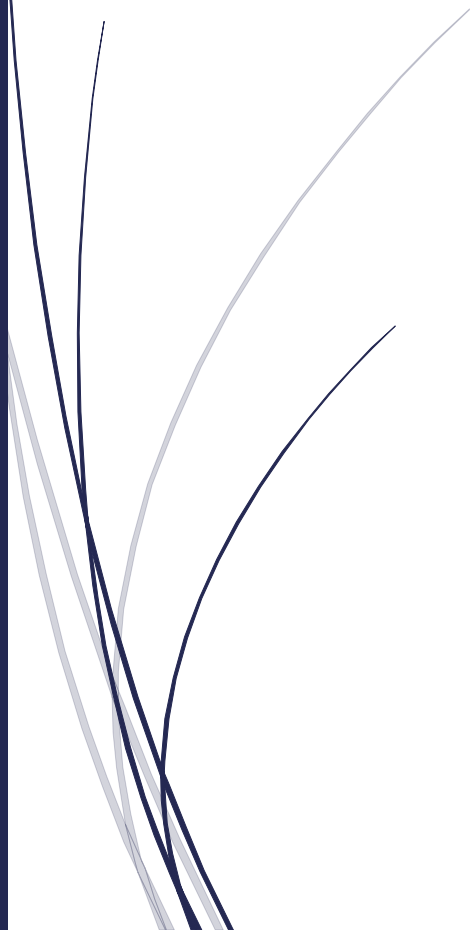


24-6-2020

Bachelor eindproject

Schaduwzeilen voor warme dagen



Sam Bekkers

BACHELOR EINDPROJECT CIVIELE TECHNIEK

SCHADUWZEILEN VOOR WARME DAGEN

Bachelor Eind Project

Civiele Techniek - Building Engineering

Student:	Sam Bekkers
Studentennummer:	4571770
Begeleider 1:	dr. Ir. H.R. Schipper
Begeleider 2:	dr. Ir. P.C.J. Hoogenboom
Vakcode:	CTB3000-16



VOORWOORD

Voor u ligt het rapport 'Schaduwzeilen voor warme dagen'. Het is geschreven als Bachelor Eind Rapport en dient ter afronding van mijn bacheloropleiding Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. Tevens betreft het een casus van het bedrijf Tentech, gespecialiseerd in het ontwerpen en produceren van membraanconstructies. Van april 2020 tot juni 2020 ben ik bezig geweest met het onderzoeken van de casus en schrijven van het rapport.

Dit rapport is gericht aan geïnteresseerden in membraanconstructies en het ontwerpen ervan. Het heeft mij nieuwe inzichten gebracht in het algemene ontwerpproces van constructies en het schrijven van wetenschappelijke rapporten. Het volbrengen van dit rapport heb ik dan ook te danken aan experts uit de civiele wereld.

Graag wil ik dan ook mijn dank uitspreken aan mijn begeleiders Dr.ir. H.R. Schipper en Dr.ir. P.C.J. Hoogenboom. Hun feedback en ondersteuning hebben mij geholpen tijdens het project. Ook wil ik ir. R. Houtman, eigenaar van het bedrijf Tentech, bedanken voor zijn tips en het delen van zijn kennis binnen het onderwerp. Dankzij hem heb ik een groot deel van mijn analyses kunnen uitvoeren.

Ik wens u veel leesplezier.

Sam Bekkers

24 juni 2020

SAMENVATTING

De meest voorkomende vorm van kanker in Nederland is huidkanker. Een van de voornaamste oorzaken van deze ziekte is de schadelijke UV-straling van de zon. In het kader van volksgezondheid moeten mensen dus beschermd worden tegen deze straling. Een oplossing vanuit de ingenieurswereld is het ontwerpen en bouwen van schaduwzeilen. Dat zijn lichte constructies die een membraan opspannen, die op een bepaalde locatie de benodigde schaduw kan vormen.

Allereerst wordt er in dit rapport onderzoek gedaan worden naar de theorie achter membraanconstructies. Met behulp van de kennis die opgedaan is tijdens het literatuuronderzoek, wordt een ontwerp gemaakt als oplossing voor een bepaalde casus. Het gaat om een hal op een festivalterrein waar een luifel aan vast gemonteerd dient te worden. Op basis van alle informatie uit deze casus wordt het Programma van Eisen opgesteld, waarin de eisen en wensen waar de constructie aan moet voldoen in staan vermeld. Nadat het Programma van Eisen is opgesteld, begint de ontwerpfase. Door het bouwen van maquettes wordt er gevoel gekweekt voor de vorm en het gedrag van membraanconstructies. Hiermee worden een begin gemaakt aan het vormen van het ontwerp. Door in de beschikbare computersoftware een model te maken en te verbeteren, wordt uiteindelijk een geschikt ontwerp gecreëerd.

Nadat het ontwerp is vastgesteld, wordt aan de hand van verschillende materiaaleigenschappen bepaald of de constructie voldoet aan de maximaal toelaatbare spanningen. Deze spanningen worden wederom bepaald met behulp van de computersoftware. Zowel voor het membraan als voor de ondersteunende constructie worden vervolgens de afmetingen bepaald zodat er een veilige constructie wordt gecreëerd die binnen de maximaal toelaatbare spanningswaarden valt.

Ook wordt nagedacht over de inpassing van de constructie, zoals het funderen en aansluiten van de luifel. Daarnaast wordt bekeken hoe de bestaande hal versterkt kan worden, wat nodig is om de extra gegenereerde krachten ten aanzien van de luifel veilig op te kunnen nemen. Tevens wordt er een mogelijkheid aangeboden om de ontworpen luifel uit te breiden naar een andere afmeting van de hal.

Het rapport wordt afgesloten met een discussie en een conclusie, gevolgd door de literatuurlijst en de bijlagen.

INHOUD

Voorwoord	- 4 -
Samenvatting	- 5 -
1. Inleiding.....	- 8 -
2. Probleemstelling	- 9 -
3. Methodiek.....	- 10 -
4. Literatuurstudie	- 11 -
4.1 Krachtsafdracht	- 11 -
4.2 Structuurvormen	- 12 -
4.3 Voorspanning.....	- 13 -
4.4 Membranen	- 14 -
4.5 Verbindingen en detaillering	- 17 -
Naden	- 17 -
Randen	- 18 -
Hoekdetailering.....	- 19 -
4.6 Verankering	- 20 -
5. Case study	- 21 -
5.1 Situatie.....	- 21 -
5.2 Specificaties van de hal.....	- 23 -
5.3 Programma van Eisen	- 24 -
6. Ontwerpconcepten	- 25 -
6.1 Beginfase	- 25 -
6.2 Ontwerpvoorstellen.....	- 28 -
Optie 1.....	- 30 -
Optie 2.....	- 31 -
7. Constructieve eisen.....	- 33 -
7.1 Belastingcombinaties.....	- 33 -
Permanente belastingen	- 33 -
Veranderlijke belastingen	- 34 -
7.2 Materiaalkeuze	- 35 -
7.3 Ultimate Limit State	- 36 -
8. Spanningsanalyse van het membraan	- 38 -
Statische belasting	- 38 -
Windbelasting	- 39 -
Windzones.....	- 39 -
Frontale windbelasting.....	- 41 -
Zijwaartse windbelasting	- 43 -

9.	Spanningsanalyse van de ondersteunende constructie	- 45 -
	Steunmasten	- 45 -
	Spankabels	- 49 -
10.	Halversterking	- 50 -
11.	Funderingen	- 53 -
	Spankabels	- 53 -
12.	Montage aan hal	- 54 -
13.	Luifeluitbreiding	- 56 -
14.	Discussie & Conclusie	- 57 -
	Discussie	- 57 -
	Conclusie	- 58 -
	Bibliografie	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
	Bijlagen	- 60 -
	Bijlage A: Bouwtechnische tekeningen Aluhal	- 60 -
	Bijlage B: Windzones Easy	- 62 -
	Frontale Windbelasting	- 62 -
	Zijwaartse Windbelasting	- 62 -
	Bijlage C: Montageproces van de luifel	- 63 -

1. INLEIDING

In Nederland neemt het aantal patiënten dat gediagnostiseerd worden met huidkanker flink toe. Sinds tien jaar is het aantal mensen met huidkanker verdubbeld waardoor deze vorm van kanker vandaag de dag de meest voorkomende vorm van kanker is in Nederland. Eén van de voornaamste oorzaken van huidkanker is de UV-straling die door de zon op de aarde wordt afgevuurd (KWF Kankerbestrijding, sd). Daarom is het belangrijk om de huid goed te beschermen tegen de zon. Wanneer de huid verbrand is door de zon kan dit namelijk op de lange termijn leiden tot huidkanker. Bescherming tegen de zon kan op verschillende manieren, onder andere door jezelf in te smeren met zonnebrand of door bedekkende kleding te dragen. Ook helpt het natuurlijk om zoveel mogelijk de zon te vermijden en zoveel mogelijk de schaduw op te zoeken.

Een oplossing vanuit de ingenieurswereld is het ontwerpen en bouwen van zogenaamde schaduwzeilen. Dit zijn constructies die bestaan uit grote zeilen die het zonlicht tegenhouden en schaduw creëren. Deze tentconstructies worden op verschillende locaties ingezet, van gezinstuinen tot muziekfestivals. Omdat de vorm van de tentconstructie zich aanpast aan de belastingen, kunnen tentconstructies in alle vormen en maten voorkomen. Daardoor is er ook op esthetisch gebied veel mogelijk met dit type constructies. Het ontwerpen van een tentconstructie kan echter complex zijn. Door het flexibele gedrag van het membraan is de spanningsverdeling niet eenvoudig te bepalen. Dit gebeurt daarom vaak met behulp van computersoftware.

In dit rapport zal het volledige ontwerpproces beschreven worden van een schaduwzeil op een locatie waar dat nodig is, die effectief bescherming biedt tegen de schadelijke straling van de zon.

2. PROBLEEMSTELLING

Zoals in de inleiding beschreven brengt de straling van de zon niet alleen warmte maar ook gevaarlijke UV-straling met zich mee. Tentconstructies kunnen echter voor schaduw zorgen waardoor het risico op huidkanker afneemt. In dit rapport wordt er naar een geschikt ontwerp toegewerkt waarbij de volgende onderzoeksvraag de leidraad vormt:

“Hoe kan een tentconstructie worden ontworpen op een nader te bepalen locatie zodat deze effectief en veilig is, en een toegevoegde waarde heeft voor deze locatie?”

Om deze onderzoeksvraag te beantwoorden wordt deze gesplitst in deelvragen, die stuk voor stuk een deel van de hoofdvraag beantwoorden. Deze deelvragen zijn:

- *Op welke locaties is een schaduwzeil een effectieve oplossing voor het probleem?*
- *Welke type membraanconstructies zijn er en wat zijn de voor- en nadelen per type?*
- *Hoe werkt de krachtsverdeling in een tentconstructie?*
- *Hoe wordt een tentconstructie veilig gedimensioneerd en gedetailleerd?*
- *Hoe beïnvloedt de vorm van het membraan de vorming van schaduw?*

Het doel van dit Bachelor Eindproject is om een veilige, esthetische en constructief verantwoorde tentconstructie te maken. Dit wordt gedaan na het uitvoeren van onder andere een literatuuronderzoek, het bestuderen van een casus en het doorrekenen van een computermodel. Door contact te houden met begeleiders en professionals is het een leerzaam proces waar met behulp van een goede planning een antwoord op de onderzoeksvraag wordt gevonden.

3. METHODIEK

Het vinden van een antwoord op de onderzoeksvraag en de bijbehorende deelvragen vergt een goede onderzoeksstrategie. Het is een breed onderwerp met veel raakvlakken waardoor een goede structuur tijdens het onderzoek noodzakelijk is. In dit hoofdstuk zal duidelijk gemaakt worden welke stappen er worden ondernomen om tot een geslaagd eindresultaat te komen.

Het onderzoek begint met het doen van uitgebreid literatuuronderzoek. Hiermee wordt zoveel mogelijk informatie vergaard op alle raakvlakken van het onderzoek. Met de hoofdvraag van het onderzoek in het achterhoofd wordt dan al inspiratie opgedaan voor eventuele ontwerpconcepten. Het dan ook belangrijk om in een vroeg stadium te beginnen met nadenken over een manier waarop en locatie waar een schaduwzeil effectief voor schaduw kan zorgen. Na het doen van literatuuronderzoek is het goed om gevoel te krijgen voor het gedrag van tentconstructies. Dat kan door schaalmodellen te bouwen en te spelen met de verschillende mogelijkheden voor de vorm. Vervolgens wordt er een Programma van Eisen opgesteld, afhankelijk van de situatie. Aan de hand van het Programma van Eisen kunnen de eisen opgesteld worden waaraan de constructie moet voldoen. Dit Programma van Eisen dient tevens als een soort houvast die continu in het achterhoofd gehouden moet worden.

Vervolgens worden er een aantal concepten verder uitgewerkt om zo te beoordelen waaraan een succesvol ontwerp moet voldoen. Uit deze concepten, of uit een combinatie van concepten, wordt een definitief ontwerp gemaakt. Dit ontwerp wordt met behulp van de software Easy doorgerekend. Aan de hand van deze computerberekeningen wordt het model waar nodig bijgesteld.

Door veel contact te houden met de begeleiders en professionals wordt geprobeerd het proces vlot en soepel te laten verlopen, zonder te veel oponthoud. Gecombineerd met een vleugje creativiteit zal dit project goed uitpakken en zal er een geslaagd ontwerp naar voren komen.

4. LITERATUURSTUDIE

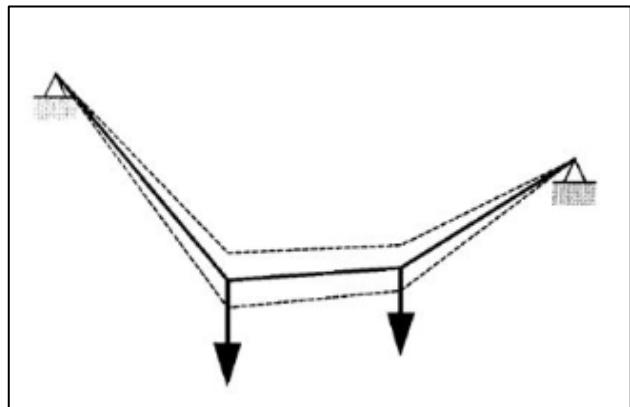
Alvorens een geschikte luifel te kunnen ontwerpen, is het belangrijk over een uitgebreide basiskennis te beschikken over dit type constructies en alles wat er bij het ontwerpproces ervan komt kijken. In dit hoofdstuk wordt dit onderzocht en overzichtelijk weergegeven zodat deze kennis later in het project gebruikt kan worden. Het bestaat uit een aantal paragrafen:

- §4.1 Krachtsafdracht
- §4.2 Structuurvormen
- §4.3 Voorspanning
- §4.4 Membranen
- §4.5 Verbindingen en detaillering
- §4.6 Verankering

4.1 KRACHTSAFDRACHT

Een tentconstructie bestaat uit een gespannen membraan dat met behulp van stijvere elementen, zoals stalen pilaren, in vorm wordt gehouden. Deze zeilen bestaan uit lange vezels die door elkaar heen geweven zijn. Meer hierover is te lezen in paragraaf 4.4. Deze individuele kabels kunnen alleen trekkrachten opnemen, geen drukkrachten en geen momenten. Wanneer een kabel wordt belast zal de vorm van de kabel zich aanpassen zodat er alleen trekkrachten in de kabel lopen. De vorm van zo'n kabelconstructie is dus afhankelijk van de belasting die erop staat. Zie figuur 4.1.

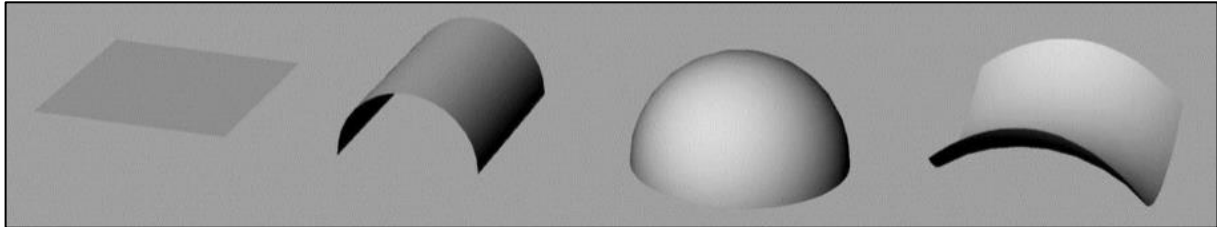
Omdat een membraan bestaat uit een hoop door elkaar geweven kabels, zou een membraanconstructie beschouwd kunnen worden als verzameling kabelconstructies die in elkaar verweven zijn. Daardoor wordt ook bij membraanconstructies de vorm van het zeil mede bepaald door de belasting die op het zeil werkt.



*Figuur 4.1: Kabelvorming onder puntbelasting
(Hans Welleman, 2016)*

4.2 STRUCTUURVORMEN

Bij het ontwerpen van een membraanconstructie kunnen vier basisvormen worden onderscheiden, namelijk: *zeroclastic*, *monoclastic*, *synclastic* en *anticlastic*. Uit de opbouw van deze termen wordt al snel duidelijk wat ze inhouden. Het laatste deel '*clastic*' betekent 'krommend'. De vier verschillende voorvoegsels van iedere term geeft dus aan op welke manieren het doek kromt.

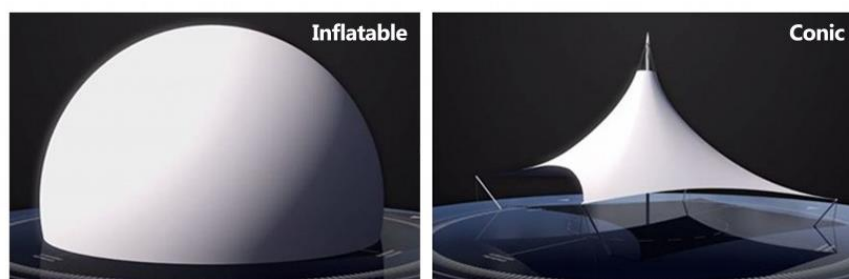


Figuur 4.2: Vier basisvormen voor membraanconstructies (Rogier Houtman, 2020)

Voor *zeroclastic* betekent dit dat er géén kromming is. Het is een platte structuurvorm die in principe in twee dimensies voorkomt. Voor een *monoclastic* membraan geldt dat er maar in één richting kromming is in het doek: in de loodrechte richting hierop kromt het doek niet.

Bij *synclastic* en *anticlastic* gevormde structuren is er sprake van dubbele kromming. Dat houdt in dat het vlak in twee verschillende richtingen gekromd is. Het voordeel van deze dubbele kromming is dat het gespannen membraan grotere belastingen loodrecht op het vlak kunnen opnemen, zonder daarbij extreem grote vervormingen te vertonen.

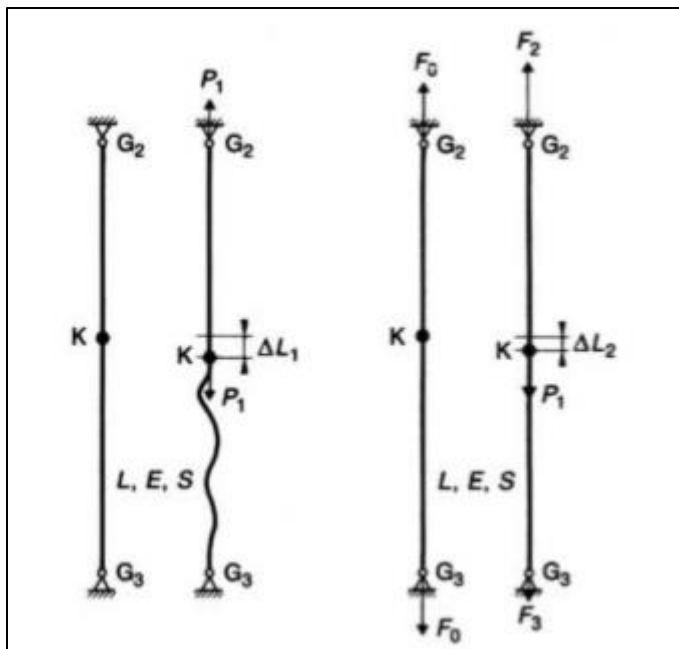
Het verschil tussen deze twee vormen is de richting waarin deze krommingen staan. Bij een *synclastic* structuur bevindt het middelpunt van de twee krommingsrichtingen zich aan dezelfde kant van het membraan. Bij een *anticlastic* vorm is dit niet zo en liggen de krommingsmiddelpunten juist aan twee verschillende kanten van het doek (Designing Buildings Ltd., 2018). De *synclastic* vorm wordt in stand gehouden met behulp van pneumatische druk die het doek doet opbollen. *Anticlastic* structuren ontstaan wanneer er op mechanische wijze een spanning wordt aangebracht, bijvoorbeeld met pilaren. Voorbeelden van *synclastic* en *anticlastic* structuren zijn gegeven in afbeelding 4.3.



Figuur 4.3: Voorbeelden van bouwkundige membraanvormen.
Links: *synclastic*; rechts: *anticlastic*
(Alex Heslop, 2010)

4.3 VOORSPANNING

Om ervoor te zorgen dat de membranen hun vorm behouden wanneer er belasting op het membraan werkt wordt er een voorspanning aangebracht op het doek. Net als voor de algemene krachtwerking van membranen kan het principe van voorspanning gemakkelijk worden uitgelegd door de membraanconstructie te reduceren tot een simpele kabelconstructie. In het volgende voorbeeld worden twee kabels in verschillende voorspanningssituaties bestudeerd:



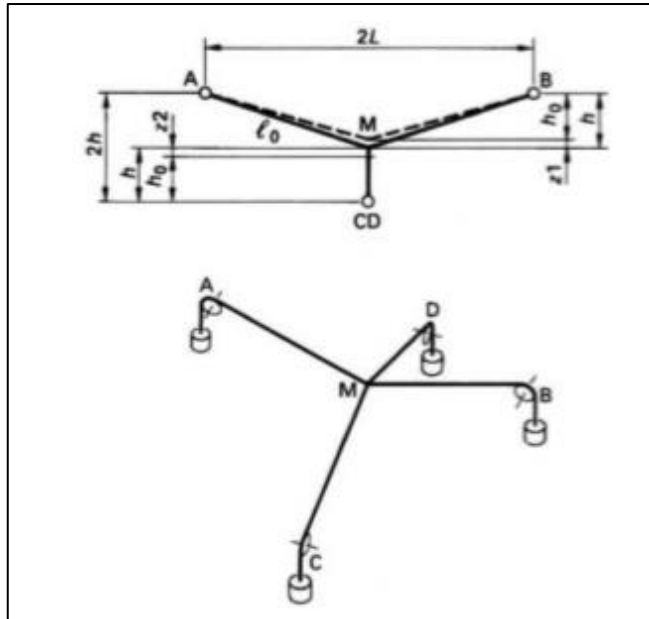
Figuur 4.4: Voorspanning visueel uitgelegd
(Brian Forster, 2004)

In de linker situatie is geen sprake van voorspanning. De kabel wordt in het midden (punt K) belast door een verticale, naar beneden gerichte kracht. Door de eindige elasticiteitsmodulus van het bovenste deel van de kabel zal deze vervormen waardoor punt K naar beneden wordt getrokken. De rest van de kabel staat nu niet meer gespannen en zal vanaf punt K slap gaan hangen naar beneden.

In het rechtervoorbeeld is er wél een voorspanning aangebracht. Wanneer deze met dezelfde belasting in punt K naar beneden wordt belast zal het punt K nog wederom naar beneden

verplaatsen. Het verschil met het eerste voorbeeld is dat er nu nog steeds spanning aanwezig is in het onderste deel van de kabel. Deze spanning is uiteraard kleiner dan de initiële voorspanning die op de kabel stond, maar omdat er nog steeds een trekkracht aanwezig is in de kabel zal deze strak blijven staan en niet slap gaan hangen zoals in het eerste voorbeeld.

Dit is echter een vereenvoudigd voorbeeld ten opzichte van daadwerkelijke membraanconstructies. In het volgende voorbeeld is een realistischer voorbeeld gegeven: hier zijn vier kabels te zien die in het midden (punt M) aan elkaar verbonden zijn. Twee van deze kabels lopen omhoog naar de punten A en B, en de andere twee kabels lopen loodrecht hierop maar dan omlaag naar de punten C en D. Hetzelfde principe als voor het vorige voorbeeld komt hier naar voren. Wanneer in punt M een omlaag gerichte kracht het punt naar beneden doet zakken zal de spanning in kabels CM en DM wegvallen. Deze komen dan slap te hangen. Om te voorkomen dat dit gebeurt wordt er een voorspanning aangebracht. Dit tweede voorbeeld lijkt veel meer op een daadwerkelijke membraanconstructie, zeker wanneer er tussen de punten A, B, C en D extra kabels worden toegevoegd. Het principe van voorspanning in een membraan is nu ook gemakkelijker in te beelden.

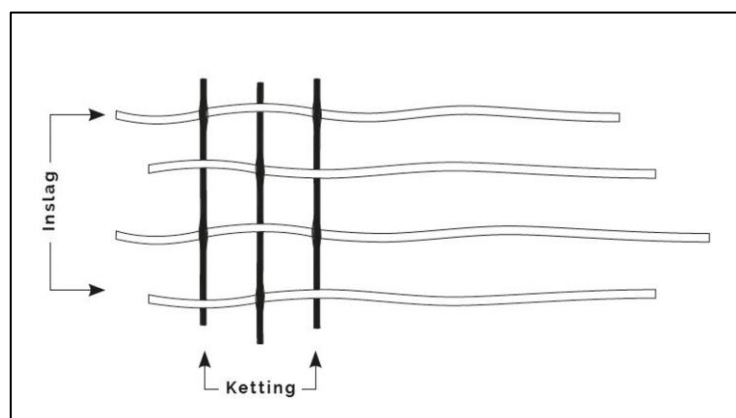


Figuur 4.5: Voorspanningsprincipe afgebeeld in drie dimensies (Brian Forster, 2004)

Om de benodigde voorspanning te bepalen zijn er vuistregels opgesteld. Hier wordt meer aandacht aan geschonken in hoofdstuk 7.

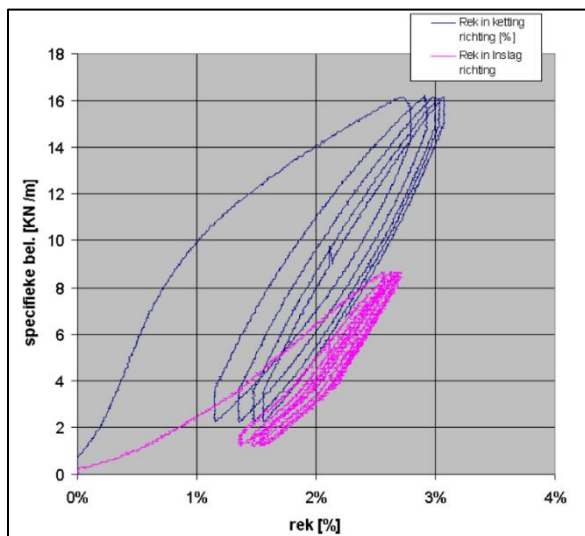
4.4 MEMBRANEN

De membranen die gebruikt worden in tentconstructies worden gemaakt door lange kabels in elkaar te verweven, loodrecht op elkaar. Dat gebeurt door een aantal zogenaamde 'ketting' kabels strak parallel ten opzichte van elkaar en daardoorheen 'inslag'-kabels te weven, zoals te zien is in afbeelding 4.6.



Figuur 4.6: Het weven van een membraan (EssenzaHome, 2020)

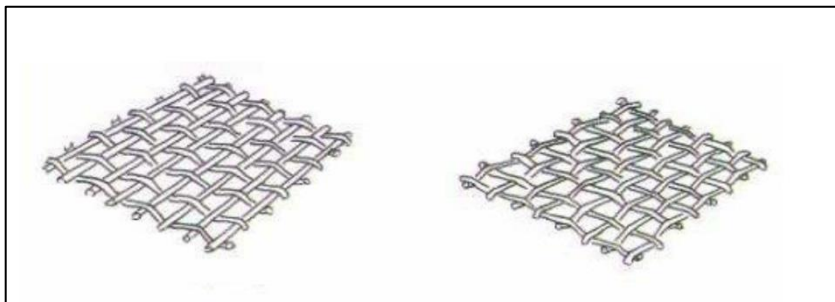
Het gevolg hiervan is echter dat de meeste zeilen door deze manier van weven een grotere stijfheid hebben in hun 'ketting' richting dan de 'inslag' richting. Voor het gedrag van een



membraan onder spanning is het belangrijk te weten wat de rek is in verschillende richtingen. Dat kan worden bepaald met een zogenaamde bi-axiale spanningsproef. Een resultatengrafiek van een bi-axiale spanningsproef is te zien in afbeelding 4.7. Hier is duidelijk te zien dat het gedrag van een membraan onder spanning verandert naarmate het doek herhaaldelijk onder spanning wordt gezet.

Figuur 4.7: Bi-axiale spanningsproef (Rogier Houtman, 2020)

Dat komt doordat de vezels van het membraan zich herschikken bij iedere keer dat het membraan uitgerekt wordt. Wanneer er een herschikking van vezels is gevonden in het membraan zal het membraan elastisch vervormen en na ontspanning weer terug vervormen naar de gerangschikte situatie. Het principe van het herschikken van de vezels staat duidelijk afgebeeld in afbeelding 4.8. Links is de originele schikking van de vezels te zien zoals die zich voordoet nét na het weven. Hier zijn de 'ketting' vezels recht afgebeeld en de 'inslag' vezels kronkelen ertussendoor. In het rechterplaatje is de situatie ná het oprekken van het membraan getekend. Hier zien we dat de vezels in beide richtingen ongeveer evenveel om elkaar heen slingeren.



Figuur 4.8. Herschikking van vezels na de spanningsproef (Rogier Houtman, 2020)

De weefsels worden meestal gemaakt van polyester of glasvezel. In een membraan zorgt het weefsel van vezels voor de sterkte van het membraan. De coating van het weefsel beschermt het weefsel tegen verschillende weersomstandigheden, zorgt ervoor dat het zeil waterdicht is en stabiliseert daarnaast ook de ligging van de losse vezels in het membraan. Door verschillende materialen te combineren met verschillende coatings kunnen er diverse membranen gemaakt worden (Houtman, Tentech, 2020). Vier noemenswaardige membranen hiervan worden op de volgende pagina besproken.

Polyesterweefsel met PVC coating:

Dit materiaal wordt erg vaak toegepast in tentconstructies. Het is geschikt voor zowel permanent en tijdelijk gebruik. Het polyester is vergeleken met het glasvezelweefsel veel flexibeler waardoor dit materiaal de voorkeur krijgt wanneer het toegepast wordt in tijdelijke constructies. Het polyester kan namelijk een rek tot 20% aan voordat het scheurt. Daardoor is het gemakkelijker te vervoeren, monteren en demonteren. Door de levensduur (15 tot 20 jaar) en een brandvertragende werking, is dit een veelgebruikt materiaal, vooral dus voor seizoensgebonden constructies. Binnen dit type materiaal worden nog vijf subcategorieën onderscheiden, welke van I tot V lopen. Deze verschillen in dikte en daardoor dus in sterkte.

Glasvezelweefsel met PTFE coating:

De glasvezels in dit materiaal leveren een sterker materiaal dan het polyester. Met een levensduur tot wel 40 jaar is het duurzamer dan het polyester. Het nadeel van de structuur van glasvezel is dat het een hoge stijfheid heeft waardoor het al kan scheuren bij een rek van 5%. Door deze hoge stijfheid is het minder bewerkbaar en handbaar. Wanneer het glasvezelweefsel vaak wordt gebogen of gevouwen (tijdens het monteren bijvoorbeeld) kan het materiaal beschadigd raken, wat tot het onverwachts scheuren van het membraan kan leiden. Daarnaast is het glasvezelweefsel duurder dan het polyesterweefsel.

Glasvezelweefsel met siliconen coating:

Dit materiaal heeft dezelfde glasvezelstructuur en is dus ook vrij gevoelig voor ruige behandeling. De siliconen coating is gemakkelijker te produceren dan de PTFE coating en daardoor ook minder duur. Het tweede voordeel van siliconen coating ten opzichte van PTFE is dat het beter is voor het milieu. Daarnaast heeft het ook een brandvertragende werking. Het grote nadeel van een siliconencoating is dat het een kleverige laag is op het membraan, waardoor stof en vuil uit de lucht snel op het doek plakken. Hierdoor wordt de tentconstructie vaak erg snel vies.

ETFE folie:

Zoals uit de naam af te leiden valt, is dit geen weefsel maar een soort folie. Wanneer dit materiaal wordt gebruikt, worden meerdere lagen met lucht ertussen gevormd. Daardoor heeft het een goede isolerende werking. Het heeft een lichtdoorlatendheid van bijna 95% waardoor het in architectonisch opzicht veel mogelijkheden biedt. Wanneer er een enkele laag van dit materiaal wordt gebruikt, is het door de lage rekbaarheid slechts in het geval van kleine overspanningen te gebruiken.

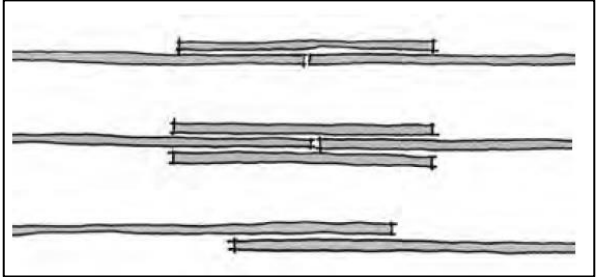
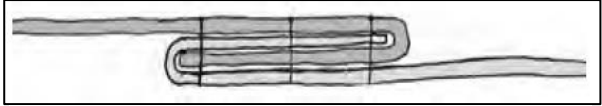
4.5 VERBINDINGEN EN DETAILLERING

De membranen van een tentconstructie blijven uiteraard niet vanzelf staan. Ze zijn verbonden aan andere elementen zoals pilaren, kabels of zelfs andere membranen om zo een rigide constructie te vormen (Forster, 2004). De detaillering, oftewel hoe de membranen aan deze verschillende elementen verbonden zijn, wordt in deze paragraaf behandeld. Daarin wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende details:

- Wanneer twee membranen aan elkaar verbonden worden, noemen we deze verbinding een naad.
- De randen van een zeil moeten goed afgewerkt zijn om de membranen duurzaam te maken.
- Een membraan wordt opgelegd aan een pilaar of een kabel vindt men een hoekplaat.

NADEN

Het kan voorkomen dat twee membranen aan elkaar gemaakt moeten worden. Waar ze aan elkaar zitten vindt men een zogenaamde naad (Forster, 2004). Er zijn een aantal verschillende type naden die gebruikt worden:

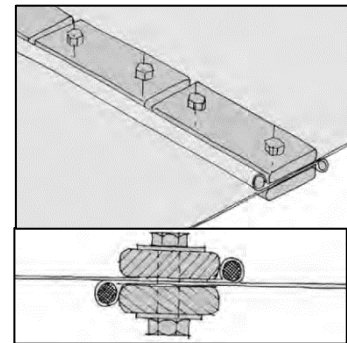
- *Gelaste naden:* Dit is het meest gebruikte soort naad door de waterdichtheid en de goed controleerbare manier van fabricatie. Het gaat om overlappende stukken weefsel waarvan de coating aan elkaar wordt gesmolten. De sterkte van de naad wordt dus met name bepaald door de mate van hechting aan het weefsel, en door de breedte van de overlap.
- *Gestikte naden:* Deze naad wordt het meest gebruikt bij niet-gecoate weefsels of bij weefsels die niet gelast kunnen worden. Ze zijn echter niet waterdicht dus moeten vaak nog bedekt worden. Ze zijn geschikt voor lage spanningen die loodrecht op het membraan staan. Daarom hebben ze vaak niet de voorkeur boven andere soorten naden.
- *Gecombineerde naden:* Om een extra sterke naad te maken wordt een gecombineerde naad toegepast. Dan wordt de naad aan elkaar gestikt en vervolgens aan elkaar gelast. Door na het stikken een extra stuk stof over de naad te leggen kan de waterdichtheid

Figuur 4.9: Gelaste naden (Forster, 2004)

Figuur 4.10: Gestikte naden (Forster, 2004)

vergroot worden. De gecombineerde naad wordt vaak gebruikt in warme landen waar de temperatuur van het membraan tot zo'n 70 graden kan oplopen.

- *Geveterde naden:* Wanneer een tentconstructie snel en gemakkelijk in en uit elkaar gehaald moet kunnen worden, kan een geveterde naad worden toegepast. Er zijn verschillende manieren om membranen aan elkaar te verbinden. De sterkte van deze verbinding wordt bepaald door de sterkte van de veter en de versterking van de vetergaten.
- *Gelijmde naden:* Omdat dit een dure en arbeidsintensieve manier van verbinden is wordt deze methode niet vaak gebruikt om twee membranen te verbinden. Wanneer een scheurtje in het weefsel gerepareerd moet worden kan het lijmen wél van toepassing zijn.
- *Geklemde naden:* Bij geklemde naden worden er kleine solide stroken aan weerszijden van de twee overlappende stukken membraan tegen elkaar aan geklemd, bijvoorbeeld met bouten en moeren. Om de kromming van een membraan de kunnen blijven volgen, kunnen deze stroken niet te lang zijn. Ze worden gemaakt van harde materialen zoals ijzer of aluminium. Deze verbinding ziet er erg sterk uit en wordt veel gebruikt om grote, geprefabriceerde membranen aan elkaar te koppelen.



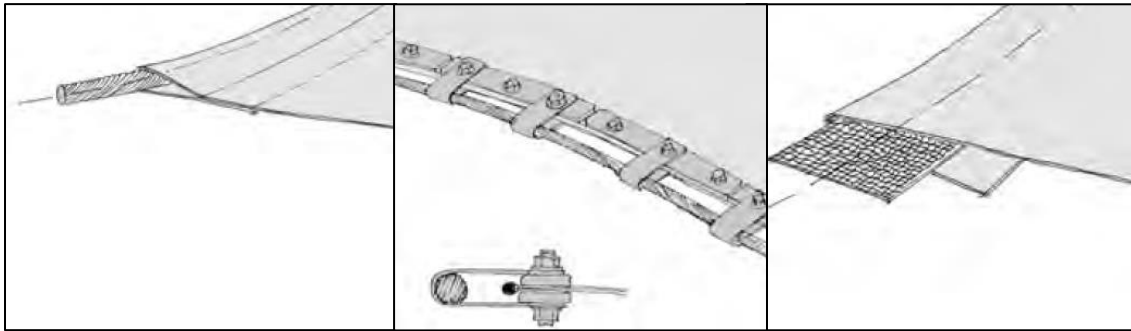
Figuur 4.11: Geklemde naad
(Forster, 2004)

RANDEN

De randen van een zeil moeten goed afgewerkt worden om het zeil op spanning te houden en bovendien het zeil duurzaam te maken. In de randen moeten zowel normaalkrachten als tangentiële krachten worden afgedragen naar de hoeken van het membraan. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen flexibele randen en starre randen:

- *Flexibele randen:* Met deze randafwerking ontstaat er een initiële voorspanning in het weefsel als resultaat van de trekkrachten in het membraan. Er zijn verschillende manieren om een flexibele rand te maken:
 - o De rand van een membraan wordt dubbel gelast en door de ontstane 'zak' wordt een kabel getrokken. De lengte van de las is hier echter beperkend. Wanneer de tangentiële krachten groter worden, wordt de concentratie van deze kracht kritisch bij de hoekplaten en kan er beter naar de volgende optie gekeken worden:
 - o Door de kabel buiten de rand van het membraan te laten lopen worden de krachten in de hoeken ingeperkt. Deze rand wordt dan ook vaak toegepast bij grote overspanningen vanaf 20 meter. Dit lijkt op de geklemde naad uit de vorige paragraaf.

- Ook kan er een riem over de rand van het membraan gelast worden die de rand versterkt. Dit ziet men terug bij kleinere overspanningen zoals oprolbare daken of zelfs paraplu's.

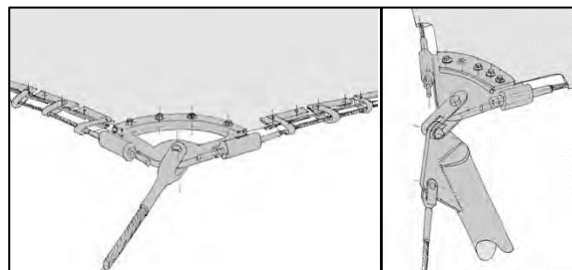


Figuur 4.12: Flexibele randversterkingen. Van links naar rechts in de volgorde zoals hierboven beschreven. (Forster, 2004)

- **Starre randen:** Hier wordt het weefsel strak gehouden door een starre ondersteuning die voor een veel grotere laterale stijfheid zorgt. Ook hier kunnen verschillende typen worden onderscheiden:
 - Vergelijkbaar met de kabel door de zak in de als eerste besproken flexibele rand, kan er ook een buis door zo'n zak lopen. Het is belangrijk dat het membraan niet over de balk schuift. Ook moet de hoek van de zak klein genoeg zijn zodat de naad niet loskomt.
 - Ook kan er aan een vaste balk een zeil bevestigd worden met behulp van haken en een geveterde verbinding. Door deze veterverbinding werken er alleen loodrechte en tangentiële krachten op de balk, wat ervoor zorgt dat deze starre rand in veel gevallen toegepast kan worden.
 - Het zeil kan ook met behulp van klemmen op een star profiel geklemd worden, vergelijkbaar met de geklemde naden.

HOEKDETAILLERING

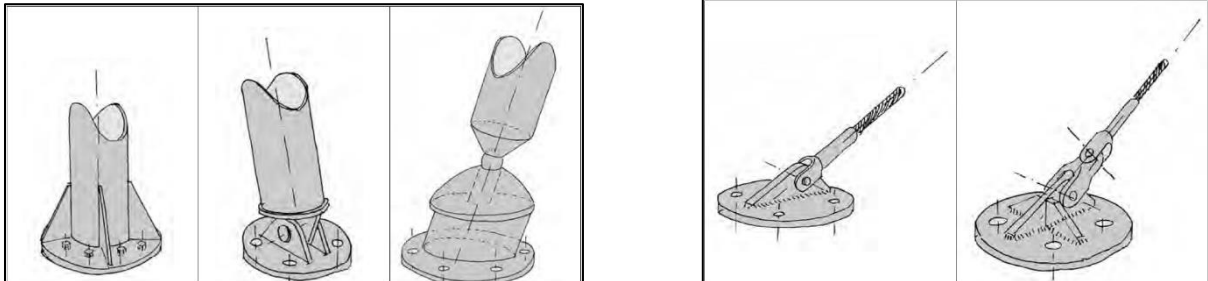
De membraankrachten die op de randkabels zijn overgedragen, worden door de kabels naar de hoeken geleid. Daar worden de krachten vervolgens overgebracht op de ondersteunende constructie. Er zijn verschillende manieren om dit op een veilige manier te ontwerpen. Zo kennen we de hoekplaat los van het weefsel of juist direct erop geklemd, eventueel met kederprofielen, riemen of doorlopende randkabels die om de hoekplaat heen lopen. Enkele voorbeelden van veel voorkomende hoekplaten zijn te vinden in afbeelding 4.11.



Figuur 4.11: Voorbeelden van hoekdetailering (Forster, 2004)

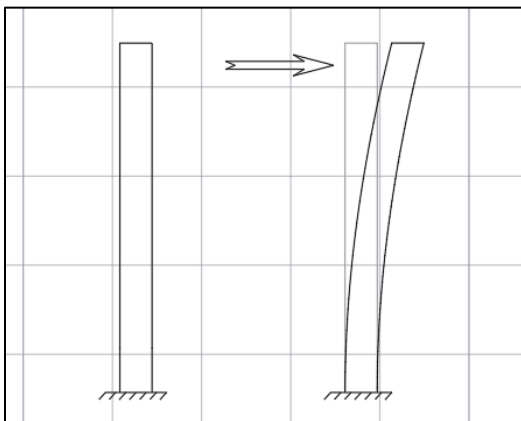
4.6 VERANKERING

De membraanconstructie wordt met wordt in vorm gehouden door steunmasten en kabels. Deze masten en kabels moeten op een correcte manier aan de bodem verbonden zijn, om voor een veilige krachtsafdracht te zorgen. Dat gebeurt met basisplaten. Deze basisplaten komen in verschillende varianten voor zoals te zien is in afbeelding 4.12.

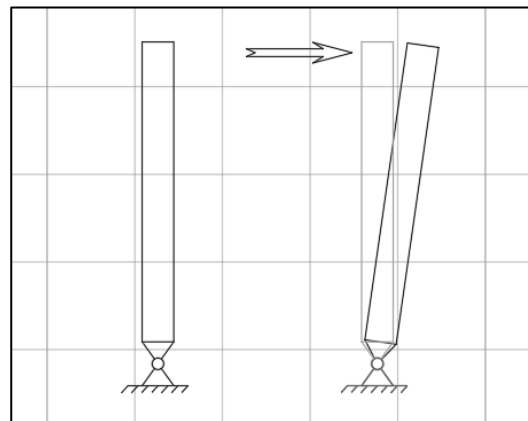


Figuur 4.12: Verankering voor steunmasten (links) en kabels (rechts). (Houtman, Tensinet European Design Guide for Tensile Surface Structures, 2004)

Een membraanconstructie is echter erg flexibel en vervormt onder verschillende belastingen, zoals de windbelasting. Wanneer de punt van de constructie zich verplaatst, zal de mast mee moeten draaien. De mast mag dan niet ingeklemd zijn, anders zal de mast moeten buigen om deze verplaatsing toe te staan waardoor grote spanningen in de mast ontstaan. Om toch de verwachte vervormingen toe te staan zonder daarbij veel te vervormen, worden de masten vaak scharnierend opgelegd. Dit principe wordt verhelderd in afbeeldingen 4.13 en 4.14.



Figuur 4.13: Vervorming van een ingeklemd mast (AutoCAD)



Figuur 4.14: Vervorming van een scharnierend opgelegde mast (AutoCAD)

5. CASE STUDY

Zoals in de inleiding beschreven zijn tentconstructies een effectieve manier om schaduw te creëren, om zo groepen mensen te beschermen tegen de schadelijke Uv-straling van de zon. Deze tentconstructies worden daardoor vaak toegepast op grote openbare gelegenheden, zoals festivalterreinen. Het bedrijf Tentech is een bedrijf dat deze membraanconstructies ontwerpt en aanlevert. In dit hoofdstuk zal een case verkregen vanuit dit bedrijf onderzocht worden. Allereerst wordt de casus bestudeerd en ontleed. Vervolgens worden er één of meerdere ontwerpen gemaakt en doorgerekend om zo tot een oplossing voor deze case te komen.

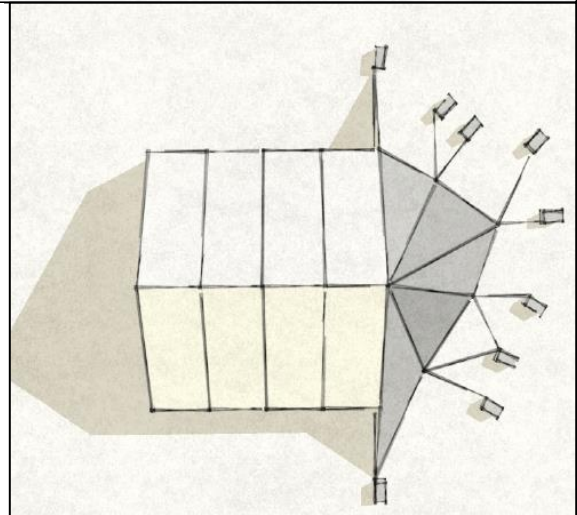
5.1 SITUATIE

De situatie is als volgt. Op een festivalterrein ergens in Nederland wordt aan een losstaande hal een zonwerende luifel gemonteerd. Voor deze luifel is al een eerste ontwerp gemaakt, te zien in figuur 5.1. De hal is hier wit ingekleurd. Het gaat bij deze case om het opnieuw ontwerpen van de grijs getekende luifel. De kopwandgevel van de hal is in het geel gekleurd. Onder de luifel zal een theatergroep spelen waarbij de kopwandgevel dient als decor.



Figuur 5.1: Situatieschets (Rogier Houtman)

Het eerste dat opvalt aan het huidige ontwerp is dat er gebruik wordt gemaakt van platte, driehoekige vlakken. Hierdoor ziet het ontwerp er strak uit. Een groot nadeel van deze vlak gespannen doeken is echter dat ze zullen klapperen in de wind. Dit fenomeen is vergelijkbaar met de werking van een blaasinstrument, waar een zogenaamd 'riet' in trilling wordt gebracht door er overheen te blazen. Om te voorkomen dat ditzelfde effect plaats vindt op de luifel, is het verstandiger om na te denken over dubbel gekromde membranen.

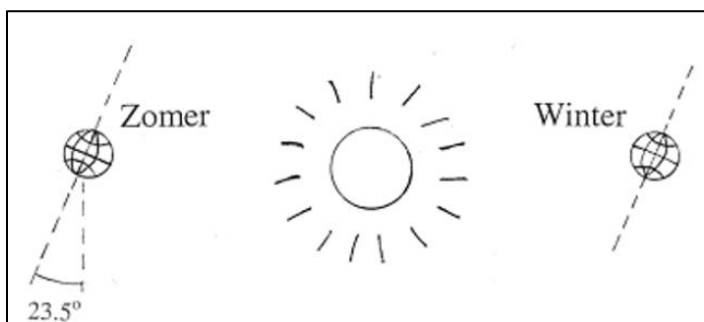


Figuur 5.2: Bovenanzicht situatieschets (Rogier Houtman)

De *monoclastic* en de *synclastic* vormen worden met behulp van pneumatische druk overeind gehouden. Aangezien het hier gaat om een luifel werkt dat niet en zal de het ontwerp van de luifel dus moeten bestaan uit *anticlastic* vormen, ook wel negatief gekromd genoemd.

Ook is het belangrijk om te kijken naar de functionaliteit van dit ontwerp. Wanneer er wordt gekeken naar de stand van de zon kan men zien dat de huidige luifel voornamelijk schaduw werpt op de kopwandgevel, en niet zozeer op de grond vóór de tent waar het toneelstuk plaats vindt. De precieze locatie en oriëntatie van de hal zijn niet gespecificeerd. Daarom zijn bepaalde aannames gemaakt waarmee de effectiviteit van de luifel bepaald kan worden. De oriëntatie van de hal bepaald namelijk uit welke hoek de zon op de luifel schijnt.

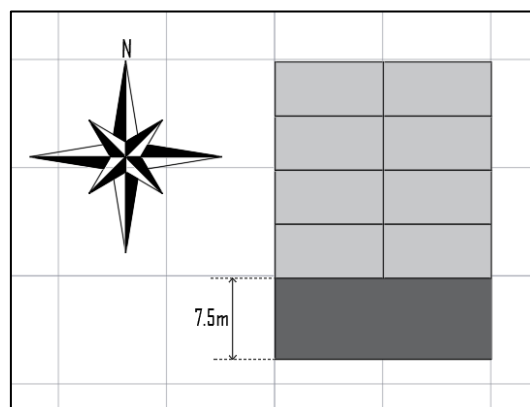
Aan het begin of eind van de dag zal de zon altijd onder de luifel doorschijnen omdat de zon dan erg laag aan de hemel staat. Dit is niet te voorkomen als de luifel open aan de voorkant moet zijn. Het is echter ook geen kritieke situatie omdat de zonkracht dan ook veel minder hoog is. Daarom wordt er hier gekeken naar het moment dat de zon het hoogst aan de hemel staat.



Figuur 5.3: Bepaling van de zonstand in Nederland (LION, 2004)

De hoogte van de zon is eenvoudig te berekenen: Nederland ligt op ongeveer 52 graden Noorderbreedte. Dan betekent dat de zon in de zomer op het hoogste punt vanuit Nederland bekeken op het zuiden staat. De hoek die de zon dan met de horizon maakt is $90 - 52 = 38$ graden. Aangezien de as van de aarde scheef staat met 23,5 graad, telt dit er in de

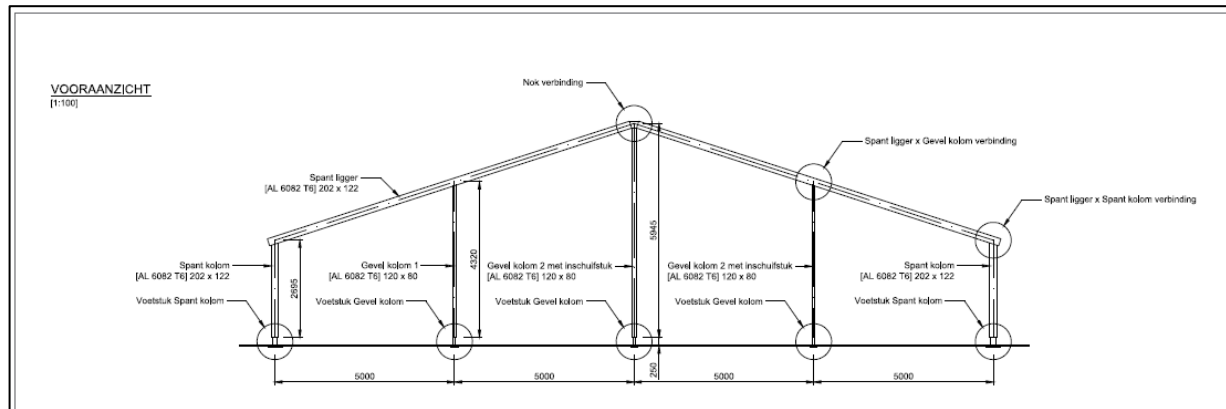
zomer nog bovenop en in de winter er van af. Theoretisch gezien zou de hoogste zonnestand in Nederland dus $38 + 23,5 = 61,5$ graad. Aangezien de zon uit ons perspectief dan in het zuiden staat, gaan we ervanuit dat de kritische situatie zich voordoet als ook de luifel naar het zuiden gericht is. Deze situatie staat geschetst in afbeelding 5.4.



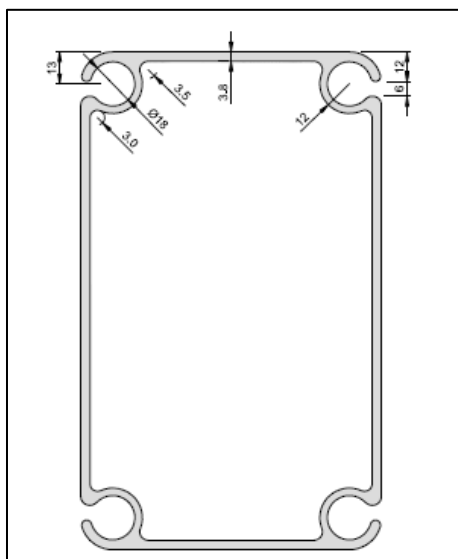
Figuur 5.4: Oriëntatie van de hal en ligging van de vloerplaten in het donkergrijs (AutoCAD)

5.2 SPECIFICATIES VAN DE HAL

Er moet dus een luifel worden ontworpen die aan een bestaande hal gemonteerd kan worden. Deze hal is 20 meter breed, heeft aan de zijkanten een hoogte van 2945 mm en in de nog een hoogte van 6195 mm (zie afbeelding 5.5). Dit zijn de belangrijkste benodigde afmetingen voor het ontwerpen en doorrekenen van het luifelontwerp. De overige afmetingen van de hal zijn terug te vinden in de bouwtechnische tekeningen in bijlage A.

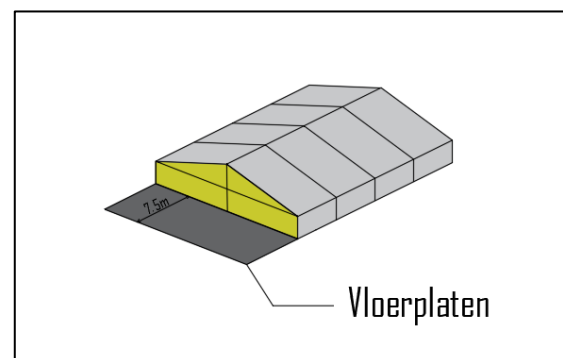


Figuur 5.5: Bouwtechnische tekening voorkant hal



Figuur 5.6: Doorsnede kederprofiel

De hal is gebouwd op vloerplaten, welke de fundering vormen voor de constructie. Deze vloerplaten steken aan de voorkant van de hal 7,5 meter uit, zoals te zien is in afbeelding 5.4 en 5.7.



Figuur 5.7: Vloerplattenplan onder de hal (AutoCAD)

5.3 PROGRAMMA VAN EISEN

In het Programma van Eisen (PvE) staan alle eisen opgesteld waar het ontwerp van een constructie aan dient te voldoen. In het PvE worden vaak ook wensen van de opdrachtgever opgenomen. Dit zijn geen harde eisen, maar dienen wel in het achterhoofd gehouden te worden tijdens het ontwerpproces.

Voor dit project is in overleg met Rogier Houtman het Programma van Eisen opgesteld. Daar heb ik zelf nog enkele eisen aan toegevoegd om tot het volgende Programma van Eisen te komen:

- De luifel wordt ontworpen voor een 20 meter brede hal, maar moet ook opgeschaald kunnen worden naar een 25 meter brede variant.
- De voorste mast van de luifel mag maximaal 7,5 meter van de hal vandaan staan zodat deze nog op de liggende vloerplaten komt.
- Aangezien de luifel op een festivalterrein moet kunnen worden geïnstalleerd, mag het publiek niet teveel hinder ondervinden van de luifel, zowel fysiek als visueel.
- De extra horizontale krachten ten aanzien van de luifel moeten op een veilige manier afgedragen worden op de ondergrond, zonder dat de bestaande hal hier te veel wordt mee belast.
- De luifel moet effectief zijn in het creëren van schaduw in de warmste uren van de dag.
- Het gaat om een tijdelijke constructie op een festivalterrein. De constructie moet daarom gemakkelijk zijn te monteren en demonteren.
- Onder de luifel komt een toneelgroep te spelen. Gewenst is dat er aandacht wordt besteedt aan ruimte voor de benodigde apparatuur.
- Door het gebruik van natuurlijke elementen moet een duurzame uitstraling gecreëerd worden.

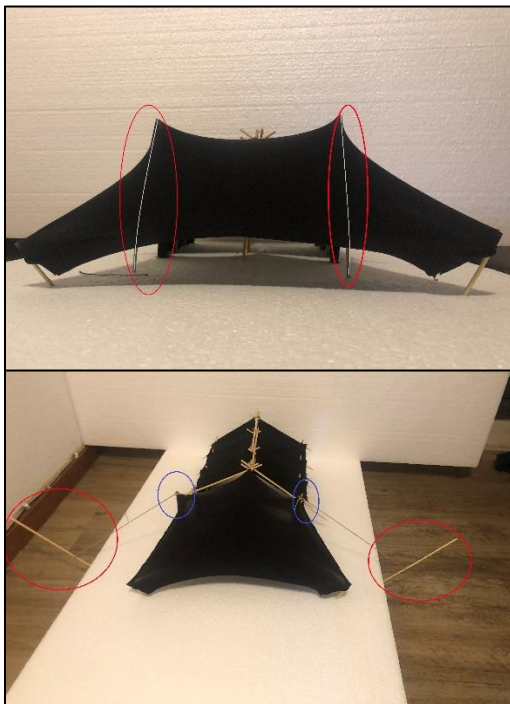
6. ONTWERPCONCEPTEN

Zoals besproken in de ontwerpanalyse in hoofdstuk 6 is het voor de stabiliteit van het doek belangrijk de tentconstructie op te bouwen uit *anticlastic* vormen. Dat gebeurt het doek te spannen over een aantal pilaren, waardoor conische vormen ontstaan. Het is niet zo gemakkelijk om voor te stellen wat het gedrag is van een membraanconstructie. De vorm die het doek aanneemt is door de gegolfde vlakken niet eenvoudig om in drie dimensies te schetsen. Daarom is het handig om schaalmodellen te maken. Voor deze case is de losstaande hal nagebouwd, waarop op kleine schaal verschillende ontwerpen gemonteerd en geprobeerd kunnen worden. Zo krijgt met snel gevoel voor het gedrag van elk van de ontwerpen.

Door te variëren in een aantal factoren binnen het ontwerp van de luifel kunnen verschillende modellen gemaakt worden. Door bijvoorbeeld het aantal gebuikte pilaren of de stand van deze pilaren te variëren ontstaat een steeds nieuwe vorm met elk zijn eigen voor- en nadelen ten opzichte van andere vormen. In dit hoofdstuk zullen een aantal ontwerpideeën gepresenteerd worden.

6.1 BEGINFASE

In de eerste fase van het ontwerpproces is er voornamelijk geëxperimenteerd met piepschuim, satéprikkers en een stuk elastische stof. Met behulp van deze maquettes, afgebeeld in figuur 6.1, kunnen al een aantal dingen afgeleid worden.



Het eerste ontwerp, afgebeeld in figuur 6.1, bestaat uit twee verticale pilaren waar het doek overheen gespannen is. De ene kant van de luifel is bevestigd aan de hal, de andere kant wordt met behulp van twee kleine pilaren vastgehouden. De twee pilaren in het midden houden het doek omhoog en op spanning. Er zijn twee dingen die al snel opvallen. Ten eerste zorgt de spanning in het doek ervoor dat de bovenkanten van de twee centrale pilaren naar elkaar toe buigen. Dit is duidelijk gemaakt met de rode cirkels. Om dit te voorkomen moeten er kabels van de top van deze twee pilaren naar de zijanten lopen. Daarnaast valt op dat het doek moeilijk op spanning te houden is tussen de twee kleinere pilaren aan de voorkant van de luifel, omdat de vrije overspanning daar relatief groot is.

*Figuur 6.1: Maquette met twee verticale pilaren.
Boven: zonder extra kabels; onder: met extra kabels.*

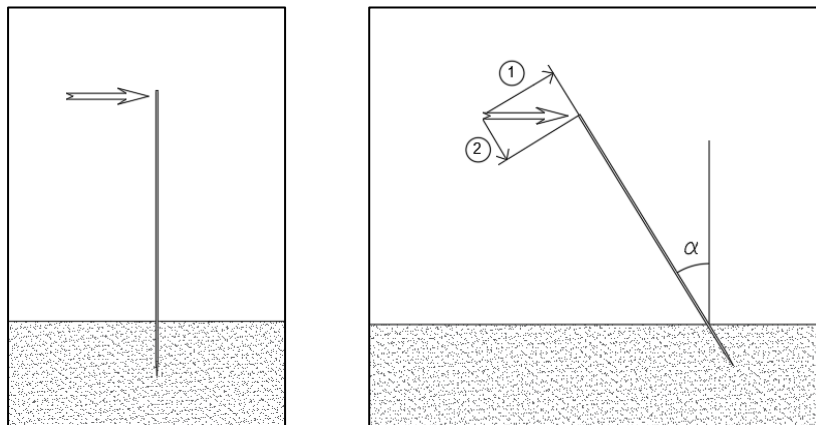
Om dit te voorkomen kan er een derde pilaar in het midden worden toegevoegd, welke verder naar voren staat. Deze zorgt ervoor dat het doek beter op spanning wordt gehouden. Zoals te zien is in afbeelding 6.2 moet hier echter ook een extra spankabel voor worden aangelegd.

Deze derde pilaar staat echter in het midden, wat een visuele beperking voor het publiek veroorzaakt. Er zullen dus maar twee steunmasten in het midden komen te staan, welke iets dichter bij elkaar worden gezet dan in de foto's van de maquettes is te zien.



Figuur 6.2: Maquette met drie steunmasten

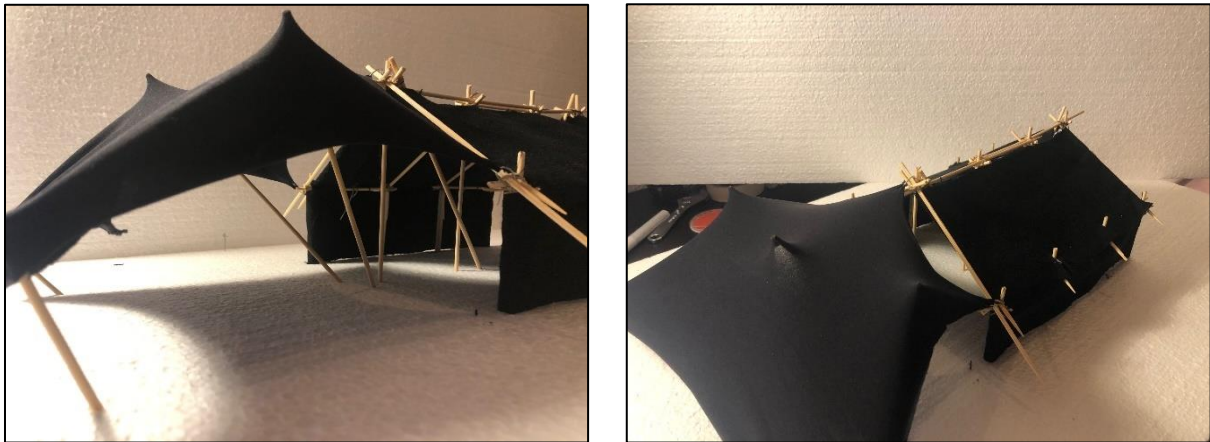
De buiging in de pilaren wordt veroorzaakt door de momenten die op de pilaar werken. Deze momenten worden veroorzaakt door de spanningen in het membraan, welke resulteren in een horizontale kracht die aangrijpt in de punt van deze pilaren. Deze kracht is naar het midden van de luifel gericht. Het aanleggen van kabels die naar buiten lopen en met een trekkracht naar buiten de membraankracht naar binnen compenseren, vermindert het statisch moment in de pilaar. Een andere manier om het moment in de pilaar te verkleinen, zonder het gebruik van kabels die extra ruimte innemen aan de zijkant van de luifel innemen, is het scheef plaatsen van de pilaren. Hierdoor neemt de drukkracht in de pilaar toe en neemt het moment af. Dit principe is uitgelegd in afbeelding 6.3.



Figuur 6.3: Het verkleinen van het moment in een diagonale steunmast ten opzichte van een verticale steunmast (AutoCAD)

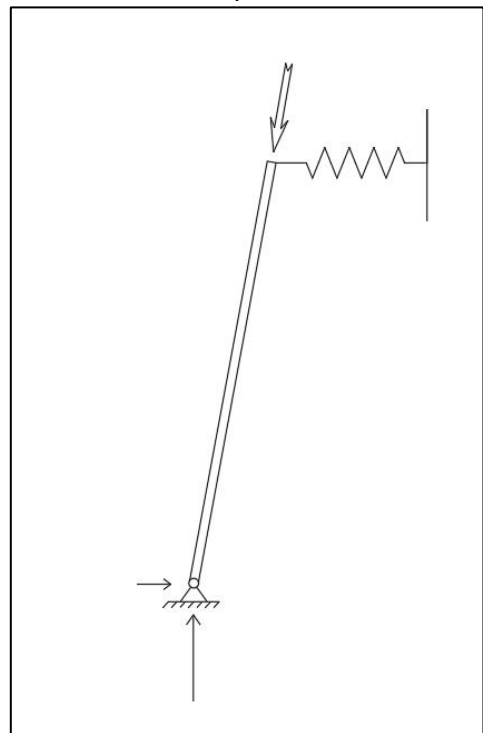
De buiging van een pilaar wordt veroorzaakt door de kracht die loodrecht op deze pilaar staat. Wanneer de pilaar onder een hoek wordt gezet, verandert ook de hoek waaronder de kracht op de pilaar werkt. F_h is in dit voorbeeld de horizontale kracht die door spanning in het membraan op de pilaar werkt. De kracht die buiging veroorzaakt is hier F_1 . Deze is gelijk aan $\cos(\alpha)$ maal F_h . Een scheefstand van α graden resulteert in een verkleiningsfactor van $\cos(\alpha)$.

Door dit eenvoudige mechanische principe toe te passen in de maquettes ontstaat een ander ontwerp, welke te zien is in afbeelding 6.4.



Figuur 6.4: Maquette van nieuw ontwerp met diagonale steunmasten. (Links twee en rechts drie steunmasten)

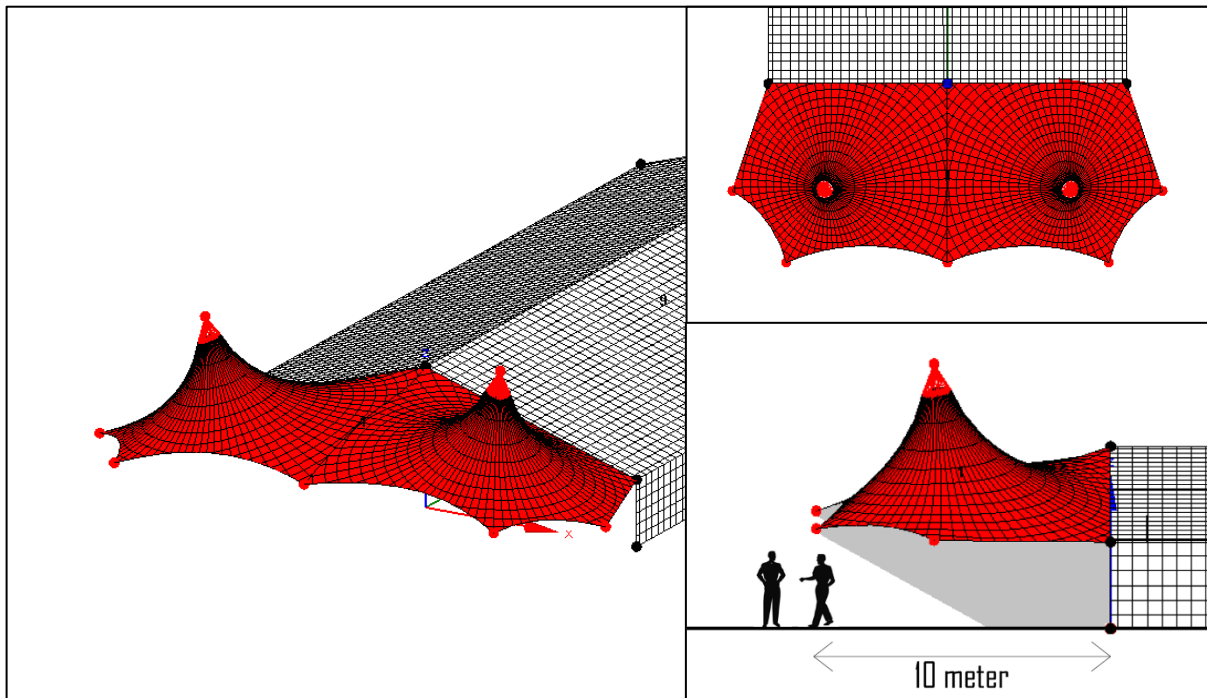
Er is een belangrijk verschil dat opgemerkt moet worden tussen de maquette en een daadwerkelijke tentconstructie. Bij de maquettes zijn de satéprikkers namelijk in het piepschuim geprikt, wat in een ingeklemde oplegging resulteert. De satéprikker kan immers niet vrij roteren in het piepschuim. Zoals in paragraaf 4.6 is besproken, worden de masten van tentconstructies in de realiteit meestal scharnierend opgelegd om de vervormingen van het zeil toe te laten en hoge spanningen in de mast te voorkomen. De stabiliteit van de mast wordt dan bepaald door de vervormbaarheid van het membraan. De invloed van het membraan kan daarom met een horizontale translatieveer worden benaderd, zoals te zien is in afbeelding 6.5. Wanneer de punt van de mast horizontaal wordt verplaatst, zorgt het membraan er voor dat de constructie terugkeert naar de evenwichtspositie. Op zowel de voet als de punt van de mast staan nu geen momenten waardoor er geen buiging optreedt in de mast. De initiële scheefstand van de mast wordt bepaald door de richting van de reactiekracht van het membraan op deze locatie. Hier wordt in paragraaf 6.2 verder op ingegaan.



Figuur 6.5: Realistische oplegging van steunmasten (AutoCAD)

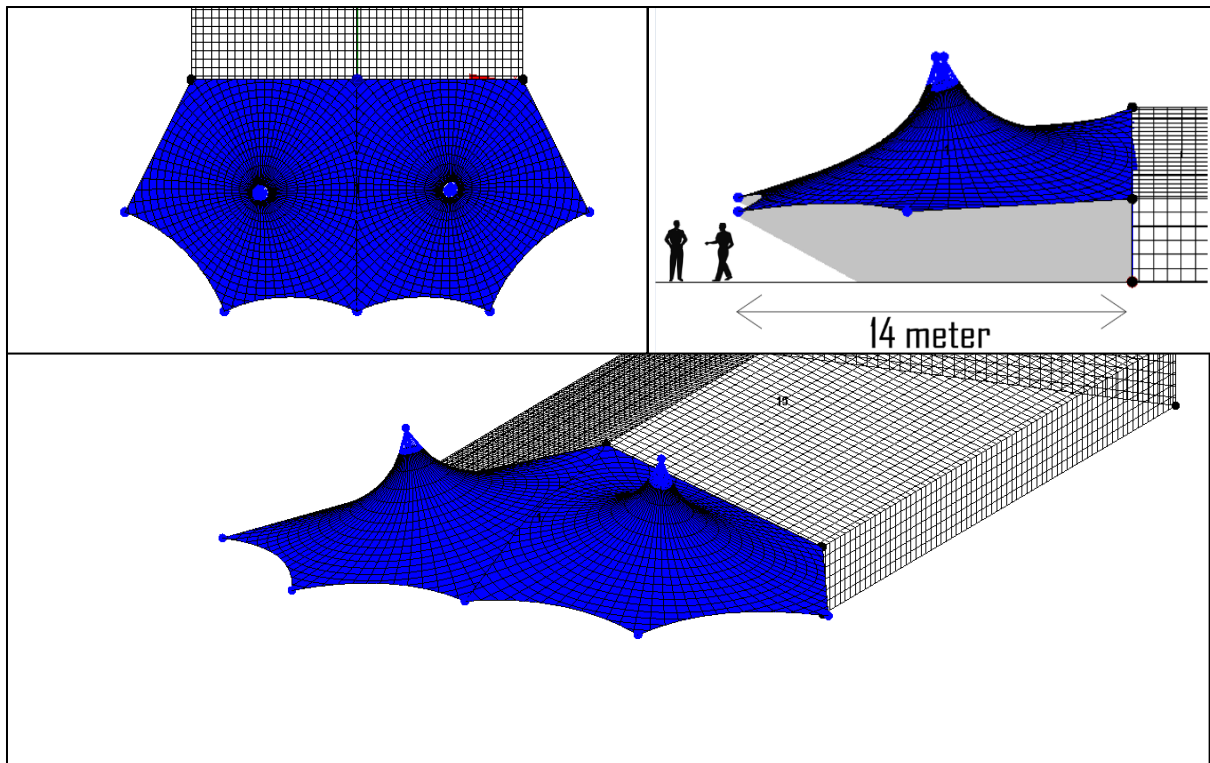
6.2 ONTWERPVOORSTELLEN

In deze paragraaf worden de eerste ontwerpconcepten gepresenteerd met behulp van het programma Easy.



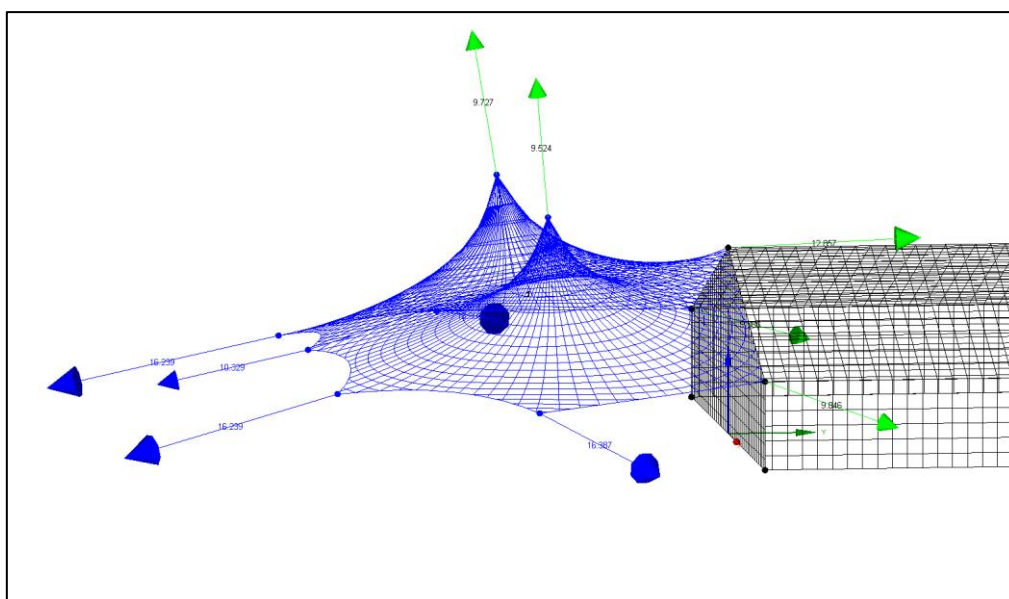
Figuur 6.6: Eerste ontwerpconcept

In afbeelding 6.6 is het eerste ontwerp afgebeeld. De luifel steekt 10 meter uit van de hal, is 24 meter breed en de voorkant van de luifel bevindt zich op 3,5 meter hoogte. Zoals in het zijaanzicht in afbeelding 6.6 te zien is, zal bij een lage zonstand al snel geen schaduw meer onder de luifel zijn, maar tegen de hal aan. De schaduwvorming kan op twee manieren verbeterd worden: ten eerst door de luifel langer te maken, en ten tweede door de voorkant van de luifel omlaag te brengen.



Figuur 6.7: Tweede ontwerpconcept

In dit tweede ontwerp is de luifel langer en breder gemaakt. De luifel steekt nu 14 meter uit vanaf de hal, en breedste afstand tussen de overstaande hoekpunten is 28 meter. In het zijaanzicht in afbeelding 6.7 is te zien dat de effectiviteit in het creëren van schaduw aanzienlijk is verhoogd ten opzichte van het vorige ontwerp. De afmetingen van de luifel liggen nu bepaald. Vervolgens moet er bekeken worden hoe de ondersteunende constructie van de luifel eruit gaat zien. Met behulp van Easy kunnen de oplegreacties voor dit ontwerp bepaald worden. Deze zien er als volgt uit:

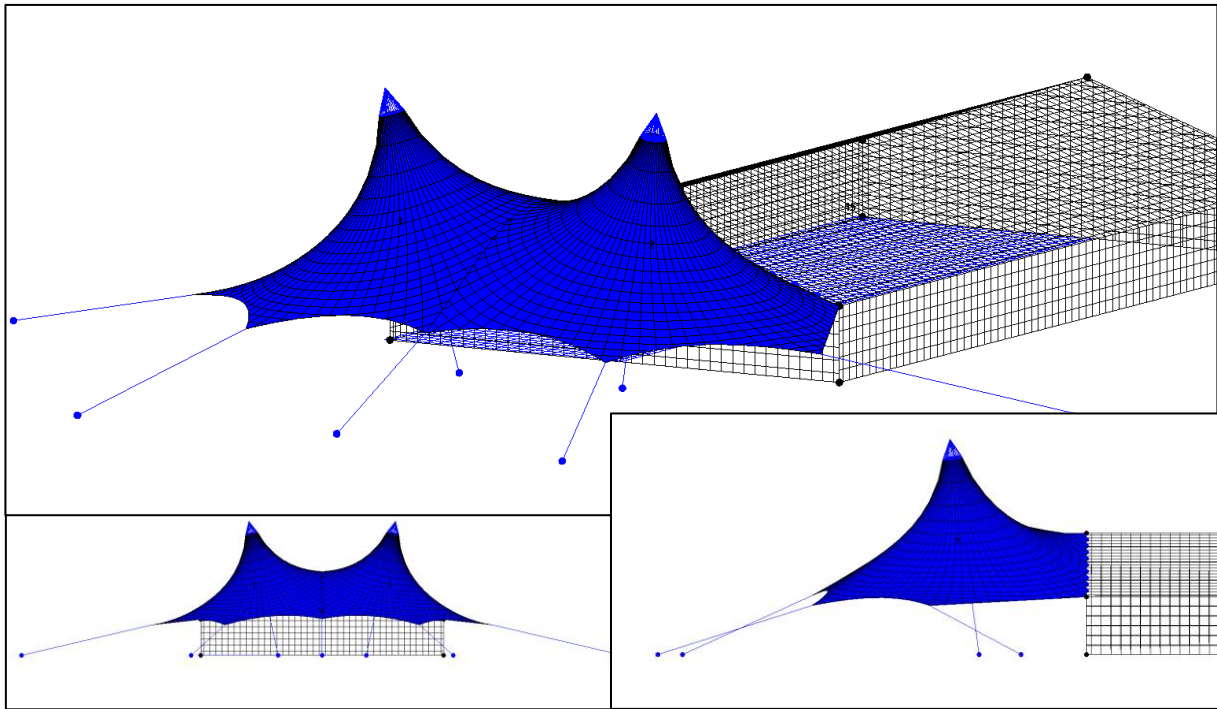


Figuur 6.8: Oplegreacties van de luifel

Voor de ondersteunende constructie van de luifel zijn twee opties bestudeerd. In de eerste optie wordt er gekeken naar alleen het gebruik van gespannen kabels. In de tweede optie worden de hoeken van de luifel met kleinere masten en kabels vastgelegd.

OPTIE 1

De eerste optie voor het opleggen van de hoeken van de luifel is met behulp van alleen kabels, zoals te zien is in afbeelding 6.9.

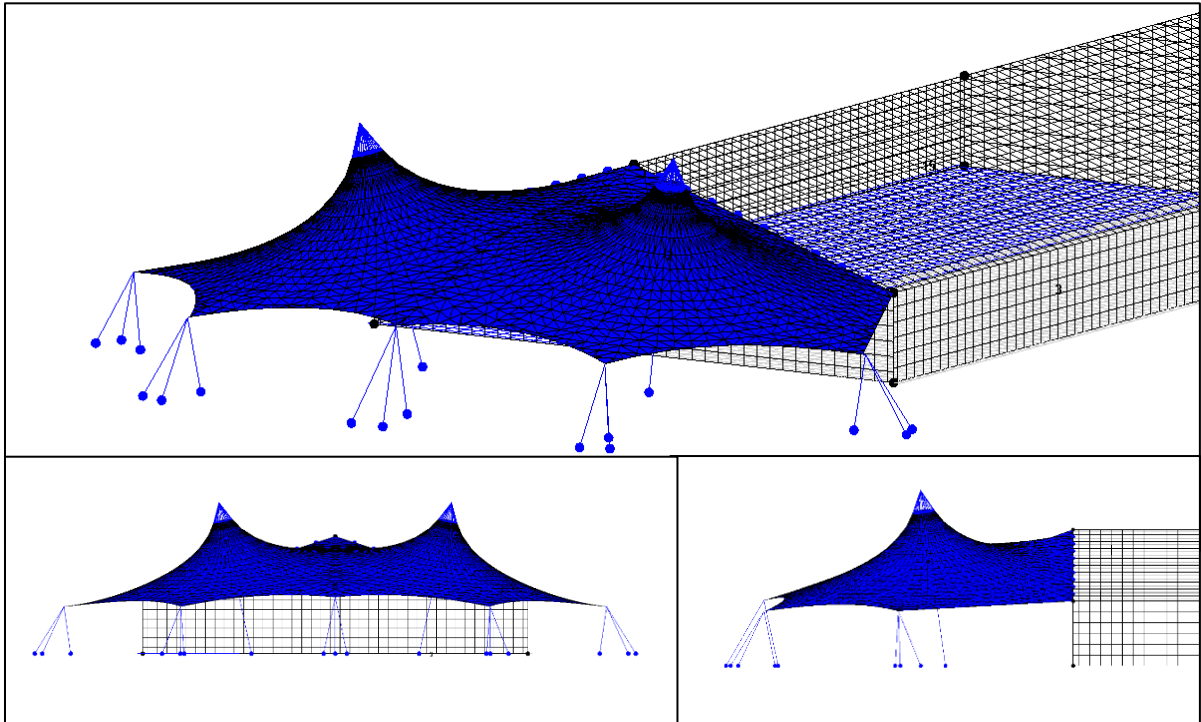


Figuur 6.9: Oplegging van de luifel door middel van spankabels

Zoals in de literatuurstudie beschreven, werken de krachten in een membraan altijd parallel aan het zeil. Als het zeil dus bijna horizontaal loopt, zullen de krachten zich hier ook in dezelfde horizontale richting bevinden. Daardoor lopen de kabels onder een erg flauwe helling waardoor ze erg lang worden. Dit is niet prettig voor bezoekers en zorgt voor een risico op struikelen. Bovendien heeft de luifel door deze manier van opleggen veel meer oppervlak nodig om opgezet te worden.

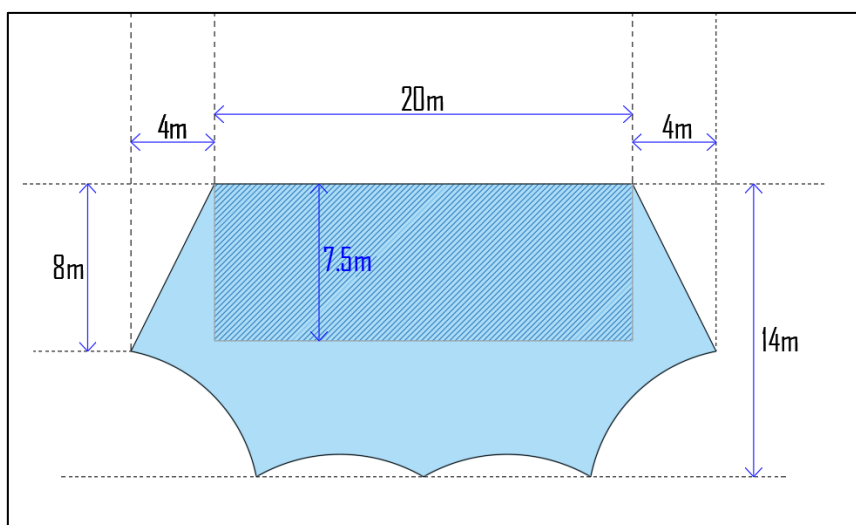
OPTIE 2

Bij de tweede optie worden de hoekpunten van de luifel verticaal ondersteund door kleine steunmasten, welke op hun beurt weer door twee kabels zijn gestabiliseerd. Zie afbeelding 6.10.



Figuur 6.10: Oplegging van de luifel door middel van masten en kabels

De kabels zijn in deze situatie veel minder lang en het ontwerp is nu veel compacter. Er doet zich echter een probleem voor als we het Programma van Eisen erbij nemen. Daarin staat namelijk vermeldt dat er vloerplaten voor de hal liggen, welke 7,5 meter uitsteken aan de voorkant van de hal. Dit is het gearceerde gebied dat te zien is in afbeelding 6.11.



Figuur 6.11: Huidige vloerplatenplan voor de luifel (AutoCAD)

In het PvE staat dat de voorste masten van de luifel op deze vloerplaten moeten komen, en dus op maximaal 7,5 meter van de hal af kunnen staan. In dit ontwerp is dat echter niet het geval. De voorste steunmasten komen op een afstand van 14 meter van de voorkant van de hal. Dit probleem kan erg gemakkelijk opgelost worden door het vloerplatenplan uit te breiden naar een groter oppervlak voor de hal.

De uiteindelijke keuze voor het ontwerp is gemaakt in overleg met Rogier Houtman. Hij is de directeur van het bedrijf Tentech en hij is dan ook degene die deze case heeft aangeleverd. Als opdrachtgever heeft hij ook de afweging gemaakt tussen het struikelrisico van optie 1, en het aanpassen van het Programma van Eisen bij optie 2. Het uitbreiden van de vloerplaten is slechts een kleine aanpassing van de situatie. Het voordeel van de tweede optie ten opzichte van de eerste op het gebied van ruimtebeslag is dermate groot dat het uitbreiden van de vloerplaten voor lief wordt genomen. Bovendien staat in het Programma van Eisen dat de constructie zo weinig mogelijk fysieke hinder moet veroorzaken voor het publiek.

Samen met Rogier Houtman is er daarom gekozen voor de tweede, compactere optie, waar gebruik wordt gemaakt van steunmasten én spankabels. Dit is dan ook het definitieve ontwerp waarmee verder gerekend zal worden in dit rapport.

7. CONSTRUCTIEVE EISEN

In hoofdstuk 6 zijn de ontwerp-eisen voor de luifel verder gespecificeerd. Hieruit kwamen twee ontwerpen naar voren. Het eerste ontwerp voldoet niet aan het Programma van Eisen. Daarom zal er vanaf verder gekeken worden naar het tweede ontwerp. In dit hoofdstuk zullen alle belastingen op de luifel worden berekend en het gedrag van de luifel onder deze belastingen worden bepaald. Eventueel zal het ontwerp aangepast moeten worden wanneer de spanningen in het membraan te hoog oplopen.

Allereerst worden de belastingcombinaties met de bijbehorende belastingfactoren bepaald. Deze waarden zijn nodig om te controleren of de constructie en het membraan voldoen aan de constructieve veiligheidseisen. Vervolgens wordt er een keuze gemaakt voor het materiaal van het membraan. Wanneer deze vaststaat, is ook de maximaal toelaatbare spanning bekend. Vervolgens worden het ontwerp met het programma Easy beproefd op verschillende belastingen. Zo wordt gecontroleerd of het ontwerp voldoet.

7.1 BELASTINGCOMBINATIES

Om een constructie te testen op constructieve veiligheid, moet onder andere de maximaal toelaatbare spanning berekend worden. Wanneer deze wordt overschreden zal de constructie dusdanig aangepast moeten worden zodat alle spanningen onder de maximaal toelaatbare spanning vallen. De maximaal toelaatbare spanning wordt bepaald door het in kaart brengen van verschillende belastingcombinaties. Dit kunnen permanente belastingen zijn, zoals het eigengewicht of de voorspanning, of veranderlijke belastingen zoals wind- of sneeuwbelasting. Door het combineren van deze belastingen (met bijbehorende belastingfactoren) en de materiaaleigenschappen van het membraan, kan de maximaal toelaatbare spanning.

PERMANENTE BELASTINGEN

Allereerst worden de permanente belastingen op de tentconstructie bepaald. Hieronder valt natuurlijk de belasting ten gevolge van het eigen gewicht van het membraan. Het eigen gewicht van de membranen ligt gebruikelijk tussen de 0,7 en 2,0 kg/m². Deze belasting staat verticaal omlaag gericht op het membraan.

Een andere permanente belasting die op membraanconstructies werkt is de voorspanning. In de literatuurstudie in hoofdstuk 4.3 wordt het principe van voorspanning uitgelegd. Deze voorspanning speelt een fundamentele rol in de vorm en het gedrag van het membraan. Hoe hoger de voorspanning wordt gekozen, hoe minder rimpelingen en afwijkingen er in het gespannen membraan te verwachten zijn.

Over het algemeen is de op te leggen voorspanning afhankelijk van de stijfheid en sterkte van het materiaal. Ook de kromming en de vorm van het ontwerp hebben invloed op de minimale op te leggen voorspanning. Het bepalen van de initiële voorspanning is dus niet eenvoudig.

Daarom zijn er vuistregels voor de voorspanning in het leven geroepen. Een algemene vuistregel is dat de voorspanning gekozen dient te worden tussen de 2,5% en 6% van de gemiddelde trekkracht van een strook textiel. Deze strook kan gekozen worden in zowel 'warp' als de 'weft' richting. Voor PVC gecoat polyester houdt deze in dat de voorspanning nooit minder mag zijn dan 1.3% van de gemiddelde trekkracht zo'n zelfde strook (Balz, 2004). De voorspanning kan dus voor een weefsel met een treksterkte van 170 kN/m oplopen tot een ruime 10 kN/m. Deze voorspanning werkt overal in het membraan parallel aan het membraan, omdat het de vezels van het membraan zijn die op spanning worden gezet. Dit is dus een andere richting dan de belasting ten gevolge van het eigengewicht, welke omlaag gericht is.

Om de vormvastheid en functionaliteit van een PVC gecoat polyester weefsel te garanderen, zijn er voor alle vijf typen PVC gecoat polyester de volgende minimale voorspanningswaarden opgesteld (Balz, 2004):

- Type I: 0,70 kN/m
- Type II: 0,90 kN/m
- Type III: 1.30 kN/m
- Type IV: 1.60 kN/m
- Type V: 2.00 kN/m

VERANDERLIJKE BELASTINGEN

Naast de permanente belastingen kennen we ook de veranderlijke belastingen. Dit zijn belastingen die vaak door weersomstandigheden worden veroorzaakt. Vaak gaat het om sneeuwbelasting en windbelasting. Aangezien het in dit project om een seizoensgebonden luifel gaat die 's zomers op een festivalterrein aan een hal staat, wordt de invloed van de sneeuwbelasting hier niet meegenomen, aangezien de luifel nooit belast zal worden door sneeuw.

Windbelasting kan echter een zeer grote invloed hebben op de spanningen in het membraan. Het bepalen van de windbelasting is echter redelijk complex. De druk die de wind op het membraan zet is erg verschillend per type constructie: is hij open of gesloten aan de achterkant? Vangt de constructie veel wind? Omdat de windbelasting sterk varieert is het niet eenvoudig een enkele belasting aan te duiden. De windbelasting moet echter zeker mee worden genomen in het constructief ontwerpen van de constructie. Daarom moet er een schatting worden gemaakt van deze belasting.

De daadwerkelijke belastingfactoren van de permanente en veranderlijke belastingen worden in paragraaf 7.3 verder besproken.

7.2 MATERIAALKEUZE

Hier wordt gekozen voor het materiaal en worden de bijbehorende eigenschappen opgesteld. Zoals in de literatuurstudie in hoofdstuk 4.4 besproken, zijn er een aantal veelgebruikte membraantypen, waarvan elk zijn voor- en nadelen heeft in bepaalde situaties. Voor dit seizoensgebonden project is het belangrijk dat het zeil gemakkelijk te installeren is. Het materiaal moet dus tegen vervorming kunnen tijdens de installatie, zonder dat het daarbij te veel beschadigd. Hiervoor is het PVC gecoat polyester de beste optie. Door de flexibiliteit raakt het namelijk veel minder snel beschadigd tijdens het vervoeren, installeren en demonteren dan het glasvezelweefsel.

Het PFC gecoat polyesterweefsel bestaat in 5 verschillende uitvoeren, welke verschillend zijn in dikte. De waarde voor de materiaalsterkte die wordt gebruikt om de Ultimate Limit State te bepalen, is in onderstaande tabel in het rood aangegeven.

<i>PES/PVC-fabrics</i>							
<i>Strength values of PVC-coated polyester fabrics directly linked to the stress verification in the ULS</i>							
<i>Parameter</i>	<i>Standard</i>	<i>Value</i>	<i>Type I warp/weft</i>	<i>Type II warp/weft</i>	<i>Type III warp/weft</i>	<i>Type IV warp/weft</i>	<i>Type V warp/weft</i>
<i>Tensile Strength [N/5cm] [kN/m]</i>	<i>EN ISO 1421</i>	<i>Mean value</i>	2750/2750	4000/4000	5500/5000	7500/6500	9250/8000
		<i>5% fractile</i>	2500/2500	3500/3500	5000/4500	6750/6000	8500/7250
<i>Seam strength at 23°C</i>	<i>EN ISO 1421</i>	<i>percentage of the respective tensile strength</i>	≥90%	≥90%	≥90%	≥90%	≥80% ¹⁾
<i>Seam strength at 70°C</i>	<i>EN ISO 1421</i>	<i>percentage of the respective tensile strength</i>	≥70%	≥70%	≥70%	≥60%	≥55%
¹⁾ Higher values might be possible, but maybe not economical.							

Tabel 7.1: Materiaaleigenschappen van vijf verschillende type PVC gecoat polyester (Stranghoner, 2016)

7.3 ULTIMATE LIMIT STATE

Het bepalen van de Ultimate Limit State (ULS) wordt op verschillende manieren gedaan. Binnen Europa zijn er verschillende voorschriften die onderling per land op een andere manier tot de ULS komen. In hoofdstuk 6 van het dictaat 'Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures' wordt verwezen naar de Duitse richtlijnen voor het ontwerpen van luchthallen (DIN 4134). Volgens deze richtlijnen kan de maximale sterkte van een materiaal bepaald worden met behulp van de zogenaamde A-factor. De maximale toelaatbare spanning wordt berekend met de volgende formule (European Commission JRC Institute for the Protection and the Safety of the Citizen, 2016) :

$$f_d = \frac{f_{k,23}}{\gamma_f \cdot \gamma_M \cdot A_i} = \frac{f_{k,23}}{A_{res}}$$

Waarin:

- f_d = Toelaatbare spanning
- $f_{k,23}$ = 5%-fractiel van de trekkracht bij 23 °C (zie tabel 7.1)
- γ_f = Belastingfactor
- γ_M = Veiligheidscoëfficiënt van het materiaal ($\gamma_M = 1.4$ in het weefsel)
- A_i = A-factor

In de berekening zullen twee verschillende belastinggevallen worden onderscheiden: de permanente belasting en de windbelasting. Voor beide gevallen zijn de belastingfactoren empirisch opgesteld. Deze waarden voor γ_M zijn 1.5 en 1.6 voor de permanente belasting en de windbelasting, respectievelijk.

De A-factoren (A_i) zijn vermeld in tabel 7.2. Daarin staat ook vermeld waar de reductiefactor precies voor corrigeert:

A_i	Waarde	Correctie
A_0	1.0 – 1.2	Verschillende uitkomsten bij strooktest en biaxiale test
A_1	1.6 – 1.7	Lange-termijn belasting
A_2	1.1 – 1.2	Vervuiling en kwaliteitsverslechtering
A_3	1.1 – 1.25	Belasting ten gevolge van hoge temperatuur

Tabel 7.2: A-factoren en hun betekenis

De waarden van A_{res} worden voor de twee belastinggevallen op de volgende manier bepaald:

- Permanente belasting: $A_{res} = \gamma_f \cdot \gamma_M \cdot A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 = 4.9 - 6.4$
- Windbelasting: $A_{res} = \gamma_f \cdot \gamma_M \cdot A_0 \cdot A_2 = 2.9 - 3.2$

Met deze waarden van A_{res} en de waarden uit tabel 7.1 kunnen uiteindelijk de maximaal toelaatbare spanningen worden bepaald in de vijf verschillende typen PVC gecoat polyester. Deze staan vermeld in onderstaande tabel. Per type staan twee waarden; dit zijn de treksterktes in 'warp'- en 'weft'-richting, respectievelijk.

	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type V
Permanent	7,81/7,81	10,94/10,94	15,63/14,06	21,09/18,75	26,56/22,66
Windbelasting	15,63/15,63	21,88/21,88	31,25/28,13	42,19/37,50	53,13/45,31

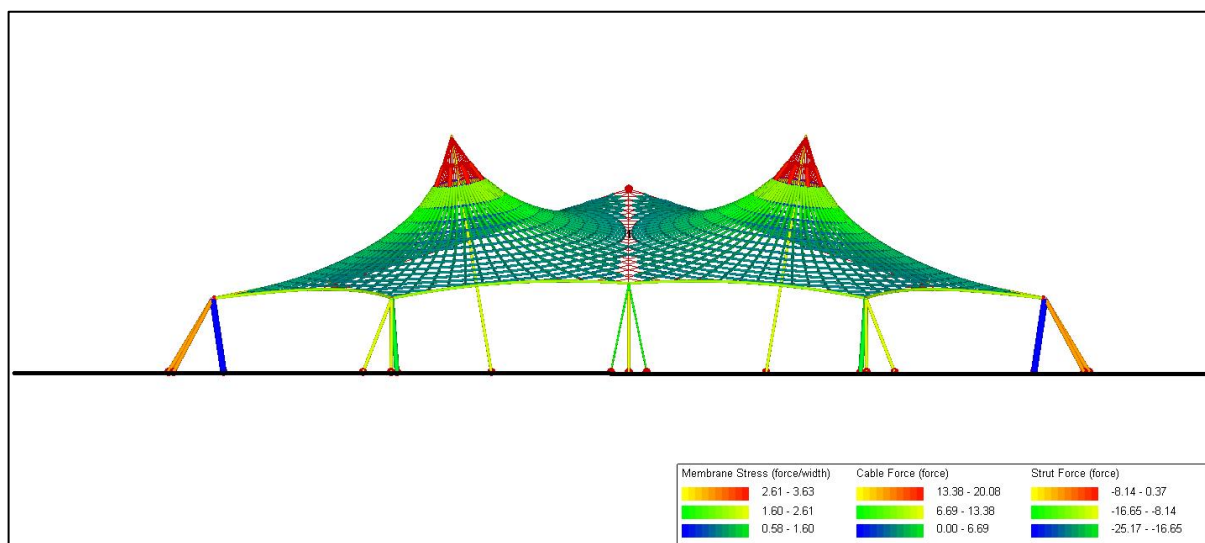
Voor de luifel van deze opdracht worden vaak membranen van type I of II gebruikt, omdat deze door het lichtere gewicht gemakkelijker te vervoeren en te monteren zijn (Houtman, 2020). Het doel van de analyse in Easy is dan ook om te bekijken of het mogelijk is alle spanningen op te nemen met een type I membraan, de dunste en daardoor de lichtste van de 5 typen PVC gecoat polyester. Dit zal behandeld worden in het volgende hoofdstuk.

8. SPANNINGSANALYSE VAN HET MEMBRAAN

In hoofdstuk 6 is een keuze gemaakt voor het definitieve ontwerp van de luifel. In dit hoofdstuk zal met behulp van het programma Easy dit ontwerp doorgerekend worden. Eerst in de statische, onbelaste situatie waarin alleen de voorspanning op het doek staat. Vervolgens wordt de invloed van de windbelasting op het ontwerp berekend. Op basis van deze bevindingen wordt een keuze gemaakt voor het type PVC gecoat polyester.

STATISCHE BELASTING

Allereerst wordt er gekeken naar de statische situatie waarin alleen de voorspanning op het doek staat. De spanningen in het membraan kunnen met behulp van het programma Easy worden bepaald. Het resultaat van deze spanningsanalyse is te zien in figuur 8.1.



Figuur 8.1: Spanningsverdeling in membraan ten gevolge van de permanente belasting

In hoofdstuk 7 zijn de maximaal toelaatbare spanningen bepaald. Voor een type I doek mogen de statische spanningen ten gevolge van de permanente belastingen niet hoger dan 7,81 kN/m zijn. Uit de legenda van figuur 8.1 is te zien dat de maximale spanning zich bevindt in de twee punten, waar deze een waarde heeft van 3,63 kN/m.

WINDBELASTING

Omdat membraanconstructies vaak lichte constructies zijn die veel wind vangen, is het belangrijk om de spanningen ten gevolge van windbelasting te bepalen. Omdat het hier om een symmetrische luifel kunnen we hier voor twee kritische gevallen de windbelasting bepalen. In de eerste situatie waait de wind vanaf de voorkant richting de luifel waait, waardoor de luifel veel wind zal vangen. In de tweede situatie komt de wind van de zijkant. Het gedrag van een membraanconstructie onder de windbelasting is erg lastig uit te rekenen. Daarom worden modellen ook getest in windtunnels om zo dit gedrag te kunnen waarnemen. Wel kan er een schatting gemaakt worden met behulp van de Eurocodes, namelijk NEN 1991-1-4. De belasting wordt dan bepaald door de horizontale windbelasting te vermenigvuldigen met een stuwdrukcoëfficiënt:

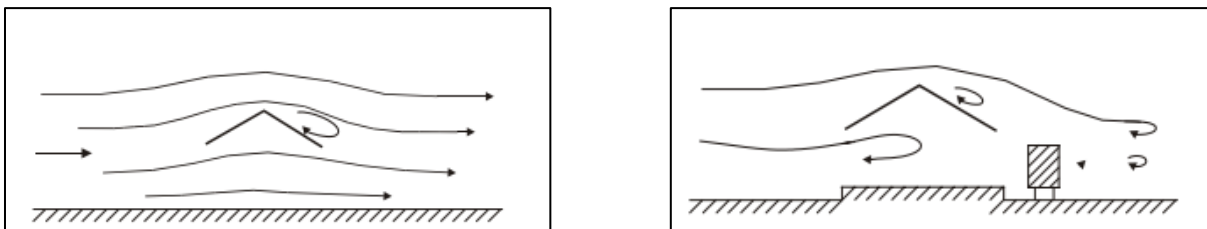
$$F_i = q_p(z_e) \cdot c_p$$

Waarin:

- F_i = Windbelasting op een component i
- $q_p(z_e)$ = horizontale windbelasting op een bepaalde referentiehoogte z_e
- c_p = stuwdrukcoëfficiënt

Om deze formule te gebruiken moet de constructie verdeeld worden in verschillende windzones. Voor iedere windzone kan dan een stuwdrukcoëfficiënt bepaald worden met behulp van de Eurocodes of andere erkende voorschriften. In het programma Easy worden deze waarden vervolgens gebruikt om het gedrag van het model te bepalen. Voor twee verschillende windsituaties zijn de verschillende windzones gecreëerd. Bij iedere windzone kunnen de waarden van q_p en c_p bepaald worden. Dit wordt in de komende paragrafen uitgewerkt.

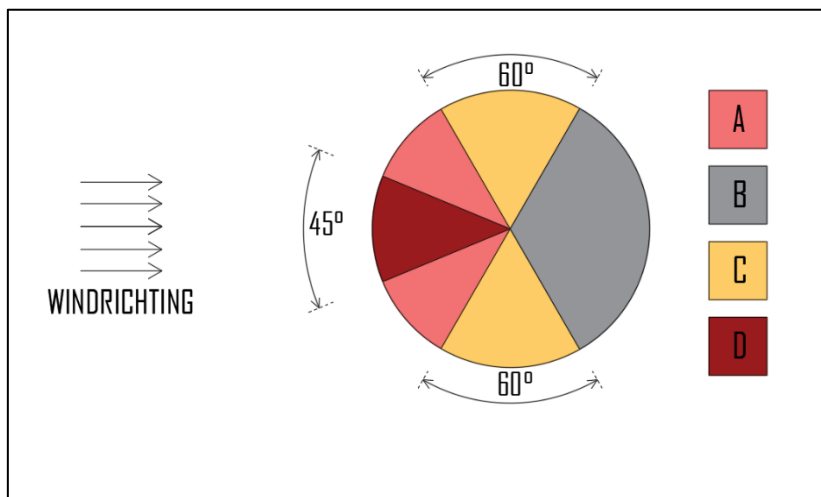
Daarnaast wordt er onderscheid gemaakt tussen situaties waar de wind vrij onder de luifel door kan stromen ($\varphi = 0$), of wanneer de doorstroom geblokkeerd wordt ($\varphi = 1$). Dit verschil wordt meegenomen in de stuwdrukcoëfficiënt.



Figuur 8.2: Verschillende waarden voor de stuwdrukcoëfficiënt ten gevolge van de luchtdoorstroom. (NEN 1991-1-4)

WINDZONES

Om de windbelasting op de constructie te bepalen zijn de c_p waarden voor iedere windzone nodig. Deze kunnen bepaald met behulp van het een standaard model voor kegelvormige tentconstructies (Balz, 2004). In figuur 8.3 is te zien in welke vlakken de kegel verdeeld wordt.



Figuur 8.3: Windzones voor een kegelvormige tentconstructie (AutoCAD)

In onderstaande tabel kunnen de standaard waarden van c_p worden afgelezen, voor zowel het geval van een vrije luchtdoorstroom als een geblokkeerde luchtdoorstroom.

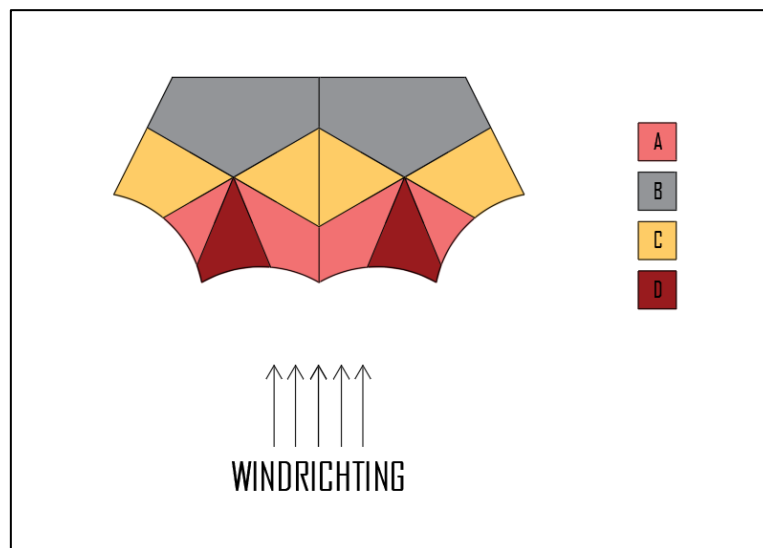
Luchtdoorstroom	Windzone A	Windzone B	Windzone C	Windzone D
Vrij ($\varphi = 0$)	-0.15	-0.6	-1.0	+0.4
Geblokkeerd ($\varphi = 1$)	-0.41	-0.7	-1.0	+0.75

Tabel 8.1: Stuwdrukcoëfficiënten voor verschillende windzones van een kegelvormig membraan

De waarde voor de horizontale windbelasting $q_p(z_e)$ kan met behulp van de Eurocodes bepaald worden. In Nederland is aan alle provincies een windcategorie toegekend, waar de waarde van $q_p(z_e)$ van afhangt. Er wordt een luifel gemaakt die overal in het land gebouwd moet kunnen worden, dus moet de windbelasting in zijn extreemste geval gekozen worden. De horizontale windbelasting wordt dan genomen zoals hij in de meest kustprovincies zich voordoet met een waarde voor $q_p(z_e)$ van 0,80 kN/m².

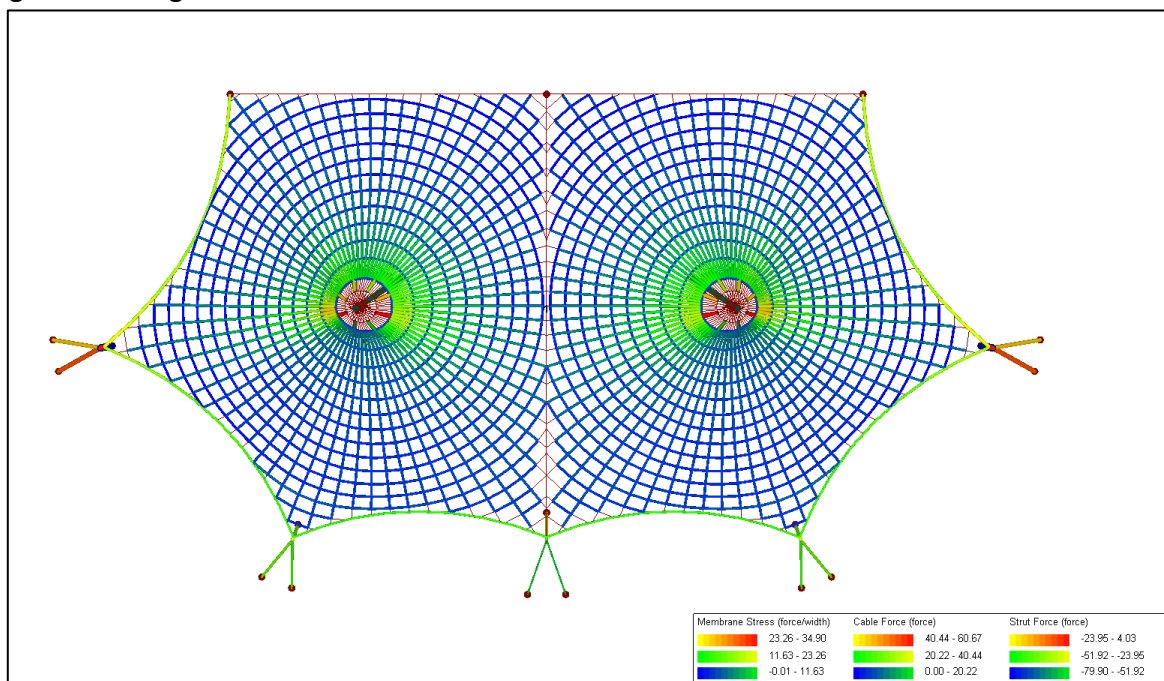
FRONTALE WINDBELASTING

In de eerste windsituatie die wordt bekeken treedt de windbelasting op wanneer de wind vanaf de voorkant richting de luifel wordt geblazen, zie figuur 8.4.



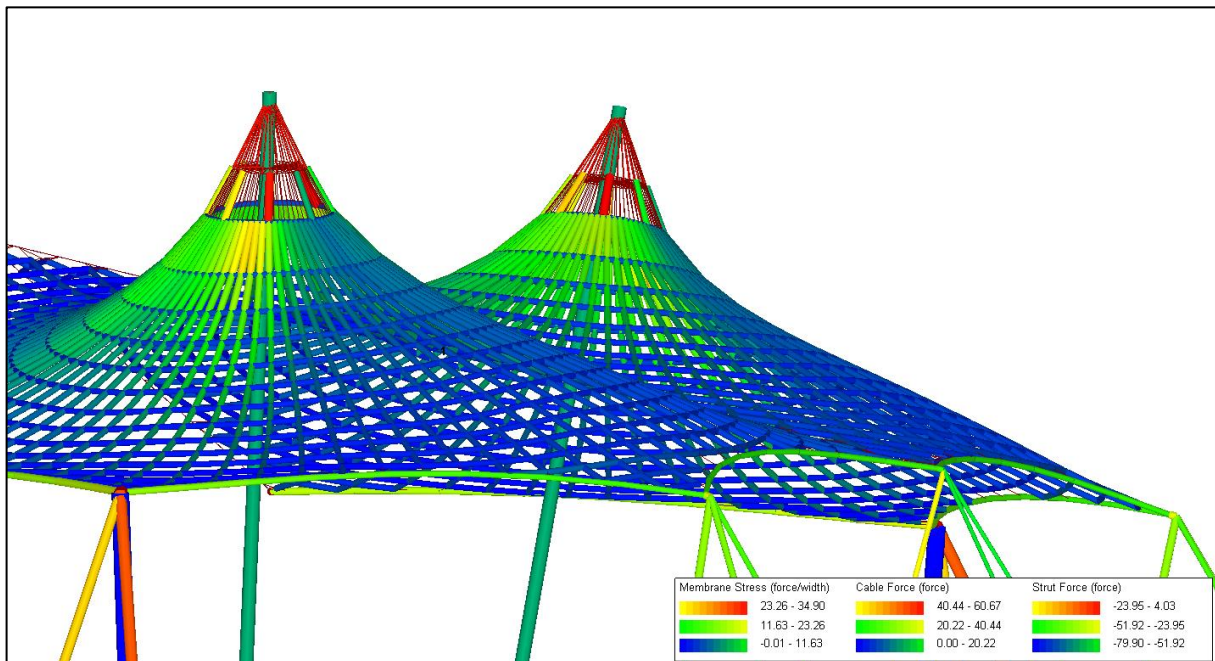
Figuur 8.4: Windzones in de situatie waar frontale windbelasting van toepassing is.

De windzones zijn aangeduid met de letters A tot en met D. In tabel 8.1 staan in de laatste rij, waarvoor geldt dat $\varphi = 1$, de waarden voor c_p vermeld. Deze worden samen met de horizontale windbelasting van $0,75 \text{ kN/m}^2$ in het programma Easy ingevoerd. Het programma berekent vervolgens de spanningen die ontstaan ten gevolge van deze windbelasting. Het resultaat is afgebeeld in figuur 8.5:



Figuur 8.5: Optredende spanningen in het membraan ten gevolge van frontale windbelasting

Uit afbeelding 8.3 is af te leiden dat de maximale spanning die optreedt in het doek, een waarde heeft van 34,90 kN/m. Deze spanning komt voor in de punten van de twee kegels van de constructie. Een detail van deze twee punten onder spanning is weergegeven in afbeelding 8.6.

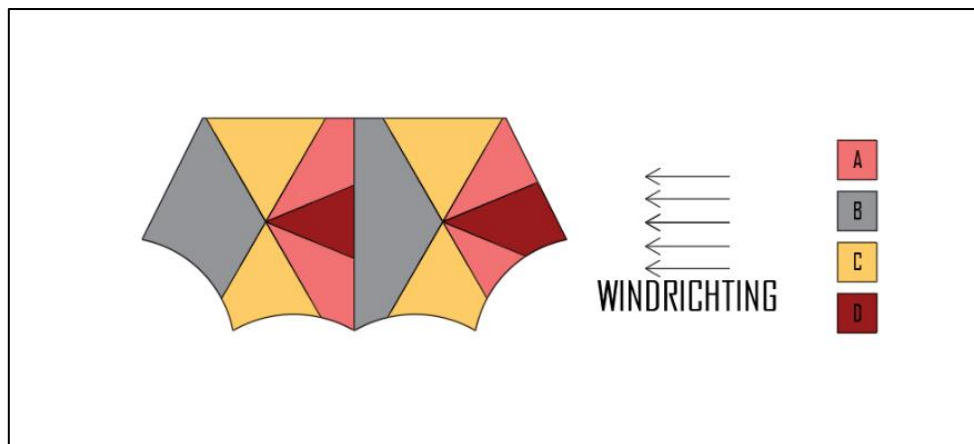


Figuur 8.6: Spanningsverdeling ten gevolge van frontale windbelasting, in detail

In hoofdstuk 7.3 is berekend dat de maximale toegestane spanning bij windbelasting voor een type I membraan 15,63 kN/m is. De spanning in de waarde van 34,90 kN/m komt hier echter ver bovenuit. Het overgrote deel van het doek staat echter op veel lagere spanning. Het zou dus erg inefficiënt zijn om voor de gehele tent een type II of nog dikker type te kiezen, omdat dit alleen maar nodig is in de punten. Volgens Rogier Houtman wordt er daarom in de praktijk vaak gebruik gemaakt van een dubbele of driedubbele laag weefsel op plekken waar dat nodig is. De spanning wordt dan op de plekken waar een dubbele laag is aangebracht gehalveerd. Op deze manier kan er toch gekozen worden voor een type I tent, welke de voorkeur heeft vanwege het lichte gewicht en daarmee de handbaarheid.

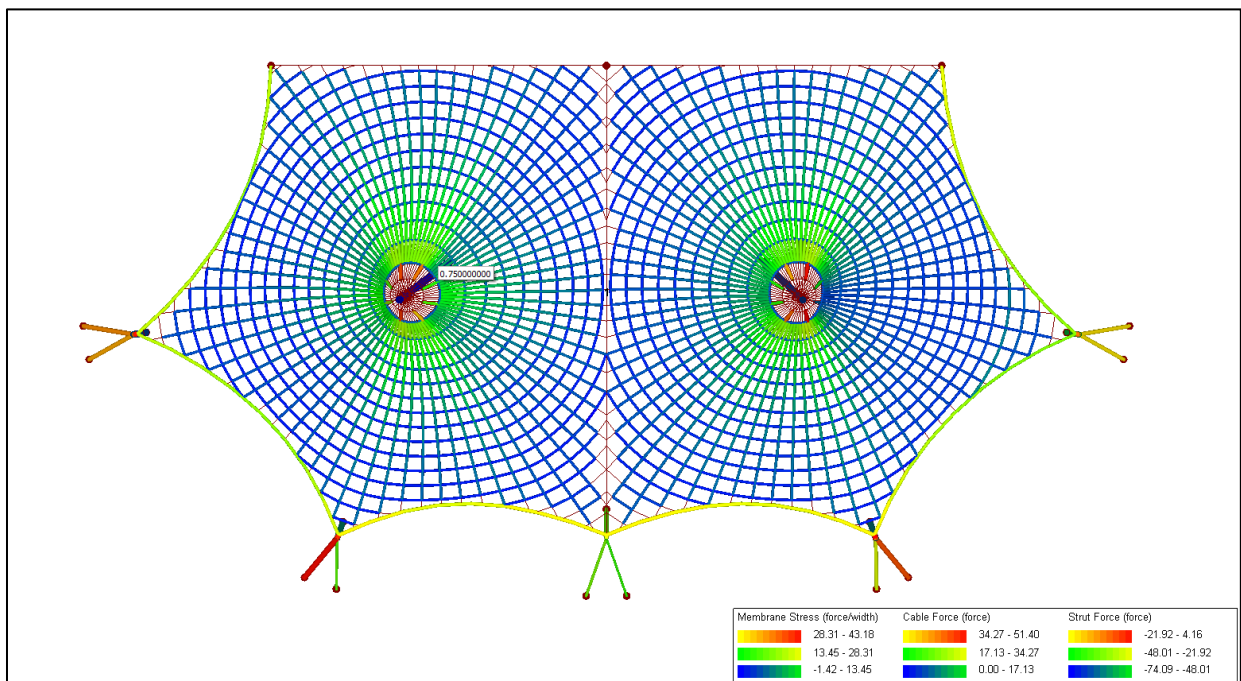
ZIJWAARTSE WINDBELASTING

In de tweede situatie komt de wind niet vanaf de voorkant, maar vanaf de zijkant van de luifel. Deze situatie is geschetst in figuur 8.7.

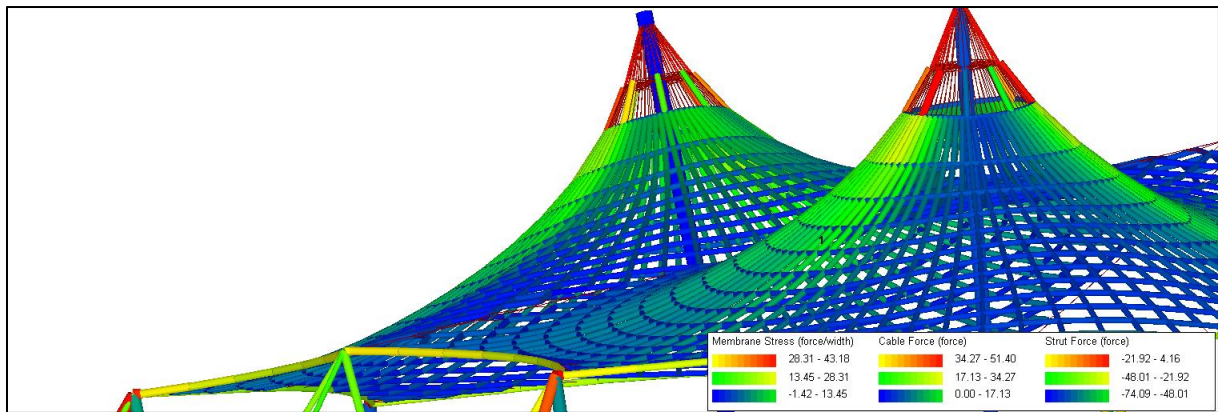


Figuur 8.7: Windzones voor situatie 2

De windzones hebben in deze situatie uiteraard een andere oriëntatie dan in de eerste situatie. Ook zijn de waarden voor c_p verschillend, omdat de wind vanaf deze kant vrij onder de luifel door kan stromen. Met de nieuwe c_p -waarden en de het nieuwe model voor de windzones worden wederom in Easy de resulterende spanningen bepaald. Deze zijn te zien in afbeelding 8.8.



Figuur 8.8: Optredende spanningen in het membraan ten gevolge van zijwaartse windbelasting



Figuur 8.9: Spanningsverdeling ten gevolge van zijwaartse windbelasting, in detail

Ook in de situatie waar de wind vanaf de zijkant komt, treedt de maximale spanning in het membraan op in de punt van de kegel. De maximale spanning is nu 43,18 kN/m, vergelijkbaar met de vorige situatie waar de wind vanaf de voorkant van de luifel kwam. In de nieuwe situatie geldt hetzelfde principe qua keuze voor een membraantype. Een type I tent volstaat namelijk voor het overgrote deel van het zeil. Alleen in de punt moeten meerdere lagen worden aangebracht, om hier de optredende spanning te verlagen.

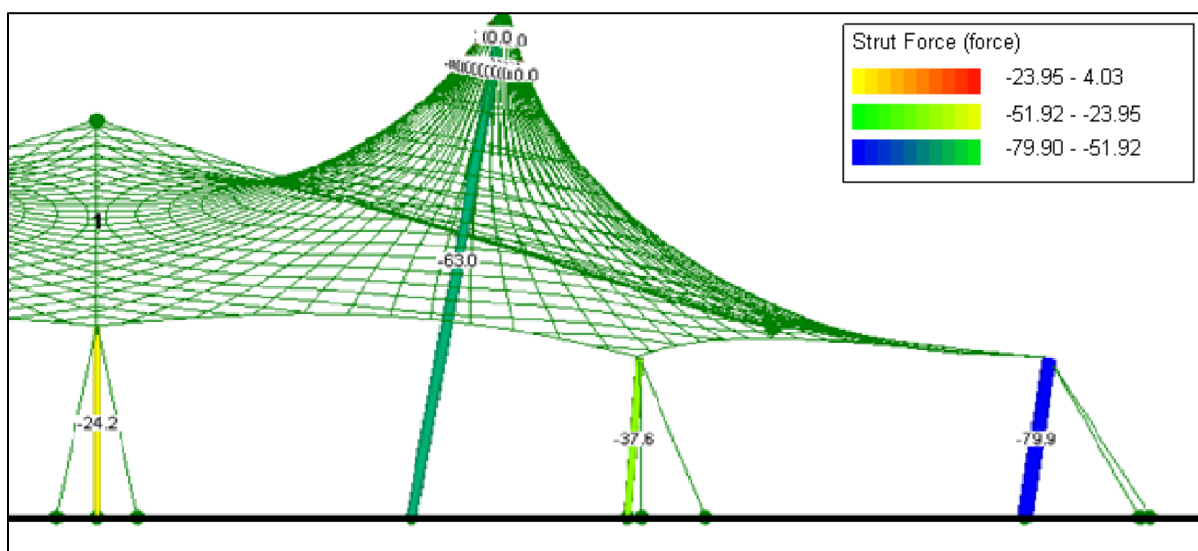
Voor het materiaal kan dus een keuze gemaakt worden: de luifel zal gemaakt worden van PVC gecoat polyester, type I. In de twee punten van de luifel zullen meerdere lagen moeten worden toegepast, om zo plaatselijk een dikker materiaal te creëren waardoor de plaatselijke spanningen af zullen nemen. Dan zullen overal in het membraan binnen de toelaatbare grens van 15,63 kN/m vallen.

9. SPANNINGSANALYSE VAN DE ONDERSTEUNENDE CONSTRUCTIE

In het vorige hoofdstuk zijn met behulp van het programma Easy de spanningen die op het membraan werken geanalyseerd. Uit deze analyse is een geschikt type PVC gecoat polyester voortgekomen waar het membraan mee zal worden gefabriceerd. Om een veilige tentconstructie te bouwen, moeten echter ook andere onderdelen van de constructie op sterkte getest worden. In dit hoofdstuk wordt onderzocht wat de werkende krachten op de ondersteunende constructie zijn. Daarnaast worden er geschikte profielen en constructiedelen gekozen.

STEUNMASTEN

De luifel zal worden opgespannen door twee grote steunmasten in het midden van het doek. Daarnaast worden de hoeken van de luifel ook vastgehouden met behulp van steunmasten. Aangezien de constructie symmetrisch is, is in afbeelding 9.1 slechts één helft van de op druk belaste steunmasten weergegeven. Uit de analyse met behulp van het programma Easy blijkt dat de drukbelasting op de steunmasten het grootst is wanneer er een frontale windbelasting optreedt. De steunmasten moeten dus op deze situatie berekend worden.



Figuur 9.1: Resulterende krachten in de steunmasten

Er zijn verschillende materiaallopties die gekozen kunnen worden voor het ontwerp van de steunmasten. De meest voorkomende zijn hout en staal. Stalen masten zijn vaak erg zwaar en bovendien duurder om te produceren. Hout daarentegen is lichter en de profielen kunnen op maat gezaagd worden. Daarnaast is hout een duurzamere optie en zorgt het voor een natuurlijke uitstraling, wat de esthetische waarde van het ontwerp verhoogt. Er is daarom gekozen om de steunmasten van hout te maken.

In de Quick Reference van de TU Delft staan eigenschappen van verschillende sterkteklassen van hout vermeld. Voor het ontwerp van de steunmasten zijn de compressiesterktes van belang. Deze variëren van 16 N/mm^2 tot 25 N/mm^2 . Voor de berekeningen in dit rapport wordt voor de compressiesterkte een gemiddelde waarde van 20 N/mm^2 genomen, behorend bij

sterkteklasse C20. In deze berekeningen moeten nog wel een aantal factoren meegenomen worden. Het gaat hier om de modificatiefactor, welke afhankelijk is van de gebruiksduur, en de materiaalfactor.

$$X_d = k_{mod} \cdot \frac{X_k}{\gamma_M}$$

Waarin:

- X_d = Ontwerpsterkte van het materiaal
- k_{mod} = Modificatiefactor
- γ_M = Materiaalfactor (= 1.3 voor solide houtprofielen)
- X_k = Karakteristieke sterkte van het materiaal

De modificatiefactor is onder andere afhankelijk van de *service class* van de houtconstructie. De *service class* wordt bepaald door het klimaat waarin de constructie zich bevindt. De gemiddelde luchtvochtigheid in Nederland ligt rond de 78% (KNMI, sd). De gemiddelde temperatuur in de zomer is ongeveer 19 graden. Dat betekent dat de houtconstructie van de luifel binnen *service class* 2 zou vallen.

Daarnaast is de modificatiefactor van het hout afhankelijk van de gebruiksduur. De meeste festivals in Nederland duren maar een weekend, wat tot een modificatiefactor van 0,90 zou leiden. Het opbouwen van deze festivals kost echter ook tijd, en bovendien zijn er festivals in Nederland die een aantal weken op locatie blijven. Daarom wordt er gekozen voor een modificatiefactor van 0,80. Dit leidt tot een grotere veiligheidsmarge op de sterkte van het materiaal.

De ontwerpsterkte van het hout dat gebruikt gaat worden is dus gelijk aan:

$$X_d = 0,80 \cdot \frac{20}{1,3} = 12,31 \text{ N/mm}^2$$

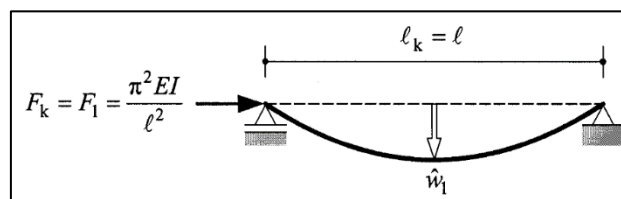
In afbeelding 9.1 zijn met de letters A, B en C de steunmasten aangegeven die de hoeken van de luifel op hun plaats moeten houden. Voor esthetische redenen is er gekozen om alle drie de steunmasten dezelfde afmetingen te geven. De profielen van deze steunmasten worden dus gedimensioneerd op degene met de hoogste drukbelasting. Dat is steunmast C, welke een drukbelasting van 79,9 kN ondervindt. Het oppervlak van de doorsnede van deze steunmasten is gemakkelijk uit te rekenen door de drukkracht te delen door de compressiesterkte:

$$A = \frac{79900 \text{ N}}{12,31 \text{ N/mm}^2} = 6490,7 \text{ mm}^2$$

In de ontwerptabellen uit de Quick Reference zijn de gangbare afmetingen van beschikbare profielen weergegeven. Eén van de profielen die voldoet aan de sterkte-eis, heeft een hoogte 120 millimeter en een breedte van 69 millimeter. Het oppervlak van deze doorsnede is 8280 mm², wat volgens de berekeningen voldoende is om de drukbelasting op te nemen.

Op de langere steunmast D staat een drukkracht van 63,0 kN. Om deze op te nemen is een doorsnedeoppervlak van $63,0/12,31 = 5117,8 \text{ mm}^2$ nodig. Een profiel van 69 x 95 millimeter volstaat voor dus voor steunmast D.

Het controleren van de steunmasten op compressiesterkte is echter nog niet voldoende. Slanke masten die op druk belast worden, moeten namelijk ook gecontroleerd worden op knikstabiliteit. Het uitknikken van een element kan voorkomen wanneer er een grote drukkracht op wordt uitgeoefend (C. Hartsuijker, 2016) . Het element zal dan vervormen en 'uitbuigen', zoals te zien is in afbeelding 9.2.



Figuur 9.2: Uitknikken van op druk belaste elementen
(C. Hartsuijker, 2016)

Voor ieder element dat op druk wordt belast, kan de knikkracht bepaald worden. Dat is de kracht waarbij het element zal uitknikken en welke dus niet overschreden mag worden. Het bepalen van de knikkracht kan met de volgende formule:

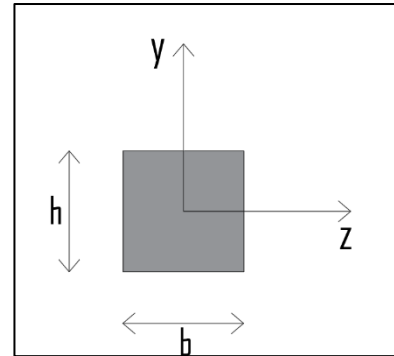
$$F_k = \frac{\pi^2 \cdot EI}{l^2}$$

Waarin:

- F_k = Knikkracht
- E = Elasticiteitsmodulus van het materiaal
- I = Traagheidsmoment van de profieldoorsnede
- l = Lengte van de staaf

De elasticiteitsmodulus is verschillend voor elke sterkteklasse. Voor de klasse C20, die ook gebruikt is bij de analyse van compressiesterkte, heeft de elasticiteitsmodulus een waarde van 9500 N/mm². Het traagheidsmoment I is afhankelijk van de afmetingen van het profiel. Wanneer een op druk belaste staaf uitknikt, zal dat altijd gebeuren in de richting met de laagste knikweerstand. Deze knikweerstand wordt bepaald door het traagheidsmoment. Met andere woorden: een staaf zal buigen om de as met het kleinste traagheidsmoment. Aangezien de steunmasten in het ontwerp van de luifel aan beide kanten volledig

scharnierend zijn opgelegd, kunnen de steunmasten in alle richtingen gaan uitknikken. Wanneer het profiel als een rechthoek wordt gekozen, zullen de traagheidsmomenten in twee richtingen verschillend zijn, en zal de staaf dus sneller in een van deze twee richtingen uitknikken. Het kleinst mogelijke profiel dat dus in alle richtingen voldoet aan het minimale traagheidsmoment heeft dus de vorm van een vierkant. Dit is waarom de steunmasten een vierkant profiel moeten hebben.



Figuur 9.3: Vierkante doorsnede van de houten steunmasten

Het bepalen van de doorsnede van de steunmasten wordt dus gebaseerd op het benodigde traagheidsmoment. Een voldoende traagheidsmoment moet ervoor zorgen dat de knikkracht van de staaf hoger is dan de daadwerkelijke kracht die op de elementen staat. De analyse met Easy laat zien dat de kracht op staaf D 63,0 kN is. De knikkracht van de steunmast moet dus minimaal zo groot zijn. Wanneer we de formule voor de knikkracht naar de volgende vorm omschrijven, kan het minimale traagheidsmoment bepaald worden:

$$I = \frac{F_k \cdot l^2}{\pi^2 \cdot E} = \frac{63000 \cdot 8000^2}{\pi^2 \cdot 9500} = 43 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Het traagheidsmoment van de doorsnede om de assen uit figuur 9.4 wordt bepaald met de volgende formule:

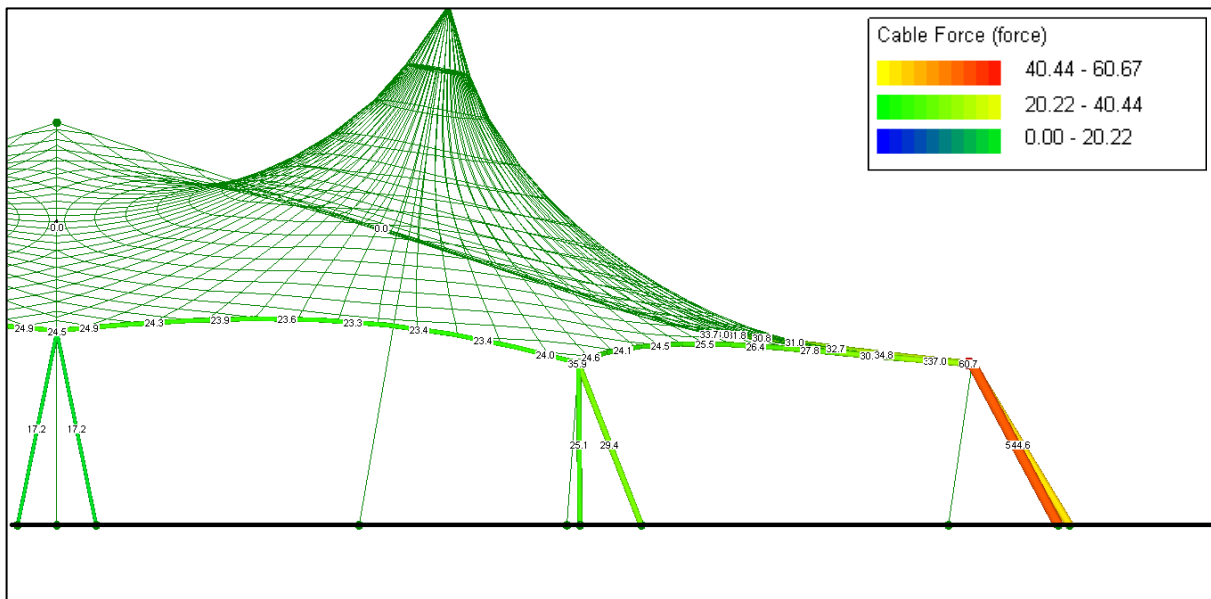
$$I_{yy} = I_{zz} = \frac{1}{12} b h^3 = \frac{1}{12} a^4$$

Aangezien het om een vierkante doorsnede gaat, zijn de traagheidsmomenten om de y-as en de z-as gelijk, omdat de breedte b gelijk is aan de hoogte h . Voor de afmeting van het vierkante profiel kan dus gesteld worden dat deze afmeting $a \times a$ millimeter moet zijn. Met bovenstaande formule kan nu de breedte van de steunmasten berekend worden:

$$a = \sqrt[4]{12 \cdot 43 \cdot 10^6} = 151 \text{ mm}$$

Voor steunmast D geldt dus dat voor de knikstabiliteit een minimale afmeting van de houten balk 151 x 151 millimeter moet zijn. Omdat de steunmasten A, B en C minder lang zijn, zou volgens de bovenstaande formules het traagheidsmoment kleiner kunnen zijn om toch voldoende te zijn. Daardoor betekent dat voor deze steunmasten een profiel van 151 x 151 millimeter sowieso voldoende is om niet uit te knikken.

Ook de trekspanningen in de spankabels die de hoeken van de luifel opleggen, kunnen met behulp van het programma Easy bepaald worden:



Figuur 9.4: Resultierende krachten in de spankabels

In het ontwerp worden spanningskabels op twee verschillende manieren gebruikt: in de rand van de luifel zit een kabel, en er worden kabels gebruikt om de steunmasten mee vast te zetten in de grond. Voor de eerste kabel, die langs de rand van de luifel loopt, wordt een stalen kabel gebruikt. De maximale trekkracht die zich in deze randkabel bevindt, is 60,7 kN. De staalsoort S235 heeft een *yield strength* van 235 kN/mm². Rekening houdend met een veiligheidsfactor van 1,5, kan de benodigde diameter van de kabel op de volgende manier bepaald worden:

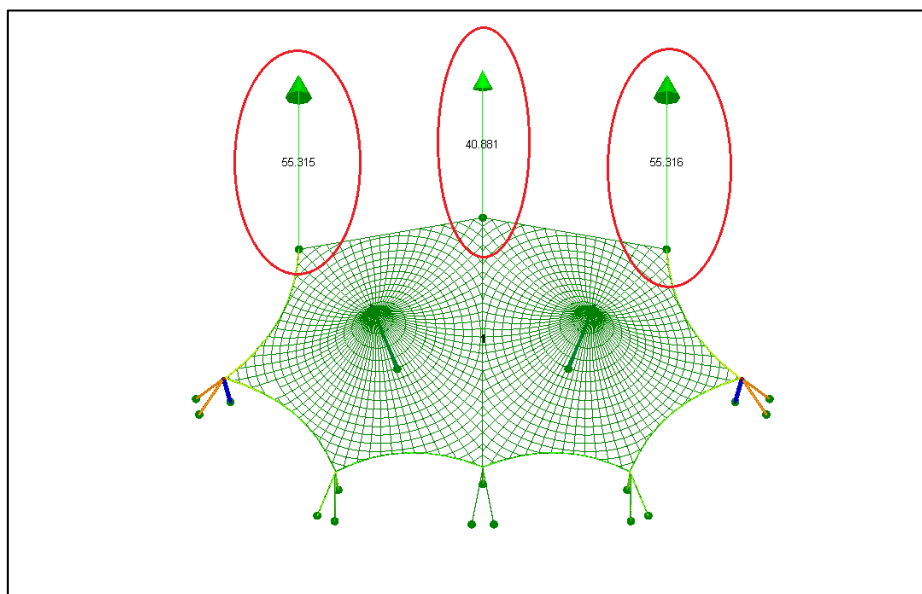
$$A = 1,5 * \frac{60700}{235} = 387,4 \text{ mm}^2 \quad D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 22,3 \text{ mm}$$

Een kabel met een diameter van 25 mm is dus voldoende.

Voor de spankabels die de steunmasten aan de grond vastzetten, worden spanbanden gebruikt. Deze zijn namelijk eenvoudig los te koppelen, wat het montageproces van de constructie gemakkelijk maakt.

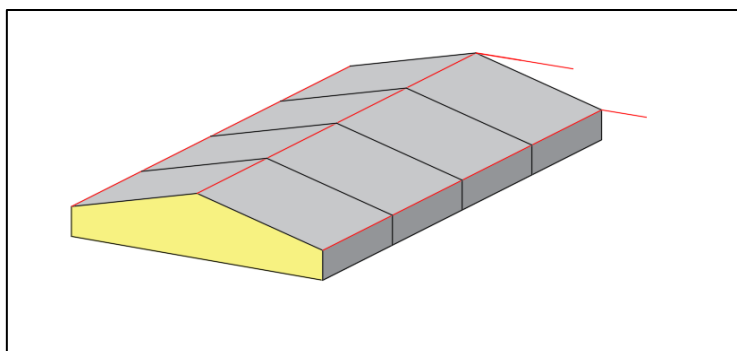
10. HALVERSTERING

Uit het programma Easy kunnen ook de reactiekrachten in de opleggingen van de constructie gehaald worden. Deze zijn weergegeven in afbeelding 10.1. Er zijn drie vectoren in het rood omcirkeld. Dit zijn de horizontale trekkkrachten die werken tussen de luifel en de hal. Deze krachten moeten door de hal afgedragen worden naar de ondergrond. De hal, die al gebouwd is voordat de luifel eraan bevestigd werd, is echter niet ontworpen voor de extra horizontale belasting ten gevolge van de luifel.



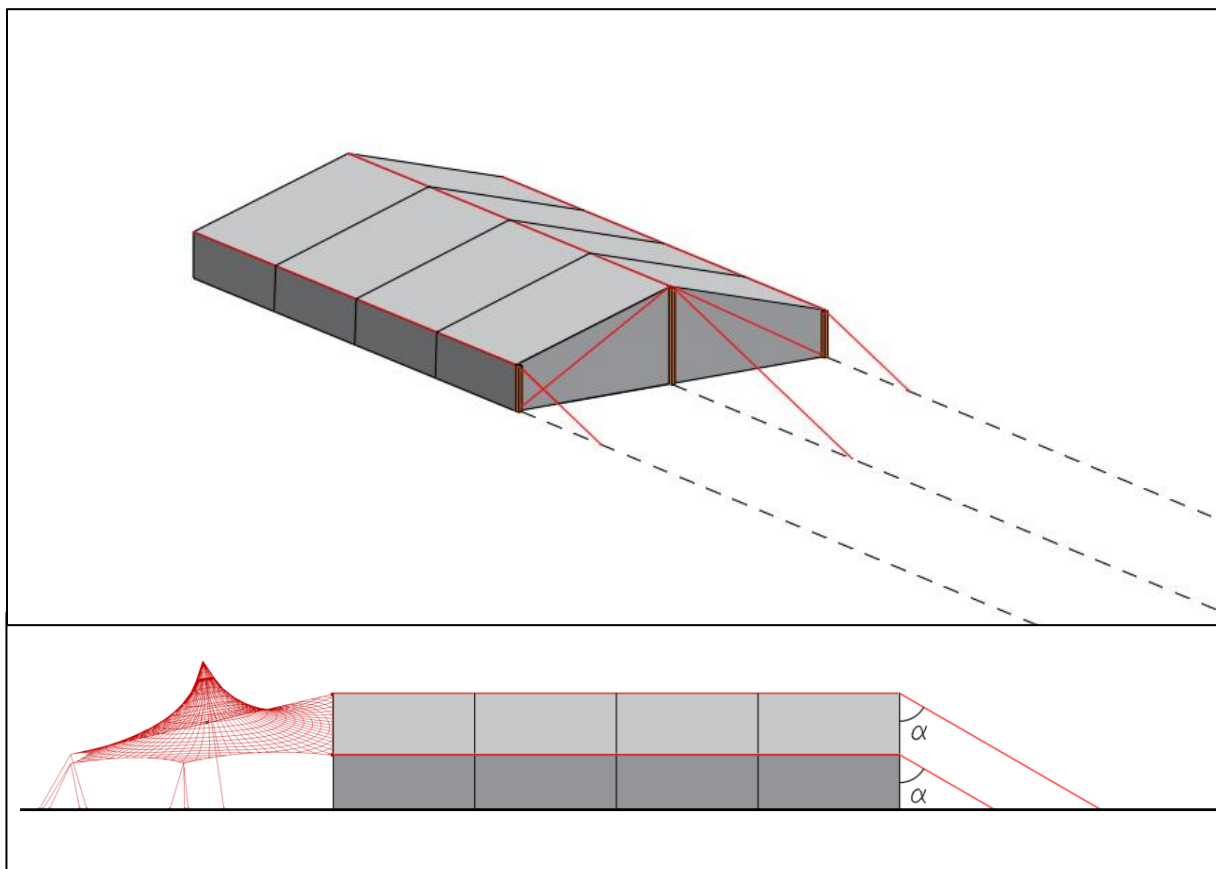
Figuur 10.1: Reactiekrachten in de verbinding tussen de hal en de luifel in kN

Om deze krachten toch door de hal opgenomen te kunnen laten worden, moet de hal versterkt worden. Dat gebeurt door drie extra kabels aan te brengen in het dak van de hal, welke in het verlengde van die drie krachten uit afbeelding 10.1 lopen. Van deze kabels loopt er dus één door de nok van de hal, en twee langs de twee hoeken van het dak, zoals te zien is in afbeelding 10.2. De voorkant van de hal is hier in het geel gekleurd, aan de achterkant is te zien hoe de extra kabels de krachten afdragen naar de bodem. Dit is nog duidelijker te zien in afbeelding 10.3.

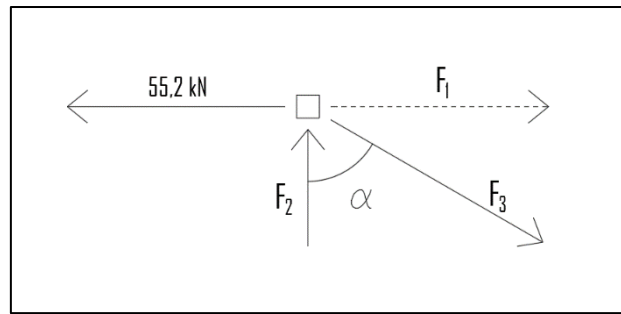


Figuur 10.2: De extra aangebrachte kabels ten behoeve van het versterken van de hal (AutoCAD)

Door de kabels lopen de horizontale krachten nu door tot in de achterkant van de hal. Daar moeten ze nu nog naar de bodem afgedragen worden. Dat gebeurt met behulp van drie extra masten die aan de achterkant van de hal zijn opgezet, zoals te zien in afbeelding 10.3. Door de kabels hier met een hoek naar beneden te laten lopen, en de daardoor ontstane verticale krachten door de masten te leiden, wordt de hal nauwelijks extra belast door de luifel. Om de stabiliteit van de hal te garanderen, worden er nog twee extra spankabels gelegd. Deze lopen vanuit de nok van de achterkant van de hal naar de twee hoeken aan de zijkant. Deze kabels zorgen ervoor dat de steunmasten niet uitknikken, wat tot het 'omvallen' van de gehele hal zou kunnen leiden.



Figuur 10.3: Versterking van de hal door het aanleggen van extra kabels en steunmasten (AutoCAD)



Figuur 10.4: Krachtenevenwicht achtergevel van de hal (AutoCAD)

Uit afbeelding 10.1 is te zien dat de grootste horizontale kabelkracht 55,2 kN is. In bovenstaande afbeelding 10.4 is het knoopenevenwicht voor de achterkant van de hal geschetst. Voor het horizontale krachtenevenwicht moet gelden dat F_1 gelijk is aan 55,2 kN. De resulterende kracht die in de diagonale kabel naar de ondergrond loopt is dan gelijk aan:

$$F_3 = \frac{55,2}{\sin(60^\circ)} = 63,7 \text{ kN}$$

Nu is ook de verticale drukbelasting in de steunmasten uit te rekenen:

$$F_2 = 63,7 \cdot \cos(60^\circ) = 31,9 \text{ kN}$$

De diagonale kracht F_3 wordt via kabels naar de ondergrond geleid. Deze kabels worden net als de spankabels in de luifelrand gemaakt van staal, met een sterkte van 235 N/mm². Met een veiligheidsfactor van 1,5 kan de diameter van deze kabels berekend worden:

$$A = 1,5 * \frac{63700}{235} = 406,6 \text{ mm}^2 \qquad D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 22,8 \text{ mm}$$

Voor deze spankabels zullen stalen kabels met een diameter van 25 millimeter dus volstaan.

Voor de steunmasten aan de achterkant geldt dat zij een drukkracht van 31,9 kN naar de bodem moeten kunnen afdragen. De masten die aan de voorkant van de luifel worden gebruikt, zijn geschikt om drukkrachten tot 79,9 kN naar de bodem te leiden. Deze zijn dus ook geschikt voor de versterking aan de achterkant van de hal, waar de drukkracht ongeveer de helft is van de drukkracht die ze aan de voorkant ervaren.

11. FUNDERINGEN

Naast dat de constructieve elementen van de luifel op sterkte getest moeten worden, is het ook van belang een goede fundering te ontwerpen voor de constructie. Het ontwerp van de funderingen van de constructie is afhankelijk van onder andere de sterkte van de bodem. In Nederland komen verschillende bodemsoorten voor. Omdat de luifel en de hal in principe op elke plek in Nederland gebruikt moeten kunnen worden, moet dus ook voor verschillende Nederlandse bodemsoorten onderzoek gedaan worden naar de funderingsmogelijkheden.

STEUNMASTEN

Voor zowel de steunmasten aan de voorkant geldt dat zij op de vloerplaten voor de hal worden gefundeerd. Door het grote oppervlak van de vloerplaten, welke ook doorlopen tot onder de hele hal, kan er vanuit gegaan worden dat deze drukkrachten geen risico op bezwijken vormen. Ook de masten aan de achterkant van de hal worden op de vloerplaten gefundeerd. Voor de fundering van de spankabels moet echter uitgebreider onderzoek worden gedaan.

SPANKABELS

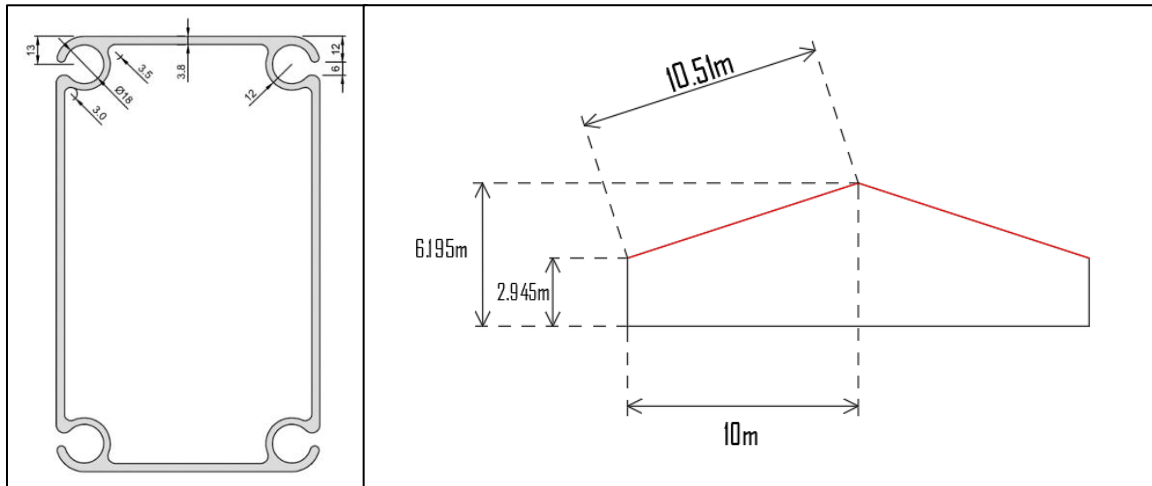
De spankabels aan zowel de voor- als de achterkant van de hal moeten aan de bodem verankerd worden. Een veel gebruikte oplossing hiervoor is door het plaatsen van grote, zware blokken waar de kabels aan bevestigd worden. Door het eigen gewicht van deze zware blokken, die vaak van beton worden gemaakt, zijn deze kabels verankerd. Zoals te zien is in figuur 9.2 op pagina 45, kunnen de trekkrachten in de kabels oplopen tot zo'n 60,7 kN. Beton heeft een dichtheid van 2500 kg/m^3 , wat gelijk staat aan een kracht van ruwweg 25 kN/m^3 . Om de kabelkracht van 60,7 kN tegen te kunnen werken, is dus al bijna 2,5 kubieke meter aan beton nodig. Dit is vrij veel, waardoor het ten eerste niet gemakkelijk is te installeren, en bovendien kan het ook nog het zicht van het publiek verhinderen, hetgeen niet gewenst is. Dit kan verholpen worden door deze zware betonnen blokken in te graven, zodat ze wel functioneel zijn als ballast maar geen hinder veroorzaken voor het publiek.

Een andere optie om de spankabels op te leggen is door stalen funderingspinnen de grond in te drukken waar de spankabels aan gemonteerd kunnen worden. De funderingscapaciteit van zo'n fundering is onder andere afhankelijk van de bodemsoort van het gebied waar de luifel geïnstalleerd wordt. In Nederland komen een aantal verschillende bodemsoorten voor, zoals zand, veen en klei. Elke bodemsoort heeft zijn eigen draagvermogen en voor elke bodemsoort zou dus de funderen doorgerekend moeten worden.

De waarde van 60,7 kN is alsnog redelijk hoog voor een stalen funderingspaal die op trek wordt belast. Het combineren van zware betonnen blokken en de stalen funderingspalen zou een gepaste oplossing kunnen zijn om deze trekkrachten op te kunnen nemen. De betonnen blokken zouden ook nog een functionele waarde kunnen toevoegen wanneer ze gebruikt worden als zitplekken voor toeschouwers.

12. MONTAGE AAN HAL

Nu het ontwerp van de luifel geanalyseerd en doorgerekend is, moet de luifel gemonteerd worden op de hal. Er moet een manier bedacht worden om de luifel aan het kederprofiel te bevestigen, dat langs de diagonale spanten aan de voorgevel van de hal is aangebracht. Het desbetreffende kederprofiel is afgebeeld in figuur 12.1.



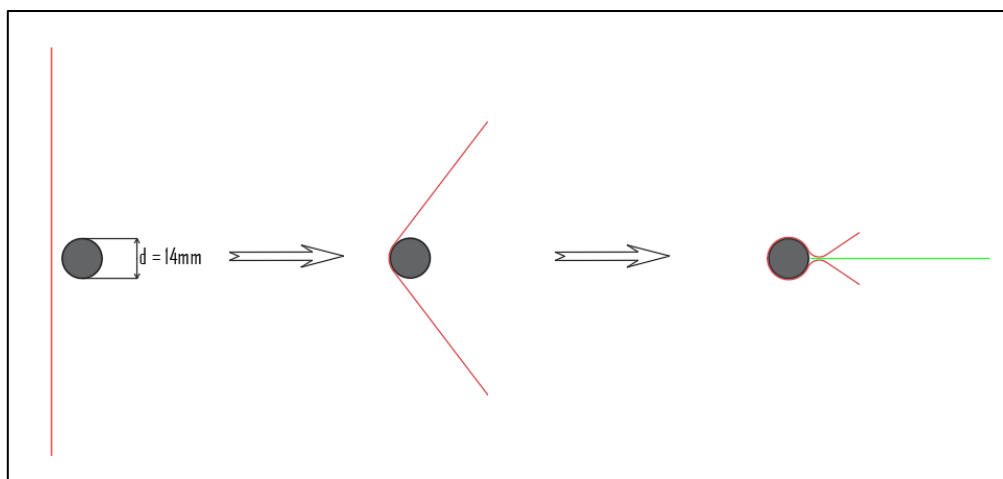
Figuur 12.1: Kederprofiel (Houtman, 2020)

Om de luifel hieraan te bevestigen, wordt de rand van de luifel aangepast. De lengte van de rand die aangepast moet worden kan berekend worden met behulp van de stelling van Pythagoras:

$$L = 2 * \sqrt{10^2 + (6.195 - 2.945)^2} = 2 * 10.51 \text{ meter}$$

De verbinding bestaat uit twee metalen buizen van ieder 10.51 meter lang. Elke buis neemt zijn een helft van de luifelverbinding voor zijn rekening. Om de buizen wordt een extra strook PVC gecoat polyester heen 'gevouwen'. De dikte van het PVC gecoat polyester ligt doorgaans tussen de 0.6 en 1.2 millimeter. De buizen hebben daarom een buitendiameter van 14 millimeter om zo met nog een extra marge in het profiel te passen, welke een binnendiameter heeft van 18 millimeter. De stroken worden helemaal om de buizen heen gevouwen. De twee stukken polyester van het verbindingsstuk die nu uitsteken worden aan weerszijden van het polyester van de luifel bevestigd door het toepassen van een lasnaad (zie hoofdstuk 4.5).

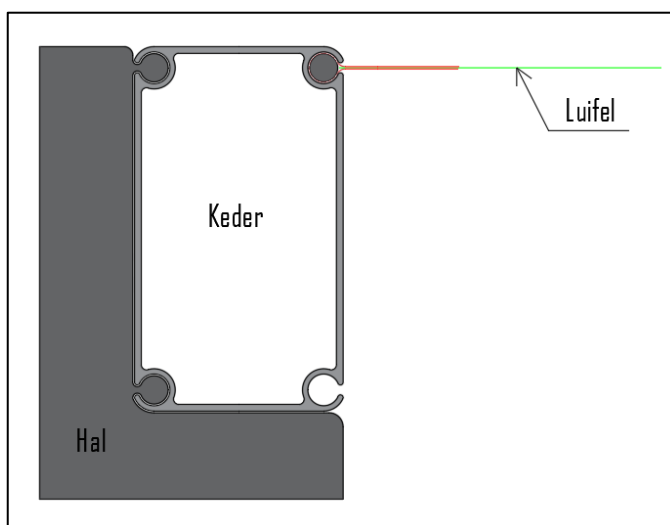
In figuur 12.2 op de volgende bladzijde staat dit proces, waarin het verbindingsstuk aan de luifel wordt gemaakt, schematisch weergegeven: de metalen buis in het donkergrijs, het polyester van het verbindingsstuk in het rood en het polyester van de luifel in het groen.



Figuur 12.2: Stappenplan bevestiging van verbindingstuk (AutoCAD)

Nu het verbindingstuk bevestigd is aan het doek van de luifel, moet de gehele luifel nog aan de hal worden gemonteerd. Omdat het kederprofiel aan beide alle kanten glijseuven heeft (afbeelding 9.1), is er aangenomen dat ook het kederprofiel zelf van de hal los geschoven kan worden. In afbeelding 9.3 is te zien dat de hal ook uitstekende delen waar het kederprofiel overheen geschoven kan worden. Dat is belangrijk voor het montageproces, dat er als volgt uit ziet:

Allereerst wordt één van beide kederprofielen van de hal afgeschoven, zodat er zich nog maar één kederprofiel de diagonale spanten bevindt. In het voorbeeld in de tabel in bijlage C wordt als eerst de linkerkant bevestigd. Dan wordt kant van de luifel die hierbij hoort hierop geïnstalleerd door het verbindingstuk in het kederprofiel te schuiven. De volgende stap is iets complexer: De andere helft van de luifel moet in de juiste positie gemanoeuvrerd worden, zodanig dat het tweede kederprofiel in één handeling over zowel de hal als het verbindingstuk wordt geschoven. De luifel zit nu op de juiste positie maar is nog niet bevestigd. Daarvoor moeten er nog verbindingstukken op de uiteindes van de diagonale spanten worden bevestigd zodat de verbinding niet meer heen en weer kan schuiven.



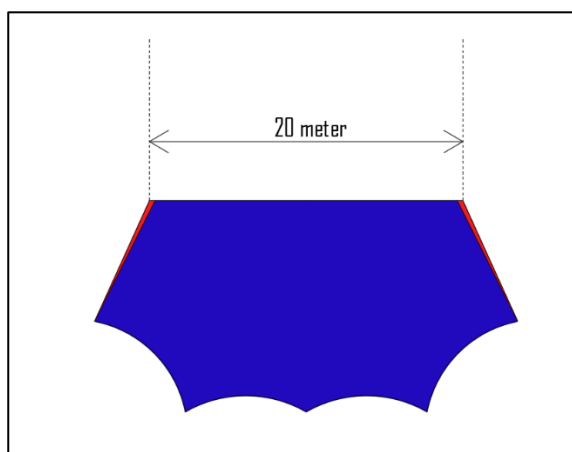
Figuur 12.3: Verbinding tussen luifel, kederprofiel en hal

In bijlage C is bovenstaande uitleg gevisualiseerd met behulp van afbeeldingen van de tussenstappen.

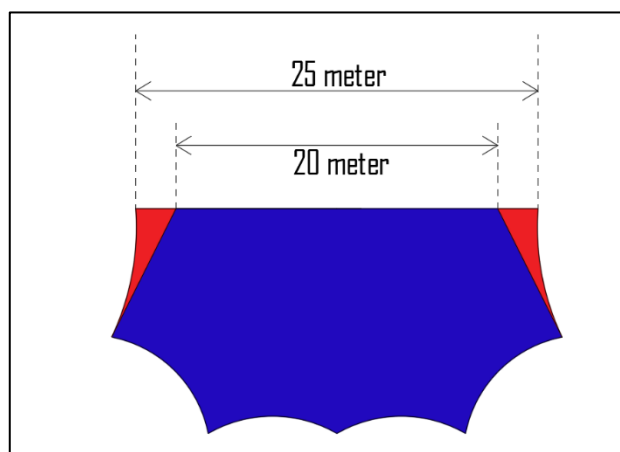
13. LUIFELUITBREIDING

Zoals in het Programma van Eisen staat vermeld, moet de luifel niet alleen gemonteerd kunnen worden op een 20 meter brede hal. Er is namelijk ook een variant van de hal die 25 meter breed is. De luifel moet ook op deze variant gemonteerd kunnen worden. Daarom is er een manier bedacht om de luifel uit te kunnen breiden en zo op een bredere hal te kunnen installeren.

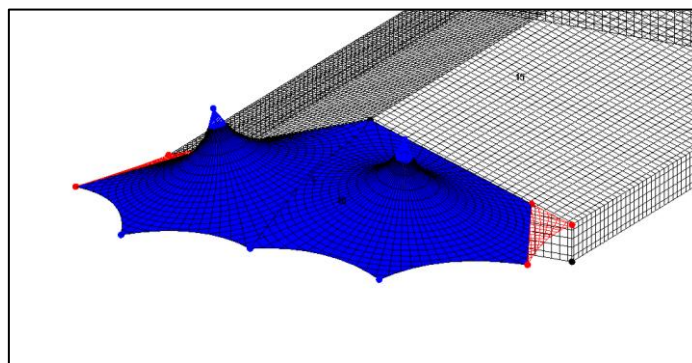
De oplossing is vrij eenvoudig. Het benodigde extra materiaal dat nodig is voor de uitbreiding naar een 25 meter brede variant, wordt ook al in het ontwerp voor de 20 meter brede hal geïmplementeerd. Wanneer de luifel echter op een 20 meter brede hal wordt aangesloten, zou er dus aan beide kanten van de luifel 2,5 meter materiaal over zijn. Daarom worden deze stukken opgerold en aan de rand van de 20 meter brede luifel vastgemaakt. Door deze rand loopt een kabel die ervoor zorgt dat deze rand recht loopt. Het extra materiaal kan dan netjes opgerold worden en bovendien wordt het opgerolde materiaal dan niet belast, maar de kabel. In afbeelding 13.1 en 13.2 zijn de opgerolde en uitgerolde varianten van de luifel weergegeven.



Figuur 13.1: Opgerolde luifeluitleiding (AutoCAD)



Figuur 13.2: Uitgerolde luifeluitleiding (AutoCAD)



Figuur 13.3: 3D-aanzicht van de luifeluitleiding

14. DISCUSSIE & CONCLUSIE

DISCUSSIE

Tijdens het ontwerpen zijn enkele aannames gedaan. Deze aannames zouden geverifieerd kunnen worden in een vervolgonderzoek, wat uit zou moeten leiden of deze aannames terecht zijn geweest.

Eén van de aandachtspunten hierbij is de berekening van de optredende spanningen in het membraan. In hoofdstuk 7 is namelijk bij het opstellen van de maximaal toelaatbare spanningen uitgegaan van een lineaire berekening. De computersoftware Easy maakt echter gebruik van een niet-lineaire, iteratieve berekening. Het is dus interessant om te onderzoeken wat de impact is van het verschil tussen deze twee methoden. Wanneer blijkt dat de lineaire berekening van de materiaaleigenschappen te veel afwijkt van de realistischere iteratieve berekening van het computerprogramma, moet er een nieuwe analyse worden uitgevoerd.

Een andere aanbeveling voor een vervolgonderzoek zou kunnen zijn: het onderzoeken van de vervormingen van de constructie. Wanneer de windbelasting op de luifel wordt gezet, zal deze vervormen. Zoals al eerder beschreven is de spanningenverdeling binnen een membraanconstructie afhankelijk van de vorm. Vervormingen van het membraan zouden dus tot een andere spanningsverdeling kunnen leiden. Ook dit is een interessante optie voor een eventueel vervolgonderzoek.

Een derde optie voor het vervolgonderzoek is om te kijken naar de programmering in de software. De steunmasten in Easy zijn namelijk nu als vast ingeklemd beschouwd, waardoor de punten van de luifel als vaste punten worden beschouwd. In werkelijke tentconstructies is het echter zo dat de punten van de kegels kunnen meebewegen met de vervormingen van het membraan. De steunmasten zijn immers scharnierend opgelegd. Door het verplaatsen van de punten van de steunmasten ontstaat wederom een nieuwe vorm, en ook voor deze vorm zouden de spanningen weer anders kunnen zijn.

CONCLUSIE

De onderzoeksvraag die de leidraad vormt in dit project luidt: *“Hoe kan een tentconstructie worden ontworpen op een nader te bepalen locatie zodat deze effectief en veilig is, en een toegevoegde waarde heeft voor deze locatie?”*

In dit project is er gekeken naar de mogelijkheden voor het ontwerpen van een luifel aan een bestaande hal op een festivalterrein, naar aanleiding van een casus aangeboden door Rogier Houtman. Er is een oplossing gevonden die overal in Nederland toepasbaar is. Door het bouwen van schaalmodellen en het afwegen van verschillende ontwerpaspecten zoals het aantal masten en de manier van opleggen, is een geschikt ontwerp naar voren gekomen. De effectiviteit in het creëren van schaduw is gecontroleerd en basis daarvan zijn de afmeting van het ontwerp vastgelegd.

Een onderzoek naar de beschikbare materiaalsoorten heeft voorgebracht dat PVC gecoat polyester, type I, een geschikte materiaalsoort is. Door het lage eigengewicht is het gemakkelijk te installeren, wat een eis is uit het Programma van Eisen. De spanningsanalyse met behulp van het programma Easy heeft echter uitgewezen dat de spanningen in de twee punten van de constructie de maximaal toelaatbare spanningen kan overschrijden, vooral wanneer de windbelastingen op de constructie toenemen. Een vaak toegepaste oplossing voor dit soort constructies is om dan op plekken in het membraan met een hoge spanningsdichtheid een dubbele laag materiaal aan te brengen. Hierdoor nemen de spanningen af en voldoet de constructie aan de maximaal toelaatbare spanningen.

Voor het gekozen ontwerp is het noodzakelijk het vloerplatenplan uit te breiden. De voorste steunmasten zullen namelijk op een afstand van 14 meter van de hal staan, hetgeen verder is dan tot waar de huidige vloerplaten liggen. Aangezien dit ontwerp geschikter is dan de andere ontwerpvoorstellen, is dit een gemakkelijke aanpassing van het Programma van Eisen.

Ten slotte is er een plan opgesteld om ook de bestaande hal te versterken om zo de extra gegenereerde horizontale krachten ten aanzien van de luifel op te kunnen nemen en aan de achterkant van de hal naar de ondergrond af te voeren. Er is bekeken hoe de luifel aan de versterkte hal gemonteerd kan worden en ook is er nagedacht over hoe de luifel toegepast kan worden op een bredere variant van de hal.

Als antwoord op de onderzoeksvraag kan dus geconcludeerd worden dat er inderdaad een effectieve en veilige tentconstructie is ontworpen voor de gespecificeerde locatie, welke een toegevoegde waarde heeft voor de toneelgroep die gebruik zal maken van deze tentconstructie.

LITERATUURLIJST

Balz, M. (2004). Tensinet Design Guide for Tensile Surface Structures

C. Hartsuijker, J. W. (2016, december). Stabiliteit van het evenwicht

Design Buildings Ltd. (2018, januari 12). Synclastic. Opgehaald van Design Buildings

European Commission JRC Institute for the Protection and the Safety of the Citizen (2016). Prospect for the European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures.

Forster, B. (2004). Tensinet Design Guide for Tensile Surface Structures

Houtman, R. (2004). Tensinet Design Guide for Tensile Surface Structures

Houtman, R. (5 juni 2020). Interviewer: S. Bekkers

Houtman, R. (2020). Tentech

KNMI . (s.d.) Gemiddelde relatieve vochtigheid. Opgehaald van [klimaatatlas.nl: Klimaatatlas.nl/klimaatatlas.php](https://klimaatatlas.nl/klimaatatlas.php)

KWF Kankerbestrijding. (s.d.) Opgehaald van KWF Kankerbestrijding.

LION. (2004, mei 04). Hoe hoog komt de zon vandaag? Opgehaald van Kennislink.

Stranghöner, N. (2016). Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures.

BIJLAGE A: BOUWTECHNISCHE TEKENINGEN ALUHAL



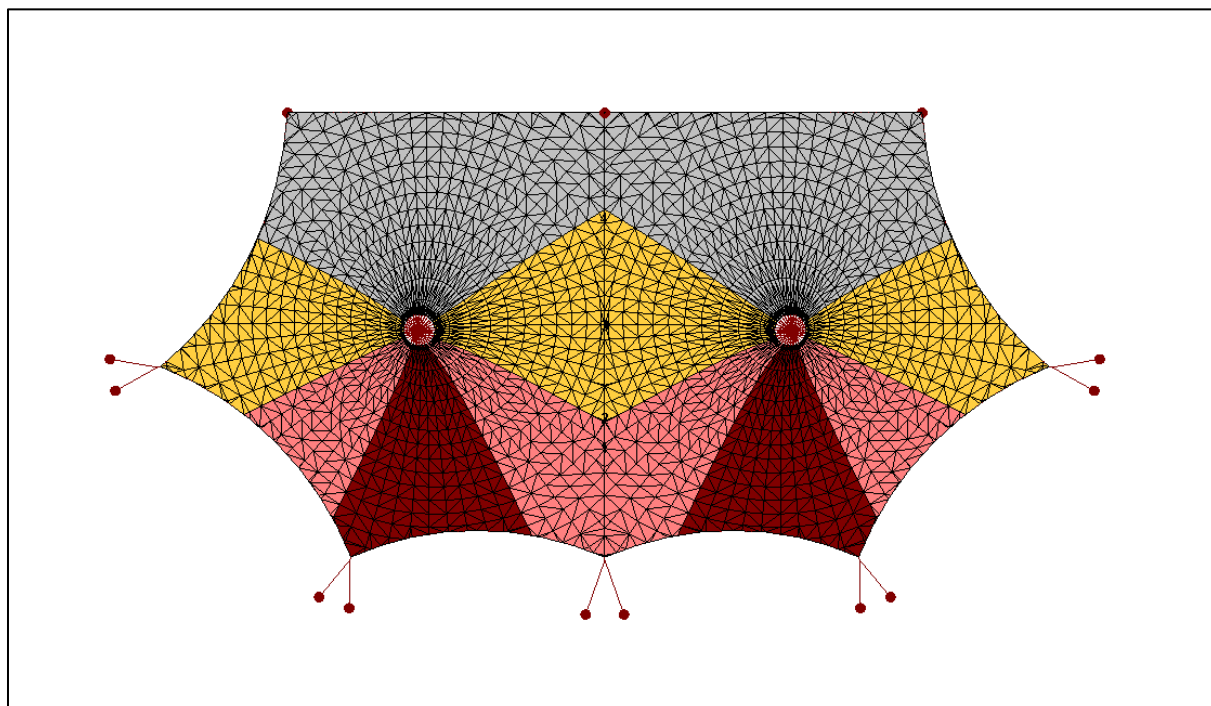
	Ankers met vloer	Ballast met vloer	Ankers zonder vloer	Ballast zonder vloer	1 anker met vloer	Ballast op hoeken met vloer
Pw [kN/m ²]	0.45	0.45	0.45	0.45	0.139	0.139
H	4	3500 kg	5	5000 kg	1	250 kg
K	4	3500 kg	5	4500 kg	0	0 kg
P	3	500 kg	4	3000 kg	0	0 kg
G1	2	0 kg	2	1250 kg	0	0 kg
G2	2	0 kg	2	1750 kg	0	0 kg

EDITOR:	DATE:	FILENAME:
KM	08.05.18	17070488_UF_20m_03

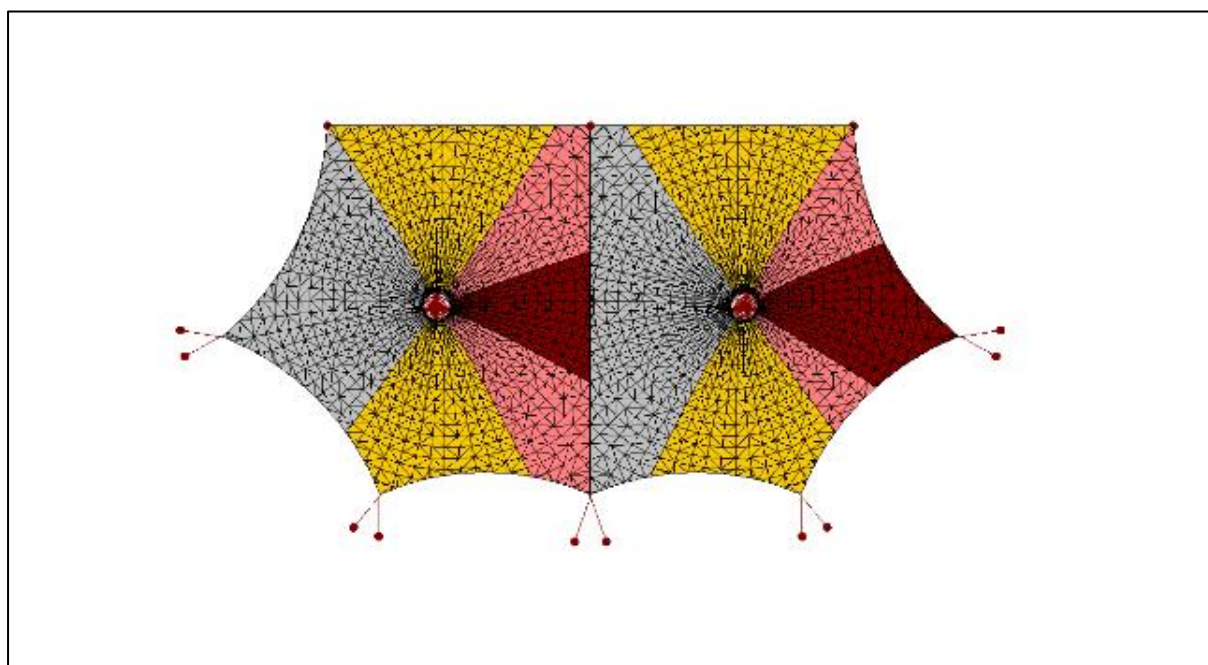


BIJLAGE B: WINDZONES EASY

FRONTALE WINDBELASTING

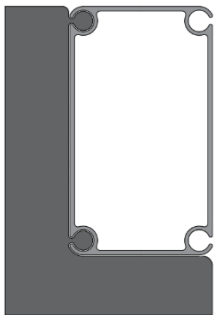
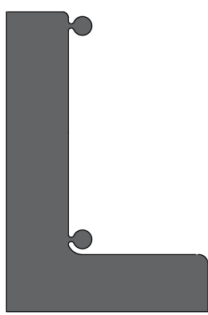
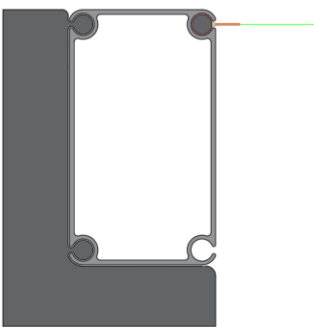
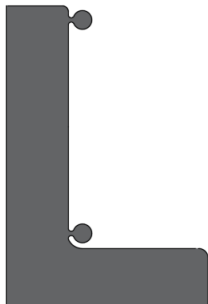
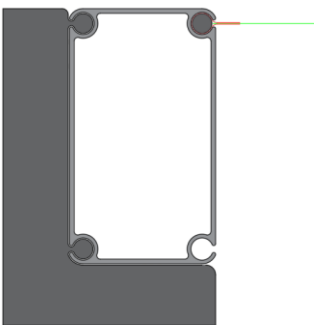
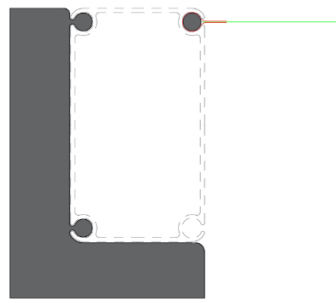


ZIJWAARTSE WINDBELASTING



BIJLAGE C: MONTAGEPROCES VAN DE LUIFEL

In onderstaande tabel is schematisch het montageproces weergegeven, behorend bij de verbale beschrijving in hoofdstuk 9, waarin als eerst de linkerkant van de luifel wordt geïnstalleerd en vervolgens de rechterkant.

	<i>Linkerhelft</i>	<i>Rechterhelft</i>
<u>Stap 1:</u> Verwijder het rechter kederprofiel van de hal (of installeer het linker kederprofiel in het geval er nog geen kederprofielen geïnstalleerd zijn).		
<u>Stap 2:</u> Schuif het verbindingsstuk met de linker helft van de luifel in het linker kederprofiel.		
<u>Stap 3:</u> Positioneer het rechter verbindingsstuk van de luifel zodanig dat het zich in de juiste positie bevindt om het rechter kederprofiel te installeren.		
<u>Stap 4:</u> Installeer het rechter kederprofiel door het tegelijk over zowel de hal als de rechter verbinding van de luifel te schuiven.	