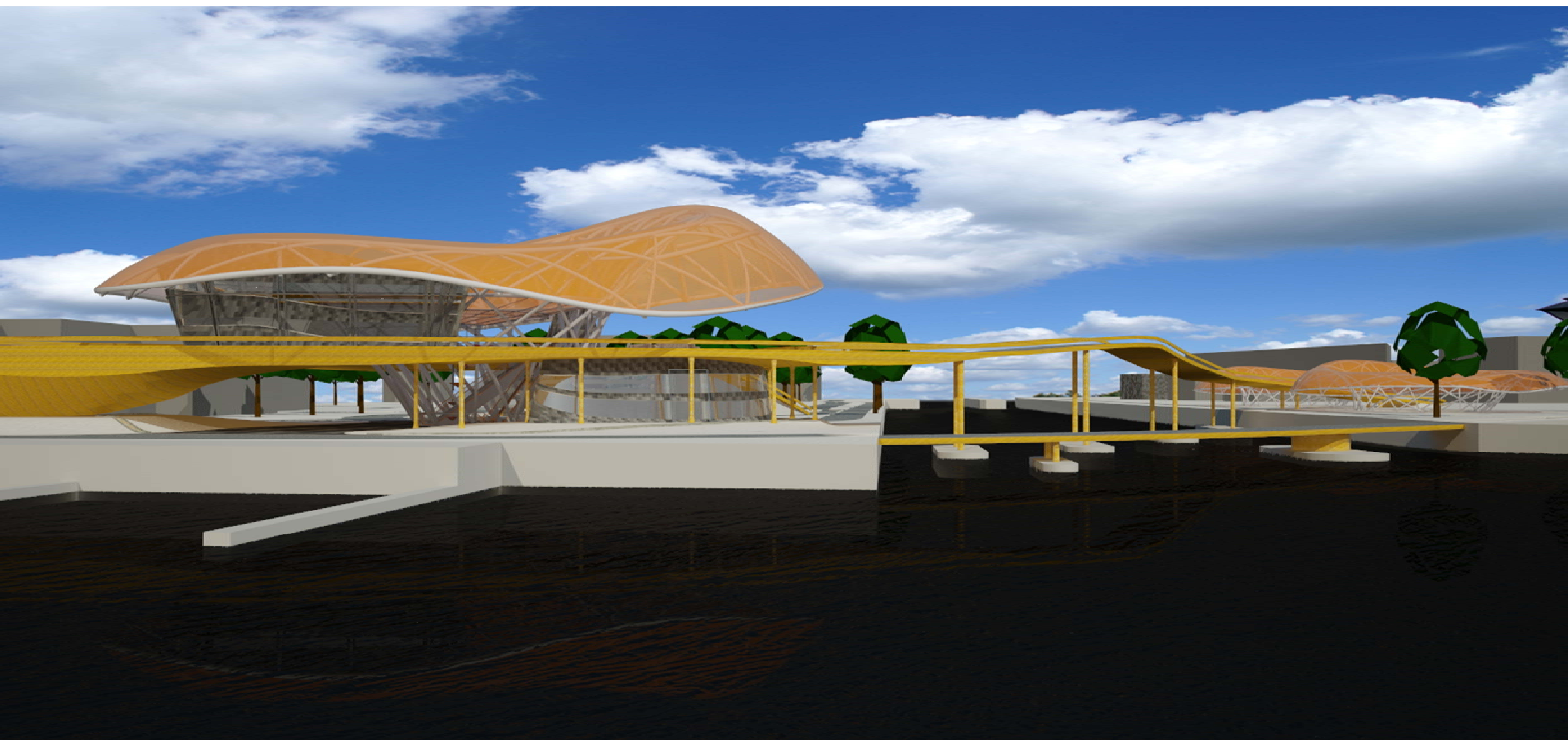


# CONSTRUCTIEF UITDAGEND TRANSFERIUM

**Mirre Veerman**

*Architectural Engineering  
Architectuur & Bouwtechnologie*



# **CONSTRUCTIEF UITDAGEND ONTWERP**

door: Mirre veerman

Faculteit Bouwkunde, TU Delft

Architectural Engineering

Architectuur & Bouwtechnologie

Begeleiders: Jan Engels, Andrew Borgart, Joop Paul

Mirre Veerman

Studentnummer: 1212192

mirre.veerman@gmail.com







# INHOUDSOPGAVE

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| <b>Introductie .....</b>                        | <b>8</b>  |
| Leeswijzer .....                                | 8         |
| <br><b>Deel I – Inleiding.....</b>              | <b>10</b> |
| 1. De opdracht .....                            | 10        |
| 2. Intentie .....                               | 11        |
| 3. Aanpak .....                                 | 12        |
| <br><b>Deel II – Achergrond.....</b>            | <b>14</b> |
| 4. Stedenbuowkundige verkeersAnalyse .....      | 16        |
| <br><b>Deel III.A – Ontwerp.....</b>            | <b>20</b> |
| 5. Concept.....                                 | 20        |
| 6. Programma .....                              | 23        |
| 7. Uitgangspunten .....                         | 25        |
| <br><b>DeelIII.B – Ontwerp .....</b>            | <b>28</b> |
| 8. Optimalisatie eigen gewicht .....            | 36        |
| 8.1 Vooronderzoek .....                         | 37        |
| 8.2 Optimalisatie constructie .....             | 44        |
| 8.3 Conclusie optimalisatie eigen gewicht ..... | 48        |
| 9. Optimalisatie wind .....                     | 50        |
| 9.1 Vooronderzoek .....                         | 53        |
| 9.2 Optimalisatie constructie .....             | 54        |
| 9.3 Conclusie optimalisatie wind.....           | 64        |
| 10. Detaillering .....                          | 65        |
| 10.1 Vooronderzoek .....                        | 67        |
| 10.2 Keuze methodes .....                       | 71        |
| 10.3 Conclusie detaillering .....               | 72        |

|                                         |               |
|-----------------------------------------|---------------|
| <b>Deel IV – Resultaat .....</b>        | <b>76</b>     |
| 11. Definitief ontwerp .....            | 76            |
| 11.1 Beantwoording deelvragen .....     | 76            |
| 11.2 Beantwoording centrale vraag ..... | 87            |
| 11.3 Doelstelling.....                  | 90            |
| 12. Reflectie.....                      | 92            |
| <br><b>Literatuurlijst .....</b>        | <br><b>94</b> |
| <br><b>Bijlage I .....</b>              | <br><b>98</b> |
| <b>Bijlage II .....</b>                 | <b>100</b>    |





# INTRODUCTIE

Dit is een verslag van het afstuderen van de richting *Architectural Engineering*, van de faculteit Bouwkunde aan de TU Delft. Deze richting betreft hier een duaal afstudeerprogramma van Architectuur en Bouwtechnologie.

Het ontwerp voor dit project is een transferium in Amsterdam Noord. Voor de architectuurrichting is er een ontwerp gemaakt met een technische fascinatie: grote overspanningen. De constructie staat in het architectonische ontwerp dus centraal. Voor de bouwtechnologietrack is deze constructie geoptimaliseerd en is er een generieke constructie methode ontworpen. De architectuur (het transferium) en de techniek (de geoptimaliseerde constructie) vormen samen het beeld van het gebouw.

## LEESWIJZER

Dit verslag is opgebouwd uit vier delen. In het eerste deel zal de opdracht uitgelegd worden. Hierbij horen ook een probleemstelling, centrale vraag en deelvragen om het ontwerp te leiden. Ook de aanpak van dit afstuderen wordt hier beschreven.

Deel twee zal gaan over het kader van het ontwerp: de stedenbouwkundige situatie. De locatie is geanalyseerd op de punten die van belang zijn voor het transferium en het architectonisch ontwerp.

Het derde deel is opgebouwd uit een A(rchitectuur) en B(ouwtechnologie) stuk. In het eerste deel (A) wordt het concept, programma en uitgangspunten beschreven. Deel B gaat over de optimalisatie van de constructie naar het eigen gewicht, de wind en het ontwerp van de generieke constructiemethode. Deze twee samen vormen het uiteindelijke ontwerp.

In het laatste deel gaat het over het behaalde resultaat. De deelvragen en centrale vraag worden beantwoord. Ook wordt er gekeken of de doelstelling behaald is. De vragen en stelling worden beantwoord aan de hand van 2D en 3D afbeeldingen, welke bestaan uit plattegronden, gevels, doorsnede, interieur en exterieur renders. Deel vier wordt afgesloten met een reflectie.

Bijgevoegd zijn een literatuurlijst, en twee maal een bijlage van vergrootte afbeeldingen uit het verslag ter bevordering van de duidelijkheid van de figuren.



## DEEL I – INLEIDING

Het doel van de studio Architectural Engineering is het integreren van architectuur en bouwtechnologie. Er wordt gezocht naar een balans tussen deze twee aspecten, om zo tot het ontwerp van een gebouw te komen. Het traject wat gevolgd is binnen Architectural Engineering, waardoor dit verslag tot stand is gekomen, is Architectuur en Bouwtechnologie.

### 1. DE OPDRACHT

De gegeven is de locatie van dit project is Buiksloterham in Amsterdam Noord. De functie dat het gebouw zal gaan vervullen is geheel naar eigen idee. Door analyse van het gebied, rekening houden met de functie, zal er een meer specifieke locatie gekozen worden voor het ontwerp. Het ontwerp wat hierna volgt, zal alles te maken gaan hebben met de technische fascinatie van de student.

Voor de technische fascinatie heb ik gekozen voor de discipline draagconstructies. Ik heb altijd een grote interesse gehad in grote, complexe overspanningen. Dit zal dus de leidraad worden in mijn architectonische ontwerp.

De functie van het gebouw staat vrij om te kiezen voor dit afstudeerlab. Omdat het hier het afstuderen betreft, is er nu de mogelijkheid aanwezig een gebouw(functie) te ontwerpen waar je als laatste project op de opleiding Bouwkunde nog in wilt verdiepen. Een van mijn passies was om nog eens een groot verkeersknooppunt te ontwerpen; een transferium. Deze passie kwam nog sterker naar voren na een bezoek aan de locatie, met het openbaar vervoer. Er zijn weinig punten in het gebied die eenvoudig te bereiken zijn zonder fiets of auto. Deze ervaring en mijn passie om een transferium te ontwerpen, zijn voor dit afstudeerproject samengesmolten.

## 2. INTENTIE

Het OV-netwerk in Amsterdam Noord is erg beperkt. Door goed te onderzoeken wat er nu daadwerkelijk mis gaat, kunnen de knelpunten op een rij worden gezet. Strategische punten voor een efficiënter netwerk komen bij een dergelijke analyse aan het licht. Behalve deze verkeersstromen, zal ook de constructie een belangrijke rol moeten spelen. Deze twee onderdelen moeten niet los van elkaar staan, maar juist één worden. Hiermee wordt de doelstelling van dit afstuderen bepaald:

*Het ontwerpen van een constructief iconisch transferium voor een structurele verbetering van het OV-netwerk van Amsterdam Noord.*

In dit afstuderen zal er vooral gekeken worden naar welke invloeden deze constructie kan krijgen op het ontwerp als geheel. Dit betekent niet alleen de beeldwaarde van de constructie in het ontwerp, maar ook in de ondersteuning van de functie van het gebouw. Er wordt toegespitst op de bijdrage van de constructie aan het doel van een transferium. De centrale vraag is dus:

*Hoe kan de constructie een belangrijke bijdrage leveren aan de verkeersstromen in een transferium?*

In deze centrale vraag, zijn er voor het globale ontwerp, twee belangrijke deelvragen. De eerste heeft betrekking op de efficiëntie van het transferium:

*Hoe kan een snel/efficiënt OV-netwerk gecreëerd worden voor het gebied Amsterdam Noord?*

De tweede belangrijke deelvraag die tijdens dit afstuderen beantwoord moet worden gaat over de invloed van de constructie op die efficiëntie:

*Hoe kan de constructie hierin een belangrijke rol spelen?*

Het onderzoek voor de mastertrack Bouwtechnologie, is een verdieping geweest op deze constructie. De optimalisatie hiervan stond in deze centraal. De ontworpen constructie zal geoptimaliseerd worden in verschillende stappen. Het doel van het bouwtechnologisch onderzoek kan als volgt beschreven worden:

*Wat is de meest optimale constructie hiervoor?*



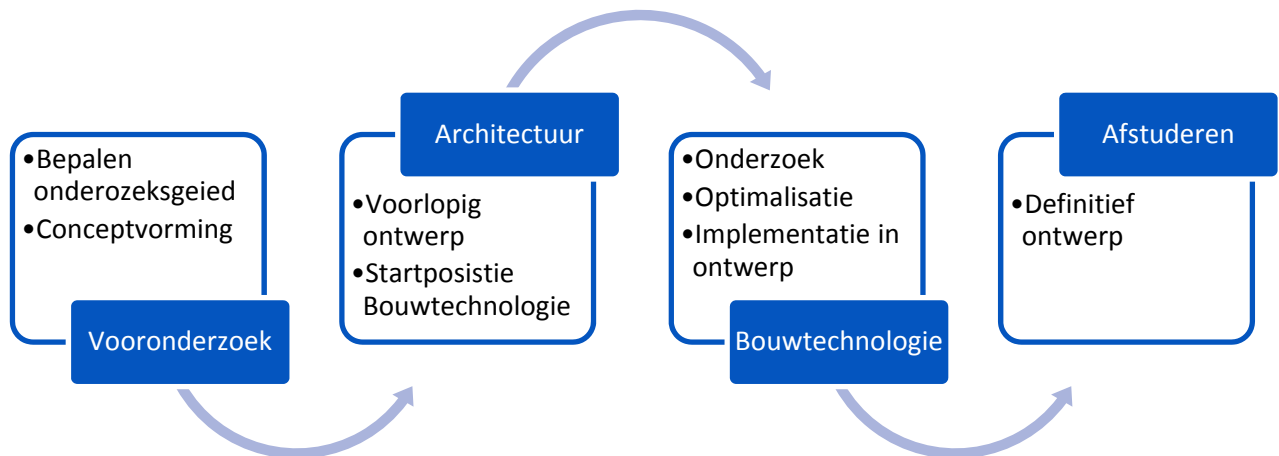
### 3. AANPAK

Omdat het hier in dit ontwerp een verkeerskundig ontwerp betreft, is het noodzakelijk stedenbouwkundige verkeerssituatie hierbij te betrekken. Door de huidige situatie te analyseren kunnen er knelpunten gevonden worden waar verbetering noodzakelijk is. Het transferium moet deze verschillende vervoermiddelen aan elkaar koppelen op een duidelijke, logische manier. De eisen van deze stromen moeten onder de loep genomen worden om het ontwerp tot een goed eindresultaat te laten leiden.

Het verloop van het OV-netwerk moet vervolgens gecompliceerd worden door de constructie. Hier zal een concept voor gevormd moeten worden. Dit concept zal zowel de wijze van de doorstroom van de gebruikers van het transferium als de vorm van de constructie gaan bepalen.

Voor het bouwtechnologische onderzoek wordt de ontworpen conceptconstructie getest op zijn draagkrachtige kwaliteit. Waar het niet naar behoren werkt, zal een optimalisatie plaats vinden. Deze optimalisatie heeft betrekking op de optimale vorm naar het eigen gewicht van de constructie. De profieldoorsnedes zijn aan de hand van de windkrachten op het gebouw bepaald. Als derde is er een detail uit voort gekomen, waarbij eenvoudige montage centraal staat.

Vanuit de leerstoel Architectural Engineering lopen de onderdelen architectuur en bouwtechnologie in de eerste fase volledig synchroon. Na verloop van tijd zal er een concept gevormd zijn, naar aanleiding van de functie en de technische fascinatie. Deze worden gezamenlijk uitgewerkt tot een architectonisch plan. Het dubbel afstudeer traject duurt een half jaar langer. Deze master is een verdiepingmaster. Hierbij wordt dieper ingegaan op technische fascinatie. Dit leidt gezamenlijk tot het eindproduct.

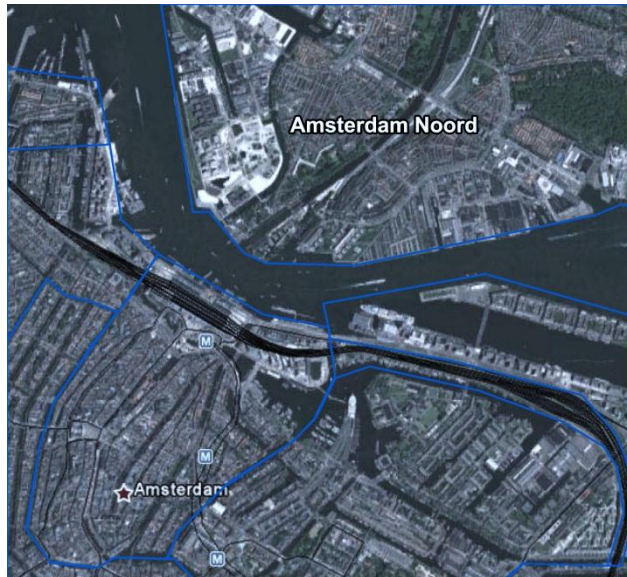


Figuur 1 – Planning afstuderen.



## DEEL II – ACHERGROND

Het gebied waar het gebouw voor ontworpen wordt, ligt in Amsterdam Noord. Van oorsprong lagen in het westelijke deel van Noord de oude havens van Amsterdam. Hier zijn vandaag de dag grote ontwikkelingsplannen voor. Er staat een nieuwe, grote, woon-werk wijk in de planning. Het moet een nieuwe, populaire wijk in Amsterdam worden.



Figuur 2 – Gebieden rond Amsterdam Noord.

Amsterdam Noord is gescheiden van de rest van de stad door het doorkruizen van het IJ en de spoorbaan. Ook qua architectuur is deze verdeeldheid te zien. Aan de zuidelijke oevers van het IJ staat veel moderne nieuwbouw, zo ook de uitbreiding van het centraal station. Aan de oevers van de Noord regio is recentelijk het filmmuseum opgeleverd en ligt de prominent aanwezige Shelltoeren. Wat er echter nog ontbreekt in dit deel, is een duidelijke toegangspoort die men de regio in leidt.



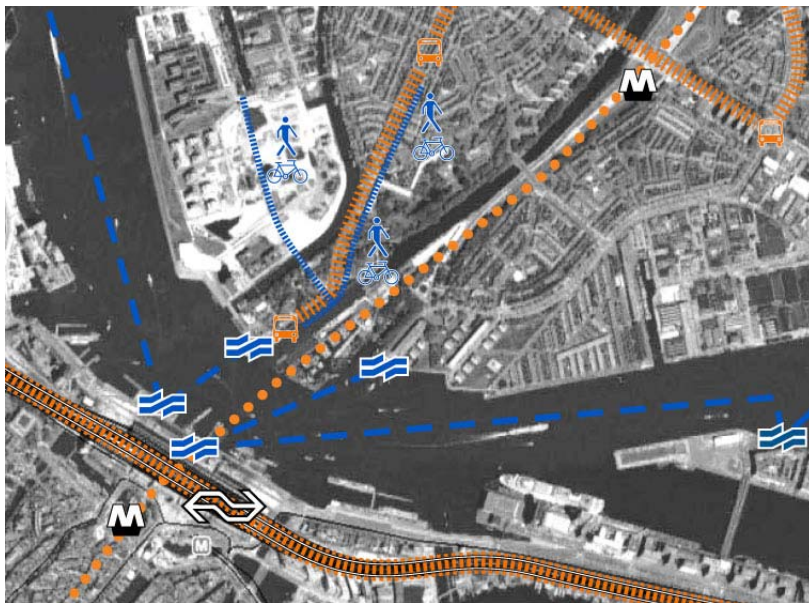
Figuur 3 – Scheiding tussen Amsterdam Noord en de rest van de stad.



Figuur 4 – De visuele wand tussen het centrum en Amsterdam Noord.

## 4. STEDENBUWKUNDIGE VERKEERSANALYSE

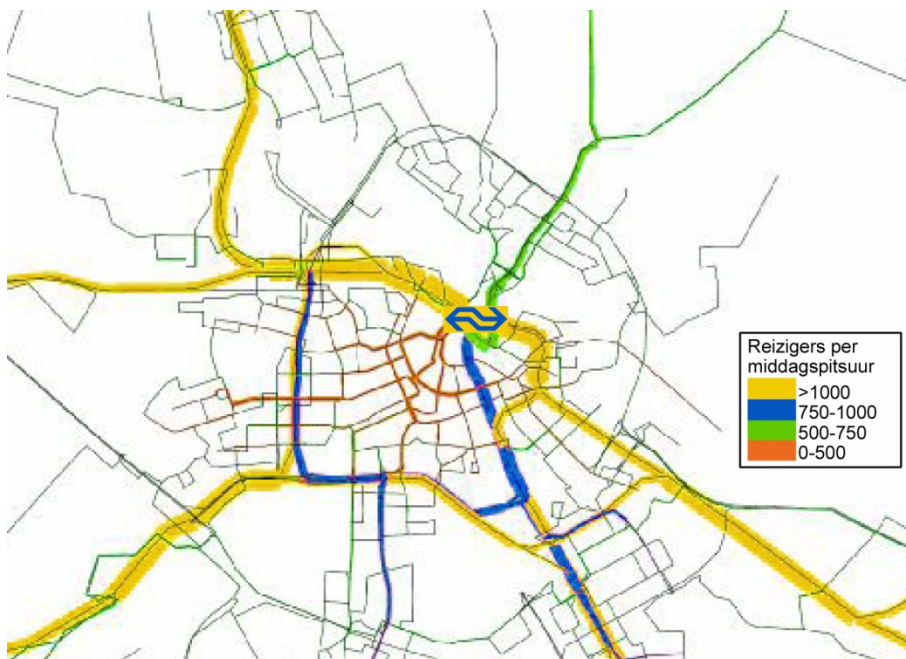
De huidige staat van het openbaar vervoer en de bereikbaarheid daarvan zijn geanalyseerd. Met deze analyse wordt er gezocht naar de meest geschikte plek voor het transferium om de bereikbaarheid van Amsterdam Noord te verbeteren. Aan de centrumzijde van het IJ, bevindt zich het centraal station. Om aan de overkant van dit water te komen, kan de veerpont genomen worden. In de toekomst komt hier ook de Noord/Zuid metrolijn bij. Tegenover het centraal station, is een opstapplaats voor de bussen richting het noorden. Wat erg opvalt aan de huidige situatie, is dat Amsterdam Noord gescheiden wordt door de twee kanalen die er doorheen lopen. Ook is er in het huidige OV-netwerk duidelijk nog geen rekening gehouden met de vernieuwingsplannen van het westelijke deel van het gebied.



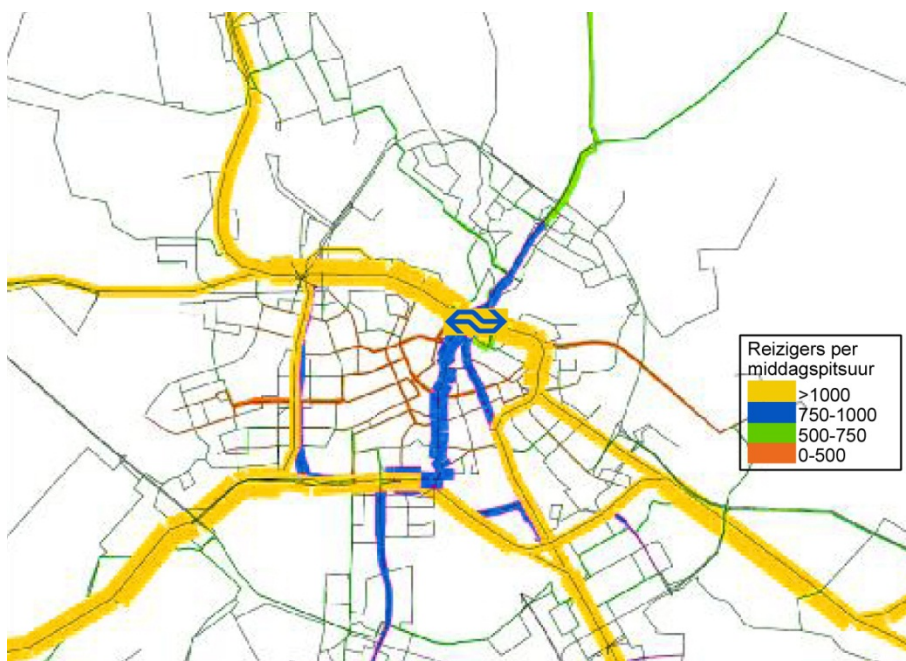
Figuur 5 – Analyse OV-netwerk van en naar Amsterdam Noord.

Door de nieuwe plannen voor Amsterdam Noord, zullen de reizigersaantallen sterk toenemen. Vanuit de gemeente is er een analyse gemaakt van de huidige aantallen, en de aantallen over 20 jaar (2030). Hierbij zijn deze ontwikkelingsplannen wel meegenomen, maar de optimalisatie van het OV-netwerk niet.



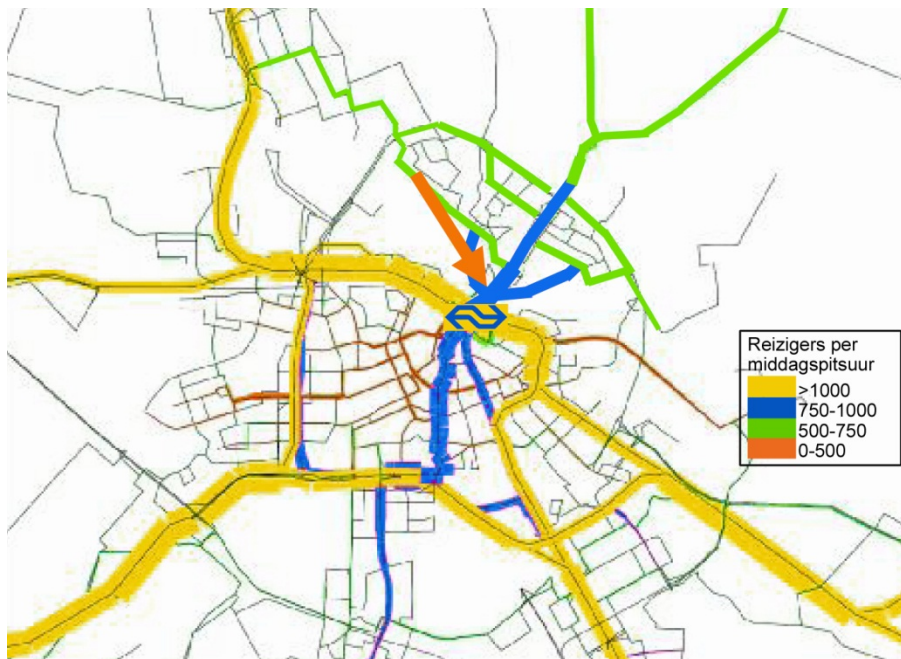


Figuur 6 – Reizigersaantallen huidig OV gebruik.



Figuur 7 – Prognose reizigersaantallen 2030.

Door de dichtheid van het OV-netwerk van Amsterdam Noord kleiner te maken, zullen er naar verwachting meer mensen gebruik maken van deze diensten. Voor dit afstuderen is er een nieuwe prognose gemaakt, met een meer optimaal OV-netwerk.



Figuur 8 – Prognose reizigersaantallen 2030 met geoptimaliseerd OV-netwerk.

Er is een duidelijk knooppunt te zien tegenover het centraal station (de oranje pijl). Vanuit dit punt ontstaan een aantal die zich door heel Amsterdam Noord bewegen. Deze locatie is daarom ideaal voor het transferium.





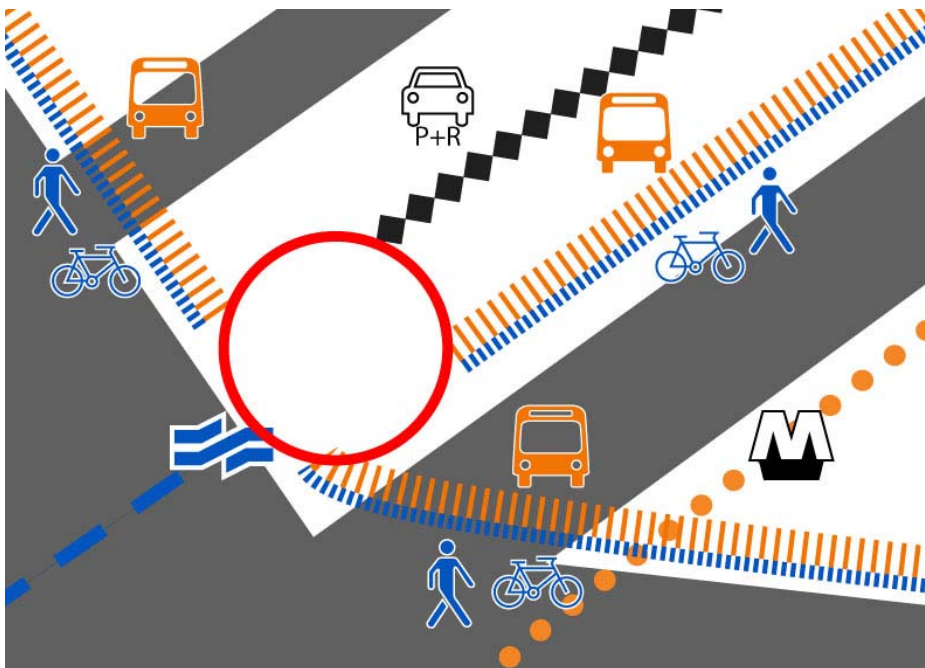
## DEEL III.A – ONTWERP

In dit deel van het rapport, zullen de verschillende elementen beschreven worden die van toepassing zijn op het architectonische ontwerp. Per punt zal er een kort inleiding gegeven worden, gevolgd door het bijbehorende onderzoek, om af te sluiten met een conclusie in de vorm van een afbeelding.

### 5. CONCEPT

In een transferium draait alles om het verkeer en de verkeersstromen. De verschillende stromen moeten goed met elkaar verbonden zijn om tot een snel en efficiënt transferium te leiden. De verkeersstromen in het transferium moeten ook goed aansluiten op de stromen buiten het transferium. Vanwege de ontwikkelingsplannen van Amsterdam Noord, is er een nieuw netwerk ontworpen, met het transferium als centraal knooppunt. De efficiëntie van het transferium zal vooral toenemen, wanneer de drie door water gescheiden gebieden in Amsterdam Noord goed met elkaar verbonden worden. Hierbij wordt er rekening gehouden met de nieuwe plannen voor de westelijke regio van Noord. Ook de bereikbaarheid van het centrum en het centraal station zijn belangrijke aspecten.

Er moet een connectie tussen de drie gebieden gerealiseerd worden. Behalve voor het openbaar vervoer (hier de bussen), is het ook van belang dat er een goede verbinding is voor de fietsers en voetgangers. De verbinding met Amsterdam CS en het centrum wordt een stuk beter van een extra metrohalte bij het transferium. Door deze aanpassingen, komt een van de twee bestaande veerdiensten te vervallen. In de rode cirkel zal het transferium deze verschillende stromen aan elkaar knopen.



Figuur 9 – Verschillende verkeersstromen voor het transferium.

Wat hier het meest opvalt, is de vele verschillende soorten verkeer en de richtingen waar zij vandaan komen. Om dit alles gestructureerd en overzichtelijk te laten verlopen, worden de verschillende stromen in lagen opgedeeld. Er zal per laag verklaard worden hoe dit in zijn werk zal gaan. Voor allen geldt dat het om een verkeersroute gaat. De eigenschap van verkeer is dat het zich altijd voortbeweegt in een vloeiende lijn. Deze vloeiende lijnen zullen in de plattegronden duidelijk zichtbaar moeten worden.

#### Niveau +1

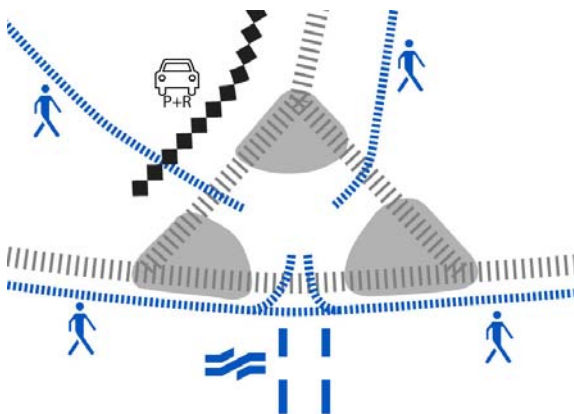
De bussen komen vanuit drie richtingen, de drie delen van Amsterdam Noord. Opdat het hier om gemotoriseerd vervoer gaat, zullen deze op de eerste verdieping geplaatst worden. Om de doorstroming goed te laten verlopen, zal het principe van de rotonde toegepast worden. Aan drie zijden worde deze afgevlakt zodat er ruimte is voor drie haltes.



Figuur 10 – Niveau +1, rotonde voor de bussen.

#### Niveau 0

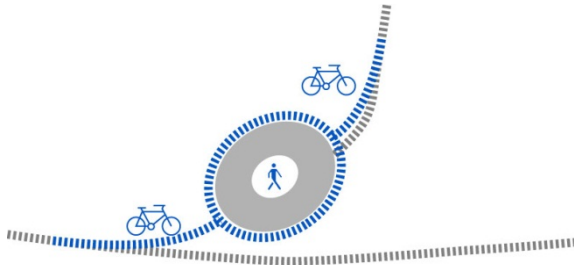
Voor de voetgangers, die vanuit verschillende richtingen komen, blijven op hetzelfde niveau. Deze groep gebruikers zal namelijk altijd overstappen op een ander vervoermiddel. Vanuit hier kan men makkelijkst van netwerk wisselen. Verder zal ook de veerpont (logischerwijs) hier aanmeren. De laatste stroom hier zijn de auto's. Er moet een gelegenheid zijn om met de auto passagiers af te zetten bij het transferium, de zogenaamde *Park + Ride* (verder P+R). Behalve de verkeerstromen, zal er uiteraard ook een constructie aanwezig moeten zijn die het bus dek gaat dragen. Deze is zo gelegen, dat de lijnen van de verschillende verkeerstromen benadrukt worden.



Figuur 11 – Niveau 0, hoofdentree voetgangers.

### Niveau -1

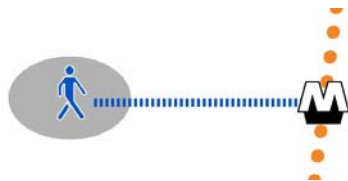
Voor de fietsers wordt een grote stalling in de kelder gerealiseerd. Deze zal zo worden ingericht, dat aan de buitenrand het fietspad licht, in het midden de stalling is en de binnenrand wordt gereserveerd voor voetgangers. Deze laatste groep kan vervolgens weer overstappen op een ander OV-netwerk.



Figuur 12 – Niveau -1, fietsenstalling.

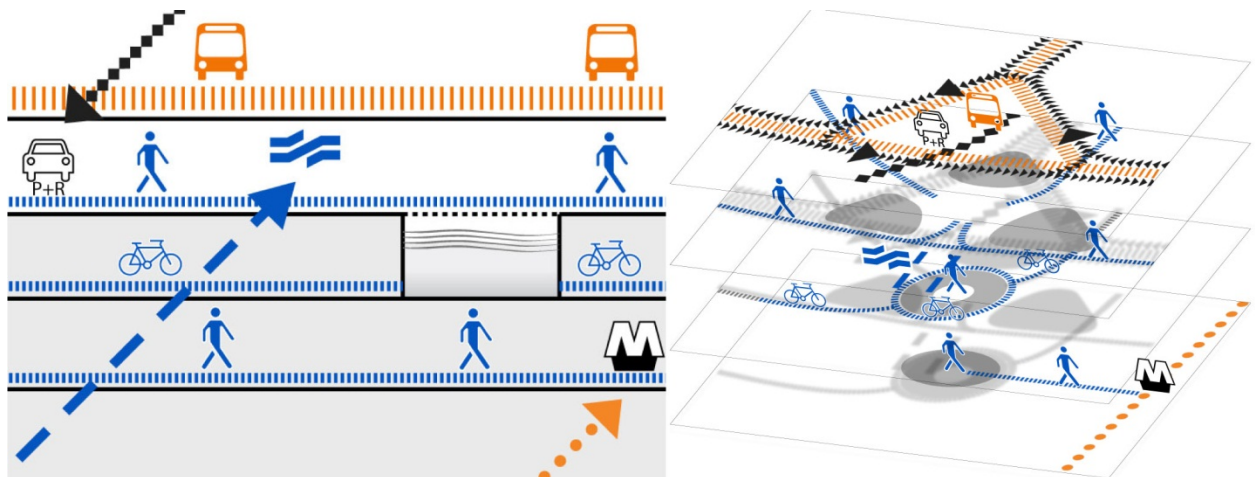
### Niveau -2

Dan is er als laatste nog een tweede ondergronds niveau. Deze leidt de reizigers met een tunnel naar de metro toe. De groepen die met de metro zullen reizen, zijn diegene die met de bus aangekomen zijn, lopend, afgezet met de auto of mensen die hun fiets net hebben gestald. Er wordt dus in het transferium alleen te voet naar de metro gereisd.



Figuur 13 – Niveau -2, tunnel naar de metro.

De conceptuele verkeersdoorsnede en 3D model zien er als volgt uit:

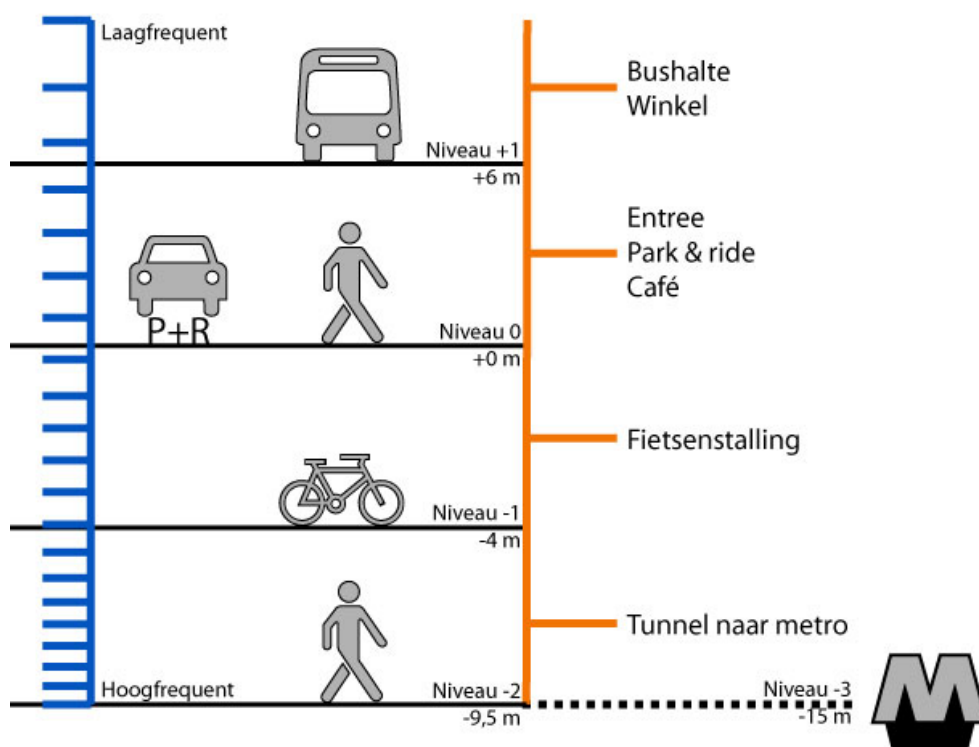


Figuur 14 – Conceptdoorsnede en 3D verkeerstromen.

## 6. PROGRAMMA

In een transferium gaat het vooral om opstappen en overstappen van en naar verschillende transportmiddelen. De wachttijd voor deze verkeerstroom is voor ieder middel anders. De metro komt bijvoorbeeld eens in de vijf minuten, terwijl men op de bus nog wel eens 15 á 30 minuten moet wachten. De frequentie van het verkeer is dus voor ieder middel anders. De bus is in dit gebouw het meest laagfrequent. Reizigers hebben de tijd en misschien wel wens om nog even snel iets te kopen in een supermarkt. Hierom zal er op de 1<sup>e</sup> verdieping, bij de bushaltes, een winkeltje geplaatst worden. Deze zal zo op een plek op dit niveau worden ontworpen, zodat er het wachtplatform duidelijk wordt afgebakend. Ook worden hier vanwege de mogelijk lange(re) wachttijden toiletten geplaatst.

De locatie voor het transferium heeft een uniek uitzicht en oriëntatie. Aan de zuidzijde van het gebouw kijkt men uit over het IJ en de vernieuwde zijde van Amsterdam Centraal Station. Het is dus een uitermate geschikte plek voor een café. Deze wordt op de begane grond ontworpen. Deze zal behalve een café zijn, ook nog voor een ander doel dienen: het zijn van een volume die de verkeerstroom zal benadrukken.



Figuur 15 – Schematische weergave programma.

De variërende verkeerstroom hebben verschillende eisen qua verdiepingshoogte. Neem bijvoorbeeld de bus. De hoogte van een bus is  $\pm 3,50$  m. Hier is dus een minimale hoogte van 4 meter vereist. De gebruikers van niveau 0 zijn minder veeleisend. Hier moet wel rekening gehouden worden met welk *gevoel* de reizigers ervaren. De minimale hoogte is na onderzoek gesteld op 5 meter. Voor een fietsenstalling is een hoogte van 4 meter gewenst. Het onderste niveau, -2, heeft een hoogte van 5,5 meter.

Er zijn voor de verschillende functies minimum en maximum eisen aan afmetingen gesteld:

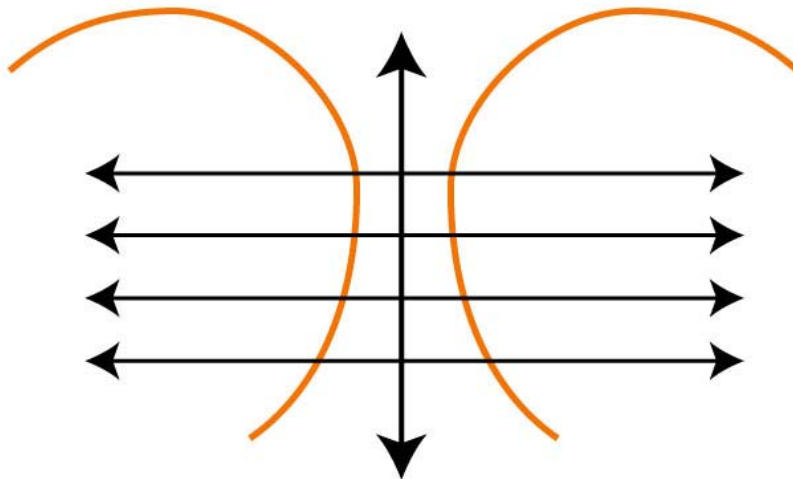
|                            | min                                                              | max                                                             |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>Fietsenstalling</b>     | 200 plaatsen<br>19,2 x 15 m <sup>2</sup>                         | 400 plaatsen<br>35 x 25 m <sup>2</sup>                          |
| <b>Bushalte</b>            | 3 stuks<br>27 x 48 m <sup>2</sup>                                | 3 stuks<br>50 x 63 m <sup>2</sup>                               |
| <b>Metrohalte</b>          | 2 stuks<br>12,2 x 150 m <sup>2</sup>                             | 2 stuks<br>20 x 150 m <sup>2</sup>                              |
| <b>Veerhalte</b>           | 2 stuks<br>32 x 7,5 m <sup>2</sup>                               | 2 stuks<br>32 x 11,5 m <sup>2</sup>                             |
| <b>Rijbanen over water</b> | 1x bus<br>2x fiets<br>2x voetgangers<br>250 x 5,2 m <sup>2</sup> | 2x bus<br>2x fiets<br>2x voetgangers<br>250 x 10 m <sup>2</sup> |
| <b>Rijbanen</b>            | 1x auto P+R<br>5,5 x 50 m <sup>2</sup>                           | 2x auto P+R<br>11 x 50 m <sup>2</sup>                           |
| <b>P+R</b>                 | 50 p/h<br>2,6 x 20 m <sup>2</sup>                                | 100 p/h<br>2,6 x 40 m <sup>2</sup>                              |
| <b>Tunnel naar metro</b>   | 2 stroken<br>2,5 x 130 m <sup>2</sup>                            | 2 stroken<br>4 x 130 m <sup>2</sup>                             |
| <b>Winkel</b>              | 40 bezoekers/h<br>150 m <sup>2</sup>                             | 80 bezoekers/h<br>200 m <sup>2</sup>                            |
| <b>Café binnen</b>         | 40 plaatsen<br>150 m <sup>2</sup>                                | 70 plaatsen<br>230 m <sup>2</sup>                               |
| <b>Café terras</b>         | 40 plaatsen<br>120 m <sup>2</sup>                                | 70 plaatsen<br>200 m <sup>2</sup>                               |
| <b>Toiletten</b>           | 2 toiletten<br>10 m <sup>2</sup>                                 | 6 toiletten<br>40 m <sup>2</sup>                                |

Tabel 1 – Minimum en maximum eisen functies.

## 7. UITGANGSPUNTEN

In de vorige hoofdstukken is duidelijk waar welke verkeerstromen gesitueerd worden en welk programma er nog meer gewenst is. Wat sterk opvalt, is dat het transferium opgedeeld is in lagen. De mensen die gebruik gaan maken van dit transferium, zullen dus de mogelijkheid moeten hebben om zich te kunnen bewegen naar een ander niveau. Wanneer men naar een ander niveau gaat, wordt er gewisseld van transportmiddel; de essentie van een transferium. Omdat dit verticale transport in het transferium van groot belang is, moet deze ook zeer duidelijk aanwezig zijn in het ontwerp. Hier komt de constructie, de fascinatie, in het ontwerp.

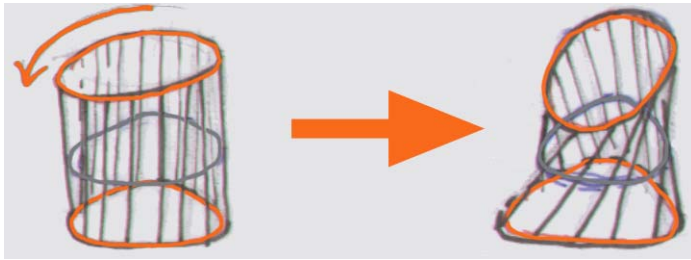
De constructie moet het verticale transport duidelijk gaan benadrukken. Ook moet deze constructie er voor gaan zorgen dat het transferium in zijn geheel zal gaan opvallen, zodat de reizigers weten waar het transferium zich bevindt. Dit betekent dat de constructie alle lagen moet gaan doorklieven en zichtbaar groots aanwezig moet zijn.



Figuur 16 – Logistiek doel constructie.

Om de constructie nog meer te benadrukken en een essentieel onderdeel te laten zijn in het gebouw, heeft het verschillende eigenschappen nodig. Als eerste is belangrijk hoe een dergelijke vorm te construeren. Hiervoor is er onderzoek gedaan naar mogelijke manieren. De meest passende voor deze constructie is een *grid shell structure*. Dit is een constructie zoals een schaalconstructie zoals het *Sidney Opera House*, waar in plaats van een dichte schaal, er gebruik is gemaakt van een constructief raster, bestaande uit staven. Hierdoor wordt er door de staven bepaald hoe de krachten door de constructie moeten gaan lopen, dus een eindige in plaats van oneindige elementen methode. Het krachtenverloop werkt net zo als bijvoorbeeld water: het kiest de weg die het minste energie kost. Dit komt bij krachtswerking neer op de voorkeur voor rechte staven. Op het eerste oog strookt dit niet met de wens van een dubbel gekromde constructie. Toch is er een oplossing voor. Voor de schacht van de constructie kunnen de doorsneden van de boven en onderkant willekeurige vormen gekozen worden. Tussen deze twee vormen worden rechte staven gezet. Eén van de twee vormen wordt geroteerd en/of verschoven in het horizontale vlak ten opzichte van de andere vorm. Tussen de geroteerde staven worden schoren geplaatst. Zo is er een dubbel gekromde constructie ontstaan, uit rechte staven. Door een logica in de constructie aan te brengen, is het ontwerpen met

een dergelijke constructie makkelijker gemaakt. Ook bevordert het sterk de maakbaarheid van de constructie.



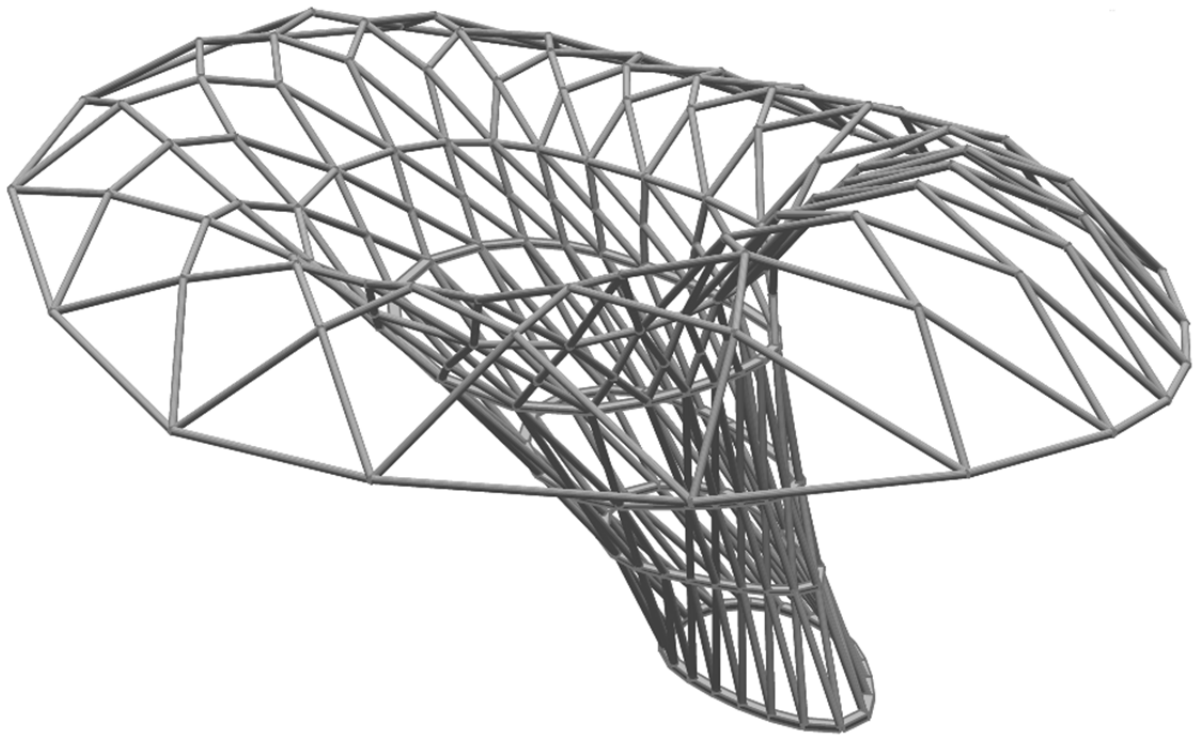
Figuur 17 – Vorming dubbel gekromde constructie.

Om meer grip te krijgen op de vorm van de bovenste en onderste ring, is er gekeken naar de eisen waar de doorsneden aan moeten voldoen, beginnende met het verticale transport. Helemaal onderin de schacht, moet de constructie richting geven naar de tunnel die naar de metro leidt. Boven in de schacht moet de constructie de driehoek vorm van de rotonde voor de bussen benaderen. Er is ook een tweede logistieke eis aan de vorm van de schacht geteld. De verdiepingshoogtes per laag verschillen. Wanneer per laag de doorsneden van de schacht bekeken worden, zullen deze allen verschillen. Deze doorsneden, dus verdiepingen, moeten wel aan elkaar gekoppeld kunnen worden met roltrappen, die overal dezelfde hellingshoek hebben. Dit resulteert in andere lengtes van de trappen per laag. De doorsneden mogen dus niet te klein zijn of te weinig overlap hebben.

De tweede eigenschap van de constructie is het brengen van zonlicht in het gebouw. Deze betekent een scheefstand in de schacht, zodat er licht naar binnen kan vallen. Omdat de zon roteert gedurende de dag en per dag (lees: seizoen) een andere hoek met de locatie maakt, zal deze hoek niet altijd optimaal zijn. Er is dus een keuze gemaakt in de mate van scheefstand en de hoek van de schacht. Deze is gericht naar het zuiden en westen. De schacht moet hiervoor bovenin een grotere doorsnede hebben dan helemaal onderin.

De derde eigenschap van de constructie heeft betrekking op het dak. Zoals eerder genoemd, is de minimale verdiepingshoogte van het bussenplatform 4 meter. Dit is dus de minimale hoogte van het dak ten opzichte van die laag. Het programma op niveau +1 bestaat uit een winkel en een wachtgedeelte. Vanwege de lage frequentie van de bussen, zal men een langere tijd gebruik maken van het wachtvertrek. Om het de reiziger zo aangenaam mogelijk te maken, wordt hier een grootse ruimtelijkheid gecreëerd door een hoog dak. Ter plaatse van de winkel hoeft het dak minder hoog te zijn. Ook heeft het dak de functie de ingangen op de begane grond te markeren. Het dak zal dus ten opzichte van de driehoekige busbaan overstekken moeten maken over de drie entrees.

Naar deze eigenschappen is er een globale vorm voor de constructie ontworpen. Voor het bouwtechnologische deel van dit onderzoek, zal deze vorm geoptimaliseerd worden.



Figuur 18 – Constructief ontwerp naar benodigde eigenschappen.

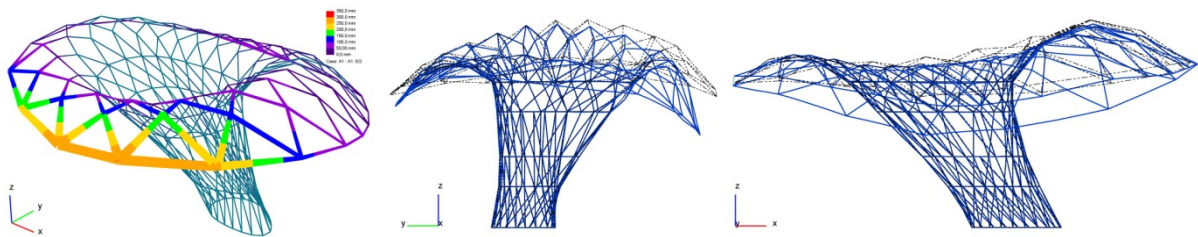
De constructie met de globale vorm als in de afbeelding hierboven, zal leidend in het ontwerp worden. De architectonische beelden en sfeerimpressies zijn te vinden in Deel IV – Resultaat op pagina 76.



## DEELIII.B – ONTWERP

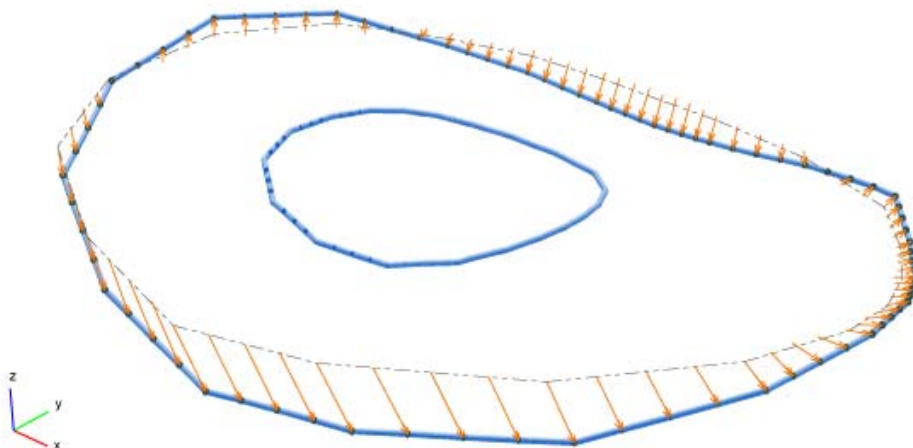
Nu er een globaal ontwerp is voor de constructie, kan er verdiept worden in de bouwtechnologie; het constructieve gedrag. Nu zal het onderzoek van Bouwtechnologie behandeld worden. Dit deel bestaat uit drie hoofdstukken. Per hoofdstuk wordt één deel van het onderzoek beschreven. De eerste twee gaan over de optimalisatie van de constructie. Het laatste hoofdstuk gaat over de detaillering van de constructie. Per hoofdstuk wordt er een inleiding gegeven, waarin beschreven staat waarom dit onderwerp onderzocht is, vervolgd door het daadwerkelijke onderzoek. De hoofdstukken worden afsloten met een conclusie; de resultaten van het onderzoek verwerkt in de constructie.

Voordat de constructie daadwerkelijk geoptimaliseerd kan worden, moet er eerst begrepen worden waarom de constructie zich op welke manier gedraagt. Hiervoor wordt eerst de doorbuiging berekend en de richting weergegeven.



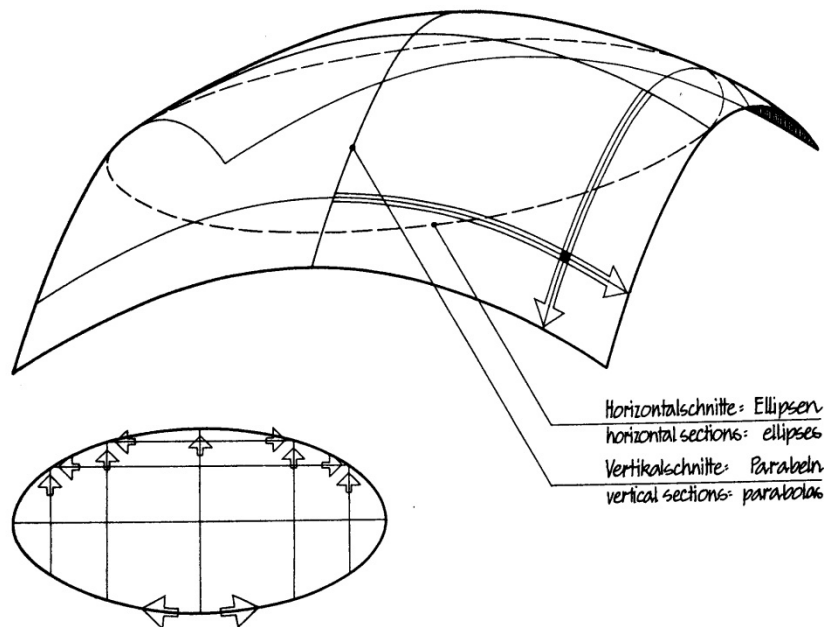
Figuur 19 – Doorbuiging conceptueel constructief ontwerp.

Wat in de doorbuiging van het conceptuele constructieve ontwerp vooral van belang is, is de doorbuiging van de buitenste ring. Dit omdat deze doorbuiging sterk met de vorm en staven in het dak te maken hebben.



Figuur 20 – Doorbuigingsgrootte en richting van de buitenste ring.

Wat opvalt, is dat het dak de ene keer in de positieve, en de andere keer, in meer en mindere mate, in de negatieve richting doorbuigt ten opzichte van de z-as. Dit heeft alles te maken met de *torusvorm* (donut) van het dak. Het kan vergeleken worden met een vlak in de vorm van een elliptische paraboloid; een *elpar*, en de daarbij behorende doorbuigingsregels. Dit is een vorm waarbij de verticale doorsneden parabolen zijn, en de horizontale ellipsen.



Figuur 21 – Krachtswerking *elpar*.

Hierover wordt in *Structure Systems* het volgende gezegd:

*“Loads are transmitted to boundary arches through arch mechanism in two axes. Boundaries therefore must receive arch thrust and must be stiffened accordingly... Because its form (ellipse) approximates the funicular tension curve for horizontal components resulting from dead weight, the edge beam remains largely free of bending.” (Engel, 1997, p. 256)*

Dit beschreven fenomeen treedt deels ook in de ontworpen constructie op. Alleen in het midden wijkt de constructie af van de *elpar*; in plaats dat het vlak de kromme tot de top te vervolgt, gaat het naar beneden, als een torus. Wat wel overeen komt zijn de doorsneden in het horizontale vlak welke ellipsen zijn. Bij een schaal (een massief gekromd vlak), zullen er oneindig veel ‘trekringen’ ontstaan in het vlak. Hoe meer de ontworpen constructie dus naar een vlak zal gaan neigen, hoe meer deze eigenschappen van een *elpar* zichtbaar zullen zijn in de doorbuiging. Dit kan bewerkstelligd worden door meer staven tussen de knooppunten in het dak toe te voegen, ofwel ringen aanbrengen in het dak. Er ontstaan dan, anders dan bij de schaal, een aantal, gecontroleerde ‘trekringen’ (in plaats van oneindig veel).

Bij een dergelijke vorm wordt de hoogte voor ieder punt berekend met de volgende formule:

$$z = \frac{x^2}{2r_1} + \frac{y^2}{2r_2} \quad [1]$$

waarbij

$r_n$  = de beschrijving van de kromme in bijbehorende richting

De twee curves met kromme  $r_1$  en  $r_2$ , schuiven over elkaar heen en maken zo een dubbel gekromd vlak; een translatievlak. Met behulp van de richtingscoëfficiënt van de kromme, kan de hoofdkromming per richting worden bepaald. De richtingscoëfficiënt wordt verkregen door de vormbeschrijvende formule te differentiëren. De hoofdkromming is de verandering van de richtingscoëfficiënt, of in wiskundige termen: de tweede afgeleide. De hoofdkromming in de x en de y richting worden hiermee bepaald. Om de krommingsmaat van een schaal te bepalen, worden de beide hoofdkrommingen met elkaar vermenigvuldigd.

$$k_1 \times k_2 = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \times \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \right)^2 \quad [2]$$

Deze formule is nodig om uiteindelijk de vervorming te berekenen. Elk punt is na belasting verplaatst in de x- en de y-richting en heeft daarmee verandering w in de z-richting ondergaan:

$$k'_1 \times k'_2 = \left( \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \times \left( \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) - \left( \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \quad [3]$$

De eigenschap van een *elpar* is dat er alleen buigvervormingen optreden en geen vervormingen door afschuiving, extensie en wringing. Dit betekent dat de toename van in de kromming zeer veel kleiner is dan de kromming zelf. De functies  $\partial^2 w / \partial x^2 \cdot \partial^2 w / \partial y^2$  en  $(\partial^2 w / \partial x \partial y)^2$  mogen daarom verwaarloosd worden. Dit resulteert in de volgende vergelijking:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \times \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \times \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = 0 \quad [4]$$

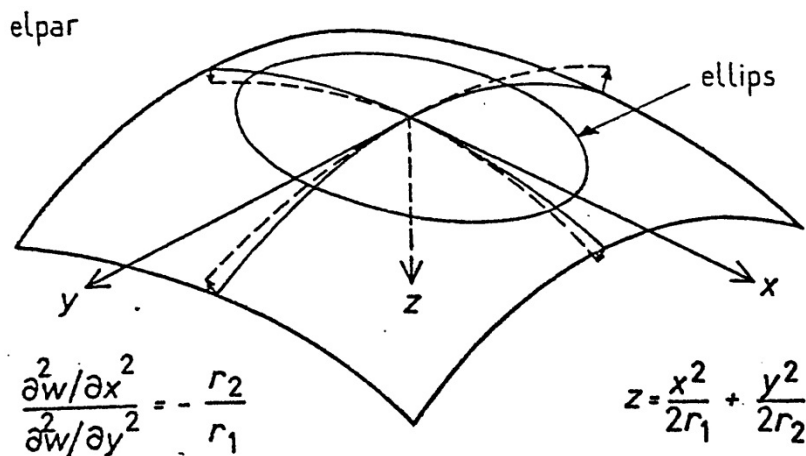
Uit vergelijking [1] blijkt dat de krommingseigenschappen van de *elpar* de volgende zijn:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{1}{r_1}; \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{1}{r_2}; \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = 0 \quad [5]$$

Deze eigenschappen kunnen in vergelijking [4], de vervorming, ingevuld worden:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -\frac{r_2}{r_1} \times \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad [6]$$

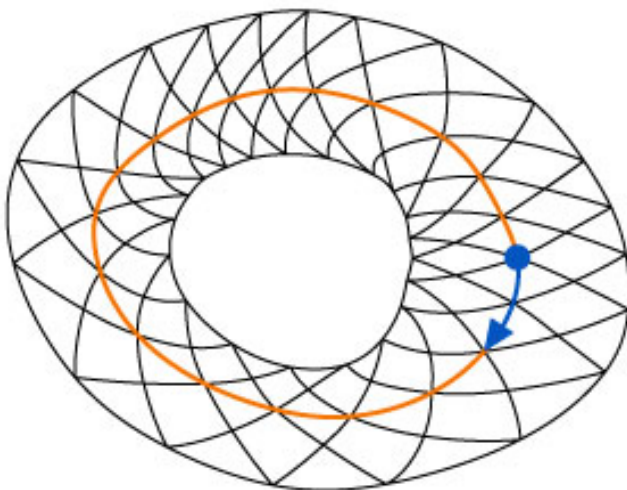
Uit deze vergelijking is op te maken dat wanneer de doorbuiging in de z-richting in de x-as toe neemt, deze in de y-as af moet nemen  $\partial x^2 \cong - \partial y^2$ .



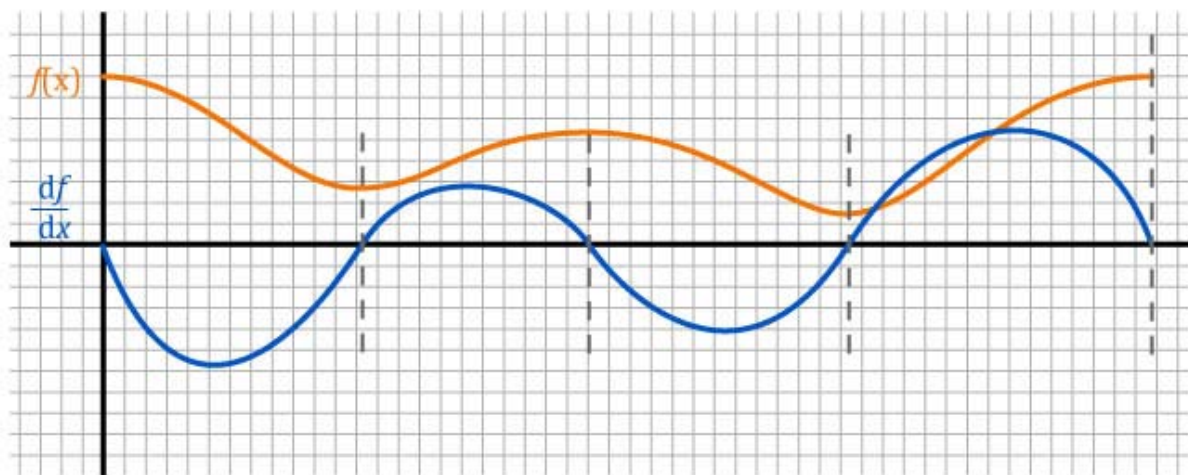
Figuur 22 – Verhouding doorbuiging in de x- en y-as van een *elpar*.

(Beranek, 1979, pp. 112-117)

Zoals gezegd, vertoont de constructie vervormingseigenschappen van de *elpar*. Deze gedeelde karakteristieken zijn vooral te danken aan het feit dat beide vormen klastisch van aard zijn. Dit houdt in dat de krommingen over de x- en de y-as beide dezelfde richting op buigen,  $k_1 \times k_2 > 0$  (Toussaint, 1980, p. 16). Echter zijn de formules hierboven niet helemaal toepasbaar op de constructie. Behalve het verschil dat de constructie een 'gat' in het midden heeft, is de vorm het ook niet met *slechts* twee krommingen te beschrijven. Als er gekeken wordt naar de richtingscoëfficiënten voor de hoogste punten van de spanten in het dak, zien we dat er twee maxima en twee minima aanwezig zijn.

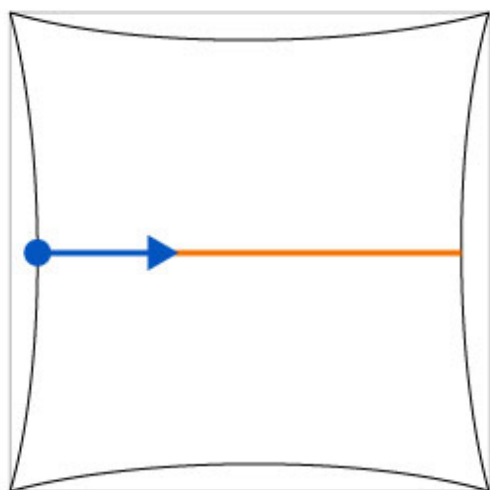


Figuur 23 – Hoogste punten constructie.

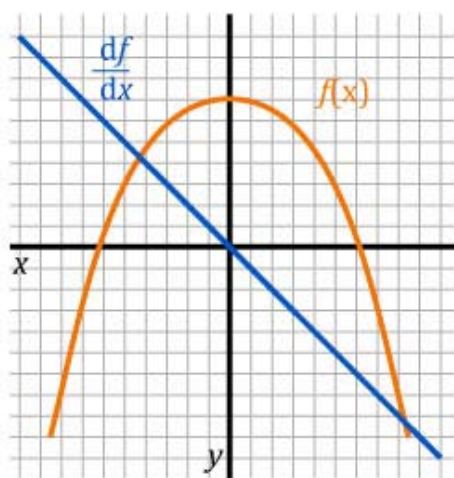


Grafiek 1 – Beschrijving hoogste punten constructie (oranje) en de bijbehorende richtingscoëfficiënt (blauw).

Terwijl dit er voor een *elpar* er zo uit zou zien:

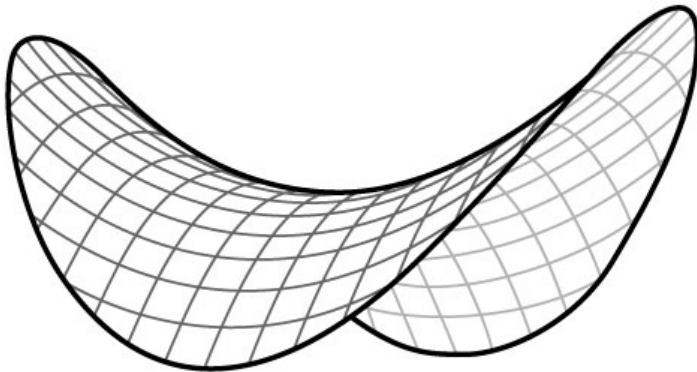


Figuur 24 – Hoogste punten *elpar* (in één richting).



Grafiek 2 – Beschrijving hoogste punten *elpar* (oranje) en de bijbehorende richtingscoëfficiënt (blauw).

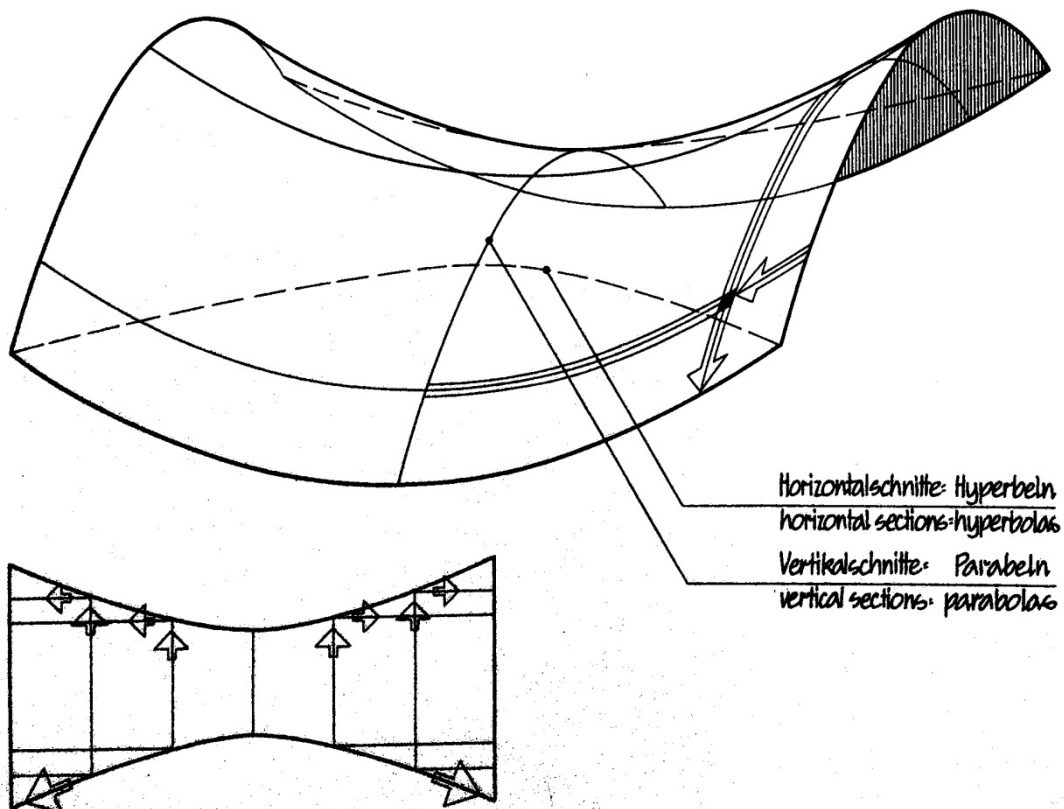
Het gaat hier dus om een samengesteld vlak. De constructie vertoont ook eigenschappen van een hyperbolische paraboloid; een *hypar*. Als we kijken naar de hoogste punten van de constructie, lopen deze in de vorm van een *pringle*.



Figuur 25 – Cirkel genomen uit een *hypar* resulteert in een *pringle*vorm.

De krachten worden in een dergelijk vlak anders doorgegeven:

*“Loads are transmitted to boundary arches through arch mechanism in the one axis and suspension mechanism in the other. Boundaries therefore must receive arch thrust in the one axis and suspension pull in the other... Because of its arch shape the edge beam can transmit these horizontal forces to the corners without major bending” (Engel, 1997, p. 256)*



Figuur 26 – Krachtswerking *hypar*.

Deze vorm wordt beschreven door de volgende formule:

$$z = \frac{x^2}{2r_1} - \frac{y^2}{2r_2} \quad [7]$$

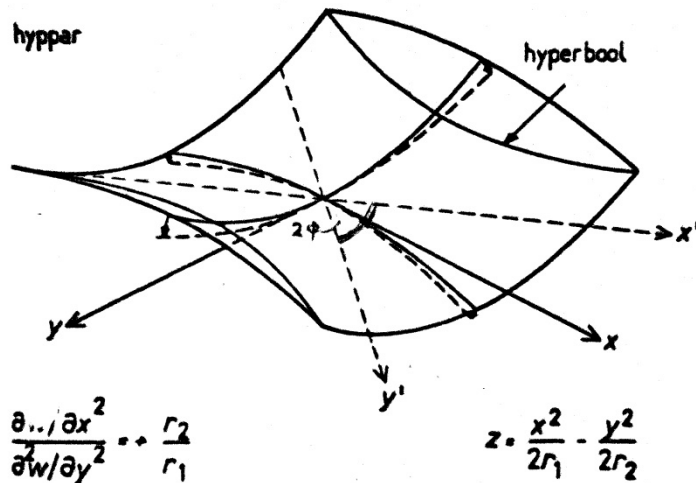
Hiervoor gelden de volgende voorwaarden

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{1}{r_1}; \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = -\frac{1}{r_2}; \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = 0 \quad [8]$$

Als we deze gegevens invullen in de formules voor de doorbuiging wordt het volgende verkregen:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = +\frac{r_2}{r_1} \times \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad [9]$$

Hieruit blijkt dat na belasting van het vlak beide doorbuigingen  $w$  (in de  $x$ - en  $y$ -richting) toe dan wel af moeten nemen. De kromming van de ene richting zal dus toenemen, en de andere afnemen.

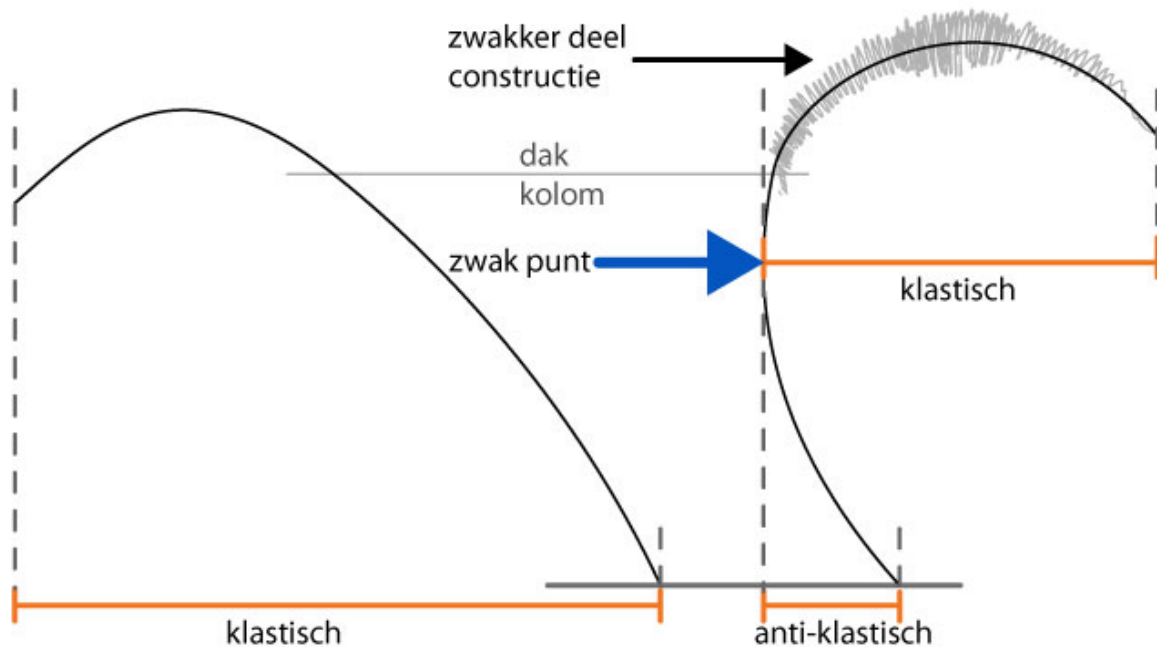


Figuur 27 – Verhouding doorbuiging in de  $x$ - en  $y$ -as van een *hypar*.

(Beranek, 1979, p. 117)

De twee kromme lopen dus in tegengestelde richting. Dit fenomeen heet anti-klastisch en wordt zo beschreven:  $k_1 \times k_2 < 0$  (Toussaint, 1980, p. 16). Hoe meer de hoogste punten in het dak dus in één lijn komen te liggen, hoe meer karakteristiek het over zal nemen van de *elpar*. Voor beide vlakken geldt dat er alleen vervormingen door buiging optreden (extensieloze vervormingen). Ook in de ontworpen constructie (in het dak) kunnen alleen buigvervormingen optreden. Dit betekent dat de constructie de verplaatsing door deze buigvervorming moet kunnen volgen en moet daarom flexibel zijn. In het optimalisatieproces wil dit zeggen dat de constructie niet te stijf mag worden. (Beranek, 1979, p. 119)

Een laatste punt waar met deze constructie rekening gehouden moet worden, is het verloop van dak naar kolom. Er is al beschreven hoe de kolom is opgebouwd. Deze neemt de vorm aan van een *hyper*; anti-klastisch dus. Als er een doorsnede over het gebouw wordt genomen, is duidelijk te zien dat in bepaalde deelen de kolom zich anti-klastisch gedraagt, en het dak klastisch. Tussen deze overgang ontstaat daardoor een zwak punt. Hier zal de constructie gezien de doorbuiging dan ook slapper zijn.



Figuur 28 – Doorsnede constructie, door klastische en anti-klastische eigenschappen ontstaat er een slapper deel in het dak.

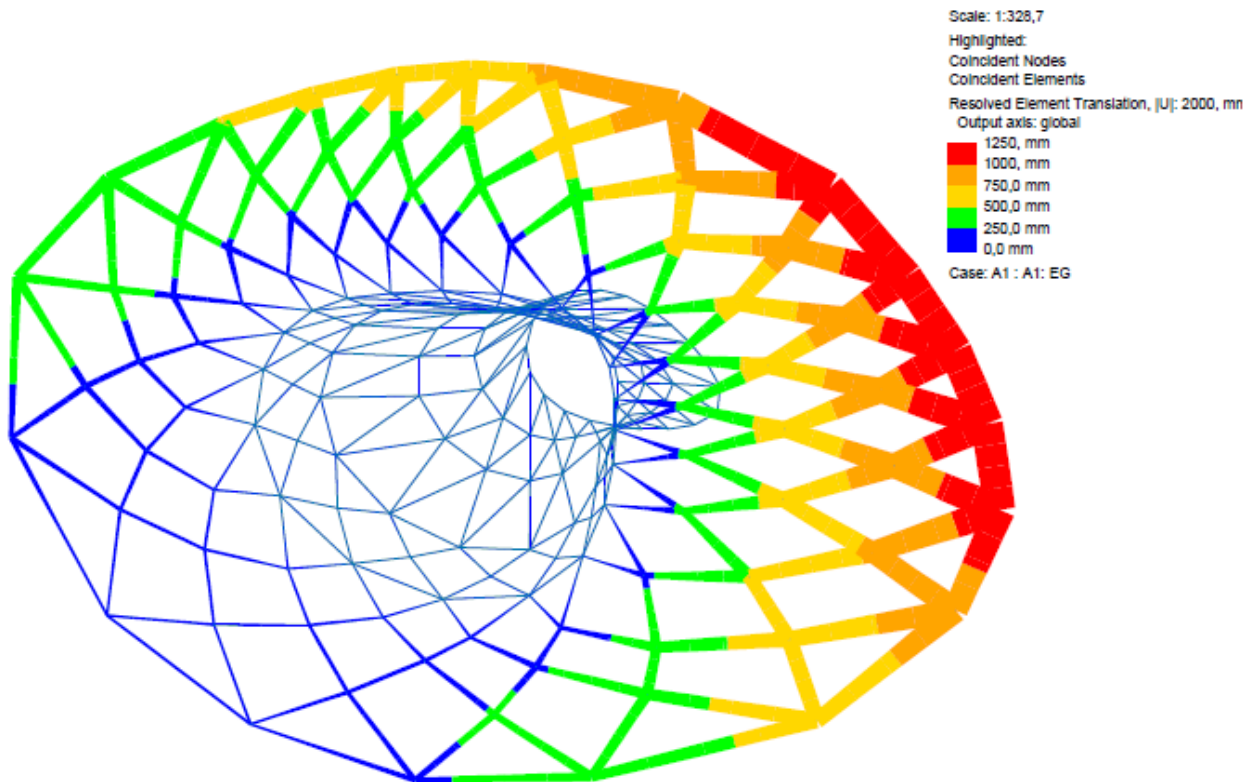
De hoofdrede dat er een slapper deel ontstaat, is dat de krachten niet vloeiend door kunnen lopen naar de opleggingen; de krachten kunnen niet de weg die het minste energie kost gebruiken. In het linker deel in Figuur 28 is dit wel het geval. Het kan vloeiend doorlopen naar de opleggingen.



## 8. OPTIMALISATIE EIGEN GEWICHT

Nu de basisprincipes van de werking van de constructie bekend is, kan deze geoptimaliseerd worden. Als eerste wordt dit gedaan naar het eigen gewicht. In dit stadium wordt er dus nog geen rekening gehouden met de wind.

De ontworpen concept constructie buigt op het moment nog veel te veel door:



Figuur 29 – Boven aanzicht van de doorbuiging van de constructie.

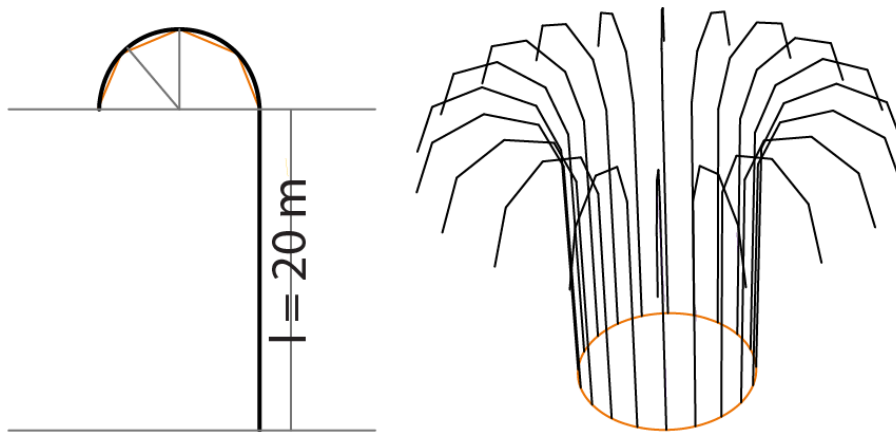
De grootste oorzaak hiervan is dat de spanten nog niet optimaal met elkaar samen kunnen werken; er missen nog ringen in het dak die spanningen op kunnen nemen als te zien was in de *elpar*. Verder geldt bij een optimale verdeling van de spanningen in een dergelijke ring, dat hoe meer deze neigt naar een cirkel (in plaats van ovaal/eivorm), hoe beter deze verdeling tot stand komt. Als laatste belangrijke punt is gebleken dat de hoogste punten van het dak gevormd zijn als een *hypar*, dus na belasting de doorbuiging in de x- en de y-richting beide toenemen. Een ring in een *elpar* (ellips in het platte vlak) is meer optimaal; als na belasting de doorbuiging in de x-richting toeneemt, neemt deze in de y-richting af (en andersom). Een kanttekening moet hierbij wel gemaakt worden: de constructie heeft op bepaalde plaatsen slappere delen door de overgang van anti-klastisch naar klastisch.

Om dit laatst genoemde punt te kunnen elimineren uit de optimalisatie is er een versimpeld model gemaakt. Hierdoor kan beter bekeken worden wat de daadwerkelijke hierboven beschreven effecten uithalen met de doorbuiging en krachtsvering in de constructie. De verschillende factoren worden onderzocht, geanalyseerd en bij verbeterd resultaat toegepast in de constructie.

## 8.1 VOORONDERZOEK

### Ringen

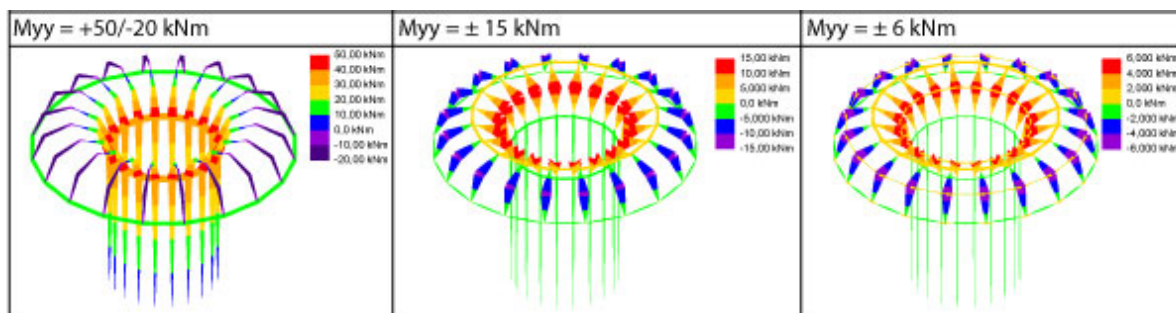
De versimpelde constructie heeft een kolom met een hoogte van 20 meter en een straal van 7 meter, welke de globale maten van de ontworpen constructie benaderen. Het dak is een halve cirkel met een straal van 5 meter.



Figuur 30 – Versimpelde constructie.

Het eerst genoemde punt gaat over het benaderen van een schaal (vlak) door het toevoegen van (meer) ringen. Hier is een tabel weergegeven met de verschillende varianten.

| Buitenringen                    | Ring op hoogste punt            | Ringen in dak                     |
|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
|                                 |                                 |                                   |
| U = 350,00 mm                   | U = 15,00 mm                    | U = 8,00 mm                       |
|                                 |                                 |                                   |
| $\sigma = \pm 4 \text{ N/mm}^2$ | $\sigma = +8/-6 \text{ N/mm}^2$ | $\sigma = +20/-10 \text{ N/mm}^2$ |
|                                 |                                 |                                   |

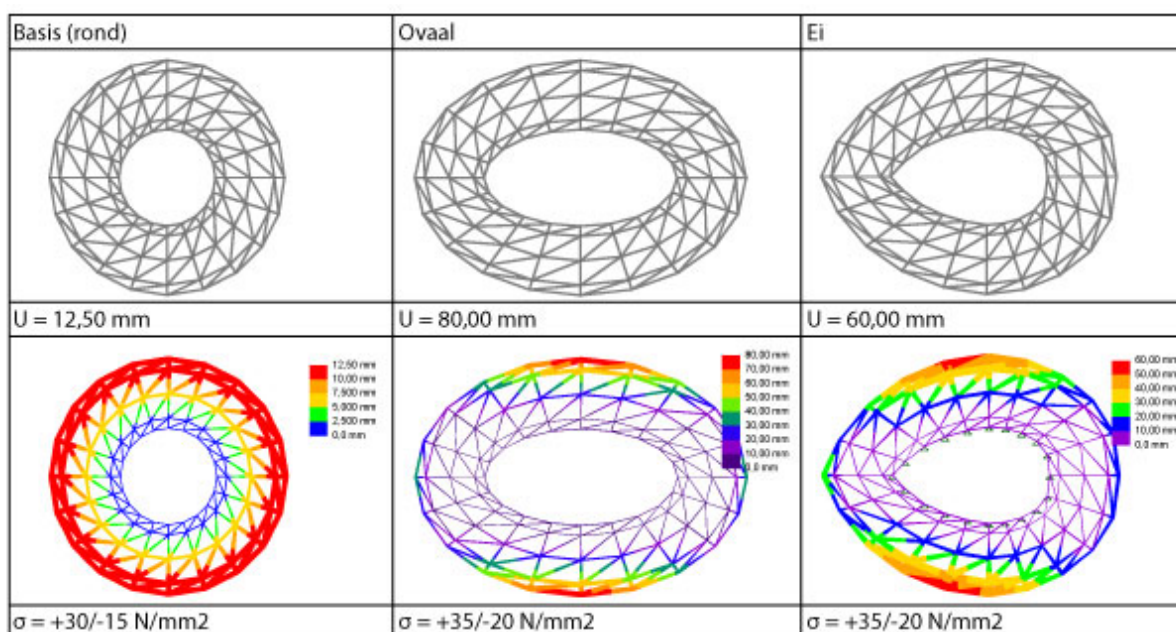


Tabel 2 – De invloed van de ringen (het meer gaan gedragen als een vlak) op doorbuiging, spanning en moment.

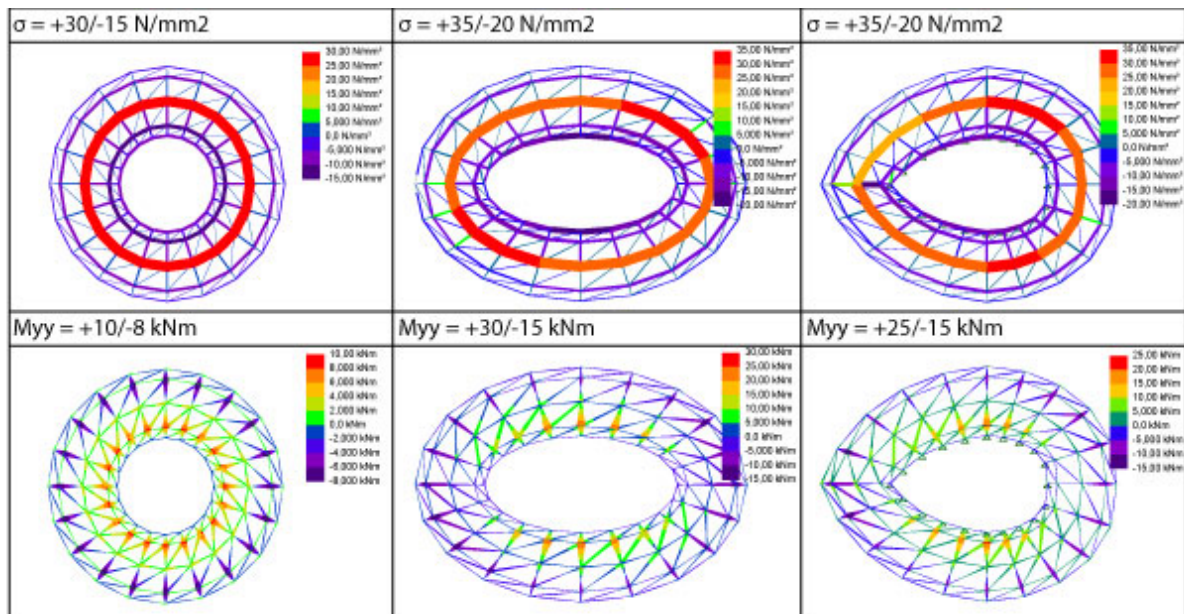
Het meest opvallende in deze resultaten zijn de verschillen tussen *buitenringen* en *ring op hoogste punt*. Er treedt een reductie van 95,7% in de doorbuiging op. De eigenschappen van een *elpar*, het creëren van trekkingen in het vlak, kan bij het tweede model ook optreden vanwege die ring. Waar eerst de trekspanningen vooral in de binnenste ring opgenomen werden, is deze functie nu overgenomen door de ring op het hoogste punt van het dak. In het derde model, *ringen in het dak*, blijft deze ring die functie vervullen. Er zijn alleen twee ringen bij gekomen die ook spanningen op zullen nemen. Deze extra ringen zorgen er voor de functie van de buitenste ringen nagenoeg weg valt. De verschillen zijn ook in de momenten goed terug te zien. In het eerste model zaten deze vooral bij de binnenring (positief) en op de hoogste punten van het dak (negatief). Na het implementeren van de ring op het hoogste punt, nemen de momenten sterk af en zitten vooral tussen de ringen. Deze nemen nog sterker af als deze in spanningen omgezet kunnen worden zoals in het laatste model. De ringen in het dakvlak zelf zorgen er voor dat de constructievorm en het materiaal meer optimaal gebruikt wordt.

### Vorm

Het tweede punt wat onderzocht is, is de relatie van de vorm (van bovenaf gezien) en de werking van de constructie. Hiervoor is er gekeken naar een ovaal en een eivorm.

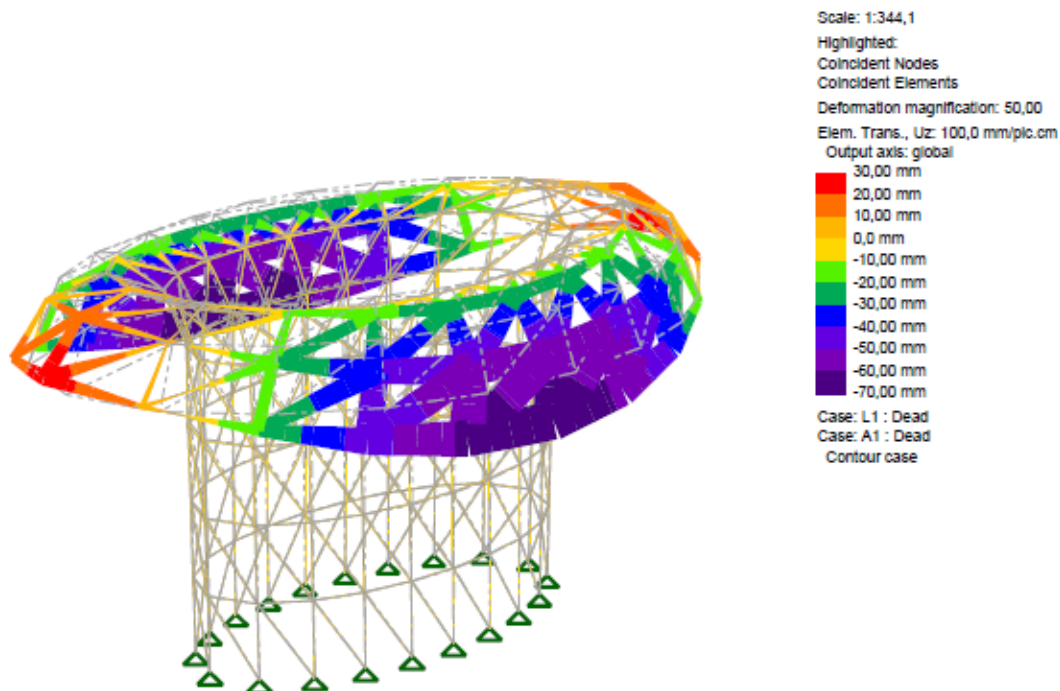






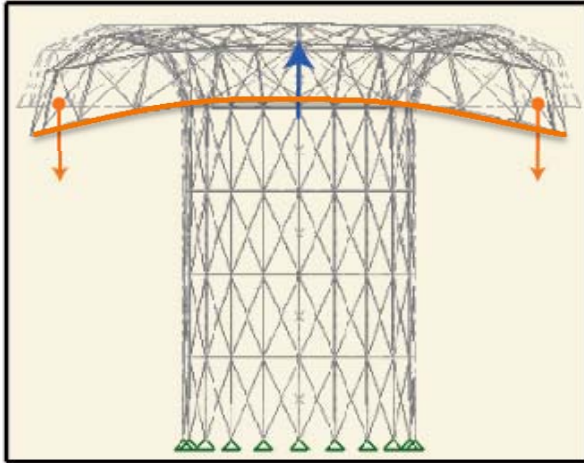
Tabel 3 – De invloed van de vorm op de doorbuiging, spanning en moment.

Hoe minder cirkelvormig de ringen in het dak zijn, hoe groter de doorbuiging. De eivorm buigt minder door dan de ovaal, omdat de bolle kant van het ei een redelijke cirkel benadert. Als er naar de momenten wordt gekeken, is te zien dat bij de cirkel ze allen gelijk zijn (logisch). Bij de ovaal echter is aan de buitenkant van de meest bolle kant een groter negatief moment te zien en aan de binnenkant van de vlakke kant een groter positief moment. Ook bij de eivorm is dit fenomeen waarneembaar. Dit heeft alles te maken met de doorbuiging. In de tabel is alleen de totale doorbuiging van bovenaf te zien. Als we in 3D kijken naar de verticale vervorming van het ovaal, krijgt met het volgende beeld:



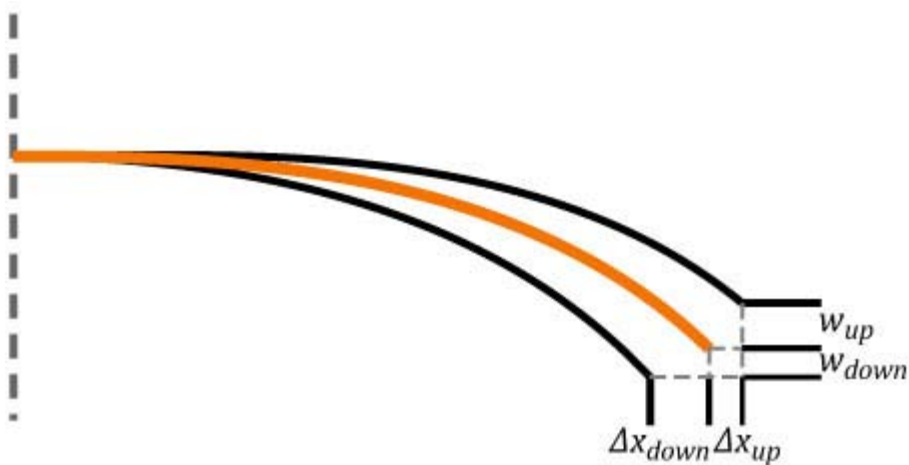
Figuur 31 – Vervorming van de ovale constructie.

Door het niet cirkelvormig zijn van de ringen, komen de eigenschappen van de *elpar* goed aan het licht. De lange, vlakke kant buigt in de negatieve richting door. Uit de vervormingsformules van de *elpar* bleek dat als de doorbuiging in de ene richting toe zou nemen, deze in de andere richting af moet nemen. Hier is dat te zien in het feit dat de korte, bollere kanten in de positieve z-richting doorbuigen. Nog beter is dit te zien in een zijaanzicht.



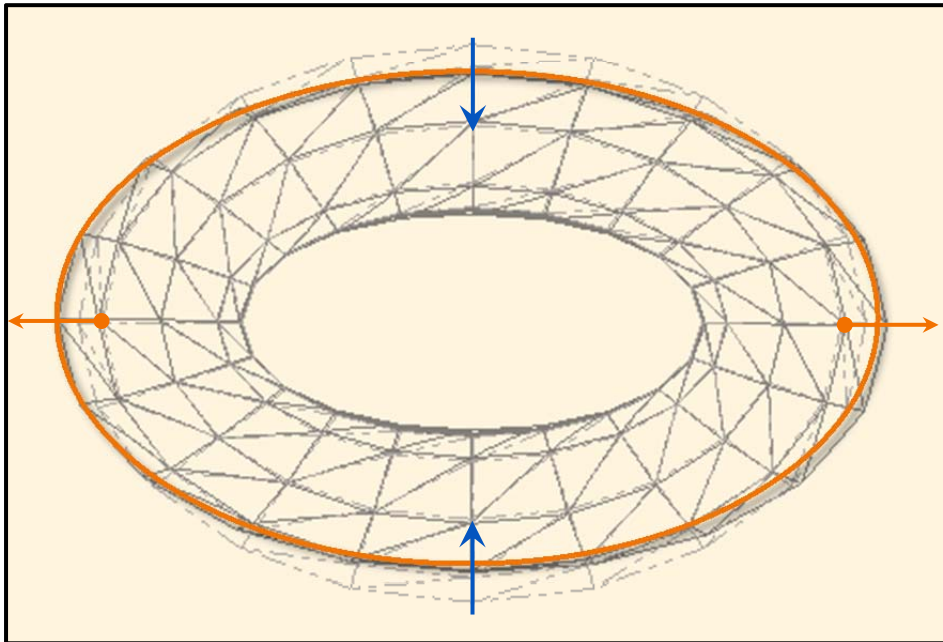
Figuur 32 – Doorbuiging ovaal, zijaanzicht.

Op het moment dat een kromme in positieve dan wel negatieve richting doorbuigt, moet deze ook in het horizontale vlak meebewegen:



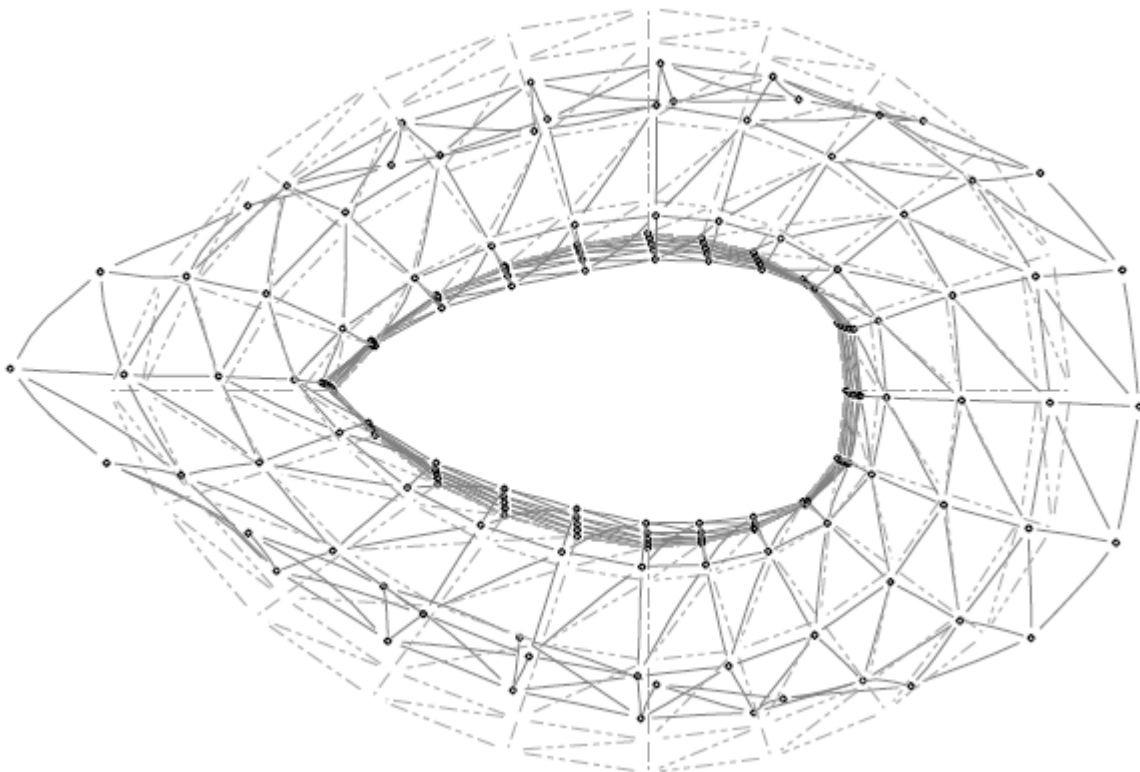
Figuur 33 – Relatie doorbuiging en verschuiving in de x-richting.

Dus de doorbuiging in het verticale vlak, moet ook voor een verplaatsing in het horizontale vlak zorgen.



Figuur 34 – Vervorming in het horizontale vlak.

Ook bij de eivorm is hier sprake van:

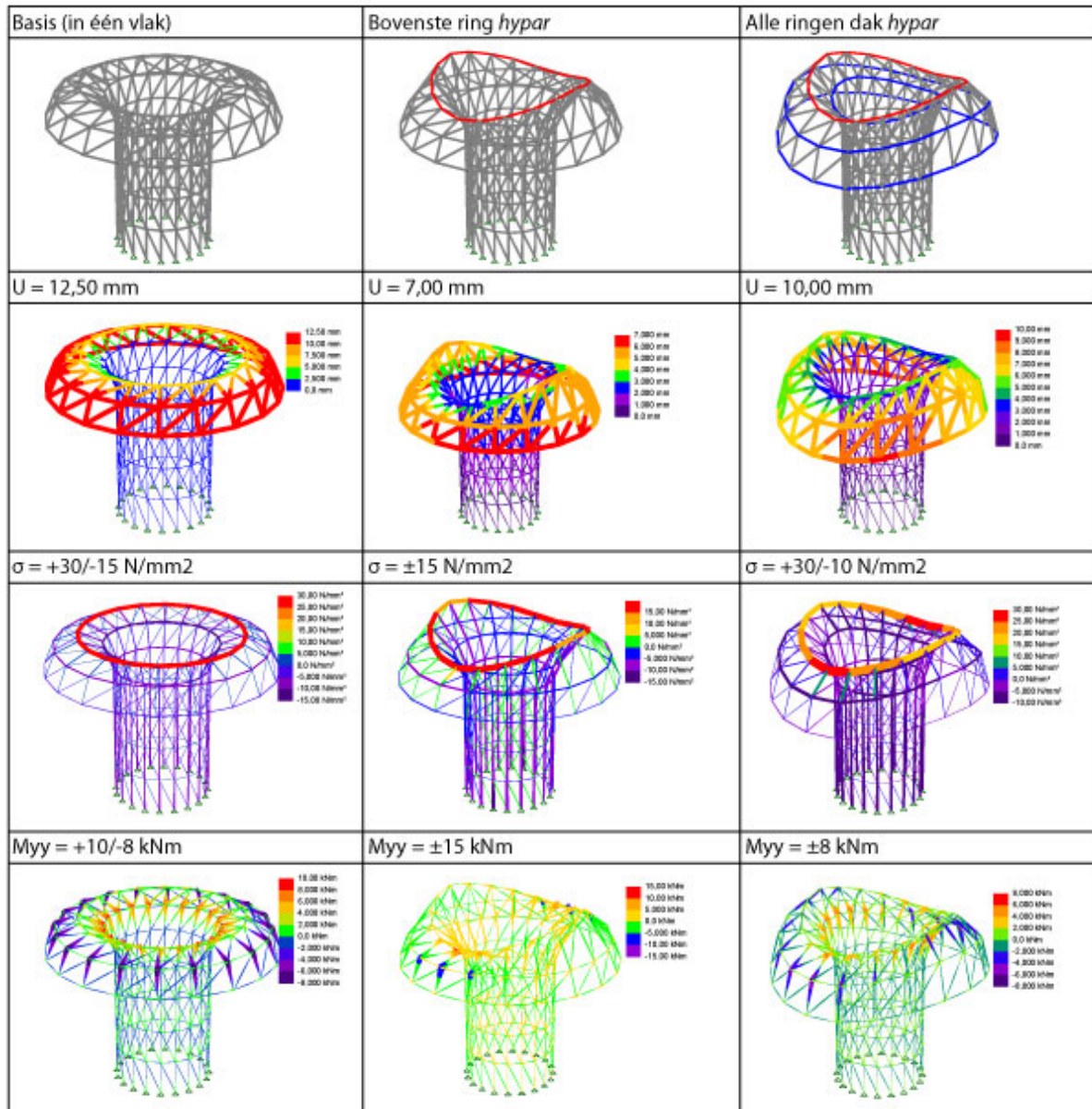


Figuur 35 – Horizontale vervorming ei.

Hoe meer cirkelvormig de constructie dus is, hoe kleiner de doorbuiging.

### Hypar ring

Het derde en laatste punt wat voor dit onderdeel onderzocht is, is de vorm van de ringen, gekeken naar in het horizontale vlak. Er is gekeken naar het effect van dergelijke ringen in de versimpelde constructie.

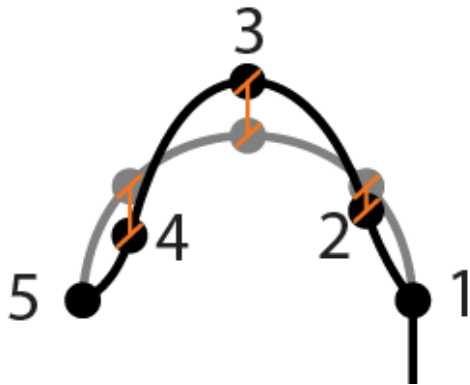


Tabel 4 – De invloed van de ringen als *hypar* op de doorbuiging, spanning en moment.

Het meest opvallend uit deze resultaten is dat bij het tweede en derde model (resp. *bovenste ring hypar* en *alle ringen dak hypar*) de doorbuiging kleiner is dan bij het basismodel. Verwacht was dat door het in twee richtingen elkaar tegenwerken van de assen in een *elpar*, deze meer optimaal zou zijn ten opzichte van de doorbuiging. De *hypar* werkt qua doorbuiging in de beide horizontale assen juist met elkaar mee ( $\partial x^2 \cong \partial y^2$ ).



Het blijkt uit het GSA model, dat de hoogte van vooral de trekking (nummer 3 in de afbeelding hieronder) in het dak zo gerangschikt kan worden ten opzichte van de drukring binnenin (nummer 1) dat hier een optimum in bestaat. De druk- en trekking vormen samen een koppel, die een tegengesteld moment levert ten opzichte van de vervorming van de spanten. Wanneer de trekking dus hoger wordt gemodelleerd, verbeterd dit de minimalisering van de doorbuiging en de momenten.



Figuur 36 – Optimale hoogtes ringen.

De grootste doorbuiging is bij dit model 4,5 mm en de momenten zijn gereduceerd met 81 tot 85% naar 1,5 kNm. De momenten worden bij een dergelijke vorm dus geminimaliseerd, wat de doorbuiging ten goede komt. Als we het basismodel nog eens vergelijken met *bovenste ring hypar*, is te zien dat de momenten toenemen. Deze zijn echter alleen aanwezig bij het laagste deel van de ring. Bij het hogere deel zijn nauwelijks momenten aanwezig, daar is het tegenwerkend moment van de koppel van druk- en trekking groter.



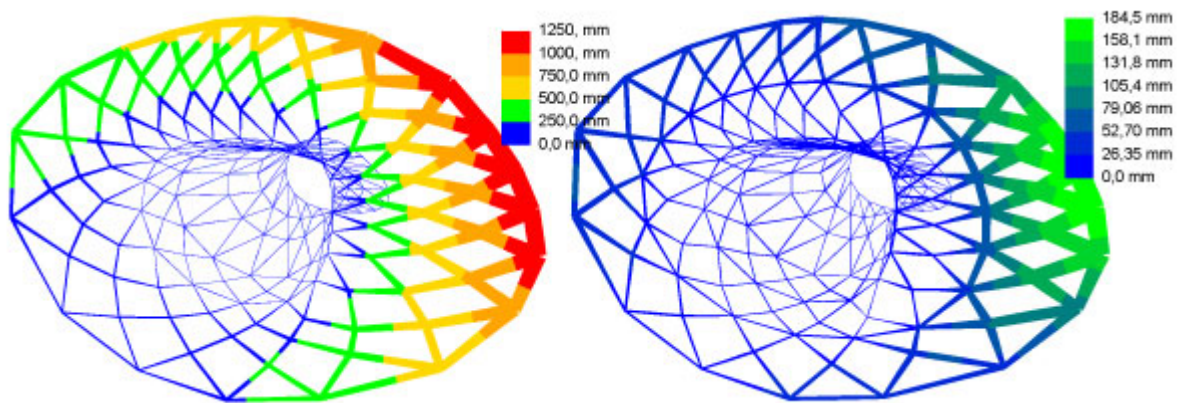
## 8.2 OPTIMALISATIE CONSTRUCTIE

### Stap 0

Door de theoretische achtergrond van de werking van de *elpar* en *hypar*, en de resultaten in het versimpelde rekenmodel, kan nu de ontworpen constructie geoptimaliseerd worden. Het eerste idee van de constructie buigt na doorrekenen met Oasys GSA, 1250 mm door (zie Figuur 29).

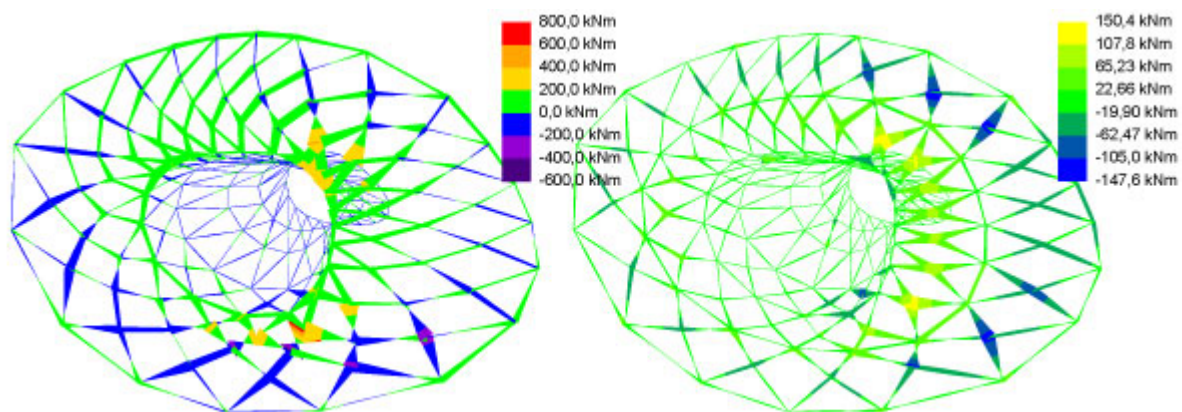
### Stap 1

De voornaamste rede dat de constructie, zoals in de eerste instantie bedacht, niet optimaal werkt (lees: meer de karakteristieken vertoont van de *elpar*), is het niet als een vlak functioneren van het dak. Door meer ringen toe te voegen, zal er een trekking op de hoogste punten ontstaan, vergelijkbaar met de in de *elpar* oneindig veel aanwezige ellipsen. De toevoeging van deze enkele ring zorgt al voor een flinke reductie in de doorbuiging. Waar deze eerst 1250 mm was, is deze nu nog maar 185 mm. In beide afbeeldingen van de doorbuiging is een slappere plek te ontdekken. Dit heeft te maken met het eerder uitgelegde zwakke punt in de constructie door de overgang van de anti-klastische kolom naar het klastisch gevormde dak.



Figuur 37 – Verschil in doorbuiging model 0 en model 1.

Doordat er spanningen in de bovenste ring opgenomen kunnen worden, worden de momenten in die knopen een stuk kleiner of vallen zelfs bijna weg. De momenten die in de binnenste ring van het dak aanwezig waren, zijn ook nagenoeg komen te vervallen.



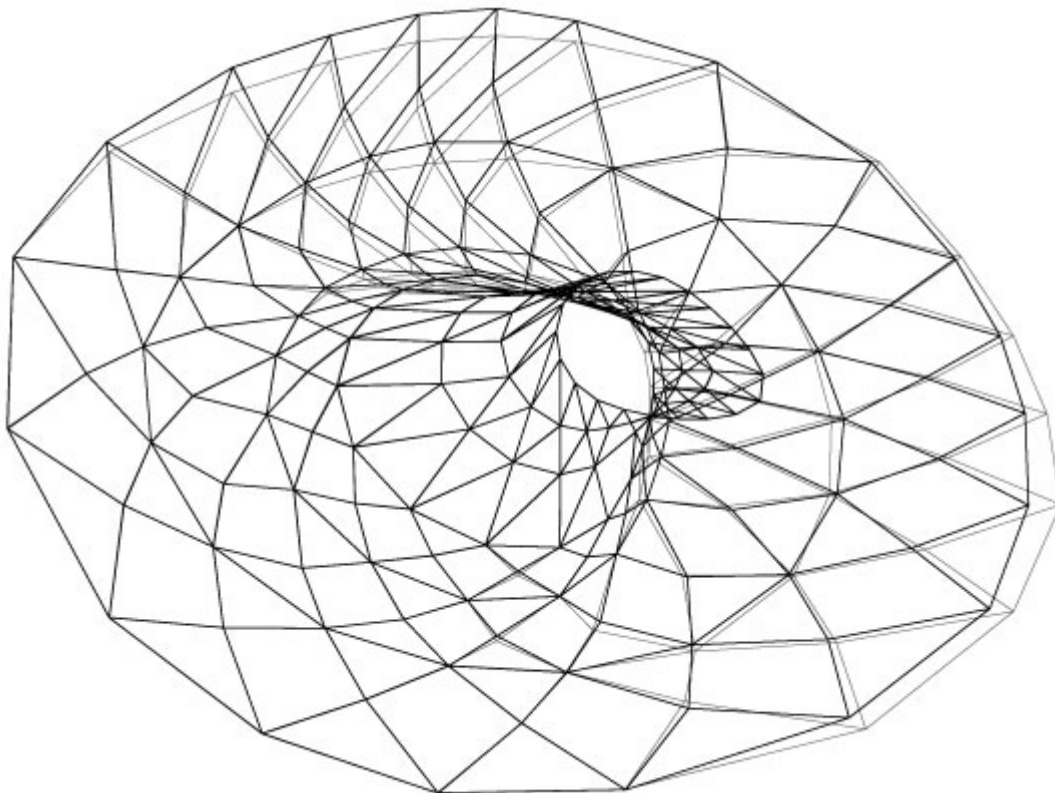
Figuur 38 – Verschil in moment model 0 en model 1.

### Stap 2

De bovenste ring is gevormd als een *hypar*. Zoals bleek uit het vooronderzoek en de theorie over deze vlakken, zal de constructie beter werken door deze ring (en de andere) in één vlak te plaatsten. Voor deze stap is echter ook de vormgeving van het geheel gemoeid. Wanneer de ringen volledig vlak worden gemodelleerd, zal het beeld en de functieweerspiegeling ook grotendeels verdwijnen. In deze stap is dan ook een optimalisatie tussen de techniek (theorie, constructieve werking) en de architectuur (beeld, vormgeving) gezocht. De noord- en zuidzijde moeten zorgen voor de connectie tussen het oostelijke en westelijke deel, en dus lager blijven. Het dak boven het wachtplatform (oost) zorg door de grote hoogte voor de ruimtelijkheid van het gebied. Na deze stap is de doorbuiging iets gereduceerd, met 12,5%.

### Stap 3

Deze ring (en de andere) werken nog beter als de spanningen beter verdeeld kunnen worden, dus cirkelvormig zijn. De punten zijn in deze fase afzonderlijk verplaatst dat het meer naar een cirkelvorm zou neigen. Ook met deze stap moet er rekening gehouden worden met het gewenste architectonische beeld. Het dak moet nog steeds luifels vormen boven de drie ingangen en een dak vormen voor de eerste verdieping. Het zal dus geen perfecte cirkel worden. Hoewel er relatief kleine aanpassingen zijn gemaakt, is het resultaat groot; de doorbuiging is van 175 mm naar 125 mm gereduceerd. Ook de spanning en momenten zijn kleiner geworden (33%).



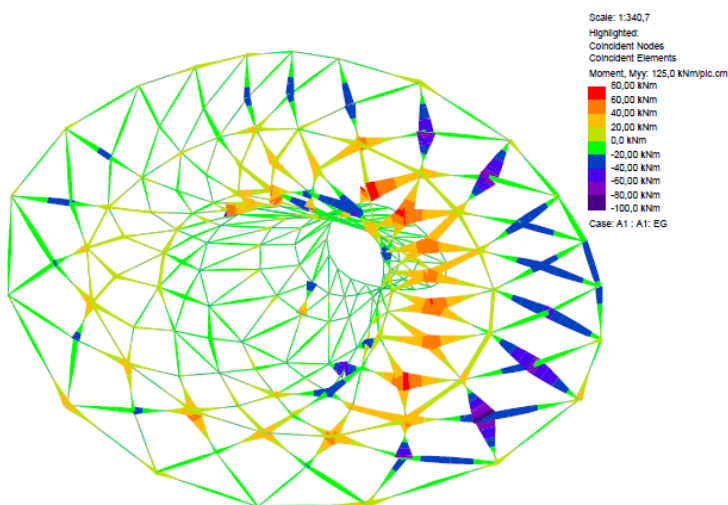
Figuur 39 – Optimalisatie stap 3, ringen meer naar een cirkel.

#### Stap 4

Omdat uit het vooronderzoek met het versimpelde model bleek dat er voor de ringen een optimale hoogte bestond, is er ook in het constructief ontwerp gekeken naar dit fenomeen, rekening houdend met de architectuur. Een verhoging van 60 mm is voor de vormgeving het meest haalbare. Met deze stap zijn vooral de doorbuiging en momenten gereduceerd (resp. 20 en 33%).

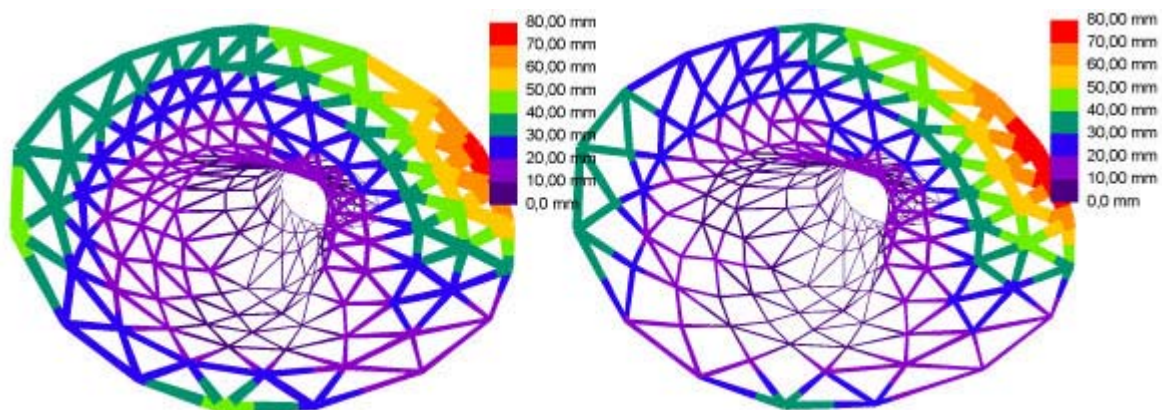
#### Stap 5

Om de constructie meer van de positieve eigenschappen van de *elpar*, moeten er meer ringen toegevoegd worden. Wel moet er, zoals eerder gezegd, rekening gehouden worden dat de constructie niet te stijf wordt. Het moet de buigvervorming nog kunnen volgen. Om te weten te komen of en hoe er meer ringen toegevoegd worden, wordt er eerst daar de momenten van *stap 4* gekeken.

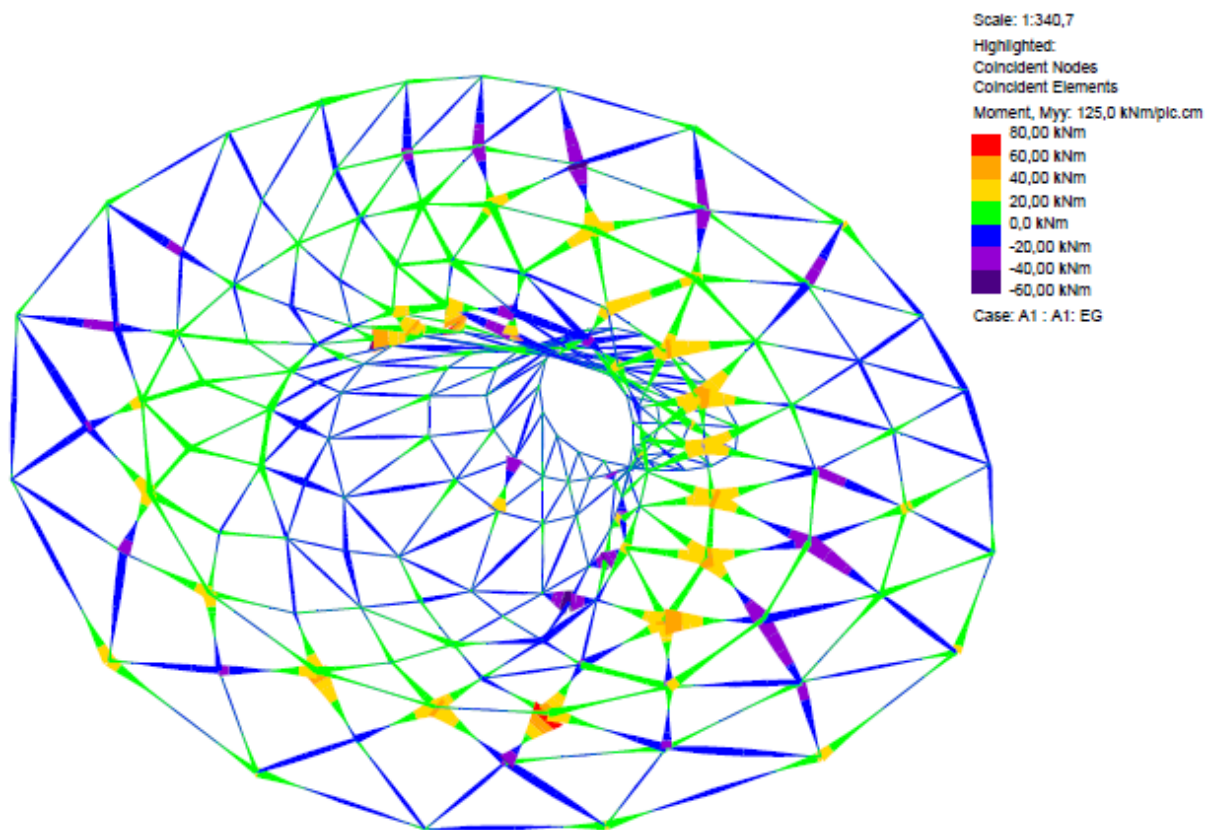


Figuur 40 – Momenten van stap 4.

Duidelijk wordt uit deze afbeelding dat er aan de rechter kant, zowel aan de binnen- als buitenkant grote momenten optreden. Dit is ook het zwakke deel van de constructie. Ter plaatse van deze momenten zouden de ringen dus gunstig zijn. De rechterkant buigt dus het meest door. Door een *volledig* stijf vlak, zullen de krachten ontstaan door deze negatieve doorbuiging ook doorgevoerd worden naar de linkerkant. Om deze reden wordt slechts een deel van de ringen toegevoegd, ter plaatse van de grote momenten.



Figuur 41 – Verschil in doorbuiging stijf vlak en flexibel vlak.



Figuur 42 – Momenten in het flexibele vlak.

Duidelijk wordt uit de afbeelding dat de momenten op de knooppunten, waar nu de deelringen zijn toegevoegd, minder groot zijn. De deelringen nemen deze over in de vorm van spanningen.

#### Stap 6

Het laatste wat in het model nog moest gebeuren voor een realistisch rekenresultaat, is het modelleren van de opleggingen naar de realiteit. De vloeren, waar de kolom van de constructie aan is gekoppeld, zullen de krachten in het horizontale vlak opnemen. Ook de constructie van de eerste verdieping is er in gemodelleerd. Met deze stap, is de optimalisatie naar het eigengewicht voltooid.

### 8.3 CONCLUSIE OPTIMALISATIE EIGEN GEWICHT

Om een dergelijke constructie meer te laten functioneren als een *elpar*, en zo de positieve eigenschappen hiervan te kunnen benutten, is het van belang dat er genoeg ringen in de constructie aanwezig zijn. Hierdoor gaat het geheel zich meer gedragen als een vlak. Toch moet het niet te stijf worden in verband met de zwakkere plekken in de kolom. Het moet een flexibele constructie blijven.

Verder is de vorm van bovenaf gezien (rond, ovaal, ei) bepalend voor de efficiëntie van de spanningsverdeling in de ringen. Hoe meer het geheel neigt naar een perfecte cirkel, hoe beter het werkt. Ook geldt dit voor het in één vlak liggen van de ringen. Door de ringen als een *hypar* te modelleren, treden er ter plaatste grotere momenten op. De eigenschap van een *hypar* is dan ook dat de doorbuiging in de beide richtingen met elkaar mee werkt, in tegenstelling tot de *elpar*, waarbij deze elkaar qua richting tegenwerken.

De grootste slag in de optimalisatie is gehaald bij het toevoegen van de bovenste ring. Als er geen rekening gehouden had hoeven worden met de architectuur, waren er in de andere stappen ook grotere vooruitgangen te behalen.

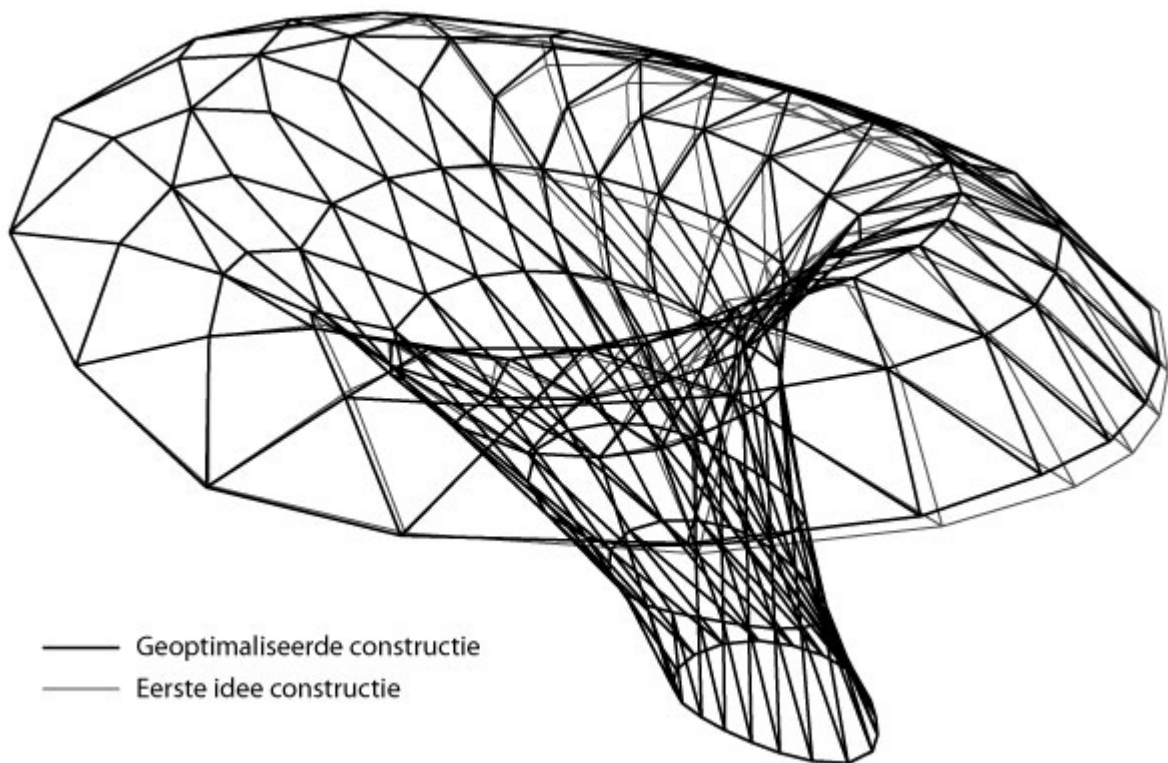
| No#            | U [mm] | U [%Δ] | $\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ] |     | $M_{yy}$ [kNm] |      | Opmerking                      |
|----------------|--------|--------|-------------------------------|-----|----------------|------|--------------------------------|
| 0              | 1250   | -      | -60                           | +60 | -600           | +800 | Eerste idee vorm               |
| 1              | 200    | 84,0   | -60                           | +80 | -150           | +200 | Toevoegen bovenste ring        |
| 2              | 175    | 12,5   | -60                           | +60 | -150           | +150 | Bovenste ring meer in één vlak |
| 3              | 125    | 28,6   | -40                           | +60 | -150           | +100 | Ringen meer naar cirkel        |
| 4              | 100    | 20,0   | -40                           | +60 | -100           | +80  | Hoogte bovenste ring           |
| 5              | 80     | 20,0   | -40                           | +70 | -60            | +80  | Extra ringen in dak            |
| 6              | 70     | 12,5   | -70                           | +80 | -60            | +80  | Opleggingen naar realiteit     |
| <b>Δtotaal</b> | -1180  | 94,4   | +10                           | +20 | -540           | -720 |                                |

Tabel 5 – Resultaten van alle optimalisatiestappen.

De totale reductie van de doorbuiging is na de optimalisatie uitgekomen op 94,9%. Voor de momenten, die in het begin ook erg groot waren, is deze geminimaliseerd met 90%. De spanningen zijn iets toegenomen. Nu is dit geen probleem; de materiaaleigenschap van staal, is dat het spanningen van 235 N/mm<sup>2</sup> kan opnemen. Er is dus juist beter gebruik gemaakt van de eigenschappen van het materiaal.

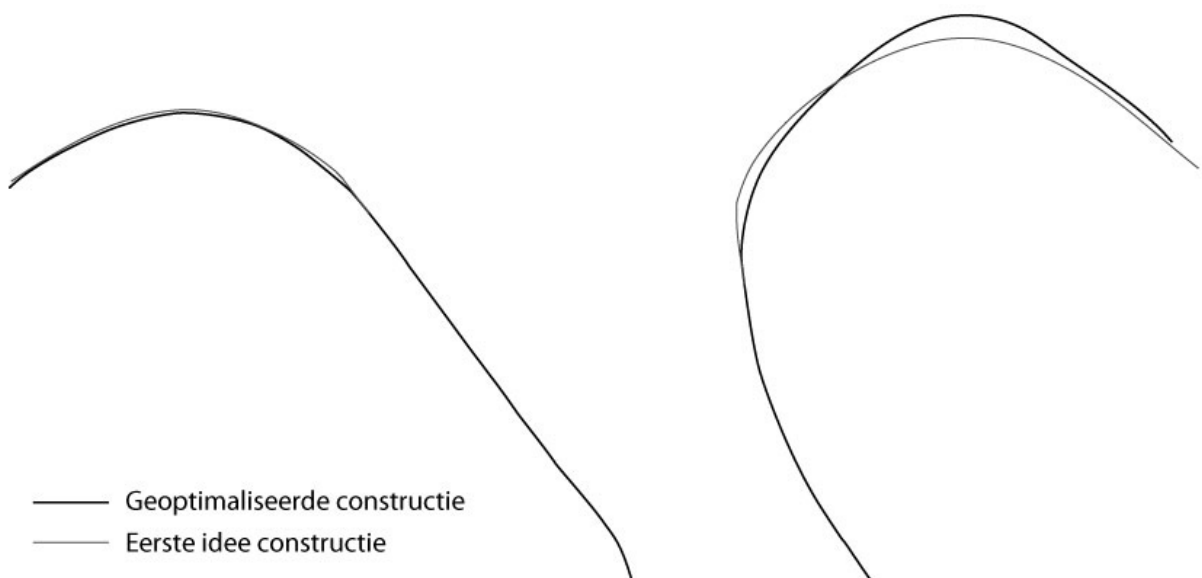
Op de volgende pagina is het lijnendiagram van de geoptimaliseerde constructie over die van het eerste vorm idee gelegd. De verschillen in 3D worden zo beter duidelijk. Vooral aan de zwakkere zijde van de constructie zijn de veranderingen in de vorm goed zichtbaar. Ook vallen de ringen, die door dit optimalisatieproces geïmplementeerd zijn, goed op.





Figuur 43 – De geoptimaliseerde constructie over het eerste idee voor de vorm.

Als we kijken naar de hardlijnen van de constructie in de doorsnede is ook goed te zien dat de optimalisatie vooral te zien is bij het zwakkere deel. Bij dit deel, is de trekking, op het bovenste punt van de spanten, hoger komen te liggen ten opzichte van de binnenste drukring.



Figuur 44 – Doorsnede van de geoptimaliseerde constructie over het eerste idee voor de vorm.

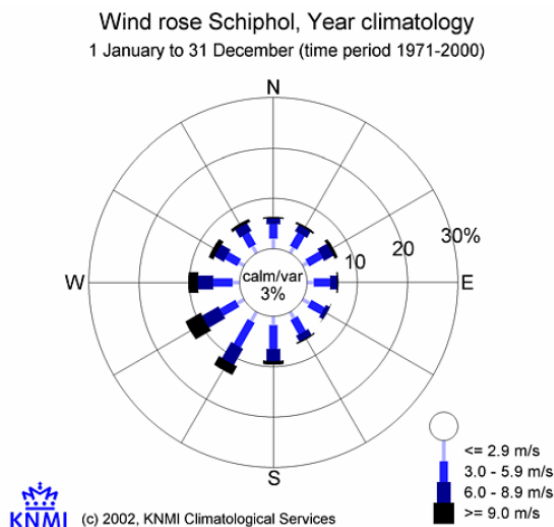
## 9. OPTIMALISATIE WIND

De constructie van het transferium lijkt sterk op die van een paraplu. Dit heeft een aantal consequenties voor de windbelasting die op het gebouw komt te staan. Het geheel bestaat uit een rondom gaande uitkraging van maximaal 26,4 meter. De volgende formule beschrijft de maximale doorbuiging voor een uitkraging:

$$U_{max} = 0,004l \times 2 \text{ [mm]} \quad [10]$$

Hieruit blijkt dat de maximale doorbuiging 211 mm bedraagt. Doordat de constructie opgebouwd is uit een stalen *grid shell structure*, oogt deze zeer fragiel voor een leek. Als deze door de wind 211 mm omhoog en omlaag gaat bewegen, zal dit als onprettig ervaren worden. De menselijke factor gaat hier dus in mee spelen. Daarom is besloten dat met alle veiligheidsmarges, de maximale doorbuiging van de constructie 200 mm bedraagt.

Als tweede zal door deze vorm, wind de maatgevende vervormingsbelasting zijn. Regen en sneeuw (belasting) zal door de schuine hoeken die het dak maakt, snel naar beneden vallen en weinig blijven liggen. Of iedere windrichting als even belangrijk (lees: maatgevend) zal zijn, hangt af van het gebied waar het gebouw gelegen is. In dit geval gaat het om Amsterdam, met aan de noord- en oostzijde bebouwing, dus verstrooide en verzwakte wind. Aan de zuid- en westzijde bevindt zich het IJ, een grote 'open vlakte', waar de wind vrij spel heeft. Nu is het geval dat uit deze twee richtingen de wind het meest komt en ook het hardst is.



Figuur 45 – Windroos vanaf 1971 van de regio Schiphol.

Door de paraplu-achtige vorm, kan er wind van zowel boven als onder het dak door waaien. Het kan dus zowel op als onder het dak aangrijpen. In een simulatie van het minst gunstige geval, zal de wind loodrecht op het dak staan, waarbij het ene deel in de positieve z-richting en de andere kan de negatieve. De wind wil het gebouw dus gaan roteren. In de volgende afbeelding is dit geïllustreerd.



Figuur 46 – Resultaten krachten wind op de constructie.

Doordat de wind het geheel wil gaan roteren, bestaat er de kans dat er trek gaat ontstaan in de fundering. Ook met de opwaartse kracht van het grondwater, door de 9,5 meter diepe kelder, moet rekening gehouden worden.

Als laatste consequentie van deze vorm, bestaat er ook de kans dat de constructie met de wind gaat resoneren. Om precies te weten hoe de wind zich om het dak gedraagt, zou een windtunneltest gedaan moeten worden. Voor dit afstuderen is dat echter niet haalbaar, dus zal er met wetenschappelijke aannamen gewerkt worden.

Door de vorm, waarbij de hellingshoek niet kleiner is dan  $15^\circ$  is, kan er niet met de standaardwaarde voor windkrachten gewerkt worden. De wind kan makkelijker aangrijpen op de constructie. De vormfactor in de formule, zal dus hoger uit komen.

$$P_{rep} = c_{dim} \times c_{index} \times p_w \left[ \frac{kN}{m^2} \right] \quad [11]$$

waarbij:

$c_{dim}$  = vormfactor gebouw

$c_{index}$  = windvormfactor = 1,2

$p_w$  = stuwdruk =  $0,9 \left[ \frac{kN}{m^2} \right]$

In het geval van deze constructie, zijn alle hoeken van het dak tussen de  $30^\circ$  en  $60^\circ$  waar de volgende windvormfactor voor loef- en lijzijde bij hoort, respectievelijk  $c_1$  en  $c_2$ :

$$c_1 = 0,8 \times \frac{60 - \alpha}{30} \quad [12]$$

$$c_2 = 1,5 \times \frac{60 - \alpha}{30} \quad [13]$$

waarbij:

$\alpha$  = hellingshoek  $[\circ]$

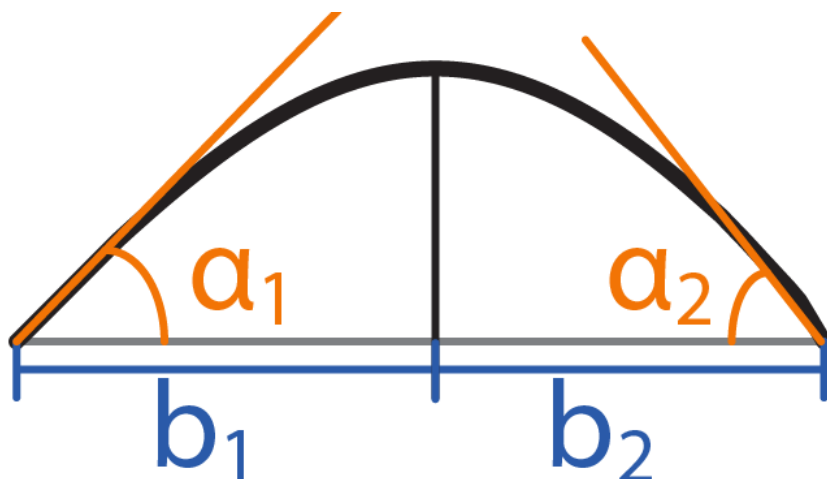
Voor  $c_1$  wordt de ene helft van het dak genomen en voor  $c_2$  de andere helft. Voor de beide gevallen ( $c_1$  = 'hoek 1' met  $c_2$  = 'hoek 2' en  $c_1$  = 'hoek 2' met  $c_2$  = 'hoek 1') wordt steeds de minst gunstige genomen, zoals te zien in Figuur 47.



Omdat mijn dak uit veel verschillende hellingshoeken bestaat, heb ik het dak in vieren opgedeeld en het gemiddelde per kwart dak voor  $\alpha$  genomen. Eerst zijn vanuit hellingshoek  $\alpha$   $c_1$  en  $c_2$  berekend en ingevuld in onderstaande formule.

$$c_i = \frac{b_1 \times c_1(\alpha_1) + b_2 \times c_2(\alpha_2)}{b_1 + b_2} \quad [14]$$

Waarbij  $b_1$ ,  $\alpha_1$ ,  $b_2$  en  $\alpha_2$  de volgende waarden voorstellen (Figuur 47):



Figuur 47 – Waarden van  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $\alpha_1$  en  $\alpha_2$ .

De waarden van de vier delen en de minst gunstige  $c_i$  hiervan zijn in de volgende tabel weergegeven.

|        |                        |                         |              |              |              |
|--------|------------------------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Deel 1 | $b_1 = 9,0 \text{ m}$  | $\alpha_1 = 32,5^\circ$ | $c_1 = 0,75$ | $c_2 = 1,38$ | $c_i = 1,01$ |
|        | $b_2 = 7,4 \text{ m}$  | $\alpha_2 = 39,0^\circ$ | $c_1 = 0,56$ | $c_2 = 1,05$ |              |
| Deel 2 | $b_1 = 8,1 \text{ m}$  | $\alpha_1 = 36,8^\circ$ | $c_1 = 0,62$ | $c_2 = 1,16$ | $c_i = 0,79$ |
|        | $b_2 = 6,1 \text{ m}$  | $\alpha_2 = 48,2^\circ$ | $c_1 = 0,31$ | $c_2 = 0,59$ |              |
| Deel 3 | $b_1 = 12,3 \text{ m}$ | $\alpha_1 = 39,0^\circ$ | $c_1 = 0,56$ | $c_2 = 1,05$ | $c_i = 0,71$ |
|        | $b_2 = 11,9 \text{ m}$ | $\alpha_2 = 47,0^\circ$ | $c_1 = 0,35$ | $c_2 = 0,65$ |              |
| Deel 4 | $b_1 = 7,5 \text{ m}$  | $\alpha_1 = 32,4^\circ$ | $c_1 = 0,75$ | $c_2 = 1,38$ | $c_i = 0,97$ |
|        | $b_2 = 4,2 \text{ m}$  | $\alpha_2 = 51,1^\circ$ | $c_1 = 0,24$ | $c_2 = 0,45$ |              |

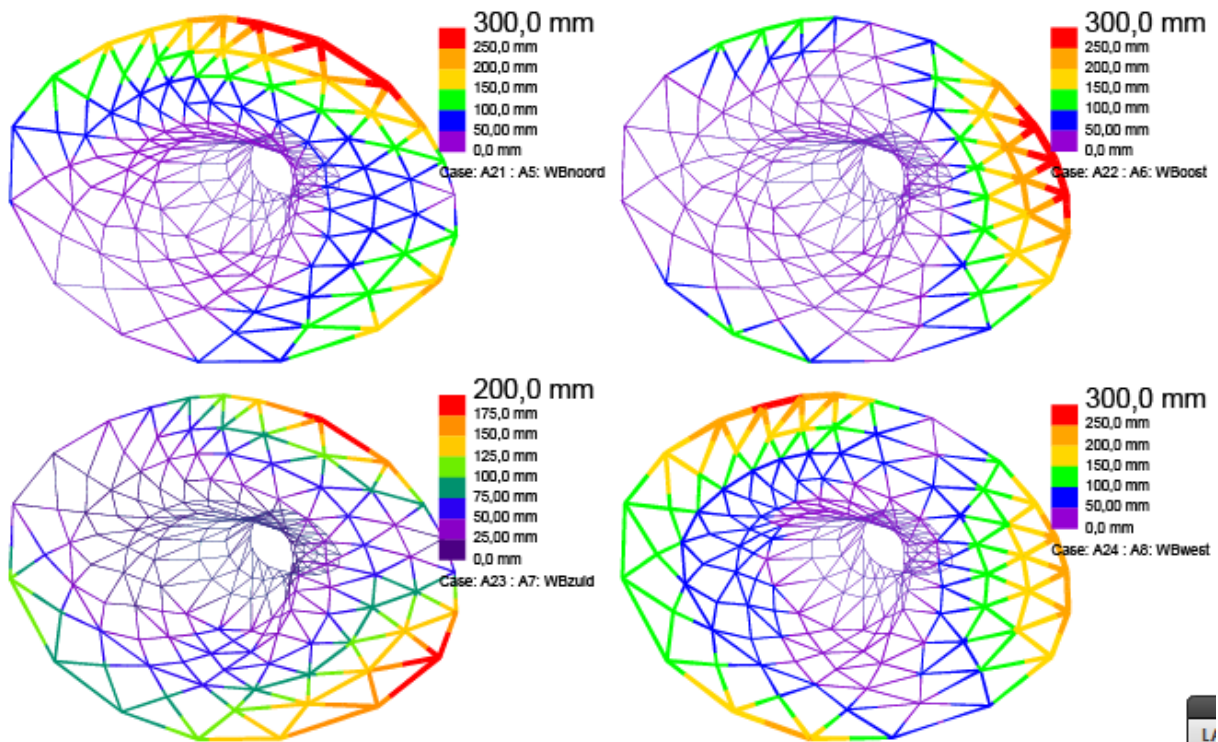
Tabel 6 – Breedte, hoek, vormfactoren en resultante, minst gunstige vormfactor van de vier delen

Voor de globale berekening is het gemiddelde van deze waarden genomen om meer verder te rekenen:  $c_i = 0,87$ .

Nu  $c_i$  bekend is, kan de representatieve windkracht uitgerekend worden:  $0,94 \text{ kN/m}^2$ . De oppervlakte van de constructie waar de wind op aan kan grijpen is  $1790 \text{ m}^2$ . De totale lengte van de staven is  $1200 \text{ m}$ . Er zal dus  $1,4 \text{ kN/m}$  aan windkrachten op elke staaf komen te staan.

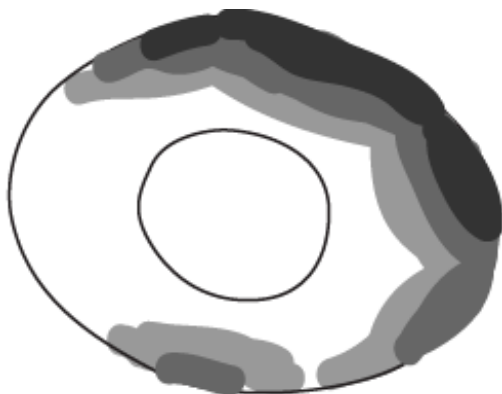
## 9.1 VOORONDERZOEK

Voor het optimaliseren van de constructie naar de windbelasting, zal er niet meer gekeken worden naar de locaties van de knooppunten, dan wel het toevoegen van staven. Dit omdat de wind een variabel gegeven is. Nu zullen de profielen van de constructie nader onderzocht worden. Als eerste wordt er gekeken naar de constructie, als geoptimaliseerd naar het eigen gewicht. Hier worden de doorbuigingen door de verschillende windrichtingen, dus de mogelijkheden hoe de wind kan aangrijpen op de constructie berekend.



Figuur 48 – Doorbuiging door de vier windrichtingen.

Alleen de doorbuiging door de zuidelijke wind voldoet aan de maximale doorbuigings eis. Als er een analyse wordt gemaakt van de plekken in de constructie die de grootste doorbuiging vertonen, is duidelijk te zien dat de constructie wederom het slaptst is daar waar de constructielijn het minst strookt met de ideale krachtsafdracht.



Figuur 49 – Analyse zwakke plekken constructie door de wind.

## 9.2 OPTIMALISATIE CONSTRUCTIE

Om nu de constructie te kunnen optimaliseren, kunnen er verschillende methodes gekozen worden:

- De ringen forser dimensioneren
- De spanten forser dimensioneren
- Alle staven forser dimensioneren
- Daar forser dimensioneren waar de constructie het meeste doorbuigt ('bos bloemen' methode).

Om een keuze te kunnen maken tussen de verschillende methodes, is er een voorwaarde gesteld:

*Het behalen van de maximale doorbuigingseis, door minimale toename van het gewicht.*

De verschillende methodes zijn uitgevoerd, totdat de grootste doorbuiging 200 mm bedraagt. Vervolgens is het gewicht van het geheel berekend. In de tabel hieronder zijn de resultaten op een rij gezet:

| Naam                        | Totalen |                 | $\Delta$ optimalisatie EG |                |
|-----------------------------|---------|-----------------|---------------------------|----------------|
|                             | M [t]   | $U_{\max}$ [mm] | M [%]                     | $U_{\max}$ [%] |
| Optimalisatie eigen gewicht | 280,4   | 300             | -                         | -              |
| Ring forser                 | 557,5   | 200             | 198,8                     | 66,7           |
| Spanten forser              | 427,7   | 200             | 152,5                     | 66,7           |
| Alle staven forser          | 367,0   | 200             | 130,9                     | 66,7           |
| 'Bos bloemen' methode       | 342,6   | 200             | 122,2                     | 66,7           |

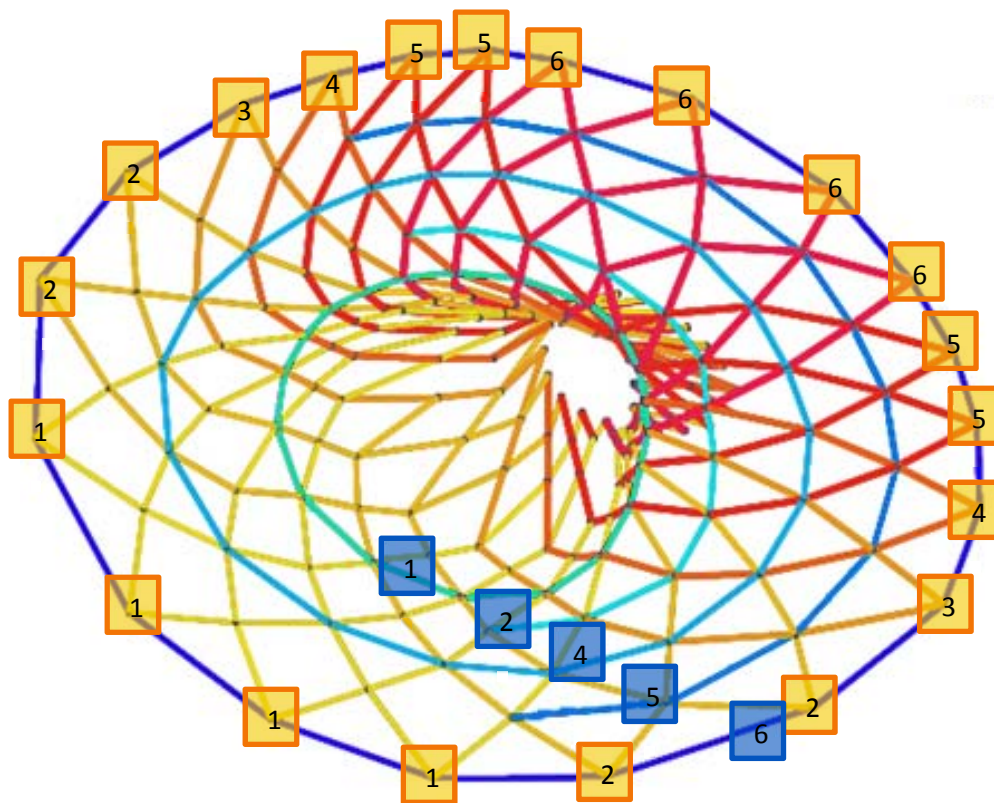
Tabel 7 – Resultaten doorbuiging en toename in gewicht.

Met de voorwaarde voor minimale gewichtstoename, zal de optimalisatie naar de 'bos bloemen' methode verricht worden.

Nu de methode bekend is, zal de werking van deze nader uitgelegd worden. Zoals eerder vermeld, worden de staven daar forser gedimensioneerd waar de constructie het meest doorbuigt. Dit geldt zowel voor de spanten als de ringen. In de noordoostelijke hoek van de constructie is deze het slapst. Daar zullen de spanten de grootste diameter krijgen. Hoe meer we de lijn volgen naar het sterkere deel, hoe slanker de profielen worden.

Voor de ringen is een zelfde wijze van optimalisatie uitgevoerd: de constructie is aan de buitenkant slapper dan aan de binnenkant (logisch!). Daarom worden de buitenste ringen forser gedimensioneerd dan de binnenste. Een uitzondering geldt hierbij voor de ring op de bovenste punten van spanten; voor het beeld gaan de staven wel in stappen omhoog (steeds grotere diameter), maar vanwege de belangrijke spanningsfunctie van de ring, worde de wanddikte wel groter.

De constructie is nu als een bos bloemen: de slappere delen hebben grotere leden (grotere diameter) en om de hele bos zitten linten genoopt, zodat het geheel niet uit elkaar valt. Hoe verder de leden (bloemen) uit elkaar willen vallen, hoe grotere linten.



Figuur 50 – Optimalisatie profielen ‘bos bloemen’ methode.

De nummers geven de volgende diameters weer:

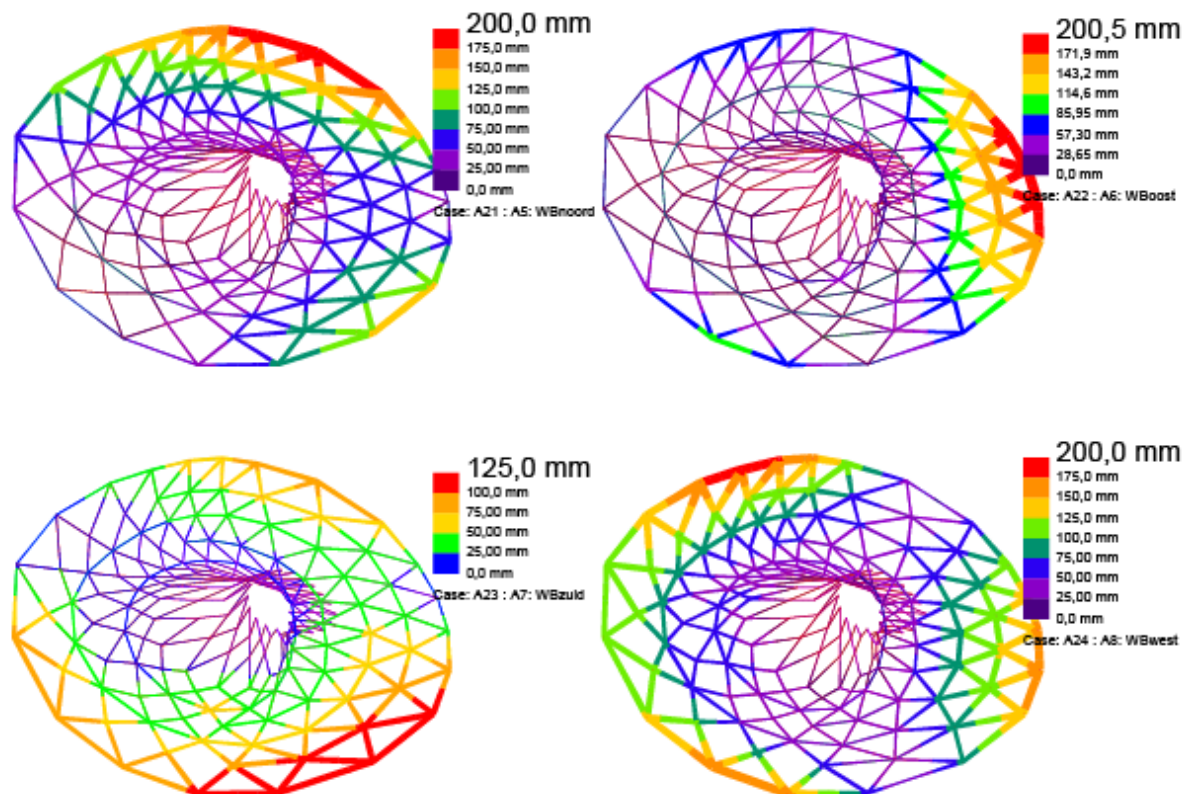
Oranje

1.  $\varnothing = 305 \text{ mm}$ ,  $t = 16 \text{ mm}$
2.  $\varnothing = 330 \text{ mm}$ ,  $t = 16 \text{ mm}$
3.  $\varnothing = 386 \text{ mm}$ ,  $t = 16 \text{ mm}$
4.  $\varnothing = 394 \text{ mm}$ ,  $t = 16 \text{ mm}$
5.  $\varnothing = 419 \text{ mm}$ ,  $t = 16 \text{ mm}$
6.  $\varnothing = 445 \text{ mm}$ ,  $t = 16 \text{ mm}$

Blauw

1.  $\varnothing = 305 \text{ mm}$ ,  $t = 16 \text{ mm}$
2.  $\varnothing = 330 \text{ mm}$ ,  $t = 16 \text{ mm}$
4.  $\varnothing = 394 \text{ mm}$ ,  $t = 25 \text{ mm}$
5.  $\varnothing = 419 \text{ mm}$ ,  $t = 17,5 \text{ mm}$
6.  $\varnothing = 445 \text{ mm}$ ,  $t = 17,5 \text{ mm}$

Met deze waarden voor de doorsneden van de staven, wordt de maximale doorbuigingseis van 200 mm behaald.

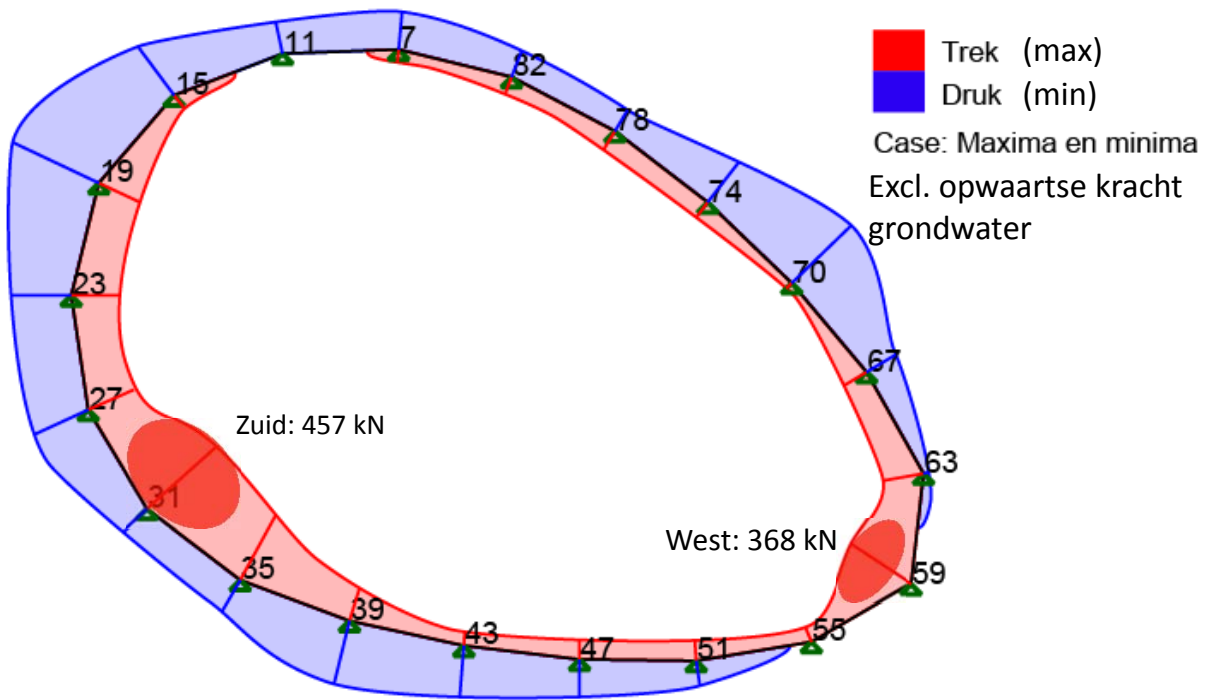


Figuur 51 – Doorbuiging door de wind na optimalisatie profielen.

#### Controle: oplegreacties

Als eerder genoemd, moet er gekeken worden of er trek in de fundering zal optreden. Als dit het geval is, is het wenselijk dat dit voorkomen wordt. Trek in de fundering is niet gunstig. Een kostbare methode is om trekpalen in het funderingsplan op te nemen. Meer gangbaar is om extra gewicht aan het gebouw toe te voegen zodat deze trek gecompenseerd wordt.

In het rekenmodel, zijn de opleggingen van de constructie aan de vloeren van de begane grond en de eerste kelderverdieping, gemodelleerd als scharnierende opleggingen. De horizontale krachten kunnen afgevoerd worden aan deze vloeren. De verticale krachten worden getransporteerd naar de fundering. Als we met deze methode kijken naar welke krachten de wind loslaat op de fundering, krijg je het volgende schema:



Figuur 52 – Optredende krachten in de fundering door de wind.

De zuidelijke wind geeft de grootste trek in de fundering. Ook is deze (samen met de westelijke) de meest maatgevende. Met de waarde van 457 kN wordt dan ook gewerkt. Voor de berekening wordt er van het meest ongunstige geval uitgegaan, de gehele constructie wordt met een kracht van 457 kN omhoog geduwd. Ook de opwaartse kracht van het grondwater speelt hierin mee. De grondwaterstand in Amsterdam varieert van 0,5 tot 1 m onder NAP (Waternet, Onbekend). De waarde van 0,5 wordt hier voor de berekening genomen. Het volume grondwater dat deze constructie omhoog wil duwen is  $3100 \text{ m}^3$ . De druk die het uitoefent is  $9,71 \text{ kN/m}^3$ . Dit maakt een totale opwaartse druk van  $30100 \text{ kN}$ . De maximale trek die op kan treden in de constructie door de wind is 457 kN. Dit maakt dat de totale maximale trek  $30557 \text{ kN}$  is.

De totaal meewerkende oppervlakte is  $2850 \text{ m}^2$ . De soortelijke massa van beton is  $25 \text{ kN/m}^2$ . Met een vloer en wanddikte van 45 cm wordt de totaal opwaartse kracht geneutraliseerd.

#### Controle: resonantie

Elk object heeft een eigenfrequentie, ook gebouwen. Dit houdt in dat wanneer het gebouw met deze frequentie in beweging wordt gebracht, het mee gaat trillen (=resoneren) en kan er metaalmoeheid optreden. Uiteraard moet dit voorkomen worden. Ook de wind heeft zo zijn frequenties: het turbulentiespectrum.

Het is bekend dat de wind gebouwen en bruggen in beweging kan brengen. Soms heb je te maken met een bepaalde windsnelheid of frequentie van vlagerigheid bij stormen dat deze een gebouw of brug laten mee resoneren. De eigenfrequentie is dan gelijk aan die van de wind. Het gebouw of de brug gaat dan mee resoneren met de wind. Dit is in de praktijk meermaals voorgekomen. De bekendste, waarbij dit leidde tot destructie van de brug, is de Tacoma Narrows Bridge in de staat Washington bij het plaatsje Tacoma. Dit was een hangbrug van 1,6 km. Door een wind begon de brug te torderen en slingeren. De wind bereikte een vlagerigheid met een frequentie van 0,2 Hz, welke



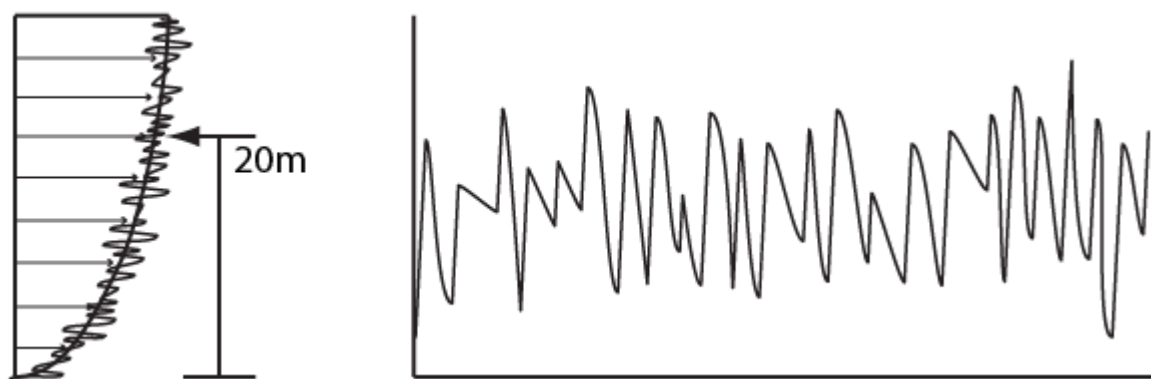
gelijk lag aan die van de brug. Hierdoor begaf de brug het onder de belasting van het resoneren (Irvine, onbekend). Hieronder zijn beelden van het resoneren, zoals dat in de praktijk voor komt, weergegeven (Ryan, 2009).



Figuur 53 – Het resoneren met de wind van de Tacoma Narrows Bridge.

Met behulp van een dynamische berekening kan GSA de eigenfrequenties van de ingevoerde constructie berekenen. De krachten die, behalve het eigen gewicht, op de constructie staan, hebben niets te maken met de eigenfrequentie van het gebouw, vandaar ook de naam eigenfrequentie. De eerste 10 eigenfrequenties voor de constructie zijn: 1,155, 1,394, 1,641, 1,902, 2,034, 2,165, 2,540, 2,802, 3,003 en 3,091 Hz. Hoe lager de frequentie, hoe minder energie er nodig is om de constructie te laten resoneren. De eerste eigenfrequentie (1,155 Hz) is dus de maatgevende.

De wind heeft ook een frequentie. Vooral met een storm en bij turbulente wind wordt deze frequentie van de wind kritiek (lees: draagt veel energie met zich mee). Er is een groot spectrum waarin deze frequenties van de wind voorkomen. Dit heeft te maken met de verschillende windsnelheden, de hoogte boven het maaiveld en richtingen van de wind. Hoe hoger boven het maaiveld de windsnelheden gemeten worden, hoe harder de wind. Deze snelheden lopen niet in een vloeiende lijn, maar kenmerkt zich door een grillig patroon (zie Grafiek 3a). Op iedere specifieke hoogte heeft de wind wel een gemiddelde snelheid, maar verloopt volgens een vlagerigheid (zie Grafiek 3b). (Steenbergen, 2012)



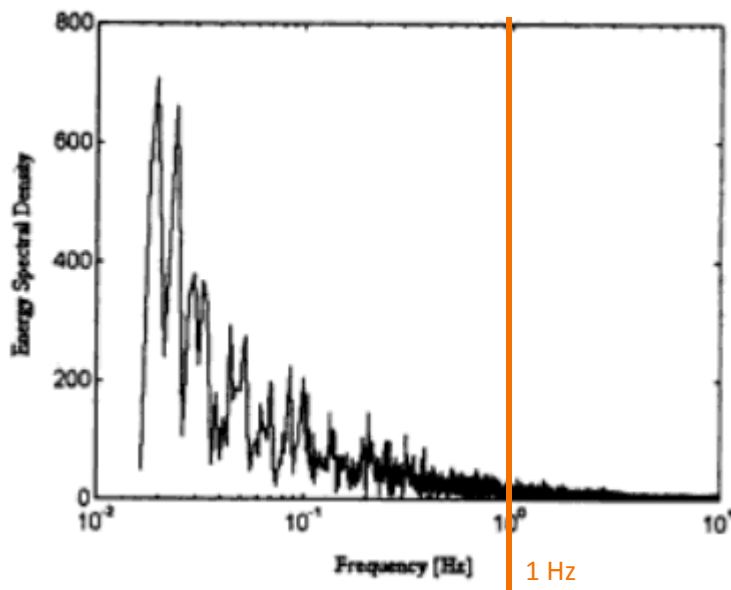
Grafiek 3 – a (links): windsnelheden uitgezet tegen de hoogte, b (rechts): vlagerigheid van de wind over verloop van tijd op hoogte x.



De wind heeft dus pieken en dalen in snelheid en frequentie. Echter hebben deze frequenties in een bepaald spectrum niet allemaal evenveel energie. Hoe minder energie een specifieke frequentie bevat, hoe minder dit dus overgegeven wordt op een object. Uit onderzoek blijkt dat het spectrum van de wind op een hoogte van 15 meter in bebouwd terrein, vooral veel energie bevat bij frequenties onder de 1 Hz:

*“The spectral analysis of the sonic anemometer showed that a significance part of the turbulence energy occurred at spectrum frequencies below 1 Hz.” (Louis Riberio, 1999)*

Hieronder is de grafiek van het spectrum van deze energiedichtheid getoond:



Grafiek 4 – Frequentie van de wind uitgezet tegen het spectrum van de energiedichtheid.

(Louis Riberio, 1999)

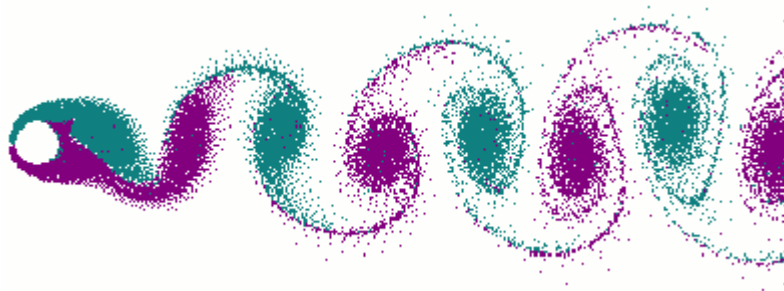
Verder speelt er nog het volgende:

*“Houd er rekening mee dat de turbulentie over het algemeen minder wordt hoe hoger je meet b.v. op 20 m hoogte is de turbulentie minder dan op 10 m. Verder is de ‘skyline’ een belangrijke scheidingslijn tussen stroomgebieden erboven en beneden.” (Stepek, 2012)*

Met behulp van deze informatie en de kennis uit het artikel van de windconferentie (hierboven genoemd), betekent dit dat door de bebouwde omgeving, het natuurlijke frequentiespectrum van een storm en turbulentie ernstig verstoord kan worden. Het gevolg is dat er meer energie gaat naar het ‘herstellen’ naar de natuurlijke frequentie en dus het spectrum van de energiedichtheid kleiner wordt. Dit gegeven is van toepassing op de noordelijke- en oostelijke wind. Vanuit deze richting zal er minder rekening gehouden hoeven worden met resonantie.

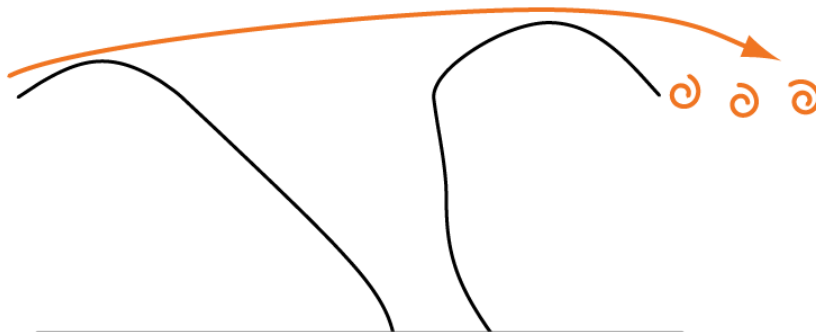
Dan is er nog een tweede eigenschap van de wind op gebouwen waar rekening mee gehouden moet worden; de loslaatfrequentie van de wind. Wind heeft de neiging om een bepaalde tijd aan een gebouw te blijven ‘plakken’ om zich er met een bepaalde frequentie weer van los te laten.

Een bekend voorbeeld hiervan is de Erasmusbrug in Rotterdam. De tuien van de brug begonnen bij bepaalde klimaatomstandigheden (wind vanuit een zekere hoek, snelheid en regen) te klapperen. In dit geval, trad die resonantie dus alleen op wanneer de kabels nat waren. Hierdoor kregen zij een andere eigenfrequentie, waar niet mee gerekend is. De brug deelde geen frequenties met het turbulentiespectrum van de wind. Dempers aan de onderkant van de kabels hebben dit probleem verholpen. Hieronder is geïllustreerd wat er gebeurde (Rosa Siqueira de la, 2005):



Figuur 54 – Loslaatfrequentie van op een cilindervormig object.

Hoe hoog deze frequentie is, heeft te maken met de vorm van het gebouw, geïllustreerd in Figuur 55. (Steenbergen, 2012)



Figuur 55 – Het resultaat van de loslaatfrequentie van de wind aan het gebouw.

Deze loslaatfrequentie kan berekend worden met de volgende formule:

$$n_s = \frac{S_t \times \bar{u}}{b} \text{ [Hz]} \quad [15]$$

waarbij:

$S_t$  = Strouhalnummer

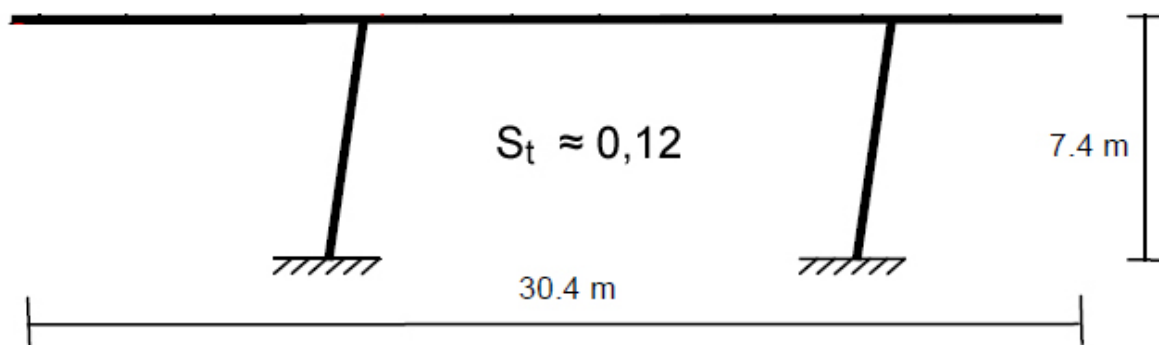
$\bar{u}$  = nominale windsnelheid [km/h]

$b$  = breedte van het gebouw [m] = 50 m

*“For a given cross-sectional shape, the frequency of vortex shedding,  $n_s$ , is proportional to the approaching flow speed, and inversely proportional to the width of the body. It may be expressed in a non-dimensional form, known as the Strouhal number,  $St$ .” (Holmes, 2001)*

Om het Strouhalnummer van een gebouw te kunnen bepalen, worden er testen uitgevoerd in een windtunnel. Als dit niet mogelijk is, kan er gerekend worden met een al eerder berekend Strouhalnummer van een (nagenoeg) gelijke gebouwworm. In mijn geval moet de gelijkenis gezocht worden in een structuur met aan twee zijden een uitkraging, die verhoudingsgewijs even gelijk zijn.

De gebruikte waarde betreft die van een brug, hieronder weergegeven. (Bessason & Thór Snaebjörnsson, 2008)



Figuur 56 – Berekend Strouhalnummer van een brug.

De verhoudingen van de brug, is vergelijkbaar met het ontwerp. De brug staat op kolommen (verticale lijnen) met een gesloten wegdek (horizontale lijn). Dit lijkt dus zeer sterk op mijn constructie: open structuur kolom en afgesloten dak. De waarde van 0,12 kan dus voor de berekeningen van de ontwerpfase gebruikt worden.

De volgende waarde die uitgerekend moet worden is de nominale windsnelheid ( $v_m = \bar{u}$ ).

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_0(z) \times v_b [m/s] \quad [16]$$

waarbij:

$c_r$  = ruwheidsfactor  
 $c_0$  = orografiefactor = 1,0  
 $v_b$  = basiswindsnelheid [m/s]

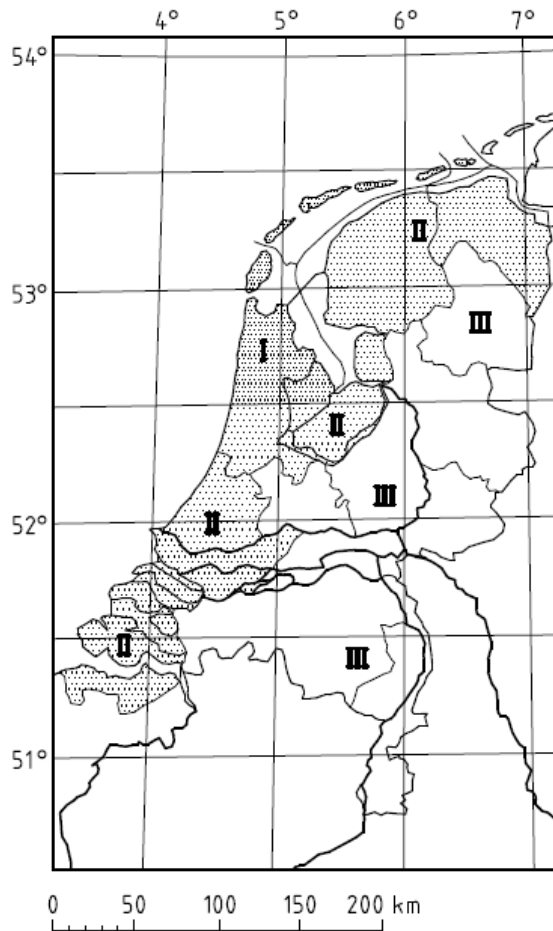
$$v_b = c_{dir} \times c_{season} \times v_{b,0} [m/s] \quad [17]$$

waarbij:

$c_{dir}$  = windrichtingsfactor = 1,0  
 $c_{season}$  = seizoenfactor = 1,0  
 $v_{b,0}$  = fundamentele waarde basiswindsnelheid [m/s]

Deze waarde voor de windrichting- en seizoenfactor zijn genomen uit de nationale bijlage van de NEN norm 1991-1-4.

De fundamentele waarde voor de basiswindsnelheid kan verkregen worden uit de volgende afbeelding (NEN, 2011):



Figuur 57 – Indeling van Nederland in windgebieden.

Amsterdam ligt in gebied I, waarbij een waarde van 29,5 m/s voor de fundamentele waarde voor de basiswindsnelheid hoort.

De waarde voor de basiswindsnelheid is 29,5 m/s.

De ruwheidsfactor is een waarde die de invloed van het ruwheid en mate van de bebouwing van het terrein op de wind weerspiegelt.

$$c_r(z) = k_r \times \ln(z/z_0) \text{ voor } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad [18]$$

waarbij:

- $k_r$  = terreinfactor
- $z$  = gebouwhoogte [m]  $\approx 18,0$  m
- $z_0$  = ruwheidslengte [m] = 0,3 m, zie Tabel 8, gebied III
- $z_{\min}$  = minimale hoogte [m] = 5 m zie Tabel 8, gebied III
- $z_{\max}$  = maximale hoogte [m] = 200 m

De waardes zijn weergegeven in Tabel 8 op de volgende pagina (NEN, 2007).

| Terreincategorie                                                                                                                                                                       | $z_0$<br>m | $z_{\min}$<br>m |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------|
| 0 Zee of kustgebied met wind aanstromend over open zee                                                                                                                                 | 0,003      | 1               |
| I Meren of vlak en horizontaal gebied met verwaarloosbare vegetatie en zonder obstakels                                                                                                | 0,01       | 1               |
| II Gebied met lage begroeiing als gras en vrijstaande obstakels (bomen, gebouwen) met een tussenruimte van ten minste 20 obstakelhoogtes                                               | 0,05       | 2               |
| III Gebied met regelmatige begroeiing of gebouwen of vrijstaande obstakels met een tussenruimte van ten hoogste 20 obstakelhoogtes (zoals dorpen, voorstedelijk terrein, blijvend bos) | 0,3        | 5               |
| IV Gebied waar ten minste 15 % van de oppervlakte is bedekt met gebouwen met een gemiddelde hoogte boven 15 m                                                                          | 1,0        | 10              |
| De terreincategorieën zijn toegelicht in A.1.                                                                                                                                          |            |                 |

Tabel 8 – Terreincategorieën en terreinparameters.

Om te terreinfactor te berekenen is de volgende formule nodig:

$$k_r = 0,19(z_0/z_{0,II})^{0,07} \quad [19]$$

waarbij:

$z_{0,II} = 0,05 \text{ m}$  = ruwheidslengte gebied II, zie Tabel 8

Deze waarde maken:

$$k_r = 0,19(0,3/0,05)^{0,07} \approx 0,22 ;$$

$$c_r = 0,22 \times \ln(18/0,3) \approx 0,88 \text{ voor } 5 \leq 18 \leq 200 \text{ m};$$

$$v_m = 0,88 \times 1,0 \times 29,5 \approx 26,0 \text{ m/s} = 93,6 \text{ km/h}.$$

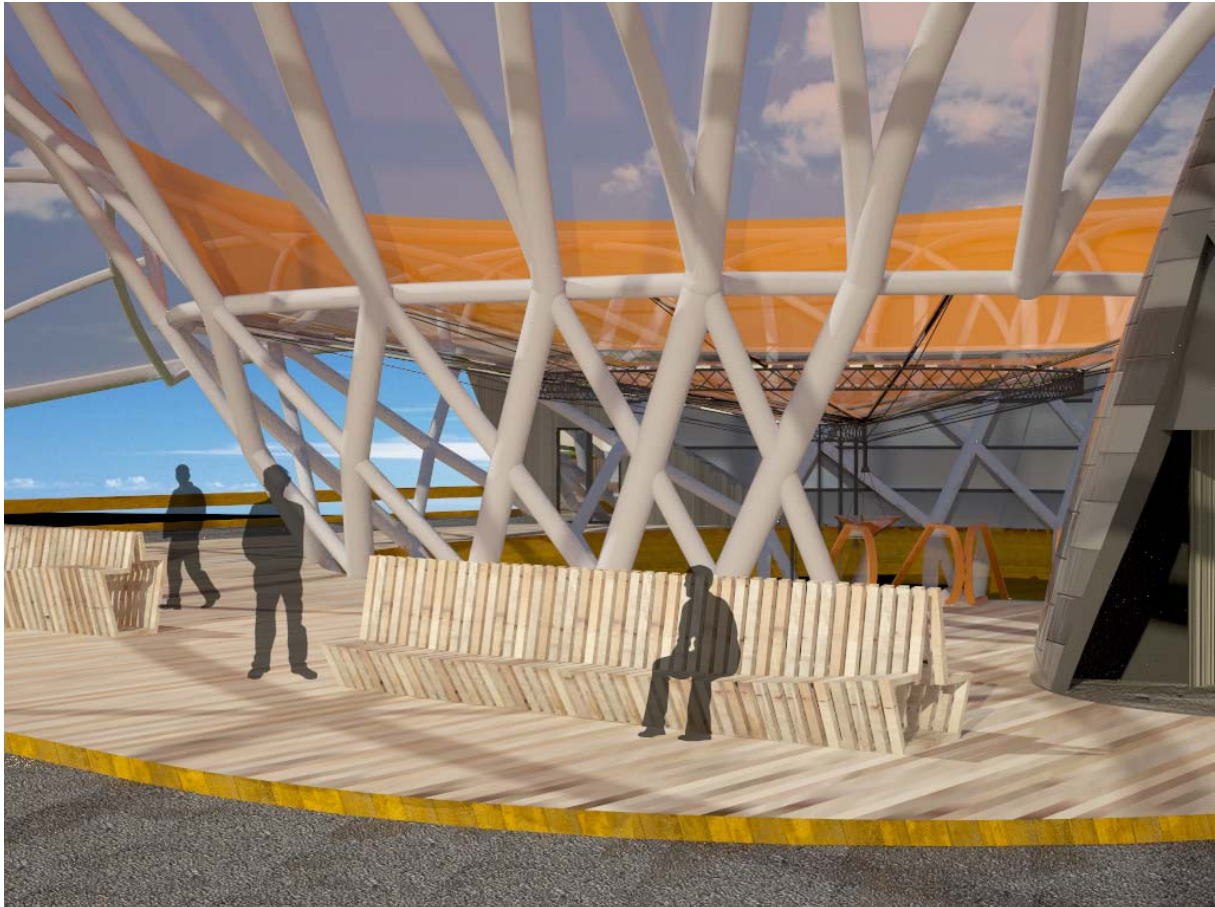
Nu deze waarde bekend is, kan de loslaatfrequentie berekend worden:

$$n_s = (0,12 \times 93,6)/50 \approx 0,22 \text{ Hz}.$$

De waarde van 0,22 Hz ligt ver beneden de eerste eigenfrequentie (1,155 Hz). Er hoeven naar aanleiding van de resonantie met de wind dus geen aanpassingen gedaan te worden.

### 9.3 CONCLUSIE OPTIMALISATIE WIND

Door een methode toe te passen die alleen gewicht toevoegt (lees: staven forser dimensioneren) daar waar de constructie dit nodig heeft, kan met minimale gewichtstoename een aanzienlijk sterkere constructie gerealiseerd worden. Het variëren van de staafdiameters geeft in het beeld ook een extra dimensie aan het geheel.



Figuur 58 – Geoptimaliseerde profielen in architectonisch beeld.

Met een paraplu-vormige constructie moet goed rekening gehouden worden met de wind. De wind kan op vele manieren aangrijpen op de constructie. Er moet tevens verder gekeken worden dan alleen de krachten die op de constructie komen te staan. Ook het berekenen van het doorvoeren van deze krachten naar de fundering is van belang. Trek in de fundering moet voorkomen worden. Verder mag de constructie op geen enkele wijze gaan mee resoneren met de wind. De eigenfrequentie mag niet gelijk zijn aan het turbulentiespectrum en de loslaatfrequentie. In dit geval ging dit in een keer goed. Was dit niet het geval, dan moet er gekeken worden naar het toevoegen van gewicht of dempers.

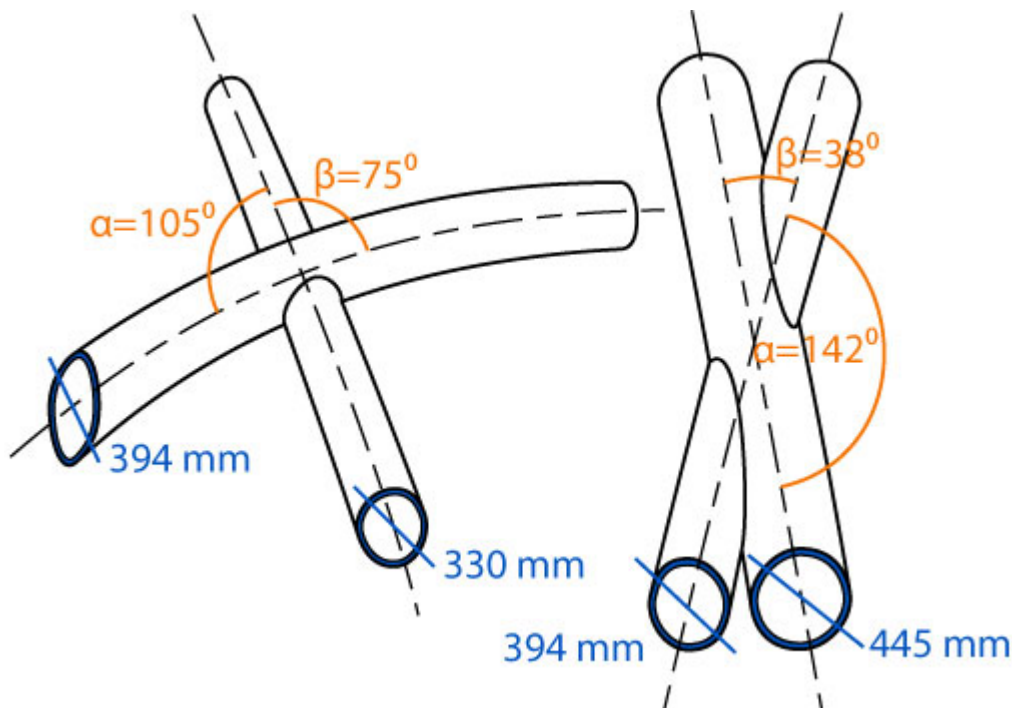
## 10. DETAILLERING

Om te bepalen hoe de knooppunten worden gedetailleerd, zijn er een aantal zaken van belang:

- Wat zijn de lastige punten in het detail?
- Hoe wordt het geheel opgebouwd?
- Hoe kan er voor gezorgd worden dat de opbouw op de werkplaats zo simpel mogelijk blijft?

Het antwoord op deze drie vragen moeten er voor zorgen dat er een generieke constructiemethode ontstaat.

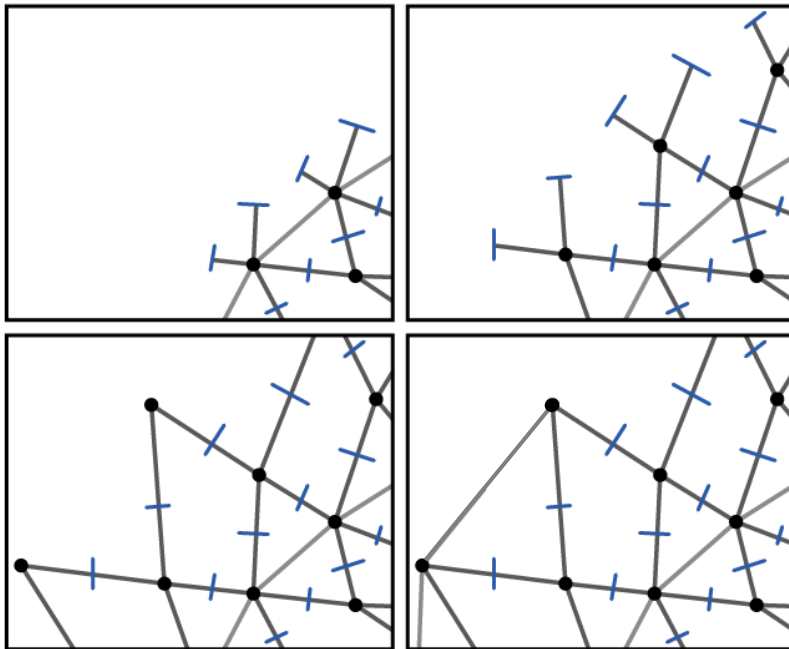
Voor het eerste punt moet er voornamelijk rekening gehouden worden met het kruizen van de staven. Bij iedere knoop komen er staven bij elkaar die iedere keer verschillende hoeken met elkaar maken en veelal andere diameters hebben.



Figuur 59 – Twee verschillende knopen, andere hoeken en verschillende diameters.

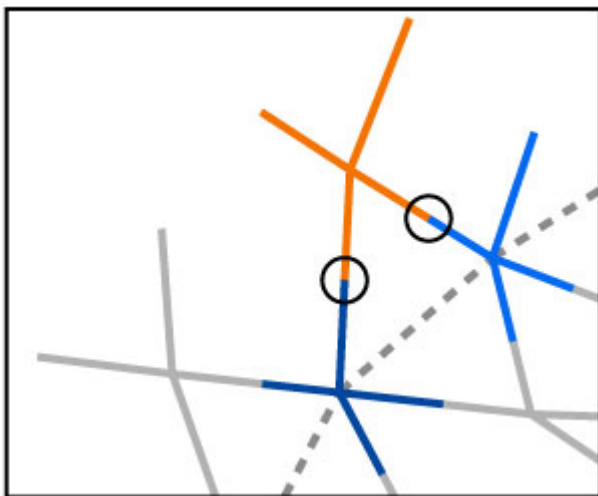


Om al deze staven tot één geheel te monteren, zal er een methode ontwikkeld moeten worden die generiek is voor iedere (verschillende) knoop. Wanneer de constructie in losse delen wordt gemaakt, kan het precisiewerk fabrieksmatig gemaakt worden en het monteren tot één geheel op de werkplaats. Als de knopen per segment gemaakt worden zou de volgende methode toegepast kunnen worden:



Figuur 60 – Wijze van montage constructie tot één geheel.

Om een dergelijke knoop aan elkaar te koppelen, is het van belang dat dit niet te veel moeite kost op de werkplaats. Als de knopen in segmenten gemaakt worden en de ringen aan de knoop vast zitten, moeten er per knoop drie staven gekoppeld worden. Dit bemoeilijkt de montage. Twee staven koppelen aan twee verschillende knopen, zou een stuk simpeler zijn. Daarom komen in dat geval de ringen in een ander constructief vlak te liggen dan de spanten. Bij een methode waarbij losse knopen en losse staven gebruikt worden, liggen de ringen wel in hetzelfde vlak.



Figuur 61 – Montage van de knopen, met twee koppelpunten.

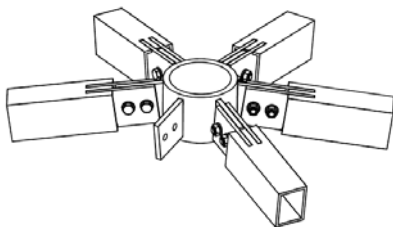
## 10.1 VOORONDERZOEK

Er is gekeken naar bestaande en experimentele manieren om een generieke constructiemethode te ontwikkelen. Voor de verschillende, eerder gestelde vragen, is er onderzoek gedaan. Per deel zal er een beschrijving volgen.

### Lastige punten detail

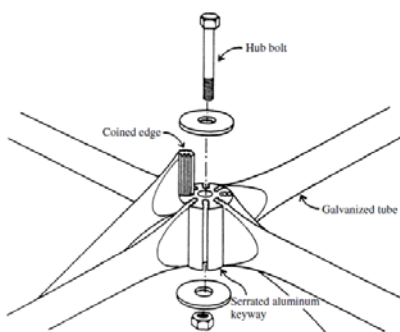
Er zijn een hoop bestaande manieren om dergelijke knopen te fabriceren. Er zal een beschrijving van deze methodes volgen van meest gangbaar naar meest experimenteel.

Voor complexe constructies zijn er verschillende details op de markt. Vaak zijn deze zo ontworpen dat het detail grotendeels gelijk is, met per knooppunt kleine aanpassingen. Twee methodes die toepasbaar kunnen zijn op de ontworpen, geoptimaliseerde constructie, zijn de *splice connector* en de *triodetic*. Deze hebben beide de eigenschap dat er gemakkelijk verschillende hoeken gemaakt kunnen worden en hebben de mogelijkheid tot koppelen van staven met andere diameters.



De *splice connector*, de POLO-1, bestaat uit de knoop waaraan de staven worden bevestigd, uit een holle cilinder. Hierbij worden er aan de cilinder platen bevestigd. Ook aan het uiteinde van de staaf worden twee platen bevestigd. Deze worden in elkaar geschoven en vervolgens vast gebout met een of meerdere bouten. (Stephan, et al., Onbekend)

Figuur 62 – POLO-1 *splice connector*.



De *triodetic* is speciaal voor ronde buizen. De knoop is in feite een dikwandige buis, waarin sleuven gefreesd zijn. Deze sleuven kunnen computergestuurd precies onder de goede hoek ingezet worden. De ronde staven zijn aan het uiteinde plat gedrukt zodat zij in de sleuven geschoven kunnen worden. Als alle buizen in de knoop geschoven zijn, worden de boven- en onderkant afgesloten met twee platen die vervolgens vastgezet worden met een boutverbinding. (Lan, Onbekend)

Figuur 63 – *Triodetic*.

Een tweede methode is er een die al eeuwen oud is: gieten. De individuele knopen kunnen in was uitgeprint worden middels *rapid prototyping*. Het wasmodel wordt ingesmeerd met, in vloeibare staat zijnde, porselein. Deze hardt uit en zorgt voor een gladde afwerking van het eindproduct. Het geheel wordt in een grote bak met zand geplaatst. Op het moment dat dit verhit wordt, smelt de hars uit het model. Nu is er een mal ontstaan. Hierin wordt het staal gegoten. Als het staal volledig is uitgehard, kan de koop uit het zand gehaald worden. Vervolgens wordt het porselein met een hamer van het staal afgeslagen en gepolijst. (Goolen, 2008)



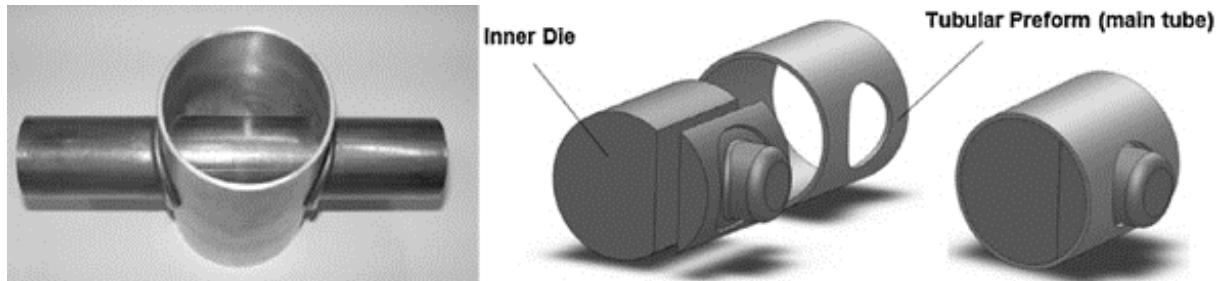
Figuur 64 – Gietstukken van een complexe knoop.

Een andere, relatief nieuwe methode, is *computer aided manufacturing*. Door de input van het computer gegenereerde model, kunnen de buizen van de knopen precies goed afgesneden worden voor een simpele, dus redelijk goedkope, lasverbinding. Een lasersnijmachine snijdt de buizen met de goede hoeken en rondingen van de diameter van de andere buis af. Er kunnen zelfs sleuven in de buizen gefreesd worden om de buizen als het ware in elkaar te klikken, zodat de ze precies goed op elkaar aan sluiten.



Figuur 65 – V.l.n.r.: laser snijder, in elkaar zetten staven tot knopen, hulp montage.

Als laatste is er nog een zeer experimentele methode, genaamd druklassen. Deze methode is speciaal ontwikkeld om buizen van verschillende diameters met elkaar te verbinden, zonder lassen. Het idee van deze methode is dat er een grote, axiale kracht op de 'koppelbuis' wordt gezet, welke omsloten is door een binnen- en buitenmal. Door de kracht zodanig te vergroten, ontstaan er flenzen aan de 'koppelbuis' die de hoofdbuis omsluiten. Voor de knooppunten worden binnen en buiten mallen gemaakt, die het proces begeleiden. (Alves & Martins, 2012)

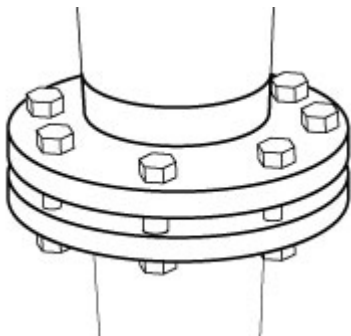


Figuur 66 – Druklassen met binnen en buitenmal.

#### Opbouw constructie

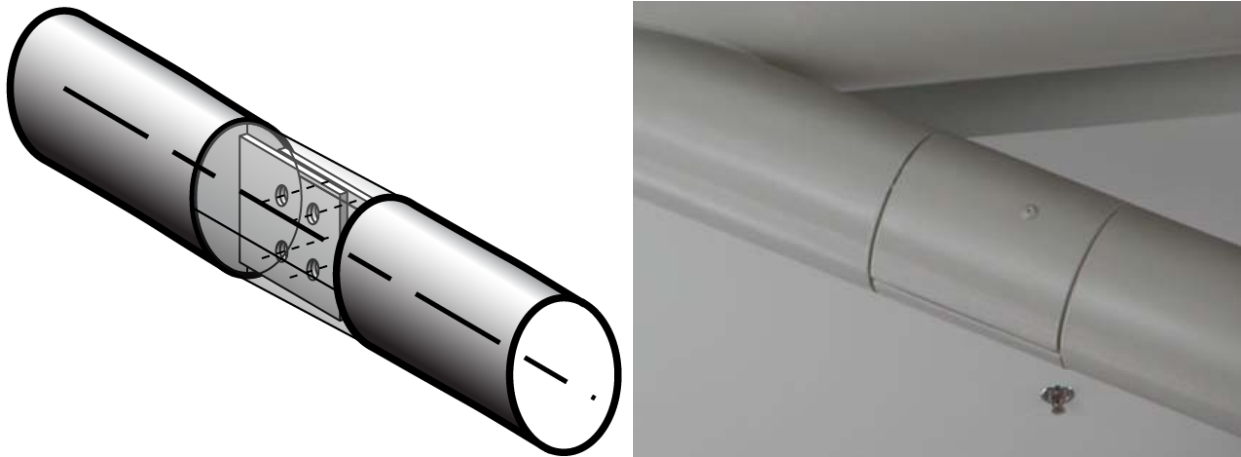
Wanneer er voor een bestaand constructiedetail gekozen wordt, zoals de *splice connector* en de *triodectic*, komen de losse knopen en staven op de werkplaats aan. Door middel van handige, efficiënte nummering, wordt het geheel in elkaar gezet. Wanneer er segmenten van de constructie gemaakt worden, bij de andere koppelsystemen, komen deze aan als spinvormige elementen. Deze losse *kruizen* kunnen op verschillende manieren aan elkaar gekoppeld worden.

De meeste gebruikte methode voor koppelden van buizen in elkaars verlengde, is door middel van aangelaste platen. Een van de manieren om dit te bewerkstelligen, is zoals ook een gasbuis verlengt wordt.



Figuur 67 – Verbinding als bij gasleidingen.

Op het moment dat deze lasplaten, en dus de koppeling van deze buizen naadloos in elkaar over moeten gaan, wordt er voor een andere verbinding gekozen. Hierbij worden er eindplaten op de buizen gelast en vervolgens flenzen op bevestigd. Deze kunnen op de bouwplaats met elkaar verbonden worden middels bouten. De verbinding wordt afgesloten met twee halve *sierbuizen*.



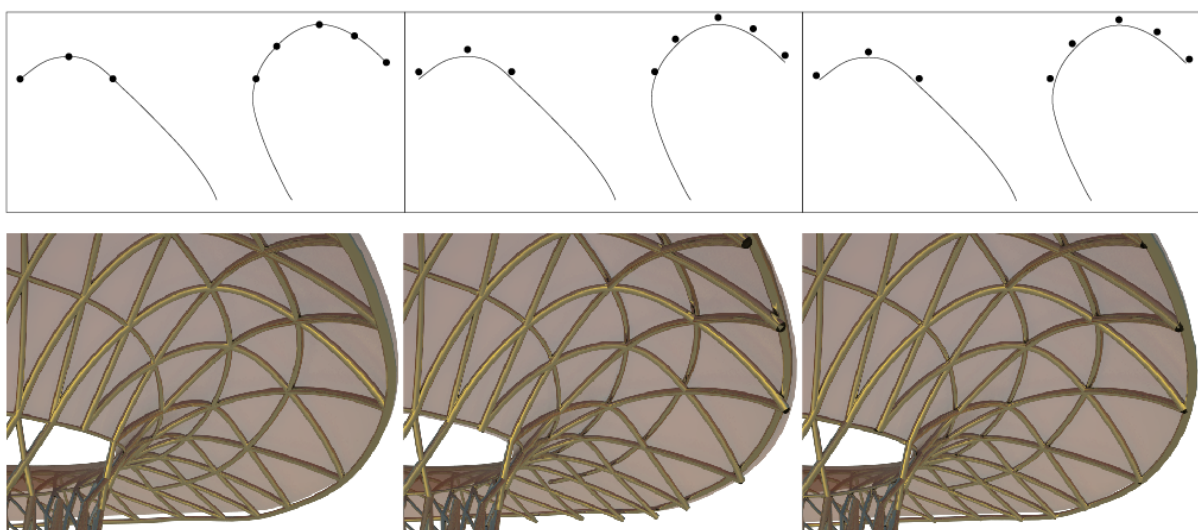
Figuur 68 – Links: montage segmenten, rechts: resultaat afwerking (Boake, 2012).

#### Eenvoudige montage

Ieder knooppunt hebben allen vier aansluitingen met de spanten. Een deel van de knooppunten hebben een extra aansluiting met de ringen. In de plaatsing van deze ringen zijn er (in het dak) zijn er drie mogelijkheden, afhankelijk van de constructiemethode voor het knooppunt:

- De ringen komen in hetzelfde vlak als de spanten;
- De ringen komen in het vlak recht boven of onder de knopen van de spanten;
- De ringen komen in het vlak loodrecht op of onder de knopen van de spanten.

Het nadeel van de ringen in een ander constructief vlak als de spanten, is de doorvoer van de krachten. In het geval dat de ringen in een ander constructief vlak ontworpen worden, moet een goede koppeling tussen beide plaats vinden.

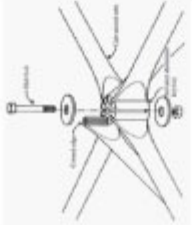
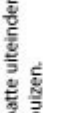
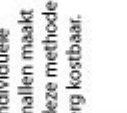
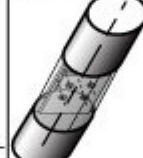
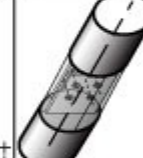
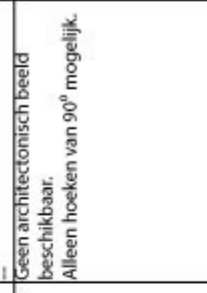


Figuur 69 – Methodes montage ringen, v.l.n.r.: ringen in hetzelfde constructieve vlak als de spanten, ringen recht boven de spanten, ringen loodrecht boven de spanten (in de lokale z-as).



## 10.2 KEUZE METHODES

Om een overzichtelijke multicriteria-analyse te kunnen maken, zijn alle onderdelen in een tabel gezet. Ook is er waardes per een onderdeel gegeven: ++ zeer goed, + goed, o neutraal, - slecht en -- zeer slecht. De totaalscores zijn bij elkaar opgeteld en kan er een keuze gemaakt worden. De grootste waarde wordt gehecht aan een methode waarbij de knopen eenvoudig te monteren zijn en binnen enige kosten-redelijkheid valt, in combinatie met het gewenste architectonische beeld.

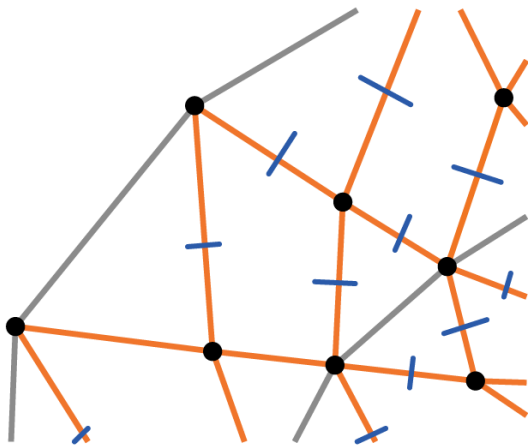
| Methodes                             | Opbouw                                                                                | Ringen                                                                                | Geschiktheid                                                                          | Montage knopen                                                                        | Architectuur                                                                          | Architectonisch beeld                                                               | Totaal                                                                                                                 |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bestaande knopen<br>splice connector |    |    |    |    |    |    | ++<br>Goede mogelijkheid, wel verstoord architectonisch beeld.                                                         |
| tridetic                             |    |    |    |    |     |    | o<br>Lastig met verschillende diameters en verstoord architectonisch beeld.                                            |
| Unieke knopen<br>gieten              |    |    |    |    |    |    | ++<br>Zeer dure methode vanwege mal unieke knopen. Wel gewenst architectonisch beeld.                                  |
| laser snijden                        |  |   |  |   |   |   | ++<br>Goed mogelijke methode. Gewenst architectonisch beeld. Nadeel: ringen in ander constructief vlak, wel oplosbaar. |
| druklassen                           |  |  |  |  |  |  | --<br>Gewenste vrijheid knopen niet mogelijk met deze methode, nog te experimenteel.                                   |

Tabel 9 – Multicriteria-analyse verschillende methodes.

### 10.3 CONCLUSIE DETAILLERING

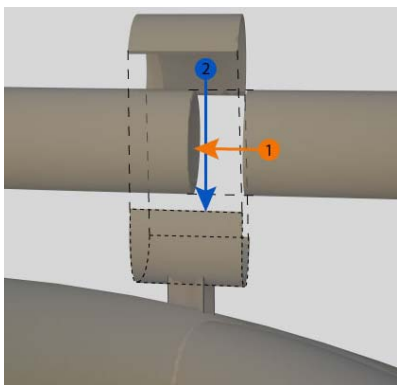
De methode lasersnijden, is als beste uit de multicriteria-analyse gekomen. De precies op maat gesneden buizen kunnen in de fabriek aan elkaar gelast worden. Nu de methode om de knoop te maken bekend is, kan de detaillering uitgewerkt worden.

Als eerste wordt de hoofddragconstructie gebouwd. De knopen zullen in de fabriek vervaardigd worden. Als losse kruizen zullen de onderdelen op de bouwplaats aankomen als in Figuur 70. Een kruis bestaat uit een knooppunt en vier staven, doorgesneden ter plaatse van de blauwe lijn. Deze lijn is om twee redenen gekozen: de eerste is zodat de knopen zelf makkelijker vervaardigd kunnen worden, de tweede omdat in het midden van de buis over het algemeen de momenten het kleinst zijn en dus het makkelijker te monteren is. De knoop, bestaande uit vier staven, wordt met de lasersnijder op maat en met de goede curve afgeslepen en vervolgens aan elkaar vast gelast.



Figuur 70 – Delen constructie.

Aan de constructie zullen in de fabriek flenzen gelast worden, ook gesneden met de lasersnijder. Deze zijn voor de aansluiting met de gevels en de ringen. Deze flenzen voor de verbinding met de ringen, staan evenwijdig aan de beide spanten. Hierdoor kunnen de spanningen die in de ringen optreden, in twee richtingen overgedragen worden op de spanten. Op de flenzen wordt een schoen gemonteerd. Op de bouwplaats kunnen komen de ringen in onderdelen aan; en lopen van knooppunt tot knooppunt. De uiteinden worden op de schoenen gemonteerd, en afgesloten met de bovenste helft van de schoen. Deze connectie bestaat uit holle wand bouten.



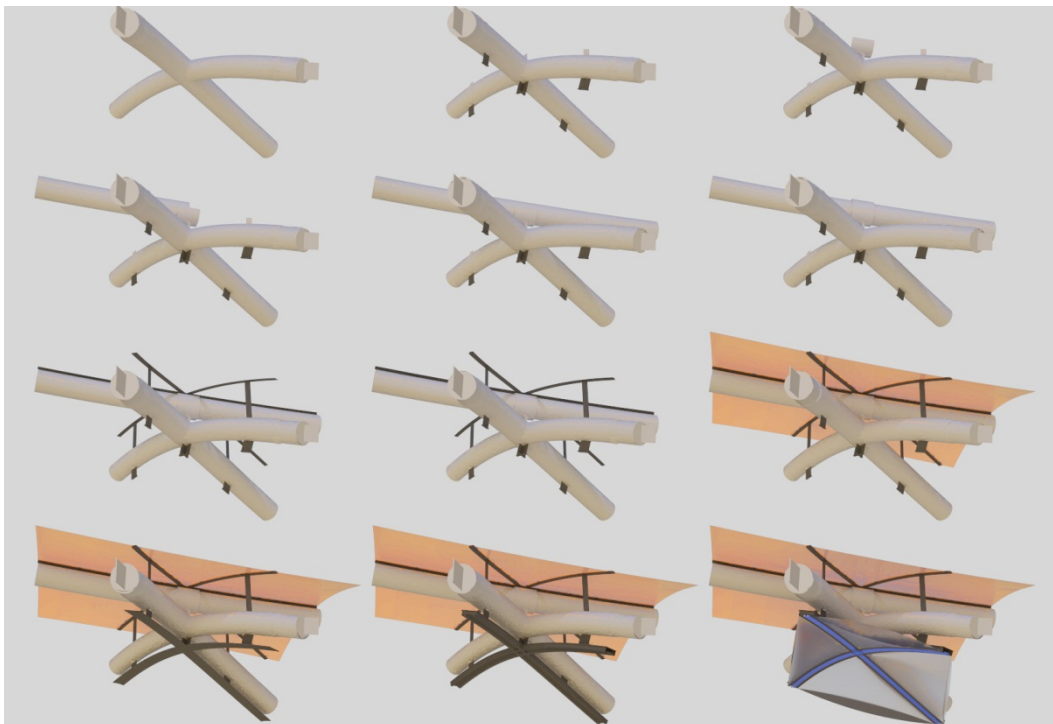
Figuur 71 – Verbinden ringen aan de spanten, buizen worden in de houder geschoven en afgedekt met de andere halve buis. Middels holle wand bouten wordt het geheel bevestigd.



Deze kruizen die de spanten vormen, zullen met het aan elkaar bouten van de aangelaste flenzen gekoppeld worden en vervolgens afgewerkt met twee halve, afsluitende buizen. Door pas op het laatst alle staven aan elkaar vast te zetten, is er meer spelingsruimte tijdens de bouw. Hieronder is het bovengenoemde, van bovenaf en onderaf in stripvorm weergegeven.

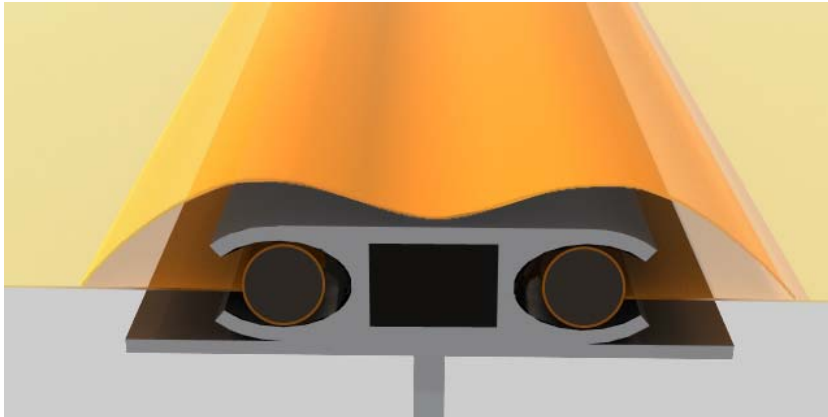


Figuur 72 – Gehele montagevolgorde, van bovenaf gezien.



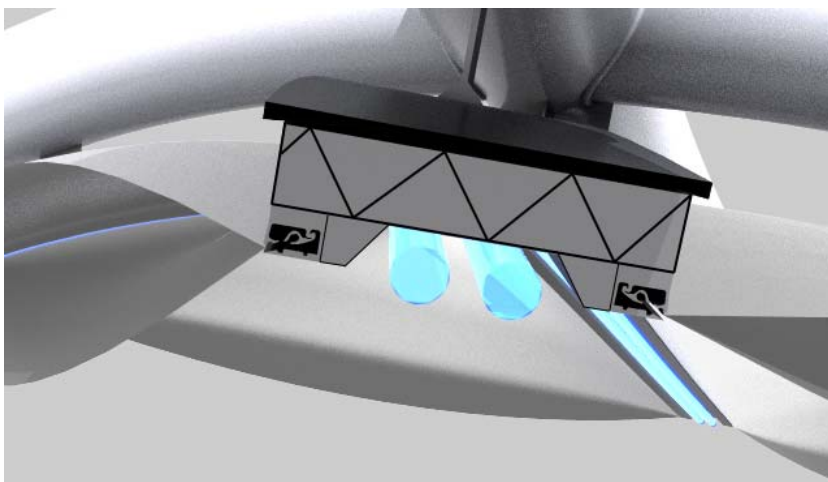
Figuur 73 – Gehele montagevolgorde, van onderaf gezien. V.l.n.r., v.b.n.o.: kruis spanten, flenzen voor montage, onderzijde montage ring, 1<sup>e</sup> deel van de ring, 2<sup>e</sup> deel van de ring, bovenkant montage ring, hulpconstructie dak, profiel dak, in PVC gecoat polymeer, hulpconstructie ETFE kussens, profiel ETFE kussens, ETFE kussens en installaties.

Aan de bovenkant van de gehele constructie wordt een hulpconstructie bevestigd voor het dak. Op deze hulpconstructie worden de profielen voor het in PCV gecoat polymeer gemonteerd, welke er vervolgens in geschoven kan worden. Wanneer de overspanning van de bestaande constructie voor het dak te groot wordt, is er de mogelijkheid extra staven aan te brengen die door hulzen in het textiel te zetten waar staven doorheen geschoven kunnen worden. Op deze manier is er geen extra profiel en hulpconstructie nodig voor het bevestigen en in vorm houden van het dak (Lienhard & Knippers, Onbekend).



Figuur 74 – Montage en detail dak.

Aan de onderkant van de constructie worden ter plaatse van de winkel isolatie in de vorm van ETFE kussens geplaatst. Vanwege de architectonische waarde van de constructie en de minder praktische mogelijkheid van dit soort daken en gevels om verlichting en andere installaties te plaatsen, wordt dit ook opgenomen in de hulpconstructie van de ETFE kussens. De lijnen waarin deze bevestigd worden, lopen gelijk aan de spanten en worden daardoor extra geaccentueerd. De kussens krijgen een hoogte van overspanningslengte/10. Om de hoogte te beperken, zijn er op diverse plaatsen extra hulpconstructies en profielen geplaatst, die de richting van de ringen volgen.



Figuur 75 – Montage en detail ETFE kussens.

Bij een dergelijke complexe constructie, is voor zowel de maakbaarheid als het gewenste architectonische beeld, *rapid prototyping* de oplossing.



## DEEL IV – RESULTAAT

Dit deel zal gaan over het samenvoegen van de architectuur en het bouwtechnologisch onderzoek; het resultaat. Het concept, programma, uitgangspunten, optimalisatie en detaillering zijn allen tot één ontwerp samengevoegd. Dit is allemaal te zien in zowel de 2D als de 3D tekeningen en renders.

### 11. DEFINITIEF ONTWERP

Op de doelstelling, centrale vraag en deelvragen worden hier gereageerd met de tekeningen die ontstaan zijn uit het architectonisch en bouwtechnologisch ontwerpproces. Door eerst antwoord te geven op de deelvragen, kan er gekeken worden naar de centrale vraag, welke de probleemstelling formuleert. De beslissingen die zijn genomen naar aanleiding van deze stelling, zijn van invloed op het al dan niet behalen van de doelstelling.

#### 11.1 BEANTWOORDING DEELVRAGEN

Uit de analyse van Amsterdam Noord, bleek dat het OV-netwerk erg mager is. Door op een strategisch punt een transferium te ontwerpen, kan er een hoogwaardig netwerk gecreëerd worden voor het hele gebied. Door de verschillende verkeerstroomen zo min mogelijk met elkaar in conflict te laten komen, kan een hoge mate van efficiëntie bereikt worden. De stroomen mogen elkaar dus niet te veel hinderen. Het opdelen van het gebouw in lagen, worden de vervoermiddelen onderverdeeld en minimaliseert deze mogelijke conflicten.

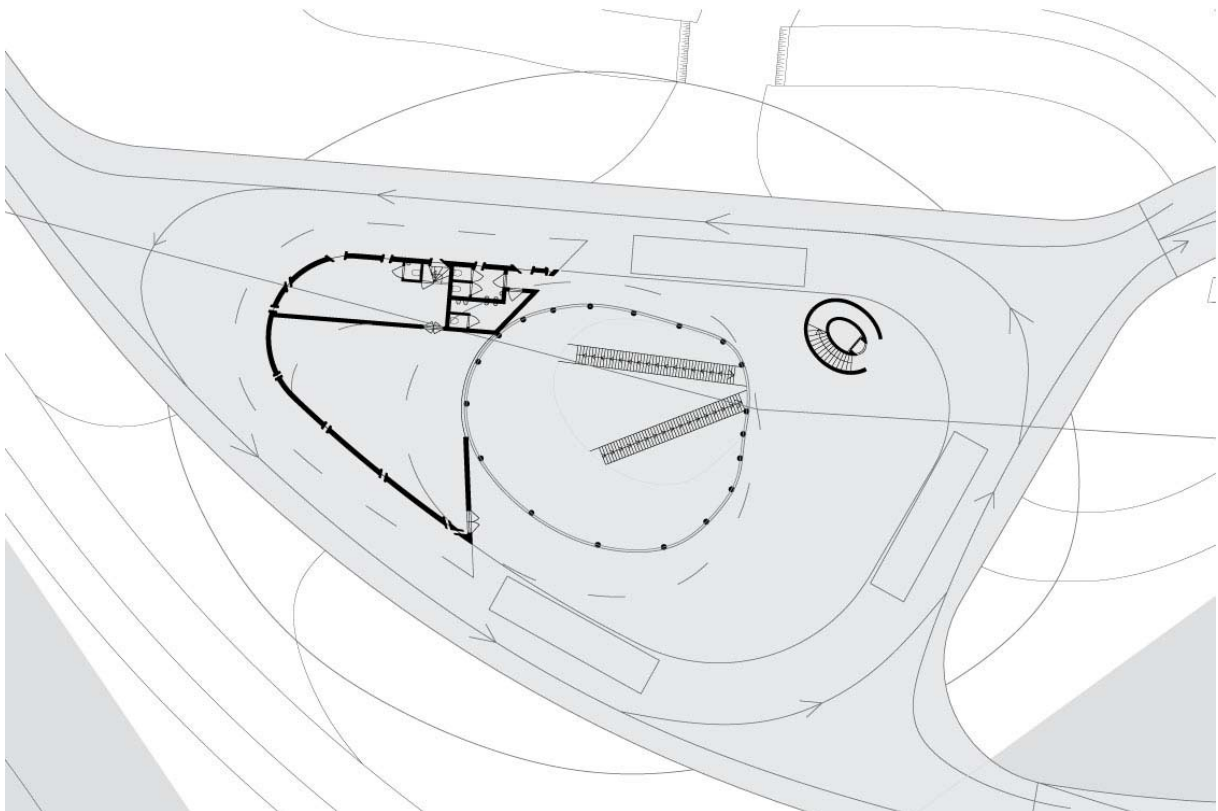
Het strategische punt voor de verkeerstroomen is, als uit de analyse van het gebied bleek, gekozen tegenover het Centraal Station van Amsterdam, aan de andere kant van het IJ. Om een grote doorstroom in te creëren, zijn vier verkeerstroomen opgedeeld in lagen. In het ontwerp resulteert dit in de volgende lagenverdeling:

| Niveau | Verkeerstroom |
|--------|---------------|
| +1     | Bus           |
| 0      | Voetgangers   |
| -1     | Fietsers      |
| -2     | Metro         |

Tabel 10 – Opdeling gebouw per niveau, per stroom.

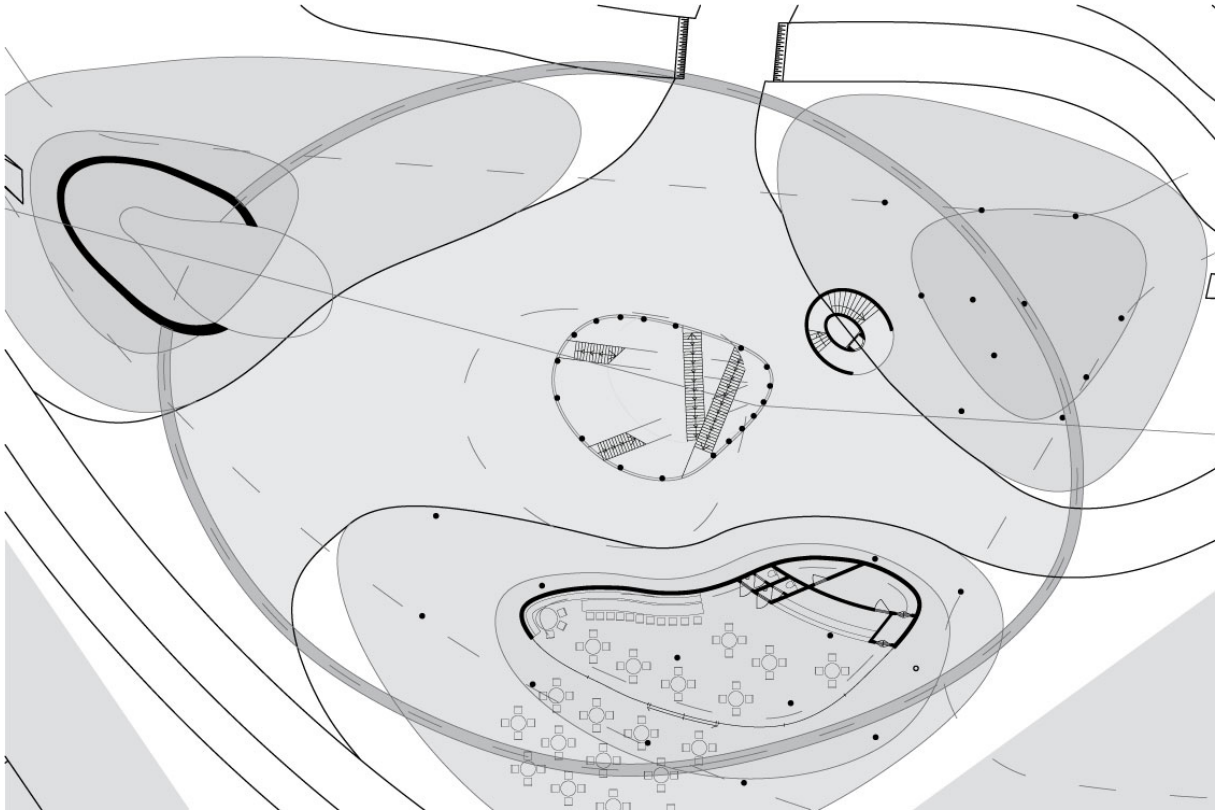
In het midden van iedere plattegrond is ruimte gereserveerd voor voetgangers, welke van en naar andere netwerken overstappen.

Op de eerste verdieping is het busstation gesitueerd. Hier is er ruimte voor drie bushaltes. Door het concept van de rotonde, ontstaan er zes routes: heen en terug naar de drie delen van Amsterdam Noord. Vanuit ieder deel kunnen de bussen naar een van de andere delen of het zelfde deel van het gebied. De planners, die de buslijnen ontwerpen, hebben nu alle vrijheid al naar gelang wat wenselijk is. Verder zijn er een toiletblok ontworpen, voor de vrouwen twee zittoiletten, voor de mannen één zittoilet en twee urinoirs. De rest van het volume aan de westzijde, is ingericht voor een winkel, met aan de noordzijde opslag. Hier is ook een tweede verdieping op ontworpen, voor personeelsruimte. Als laatste is aan de noordoostzijde een lift geplaatst. Deze is zo gelegen, dat deze op iedere verdieping handig in de plattegronden inpast.



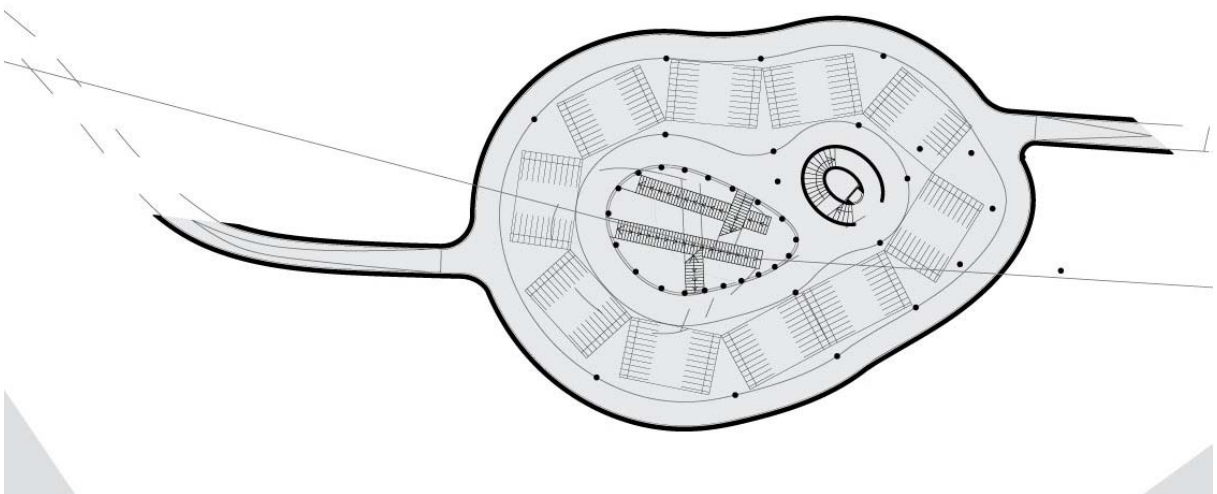
Figuur 76 – 1<sup>e</sup> verdieping, 6 meter boven het maaiveld, minimale verdiepingshoogte: 5 meter. Busstation, winkel, toiletten.

Op de begane grond, op maaiveld niveau, zijn drie entrees voor de voetgangers, allen geaccentueerd door het dak. Op de drie hoekpunten van de busrotonde, is het maaiveld iets verhoogt en voorzien van draagconstructie. De noordzijden zijn 1 meter verhoogt, met aan de oostzijde kolommen en de westzijde een dubbel gekromd vlak van gewapend beton van  $\pm 30$  cm dik. De zuidzijde is 0,5 meter opgetilt in verband met het cafe. De constructie hier bestaat ook uit kolommen.



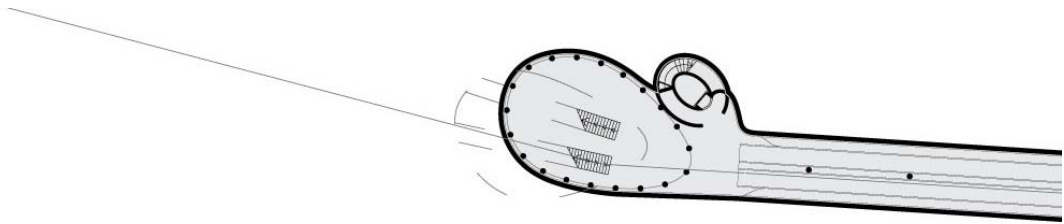
Figuur 77 – Begane grond, gelijk aan het maaiveld, verdiepingshoogte:  $\pm 5$  meter. Entrees voetgangers, P+R, café.

Op de eerste verdieping van de kelder bevindt zich de fietsenstalling. Buitenom loopt het fietspad, midde de stallingen en binnenin is een gebied voor voetgangers met de verticale ontsluiting.



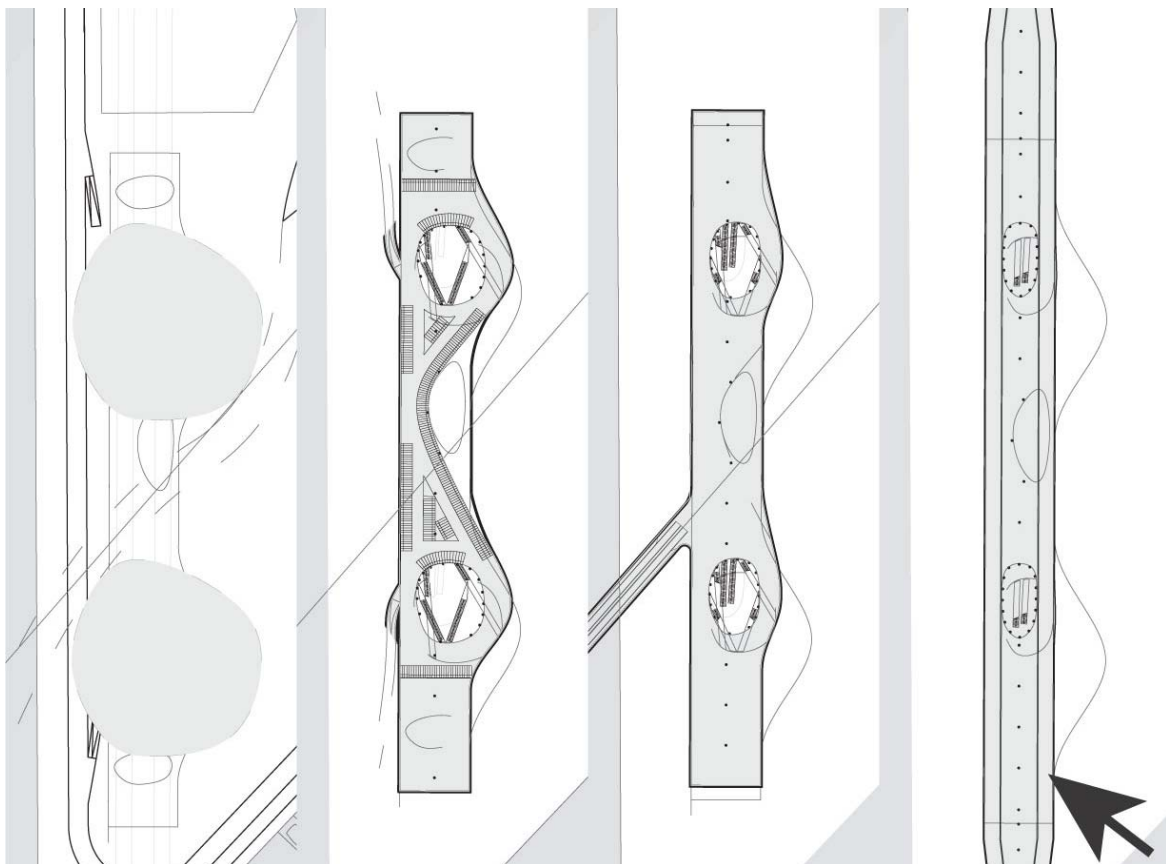
Figuur 78 – 1<sup>e</sup> verdieping kelder, 4 meter onder het maaiveld, verdiepingshoogte: 3,7 meter. Fietsenstalling.

Op de onderste verdieping, het tweede niveau van de kelder, heeft de doorsnede van de constructie een richting gekregen. De punt van de eivormige doorsnede wijst naar de tunnel die naar de metro leidt. Deze is voorzien van loopband vanwege de lengte van de tunnel: 130 meter.



Figuur 79 – 2<sup>e</sup> verdieping kelder, 9,5 meter onder het maaiveld, verdiepingshoogte: 5,2 meter. Tunnel naar metro.

De metrohalte is volgens hetzelfde principe ingedeeld. Op de begane grond bevinden zich de entrees. Dit zijn er twee vanwege de minimale lengte van een metrostation (150 meter). Op eerste verdieping van de kelder bevinden zich de fietsenstallingen. Op niveau -2 bevindt zich de entree vanuit het transferium met de tunnel. Hier is tevens plaats voor winkeltjes e.d. Op -3 (15 meter onder het maaiveld), is de daadwerkelijke halte geplaatst. Dit sluit aan op de diepte van de rails.

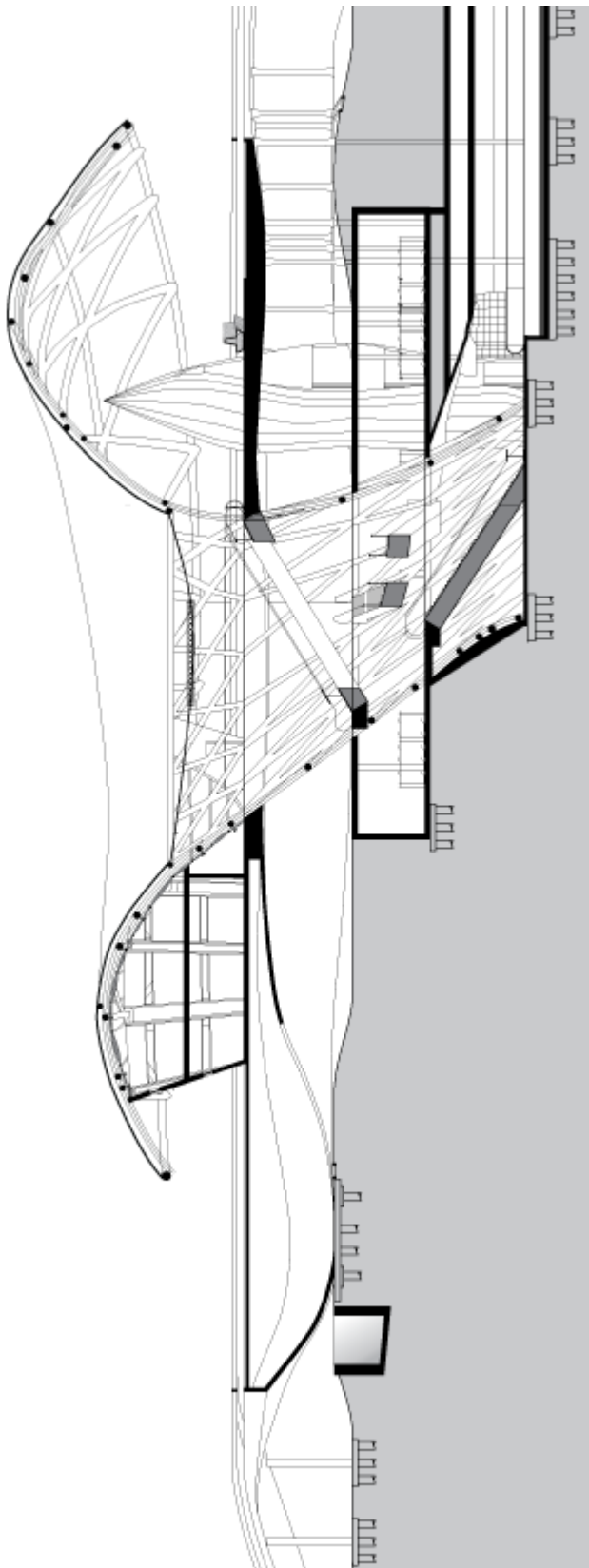


Figuur 80 – Metro, v.l.n.r.: BG (entree), -1 (fietsenstalling), -2 (entree vanuit transferium), -3 (metrohalte).

Ieder vervoermiddel heeft dus zijn eigen verdieping. Dit bevordert de snelheid van de verschillende reizigers. Er zijn door de onderverdeling weinig conflictpunten (lees: kruisingen tussen de stromen op hetzelfde niveau).



De tweede deelvraag moest zorgen voor de belangrijke rol van de constructie in het transferium. Deze constructie moest vooral het transport in het transferium ondersteunen. Deze vraag kan het best beantwoordt worden aan de hand van de doorsnede van het gebouw.

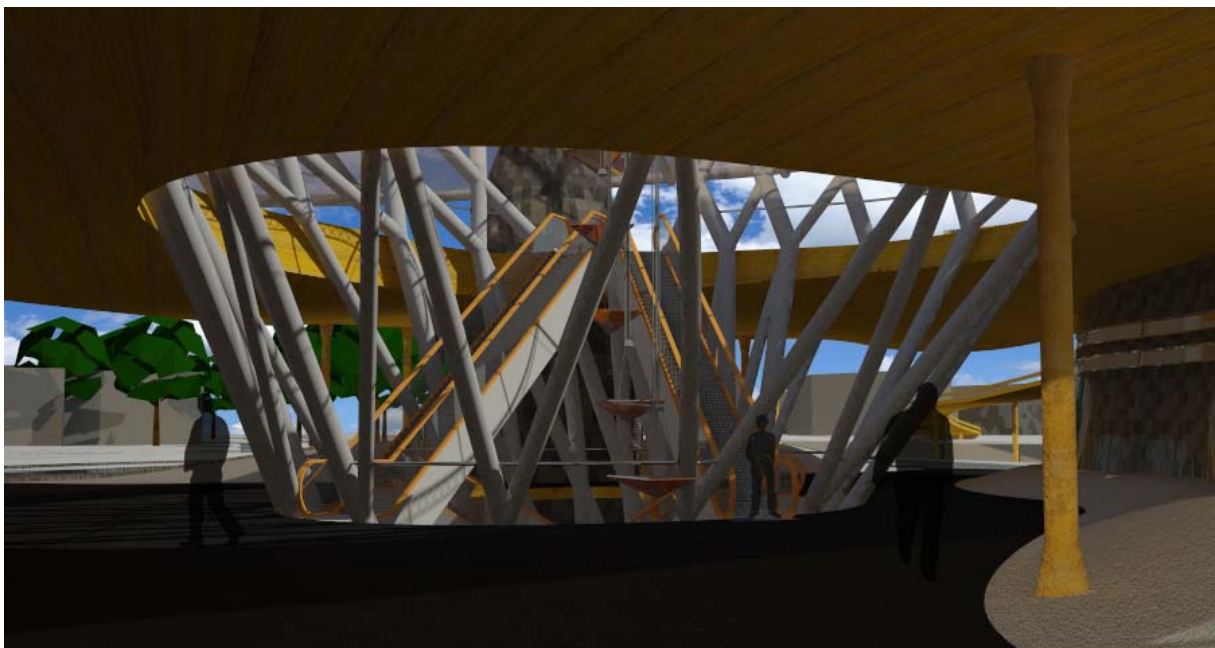


Figuur 81 – Doorsnede transferium.

De constructie is door de eerder gestelde parameters vervormd. Deze is in het totale gebouw ook te zien. De doorsnede van het gebouw vormt zich naar de constructie, waardoor de constructie het gebouw *geworden* is. De kolom van de constructie bakent duidelijk het verticale transport af. In de kolom bevinden zich dan ook enkel de roltrappen. Het directe gebied rondom de kolom is bestemd voor voetgangers. Buiten dit gebied, is het bestemd voor het transportmiddel dat per verdieping verschilt.



Figuur 82 – Verticaal transport 1<sup>e</sup> verdieping.



Figuur 83 – Verticaal transport begane grond.



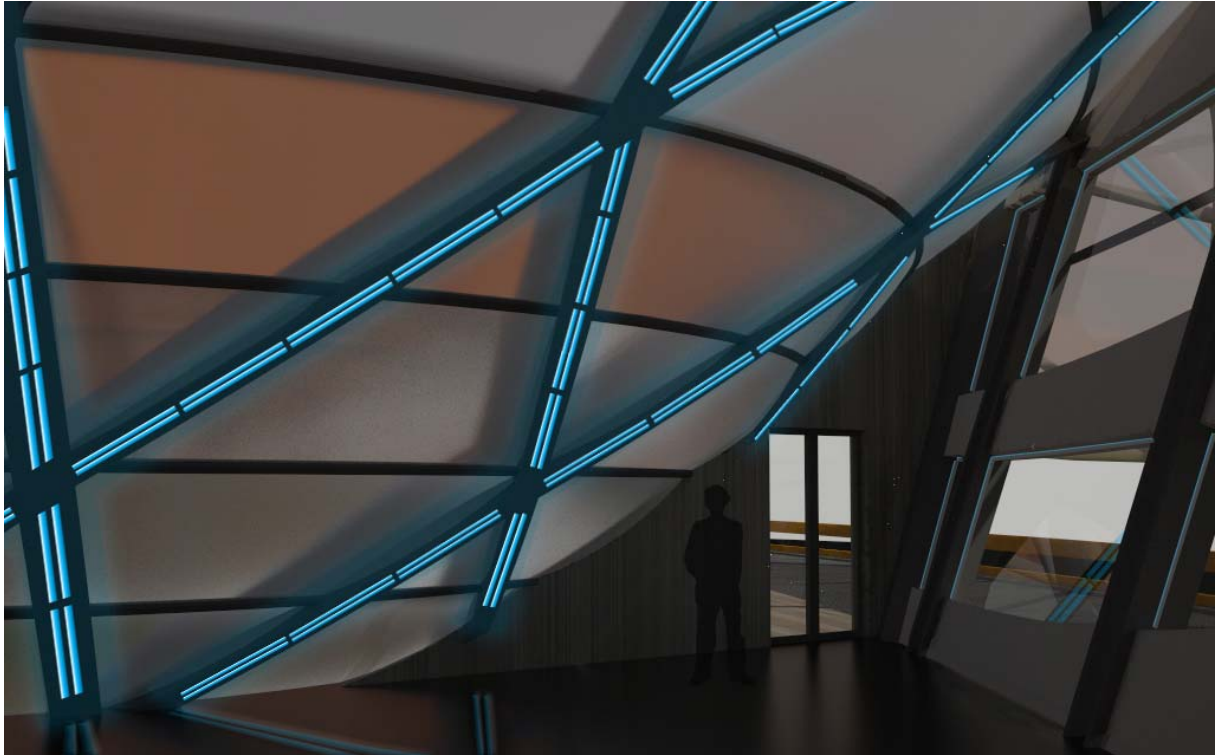
Figuur 84 – Verticaal transport eerste kelderverdieping.



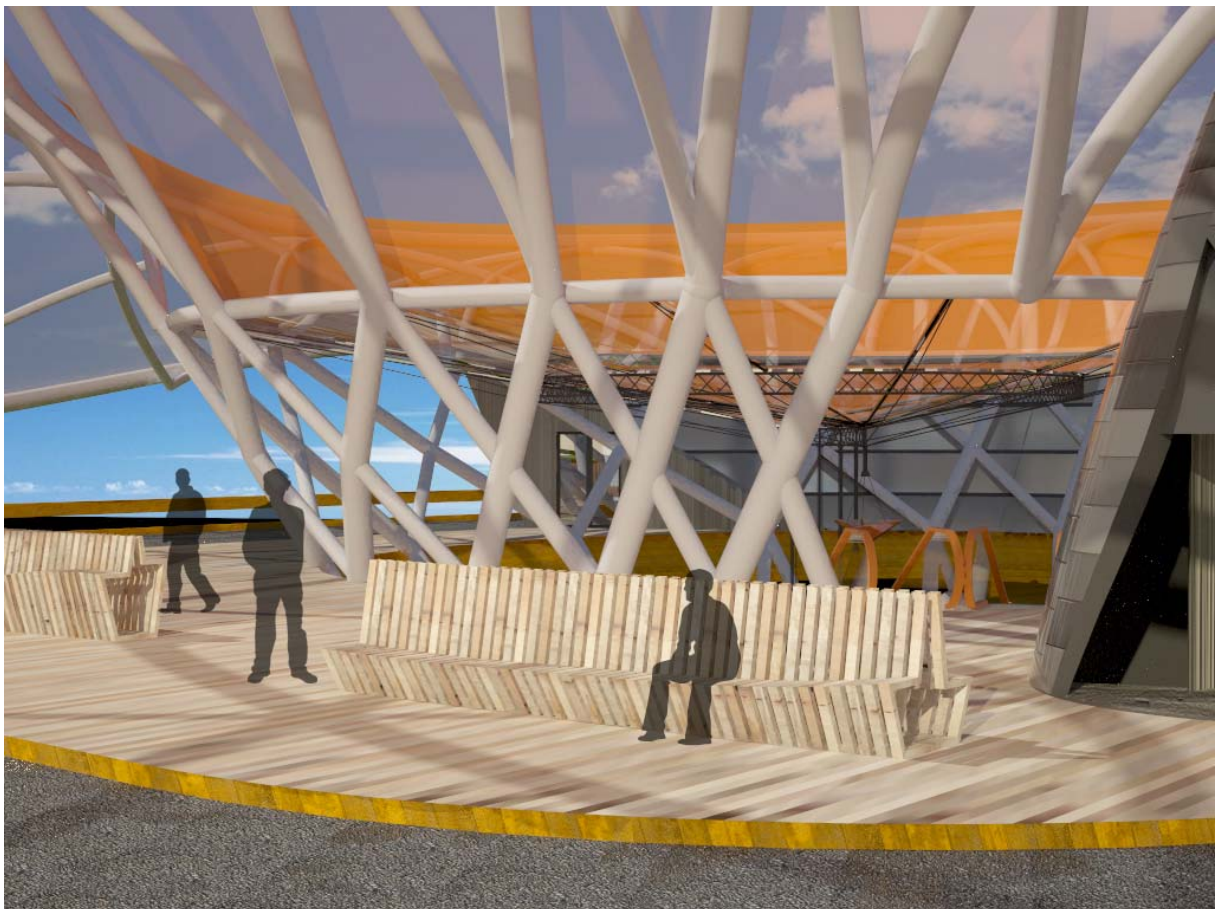
Figuur 85 – Verticaal transport tweede kelderverdieping.

Het dak, de bovenkant van de constructie, heeft voor de beleving in het transferium meerdere identiteiten. In de doorsnede is het gebied van de winkel en de wachtruimte te zien. Boven de winkel is het dak relatief laag. Voor de winkel geeft dit een mate van intimiteit. Ook zou het onnodig (en kostbaar) zijn om het dak hier heel hoog te ontwerpen. Voor de wachtruimte creëert het hoge dak juist ruimtelijkheid. Het heeft een luchtige sfeer. Wachtruimtes voor bussen zijn vaak buiten. Mijn ervaring is als deze wel binnen zijn, ze meestal een bedompte, verwaarloosde en onprettige sfeer hebben, zoals Utrecht Centraal en het onlangs gesloopte busstation bij Den Haag Centraal. Door het hoge, semi-transparante dak in dit transferium, worden deze stereotype doorbroken.





Figuur 86 – Lage dak bij de winkel.

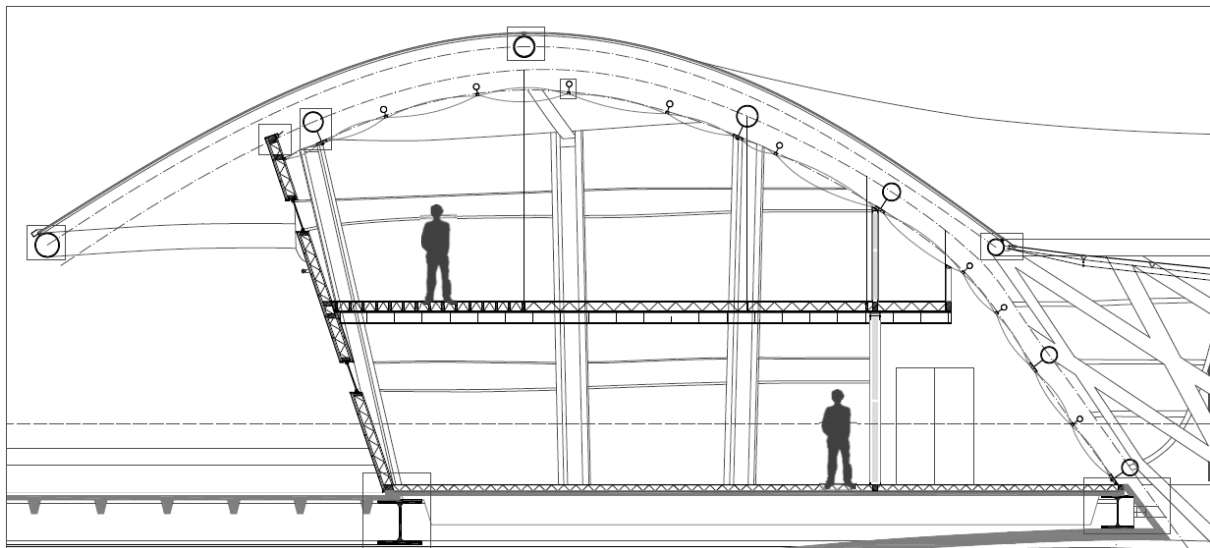


Figuur 87 – Hoge, ruimtelijke dak busstation.

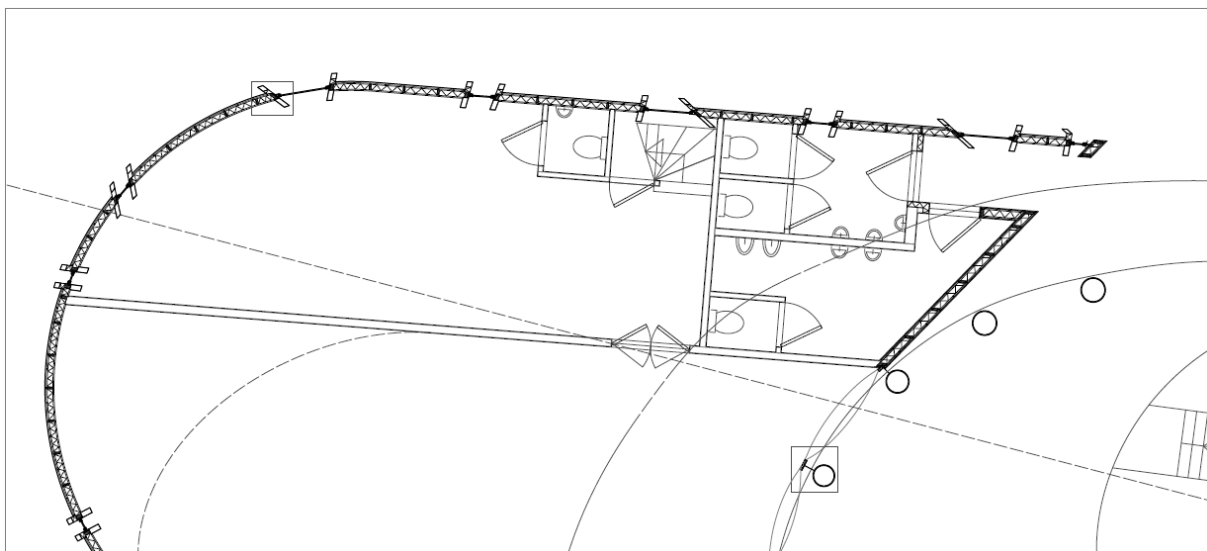
De laatste deelvraag is gesteld voor de verdieping in de bouwtechnologie. Deze vraag gaat over de meest optimale constructie voor de eerder genoemde functie en vorm die het moet vervullen. Omdat het hier over een dubbel gekromde constructie gaat, is het noodzakelijk een bepaalde logica in het constructieve netwerk aan te brengen, zodat er mee ontworpen kan worden. Deze logica is beschreven in Hoofdstuk 7. Uitgangspunten (pagina 25). Met het toepassen van die methode, kan er voor twee soorten constructies gekozen worden: de schaal of de *grid shell structure*. De schaal heeft als eigenschap dat het een dicht vlak is en daarmee oneindig veel krachtlijnen door dit vlak heeft. De *grid shell structure* kan dezelfde vorm aannemen als de schaal, maar heeft een ontworpen constructief raster waarover de krachten lopen. Gezien de eisen waar de constructie aan moet voldoen, is het wenselijk als het geheel een open karakter heeft, zoals de *grid shell structure*.

Om de doorbuiging te reduceren, moet goed gekeken worden naar de vormeigenschappen van een dergelijke constructie. In dit geval neigen deze eigenschappen sterk naar die van de *elpar*. Op basis van de gegevens die bij de *elpar* horen, zal de optimalisatie van de vorm plaats moeten vinden. Het gaat hier om een constructie, die door de vorm van de kolom slappere plekken heeft. Daar is de doorbuiging groter. Wanneer het dakvlak volledig stijf wordt ontworpen, zal deze negatieve doorbuiging ook op andere plekken tevoorschijn komen. Dit is een ongunstige situatie. Door het dakvlak flexibel te ontwerpen, kan er met deze slappe plekken rekening gehouden worden. Ook de profieldoorsneden spelen hierin een belangrijke rol. Daar waar de doorbuiging het grootst is, zullen de doorsneden de grootste oppervlakte en traagheidsmoment hebben. Hoe minder slap de constructie is, des te kleinere profieldoorsneden er nodig zijn. Met deze methode (de 'bos bloemen' methode) kan de maximale doorbuigingseis behaald worden met een minimale gewichtstoename. In het architectonische beeld werpen deze verschillende profieldoorsneden ook zijn vruchten af. Er is door de gebruikte methode een diepteverschil ontstaan. Dit is een bijzonder beeldend facet aan de constructie.

Door de optimalisatieprocessen, is er een complex geheel ontstaan. Het daadwerkelijk bouwen van de constructie mag hier niet onder leiden. Daarom is er een generieke constructiemethode bedacht waarbij eenvoudige montage centraal staat. Een van de resultaten hiervan is dat de ringen van de constructie in een ander constructief vlak komen te liggen dan de spanten. Dit is voor de constructieve werking niet het meest ideaal, maar door de verbinding tussen deze zodanig te ontwerpen, dat de krachten in de ringen in twee kanten afgevoerd worden, is dit te overzien. Een voordeel dat de ringen en staven niet in hetzelfde vlak zitten, is dat er over de gehele constructie en over de huid van het dak en de winkel, een gelaagdheid optreedt.

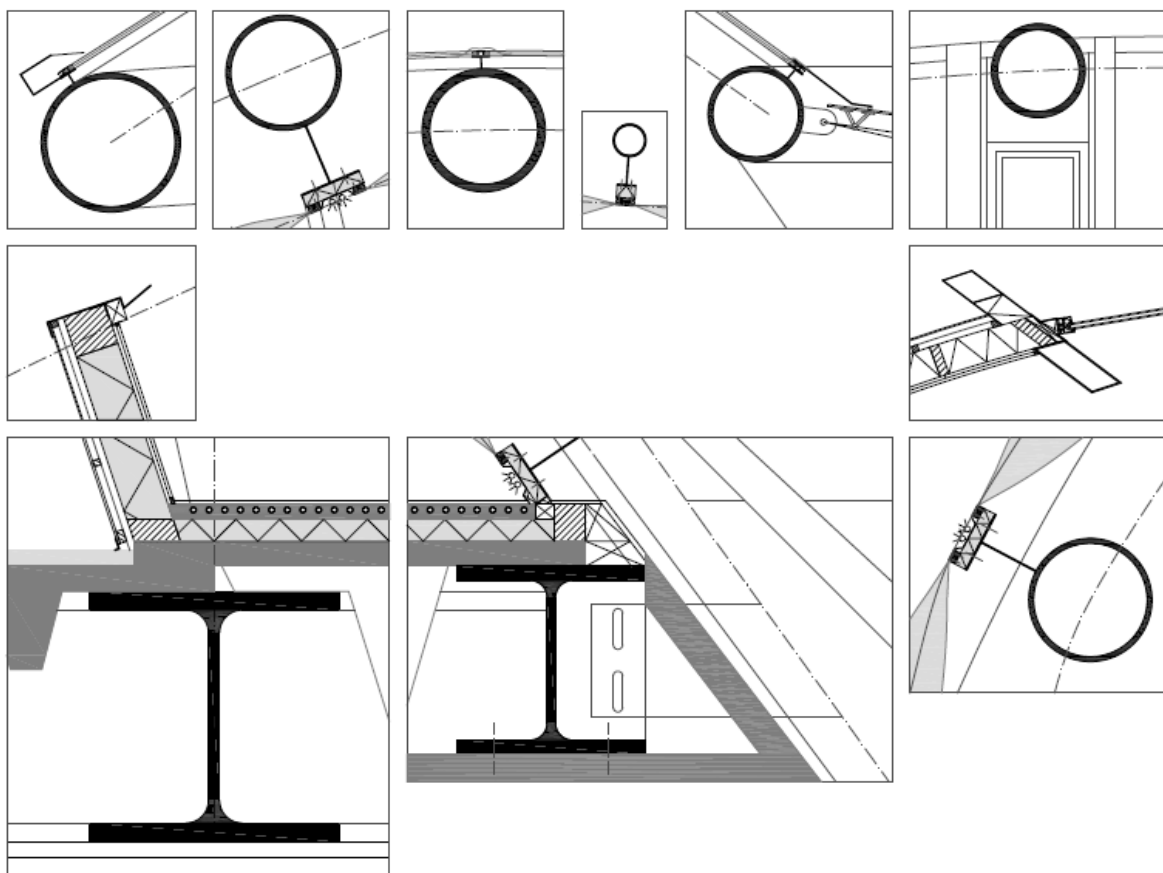


Figuur 88 – Doorsnede over de constructie en de winkel.



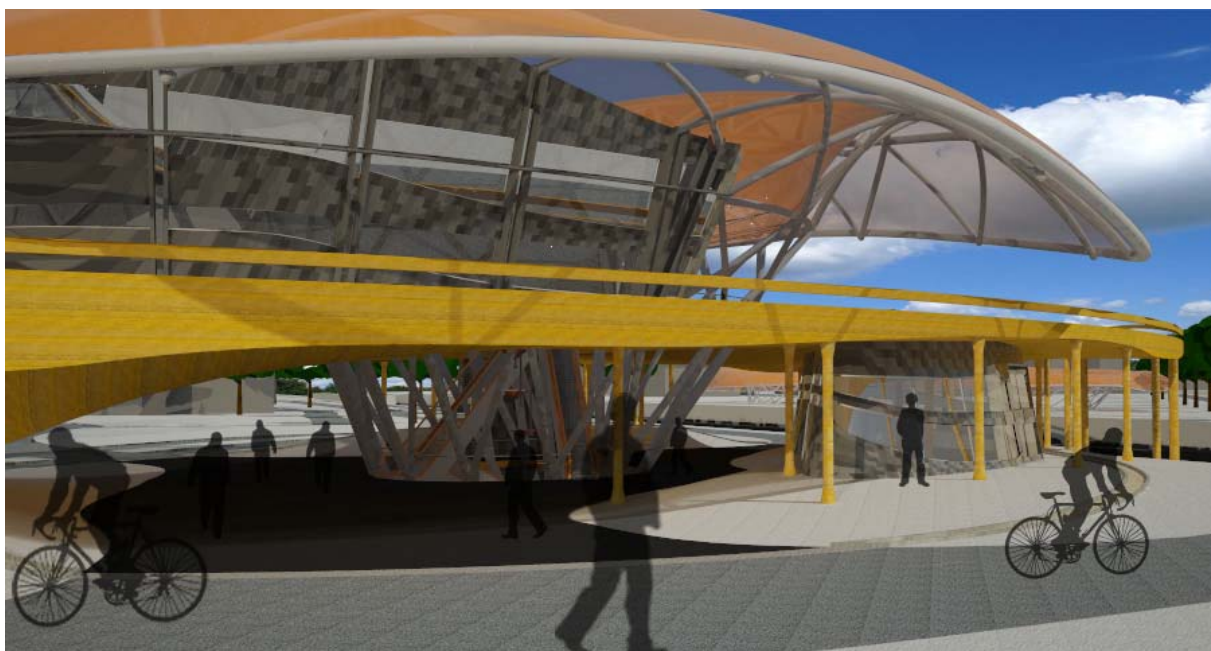
Figuur 89 – Plattegronddoorsnede van de constructie en de winkel.

Deze gelaagdheid is dus ook in de detaillering waarneembaar, welke te zien is op de volgende pagina. Een van de gevolgen van deze gelaagdheid, is het integreren van de verlichting ter plaatse van de winkel, te zien in Figuur 86 op pagina 83.



Figuur 90 – Detaillering constructie, dak, en huid, wand en vloer winkel.

Door de ringen in een ander vlak te plaatsten, zijn bij het architectonische beeld zijn van binnenuit gezien, liggen de spanten dan meer op de voorgrond. Ook ontstaat er een gelaagdheid wat een extra dimensie geeft aan de constructie. Een ander ontstaan effect is dat de spanten onder de buitenste ring doorsteken. Zowel van binnen als van buiten legt dit detail een extra accent op de constructie.



Figuur 91 – Beeldende accenten gelaagdheid constructie.



## 11.2 BEANTWOORDING CENTRALE VRAAG

De vraag *hoe kan de constructie een belangrijke bijdrage leveren aan de verkeerstromen in een transferium?* kan het beste beantwoord worden met 3D afbeeldingen van het gebouw.



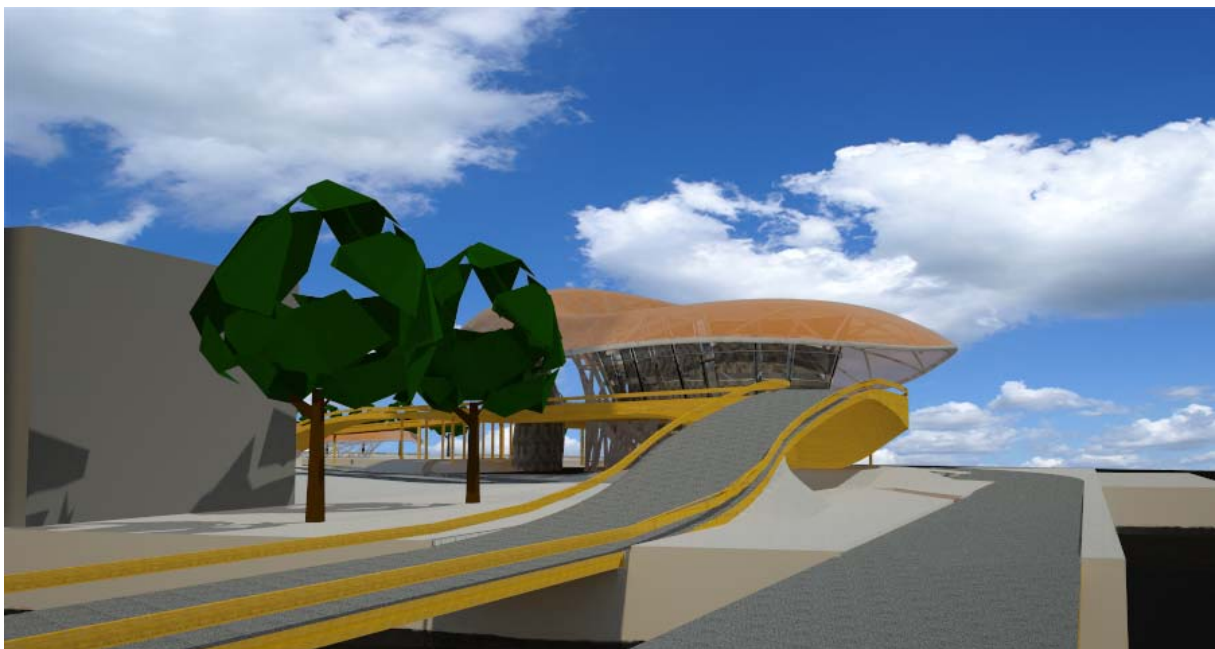
Figuur 92 – Zuidgevel transferium.



Figuur 93 – Oostgevel transferium.



Figuur 94 – Noordgevel transferium.



Figuur 95 – Westgevel transferium.

In de gevelaanzichten is goed de invloed van de constructie. Ook opvalt is de samenwerking van het dak met het plateau waar de busbaan op gelegen is. Door de dubbel gekromde vorm van de constructie heeft ieder gevelbeeld een ander uiterlijk. Hierdoor speelt de constructie ook een rol in de oriëntatie rondom het gebied van het transferium.



Figuur 96 – Verticaal transport (roltrappen) in de kolom van de constructie.

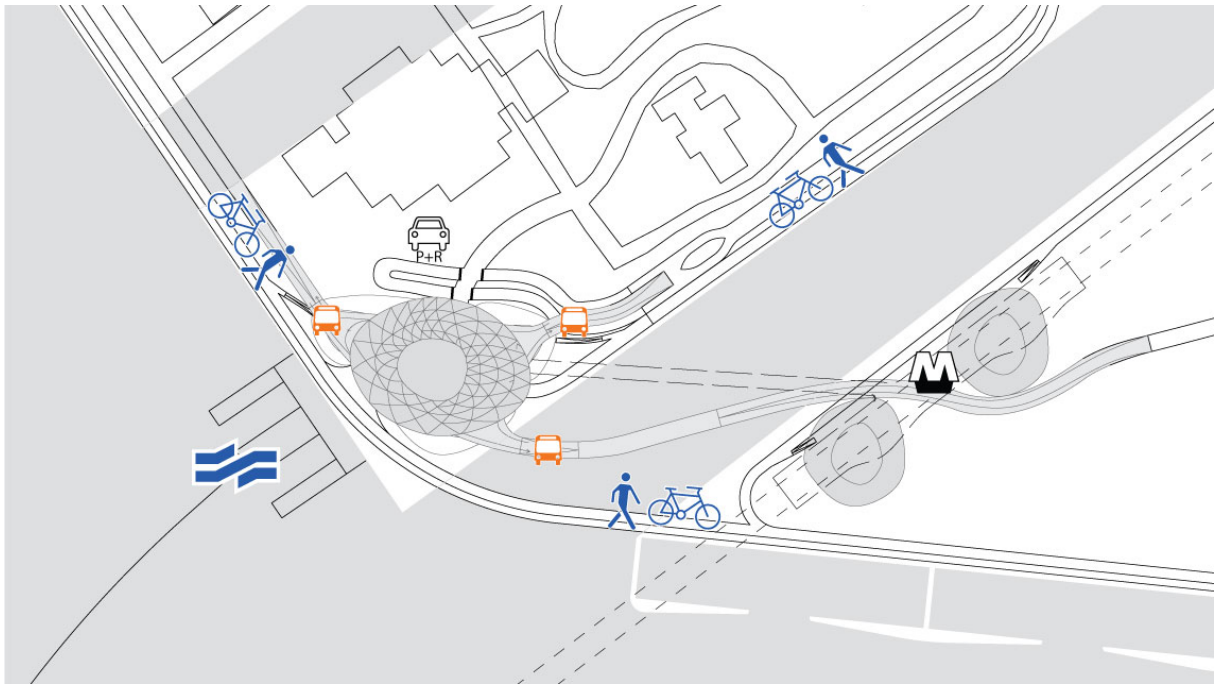
De roltrappen, welke het verticale transport vormen in het transferium, liggen in de kolom van de constructie. Doordat deze dubbel gekromd is, ontstaat er een spel van schuinen lijnen. De roltrappen zijn zo ontworpen, dat de voetgangers in een lijn makkelijk naar boven of naar beneden kunnen reizen. Deze twee routes kruizen elkaar niet, zodat de beide stromen niet met elkaar in conflict komen. Dit bevordert wederom de *snelheid* en efficiëntie van het transferium als geheel.



### 11.3 DOELSTELLING

De doelstelling van het ontwerp was *het ontwerpen van een constructief iconisch transferium voor een structurele verbetering van het OV-netwerk van Amsterdam Noord*. Hoe deze behaald is, zal uitgelegd worden aan de hand van een aantal afbeeldingen.

Als eerste wordt er gekeken naar het nieuwe stedenbouwkundig plan.



Figuur 97 – Stedenbouwkundig plan transferium.

Er is tegenover het centraal station van Amsterdam een knooppunt van OV-netwerken ontstaan. Er kan gemakkelijk van het ene naar het andere vervoer overgestapt worden. Vanuit het kruispunt zijn er drie routes, voor zowel de bussen als de fietsers en voetgangers. Deze lopen naar de verschillende gebieden van Amsterdam Noord. Nu is heel Amsterdam Noord goed bereikbaar vanuit het centraal station. Ook kan vanuit beide punten (Amsterdam CS en het transferium) de metro genomen worden om naar het zuiden of verder naar het noorden te reizen. Een andere mogelijkheid om naar het centrum te reizen is de veerpont. Door de gecreëerde verbinding tussen de drie gebieden, volstaat één veerdienst in plaats van twee die nagenoeg naast elkaar lagen. Een laatste mogelijkheid om het transferium te bereiken is voor de passagiers die afgezet worden met de auto. Hier voor is een lus ontworpen met *park + ride* parkeerplaatsen. Deze afbeelding onderbouwd het deel van de doelstelling over de structurele verbetering van het OV-netwerk van Amsterdam Noord.

Het andere deel gaat over de architectuur en dus de uitstraling van het transferium: het ontwerpen van een constructief iconisch transferium. Het beeld vanuit het centraal station is een uniek gebouw, welke door zijn vloeiende vormen visueel het transport weergeeft (zie afbeelding op de volgende pagina). Het meest opvallende is het oranje dak en de gele constructie van de eerste verdieping. Door de gele accenten in de bruggen en plateau worden de verschillende gebieden meer met elkaar verbonden. Als men met de veerpont naar het transferium reist zal de uitzonderlijke constructie in het oog springen. Steeds meer detail in het gebouw worden zien, tot aan het verschillen de diameters van de staven en de ringen die in een ander vlak liggen dan de spanten.



Figuur 98 – Uitzicht op het transferium vanuit Amsterdam Centraal Station.

## 12. REFLECTIE

De afstudeerrichting van dit project is Architectural Engineering, *Architectuur*. Het idee van dit lab, is een ontwerp middels een technische fascinatie te ontwikkelen. De architectuur en de bouwtechnologie wordt hier gecombineerd tot één geheel. Er vindt een constante wisselwerking plaats tussen het architectonisch ontwerp en de techniek. Voor dit traject had de student de keus om nog een extra half jaar zich te verdiepen in het technische fascinatie voor de richting *Bouwtechnologie*.

Voor dit afstudeerproject is er een transferium ontworpen met als technische verdieping grote overspanningen. Deze grote overspanning moest het gebouw vorm gaan geven, zodat de *Engineering*kant van dit verhaal de *Architectuur* zou worden. Hierdoor zou er een constante wisselwerking plaats gaan vinden tussen de twee vakgebieden.

Met het ontwerpen van een transferium heeft men te maken met vele logistieke knooppunten. De constructie zou hierin een belangrijke rol gaan spelen. De beide onderdelen, de vorm van de constructie en het logistiek plan, zouden uiteindelijk leiden tot wat het transferium nu is geworden.

Voor de optimalisatie van de constructie is er veel gebruik gemaakt van de beschikbare literatuur en het rekenprogramma *Oasys GSA*. De verbeterde constructie heeft er voor gezorgd dat er geen extra ondersteuning onder het dak nodig waren en heeft gehele ontwerp naar een hoger plan getild. Voor de detaillering is er onderzoek gedaan naar de verschillende bestaande en meer experimentele methodes. Door een multicriteria-analyse uit te voeren, waarbij zowel de maakbaarheid, eenvoudige montage en de architectonische uitwerking een belangrijke rol speelde, is er een geschikte, generieke methode ontworpen.

Door de opdeling van het afstudeertraject in zijn huidige vorm, konden echter niet ieder moment de beide vakgebieden parallel naast elkaar lopen. Wanneer dit meer het geval zou zijn geweest, zou de vormoptimalisatie in combinatie met de architectuur op een meer logische manier verlopen zijn.





# LITERATUURLIJST

## Boeken

Prof. ir. Beranek, W.J., 1979. *K3 dictaat ruimtelijke cestructies deel 2*. Delft: Technische Hogeschool Delft.

Engel, H., 1997. *Structure Systems*. Ostfildern: Hatje Cantz Verlag.

Hartsuijker, C., 2005. *Toegepaste Mechanica, Deel 2 Spanning, vervormingen, verplaatsingen*. 3e ed. Den Haag: Academic Service.

Holmes, J. D., 2001. *Wind loading of structures*. Londen: Spon Press.

Irvine, T., onbekend. *Tacoma Narrows Brigde*. [Online]  
Available at: <http://www.vibrationdata.com/Tacoma.htm>  
[Accessed 26 mei 2012].

Lan, T. T., Onbekend. Space frame structures. In: *Handbook of Structural Engineering*. Onbekend: Onbekend, pp. 35-47.

## Artikelen

Alves, L. M. & Martins, P. A. F., 2012. Tube branching by asymmetric compression beading. *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 1200-1208.

Bessason, B. & Thór Snaebjörnsson, J., 2008. *Vortex shedding induced vibrarions of a light mast*, Reykjavik: University of Iceland.

Goolen, D. v., 2008. *Literatuurstudie Gietstukken*, Onbekend: IV-Bouw & Industrie.

Lienhard, J. & Knippers, J., Onbekend. *Permanent and convertible membrane structures with intricate bending-active support systems*, Stuttgart: Univeriteit van Stuttgart.

Louis Riberio, J. P. e. a., 1999. *European Wind Energy Conference, Wind Energy for the next millennium*. London, UK, James & James (Science Publishers) Ltd, p. 1048.

Rosa Siqueira de la, C., 2005. *Von Kármán vortex street animation*. [Online]  
Available at: [http://www.mcef.ep.usp.br/staff/jmeneg/cesareo/Cesareo\\_HomePage.html](http://www.mcef.ep.usp.br/staff/jmeneg/cesareo/Cesareo_HomePage.html)  
[Accessed 10 augustus 2012].

Ryan, V., 2009. *Structures*. [Online]  
Available at: <http://www.technologystudent.com/struct1/tacoma1.htm>  
[Accessed 26 mei 2012].

Stephan, S., Sánchez-Alvarez, J. & Knebel, K., Onbekend. *Reticulated structures on free-form surfaces*, Würzburg: s.n.

Toussaint, M., 1980. *A Design Tool for Timber Gridshells - The Development of a Grid Generation Tool*, Delft: Delft University of Technology.

Waternet, Onbekend. *Waterstanden*. [Online]

Available at: <http://legger.agv.nl/peilbuizen/peilbuizen.aspx>

[Accessed 9 September 2012].

Boake, T. M., 2012. *Fun is in the details*. [Online]

Available at: [http://www.architecture.uwaterloo.ca/faculty\\_projects/terri/SSEF1/hidden.html](http://www.architecture.uwaterloo.ca/faculty_projects/terri/SSEF1/hidden.html)

[Geopend 7 November 2012].

## **Normen**

NEN, 2007. *Norm: NEN-EN 1991-1-4:2005 nl, Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-4: Algemene belastingen - Windbelasting*, Onbekend: NEN.

NEN, 2011. *Norm: NEN-EN 1991-1-4+A1+C2/NB, Nationale bijlage bij NEN-EN 1991-1-4+A1+C2*, Onbekend: NEN.

## **Interviews**

Steenbergen, R., 2012. *Meetgegevens windfrequentiespectrum, 0-20 m (TNO)* [Interview] (3 juli 2012).

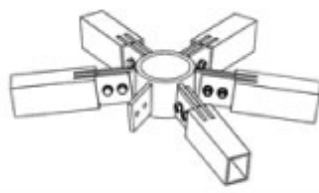
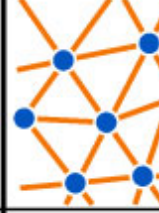
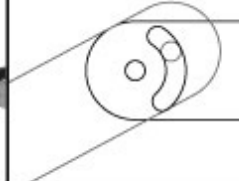
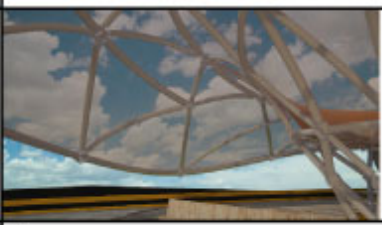
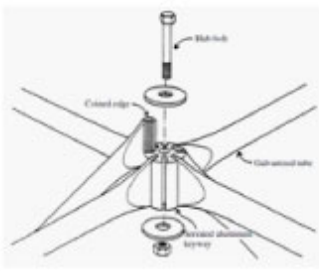
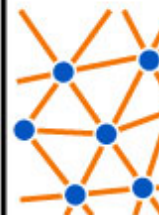
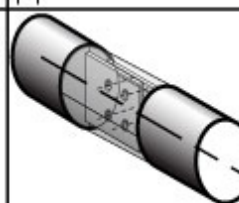
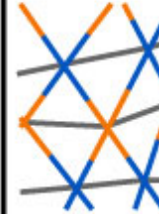
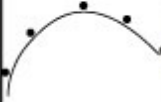
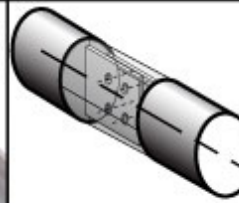
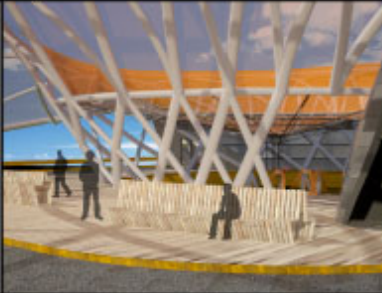
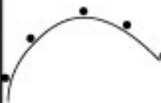
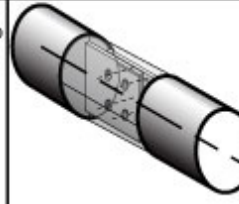
Stepek, A., 2012. *Meetgegevens van het frequentie spectrum van turbulentie in bebouwd gebied* [Interview] (22 mei 2012).





## BIJLAGE I

Multicriteria-analyse verschillende methodes

| Methodes                                                                            | Opbouw                                                                              | Ringen                                                                              | Geschiktheid                                                                      | Montage knopen                                                                       | Architectuur                                                                       | Architectoisch beeld                                                                  | Totaal                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bestaande knopen<br>splice connector                                                |                                                                                     | ++                                                                                  | ++                                                                                | ++                                                                                   | --                                                                                 | -                                                                                     | +                                                                                                                |
|    |    |    |  |    | Beeld unieke spanten wordt verstoord door knopen.                                  |    | Goede mogelijkheid, wel verstoord architectonsch beeld.                                                          |
| triodectic                                                                          |                                                                                     | ++                                                                                  | 0                                                                                 | -                                                                                    | -                                                                                  | 0                                                                                     | -                                                                                                                |
|    |    |    | Knoop wordt even hoog als plat eind hoogste buis.                                 | Probleem vastzetten staven kleine diameter                                           | Beeld wordt redelijk verstoord door knopen en patte uiteinden buizen.              | Geen architectonisch beeld beschikbaar. Relatief kleine knoop.                        | Lastig met verschillende diameters en verstoord architectonisch beeld.                                           |
| Unieke knopen<br>gieten                                                             |                                                                                     | -                                                                                   | -                                                                                 | ++                                                                                   | ++                                                                                 | ++                                                                                    | 0                                                                                                                |
|  |  |  | Individuele mallen maakt deze methode erg kostbaar.                               |  | Onderscheiding ringen en spanten. Structuur spanten wordt niet verstoord.          |  | Zeer dure methode vanwege mal unieke knopen. Wel gewenst architectonisch beeld.                                  |
| laser snijden                                                                       |                                                                                     | -                                                                                   | ++                                                                                | ++                                                                                   | ++                                                                                 | ++                                                                                    | ++                                                                                                               |
|  |  |  | Eenvoudige afstelling                                                             |  | Onderscheiding ringen en spanten. Structuur spanten wordt niet verstoord.          |  | Goed mogelijke methode. Gewenst architectonisch beeld. Nadeel: ringen in ander constructief vlak, wel oplosbaar. |
| druklassen                                                                          |                                                                                     | -                                                                                   | --                                                                                | ++                                                                                   | --                                                                                 | --                                                                                    | --                                                                                                               |
|  |  |  | Alleen nog hoeken van 90° mogelijk.                                               |  | Alleen hoeken van 90° mogelijk waardoor gehele beeld structuur negatief veranderd. | Geen architectonisch beeld beschikbaar. Alleen hoeken van 90° mogelijk.               | Gewenste vrijheid knopen niet mogelijk met deze methode, nog te experimenteel.                                   |





## BIJLAGE II

Doorsnede

