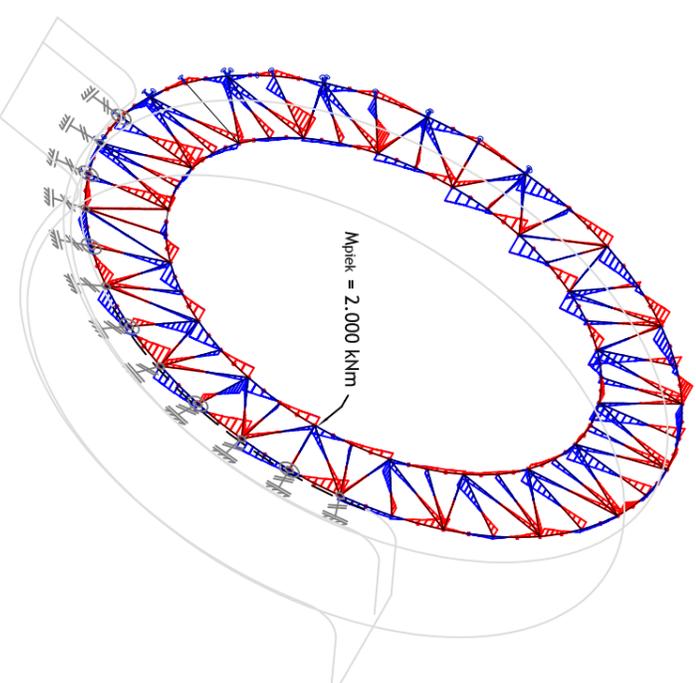
Onderzochte posities, ring C
(Schaal 1:5.000)



Verloop moment ring C, positie 2
(in het vlak van de ring)
(Schaal 1:2.000)



Piekmomenten treden op ter plaatse van de hoogste opleggingen, t.g.v. knik in de vervorming



Verloop moment ring C, positie 2
(uit het vlak van de ring)
(Schaal 1:2.000)

Opmerkingen:

- Elementkrachten zijn het hoogst in positie 2 (en 4).
- Positie 2 en 4 zijn spiegelsymmetrisch.
- Krachten ten gevolge van permanente belasting, afkomstig uit eigen gewicht hoofdtraagconstructie en hoofdcapsole
- Gebruikte veiligheidsfactor: $\gamma_G = 1,35$ (NEN 6702)
- Piekspanningen in treden op boven de hoogste steunpunten, zowel voor normaalkracht, als moment.
- Spanningen ten gevolge van normaalkracht en moment in het vlak zijn maatgevend bij de controle op vermoeting t.g.v. permanente belasting.

Project

Great Dubai Wheel

Titel

Krachtverloop ring C, t.g.v. permanente belasting

Tekenaar

Sjors Bolleboom

Datum

09-09-2008

Tek. nr.

2.2

Formaat

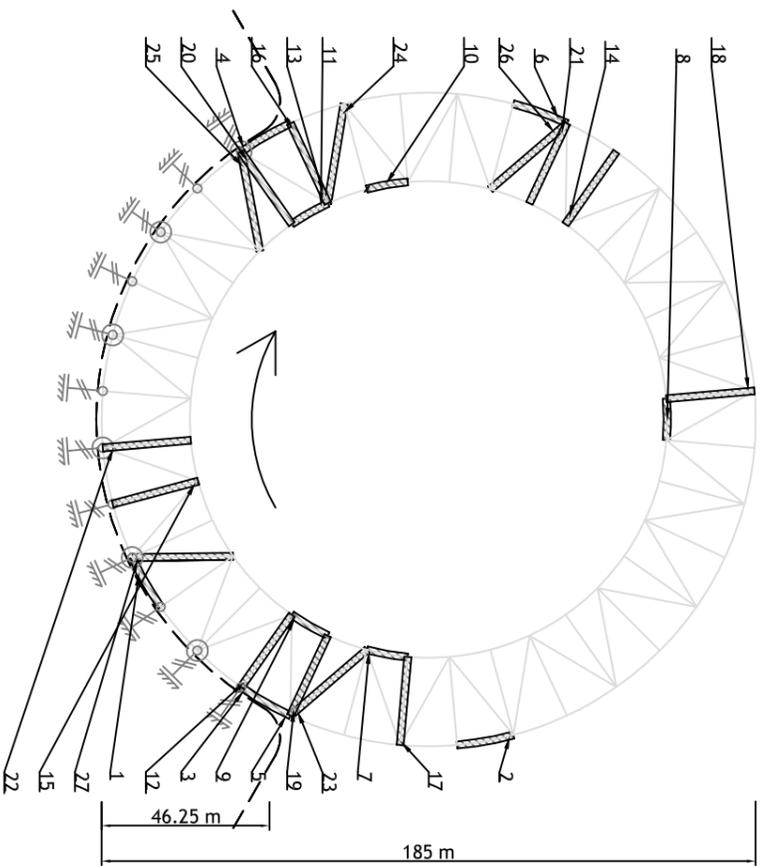
A3

Schaal

1:2.000

Eenheid

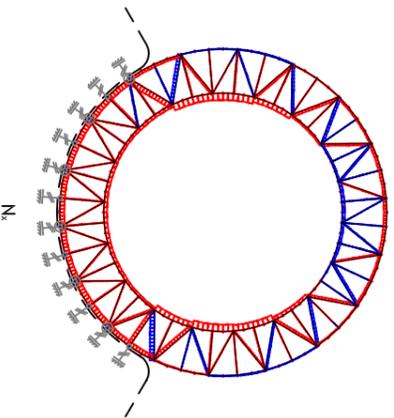
m



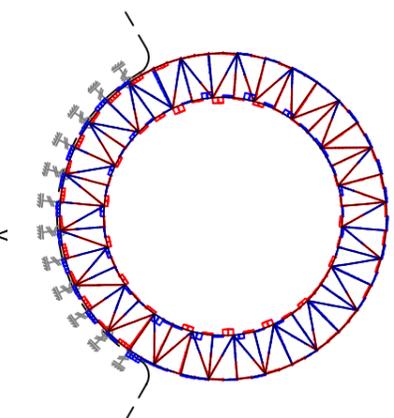
Overzicht beoordeelde elementen,
positie 2, ring C
(schaal 1:2.000)

locatie	Permanente belasting, positie 2, ring C ($\gamma_G = 1,35$)					Spanning uiterste vezel (N/mm ²)		
	$N_{p,d}$ (kN)	$G_{p,d}$ (N/mm ²)	$M_{p,d}$ (kNm)	$G_{w,p,d}$ (N/mm ²)	$M_{w,p,d}$ (kNm)	$G_{p,e,d}$ (N/mm ²)	$G_{w,p,e,d}$ (N/mm ²)	
Buitenring (CHS2220)								
1	-34.658	-126,5	4,747	± 32,4	1,093	± 7,4	-94,2	-158,9
2	5.853	21,4	-3,980	± 27,1	-1,962	± 13,4	48,5	-5,8
3	-27.397	-100,0	20,935	± 142,7	-28	± 0,2	42,7	-242,7
4	-17.060	-62,3	12,158	± 82,9	1,867	± 12,7	20,6	-145,2
5	-27.160	-99,2	-8,814	± 60,1	-1,049	± 7,1	-39,1	-159,2
6	5.652	20,6	-2,632	± 17,9	-2,066	± 14,1	38,6	2,7
Binnenring (CHS2220)								
7	-46.408	-169,4	10,986	± 74,9	1,914	± 13,0	-94,5	-244,3
8	16.430	60,0	4,211	± 28,7	-204	± 1,4	88,7	31,3
9	-33.590	-122,6	19,736	± 134,5	2,109	± 14,4	11,9	-257,2
10	-42.132	-153,8	-8,859	± 60,4	-685	± 4,7	-93,4	-214,2
11	-17.528	-64,0	-1,325	± 9,0	-1,665	± 11,3	-55,0	-73,0
Verticaal 1 (CHS2220)								
12	-21.160	-77,3	-9,108	± 62,1	574	± 3,9	-15,2	-139,3
13	3.275	12,0	-10,648	± 72,6	-647	± 4,4	84,5	-60,6
14	-870	-3,2	7,321	± 49,9	1,897	± 12,9	46,7	-53,1
15	-3.264	-11,9	-977	± 6,7	-2,314	± 15,8	-5,3	-18,6
16	2.974	10,9	11,445	± 78,0	591	± 4,0	88,9	-67,2
Verticaal 2 (CHS1440)								
17	-5.507	-31,3	-1,242	± 20,7	-427	± 7,1	-10,6	-52,0
18	3.476	19,8	-206	± 3,4	-529	± 8,8	23,2	16,3
19	-3.438	-19,5	-3,995	± 66,7	-21	± 0,4	47,2	-86,2
20	-4.590	-26,1	3,036	± 50,7	812	± 13,6	24,6	-76,8
21	-3.146	-17,9	-722	± 12,0	-732	± 12,2	-5,8	-29,9
22	-3.525	-20,0	-11	± 0,2	932	± 15,6	-19,9	-20,2
Diagonaal (CHS1440)								
23	-21.646	-123,1	-2,717	± 45,4	89	± 1,5	-77,7	-168,4
24	19.242	109,4	1,643	± 27,4	-141	± 2,3	136,8	82,0
25	6.048	34,4	1,858	± 31,0	623	± 10,4	65,4	3,4
26	-11.608	-66,0	-253	± 4,2	-804	± 13,4	-61,8	-70,2
27	-634	-3,6	-195	± 3,3	878	± 14,7	-0,3	-6,9

Normaalkrachtenverloop

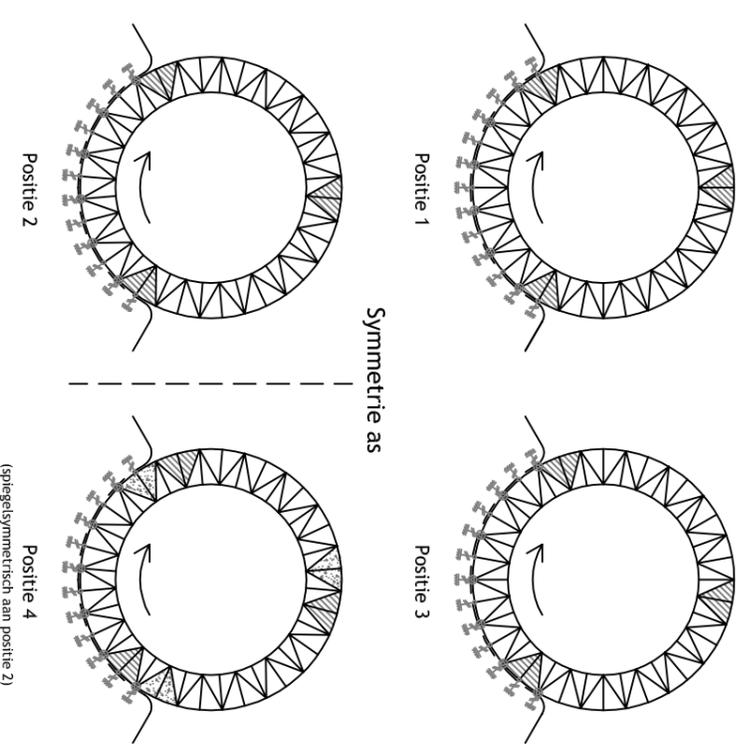
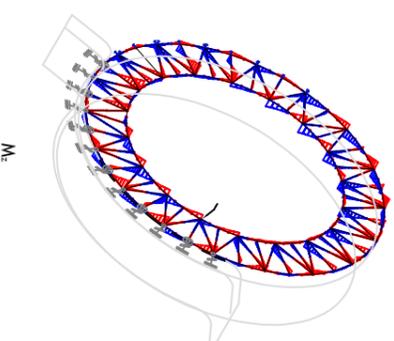
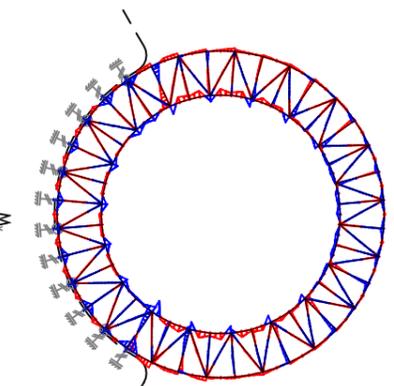


Dwarskrachtenverloop



Krachtsverloop, t.g.v. eigen gewicht, in ring C
(schaal 1:4.000)

Momenten verloop

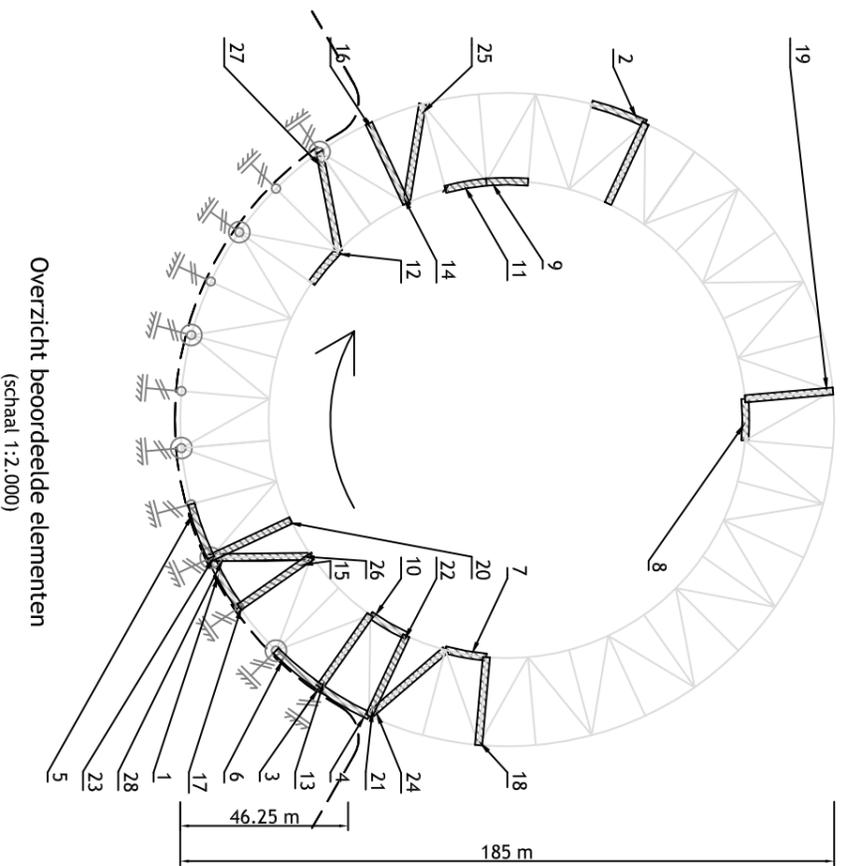


Onderzochte posities, ring C
(Schaal 1:5.000)

Opmerkingen:

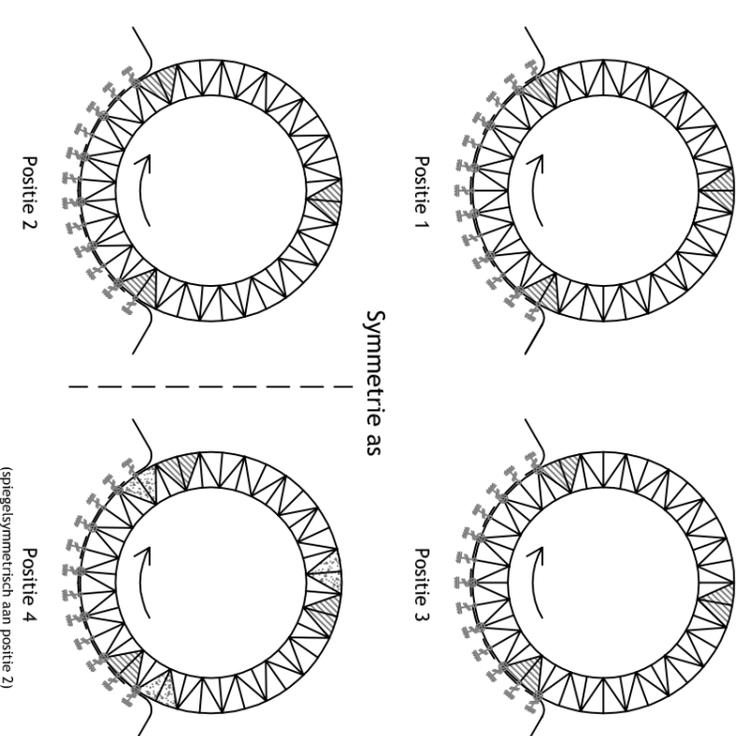
- Elementkrachten zijn het hoogst in positie 2 (en 4).
- Positie 2 en 4 zijn spiegelsymmetrisch.
- Gebruikte veiligheidsfactor: $\gamma_{ver} = 1,2$ en $\gamma_{ver} = 1,5$ (NEN 6702, PB)
- Permanente belasting bestaat uit: eigen gewicht hoofd draagconstructie en eigen gewicht hoofd-capsules
- Spanningen in profielen binnen/ en buitenring hoger dan de vloeispanning (355 N/mm²)!
- Positief is dun, negatief is dik

Project			
Great Dubai Wheel			
Titel			
Krachtsverloop ring C, t.g.v. permanente belasting			
Tekenaar	Datum	Tek. nr.	
Sjors Bolleboom	09-09-2008		
Formaat	Schaal	Eenhheid	
A3	1 : XX	mm	2.3



Overzicht beoordeelde elementen
(schaal 1:2.000)

locatie	Permanent B wind, positie 2, ring C						Spanning uiterste vezel (excl. dwarskracht)	
	Nx;d (kN)	BN;d (N/mm ²)	My;d (kNm)	dmY;d (N/mm ²)	Mz;d (kNm)	dmZ;d (N/mm ²)		
Buitenring								
1	-56,303	-205,6	7,118	± 48,5	2,960	± 20,2	-157,0	-254,1
2	7,893	28,8	-2,389	± 16,3	-1,556	± 10,6	45,1	12,5
3	-47,322	-172,8	30,234	± 206,1	-2,089	± 14,2	33,3	-378,9
4	-47,195	-172,3	-11,596	± 79,0	433	± 2,9	-93,3	-251,4
5	-43,738	-159,7	12,230	± 83,4	-4,531	± 30,9	-76,3	-243,1
6	-49,387	-180,3	6,845	± 46,7	6,994	± 47,7	-133,6	-227,0
Binnenring								
7	-62,589	-228,5	-11,172	± 76,2	1,512	± 10,3	-152,4	-304,7
8	26,286	96,0	5,947	± 40,5	-983	± 6,7	136,5	55,4
9	-59,978	-219,0	13,237	± 90,2	3,807	± 26,0	-128,7	-309,2
10	-50,854	-185,7	29,797	± 203,1	2,470	± 16,8	17,4	-388,8
11	-60,305	-220,2	-13,035	± 88,9	-454	± 3,1	-131,3	-309,0
12	-24,745	-90,3	11,127	± 75,8	-2,163	± 14,7	-14,5	-166,2
Verticaal 1								
13	-28,073	-102,5	-11,845	± 80,7	4,335	± 29,5	-21,8	-183,2
14	5,635	20,6	-14,606	± 99,6	-5,162	± 35,2	120,1	-79,0
15	-6,492	-23,7	-406	± 2,8	-11,787	± 80,3	-20,9	-26,5
16	5,367	19,6	15,179	± 103,5	3,207	± 21,9	123,1	-83,9
17	-7,011	-25,6	-1,264	± 8,6	6,812	± 46,4	-17,0	-34,2
Verticaal 2								
18	-7,306	-26,7	-852	± 5,8	-825	± 5,6	-20,9	-32,5
19	4,404	16,1	-339	± 2,3	764	± 5,2	18,4	13,8
20	-3,954	-14,4	-307	± 2,1	-3,608	± 24,6	-12,3	-16,5
21	-4,913	-17,9	-4,626	± 31,5	1,241	± 8,5	13,6	-49,5
22	-4,743	-17,3	3,982	± 27,1	-1,179	± 8,0	9,8	-44,5
23	-4,317	-15,8	-382	± 2,6	4,303	± 29,3	-13,2	-18,4
Diagonaal								
24	-26,929	-98,3	-2,950	± 20,1	829	± 5,7	-78,2	-118,4
25	25,529	93,2	1,281	± 8,7	608	± 4,1	101,9	84,5
26	-3,642	-13,3	829	± 5,7	-3,612	± 24,6	-7,6	-18,9
27	9,419	34,4	1,832	± 12,5	3,395	± 23,1	46,9	21,9
28	-4,099	-15,0	-615	± 4,2	3,864	± 26,3	-10,8	-19,2

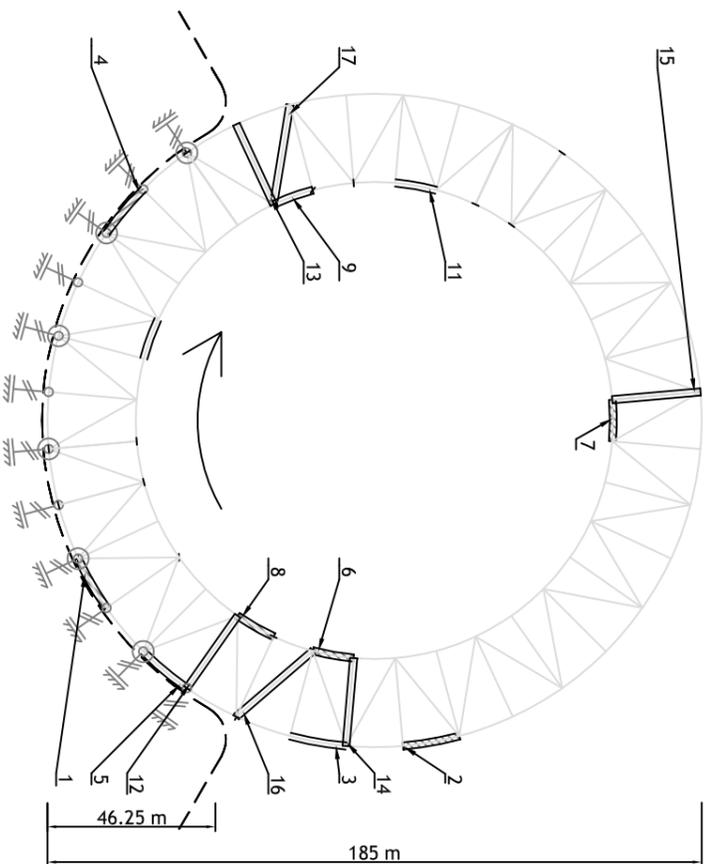


Onderzochte posities, ring C
(Schaal 1:5.000)

Opmerkingen:

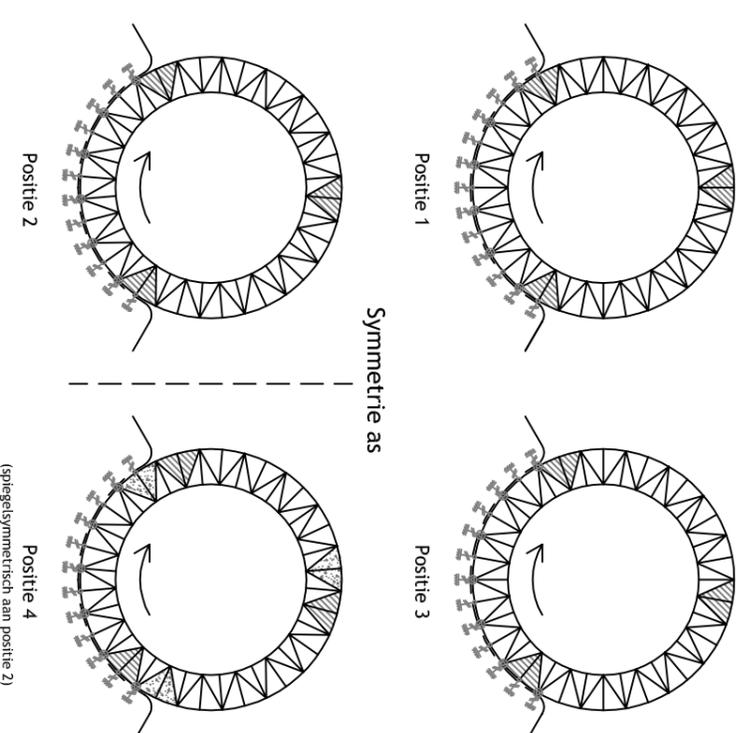
- Elementkrachten zijn het hoogst in positie 2 (en 4).
- Positie 2 en 4 zijn spiegelsymmetrisch.
- Gebruikte veiligheidsfactor: $\gamma_{ver} = 1,2$ en $\gamma_{ver} = 1,5$ (NEN 6702, PB)
- Permanente belasting bestaat uit: eigen gewicht hoofdtraagconstructie en eigen gewicht hoofd-capsules
- Spanningen in profielen binnen/ en buitenring hoger dan de vloeispanning (355 N/mm²)!
- Positief is dun, negatief is dik

Project			
Great Dubai Wheel			
Titel			
Krachtsverloop ring C, t.g.v. Permanent & wind			
Tekenaar	Datum	Tek. nr.	
Sjors Bolleboom	09-09-2008		
Formaat	Schaal	Eenheid	
A3	1 : XX	mm	2.4



Overzicht beoordeelde elementen
(schaal 1:2.000)

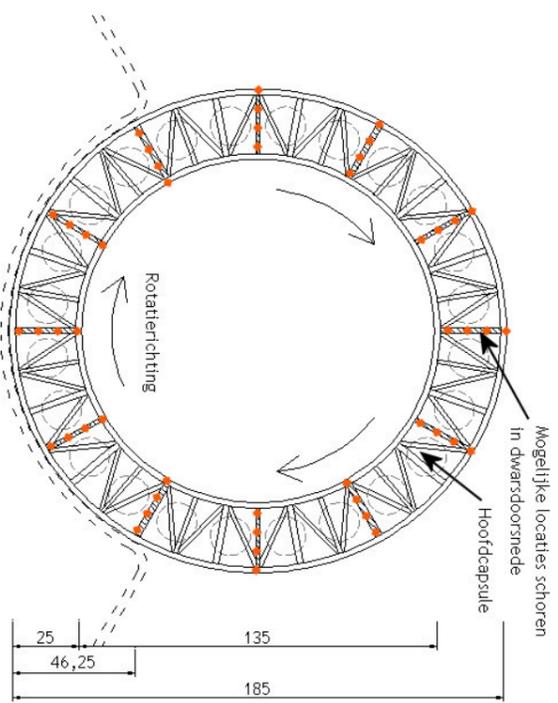
locatie	Permanente belasting, positie 2						Spanning uiterste vezel	
	Nx;d (kN)	Sx;d (N/mm ²)	My;d	oMy;d	Mz;d	oMz;d		
1	-34796	-127,0	4248	± 29,0	-270	± 1,8	-98,1	-156,0
2	4919	18,0	-3202	± 21,8	179	± 1,2	39,8	-3,9
3	-4190	-15,3	-2784	± 19,0	623	± 4,2	3,7	-34,3
4	-33555	-122,5	4078	± 27,8	-334	± 2,3	-94,7	-150,3
5	-28695	-104,8	15902	± 108,4	88	± 0,6	3,6	-213,2
Binnenring (CHS 2220)								
6	-45956	-167,8	8330	± 56,8	185	± 1,3	-111,0	-224,6
7	15610	57,0	4286	± 29,2	-276	± 1,9	86,2	27,8
8	-34257	-125,1	15007	± 102,3	293	± 2,0	-22,8	-227,4
9	-43579	-159,1	-10384	± 70,8	256	± 1,7	-88,3	-229,9
10	-19928	-72,8	7660	± 52,2	-345	± 2,3	-20,5	-125,0
11	-42958	-156,8	7726	± 52,7	362	± 2,5	-104,2	-209,5
V 1 (CHS 2220)								
12	-21728	-79,3	0	± 0,0	0	± 0,0	-79,3	-79,3
13	3269	11,9	0	± 0,0	0	± 0,0	11,9	11,9
V 2 (CHS 1440)								
14	-5963	-21,8	0	± 0,0	0	± 0,0	-21,8	-21,8
15	3642	13,3	0	± 0,0	0	± 0,0	13,3	13,3
D (CHS 1440)								
16	-22203	-81,1	0	± 0,0	0	± 0,0	-81,1	-81,1
17	20187	73,7	0	± 0,0	0	± 0,0	73,7	73,7



Onderzochte posities, ring C
(Schaal 1:5.000)

Opmerkingen:

- Elementkrachten zijn het hoogst in positie 2 (en 4).
- Positie 2 en 4 zijn spiegelsymmetrisch.
- Elementen wandstaven scharnieren aan doorgaande wandstaven verbonden. -> enkel piekmoment in wandstaven
- Creëren scharnieren moeilijk!
- Gebruikte veiligheidsfactor: $\gamma_{per} = 1,35$ (NEN 6702, PB)
- Normalkracht neemt toe, piekmoment neemt af.
- Positief is dun, negatief is dik



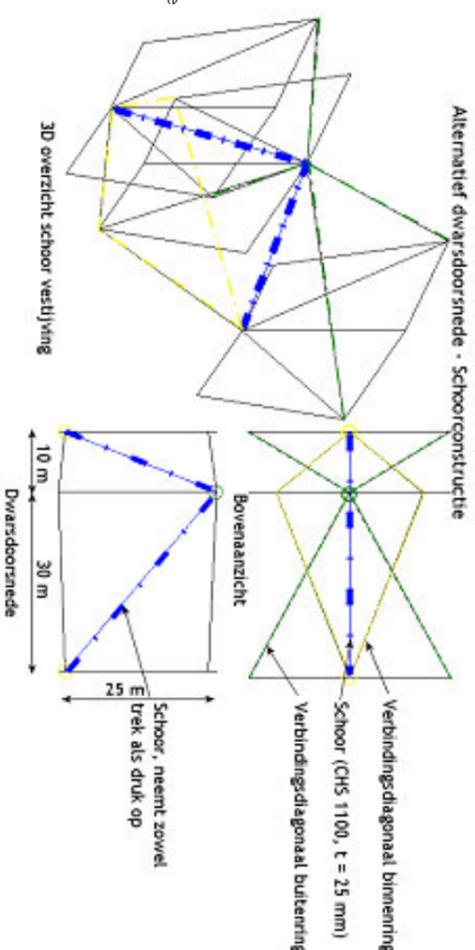
De schoren bevinden zich in axiale richting (loodrecht op ring).

De hinder van het vrije uitzicht van de hoogste capsule door de schoren is beperkt.

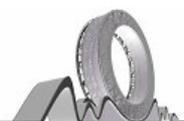
Hier wordt het uitzicht voornamelijk gehindert door de naastliggend capsule.

De zichthinder neemt af naar het midden van de ring, doordat de schoren vlakker komen te liggen.

In het midden van de ring ligt de schoor horizontaal en is er dus enkel hinder uit van de verbindingdiagonalen tussen de ringen.



Project			
Great Dubai Wheel			
Titel			
Aangepast krachtsverloop ring C, t.g.v. Permanente belasting (Schoorconstructie en scharnieren)			
Tekenaar	Datum	Tek. nr.	
Sjors Bolleboom	09-09-2008	2.5	
Formaat	Schaal	Eenheid	
A3	1 : XX	mm	



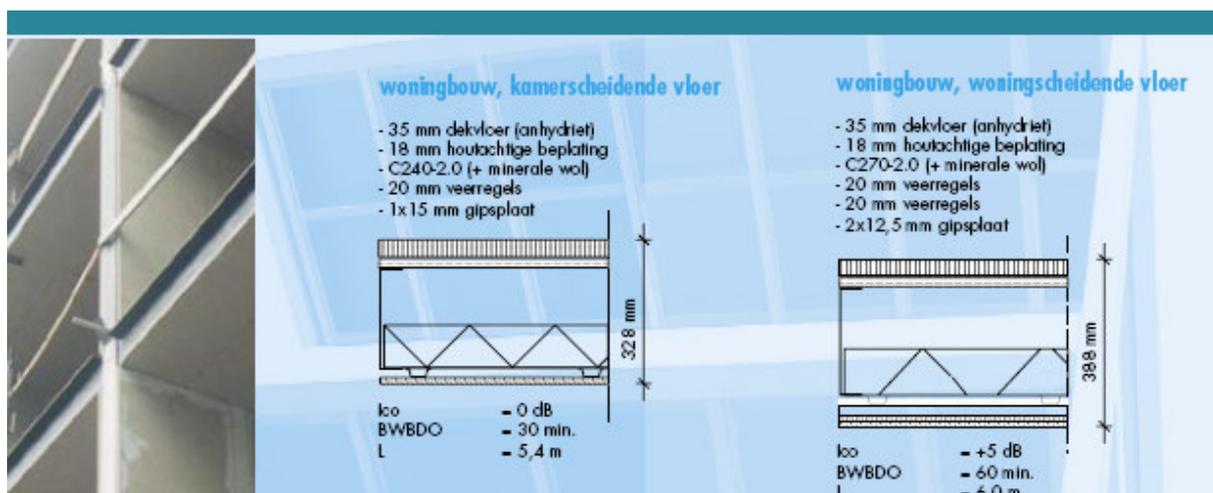
Bijlage B: Belastingen

B.1 Uitleg bepaling eigen gewicht capsule³

Hotelfunctie	PB	$\gamma_p=1,2$	VB	$\gamma_t=1,5$	Bijeenkomst	PB	$\gamma_p=1,2$	VB	$\gamma_t=1,5$
<u>Belastingen</u>					<u>Belastingen</u>				
Veranderlijk	$\psi=0,4$		1,75	kN/m ²	Veranderlijk	$\psi=0,25$		5,00	kN/m ²
Vloer + afwerklaag		1,40	kN/m ²		Vloer + afwerklaag		1,40	kN/m ²	
Leidingen, plafond, e.d.		0,50	kN/m ²		Leidingen, plafond, e.d.		0,50	kN/m ²	
Staal (constructie)		1,00	kN/m ²		Staal (constructief)		1,00	kN/m ²	
		2,90 kN/m ²		1,75 kN/m ²			2,90 kN/m ²		5,00 kN/m ²
Lichte sch. wanden		0,80	kN/m ²		Lichte sch. wanden		0,8	kN/m ²	
Façade		0,50	kN/m ²		Façade		0,50	kN/m ²	

Vloerconstructie, 1,4 kN/m²

Ook voor de vloerconstructie is vanwege het lage eigen gewicht gekozen voor een vloertype afkomstig uit de staalskeletbouw.

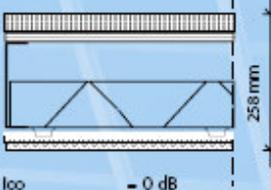


³ Bron: www.staalframebouw.nl



utiliteitbouw

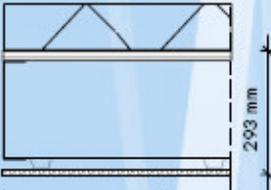
- 35 mm dekvloer (anhydriet)
- 18 mm houtachtige beplating
- C180-2.0 (+ minerale wol)
- 20 mm veerregels
- 2x12,5 mm gipsplaat



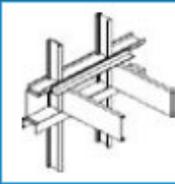
lco = 0 dB
 BWBDO = 60 min.
 L = 3,6 m
 h.o.h. = 400 mm

utiliteitbouw, dakvloer

- 100 mm afschotisolatie (niet in dikte)
- 18 mm houtachtige beplating
- C240-2.0
- 20 mm veerregels
- 1x15 mm gipsplaat



lco = -5 dB
 BWBDO = 30 min.
 L = 7,2 m
 h.o.h. = 400 mm
 Rc = 2,5 m2K/W

Opbouw	gewicht [dak] [kN/m²]	gewicht [vloer] [kN/m²]	dikte [mm]
[separaties]	0,00	0,50	0
dekvloer (anhydriet)	0,00	0,70	35
OSB/spaanplaat	0,10	0,10	18
C-liggers (t = 2 mm)	0,10	0,15	240
veerregels	0,05	0,05	20
gipsbeplating	0,25	0,25	25
		basis vloerdikte	338 mm

Voor een woningscheidende vloerconstructie bedraagt de belasting in dit geval:

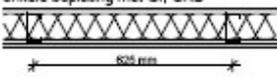
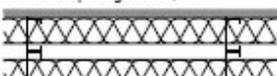
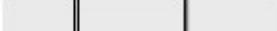
afwerklaag (40mm):	0,8	kN/m ²
OSB/spaanplaat:	0,1	kN/m ²
C-ligger:	0,15	kN/m ²
veerregel (2x):	0,1	kN/m ²
gipsbeplating:	0,25	kN/m ²
	1,4	kN/m ²

Deze waarde is inclusief een afwerklaag (40 mm anhydriet).



Wanden (Staal skeletbouw), 0,8 kN/m²

Voor de wandconstructie is vanwege het lage eigen gewicht gekozen voor een wandtype afkomstig uit de staalskeletbouw.

constructie	wanddikte	massa	karacteristieke luchtgeluidisolatie $I_{L,w}$	brandwerendheid (minuten)
enkele staalframebouw wand enkele beplating met GF GKB 	75 — 125 mm	35 — 45 kg/m ²	-18 to 0 dB	30
enkele staalframebouw wand dubbele beplating met GF GKB 	100 — 150 mm	45 — 65 kg/m ²	-10 tot +5 dB	60 90
enkele staalframebouw wand met veerregels dubbele beplating met GF GKB 	ca. 155 mm	ca. 52 kg/m ²	-5 tot +8 dB	60 90
dubbele staalframebouw wand dubbele beplating met GF GKB 	175 — 275 mm	65 — 80 kg/m ²	0 tot +15 dB	90 120
massieve kalkzandsteen wand 115 mm, afgesmeerd 	145 mm	200 kg/m ²	-15 tot -5 dB	90 120
massieve kalkzandsteen wand 245 mm, afgesmeerd 	270 mm	430 kg/m ²	-5 tot +3 dB	180

- brandwerendheid afhankelijk van de functie (dragend of niet-dragend)
- in alle gevallen geldt dat de prestatie afhangt van het stijl- en regelwerk en montage
- de karakteristieke geluidwering $G_{A,w}$ is afhankelijk van beglazing en ventilatie
- voor de luchtgeluidisolatie komt de invloed van bouwkroppen en plattegrond ertbij

54. Akoestische prestaties van verschillende staalframebouw wanden in vergelijking met massieve steenachtige elementen.

Voor een woningscheidende wandconstructie in de hotelcapsules bedraagt het gewicht van de wandconstructie:

$$F_{\text{tot}} = A_{\text{wand}} \cdot \rho_{\text{wand}}$$

$$A_{\text{wand}} = 9 \cdot (\pi/4 \cdot 152) + 30 \cdot 15 = 2040 \text{ m}^2$$

$$\rho_{\text{wand}} = 80 \text{ kg/m}^2 = 0,8 \text{ kN/m}^2 \text{ wandoppervlakte}$$

$$F_{\text{tot}} = 1632 \text{ kN}$$

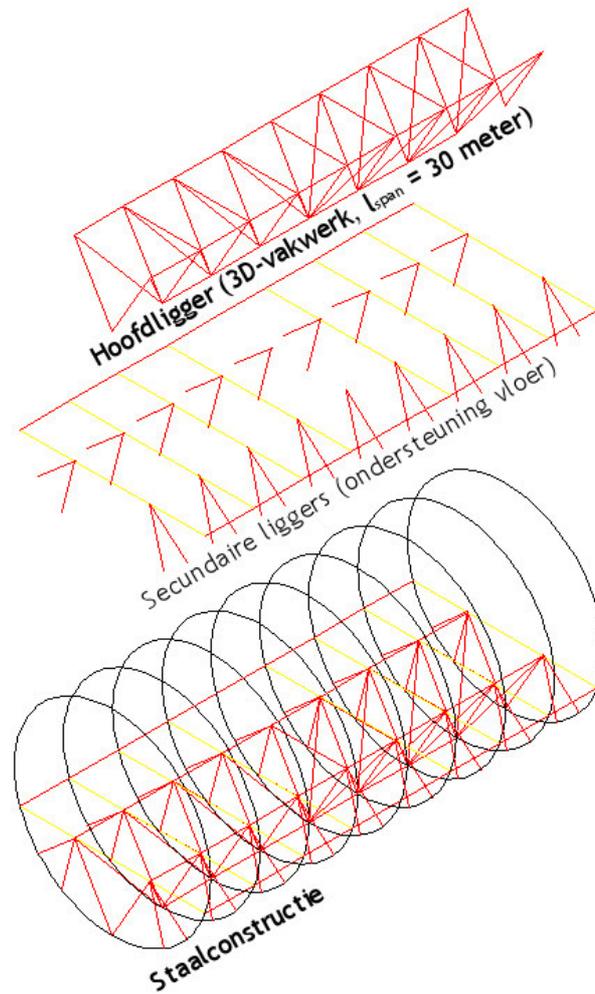
$$\rho_{\text{wand}} = 1632 / (15 \cdot 30) \approx 3,6 \text{ kN/m}^2 \text{ vloeroppervlakte}$$

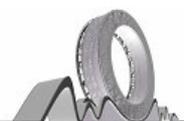
In de capsules met algemene ruimtes zal het oppervlakte van de wanden en eventueel ook het gewicht af kunnen wijken van de hierboven getoonde waarde. In deze capsule zal

echter de veranderlijke belasting een stuk hoger liggen. In eerste instantie is aangenomen dat alle capsules dezelfde wandconstructie hebben.

Staal, 1,0 kN/m²

In de capsule zal een stalen hulpconstructie geplaatst worden. Aangenomen is dat deze constructie omgerekend 450 kN = 45 ton zal wegen.





B.2 Grondeigenschappen⁴

In juli en augustus 2006 is er op de toekomstige locatie van het Great Dubai Wheel een grondonderzoek uitgevoerd door VETH Consulting, Sharjah.

Het doel van dit grondonderzoek was het verkrijgen van inzicht in de fysische, mechanische en chemische eigenschappen van de bodem. Met de uit het onderzoek verkregen resultaten kon een aanbeveling worden gedaan betreffende de fundering van het Great Dubai Wheel.

In de onderstaande tabel zijn de verschillende grondsoorten over de diepte weergegeven. De diepte is aangegeven ten opzicht van het Dubai Municipality Datum (DMD), de referentiehoogte in Dubai.

Elevation, m DMD		Geologic Description	Summary of test results	Material Classification
From	To			
23,2	22,7	Silty sand	N.A	N.A
22,7	9,2	Very silty sand	SPT: 23 ->50	Medium dense to very dense
9,2	3,19	Gypsiferous sand	SPT: >50	very dense
3,19	-1,3	Sandstone/Calcarenite	RQD (%) 0 - 99 UCS (Mpa) 0,75 - 6,66	Very weak to moderately weak
-1,3	-1,8	Siltstone/ Calcisiltite	RQD (%) 40 - 77 UCS (Mpa) 5,17 - 6,32	moderately weak

Tabel 55 - grondsoorten op projectlocatie Great Dubai Wheel

Aanbevelingen

Na onderzoek van de bodem kon geconcludeerd dat de bodem voldoende ondersteuning kan geven aan de constructie. De ondersteuning kan plaatsvinden op staal of via een paalfundering, afhankelijk van de belasting komende uit de constructie.

⁴ Bron: VETH Consulting; Site investigation proposed Great Dubai Wheel in Dubailand for Great Wheel Corporation. Dubai, 2006.

Fundering op staal

Fundering op staal wordt aanbevelen voor lichte constructies. De funderingsdiepte zal minimaal 1,0 m bedragen.

De toelaatbare grondspanningen onder de fundering is te zien in tabel 56.

Minimale diepte fundering, m	Breedte fundering, m	Net. Toelaatbare spanningen, kPa	Verwachte maximale zetting, mm
1,0 m	Tot 4,0 m	200 kPa	12 mm
1,0 m	4 - 8 m	180 kPa	25 mm
1,0 m	> 8 m	180 kPa	40 mm
2,0 m	Tot 4,0 m	225 kPa	15 mm
2,0 m	4 - 8 m	200 kPa	25 mm
2,0 m	> 8 m	200 kPa	50 mm

Tabel 56 - draagvermogen fundering op staal

Paalfundering

Voor zware belastingen en op plaatsen waar opwaartse krachten zijn, is het aan te bevelen om een geboorde paalfundering toe te passen. Geheide palen zijn leveren vaak problemen op bij het inheien, met schade aan de palen tot gevolg.

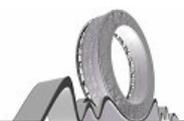
Het draagvermogen bij de geboorde palen wordt voornamelijk geleverd door wrijving langs de schacht, een beperkt deel wordt geleverd door het puntdraagvermogen van de paal.

De toelaatbare drukbelastingen en opwaartse belasting voor verschillende paaldiameters en dieptes is te zien in de onderstaande tabel. Een veiligheidsfactor van 3,0 is gehanteerd voor de schachtwrijving.

Het eigen gewicht van enkel de hoofddraagconstructie (rad) bedraagt 232.000 kN. Om dit gewicht op te nemen zijn ongeveer 40 palen nodig met een diameter van 1,0 meter en een paallengte van 22 meter. Het aantal palen zal verder toenemen als gevolg van de belasting uit de capsules, het gewicht van de onderbouw en de windbelasting.

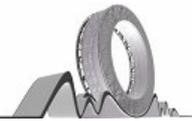
Diepte paalvoet, m DMD	Paallengte, m	Toelaatbare drukkracht, kN				
		Paaldiameter, m				
		0,5 m	0,75 m	1,0 m	1,2 m	1,5 m
5	15	899	1385	1895	2321	2990
4	16	1157	1882	2706	3436	4648
3	17	1378	2215	3150	3968	5313
2	18	1600	2548	3593	4500	5979
1	19	1822	2880	4037	5032	6644
0	20	2093	3323	4677	5847	7751
-1	21	2341	3695	5172	6442	8495
-2	22	2589	4067	5668	7038	9239

Tabel 57 - Draagvermogen geboorde paal (druk)



Diepte paalvoet, m DMD	Paallengte, m	Toelaatbare trekkracht, kN				
		Paaldiameter, m				
		0,5 m	0,75 m	1,0 m	1,2 m	1,5 m
5	15	595	892	1189	1427	1784
4	16	672	1008	1344	1613	2017
3	17	827	1241	1655	1986	2482
2	18	983	1474	1965	2358	2948
1	19	1138	1707	2276	2731	3414
0	20	1293	1940	2586	3104	3880
-1	21	1467	2200	2933	3520	4400
-2	22	1640	2460	3281	3937	4921

Tabel 58 Draagvermogen geboorde paal (trek)



Bijlage C: ESA-model

Cd-rom:

- ESA - model
- PDF, gebruikte profielen en belastingen in ESA model
- PDF, vervorming rad onder eigenfrequentie



Bijlage D: Sterkte

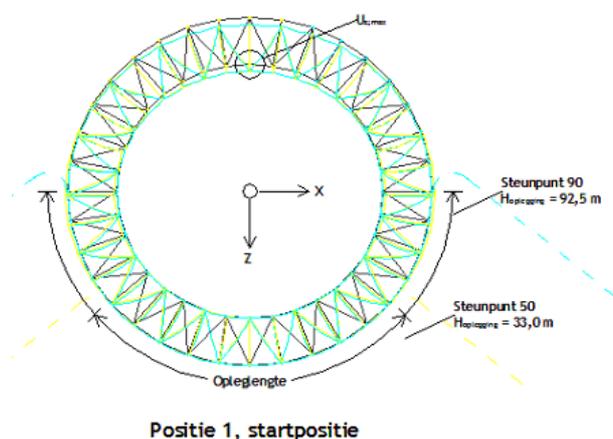
Ideeën voor aanpassingen met betrekking tot sterkte en vermoeiing

Andere mogelijkheden om het krachtsverloop te beïnvloeden worden in deze bijlage behandeld. Het effect van deze maatregelen is minder ver uitgewerkt dan de eerdergenoemde aanpassingen. De aanpassingen zijn veelal ingrijpender op het ontwerp van het rad, dan de in hoofdstuk 6, Sterkte en vermoeiing, behandelde aanpassingen.

Aanpassing opleghoogte

Door het rad over een grotere lengte/ hoogte te ondersteunen zullen de krachten in de elementen afnemen, indien de veerstijfheid van de opleggingen gelijk blijft. Deze afname van de interne krachten is het gevolg van een kleinere vervorming van het rad. De belasting op de ondersteuningsconstructie zal nu toenemen.

Vanuit architectonisch oogpunt is het echter niet wenselijk om de oplegging over de gehele omtrek van het rad door te laten lopen. Besloten is tot een maximale opleghoogte van $\frac{1}{4}$ van de totale hoogte (= 46 m). **Verandering van de opleghoogte is niet wenselijk.**



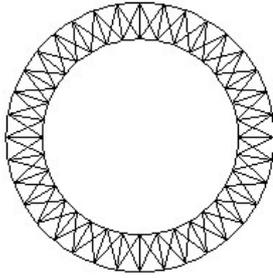
Figuur 272 - Gebruikt model ter bepaling de invloed van de opleglengte op de vervorming

Aanpassing vakwerktype

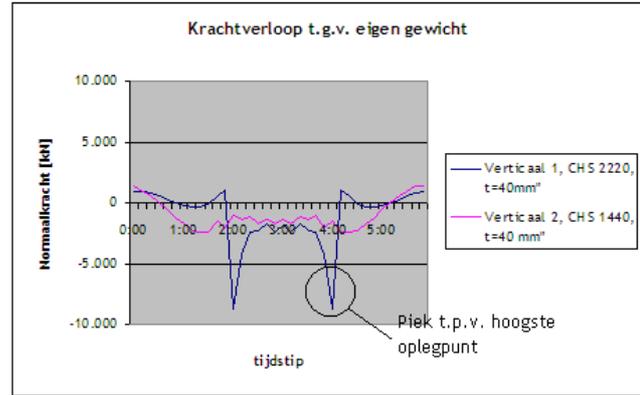
Een mogelijke aanpassing om de piekspanning in verticaal 1 boven de hoogste oplegging weg te nemen is om het ontwerp van de vakwerkkring te wijzigen. Van een Warren-vakwerk, naar een Vakwerk met kruisverbanden. Nu zullen de verticaal 1 en 2 een gelijke spanningswisseling ondergaan, waardoor voor de verticalen slechts één profieltype toegepast hoeft te worden.

Een aanpassing van het vakwerktype zal bovendien resulteren in een beperking van het aantal verschillende knooppunten.

Het aanpassen van het vakwerktype zal echter resulteren in een grote verandering van het uiterlijk van het rad. Deze verandering zal in strijd zijn met de wensen die de architect aan het ontwerp heeft gesteld.



Figuur 273 - Vakwerk met kruisverbanden



Figuur 274 - Normalkracht verloop in verticalen

Aanpassing aantal verticalen

Momenteel is het ontwerp van de vakwerkring opgedeeld in 36 stukken en ook 36 verticalen per ring. Door het aantal verticalen te verminderen naar bijvoorbeeld 24 (= aantal hoofdcapsules) zullen er aanzienlijk minder elementen en knooppunten noodzakelijk zijn. Aangezien de vermoeiing voornamelijk in de knooppunten op zal treden neemt het aantal potentiële plaatsen waar schade op kan treden af. De krachten in de elementen zullen echter toenemen waardoor ook de knooppunten zwaarder belast worden. Ook zal de constructie indien er minder verticalen aanwezig zijn slapper reageren.

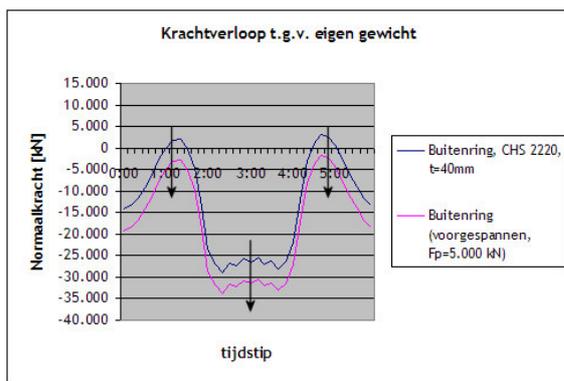
Of het verminderen van het aantal elementen een groot voordeel oplevert zal nader onderzocht moeten worden. Dit onderzoek valt buiten het bereik van dit rapport.

Voorspanning

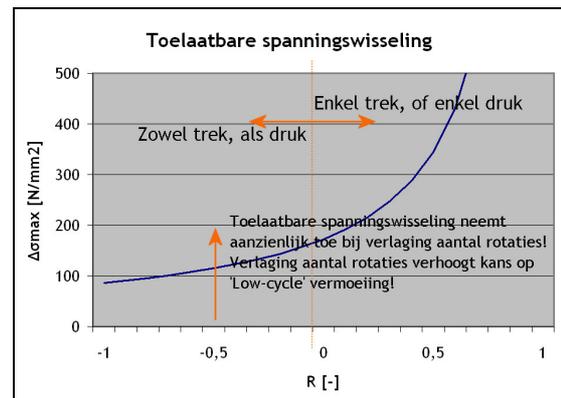
Door het rad voor te spannen zal de trek uit de diverse elementen worden weggenomen. Door het wegnemen van de trek zal het vermoeiingsgedrag van de constructie positief worden beïnvloedt, immers $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ neemt toe. Hierdoor neemt de toelaatbare

spanningswisseling
$$\Delta\sigma_{max,nom,vandstaaf} = \frac{\Delta\sigma_{geom.}}{\gamma_{Mf} \cdot C \cdot (1 - R) \cdot SCF}$$
 ook toe .

Een voorbeeld van de invloed van het voorspannen op de normaalkrachten in de elementen is in figuur 275 en figuur 276.

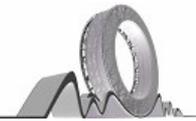


Figuur 275 - Effect voorspanning op krachtsverloop in de buitenring



Figuur 276 - Afhankelijkheid toelaatbare spanningswisseling ten opzichte van verhouding tussen σ_{max} en σ_{min} (R)

Het voorspannen van het Great Dubai Wheel is niet absoluut noodzakelijk. Vergroting van de profielafmetingen om zodoende de spanningswisseling te verlagen zal voldoende zijn.



Bijlage E: Stijfheid

Factoren van invloed op de vervorming

In het huidige ontwerp is aangenomen dat zowel de oplegging in zowel radiale als in axiale richting over de gehele opleglengte doorloopt. Het rad zal opgelegd zijn op het entreegebouw en is ondersteund tot een hoogte van 46 meter ($1/4 \cdot h_{\text{totaal}}$).

Zowel de variatie van de locatie van de axiale opleggingen als de opleglengte zullen de vervormingen van het rad beïnvloeden. In deze paragraaf zal de invloed van deze factoren onderzocht worden.

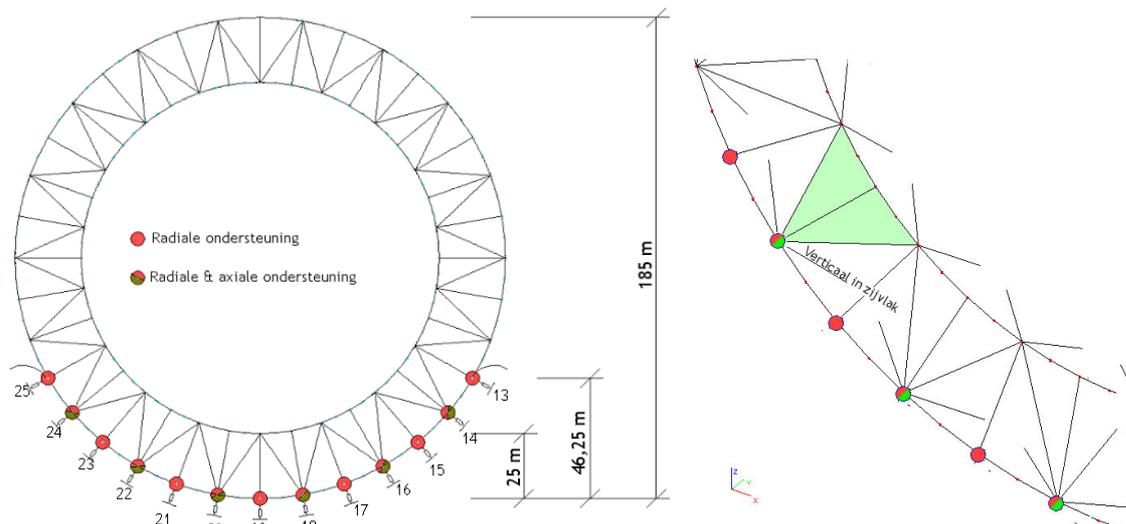
E.1 Invloed hoogte axiale oplegging op stijfheid

De grootte van de topverplaatsing is afhankelijk van de wijze van axiale ondersteuning. Deze ondersteuning kan op verschillende hoogte op de constructie aanwezig zijn.

De diverse ondersteuningsvormen en de hierbij behorende topverplaatsing worden in de volgende tabellen getoond. De constructie wordt belast door het eigen gewicht van de hoofddragconstructie, de hoofdcapsules, de zichtcapsules en door een windbelasting (excl. tweedeorde vergrotingsfactor). De gegeven uitbuigingen gelden voor de bruikbaarheids grenstoestand. De veerstijfheid van de oplegging in zowel de radiale als axiale richting bedraagt $1 \cdot 10^3$ MN/m (stijfheid van ongeveer 10 betonnen funderingspalen). Het opleg-/ entreegebouw zal ontworpen moeten worden om deze stijfheid te leveren.

De axiale opleggingen bevinden zich enkel in de knooppunten van de buitenring welke gesteund worden door de diagonalen tussen de ringen. Ongesteunde knooppunten zullen immers zeer slap reageren, waardoor de bijdrage aan de stijfheid minimaal is.

De maximale verplaatsing uit de bijkomende vervorming zal 370 mm mogen bedragen (scheefstand van 1:500)



Figuur 277 - Mogelijke locaties radiale en axiale ondersteuning, voor positie 1

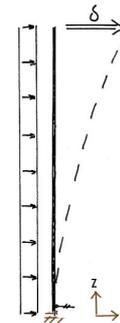
Inklemming

Wanneer de constructie enkel aan de voet wordt gesteund zal de constructie als een uitkragende buigligger vervormen. De axiale vervorming t.g.v. windbelasting bedraagt: 544 mm. Deze vervorming is te groot.

Ter bepaling van de berekening is een lineair elastische berekening uitgevoerd. Wanneer een niet-lineaire berekening wordt uitgevoerd zal het rad loskomen van zijn radiale steunpunten, er zal een instabiel systeem ontstaan, zie hoofdstuk 8.

Vanuit het oogpunt van stijfheid zal een inklemming aan de voet van de constructie niet voldoen.

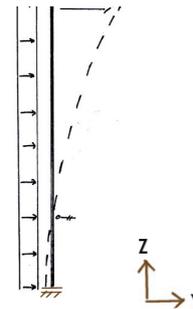
vervorming	Ux [mm]	Uy [mm]	Uz [mm]
e.g. ring	0	23	-101
e.g. hoofdcapsule	0	98	-58
e.g. zichtcapsule	0	-22	1
wind	0	544	-77
Totaal	0	643	-235



Tabel 59 - Topverplaatsing ring C, axiale oplegging onder (inklemming)

Door de hoogte van de axiale oplegging te laten toenemen, zal de vervorming afnemen. Wanneer de oplegging zich aan de top van het opleggebouw bevindt zal de vervorming 360 mm bedragen. Deze waarde is acceptabel.

vervorming	Ux [mm]	Uy [mm]	Uz [mm]
e.g. ring	0	21	-101
e.g. hoofdcapsule	0	88	-58
e.g. zichtcapsule	0	-20	1
wind	0	360	-65
Totaal	0	-449	-223

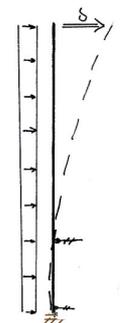


Tabel 60 - Topverplaatsing ring C, axiale oplegging boven (voetverplaatsing $u_{y;wind} = 15$ mm)

Meerdere Steunpunten

Door aan de voet van de constructie een steunpunt toe te voegen zal de vervorming aan de voet afnemen. Hierdoor neemt ook de totale vervorming verder af.

vervorming	Ux [mm]	Uy [mm]	Uz [mm]
e.g. ring	0	20	-100
e.g. hoofdcapsule	0	80	-20
e.g. zichtcapsule	0	-18	1
wind	0	347	-63
Totaal	0	-429	-218



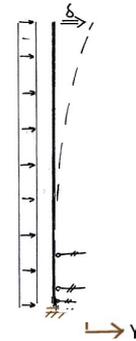
Tabel 61 - Topverplaatsing ring C, axiale oplegging onder en boven



Huidig ontwerp

In het huidig ontwerp is de constructie over de gehele opleglengte in axiale richting gesteund. De extra axiale ondersteuning zal weinig invloed hebben op de axiale vervorming. Een axiale ondersteuning over de gehele opleglengte zal het ontwerp van de axiale vervormingen boven de oplettingen doen afnemen.

vervorming	Ux [mm]	Uy [mm]	Uz [mm]
e.g. ring	0	20	-100
e.g. hoofdcapsule	0	80	-20
e.g. zichtcapsule	0	-18	1
wind	0	347	-63
Totaal	0	-429	-218



Tabel 62 - Topverplaatsing ring C, axiale opletting over de gehele lengte

Conclusie

De grote van de maximale horizontale uitwijking is voornamelijk afhankelijk van de locatie van de hoogste axiale opletting. Om de axiale uitwijking te beperken is het verstandig om het rad axiaal te.

NB:

Ter bepaling van de verplaatsing is gebruik gemaakt van een lineair elastische berekening. Aangenomen is dat de oplettingen zowel trek als druk op kunnen nemen. In werkelijkheid zal de opletting enkel druk opnemen. Hierdoor zal de aangenomen inklemming aan de voet niet in alle gevallen optreden. Zo zal aan de voet van de constructie bij een inklemming een scharnier ontstaan. Dit is te lezen in hoofdstuk 8. In het huidige ontwerp zal echter geen trek in de radiale oplettingen optreden, de gevonden vervormingen voor zijn voor het huidige ontwerp juist.

Naast de hoogte van de axiale opletting zal tevens de veerstijfheid van zowel de radiale als axiale ondersteuning de topuitwijking van het rad beïnvloeden. In deze paragraaf is dus slechts een indicatie gegeven van de te verwachten vervormingen bij de gebruikte veerstijfheden.

Het aantal axiale oplettingen zal tevens invloed hebben op de reactiekrachten in deze oplettingen.

E.2 Invloed opleglengte op de verticale vervorming t.g.v. eigen gewicht

Om de invloed van de opleglengte op de stijfheid (vervorming) van de constructie te onderzoeken is met behulp van het eindige elementen programma SCIA ESA PT de vervorming van de constructie bepaald bij verschillende opleglengtes.

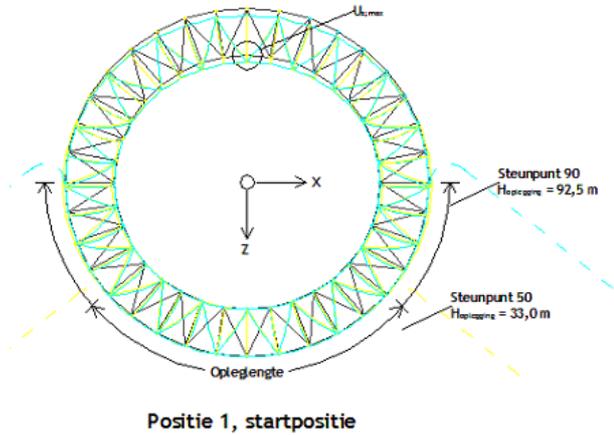
Gebruik is gemaakt van een 2D modellering van één vakwerking. De volgende aannamen zijn gedaan:

- De oplettingen zijn oneindig stijf
- De constructie is enkel belast door zijn eigen gewicht

Vanwege de verkozen vereenvoudiging van een 3D-vakwerk naar een 2D-vakwerk en de keuze voor een oneindig stijve ondersteuning zal de werkelijke topuitwijking afwijken. De in tabel 63 getoonde waarden dienen enkel ter indicatie van het verloop van de doorbuiging t.g.v. de opleglengte.

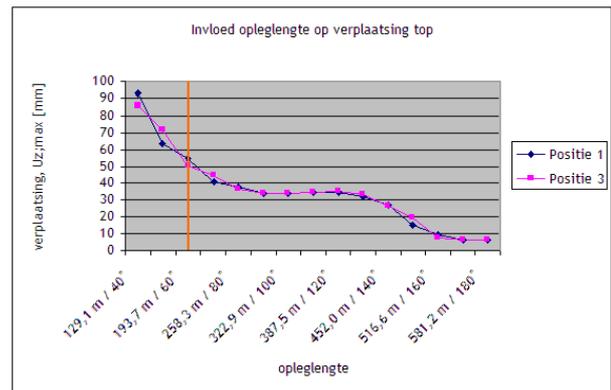
		U _z ;max	
Maximale opleghoogte	Opleglengte	Positie 1	Positie 3
12,6 m	129,1 m	93,1 mm	85,5 mm
33 m	161,4 m	63,6 mm	71,4 mm
46,25 m	193,7 m	54,5 mm	50,3 mm
60,8 m	226 m	40,9 mm	44,6 mm
76,4 m	258,3 m	38 mm	36,2 mm
92,5 m	290,6 m	34,1 mm	34,1 mm
108,6 m	322,9 m	34,1 mm	34,1 mm
124,1 m	355,2 m	34,8 mm	34,6 mm
138,8 m	387,5 m	34,5 mm	35,4 mm
152 m	419,8 m	32,3 mm	33,4 mm
163,4 m	452 m	27,2 mm	26,3 mm
172,6 m	484,3 m	15,1 mm	19,3 mm
179,4 m	516,6 m	9,2 mm	7,3 mm
183,6 m	548,9 m	6,3 mm	6,3 mm
185 m	581,2 m	6,3 mm	6,3 mm
Gehele hoogte			

Tabel 63 - U_z;max t.g.v. eigen gewicht bij verschillende opleglengtes



Positie 1, startpositie

Figuur 278 - Gebruikt model ter bepaling de invloed van de opleglengte op de vervorming



Figuur 279 - U_z;max t.g.v. eigen gewicht bij verschillende opleglengtes

In figuur 279 is getoond dat wanneer de opleglengte kleiner wordt de totale verplaatsing in de top snel toeneemt. Naarmate de opleglengte toeneemt, neemt de topverplaatsing af. Bij een opleglengte tussen 226 m ($h_{oplegging} = 60.8$ m) en 420 m ($h_{oplegging} = 152$ m) is de topverplaatsing min of meer constant. Bij een opleglengte groter dan 290,6 meter neemt de verplaatsing af, in dit geval zal het rad echter voor meer dan de helft opgelegd zijn in het hoofdgebouw. Opleglengten groter dan 290,6 meter zullen in werkelijkheid niet voorkomen.

In het ontwerp van de opleglengte zal naast de functionele en constructieve eisen als sterkte, stijfheid en stabiliteit ook rekening moeten worden gehouden met de architectonische eisen. Zo zal het uitzicht vanuit de hotelcapsules niet teveel mogen worden beïnvloed door de opleggingen. Om een vrij uitzicht in de hotelkamers te behouden zal een oplegconstructie en entreegebouw ontworpen moeten worden met veel transparantie. Voor het ontwerp van het entreegebouw is een opleghoogte van 40 à 50 meter aangenomen.



Conclusie

De vervorming zal minimaal zijn wanneer de radiale opleggingen doorlopen over de gehele hoogte. Dit is echter vanuit architectonisch oogpunt niet wenselijk

Naast de vervormingen zal er ook gekeken moeten worden naar architectonische eisen, zoals het vrije uitzicht uit het rad. De eis vanuit het vrije uitzicht zal de maximaal toelaatbare opleghoogte verlagen. Om het vrije uitzicht te behouden zal tevens een oplegconstructie ontworpen moeten worden met een hoge mate van transparantie.

NB:

In het onderzoek naar de invloed van de opleglengte is aangenomen dat de veerstijfheid van oplegging oneindig is. Ook is slechts één vakwerkschijf bekeken. Deze vereenvoudigingen hebben tot gevolg dat de werkelijke waarden van de vervorming enigszins zullen afwijken.

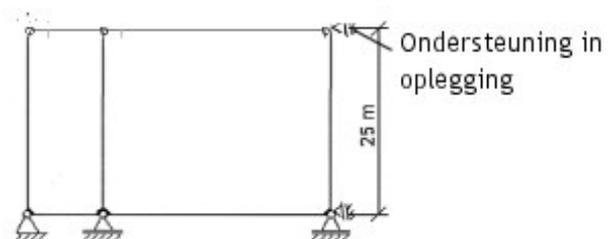


Bijlage F: Stabiliteit

F.1 Dwarsdoorsnede

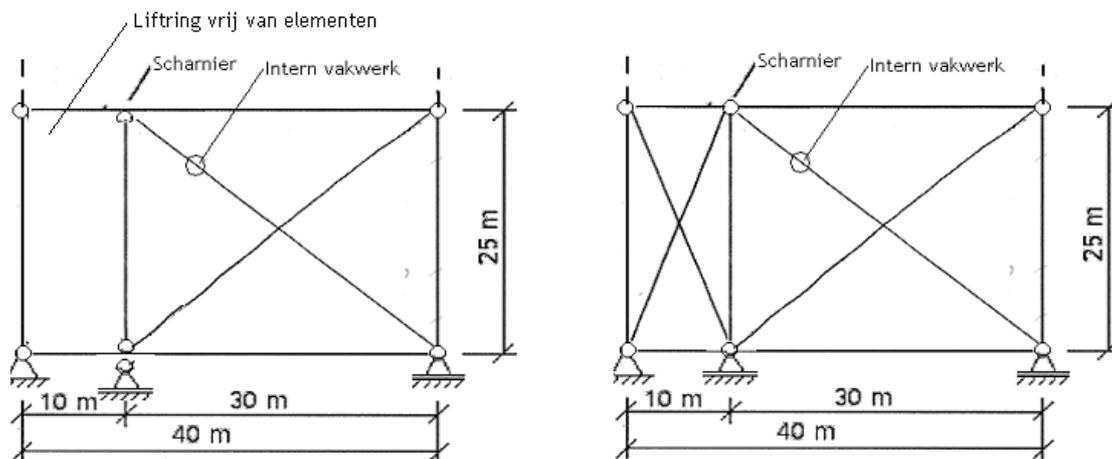
Om de globale stabiliteit van de dwarsdoorsnede te verhogen kunnen de in paragraaf 8.1.1 getoonde aanpassingen in de dwarsdoorsneden uitgevoerd worden. Deze aanpassingen zijn er voornamelijk op gericht om de samenwerking tussen de buiten- en binnenring van het rad te verbeteren. In het huidige ontwerp wordt deze samenwerking verkregen uit de momentvaste knooppunten van de dwarsdoorsnede.

Het toevoegen van een extra axiaal steunpunt figuur 280 zal de samenwerking tussen buiten- en binnenring niet verhogen, de binnenring zal nu echter net als de buitenring aan de voet van het rad axiaal gesteund worden, via schijfwerking in de verbindingsdiagonalen zal de gehele binnenring door deze extra oplegging gestabiliseerd worden. Het toevoegen van een extra axiale oplegging op de binnen ring zal het uiterlijk van het ondersteuning- / entreegebouw sterk beïnvloeden.



Figuur 280 - Toevoeging axiaal steunpunt in de binnenring

Een andere mogelijkheid om de samenwerking tussen de buiten- en binnenring te verhogen is het toevoegen van een intern vakwerk. Deze aanpassing zal het uiterlijk van het rad minimaal beïnvloeden. Het vrije uitzicht uit de capsules zal door het toegenomen aantal elementen echter wel beïnvloed worden. Vanwege deze beïnvloeding van het vrije uitzicht is deze toepassing vanuit architectonisch oogpunt niet toegestaan.



Figuur 281 - Toevoeging intern vakwerk

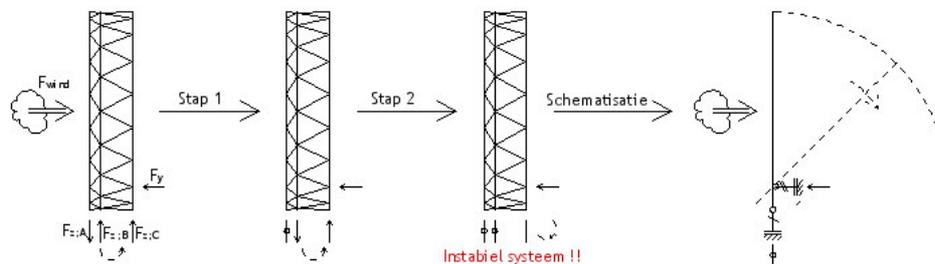
F.2 Kantelinstabiliteit

Invloed axiale oplegging op de kantelveiligheid

In het huidige ontwerp van het Great Dubai Wheel is aangenomen dat de axiale opleggingen over de gehele oplegglengte verdeeld zijn. De opleggingen bevinden zich op meerdere niveaus. Om het aantal axiale steunpunten te beperken kan er ook voor gekozen worden om het rad op slecht op één niveau in axiale richting te steunen.

Axiale ondersteuning op één niveau

Wanneer het rad op slechts één niveau in axiale richting gesteund wordt, dan zal het kantelmoment opgenomen worden door een koppel in alleen de radiale richting. Wanneer de windbelasting trek in deze radiale opleggingen veroorzaakt, dan zal het benodigde koppel niet kunnen optreden, de constructie kantelt. De trek in de radiale steunpunten wordt voorkomen door het eigen gewicht van de constructie.

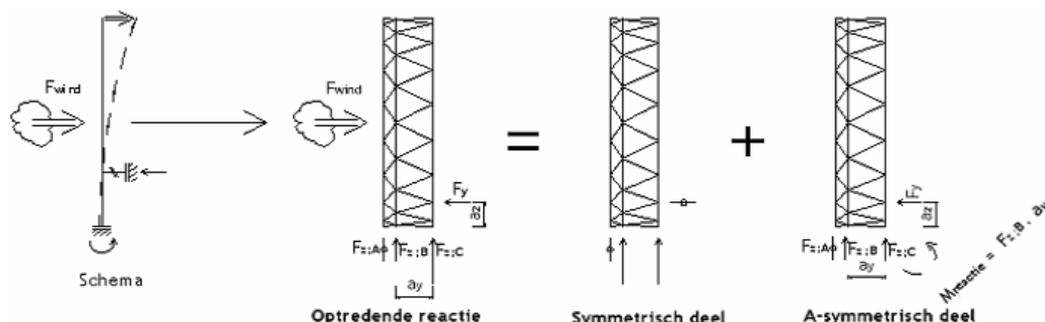


Figuur 282 - Schematisering gedrag constructie onder windbelasting, bij een axiale ondersteuning aan de voet.

Wanneer de constructie op slechts één niveau gesteund wordt, ontstaat er enkel een koppel in de radiale opleggingen. Trek in deze opleggingen zal leiden tot het kantelen van de constructie.

Door de hoogte van het axiale steunpunt te laten toenemen, neemt het kantelmoment t.g.v. de windbelasting af. De benodigde verticale belasting, uit het eigen gewicht, benodigd om een tegengesteld koppel te kunnen vormen en trek in de opleggingen te voorkomen, neemt eveneens af.

De minimaal benodigde opleghoogte in axiale richting is afhankelijk van de grootte van de windbelasting en het eigen gewicht. Bij een hoog eigen gewicht zal geen trek in de oplegging ontstaan wanneer de axiale ondersteuning zich aan de voet van het rad bevindt ($a_y = 0$) en is er geen gevaar voor kantelen van de constructie.

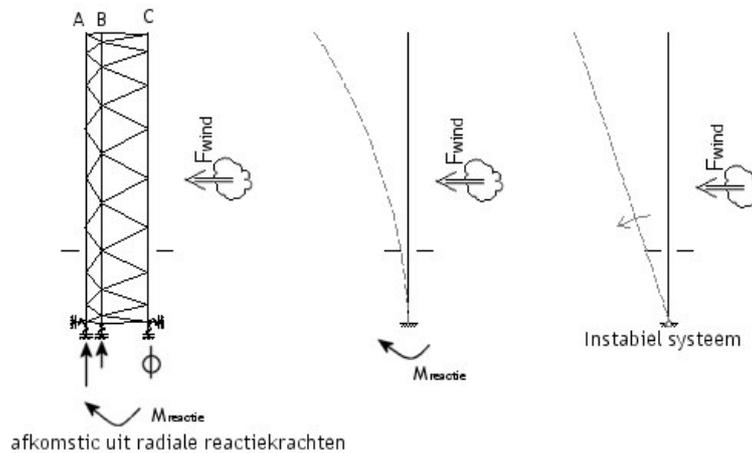


Figuur 283 - Schematisering gedrag constructie onder windbelasting en (voldoende) eigen gewicht



Inklemming aan de voet

Wanneer de constructie enkel aan de voet in axiale richting gesteund wordt, dan zal deze zich als een ingeklemde kolom/ uitkragende ligger gedragen. Het inklemmingsmoment wordt enkel door een koppel in de radiale opleggingen opgenomen. Deze radiale opleggingen kunnen enkel drukkrachten als reactiekracht opnemen, trekkrachten worden niet in de oplegging opgenomen en zullen dan ook geen bijdrage aan het koppel hebben.



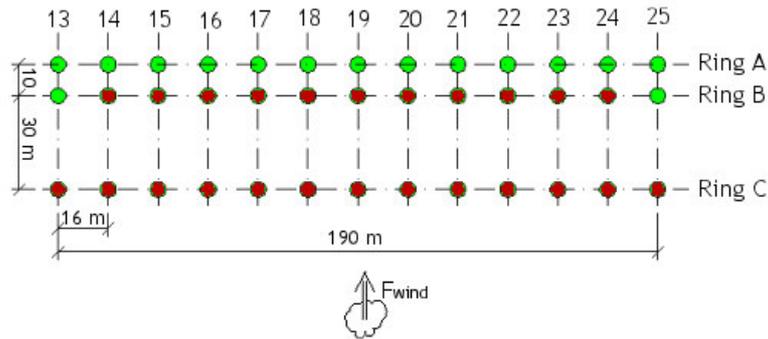
Figuur 284 -Schematisatie gedrag constructie onder windbelasting bij een inklemming aan de voet

Om het inklemmingsmoment te leveren moet onder minimaal twee ringen een drukkracht optreden, welke een koppel vormen. Indien deze drukkrachten niet aanwezig zijn, vormt zich aan de voet van het rad een scharnier en kantelt de constructie. Het huidige ontwerp heeft een te laag eigen gewicht om dit koppel te kunnen vormen, waardoor de constructie instabiel is.

Een constructie ingeklemd aan de voet gedraagt zich onder windbelasting enkel stabiel wanneer naast het eigen gewicht van de hoofddraagconstructie tevens het eigen gewicht van de hoofdcapsules wordt in de controle wordt meegenomen.

De constructie is in het bovenstaande geval weliswaar stabiel. Door het loslaten van de constructie onder ring C, is de funderingsstijfheid zeer laag, de topverplaatsing ten gevolge van windbelasting is aanzienlijk.

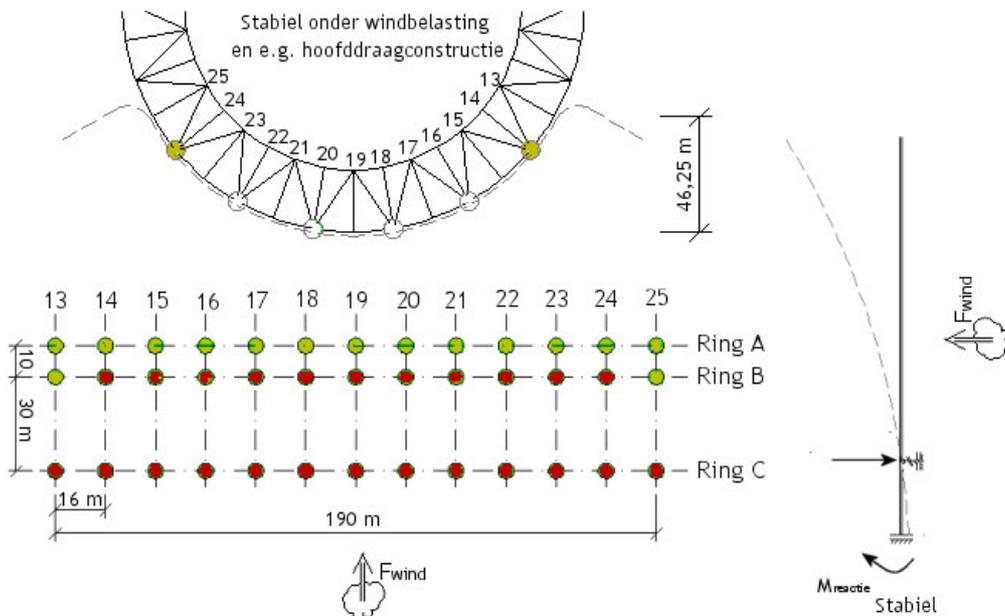
Wanneer naast het eigen gewicht van de hoofddraagconstructie tevens het eigen gewicht van de hoofdcapsule wordt meegenomen is er onder zowel ring A, als Ring B een drukkracht aanwezig (zie figuur 285). Er ontstaat een koppel ten gevolge van de radiale reactiekrachten, welke tegengesteld is aan het kantelmoment ten gevolge van de windbelasting. De constructie is in dit geval weliswaar stabiel, maar door het loslaten van de constructie onder ring C, is de funderingsstijfheid zeer laag. De topverplaatsing ten gevolge van windbelasting is dan ook aanzienlijk.



Figuur 285 - Constructieve reactie op windbelasting en eigen gewicht van zowel de hoofddraagconstructie als de hoofdcapsules, bij axiale steunpunten op as 18 en 20 (inklemming)

Toename hoogte axiale oplegging

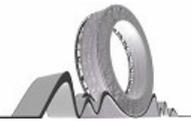
Door de hoogte van de axiale oplegging te vergroten neemt het kantelmoment af. Door de oplegging naar stramien 14 en 24 te verplaatsen (hoogst mogelijke positie), zal het kantelmoment opgenomen kunnen worden door het koppel ten gevolge van het eigen gewicht van de hoofddraagconstructie. De constructie komt los onder vakwerkkring C. Het koppel wordt geleverd door de drukkrachten onder ring A en B (zie figuur 286).



Figuur 286 - Constructieve reactie op windbelasting en eigen gewicht hoofddraagconstructie bij axiale steunpunten op as 14 en 24

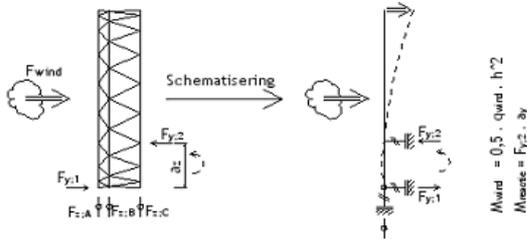
Wanneer de constructie op slechts één niveau wordt gesteund moet dit steunpunt zo hoog mogelijk geplaatst worden om zodoende het kantelmoment t.g.v. windbelasting te beperken.

De constructie zal bij een hogere plaatsing van het axiale steunpunt weliswaar bestand zijn tegen kantelen. De totale vervorming van het rad (vergroot door loslaten van het rad van de opleggingen) is in dit geval echter matgevend.

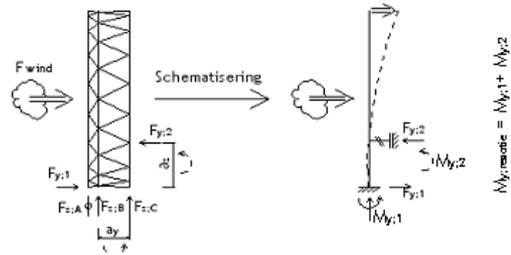


Axiale ondersteuning op meerdere niveaus

Wanneer aan de voet van de constructie geen inklemming ontstaat, is de constructie instabiel bij een axiale oplegging op slechts één niveau. Door het toevoegen van extra axiaal steunpunten kan het kantelmoment komende uit de windbelasting ook worden opgenomen in de axiale richting. De constructie zal altijd stabiel zijn tegen kantelen.



Figuur 287 - Schematisering gedrag constructie onder windbelasting

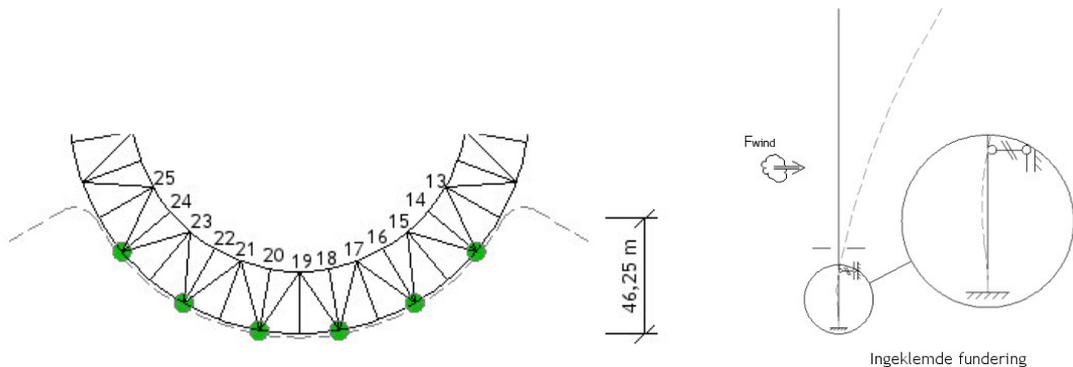


Figuur 288 - Schematisering gedrag constructie onder windbelasting en eigen gewicht

Wanneer de constructie voldoende eigen gewicht heeft, ontstaat in de radiale opleggingen geen trek. Het moment komende uit de windbelasting wordt nu opgenomen door een koppel in zowel de axiale, als de radiale richting. Dit is in figuur 288 getoond.

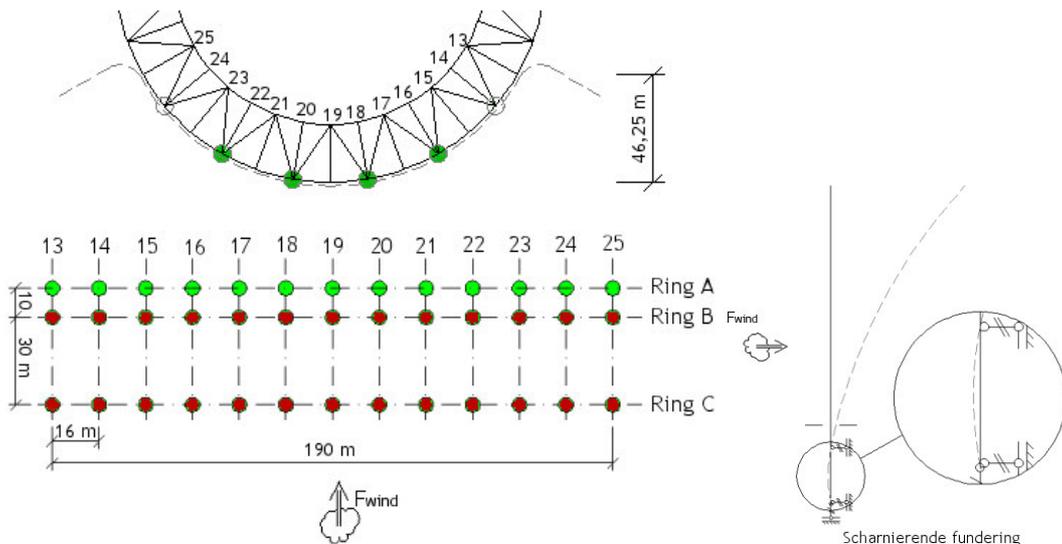
Als gevolg van het optreden van het koppel in de axiale steunpunten zullen de axiale reactiekrachten in de hoogste steunpunten hoger liggen dan bij de ondersteuning op slechts één niveau ($> \frac{1}{2} F_{wind}$).

In het huidige ontwerp bevinden de axiale opleggingen zich in de oplegpunten 14, 16, 18, 20, 22 en 24.



Figuur 289 - Constructieve reactie bij axiale steunpunten op as 14, 16, 18, 20, 22 en 24 (huidige ontwerp)

In de opleggingen kan een koppel ontstaan in zowel de radiale, als de axiale richting. In de radiale opleggingen onder ring C zal trek ontstaan, waardoor deze opleggingen geen kracht zullen opnemen. Door het wegvallen van de radiale opleggingen onder ring C neemt de funderingsstijfheid af en neemt de totale vervorming toe.



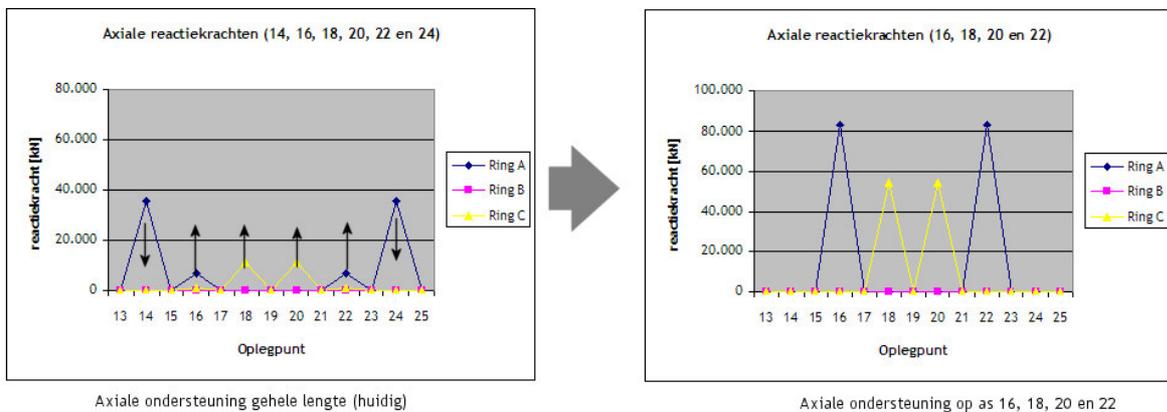
Figuur 290 - Constructieve reactie bij axiale steunpunten op as 16, 18, 20 en 22

Om het aantal benodigde axiale steunpunten te beperken is het mogelijk om enkel op as 16, 18, 20 en 22 steunpunten te plaatsen. Deze configuratie veroorzaakt, ten gevolge van windbelasting en het eigen gewicht van de hoofddragconstructie, trek onder zowel ring B, als ring C. Hierdoor is het ontstaan van een koppel in radiale richting onmogelijk. De constructie vervormt aan de voet als een scharnier.

Wanneer de constructie op meerdere niveaus wordt gesteund ontstaat een koppel in zowel radiale, als axiale richting. Hierdoor neemt de reactiekracht in axiale richting toe.

Om de toename in axiale reactiekrachten te beperken is het verstandig de arm tussen de axiale reactiekrachten zo groot mogelijk te maken; hoogste oplegging zo hoog mogelijk plaatsen.

Het kantelmoment ten gevolge van de windbelasting moet nu geheel door de axiale steunpunten worden opgenomen. De krachten in deze axiale steunpunten zijn aanzienlijk groter dan in het huidige ontwerp van de constructie. Dit is het gevolg van het toenemen van het op te nemen moment en het afnemen van de verticale afstand (arm) tussen de axiale opleggingen.



Figuur 291 - Verschil axiale reactiekrachten, afhankelijk van locatie axiale steunpunten



Conclusie

Het huidige ontwerp van het rad met axiale opleggingen over de gehele opleglengte is altijd stabiel zijn tegen kantelen. Het door de wind veroorzaakte kantelmoment wordt opgenomen door een koppel bestaande uit zowel de radiale, als de axiale reactiekrachten.

Door de verdeling van de axiale opleggingen over de gehele opleglengte is de arm tussen de hoogste en laagste oplegging maximaal, dit beperkt de toename van de axiale reactiekracht.

Het loslaten van de steunpunten onder windbelasting leidt niet tot kantelen van de constructie. De stijfheid van de fundering neemt echter wel af, waardoor de vervorming toeneemt. Het loslaten van het rad zal, vanuit het oogpunt van stijfheid niet wenselijk zijn.

NB:

Bij de controle van de kantelstabiliteit is uitgegaan van een uniform windprofiel over de hoogte van het gebouw. Als waarde voor de stuwdruk is de maximale waarde gehanteerd, welke op 185 meter hoogte optreedt. In werkelijkheid verloopt het windprofiel logaritmisch, waardoor resulterende windbelasting lager zal zijn, dit resulteert in een lagere trekkracht ten gevolge van wind.

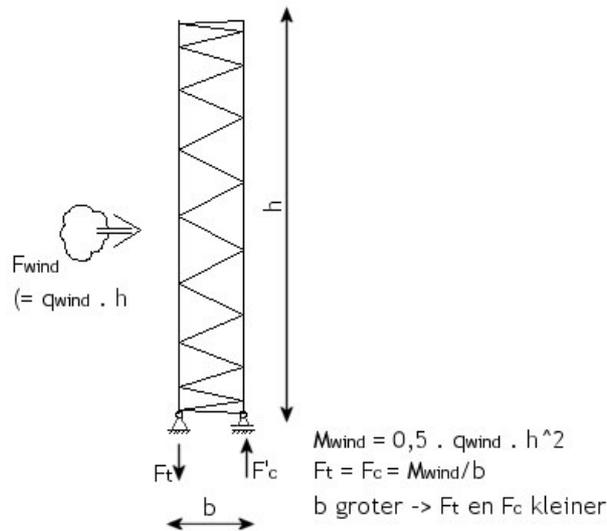
De windbelasting is afhankelijk van de windrichting, een gunstige situering van het rad ten opzicht van de wind zal resulteren in een lagere windbelasting.

Factoren van invloed op de kantelstabiliteit

De stabiliteit van de constructie onder windbelasting (kantelstabiliteit) wordt beïnvloed door een aantal variabelen. Zoals de breedte van de voet, de hoogte van de axiale steun en de belasting. Het huidige ontwerp van het rad is reeds stabiel, de in deze paragraaf getoonde aanpassingen zijn dan ook niet noodzakelijk om toe te passen.

Breedte van de voet

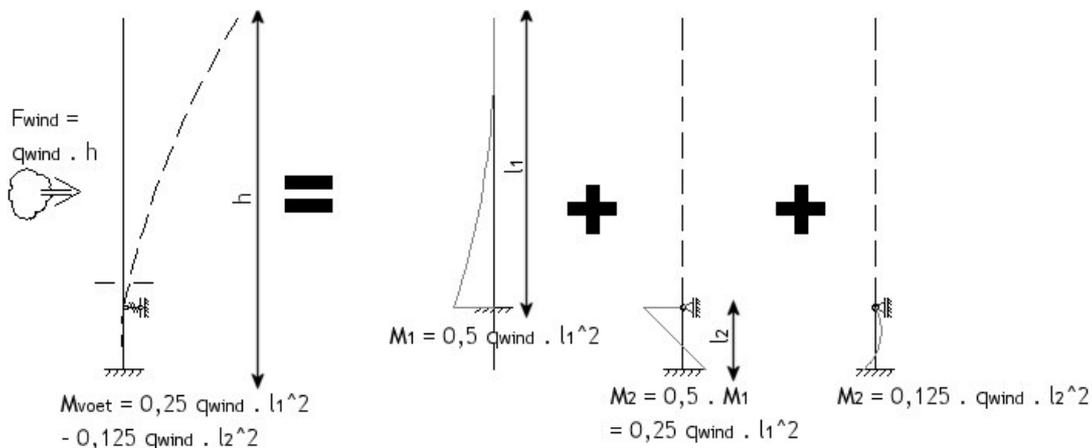
De breedte van de voet bepaalt de grootte van de trekkracht die zal ontstaan ten gevolge van de windbelasting. Deze drukkracht afkomstig uit het eigen gewicht zal de trekkracht moeten verminderen en het liefst zelfs geheel wegnemen. Een grotere breedte van de voet van het rad betekent een lagere trekkracht, en een hogere veiligheid tegen kantelen.



Figuur 292 - Verband breedte constructie en reactiekrachten

Hoogte axiaal steunpunt

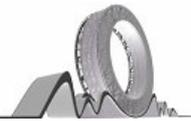
Wanneer de axiale opleghoogte van het rad toeneemt, zal tevens het moment aan de voet afkomstig uit de wind (kantelmoment) afnemen. In de radiale opleggingen zal als gevolg van het lagere moment tevens een lagere trekkracht optreden, welke door een lager eigen gewicht opgenomen kan worden. Des te hoger de axiale oplegging des te lager de benodigde verticale belasting.



Figuur 293 - Verband axiale opleghoogte constructie en moment aan de voet

Belasting

De veiligheid van de constructie tegen kantelen wordt bepaald door de belastingen. De wind zal de constructie doen kantelen, een afname van deze belasting zal leiden tot een toename van de veiligheid. De verticale werkende belasting zal het kantelen van de constructie voorkomen, door het optreden van trek in de opleggingen weg te nemen. Een toename van de verticale belasting zal de veiligheid tegen kantelen verhogen.



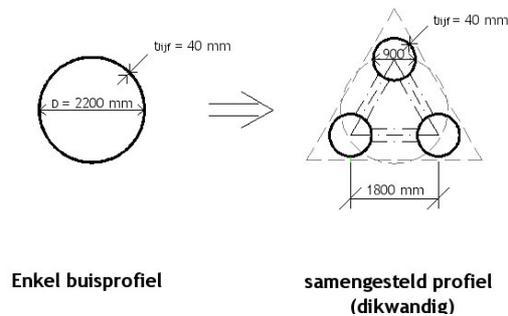
F.3 Lokale stabiliteit

Profieldoorsnede

Om de veiligheid van de vakwerkelementen tegen uitknikken te vergroten is het mogelijk om de gekozen profieldoorsnede aan te passen. De weerstand tegen knik wordt voor een groot deel bepaald door het traagheidsmoment (I) van de doorsnede. Door in plaats van een enkel buisprofiel een samengesteld profiel van meerdere kleinere buisprofielen (met een gelijk oppervlak) toe te passen zal dit traagheidsmoment toenemen omdat de afstand van de zwaartepunten van de profielen groter is.

Bij het gebruik van samengestelde liggers zal echter niet de gehele Steiner bijdrage mogen worden meegenomen in de berekening. In de ligger zal tussen de profielen onderling afschuiving plaatsvinden.

Het aantal voor vermoeiing gevoelige verbindingen zal echter toenemen bij een samengesteld profiel. Vanuit het oogpunt van vermoeiing is het verstandiger om een enkel buisprofiel toe te passen.



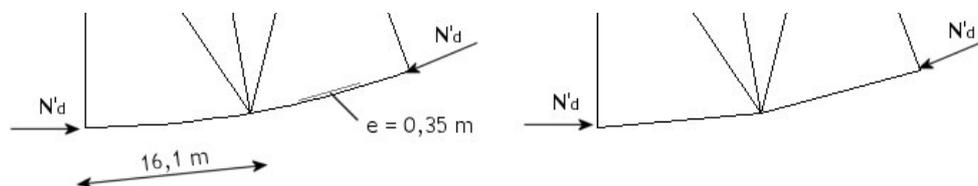
Figuur 294 - Mogelijke aanpassing profieldoorsnede

Ontwerp

In het ontwerp van het rad zal gebruik worden gemaakt van gekromde randprofielen. Doordat de profielen gekromd zijn hebben deze profielen een excentriciteit. Wanneer de elementen op druk worden belast zal het gekromde element bij een lagere normaalkracht uitknikken.

Door de randprofielen op te bouwen uit rechte profielen zal deze excentriciteit verdwijnen, waardoor de elementen een hogere normaalkracht kunnen opnemen. Het gebruik van rechte profielen zal echter de ronde vorm van het rad verminderen.

Vanuit constructief oogpunt is het verstandig om rechte randprofielen zonder excentriciteit toe te passen. In overleg met de architect zal besloten worden of er rechte, dan wel geknikte randprofielen worden toegepast.



Figuur 295 - aanpassing vorm randprofielen

Bijlage G: Rolopleggingen

De opleggingen zullen de reactiekrachten op moeten nemen en een rotatie van het rad moeten toelaten.

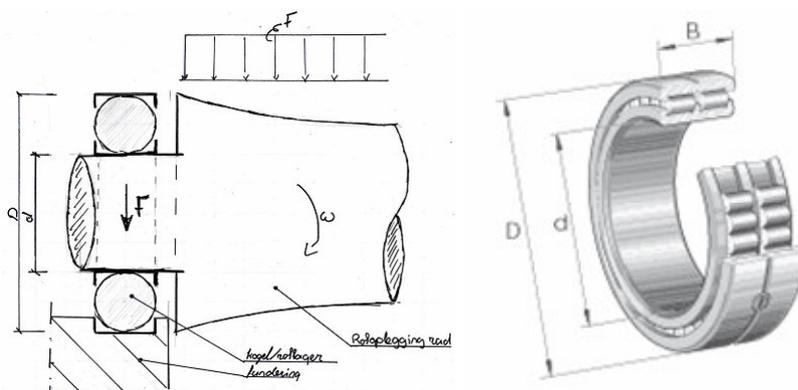
De maximale reactiekracht in de opleggingen treedt op in de hoogste oplegging en heeft een rekenwaarde van:

- 35.000 kN (permanente belasting, $\gamma_{\text{per}} = 1,35$)
- 50.000 kN (permanente belasting en windbelasting, $\gamma_{\text{per}} = 1,2$ en $\gamma_{\text{ver}} = 1,5$)

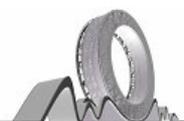
Wanneer gebruik wordt gemaakt van rolopleggingen zal deze belasting over meerdere rolopleggingen moeten worden verdeeld. De maximaal opneembare reactiekracht per oplegging voor enkele rolopleggingen van FAG Schaeffler is in tabel 64 getoond.

	Double row: NNU 49	Double row: ZNR31			
	NNU49/500-S-K-M-SP	Z-572777.ZL-K-C5	Z-565685.ZL-K-C5	Z-573929.ZL-K-C5	F-800594.ZL-K-C5
Diameter	670 mm	700 mm	980 mm	980 mm	1.150 mm
Width	170 mm	224 mm	230 mm	300 mm	345 mm
Basic dynamic load	2.320 kN	4.500 kN	6.000 kN	8.150 kN	10.600 kN
Basic static load	6.100 kN	9.500 kN	15.600 kN	18.600 kN	24.000 kN
Fatigue limit load	670 kN	970 kN	1.290 kN	1.520 kN	1.850 kN
mass	162 kg	363 kg	627 kg	962 kg	1.430 kg

Tabel 64 - opneembare belasting per roloplegging (bron: FAG Schaeffler)



Figuur 296 - Detail oplegging op rollen

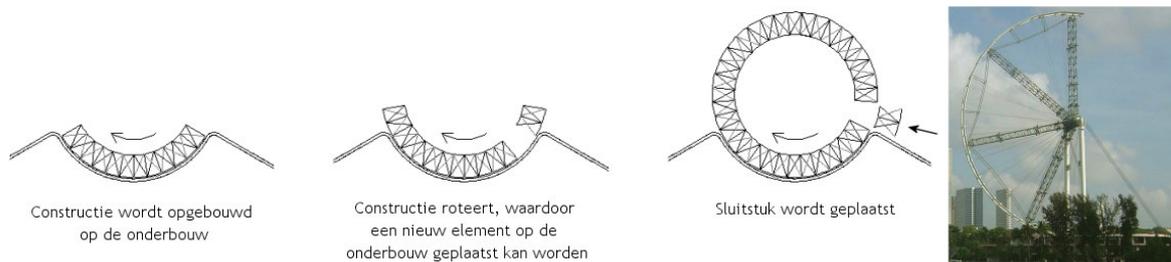


Bijlage H: Bouwmethode

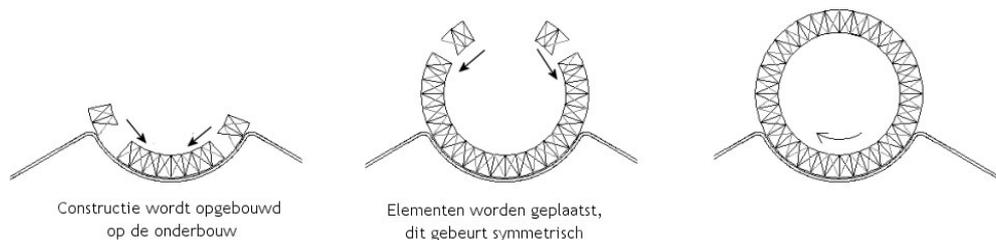
Er zal gekeken moeten worden naar de manier waarop de constructie gebouwd kan worden. De gekozen bouwmethode zal van invloed zijn op het verdere ontwerp van de constructie.

- De gekozen bouwmethode zal invloed hebben op de krachten in de profielen tijdens de bouwfase. Deze krachten kunnen bij sommige bouwmethoden de krachten tijdens de gebruikfase overtreffen.
- De detaillering van verbindingen zal eveneens beïnvloedt worden door de gekozen bouwmethode. Zo is het niet bij elke bouwmethode mogelijk, of wenselijk, om te lassen en zal er in dat geval gekozen worden voor voorgespannen boutverbindingen.

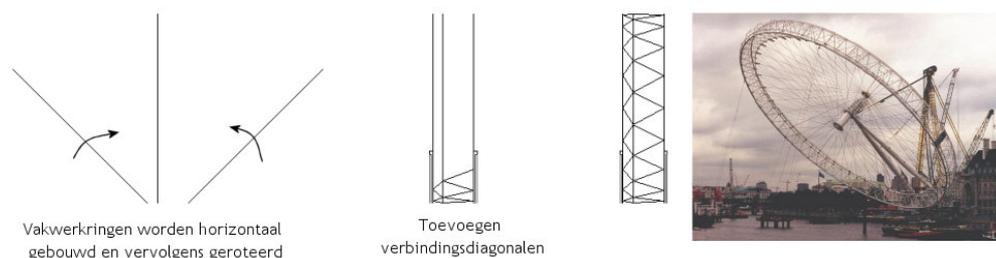
Voorbeelden van mogelijk te gebruiken bouwmethoden zijn in figuur 297 t/m figuur 299.



Figuur 297 - Bouwmethode, stapelen i.c.m. roteren



Figuur 298 - Bouwmethode, stapelen



Figuur 299 - Bouwmethode, ophijsen

Bij de keuze van de bouwmethode zal tevens rekening moeten worden gehouden met de montage van de capsule. De capsules zullen zich in tegenstelling de conventionele reuzenraden (London Eye, Beijing Wheel) niet enkel aan de buitenzijde van de hoofdconstructie bevinden, maar tevens binnenin de constructie. Wanneer het rad voltooid is, is het vanwege de reeds aanwezige constructie-elementen niet mogelijk om de grote hotelcapsules 'eenvoudig' als één geheel in het rad te bevestigen.