

The Roundhouse van polyethyleen

Een membraandak dat gerecycled kan worden



The Roundhouse van polyethyleen

Een membraandak dat gerecycled kan worden

By

M.T. van Dieren

in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Bachelor of Science
in Civil Engineering

at the Delft University of Technology,
October, 2022

Advisors:	Dr. ir. P.C.J. Hoogenboom,	TU Delft
	Dr. ir. H.R. Schipper,	TU Delft
	Ir. R. Houtman,	Tentech

Voorwoord

Dit rapport is onderdeel van het Bachelor Eind Project (BEP), waarin is onderzocht of 'The Roundhouse', wat het bedrijf ID Agro BV heeft ontworpen, ontwikkeld kan worden met een duurzamer en beter recyclebaar overspanningsdoek van polyethyleen (PE). Het rapport is gemaakt ter afronding van de bacheloropleiding Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft.

Allereerst zou ik graag de directeur en eigenaar van Tentech bv Ir. R. Houtman willen bedanken voor het openstellen van hun vestiging, waar ik regelmatig mijn tijd heb kunnen doorbrengen. Mede hierdoor heb ik goed gebruik kunnen maken van het ter beschikbaar gestelde literatuur, hun software en alle overige hulp en adviezen om zodoende de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden.

Daarnaast zou ik ID Agro BV willen bedanken voor het mogen schrijven over en het onderzoeken van 'The Roundhouse'. Tot slot zou ik via deze weg mijn begeleiders Dr. ir. P.C.J. Hoogenboom en Dr. ir. H.R. Schipper willen bedanken voor alle waardevolle hulp en adviezen die ze gedurende dit traject hebben aangeboden.

*M.T. van Dieren
Delft, oktober 2022*

Corrigendum

- 1) De gekozen voorspanning van 2.3 kN/m is ongebruikelijk hoog. Beter is een voorspanning van ongeveer 1 kN/m.
- 2) De gekozen E-moduli van polyester type 1 (1200 kN/m²) en polyethyleen (2000 kN/m²) zijn niet correct. De correcte stijfheid van PVC-gecoat polyesterdoek is ongeveer 800 kN/m in ketting en inslag voor een Type 1 doek. De correcte stijfheid van PE-doek is ongeveer 500 kN/m in ketting en inslag.

Samenvatting

Duurzaamheid speelt tegenwoordig een belangrijke rol in beslissingen rondom constructies en bouwmaterialen. Membraanconstructies zijn een innovatieve, mooie en effectieve methode om de duurzaamheid van constructies ten opzichte van de alledaagse beton- en staalconstructies te bevorderen. Een voorbeeld van een membraanconstructie is een veestal genaamd The Roundhouse die ontworpen is door het bedrijf ID Agro. Om membraanconstructies nog duurzamer te maken kan ervoor worden gekozen om materialen te gebruiken die een hoge recyclebaarheid hebben. In het geval van The Roundhouse kan dit worden gerealiseerd als het overspanningsdoek van PVC-gecoat polyester vervangen wordt door een doek van polyethyleen (PE). PE heeft echter een grotere stijfheid dan PVC-gecoat polyester, doordat het dikker is, maar waardoor de uitvoering wellicht problemen kan veroorzaken.

In dit rapport staat de volgende onderzoeksvraag centraal: Is de grotere stijfheid van het beter recyclebare polyethyleen (PE), waardoor de duurzaamheid van The Roundhouse wordt bevorderd, een probleem voor het ontwikkelen van een membraanconstructie als overspanning voor The Roundhouse?

Hiervoor wordt allereerst onderzoek gedaan naar de opbouw van The Roundhouse. Daarna wordt er een literatuuronderzoek gedaan naar eigenschappen van de twee verschillende materialen waarin het doek van The Roundhouse uitgevoerd kan worden. Vervolgens wordt er een fysiek schaalmodel gemaakt om via deze weg meer inzicht te verkrijgen in het gedrag van verschillende materiaaleigenschappen op membraanconstructies als The Roundhouse. Tot slot wordt er in Easy een model van The Roundhouse gemaakt, waarbij de materiaaleigenschappen aangepast kunnen worden. Op deze drie manieren kan er een goede vergelijking worden gemaakt tussen de toepassingen van PVC-gecoat polyester en PE.

Uit het literatuuronderzoek naar de materiaaleigenschappen van PVC-gecoat polyester en PE is gebleken dat de twee materialen minimaal verschillend zijn en dat PE zich kan meten aan de materiaaleigenschappen van PVC-gecoat polyester. De enige verschillen zijn dat PE een dichtheid heeft wat 35% kleiner is als dat van PVC-gecoat polyester en dat PE duurzamer is op basis van recyclebaarheid, wat betekent dat PE meer kosteneffectief is. Op basis van het literatuuronderzoek naar de mechanische eigenschappen van PE kan er geconcludeerd worden dat The Roundhouse uitgevoerd kan worden met een dak van PE.

Op basis van het schaalmodel waarin een stijf materiaal in de vorm van kunststof gaas vergeleken is met een flexibel materiaal in de vorm van vloerfolie blijkt dat er met het stijvere materiaal veel meer inspanning en voorspanning in het doek vereist is. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het bouwproces van The Roundhouse tijdrovender en duurder kan zijn wanneer het stijvere doek van PE wordt toegepast in plaats van het iets soepelere doek van PVC-gecoat polyester.

Als er wordt gekeken naar de modellen van The Roundhouse in Easy in combinatie met verschillende belastingcombinaties kan er worden geconcludeerd dat PE kan worden toegepast als overspanning en dak voor The Roundhouse. De maximaal toegestane spanningen die in het membraan mogen optreden, worden namelijk voor elke belastingsituatie en -combinatie niet overschreden. Verder blijkt dat er minimale verschillen zitten in de spanningen wanneer The Roundhouse met PVC-gecoat polyester wordt uitgevoerd of met PE.

Al met al kan er op basis van het literatuuronderzoek, het fysieke schaalmodel en de computermodellen in Easy geconcludeerd worden dat de grotere stijfheid van PE geen probleem vormt voor het ontwikkelen van een membraanconstructie als dak van The Roundhouse, aangezien de spanningen in de membraanconstructie niet de maximale spanningen van PE overschrijden. Daarnaast wordt door het gebruik van PE de duurzaamheid bevordert doordat PE beter gerecycled kan worden en vervolgens adequater kan worden hergebruikt.

Inhoudsopgave

Voorwoord	iii
Samenvatting.....	iv
1. Introductie.....	6
2. Methodologie	7
2.1 Probleemstelling	7
2.2 Deelvragen	7
2.3 Doelstelling.....	7
2.4 Methodiek.....	7
3. Materialen membraanconstructies	9
3.1 Architectonische membraanconstructies.....	9
3.1.1 The Roundhouse	10
3.2 PVC coating op polyester materiaal.....	11
3.3 Polymeer polyethyleen materiaal.....	12
3.4 Vergelijking tussen de materialen	13
4. Grenstoestanden & Belastingen	15
4.1 Grenstoestanden	15
4.1.1 Ultimate Limit State	15
4.1.2 Serviceability Limit State.....	16
4.2 Belastingen.....	16
4.2.1 Eigen gewicht	17
4.2.2 Voorspanning	17
4.2.3 Windbelasting	17
4.2.4 Sneeuwbelasting	18
5. Technisch ontwerp.....	19
5.1 Introductie.....	19
5.1.1 De kolommen	20
5.1.2 Het vakwerk.....	22
5.1.3 De membraanconstructie.....	23
5.2 Concept en schaalmodel	24
5.2.1 Materialen.....	24
5.2.2 Schaalmodel.....	25
5.3 Easy Software ontwerp.....	29
5.3.1 Ontwerp met PE	32
5.3.2 Ontwerp met PVC-gecoat polyester.....	37
5.3.3 Vergelijking ontwerpen	42
6. Conclusies & Aanbevelingen	43
6.1 Conclusies.....	43
6.2 Discussie.....	44
6.3 Aanbevelingen.....	44
Literatuurlijst	45
Appendix A: Eigenschappen PVC-gecoat polyester.....	47
Appendix B: Eigenschappen PE	50
Appendix C: Materialen en aanzichten schaalmodel.....	54
Appendix D: Easy basisvormgeving invoerwaarden.....	64

1. Introductie

Vrije-vorm-architecturen en -constructies kunnen mens en dier beschermen tegen ongewone of plotseling veranderende weersomstandigheden als regenval, heftige windstoten, sneeuw of zelfs warmte. Onder deze vrije-vorm-architecturen en -constructies vallen onder meer tenten, luifels, pneumatische constructies en andere typen membraanconstructies. Membraanconstructies worden vandaag de dag steeds meer toegepast, omdat deze type constructies vergeleken met beton- en staalconstructies vooral goedkoper zijn. 'The Roundhouse' is een voorbeeld van een membraanconstructie waarbij er een onderliggende constructie van bijvoorbeeld hout of staal wordt overspannen door een doek. In dit geval is The Roundhouse ontworpen door ID Agro BV als veestal, waarbij gemak voor mens en dier en duurzaamheid centraal staan. Echter, membraanconstructies kennen een aantal constructieve uitdagingen. Eén van deze uitdagingen is het ontwikkelen van dusdanige vormen zodat de constructie enerzijds binnen de randvoorwaarden en eisen valt en anderzijds dat de constructie met een hoge constructieve efficiëntie gerealiseerd kan worden (Qingpeng Li, 2018). Bij laatstgenoemde speelt duurzaamheid tegenwoordig een steeds prominentere rol. Materiaalkeuze en met name de recyclebaarheid en levensduur van materialen is een onderdeel wat mede kan bepalen in hoeverre een constructie duurzaam is.

Duurzaam bouwen en duurzame materialen zijn belangrijke aspecten die meehelpen aan het verduurzamen van constructies. Het verduurzamen van The Roundhouse kan bijvoorbeeld worden gedaan door het huidige overspanningsdoek, dat gemaakt is van polyester met een coating van polyvinylchloride (PVC), te vervangen door een nieuw doek van polyethyleen (PE). Het is daarom van belang om kennis te vergaren of PE geschikt is als materiaal om The Roundhouse mee te overspannen.

Een PVC-gecoate polyester doek is moeilijker recyclebaar dan een doek van PE. Dit komt door het feit dat de verschillende materialen in PVC-gecoat polyester eerst gescheiden moeten worden voordat het volledig gerecycled kan worden. Daarentegen hoeft PE niet eerst gescheiden te worden wat het recycleproces vergemakkelijkt. Echter, er is een constructieve uitdaging in het ontwerpen van The Roundhouse met een doek van PE. Dit komt omdat PE niet exact dezelfde eigenschappen en voor- en nadelen heeft als PVC-gecoat polyester. PE is namelijk relatief sterker, taaier en dikker dan PVC-gecoat polyester.

Een tentconstructie als The Roundhouse is een voorbeeld van een vorm-actieve constructie. Waar tegenaan kan worden gelopen is het ontwikkelen van een stabiele evenwichtsvorm, onderhevig aan mechanische beperkingen zoals de vereisten van de verdeling van de spanningen in het doek van een tentconstructie. Het creëren of ontwikkelen van een stabiele evenwichtsvorm van tentconstructies wordt 'Form-Finding' genoemd. Met behulp van rekenmodellen of software kan een stabiele evenwichtsvorm gevonden worden. Een voorbeeld waarbij 'Form-Finding' wordt toegepast, is het programma Easy.

De opbouw van dit rapport is als volgt. Hoofdstuk 2 beschrijft de methodologie van dit rapport. Vervolgens beschrijft hoofdstuk 3 de eigenschappen en voor- en nadelen van het huidige materiaal van het overspanningsdoek van The Roundhouse en doet dit ook voor het nieuwe materiaal, waarna in dit hoofdstuk een vergelijking kan worden beschreven. Daarna volgt hoofdstuk 4 waarin belastingen en grenstoestanden worden beschreven die maatgevend zijn voor The Roundhouse. Verder wordt er in hoofdstuk 5 een concept model gemaakt om de werking van membraanconstructies beter te verstaan. Daarnaast wordt er in hoofdstuk 5 een beschrijving gegeven van het ontwerp gemaakt met behulp van Easy Software. Hoofdstuk 6 bevat de conclusie van dit rapport en tevens wordt er in hoofdstuk 6 een aantal aanbevelingen gedaan aan de hand van dit rapport. Tot slot zijn in de bijlagen enkele mechanische eigenschappen van testen en bouwcodes opgenomen en overige foto's en aanzichten van verschillende materialen en modellen.

2. Methodologie

In dit hoofdstuk wordt de strategie van dit rapport beschreven. Dit wordt allereerst gedaan aan de hand van een probleemstelling waaruit een onderzoeksvraag wordt geformuleerd. Uit deze hoofdvraag zullen meerdere deelvragen worden afgeleid. Vervolgens zal er een beschrijving gegeven worden van de doelstelling van dit rapport. Tot slot wordt de methodiek van dit rapport beschreven die de basis legt om de onderzoeksvraag en de daarbij horende deelvragen te beantwoorden.

2.1 Probleemstelling

Zoals in de inleiding is beschreven, is er een constructieve uitdaging in het ontwerpen van The Roundhouse. Deze uitdaging is namelijk het verduurzamen van The Roundhouse. Een oplossing om de duurzaamheid te bevorderen is het vervangen van materialen die worden gebruikt in en op de The Roundhouse. Het overspanningsdoek van The Roundhouse kan bijvoorbeeld gemaakt worden van PE in plaats van het huidige PVC-gecoate polyester. De onderzoeksvraag zou dus als volgt geformuleerd kunnen worden:

“Kan de membraanconstructie van PVC-gecoat polyester op The Roundhouse vervangen worden door een membraanconstructie van het stijvere polyethyleen (PE)?”

2.2 Deelvragen

Om de onderzoeksvraag zo goed mogelijk te beantwoorden en de probleemstelling zo goed mogelijk op te lossen, zijn er verschillende deelvragen opgesteld die elk een gedeelte van de onderzoeksvraag kunnen beantwoorden. Deze deelvragen zijn als volgt, waarbij de deelvragen worden onderverdeeld in twee thema's met een eigen hoofdvraag:

- 1) Is PE geschikt als materiaal voor het overspanningsdoek van The Roundhouse?
 - a. Wat zijn de technische en functionele eigenschappen van PE?
 - b. Wat zijn de belastingen en grenstoestanden van The Roundhouse voor het gebruik van het overspanningsdoek op de constructie?
 - c. Hoe wordt de duurzaamheid van The Roundhouse bevorderd?
- 2) Welk ontwerp voor The Roundhouse kan het best worden toegepast gezien het materiaal en de duurzaamheid van de membraanconstructie?
 - a. Wat zijn de verschillen en overeenkomsten als er wordt gekeken naar de eigenschappen van PVC-gecoat polyester en PE?
 - b. Wat zijn de overeenkomsten en verschillen van The Roundhouse met PVC-gecoat polyester en PE als er wordt gekeken naar de modellen in Easy?

2.3 Doelstelling

Het doel van dit rapport is met name gericht op het onderzoeken, concluderen en evalueren of PE geschikt is als materiaal voor een membraanconstructie over The Roundhouse heen. Er wordt onderzocht of PE kan worden ingezet op The Roundhouse door middel van een literatuuronderzoek, de beschrijving van grenstoestanden, veiligheidsklassen en belastingen op The Roundhouse, een fysiek schaalmodel en een computermodel met behulp van Easy Software.

2.4 Methodiek

Om de onderzoeksvraag en de bijbehorende deelvragen te kunnen worden beantwoorden zal op de volgende manier te werk worden gegaan. In dit rapport wordt in de eerste plaats een literatuuronderzoek uitgevoerd met literatuur onder andere uitgegeven of uitgeleend door Tentech. Hierbij wordt belangrijke informatie verzameld over The Roundhouse en de eigenschappen van het huidig gebruikte PVC-gecoate polyester doek en het nieuwe doek van PE. Het doel is om hiermee deelvragen 1a, 1c en 2a te kunnen beantwoorden. Daarnaast zal er in een literatuuronderzoek informatie worden gezocht over de grenstoestanden, veiligheidsklassen en belastingen voor The Roundhouse met als doel het beantwoorden van deelvraag 1b. Daarna wordt er een fysiek schaalmodel gemaakt om op deze manier inzicht te verkrijgen in de werking van membraanconstructies, de eigenschappen van verschillende materialen voor membraanconstructies en de

vorming van membraanconstructies. Aan de hand hiervan kan worden ingeschat wat de werking is van PE op The Roundhouse, bijvoorbeeld of het materiaal snel zal scheuren of dat het materiaal te stijf is.

Tot slot wordt er door middel van software waarover Tentech beschikt, genaamd Easy Software, een vergelijking gemaakt tussen PVC-gecoat polyester en PE. Dit wordt gedaan door twee concepten van The Roundhouse te construeren in Easy, waarna kan worden afgelezen hoeveel krachten er werken op en in de membraanconstructie. Door met dezelfde belastingen en afmetingen te werken een verschillende materiaaleigenschappen kan er een goede vergelijking gemaakt worden welk materiaal het meest geschikt is als uitvoering op The Roundhouse. Dit zal deelvraag 2b kunnen beantwoorden.

3. Materialen membraanconstructies

In dit hoofdstuk wordt in de eerste paragraaf (par. 3.1) informatie gegeven over membraanconstructies, waarbij de basis wordt gelegd om verschillende materialen die worden gebruikt voor tentconstructies te vergelijken. Vervolgens worden in de volgende paragraaf (par 3.2) allereerst het materiaal behandeld waarmee het overspanningsdoek van The Roundhouse momenteel wordt gemaakt. Vervolgens wordt er in de paragraaf daarop (par. 3.3) een nieuw materiaal voorgesteld om het overspanningsdoek van te maken. Er wordt bij beiden materialen ten eerste gekeken naar de mechanische eigenschappen als sterkte en stijfheid. Daarnaast wordt er ook gekeken naar de duurzaamheid van de materialen en de mate waarin het materiaal recyclebaar is. Tot slot wordt er in de laatste en tevens de vierde paragraaf (par 3.4) een vergelijking gemaakt tussen beiden materialen en er wordt een afweging gemaakt welk materiaal het meest geschikt is voor The Roundhouse.

3.1 Architectonische membraanconstructies

Het verschil tussen membraanconstructies en conventionele constructies is dat bij de conventionele constructies onderscheid gemaakt wordt op basis van de gebruikte materialen voor de constructie. Er kan hierbij bijvoorbeeld worden gekozen voor een constructie van hout, staal of beton waar vervolgens het bouwproces op wordt aangepast. Dit in tegenstelling tot membraanconstructies waarbij er verschillende materialen gebruikt kunnen worden waarbij hetzelfde principe van bouwen wordt toegepast, maar waarbij elk materiaal zich onderscheidt op basis van membraan structuur. Deze membraanconstructies kenmerken zich door het gebruik van materialen die alleen trekkrachten kunnen opnemen en die, door de doorbuiging te vergroten, externe belastingen op de constructie omzet in trekkrachten (Houtman, 2015).

Een andere kant van membraanconstructies is dat het vaak een vrije-vorm-architectuur of -constructie is waarbij constructieve uitdagingen komen kijken. De grootste van deze uitdagingen is het ontwikkelen van dusdanige vormen zodat de constructie enerzijds binnen de randvoorwaarden en eisen van het desbetreffende ontwerpproces valt en anderzijds dat de constructie met een hoge constructieve efficiëntie gerealiseerd kan worden (Qingpeng Li, 2018). Belangrijk bij membraanconstructies is dan ook de relatie tussen vorm en kracht. De studie naar de relatie tussen vorm en kracht wordt 'Structural Morphology' genoemd en kan een effectieve oplossing bieden voor deze uitdaging. Binnen deze studie vallen membraanconstructies onder de categorie vorm-actief, wat betekent dat de vorm ten gevolge van de op de constructie staande belastingen significant en actief wordt aangepast (Pedreschi & Lee, 2014). Op basis hiervan is het belangrijkste waar tegenaan wordt gelopen tijdens het ontwerpproces van een membraanconstructie het ontwikkelen van een stabiele evenwichtsvorm, onderhevig aan mechanische beperkingen zoals de vereisten van de verdeling van spanningen in het doek. In andere woorden, het doel van het ontwerpen van membraanconstructies is het ontwikkelen van een stabiele evenwichtsvorm van het membraan onder een externe belasting.

Doordat membraanconstructies flexibel zijn en vorm-actief kunnen er onder grote overspanningen ook grote vervormingen en doorbuigingen optreden. Meestal hebben membraanconstructies daarom een dubbel gebogen vorm, een soort zadelvorm. Aangezien deze zadelvorm schuifspanningen oplevert, moeten de materialen dit wel kunnen houden. Daarom kan er een tweetal eisen opgesteld worden waaraan een membraan materiaal moet voldoen (Houtman, 2015):

- Het membraan materiaal mag alleen trekkrachten kunnen overbrengen;
- Het membraan materiaal moet bestand zijn tegen afschuifvervorming.

Tegenwoordig worden de meeste gewoven membraanconstructies gemaakt van katoenvazel, polyamide 6.6 (Nylon), Polyestervezel- en glasvezelmaterialen of in combinatie met coatings van polyvinylchloride (PVC), polytetrafluoroethyleen (PTFE), ethyleen tetrafluoroethyleen (EFTE) en siliconen (Eltahan, 2018; Houtman & Orpana, 2000).



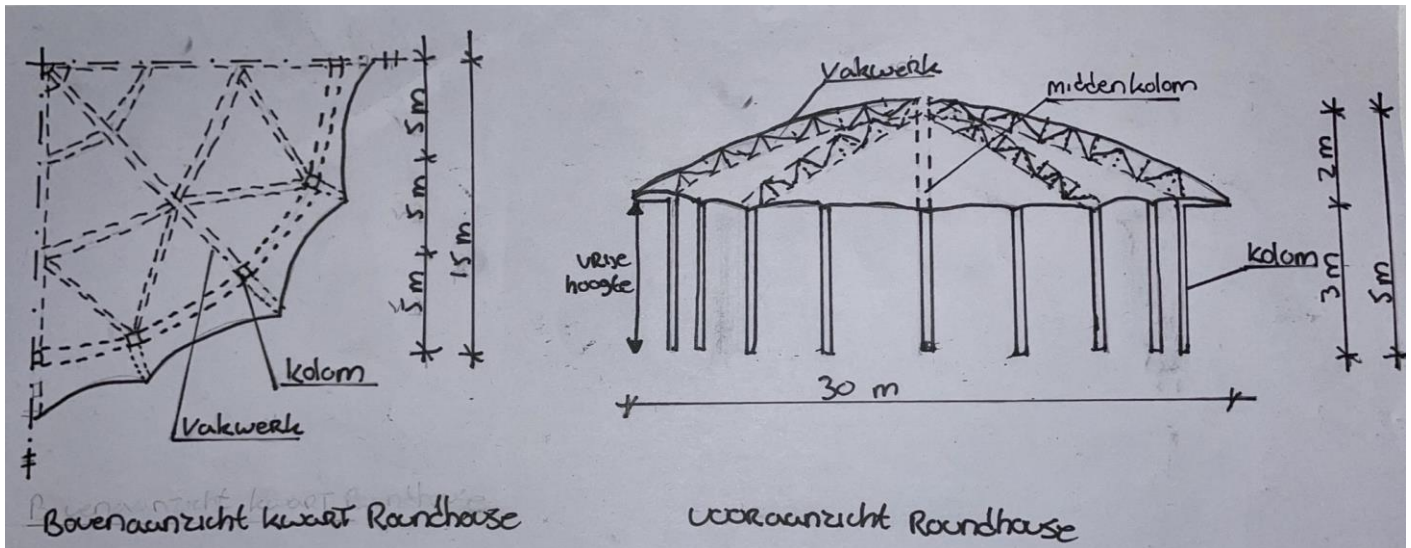
Figuur 1: 'The Roundhouse'. Geraadpleegd van "ID Agro", gemaakt door ID Agro BV, 2009 (<https://www.idagro.nl/producten/the-roundhouse>).

3.1.1 The Roundhouse

The Roundhouse, zoals te zien in Figuur 1, is een membraanconstructie die is ontworpen door ID Agro en functioneert als een veestal om het dierwelzijn, werkgemak van de boer en de kostenefficiëntie te bevorderen (ID Agro BV, z.d.). The Roundhouse is ontworpen in een ronde vorm wat de eenvoud van het gebruik van de constructie aanduidt. De gehele constructie bestaat uit een staal- of houtconstructie en een membraanconstructie. De staal- of houtconstructie is opgebouwd uit één centrale kolom in het midden waar vakwerkspanten aan zijn verbonden, zoals te zien is in Figuur 2. Daarnaast is er in Figuur 3 nog een tekening van The Roundhouse weergegeven. De stalen of houten draagconstructie is in het bovenaanzicht met de stippellijn aangegeven. Ook zijn de vakwerkspanten in het vooraanzicht aangegeven met stippellijnen.



Figuur 2: Vakwerkspant en membraanconstructie. Geraadpleegd van "ID Agro", gemaakt door ID Agro BV, 2009 (<https://www.idagro.nl/producten/the-roundhouse>).



Figuur 3: Boven- en vooraanzicht van The Roundhouse.

De membraanconstructie is het dak en bestaat uit een PVC-gecoat membraan dat strak wordt opgespannen. Het doek bestaat uit polyesterweefsel en het PVC is gecoat op het doek. Verder is de ronde vorm van het doek onderverdeeld in meerdere snijvlakken die met elkaar zijn verbonden door middel van een naad. In de volgende paragraaf wordt er ingegaan op de eigenschappen en voordelen van dit soort doek. Daarnaast wordt er in de paragraaf daarna onderzocht of er een mogelijkheid is om het doek van een ander materiaal te maken, namelijk een doek van een polymeer polyethyleen, en of de voordelen van het doek van polyethyleen het bestaande doek overtreffen.

3.2 PVC coating op polyester materiaal

De combinatie van een polyester doek en een coating van PVC is een van de meest gebruikte vormen van doeken voor lichtgewicht constructies. Op veel gewoven membraanconstructies worden coatings toegepast. De reden hiervoor is de duurzaamheid en de langdurigheid van het doek te bevorderen, eveneens als het waterdicht maken en het glad maken van de membraanconstructie (Bögner-Balz, Blum & Köhnlein, 2015; Houtman, 2015). Oftewel, de coating beschermt het onderliggende gewoven materiaal tegen schade van stralingen, zoals UV licht, schade van water dat door kan dringen tussen de draden van het gewoven materiaal en verder stabiliseert de coating de geometrie van het gewoven materiaal. Deze eigenschappen en kenmerken gelden ook voor de PVC coating op polyester.

Het doek voor The Roundhouse is momenteel dus waterdicht, beschermend tegen atmosferische stralingen als UV licht en door de gladde PVC coating is het doek ook vuilafstotend. Volgens Bögner-Balz, Blum & Köhnlein (2015) en Bridgens, Gosling & Birchall (2003) worden naast bovengenoemde kenmerken nog meerdere eigenschappen en voordelen van PVC-gecoat polyester aangeduid:

- Het PVC-gecoat polyester is sterk en heeft een hoge flexibiliteit wat het gevaar van schade door vouwen verkleint. Daarnaast heeft het materiaal een lage afschuifweerstand, waardoor dubbele krommingen en andere vormen gemakkelijk toegepast kunnen worden.
- De PVC coating werkt brandvertragend. Wanneer er brand uitbreekt ontstaan er dus gaten in het doek, waardoor de overkapping zelf ventilerend kan zijn en wat mensen de tijd geeft onder de overkapping vandaan te komen.
- De coating is altijd gepigmenteerd en kan geproduceerd worden in verschillende kleuren. Dat geeft de mogelijkheid esthetische wensen te waarborgen.
- De membraanconstructie gemaakt van PVC-gecoat polyester kan worden toegepast op verschillende onderliggende funderingsconstructies en gemaakt van verschillende soorten materialen. De onderliggende constructie van The Roundhouse kan dus worden uitgevoerd in zowel staal als hout.
- Het recyclen van de gehele membraanconstructie is mogelijk, maar het proces van recyclen duurt lang en is duur doordat de coating van het polyester gescheiden moet worden om vervolgens de twee verschillende materialen afzonderlijk te recyclen.

Naast deze voordelen zijn er ook enkele beperkingen van PVC-gecoat polyester. PVC-gecoat polyester heeft onder andere een lage licht doorlatendheid, waardoor er in The Roundhouse donkere plekken gecreëerd worden in vergelijking met buiten de veestal. Daarnaast vallen deze membraanconstructies onder de constructies met korte tot middelmatige levensduur wat betekent dat de constructie snel vervangen of gerenoveerd zou kunnen worden (Bletzinger et al., 2013).

Alle karakteriseringen van het PVC-gecoat polyester op basis van onder andere de fysieke eigenschappen, duurzaamheid en recyclebaarheid worden weergegeven in Appendix A. Dit bevat ook enkele mechanische eigenschappen die specifiek gebruikt kunnen worden om een relativering te maken tussen PVC-gecoat polyester en PE.

3.3 Polymeer polyethyleen materiaal

Membraanconstructies gemaakt van polyethyleen (PE) worden in eerste instantie alleen gebruikt voor doeleinden waarbij staalconstructies worden overspannen. PE wordt gezien als een thermoplast, omdat het door warmte gesmolten kan worden en eenmaal afgekoeld en gevormd weer opnieuw gesmolten kan worden en daarna nog een keer worden herstructureerd (Patton, 2021). Door deze eigenschap van PE wordt dit materiaal gezien als duurzaam, aangezien het materiaal na haar levensduur van meer dan 20 jaar weer omgesmolten kan worden en kan worden gerecycled om vervolgens hergebruikt te worden. Daarnaast worden PE membranen gecertificeerd als vervaardigd in een veilig en circulair milieu en op een verantwoorde manier. Eén van de meest sterke eigenschappen van PE is de verhouding tussen de sterkte en het gewicht van het materiaal. Dit lage gewicht heeft een enorme positieve impact in de transportkosten en de mate waarin de membraanconstructie met dit materiaal makkelijk te installeren is. Dit komt doordat grote stroken of uitsnijdingen in veel gevallen makkelijk door mankracht aangepast kunnen worden. Daarnaast hebben de membranen van PE ook nog een hoge afschuifsterkte en dus een grote weerstand tegen scheurvormingen (Patton, 2021).

Volgens Patton (2021) worden er naast de bovengenoemde eigenschappen en voordelen nog enkele andere typische kenmerken van PE opgesomd die de vergelijking tussen PVC-gecoat polyester kunnen vergemakkelijken of verduidelijken:

- Constructies die bedekt worden met een wit PE membraan worden door mensen vaak geassocieerd met een comfortabel milieu. Dat comfortabele is met name van belang voor The Roundhouse waar het vee geen last moet ondervinden en waar het zich zo veilig mogelijk kan voelen.
- PE membranen hebben een goede doorschijnendheid en kunnen zorgen voor een natuurlijk belichte veestal. Dit komt doordat het materiaal het licht diffundeert. Daarnaast blokkeert het PE membraan een deel van de UV straling om de schadelijke effecten te beperken.
- Het PE membraan kan goed tegen vervormingen als gevolg van extreme temperaturen. Het kan worden toegepast bij zeer koude temperaturen waarbij het materiaal zich zal samentrekken, maar niet zal barsten of scheuren. Bij hogere temperaturen boven de vijftig graden Celsius zal er blijvende krimp optreden. Echter, als er een wit PE membraan wordt toegepast blijft het doek koeler en zal het doek alleen de temperatuur van de lucht eromheen aannemen.
- Door de inerte aard van PE blijven vuil en slijtages niet plakken aan het membraan en is het vuil gemakkelijk te verwijderen. Daarnaast kunnen er zich geen micro-organismen vormen op het oppervlak van PE, omdat daar geen voedselbron voor is.
- PE is brandvertragend. Dat betekent dat het materiaal het vuur zelf laat doven om iedereen tijd te geven uit het gebouw te komen. Er ontstaan dus alleen gaten in het doek, waardoor de rook ook kan ontsnappen.

Voor de toepassing van een overspanningsdoek van PE op The Roundhouse kan worden gekozen voor een doek genaamd NovaShield FR 400. PE membranen worden gekarakteriseerd op basis van onder andere de fysieke en mechanische eigenschappen, de duurzaamheid en de recyclebaarheid welke zijn terug te vinden in Appendix B. De karakterisering gebeurt met behulp van standaarden die specifiek zijn gesteld aan PVC-gecoat polyester. Deze standaarden worden gevormd door middel van klassen uitgaande van gewicht en kracht.

3.4 Vergelijking tussen de materialen

Het mechanische gedrag van membraanconstructies hangt vooral af van de kromming. Daarbij zijn de twee belangrijkste prestatiecriteria voor membraanconstructies gerelateerd aan spanning en vervorming. In de meeste gevallen bij membraanconstructies zullen de maximale spanningen optreden in de vezelrichtingen. Dat komt door het feit dat membraanconstructies een lage afschuiftijfheid hebben in vergelijking met hun trekstijfheid (Karatsi, 2022). Hiernaast zijn er voor membraanconstructies geen strikte eisen aan doorbuigingen gesteld. Daarentegen kunnen er wel limieten voor de doorbuiging zijn om bijvoorbeeld botsingen of overlappingsen tussen de onderliggende constructie en de membraanconstructie te voorkomen.

De resultaten van alle mechanische eigenschappen in Appendix A en Appendix B laten zien dat PE zich kan meten aan de mechanische eigenschappen van PVC-gecoat polyester of deze zelfs overtreft. De belangrijkste redenen om voor een membraanconstructie gemaakt van PE te kiezen in plaats van PVC-gecoat polyester is dat PE een oppervlakte gerelateerde massa wat 35% minder is dan dat van PVC-gecoat polyester en dat PE veel duurzamer is op basis van recyclebaarheid (Patton, 2021). Tabel 1 laat de belangrijkste vergelijkingen zien voor de mechanische eigenschappen tussen de NovaShield FR 400 en de verschillende klassen van PVC-gecoat polyester. De laatste kolom in deze tabel geeft de NovaShield FR 400, welke is gemaakt van PE, weer. In de drie kolommen daarvoor staan de materiaaleigenschappen van drie klassen PVC-gecoat polyester. In deze tabel is te zien dat de treksterkte tenminste even goed is als klasse Z1 van het gecoat polyester, maar met een lagere oppervlakte gerelateerde massa. Daarnaast zijn de eigenschappen redelijk gelijkwaardig of in het voordeel van PE.

Tabel 1: Vergelijking materiaaleigenschappen PVC-gecoat polyester (1^e kolom "Membraanconstructie materialen") en de NovaShield FR 400 van PE (2^e kolom "Membraanconstructie materialen en laatste kolom van de tabel).

Parameter	Standaard	Membraanconstructie materialen			
		PVC-gecoat polyester			PE
		Klasse Z 1	Klasse Z 2	Klasse Z 3	
Draagstof	DIN EN ISO 2076	Polyester (PES)			High Density PE
Coating	-	Soft PVC			Low Density PE
Oppervlak gerelateerde massa [g/m ²]	DIN EN ISO 2286-2	≥ 450	≥ 580	≥ 650	407
Treksterkte schering/inslag [kN/5 cm]	DIN EN ISO 1421, procedure 1	2.0 / 1.6	2.5 / 2.5	3.0 / 3,0	2.3 / 2.2
Rek bij breuk [%]		≥ 15 / ≥ 15			22 / 18
Max. rek bij 10% van de treksterkte [%]		≤ 2 / ≤ 6			1.5 / 1.2
Weerstand tegen scheurvoortplanting [kN]	DIN EN 1875-3	0.1 / 0.1	0.13 / 0.13	0.2 / 0.2	0.5 / 0.4
Kleefkracht [N/5 cm]	DIN EN 15619: 2014-07, Appendix B	100	100	100	80
Lassterkte [kN/5 cm] (lasbreedte tussen 15 en 40 mm)	DIN EN ISO 1421, procedure 1	Bij 23 °C: min. 70% van treksterkte Bij 70 °C: min. 40% van treksterkte			23 °C: 85% 70 °C: 70%
Lassterkte [kN/5 cm] (lasbreedte ≥ 40 mm)		Bij 23 °C: min 80% van treksterkte Bij 70 °C: min. 60% van treksterkte			23 °C: 85% 70 °C: 70%

Noot. Overgenomen uit *Characterization of Polyethylene Structure Membrane*, door S. Patton, 2021, p. 50.

Als er wordt gekeken naar de grotere stijfheid en de grotere dikte van PE, kunnen overspanningen met complexe vormen zoals dubbele buigingen of strakke rondingen moeilijker te produceren zijn. Echter, dit is voor The Roundhouse minder van toepassing aangezien het een relatief simpele vorm heeft en geen lastige aansluitingen. Wanneer PVC-gecoat polyester wordt gebruikt, kan de draagconstructie daarnaast in

meerdere materialen uitgevoerd worden. Dit kan bij een membraanconstructie van PE alleen uitgevoerd worden in combinatie met een draagconstructie van staal. Een andere reden om meer te neigen naar een doek van PE is dat PE meer licht doorlatend is, waardoor er een rustigere en meer natuurlijke veestal gecreëerd kan worden.

Voordelen als de waterdichtheid van het membraan, de beschermende functie van het membraan tegen atmosferische stralingen en de brandvertragende werking van het membraan gelden voor zowel PVC-gecoat polyester als PE.

Al met al wegen de voordelen dat PE lichter van gewicht is en waarbij dezelfde treksterkte en afschuifweerstand van toepassing is, dat PE kosten effectief is en dat PE duurzamer is zwaarder mee dan de voordelen van PVC-gecoat polyester dat in meerdere kleuren uitgevoerd kan worden en een draagconstructie kan hebben van zowel staal als hout. Doordat PE lichter van gewicht is, worden de hanteerbaarheid, het transport en de installatie dusdanig vergemakkelijkt dat de kosten voor de bouw van The Roundhouse ook nog eens naar beneden worden gebracht. Er kan dus geconcludeerd worden dat op basis van de mechanische eigenschappen en alle overige kenmerken een membraanconstructie kan worden toegepast van PE. Voordat The Roundhouse daadwerkelijk toegepast kan worden als membraanconstructie van PE wordt er een op schaal gemaakte modellering gemaakt om meer inzicht te verkrijgen hoe de constructie kan vormen en hoe een membraanconstructie zich gedraagt.

4. Grenstoestanden & Belastingen

In dit hoofdstuk wordt allereerst het Programma van Eisen beschreven. Daarnaast worden de belastingen en grenstoestanden beschreven. Ook wordt er ingegaan op veiligheidsfactoren, omgeving en de veiligheidsklasse voor The Roundhouse. Tot slot worden verschillende soorten belastingen beschreven, zoals eigen gewicht, windbelastingen en sneeuwbelasting.

4.1 Grenstoestanden

Het ontwerp van The Roundhouse moet op verschillende vlakken worden getoetst. Op deze manier kan worden aangetoond dat de constructie veilig is, constructief efficiënt en betrouwbaar. Het aantonen dat de constructie veilig is, constructief efficiënt en betrouwbaar gebeurt door het beschrijven van de Ultimate Limit State (ULS) en de Serviceability Limit State (SLS). In de ULS wordt de sterkte van het membraan op de uiterste omstandigheden getoetst, waarbij het membraan nog voldoende moet functioneren. Dit wordt gedaan door veiligheidsfactoren te gebruiken. De SLS stelt dan weer eisen aan de functionaliteit waar The Roundhouse en de membraanconstructie aan moet voldoen zonder te bezwijken.

4.1.1 Ultimate Limit State

De ULS stelt dat de spanning in het doek niet groter mag zijn dan de maximale ontwerpsterkte. In werkelijkheid zijn de exacte eigenschappen van het te toetsen materiaal niet bekend, evenmin als de exacte belastingen die op de membraanconstructie aangrijpen. Daarom worden veiligheidsfactoren gebruikt voor zowel de belastingen als voor de materiaaleigenschappen om de onzekerheid weg te nemen. Voor membraanconstructies als The Roundhouse wordt gebruik gemaakt van DIN4134, zoals ook is toegepast in het onderzoek van Barnes, Forster & Dencher (2004). Deze komen namelijk het meest overeen met EN 1990 en de Quick Reference. Hierin maken zij gebruik van de volgende formule:

$$f_d = \frac{f_{tk}}{\gamma_f \gamma_M A_i} = \frac{f_{tk}}{A_{res}}$$

Waarin:

- f_d = toegestane spanning [kN/m];
- f_{tk} = karakteristieke treksterkte van 5%-fractiel [kN/m];
- γ_f = belastingfactor [-];
- γ_M = veiligheidscoëfficiënt voor het materiaal [-] (1,4 in het weefsel en 1,5 in de verbindingen);
- A_i = combinatie van reductiefactoren, afhankelijk van de belasting situatie [-].

Voor de ULS is een aantal belastingfactoren voor verschillende belastingcombinaties opgesteld, omdat het niet mogelijk is om verschillende belastingfactoren voor de verscheidene belastingcombinaties, zoals permanente belasting en wind- en sneeuwbelasting, lineair te interpoleren en te combineren. Deze belastingfactoren zijn te vinden in Tabel 2.

Tabel 2: Belastingfactoren voor de belastingcombinaties.

Belastingcombinatie	γ_f [-]	Belastingen
Permanent	1,5	Voorspanning, eigen gewicht
Wind	1,6	Voorspanning, eigen gewicht, windbelasting
Sneeuw	1,5	Voorspanning, eigen gewicht, sneeuwbelasting

Noot. Overgenomen uit *The European Design Guide for Tensile Surface Structures*, door Forster en Mollaert, 2004.

Daarnaast zijn in Tabel 3 de waarden gegeven voor de reductiefactoren die afhankelijk zijn van de belasting situatie. Ook staat er een beschrijving gegeven waarvoor die reductiefactor geldt en waarvoor die reductiefactor dus corrigeert.

Tabel 3: Reductiefactoren, A_i .

A_i	Factor	Beschrijving
A_0	1,0-1,2	De reductiefactor houdt rekening en compenseert voor het verschil in de waarde van de sterkte tussen de strooktest en de bi-axiale test.
A_1	1,6-1,7	De reductiefactor houdt rekening met de lang termijn belastingen.
A_2	1,1-1,2	De reductiefactor houdt rekening met de vervuiling en degradatie van het materiaal.
A_3	1,1-1,25	De reductiefactor houdt rekening met de belasting in geval van hoge temperaturen.

Noot. Overgenomen uit *The European Design Guide for Tensile Surface Structures*, door Forster en Mollaert, 2004.

De belastingfactoren, de veiligheidscoëfficiënten en de reductiefactoren kunnen nu samen genomen worden om zo tot A_{res} te komen. Een overzicht van deze ene factor voor elke belastingcombinatie is weergegeven in Tabel 4. De rekenwaarde van deze ene factor is voor elke combinatie de maximale waarde voor A_{res} .

Tabel 4: Globale veiligheidsfactoren per belastingcombinatie.

Belastingcombinatie	Factoren	A_{res}
Permanent	$\gamma_f * \gamma_M * A_0 * A_1 * A_2 * A_3$	4,9 – 6,4
Wind	$\gamma_f * \gamma_M * A_0 * A_2$	2,9 – 3,2
Sneeuw	$\gamma_f * \gamma_M * A_0 * A_1 * A_2$	4,4 – 5,1

Noot a. Overgenomen uit *The European Design Guide for Tensile Surface Structures*, door Forster en Mollaert, 2004.

Een ander bezwijkmechanisme is dat het membraan, bijvoorbeeld op een warme dag, in brand vliegt. In dit geval moet het vee in The Roundhouse tijd genoeg hebben uit de stal te komen en zonder in paniek te raken. Het doek moet dus een vlam vertragende werking moeten hebben of zelfs helemaal niet ontvlambaar moeten zijn.

4.1.2 Serviceability Limit State

The Roundhouse is een veestal en zal dus vooral in plattelandsgebieden te vinden zijn. Vandaar dat The Roundhouse valt onder gevolgklasse CC1 volgens de Quick Reference, aangezien er een hele kleine kans is op verlies van menselijke levens en sociale, economische en ecologische gevolgen zijn relatief klein of verwaarloosbaar (Pasterkamp, 2016). Vandaar dat de veiligheidsfactoren voor de permanente belasting en voor de leidende variabele belasting vermenigvuldigt moeten worden met een factor K_{FI} van 0,9.

Daarnaast kan het voorkomen dat de membraanconstructie los schiet van de draagconstructie door bijvoorbeeld een heftige rukwind. Mocht dit zich voordoen en het membraan bezwijkt dan moet de draagconstructie van The Roundhouse stabiel blijven staan. Dat betekent dus dat het vakwerk, de kolommen en de middenkolom niet van hun plaats mogen schieten. Het wordt als acceptabel gezien dat het membraan ongeveer eens in de 10 tot 15 jaar mag bezwijken, maar dat het membraan daarna eenvoudig kan worden vervangen.

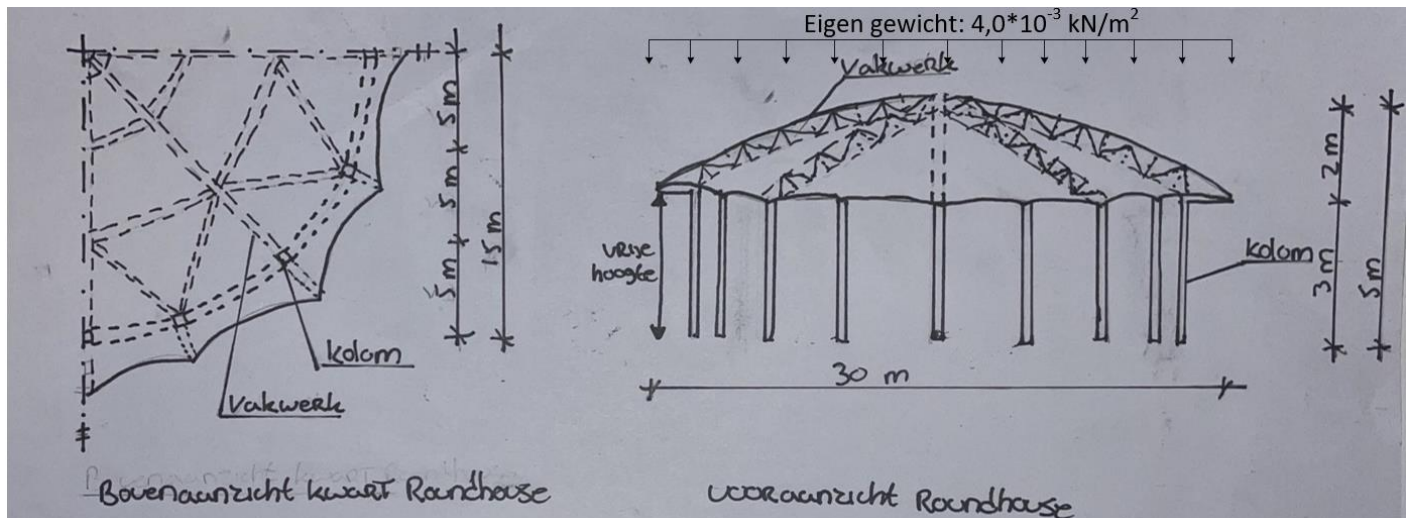
Tot slot mogen de vervormingen van het doek niet te groot worden. Dit is om het klapperen van de membraanconstructie te voorkomen, zodat het vee in The Roundhouse zo min mogelijk hinder ondervindt of onverwachte knallen. Dit kan voorkomen worden door het membraan zo strak mogelijk te spannen, waardoor de vervormingen minder groot worden. Het membraan kan echter niet te strak gespannen worden, aangezien de kans op scheuren wordt vergroot bij een strakker gespannen membraan. Tegelijkertijd komt hierbij kijken dat door het vervormen van het membraan de kans op ophoping van water verminderd. Door ophoping van water kunnen plassen op het membraan ontstaan waardoor de belastingen op specifieke gedeelten toeneemt met als gevolg het scheuren van de membraanconstructie.

4.2 Belastingen

De belastingen die op The Roundhouse werken, kunnen worden bepaald door gebruik te maken van bestaande eurocodes. Momenteel is er nog geen complete eurocode voor het ontwerpen en toetsen van membraanconstructies. Er wordt dus ook gebruik gemaakt van nationale richtlijnen (Corne et al., 2016), een multidisciplinaire membraanstructuren vereniging genaamd Tensinet (Forster & Mollaert, 2004) en de Quick Reference van de TU Delft (Pasterkamp, 2016). De belastingen die op de membraanconstructie werken worden onderverdeeld in de vier belangrijkste invloeden: voorspanning en eigen gewicht die onder de blijvende belastingen vallen en wind- en sneeuwbelasting die onder de veranderlijke belastingen vallen.

4.2.1 Eigen gewicht

Het eigen gewicht bij membraanconstructies is erg laag. Het materiaal waarin The Roundhouse wordt uitgevoerd is PE. De specifieke uitvoering van het doek van The Roundhouse is, op aanraden van Ir. R. Houtman, de NovaShield FR 400. Dit heeft een eigen gewicht van 407 g/m^2 zoals is weergegeven in Tabel 1. Omgerekend is dit ongeveer $4,0 \cdot 10^{-3} \text{ kN/m}^2$. Een belastingschema hoe het eigen gewicht op de constructie aangrijpt is weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4: Belastingschema voor het eigen gewicht.

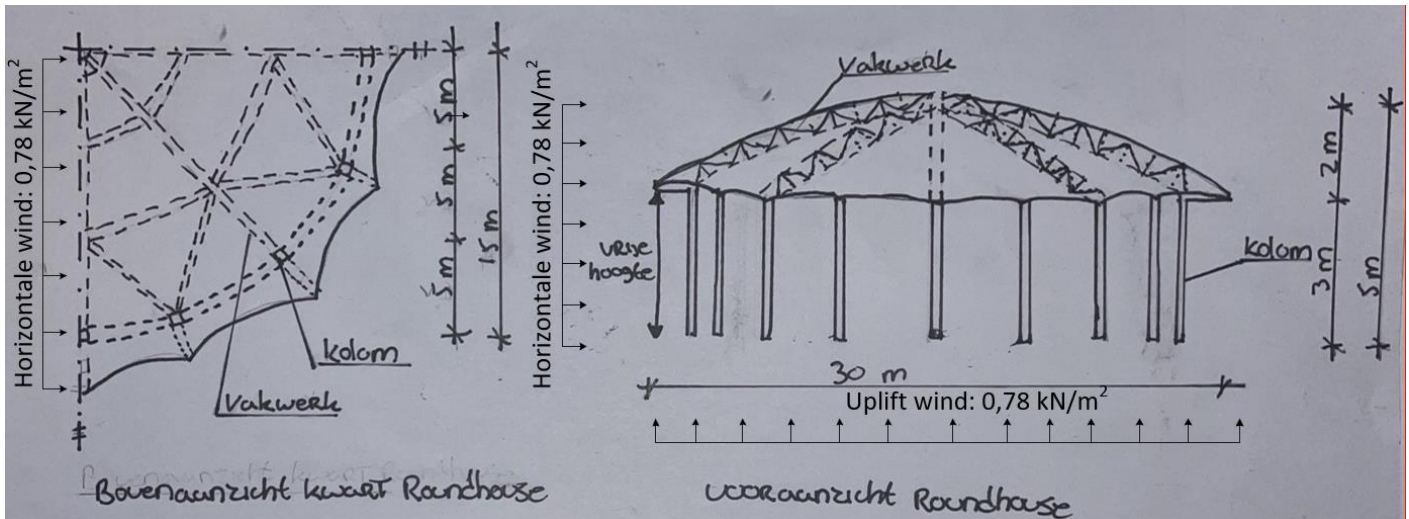
4.2.2 Voorspanning

De voorspanning is er om te zorgen dat de vorm van de membraanconstructie behouden blijft wanneer er belastingen op het doek werken. Het doel van de voorspanning in een membraanconstructie is dus eigenlijk het blijven garanderen van trekkrachten in de constructie zodat, wanneer er een kracht aangrijpt in een punt, geen delen van het membraan slap gaan hangen of vervormen. Hoe hoger de voorspanning is des te minder krommingen en andere afwijkingen in het membraan zich voordoen. Daarnaast hebben membraanconstructies verschillende sterktes in lengte en breedte richting, oftewel de 'schering' en 'inslag'. De voorspanning kan voor deze richting dan ook verschillen en apart worden aangepast.

Om de benodigde voorspanning voor The Roundhouse te bepalen, zijn er enkele vuistregels opgesteld. De voorspanning hangt onder andere af van de sterkte en stijfheid van het materiaal. De algemene vuistregel is dat de voorspanning tussen de 2,5% en 6% van de gemiddelde trekkracht gekozen wordt. In Tabel is af te lezen dat PE een treksterkte heeft in de schering van $2,3 \text{ kN/5 cm}$ en in de inslag van $2,2 \text{ kN/5 cm}$. Omgerekend is dit respectievelijk 46 kN/m en 44 kN/m voor de schering en inslag. De voorspanning kan daarom variëren van de laagst mogelijke optie, oftewel 2,5% van 44 kN/m , tot de hoogst mogelijke optie, oftewel 6% van 46 kN/m . Dus de variatie in voorspanning kan lopen van $1,1 \text{ kN/m}$ tot $2,76 \text{ kN/m}$. Aangezien het materiaal relatief stijf is, wordt er gekozen voor een voorspanning die wat hoger ligt. In dit geval wordt er in eerste instantie een voorspanning gekozen van $2,3 \text{ kN/m}$.

4.2.3 Windbelasting

De windbelasting is de meest dominante belasting als het gaat om membraanconstructies doordat de grootste vervormingen van deze type constructies meestal door de windbelasting wordt veroorzaakt. De windbelasting wordt bepaald aan de hand van NEN-EN 1991-1-4 en de Quick Reference variable load II. De hoogte van The Roundhouse varieert tussen 3 meter en 5 meter en doordat het een veestal is, komt The Roundhouse met name voor in plattelandsgebieden. Vandaar dat de maximale stuwdruk in dit geval $0,78 \text{ kN/m}^2$ bedraagt. Deze waarde zal worden gebruikt voor de gehele constructie. De windbelasting kan op de constructie zowel horizontaal aangrijpen als verticaal omhoog gericht. Deze twee soorten windbelastingen zijn in Figuur 5 weergegeven in een belastingschema.



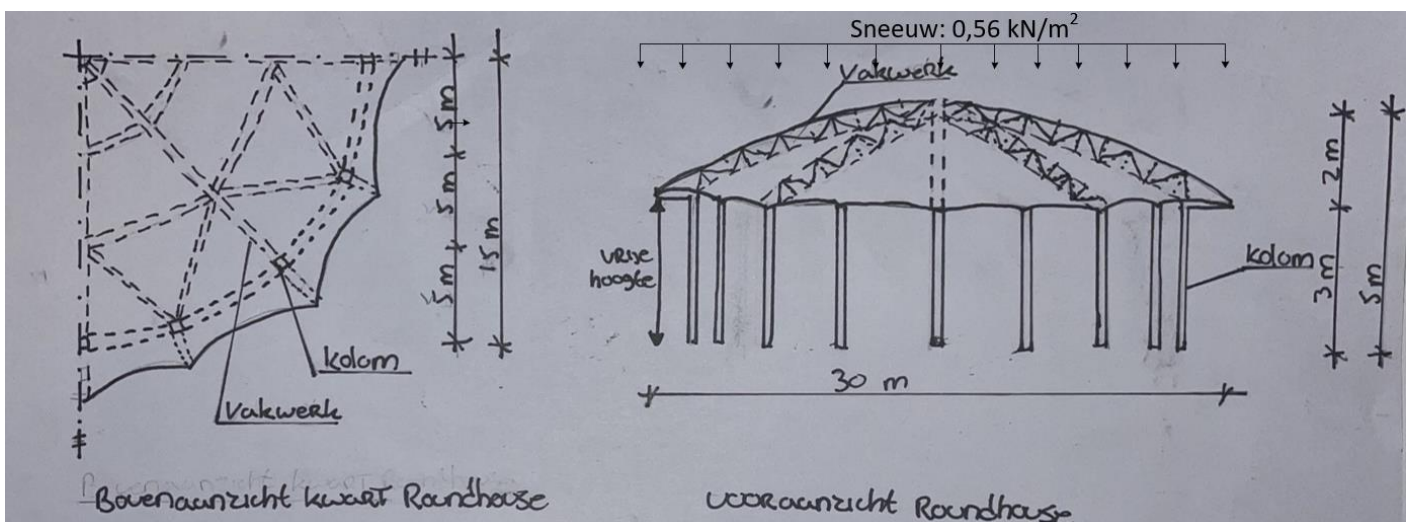
Figuur 5: Belastingenschema voor de windbelastingen.

4.2.4 Sneeuwbelasting

De sneeuwbelasting hoeft volgens de NEN-EN 13782 artikel 7.4.3 niet noodzakelijk meegenomen te worden in de sterkte- en stabiliteitsberekeningen. Dit geldt echter alleen wanneer er aan de volgende voorwaarden wordt voldaan (van Weersch, 2018):

- Er wordt gebouwd in een gebied waar geen sneeuw zal voorkomen, of
- er wordt gebouwd tijdens een seizoen waarin geen sneeuw zal voorkomen, of
- er worden maatregelen getroffen waardoor sneeuw niet kan blijven liggen, te weten:
 - Er kan voldoende verwarmd worden door verwarmingsapparatuur.
 - De constructie voldoende verwarmd kan worden voordat het gaat sneeuwen.
 - De oppervlakte aan de buitenkant van het membraan op een dusdanige manier verhit wordt dat de temperatuur minstens 2°C boven het vriespunt ligt.
 - De membraanconstructie zo strak wordt gespannen dat wateraccumulatie niet kan optreden.

Niet aan alle eisen wordt voldaan. Vandaar dat de sneeuwbelasting wordt bepaald volgens NEN-EN 1991-3 en de Quick Reference variable loads III. Sneeuwophoping kan zich voordoen op The Roundhouse. Een standaardwaarde voor de sneeuwbelasting op de grond is in Nederland 0,7 kN/m². Deze sneeuwbelasting wordt nog vermenigvuldigd met een vormfactor. Aangezien The Roundhouse ongeveer een driehoekige overspanning heeft met een hoek van de overspanning kleiner dan 30° wordt er gerekend met een vormfactor van 0,8. De uiteindelijke sneeuwbelasting waarmee gerekend wordt, is dan gelijk aan 0,56 kN/m². In Figuur 6 is het belastingenschema weergegeven voor de sneeuwbelasting.



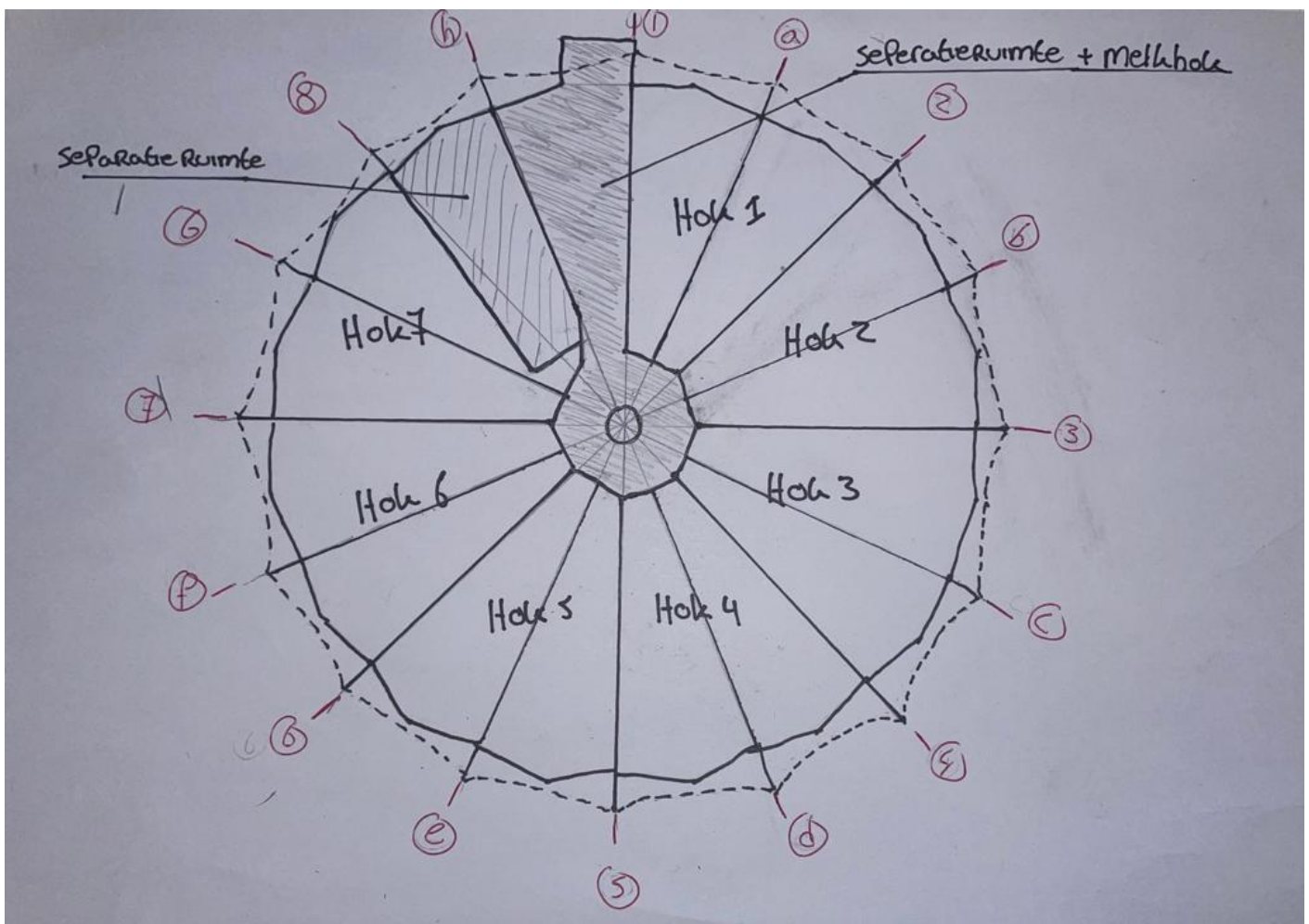
Figuur 6: Belastingenschema voor de sneeuwbelasting.

5. Technisch ontwerp

Voor een goed definitief ontwerp tot stand kan komen, worden enkele stappen ondernomen om het ontwerpproces in goede banen te begeleiden. Allereerst wordt er informatie opgezocht hoe The Roundhouse in elkaar zit, hoe het doek wordt verbonden met het vakwerk en de onderliggende constructie en hoe het doek bijvoorbeeld aan elkaar wordt verbonden of dat het doek in één keer wordt gemaakt. Deze informatie wordt beschreven in de paragraaf 5.1. Vervolgens wordt er in paragraaf 5.2 een concept ontwerp beschreven om de werking van The Roundhouse beter te kunnen begrijpen. Dit is gedaan door een op schaal gemaakt ontwerp met behulp van ijzerdraden, kunststoffen, pinnetjes, etc. om de werkelijkheid zo accuraat mogelijk na te bootsen. In de laatste paragraaf (par. 5.3) wordt er een optimaal ontwerp gemaakt en beschreven met behulp van Easy Software.

5.1 Introductie

Om een tot een goed en representatief model voor The Roundhouse te komen, is het van belang om te weten hoe The Roundhouse in elkaar zit en uit welke onderdelen deze bestaan. The Roundhouse bestaat uit drie onderdelen: de kolommen, de vakwerkspanten waarover het doek wordt gespannen en het doek zelf, oftewel de membraanconstructie. Deze onderdelen worden in de volgende deelparagrafen beschreven. Omdat er in dit rapport uitgegaan wordt van een doek van PE zal The Roundhouse ook alleen maar uitgevoerd kunnen worden met een onderliggende staalconstructie, zoals in paragraaf 3.3 staat beschreven. The Roundhouse kan worden uitgevoerd in meerdere maten en groottes. De standaard Roundhouse heeft een diameter tussen de kolommen van 30 meter, maar er zijn ook latere varianten met diameters van 22 meter en 45 meter. Hier wordt uitgegaan van de standaard variant.



Figuur 7: Plattegrond van The Roundhouse 30. Geraadpleegd van "ID Agro", gemaakt door ID Agro BV, 2015 (<https://www.idagro.nl/media/77216/brochure-roundhouse.pdf>).

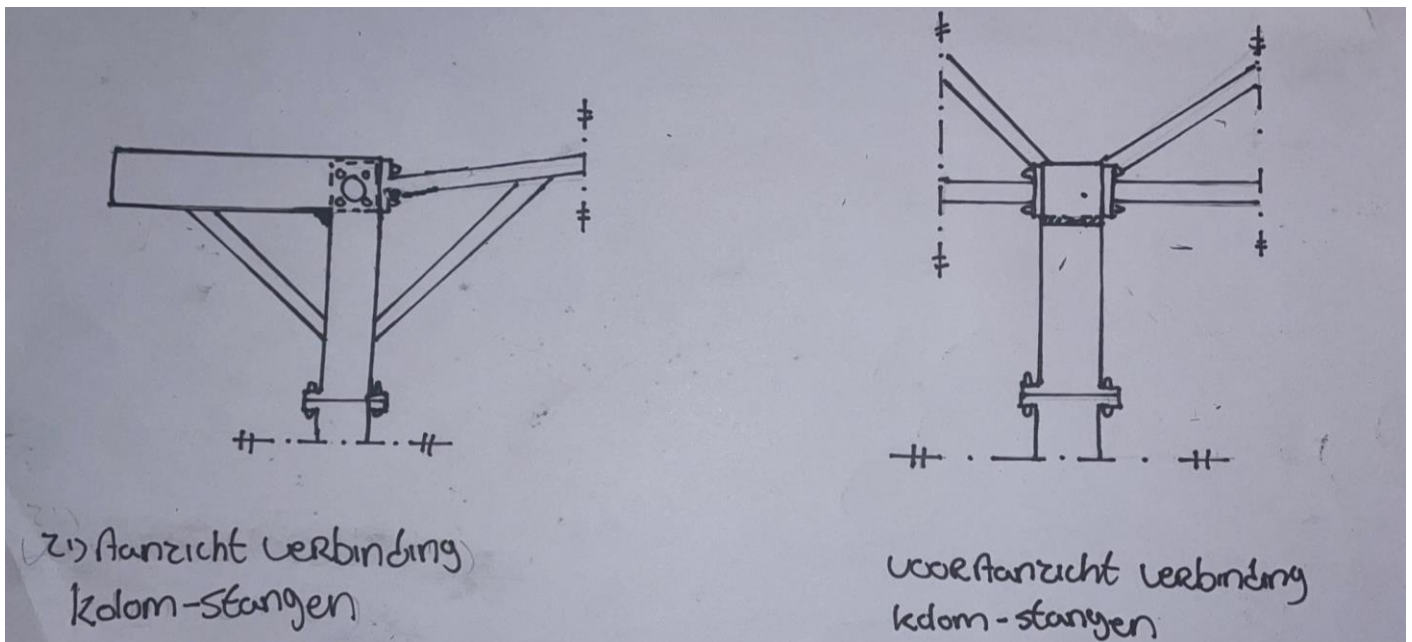
In Figuur 7 is er een algemene plattegrond van The Roundhouse 30 weergegeven. In de figuur lopen de vakwerkspanten over de lijnen met een getal en de lijnen met een letter geven de lijnen aan waar ook nog kolommen worden geplaatst. In de plattegrond is verder te zien dat een stal tussen twee vakwerkspanten wordt omsloten en dat er centraal in het gebouw een controleruimte is gesitueerd waar de dieren uit een hok heengeleid kunnen worden als een stal gemest of schoongemaakt moet worden.



Figuur 8: Kolommen van The Roundhouse. Geraadpleegd van "Herefords", gemaakt door Natuur Beheer Limburg, 2012 (<http://www.herefords.nl/natuur-beheer/>).

5.1.1 De kolommen

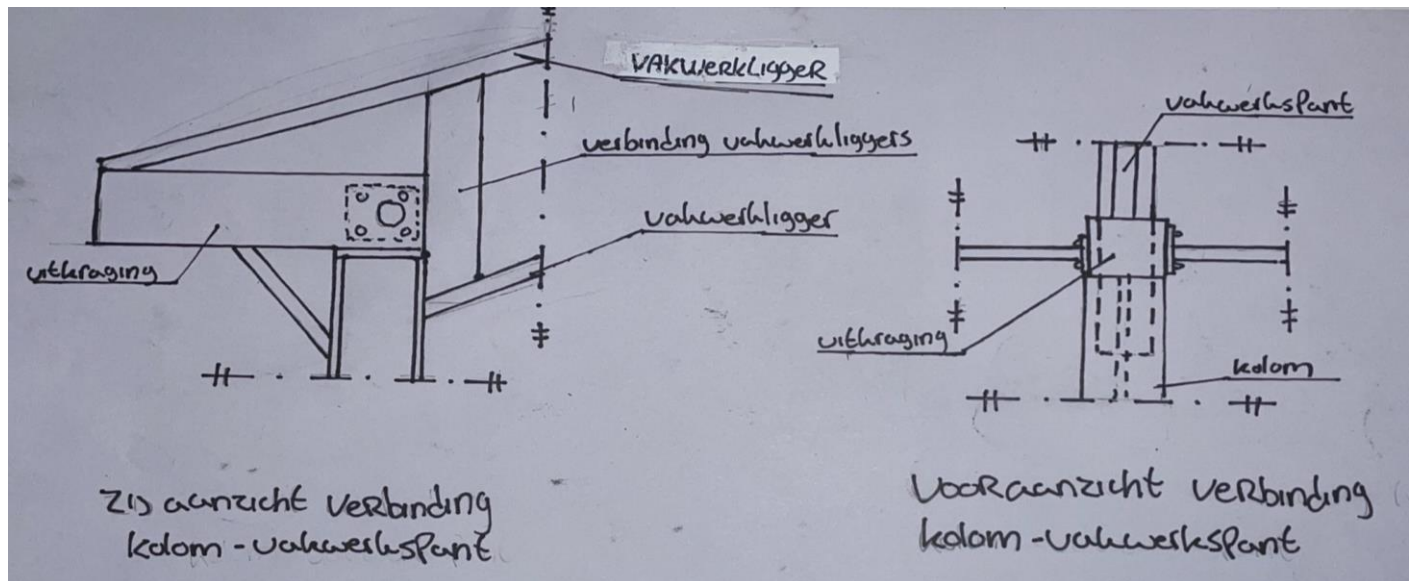
De kolommen van The Roundhouse zijn gemaakt van staal en worden uitgevoerd als I-profiel of als H-profiel, zoals te zien in Figuur 8. In de standaard Roundhouse zijn er 16 kolommen, vanaf het midden gezien elk op een gelijke hoek van elkaar. Daarnaast worden de kolommen bovenaan verbonden met afwisselend een vakwerkspant of een stalen stang. Een tekening van de kolommen die verbonden worden met een stalen stang is weergegeven in Figuur 9.



Figuur 9: Tekening verbinding kolom met de stalen stangen.

De kolommen die worden verbonden aan het vakwerk hebben een momentvaste verbinding met een I-profiel of H-profiel die omhoog is gericht om het vakwerkspant met de bovenste en onderste staaf zo goed mogelijk te verbinden. Ook is er bij elke kolom een momentvaste verbinding met een massieve of dunwandige

kokerprofiel om het uiteinde van het doek aan te bevestigen. Een tekening van de verbinding tussen de kolom en vakwerkspant is weergegeven in Figuur 10. Daarnaast valt op dat door de kolommen heen en rondom de gehele constructie buisprofielen worden verbonden aan de kolommen om zo de bijna ronde vorm van The Roundhouse te garanderen. Dit gebeurt ook voor de kleinere ring van kolommen binnenin The Roundhouse en is tevens ook ter ondersteuning van het vakwerk en het opnemen van de voorspanning.

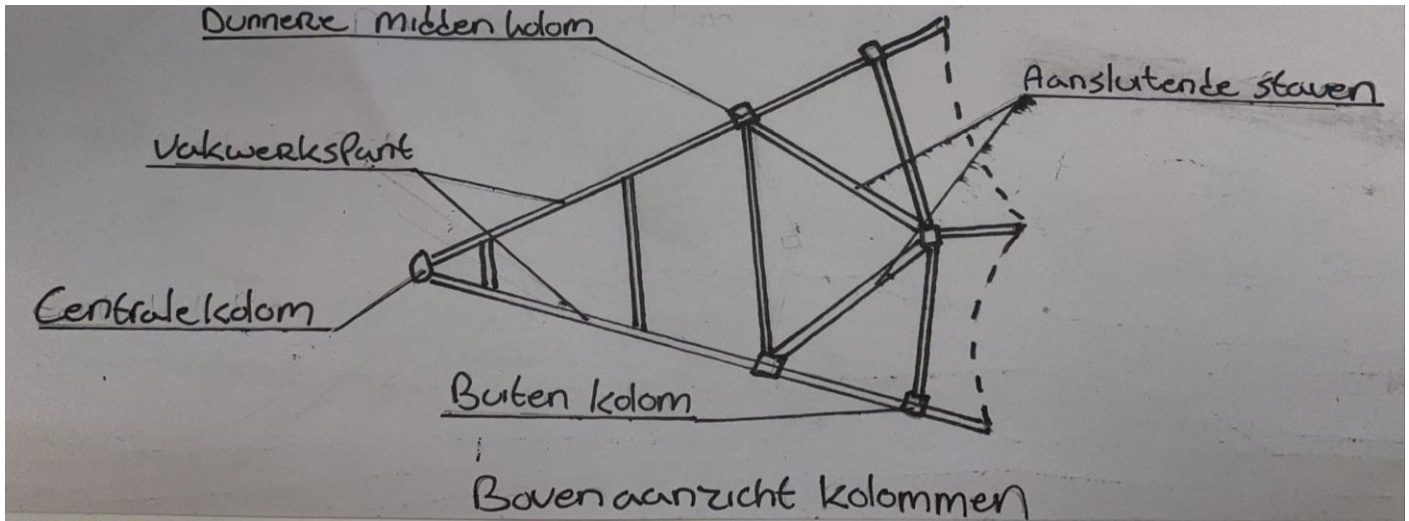


Figuur 10: Tekening verbinding kolom met vakwerkspant.

Tot slot staan in het midden van de meestal dunnere kolommen die op hun plaats ook weer worden verbonden met het vakwerkspant om deze te ondersteunen. Dit zijn 8 kolommen, aangezien deze kleinere kolommen alleen maar onder een vakwerkspant worden geplaatst. In Figuur 11 is goed te zien dat de buitenste kolommen die geen vakwerkspant ondersteunen wel aansluitingen hebben met andere staven die samenkomen op het punt van de binnenste kolommen en het vakwerkspant. Een bovenaanzicht van aansluitingen met alle staven met de vakwerkspanten en de dunnere kolommen is weergegeven in Figuur 12.



Figuur 11: Binnenste kolommen en verbindingen van The Roundhouse 30. Geraadpleegd van "ID Agro", gemaakt door ID Agro BV, 2020 (<https://www.idagro.nl/projecten/agrarisch/the-roundhouse/roundhouse-30-voor-belgisch-witblauw>).



Figuur 12: Boven aanzicht verbindingen van staven met de vakwerkspanten en dunnere kolommen.

5.1.2 Het vakwerk

De gehele staalconstructie is verzinkt. De totale constructie bestaat uit 8 vakwerkspanten en zo een achthoek vormen. In Figuur 13 is te zien dat alle 8 de vakwerkspanten in het midden van deze staalconstructie zijn aangesloten op de centrale middenkolom. Aan het uiteinde zijn de vakwerkspanten aangesloten op de kolommen middels een momentvaste verbinding. Alle vakwerkspanten worden verbonden met elkaar door middel van drie cirkels van staven: één aan de buitenkant van The Roundhouse, één op ongeveer een derde vanaf het midden en één op ongeveer twee derde vanaf het midden. De totale staalconstructie met de vakwerkspanten is mooi te zien in Figuur 14.



Figuur 13: Verbinding vakwerkspant aan centrale kolom. Geraadpleegd van "ID Agro", gemaakt door ID Agro BV, 2020 (<https://www.idagro.nl/projecten/agrarisch/the-roundhouse/roundhouse-voor-zoogkoe-tot-vleesstier>).



Figuur 14: Vakwerkspant van The Roundhouse 30. Geraadpleegd van "ID Agro", gemaakt door ID Agro BV, 2020 (<https://www.idagro.nl/projecten/agrarisch/the-roundhouse/roundhouse-voor-zoogkoe-tot-vleesstier>).

5.1.3 De membraanconstructie

De membraanconstructie is het belangrijkste onderdeel van The Roundhouse en tevens ook het lastigste deel ervan. In Figuur 15 is een bovenaanzicht van The Roundhouse weergegeven. Hierin is goed te zien hoe de membraanconstructie wordt gespannen en hoe het is verwerkt. Zo is er in de figuur aan de donker gekleurde cirkelvormige lijnen te zien dat het doek is opgebouwd uit snijvlakken. Alle snijvlakken zijn uiteindelijk aan elkaar gelast tot een groot geheel.



Figuur 15: Bovenaanzicht The Roundhouse. Geraadpleegd van "Veehouderij Techniek", gemaakt door J. Lentz, 2016 (<https://www.mechaman.nl/veehouderij-techniek/artikel/20160616/id-agro-nieuwe-eigenaar-roundhouse-concept/>).

Daarnaast valt op dat rondom aan het uiteinde van het doek touwen zijn gespannen die er voor zorgen dat de ronde vorm van The Roundhouse blijft behouden en dat de spanning in het doek optimaal gehouden wordt, zodat scheurvormingen niet zullen optreden. In Figuur 16 is te zien dat er gebruik wordt gemaakt van twee touwen in de membraanconstructie die allebei aan of in het uiteinde van het doek worden gespannen. Allereerst wordt een touw gespannen op het doek tussen de kolommen waaraan geen vakwerkspant verbonden zit. Dit wordt gedaan zodat er bij het uiteinde van het doek tussen alle kolommen een mooie boog gerealiseerd kan worden doordat er genoeg spanning is. Als tweede wordt er een touw gespannen in het uiterste van het doek tussen alle kolommen. Deze touwen worden vervolgens ook gemonteerd aan alle kolommen. Dit wordt gedaan om de ronde vormen tussen die kolommen te waarborgen en om genoeg spanning te realiseren dat de vorm behouden blijft.



Figuur 16: Verbindingen van de twee gespannen touwen. Geraadpleegd van "Herefords", gemaakt door Natuur Beheer Limburg, 2012 (<http://www.herefords.nl/natuur-beheer/>).

Tot slot, het doek wordt aan het onderliggende vakwerkspant verbonden door middel van metalen plaatjes met twee pinnen erin. In Figuur 17 is te zien dat de verbindingen over het gehele vakwerkspant geplaatst zijn als een soort nietjes die het doek vervolgens op zijn plaats moet houden. Ook is in Figuur 17 te zien hoe het doek is verbonden aan de bovenkant van de constructie. De verbindingen worden gerealiseerd door dezelfde metalen plaatjes als de verbinding met het vakwerkspant alleen dan over de breedte van de acht vlakken tussen de acht kolommen die een vakwerkspant dragen.



Figuur 17: Aansluiting van het doek op de vakwerkspanten. Geraadpleegd van "ID Agro", door ID Agro BV, 2016 (<https://www.idagro.nl/producten/the-roundhouse>).

5.2 Concept en schaalmodel

5.2.1 Materialen

Om een idee te krijgen hoe het doek zich zal gedragen en zal vervormen is een schaalmodel gemaakt. In dit schaalmodel is ervoor gekozen gebruik te maken van verschillende materialen. Een overzicht welk materiaal wat van The Roundhouse voorstelt is weergegeven in Tabel 5. Afbeeldingen van de gebruikte materialen zijn te vinden in Appendix C.

Tabel 5: Overzicht materialen schaalmodel.

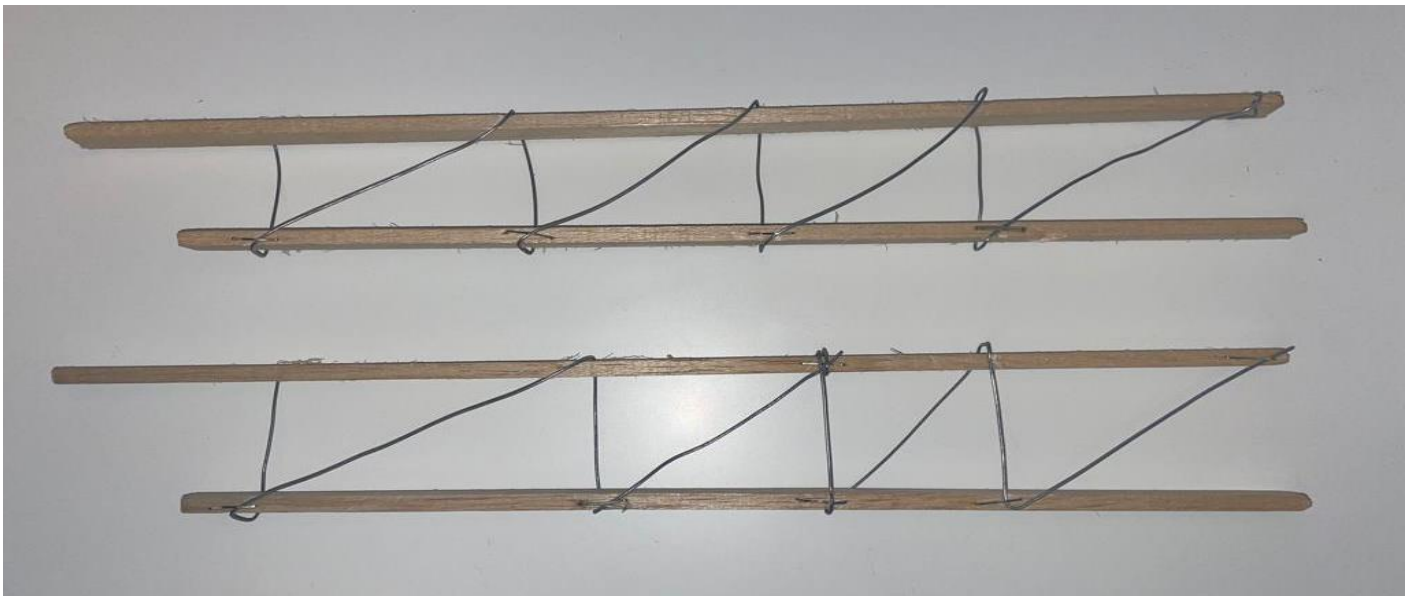
Object The Roundhouse		Materiaal schaalmodel
Buitenkolommen		Koperdraad van 10 cm
Centrale middenkolom		Aan elkaar gelijkde houten latjes
Vakwerkspanten	Boven- en onderligger	Houten latjes
	Driehoeken tussen boven- en onderligger	IJzerdraad
Fundering		Piepschuim (EPS plaat)
Verbindingen vakwerk en kolommen		Spijkers of met behulp van ijzerdraad
Doek		Vloerfolie (plastic polymeer)
		Kunststof gaas
Verbinding doek en vakwerk		Nietjes, ijzerdraad of spijkers

Het schaalmodel is gemaakt op een plaat gemaakt van piepschuim. In het schaalmodel wordt er gekeken naar twee verschillende materialen die gebruikt kunnen worden als doek. Elk materiaal heeft een verschillende stijfheid en elasticiteit. Door deze twee verschillende doeken te bekijken en te vergelijken, wordt er meer inzicht verkregen in de invloed die de stijfheid heeft op de vervorming van het doek. Het kunststof gaas heeft hierbij de grootste stijfheid en de vloerfolie is het minst stijf.

5.2.2 Schaalmodel

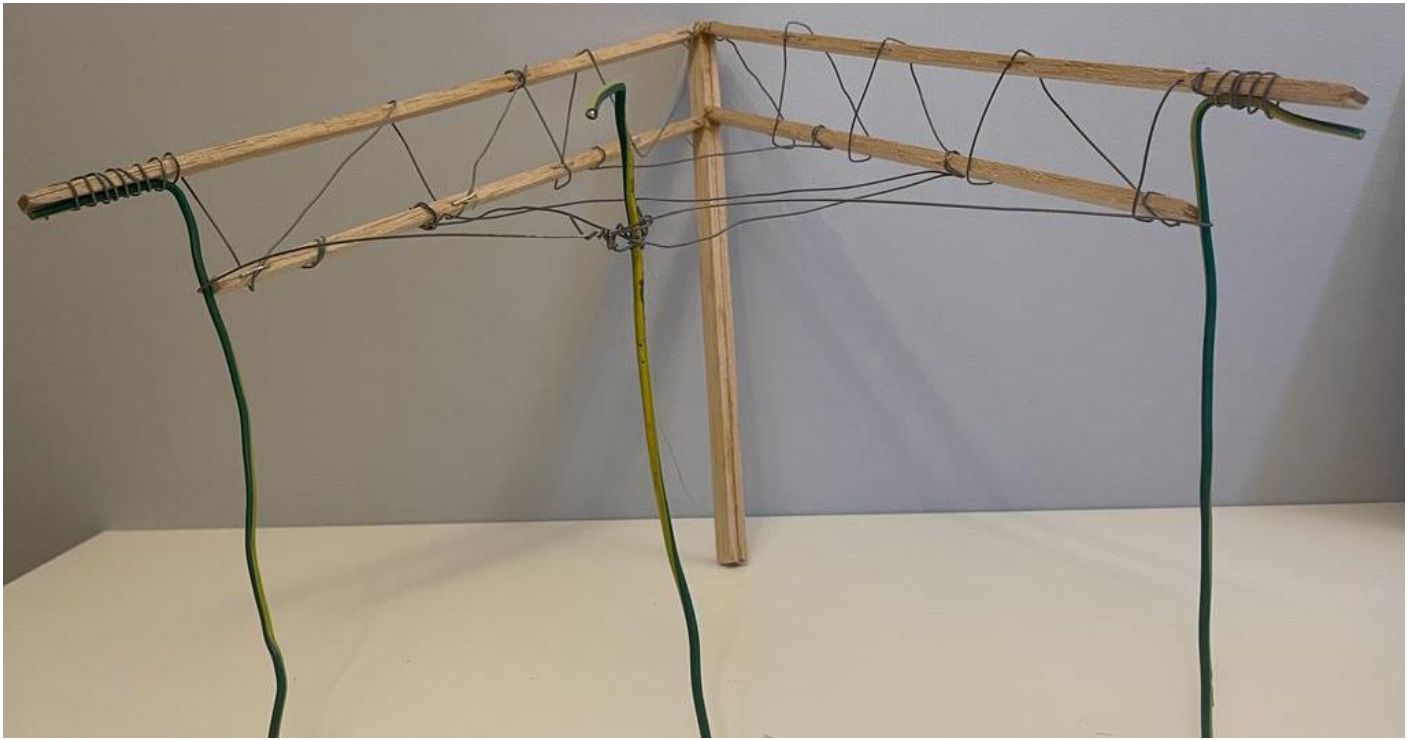
Allereerst zijn de afzonderlijke onderdelen van de gehele constructie samengesteld. Dus de onderliggende kolommen zijn samengesteld, de vakwerkspanten en vervolgens het doek. Deze zijn dan vervolgens aan elkaar gezet. In dit schaalmodel is niet de gehele constructie gemodelleerd, maar een deel van drie buitenste kolommen, waarvan er twee kolommen een vakwerkspant hebben. Dit is gedaan omdat de constructie symmetrisch is opgebouwd.

De twee afzonderlijke vakwerkspanten van The Roundhouse zijn te zien in Figuur 18. Hierin is verder te zien dat het vakwerk is opgebouwd uit een bovenligger en een onderligger van hout en de verbindende driehoeken die het tot een vakwerk maken van ijzerdraad. In de oorspronkelijke uitvoering van The Roundhouse worden de verbindingen in het vakwerk aan elkaar gelast. In dit model is gebruik gemaakt van nietjes die het ijzerdraad op de plaats houdt en het ijzerdraad met de houten latjes aan elkaar verbindt. Voor de rest is de bovenste ligger langer dan de onderste ligger. Dit is gedaan, omdat in de oorspronkelijke uitvoering de overkapping langer doorloopt dan waar de buitenste kolommen staan. Om dit ook voor het model na te maken, loopt de bovenste ligger van het vakwerkspant iets langer door om zo dus ook de overkapping tot iets na de kolommen te laten doorlopen.



Figuur 18: Gemodelleerde vakwerkspanten van The Roundhouse met ijzerdraad en houten latjes verbonden met nietjes.

Vervolgens is er aan de rand en op een derde en twee derde van de vakwerkspanten een ring geplaatst die de spanten met elkaar verbinden en zo de vorm van een deel van de cirkelvormige constructie in stand houdt. Ook zijn er ijzerdraden, die de overige stalen liggers voorstellen, vanaf de kolom zonder vakwerkspant verbonden aan de vakwerkspant met behulp van touwtjes, spijker of nietjes. Deze in een cirkel lopende ijzerdraden die zich nog boven de kolommen bevinden, de overige ijzerdraden en de verbinding met de drie kolommen zijn weergegeven in Figuur 19 en Figuur 20 in combinatie met de vakwerkspanten. In Figuur 19 is een vooraanzicht weergegeven en in Figuur 20 is er een bovenaanzicht weergegeven zodat de cirkelvormige ijzerdraden en overige ijzerdraden goed te zien zijn. Aanzichten als een onderaanzicht en een zijaanzicht zijn weergegeven in de figuren C.10 en C.11 van Appendix C.



Figuur 19: Vooraanzicht onderliggende constructie van het schaalmodel.



Figuur 20: Bovenaanzicht onderliggende constructie van het schaalmodel.

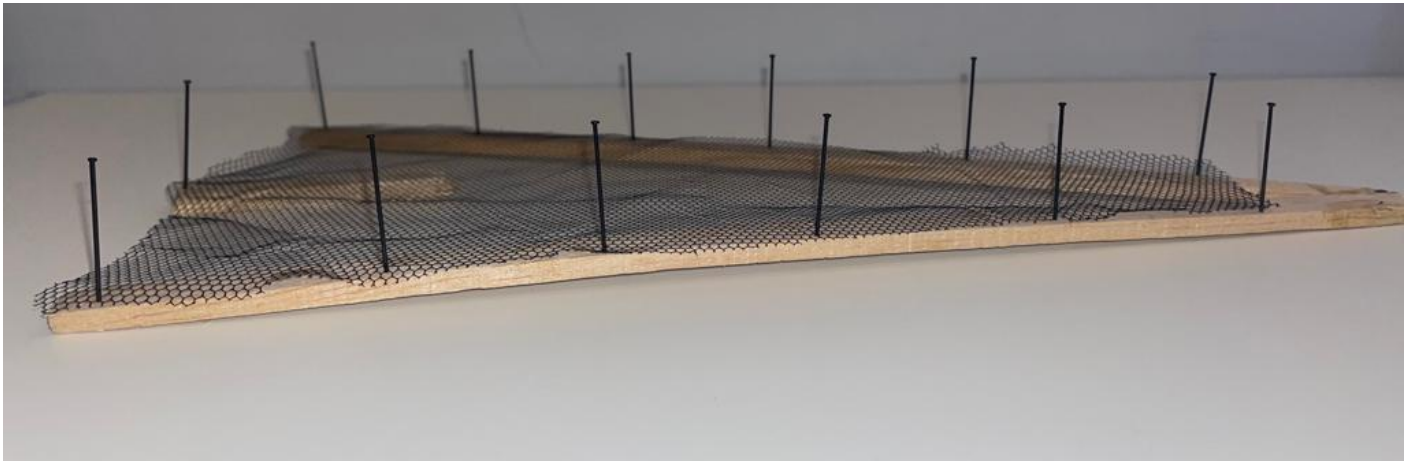
Voor de gehele constructie met doek hoeft alleen nog maar het doek over de onderliggende constructie heen worden gespannen en worden vastgemaakt. De vormen en delen van het doek worden, anders dan in de oorspronkelijke constructie, niet door middel van snijvlakken gevormd en aan elkaar gezet, omdat de snijvlakken niet aan elkaar gelast kunnen worden in het schaalmodel. Vervormingen zullen daarom iets anders zijn in vergelijking met het oorspronkelijke model, maar door middel van verbindingen is geprobeerd ongeveer dezelfde vormgeving van het doek gerealiseerd te krijgen. Vervolgens wordt het doek in het schaalmodel door middel van nietjes aan het vakwerkspant vastgemaakt. De nietjes die worden gebruikt als verbindingen tussen het doek en het vakwerkspant komen erg veel overeen met de daadwerkelijke verbindingen. Respectievelijk, een vooraanzicht van de gehele constructie met een doek van kunststof gaas en folie zijn weergegeven in Figuur 21 en Figuur 23. Meer foto's en aanzichten van de twee type doeken zijn te vinden in Appendix C.

Om het gedrag van het doek te verduidelijken zijn, naast de schaalmodellen van de gehele constructie, ook schaalmodellen gemaakt van alleen de vorm waaraan het doek vastzit in een plat vlak. Dit maakt het beter af te lezen wat het gedrag is van het type doek, zoals bijvoorbeeld krommingen die ontstaan door de spanning en dergelijke.



Figuur 21: Vooraanzicht schaalmodel met kunststof gaas.

In Figuur 21 is te zien dat het doek niet mooi egaal en strak gespannen is, maar dat er veel krommingen aanwezig zijn. Dit komt met name door de grote stugheid van het kunststof gaas. Er zal dus een grote voorspanning aanwezig moeten zijn, wil dit doek mooi egaal gespannen worden. Dit kan gedaan worden door extra verbindingen en extra aanknopingspunten te maken voor punten in het doek waar de spanningen het grootst zijn. Dat het doek met een grote voorspanning redelijk egaal gespannen kan worden is te zien in Figuur 22. Hierin is in een plat vlak met de bolling van The Roundhouse dat kunststof doek gespannen om zo beter te zien hoe het doek zich gedraagt. Voor de rest is in dit figuur te zien dat het doek, hoewel met grote inspanning en voorspanning, nog steeds veel krommingen heeft en niet mooi egaal is.



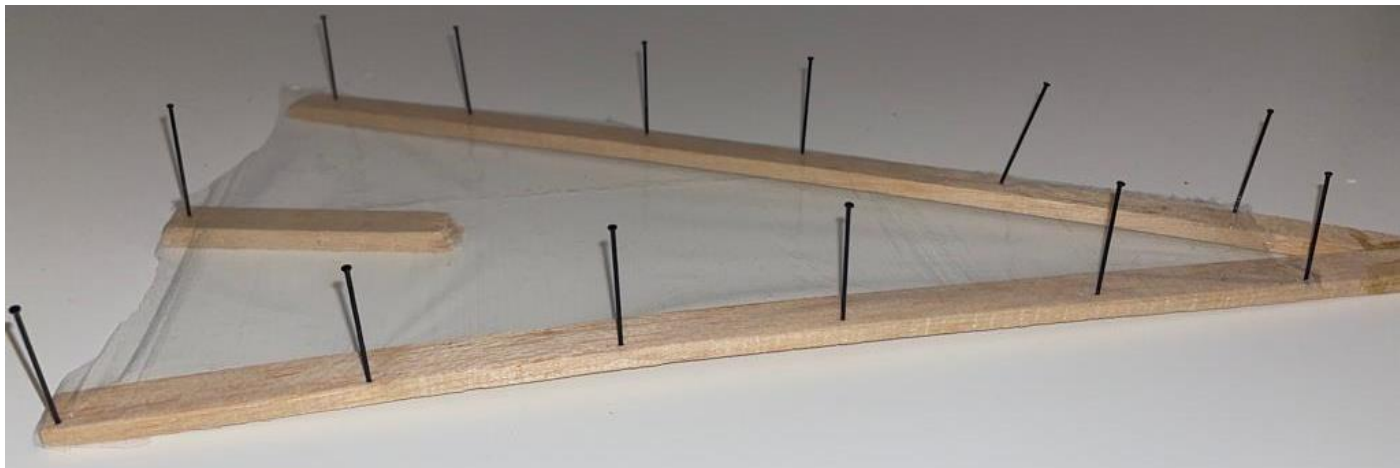
Figuur 22: 3D aanzicht plat vlak membraan dak met kunststof gaas.

In Figuur 23 is het schaalmodel weergegeven waarbij de vloerfolie is gebruikt als overspanning. Hierin is te zien dat dit materiaal makkelijk heel strak te spannen is en dat er zich weinig krommingen in het doek voordoen. Dit komt met name door de grote flexibiliteit van het materiaal. In dit geval zijn weinig extra verbindingen nodig. Om het te verduidelijken dat het doek makkelijk straks gespannen kan worden en dat het een grote flexibiliteit heeft, is er in Figuur 24 een plat vlak zien waarover het doek wordt gespannen. Hierin is verder te zien dat er met weinig moeite en voorspanning een mooi egaal gespannen dak gerealiseerd kan worden.



Figuur 23: Vooraanzicht schaalmodel met vloerfolie.

Een voordeel van het gebruik van folie als dak is dat het materiaal dus zeer flexibel is waardoor er weinig voorspanning of inspanning benodigd is. Een nadeel daarentegen is dat het materiaal snel kan scheuren doordat het folie zo flexibel en dun is. Door de flexibiliteit van het materiaal kan het dak dus bezwijken. Een oplossing hiervoor zou zijn om het dak te laten bestaan uit meerdere lagen folie, zodat het materiaal sterker wordt en minder snel zal gaan scheuren. Zeker bij de verbindingen is het folie strak gespannen en is de kans op scheurvorming groot.



Figuur 24: 3D aanzicht plat vlak membraan dak met vloerfolie.

Op basis van het inzicht dat is verkregen door deze schaalmodellen kan er worden geconcludeerd dat het stijvere doek veel lastiger egaal te spannen is. Er treden in dat geval veel krommingen op en er moet veel moeite gaan worden om het doek goed op zijn plaats te krijgen. Omdat er in het doek veel krommingen zijn, zal het doek ook veel vervormen.

Het soepele doek is daarentegen heel makkelijk strak en egaal te spannen. Als er al krommingen optreden, kunnen deze makkelijk worden verholpen door bijvoorbeeld een extra verbinding te maken. Dit type doek zal dus bijna niet vervormen wanneer het gespannen wordt. Echter, er is wel opgemerkt dat er makkelijk scheurvorming optreedt wanneer in dit doek een te grote spanning aanwezig is. Er zal dus een balans gezocht moeten worden tussen de spanning en de mate van vervormingen.

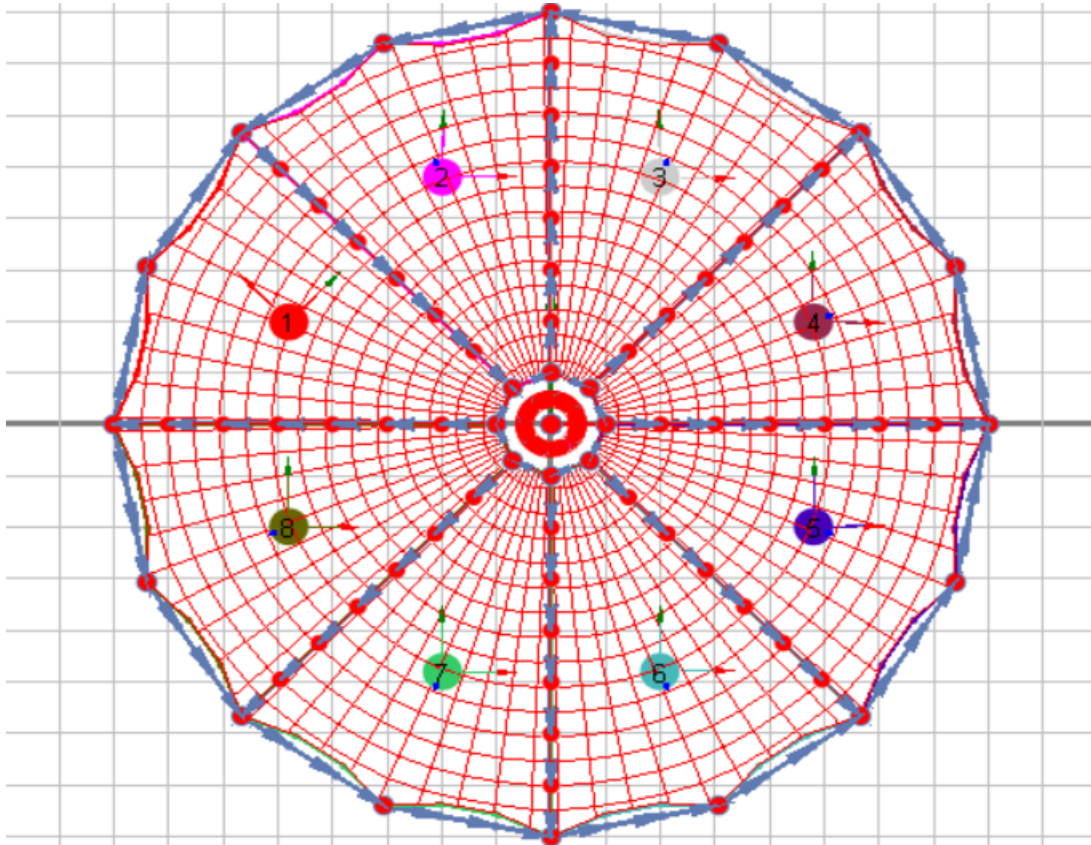
5.3 Easy Software ontwerp

Met behulp van Easy kan worden nagegaan of de spanningen in de constructie de toegestane spanning overschrijden. De maximaal toegestane spanningen worden ingedeeld per belastingcombinatie als ook in hoofdstuk 4 is omschreven. Deze maximaal toegestane spanning f_d wordt berekend door de treksterkte van de schering en inslag f_{tk} , zoals te zien is in Tabel 1 in paragraaf 3.4, te delen door de A_{res} waarden zoals is weergegeven in paragraaf 4.1.1. In dit rapport wordt voor PVC-gecoat polyester wordt uitgegaan van klasse Z2. De f_{tk} van PVC-gecoat polyester is dus in schering en de inslag beiden 50 kN/m en van PE in schering en de inslag, respectievelijk, 46 kN/m en 44 kN/m. In Tabel 6 zijn de maximaal toelaatbare spanningen per belastingcombinatie weergegeven.

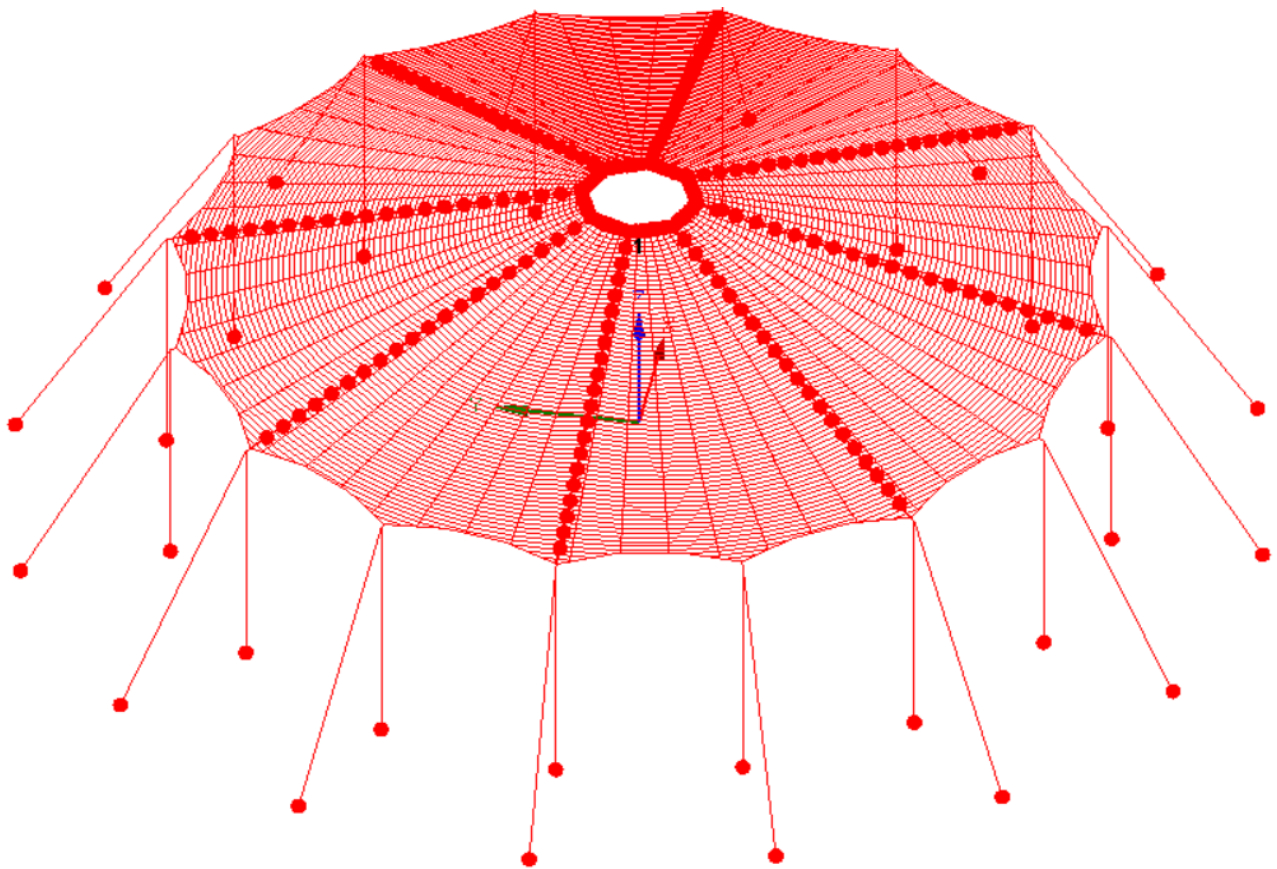
Tabel 6: Maximaal toelaatbare spanningen in kN/m per belastingcombinatie.

Belastingcombinatie	A_{res} [-]	f_d PVC-gecoat polyester klasse Z 2 (schering/inslag) [kN/m]	f_d PE (schering/inslag) [kN/m]
Permanent	6,4	7,81 / 7,81	7,19 / 6,88
Wind	3,2	15,63 / 15,63	14,38 / 13,75
Sneeuw	5,1	9,80 / 9,80	9,02 / 8,63

In Easy is er met behulp van de 'form-finding' functie een basis gelegd voor de vormen van The Roundhouse. Uit deze basis kunnen materiaaleigenschappen veranderd of gewijzigd worden en kunnen onder andere de krachten, spanningen en rekken gevisualiseerd worden. De basisvormgeving van The Roundhouse is weergegeven in Figuur 25 als bovenaanzicht en Figuur 26 als 3D-aanzicht. Er is gekozen om de meridionale richting aan te nemen als de schering en de hoepelrichting als de inslag. In Figuur 25 is naast de basisvormgeving te zien dat het model uit acht soort driehoeken bestaat waarbij de buitenste randen in meridionale richting de aansluitingen met de vakwerkspanten voorstellen. Deze randen zijn vastgesteld in alle richtingen, aangezien deze niet verplaatsen of verschuiven en lopen vanaf 3 meter hoogte aan de buitenkant op tot 5 meter hoogte aan de binnenkant. Tussen de vakwerkspanten zit, net als in het echte Roundhouse een kolom waar geen vakwerkspant aan vast zit. Vandaar dat er zestien krommingen te zien zijn in het model. Daarnaast is de binnenste rand in hoepelrichting ook vastgesteld in alle richtingen op een hoogte van 5 meter. De buitenste rand is in het model per definitie niet vastgesteld in alle richtingen en heeft een radius van 8% met de kromming naar binnen. Overige invoerwaarden zijn te vinden in Appendix D.



Figuur 25: Bovenaanzicht basisvormgeving The Roundhouse in Easy.

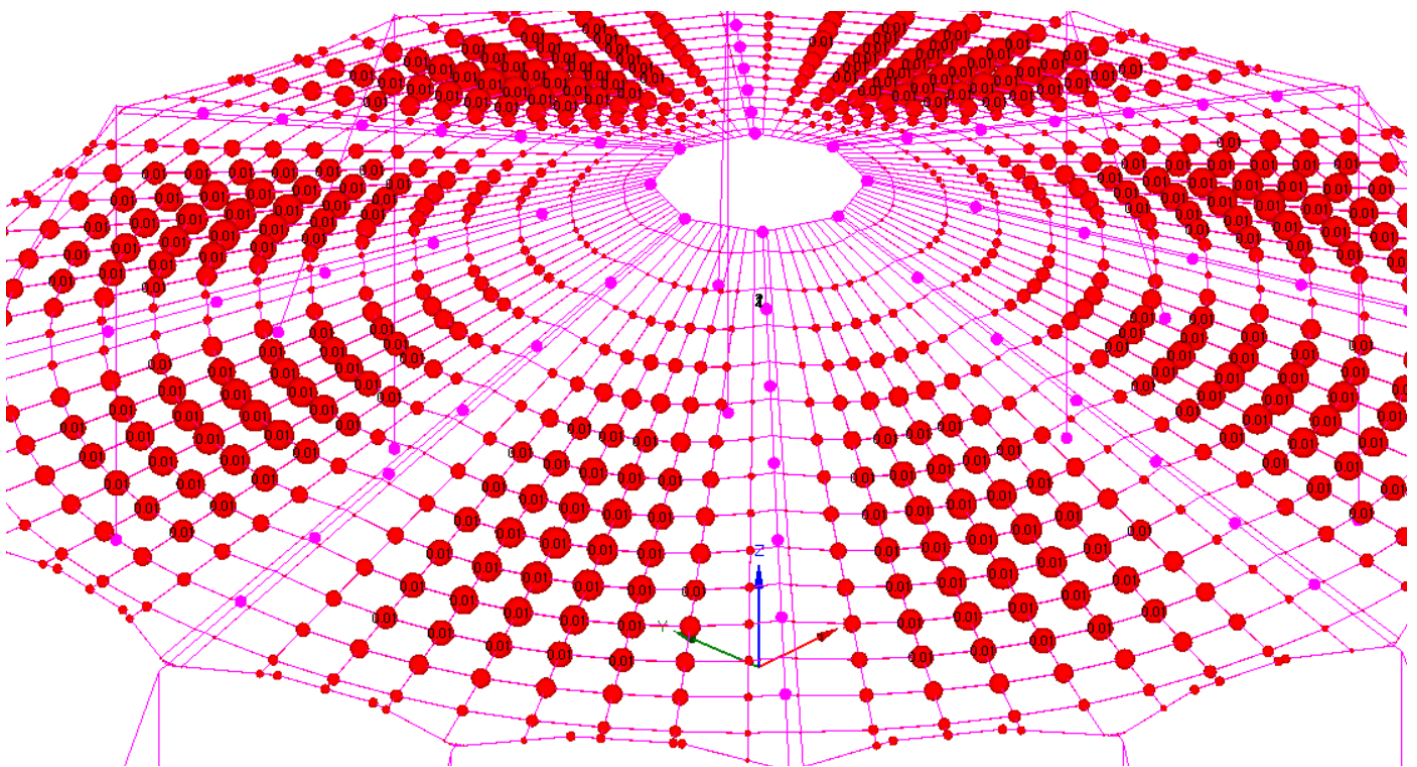


Figuur 26: 3D-aanzicht basisvormgeving The Roundhouse in Easy.

In het model is ook gekozen voor het plaatsen van stutten en scheerlijnen als onderliggende constructie om de membraanconstructie te verstevigen. In het model is rekening gehouden met het feit dat The Roundhouse uitgevoerd is met een onderliggende constructie van staal door deze stutten en scheerlijnen dezelfde

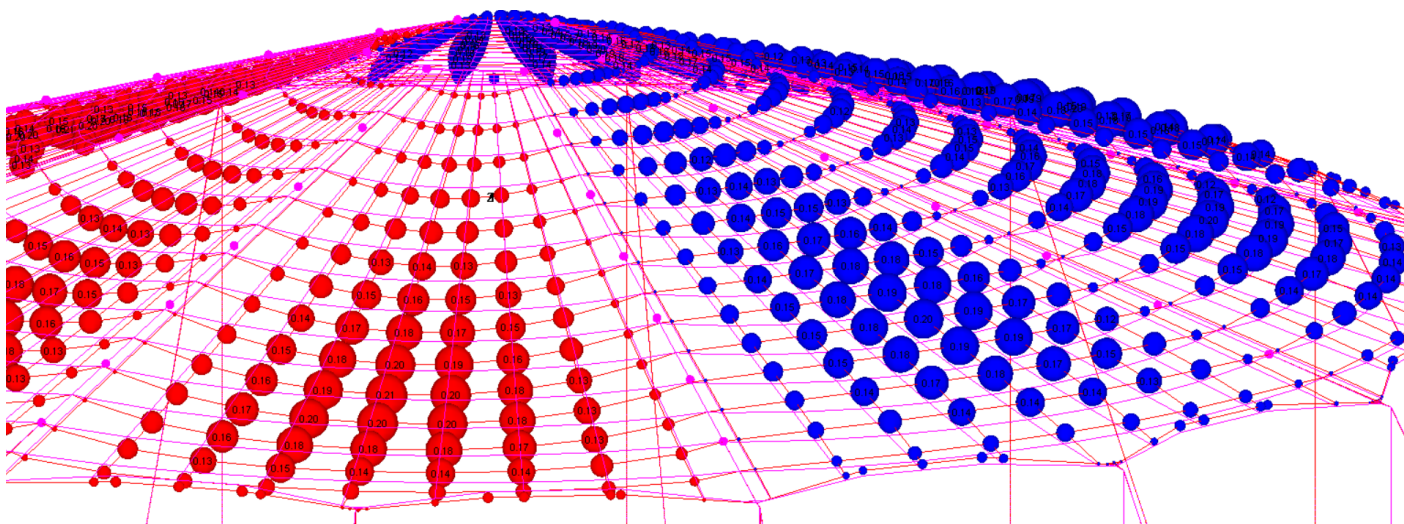
materiaaleigenschappen te geven als staal. Er wordt daarnaast alleen gekeken naar de spanningen in de membraanconstructie en niet in die van de stutten en scheerlijnen. In de basisvormgeving zijn naast de stutten en scheerlijnen ook rode stippen te zien. Deze rode stippen liggen op een scheringlijn die aan het vakwerkspant verbonden zit en niet kunnen verzakken of verschuiven. Dit zijn in het model dus de verbindingpunten tussen de vakwerkspanten en het membraan.

De modellen in Easy zijn ook gecontroleerd door de vervorming van uitsluitend het eigen gewicht en de vervorming van uitsluitend de windbelasting. Deze controle is noodzakelijk om te kijken of alles juist aan elkaar zit en vervormingen niet te groot zijn. Allereerst is er gekeken naar vervormingen door het eigen gewicht van PE van $4,0 \cdot 10^{-3} \text{ kN/m}^2$. Aangezien het eigen gewicht van zowel PE als PVC-gecoat polyester heel klein zijn, zijn deze vervormingen bijna identiek aan elkaar. In Figuur 27 zijn de vervormingen door uitsluitend het eigen gewicht van PE weergegeven. Er is te zien dat er geen vervormingen optreden in de uiteinden van het membraan, in de verbindingpunten van de stutten en scheerlijnen en in de verbindingen tussen het membraan en de vakwerkspanten. Dat betekent dat The Roundhouse op een juiste manier is gemodelleerd en juist aan elkaar zit. Verder is te zien dat de maximale vervormingen ongeveer in het midden van het membraan tussen twee vakwerkspanten optreedt met een maximale vervorming van 0,01 meter. De vervormingen zijn dus minimaal wat ook betekent dat The Roundhouse op een juiste manier aan elkaar zit en op een juiste manier is gemodelleerd.



Figuur 27: Vervormingen [m] door uitsluitend het eigen gewicht van PE.

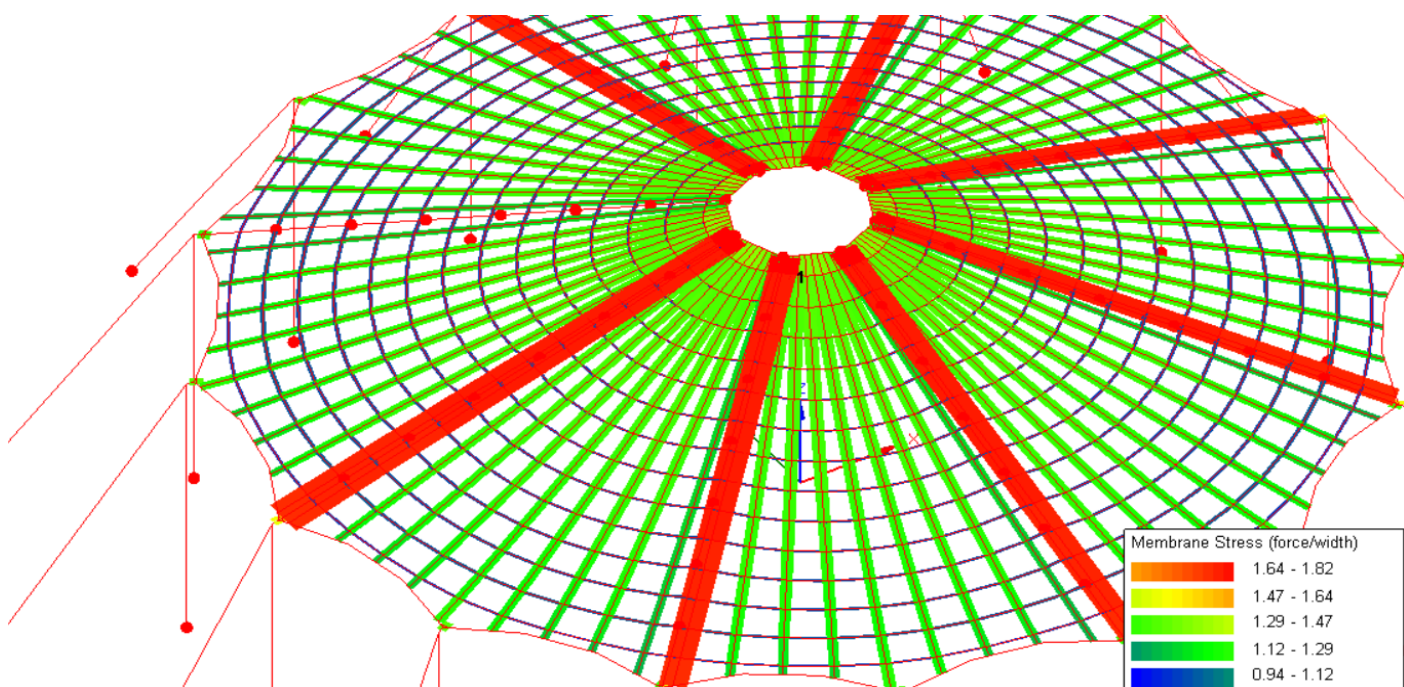
Als tweede is er gekeken naar de vervormingen uitsluitend door de windbelasting van $0,78 \text{ kN/m}^2$. De vervormingen in dit geval zijn weergegeven in Figuur 28 voor de horizontale windbelasting die in de figuur van links naar rechts loopt. Hiervoor is gekozen omdat de horizontale windbelasting zowel een vervorming omhoog aangeeft als vervormingen omlaag. De vervormingen omhoog zijn in de figuur weergegeven in het blauw en de vervormingen omlaag zijn in de figuur aangegeven in het rood. In het geval van uitsluitend windbelasting is ook te zien dat er geen vervormingen optreden in de uiteinden van het membraan, in de verbindingpunten tussen het membraan en de vakwerkspanten en in de verbindingen tussen de stutten en scheerlijnen en het uiteinde van het membraan. Verder is in de figuur te zien dat de maximale vervorming zowel omhoog als omlaag ongeveer 0,20 meter is in het midden van het membraan tussen twee vakwerkspanten. Dit is ook nog een acceptabele waarde voor de vervormingen van het membraan. Ook vanuit de vervormingen uitsluitend door windbelasting is The Roundhouse correct gemodelleerd en zit alles juist aan elkaar.



Figuur 28: Vervormingen [m] door uitsluitend de windbelasting.

5.3.1 Ontwerp met PE

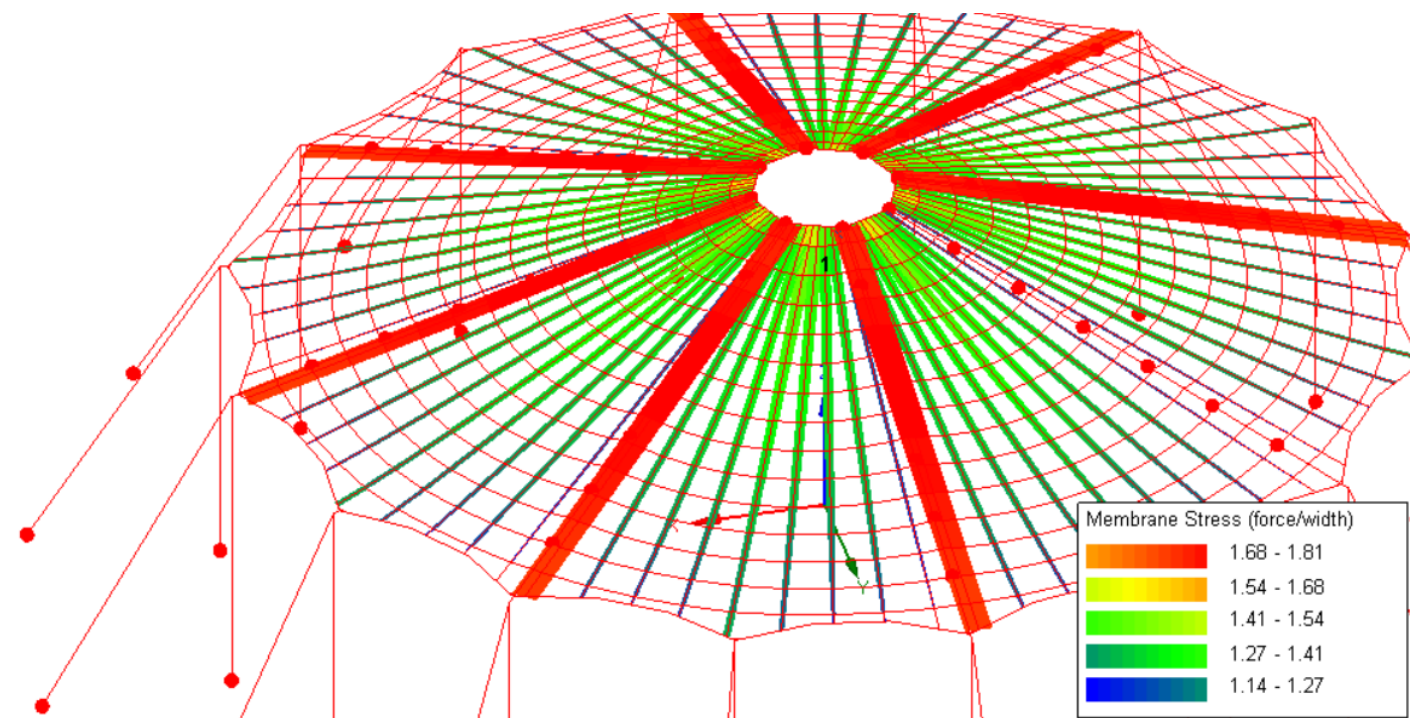
Het PE die mogelijk toegepast kan worden op The Roundhouse heeft een E-modulus wat iets stijver is dan dat van PVC-gecoat polyester¹. Aangezien PE niet als materiaal geïmporteerd is in Easy wordt er gerekend met PVC/PES klasse IV. Dit materiaal heeft namelijk ongeveer dezelfde stijfheid als PE van 2000 kN/m². Ook wordt er door middel van drie belastingsituaties, namelijk een permante belastingsituatie, een sneeuw belastingsituatie en een wind belastingsituatie, waarna er met behulp van Easy getoetst kan worden of de membraanconstructie niet zal bezwijken. Naast de keuze om PVC/PES klasse IV te gebruiken in het model is er ook gekozen om de spanningen te bekijken voor het standaard materiaal in Easy van PVC-gecoat polyester, maar om vervolgens een factor op het eigen gewicht toe te passen van 0,65, aangezien het eigen gewicht van PE 35% kleiner is dan dat van PVC-gecoat polyester. Vervolgens is gebleken dat de spanningen nauwelijks verschillen wanneer er gebruik wordt gemaakt van PVC/PES klasse IV als materiaal of de standaard PVC-gecoat polyester met een factor van 0,65 op het eigen gewicht. Voordat er naar de belastingsituaties gekeken wordt, is er eerst een model van de spanningen gemaakt van The Roundhouse zonder belastingen. Deze spanningen zijn weergegeven in Figuur 29. Er is te zien dat de maximale spanningen in de membraanconstructie niet wordt overschreden. De spanningen zijn het hoogste in het midden van de membraanconstructie en bij de aansluitingen op de vakwerkspanten.



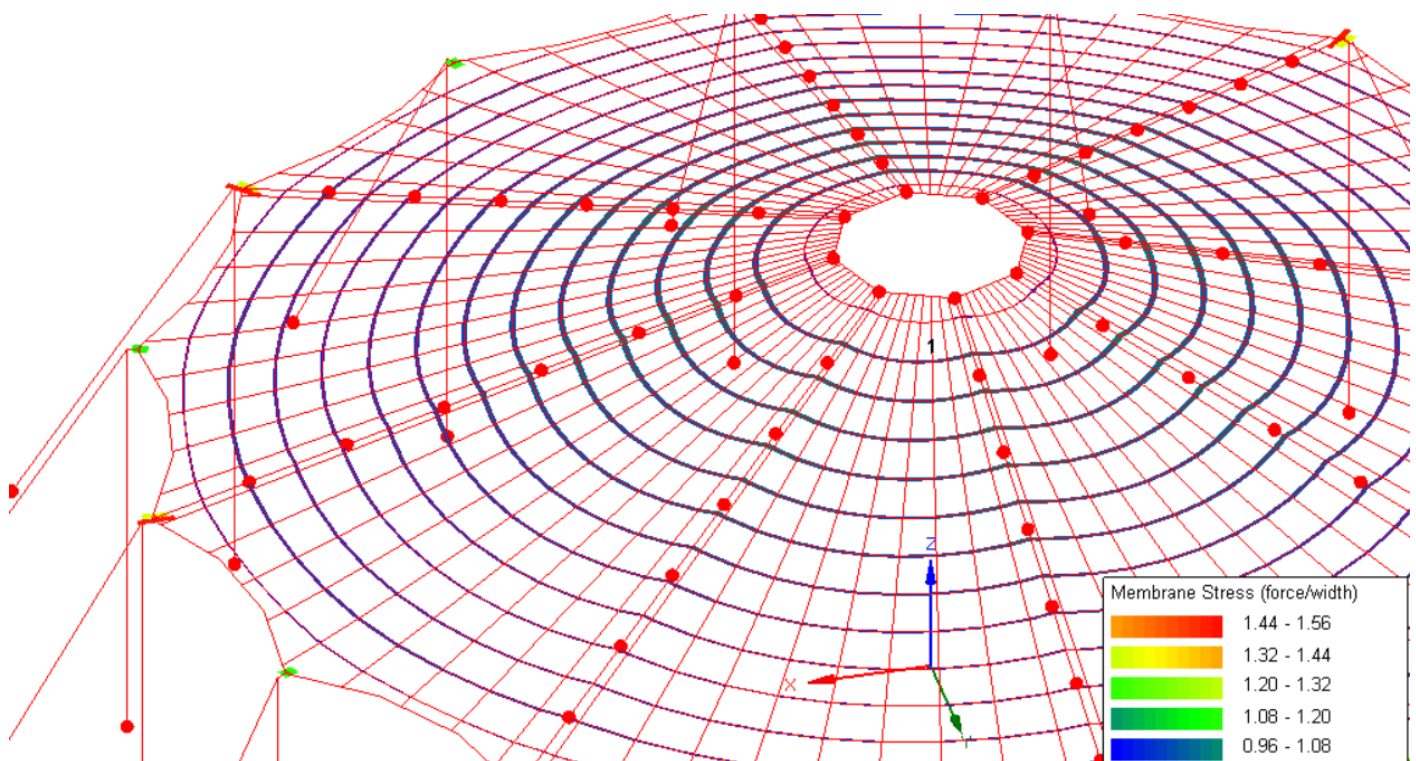
Figuur 29: Spanningen [kN/m] in de membraanconstructie van PE zonder belastingen.

¹ Zie paragraaf 6.2 voor een discussiepoint over de stijfheid.

Voor de permanente belastingsituatie wordt gerekend met een eigen gewicht van $4,0 \cdot 10^{-3}$ kN/m² en een voorspanning van 2,3 kN/m. De spanningen in de membraanconstructie ten gevolge van de permante belastingsituatie zijn weergegeven in Figuur 30 en Figuur 31, waarbij de spanningen in de schering zijn weergegeven in Figuur 30 en in de inslag in Figuur 31. De maximale spanningen die optreden zijn niet groter dan 1,81 kN/m. Dat betekent dat de maximale spanning in zowel de schering als de inslag niet wordt overschreden en dus voldoet PE voor de permanente belastingsituatie. Verder is af te leiden dat het eigen gewicht van het membraan nauwelijks bijdraagt aan de totale spanning en de voorspanning hierin dominant is.

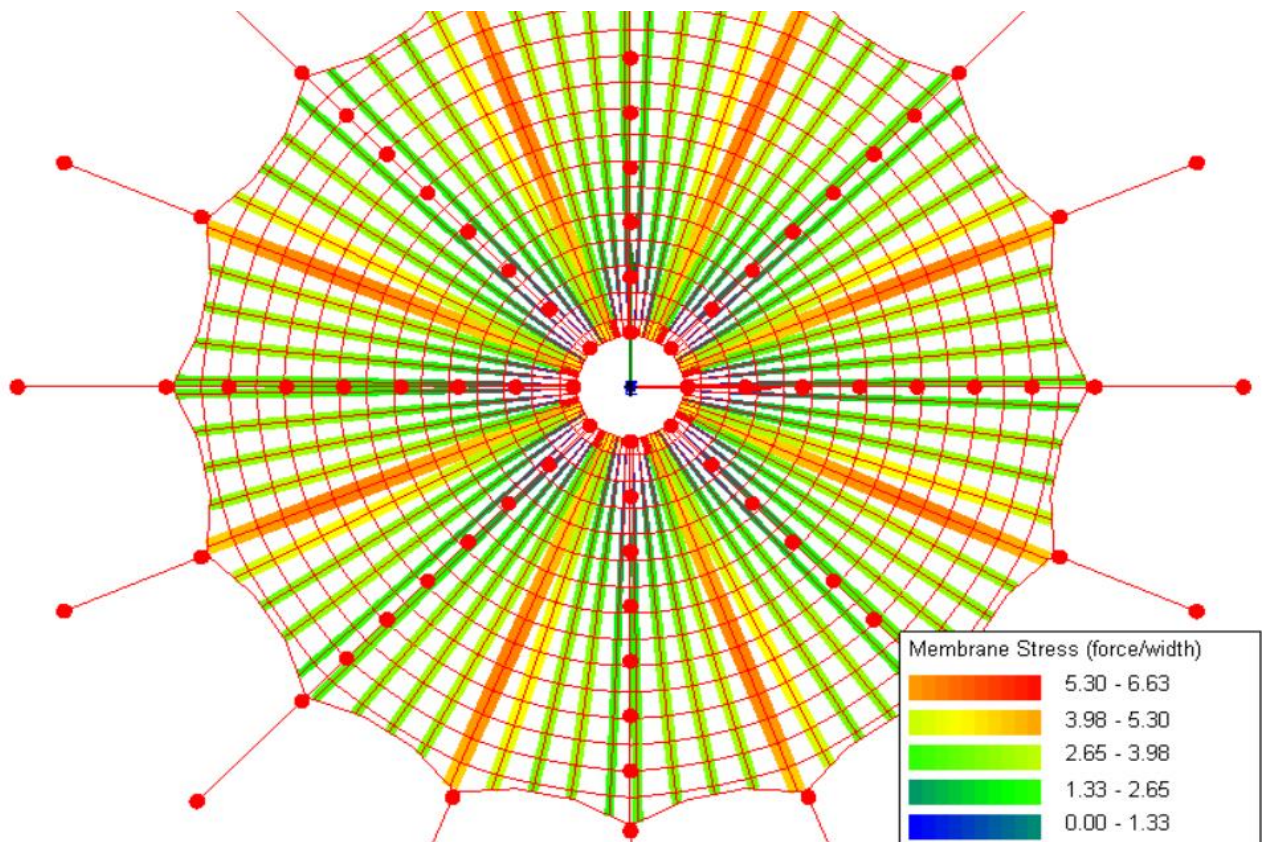


Figuur 30: Spanningen [kN/m] ten gevolge van de permanente belasting in de schering.

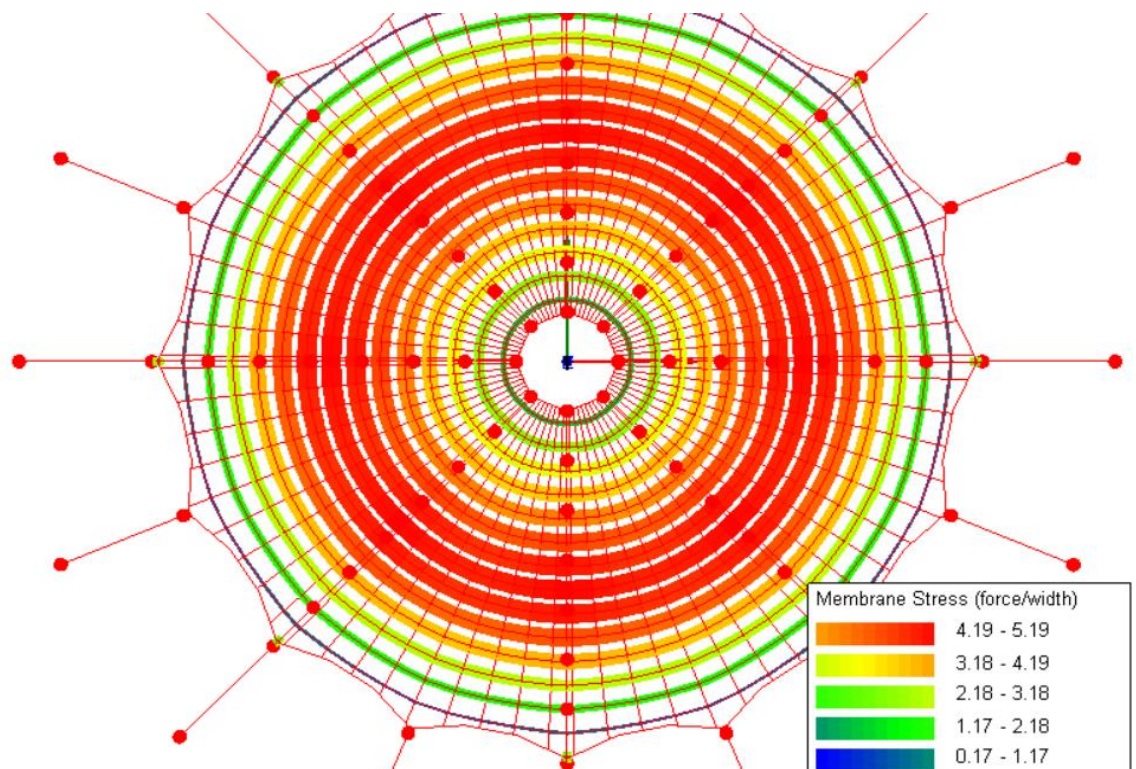


Figuur 31: Spanningen [kN/m] ten gevolge van de permanente belasting in de inslag.

Voor de sneeuwbelasting wordt er gerekend met zowel de voorspanning van 2,3 kN/m, het eigen gewicht van PE van $4,0 \cdot 10^{-3}$ kN/m² en de sneeuwbelasting van 0,56 kN/m². De totale neerwaartse belasting voor deze belastingsituatie is dus ongeveer 0,564 kN/m². De spanningen in de membraanconstructie voor deze belastingsituatie zijn weergegeven in Figuur 32 en Figuur 33 voor de schering en de inslag respectievelijk. In deze figuren is te zien dat ook voor de sneeuw belastingsituatie de maximale spanningen niet worden overschreden, maar ruimschoots voldoen.

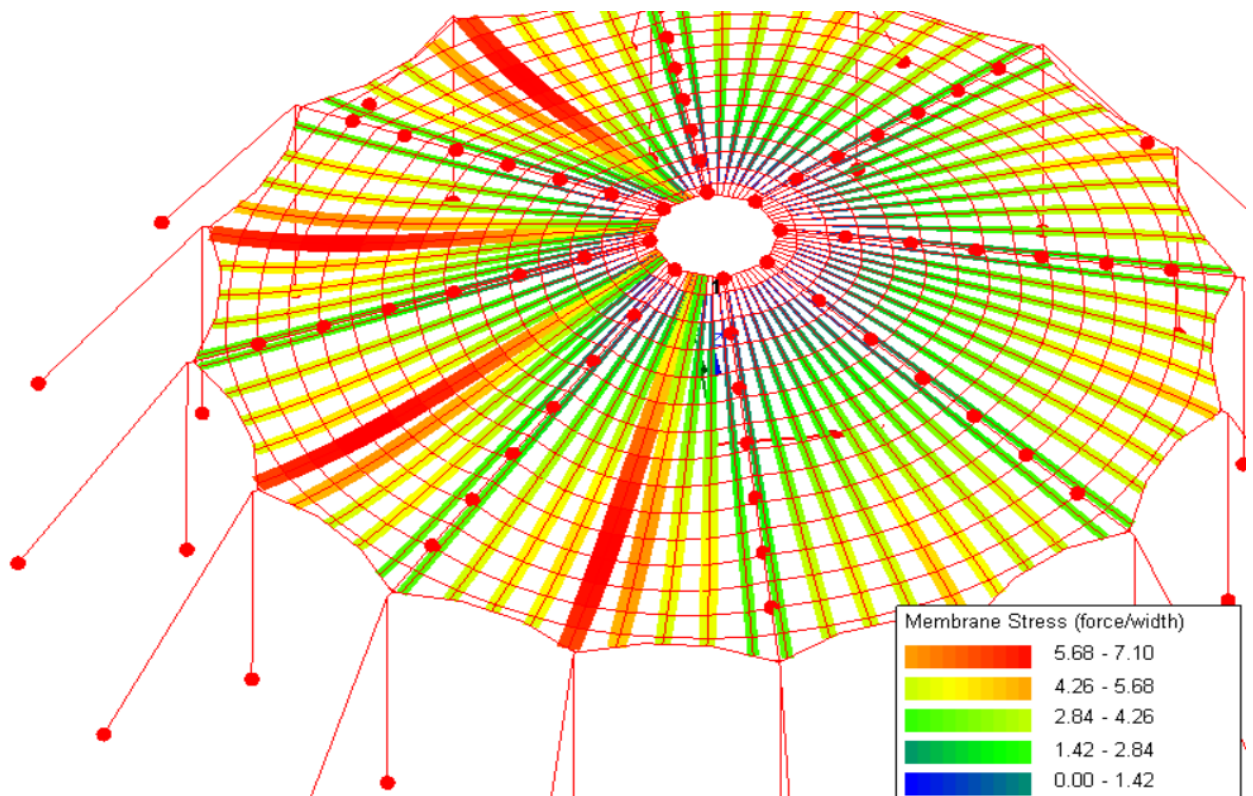


Figuur 32: Spanningen [kN/m] ten gevolge van de sneeuwbelasting in de schering.

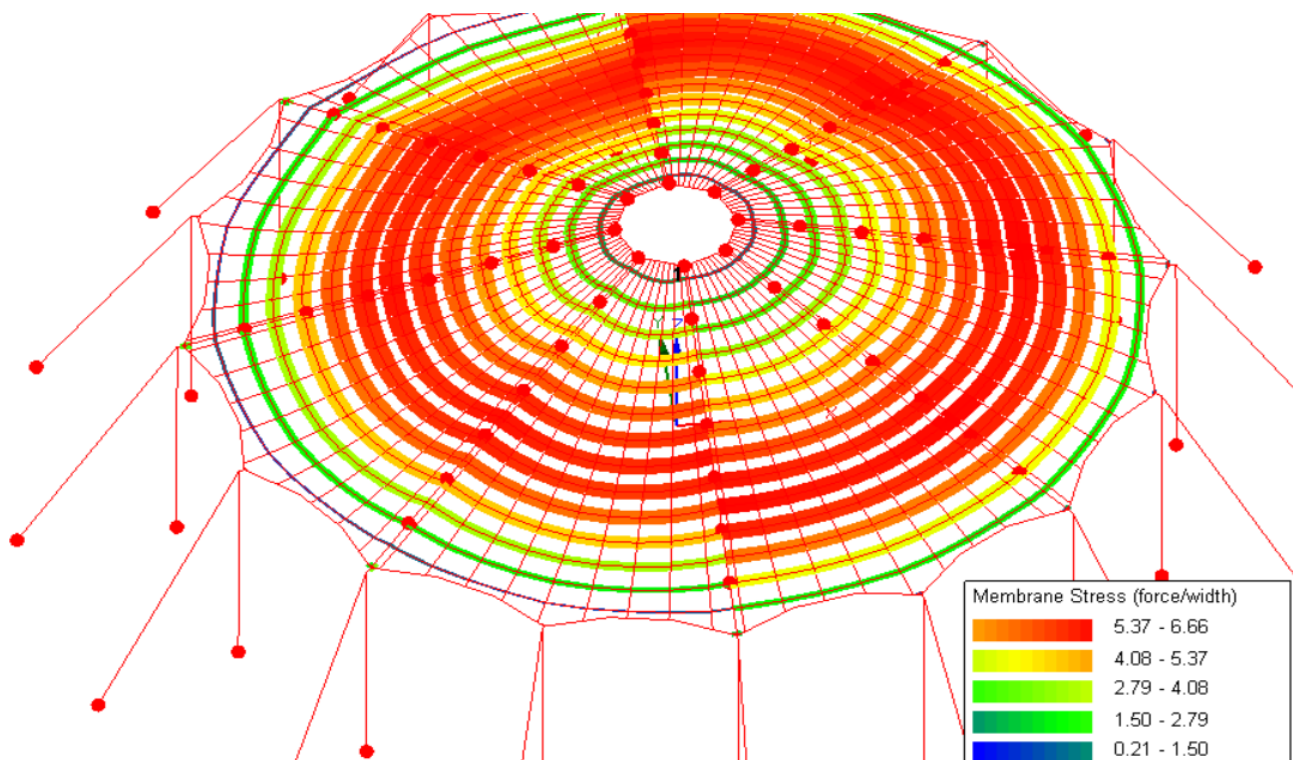


Figuur 33: Spanningen [kN/m] ten gevolge van de sneeuwbelasting in de inslag.

Voor de windbelasting wordt er gerekend met een windbelasting van ongeveer $0,78 \text{ kN/m}^2$, een voorspanning van rond de $2,3 \text{ kN/m}$ en een eigen gewicht van $4,0 \cdot 10^{-3} \text{ kN/m}^2$. De spanningssituaties in de membraanconstructie voor deze belastingsituatie wordt onderverdeeld in twee type windbelastingen, namelijk een horizontale windbelasting en een windbelasting voor zuiging en uplift van de membraanconstructie, dus een windbelasting die normaal staat op het membraanoppervlak en omhoog is gericht. In beide windsituaties wordt gerekend met de belasting van $0,78 \text{ kN/m}^2$. In Figuur 34 en Figuur 35 worden de spanningen weergegeven voor de horizontale windbelasting in de schering en de inslag respectievelijk. Deze spanningen overschrijden de maximale spanningen ook niet.

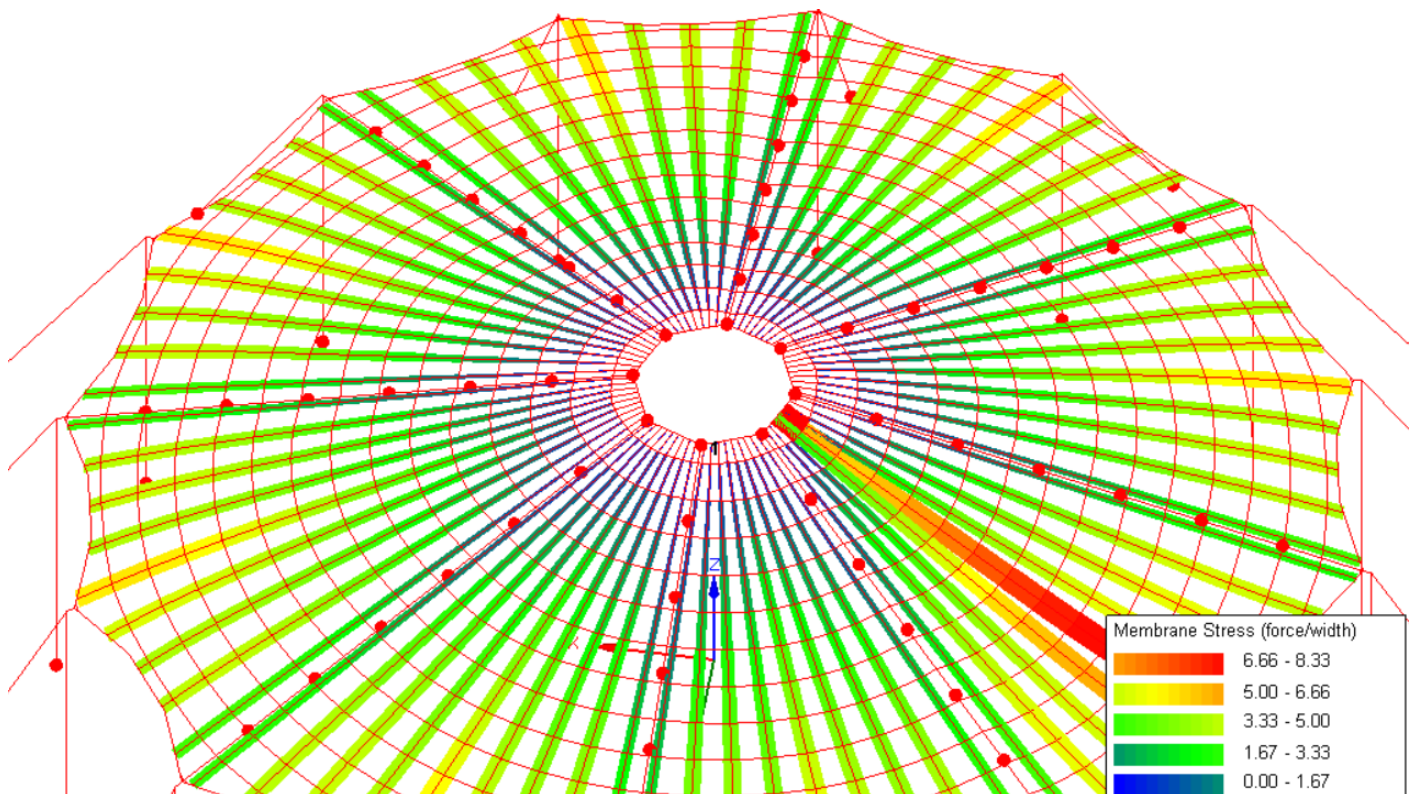


Figuur 34: Spanningen [kN/m] ten gevolge van de horizontale windbelasting in de schering.

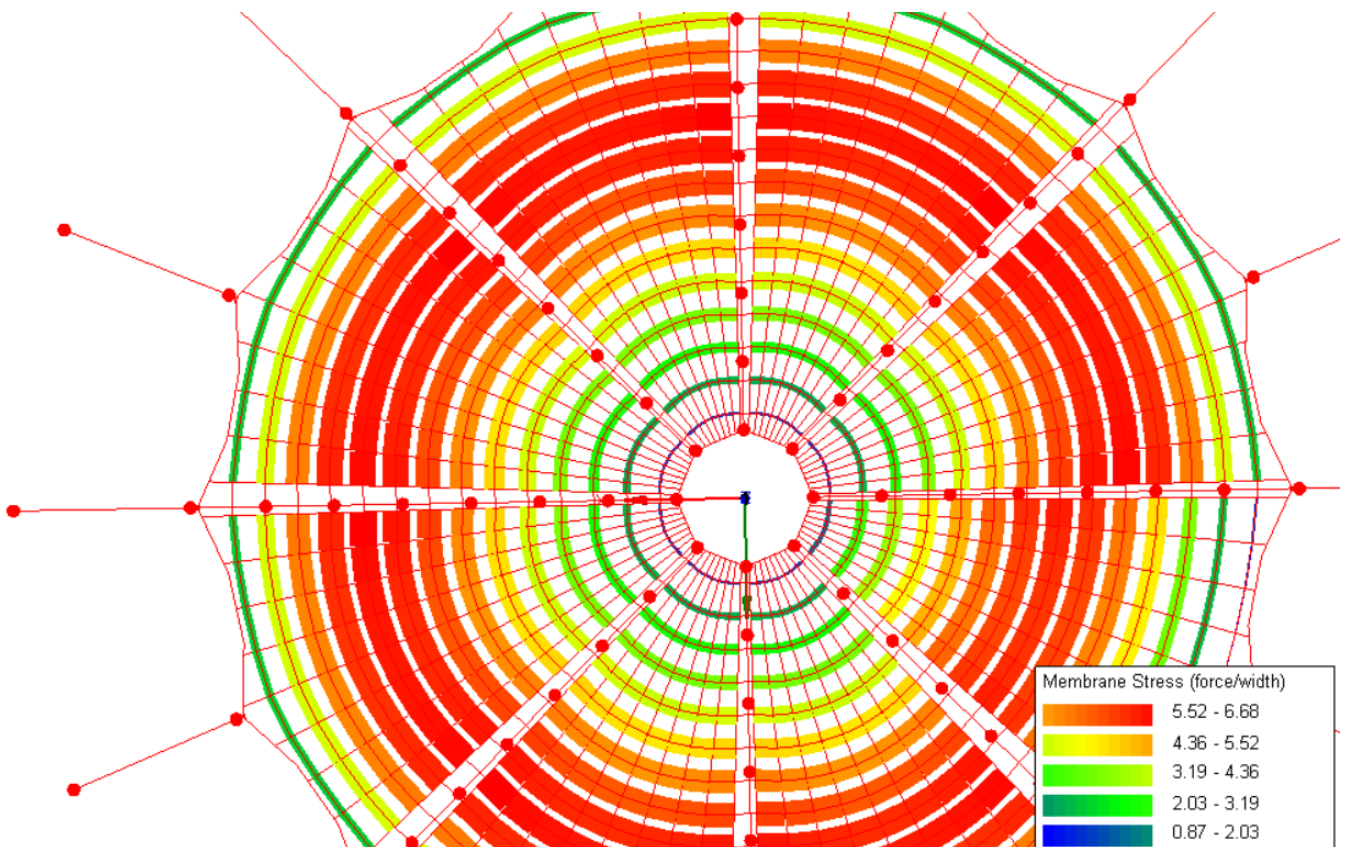


Figuur 35: Spanningen [kN/m] ten gevolge van de horizontale windbelasting in de inslag.

De spanningen ten gevolge van de windbelasting die zorgt voor uplift en zuiging van de membraanconstructie zijn weergegeven in Figuur 36 en Figuur 37 in de schering en de inslag respectievelijk. Deze spanningen in de membraanconstructie lopen maximaal op tot 7 kN/m. Dat betekent dat de maximaal toegestane spanning voor de windbelasting niet wordt overschreden.



Figuur 36: Spanningen [kN/m] ten gevolge van de opwaartse windbelasting in de schering.

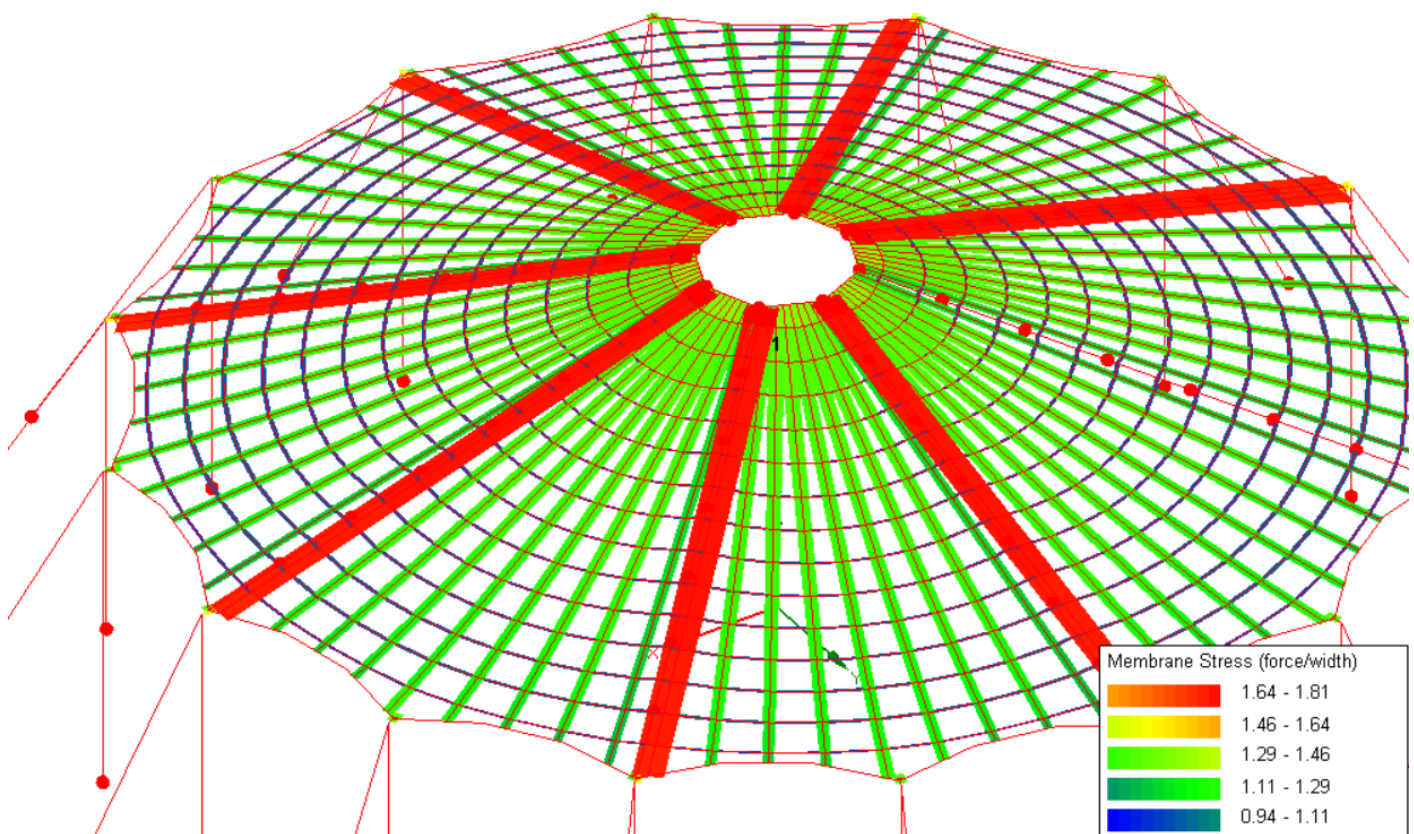


Figuur 37: Spanningen [kN/m] ten gevolge van de opwaartse windbelasting in de inslag.

De spanningen zijn het hoogst in de situatie waarbij er een opwaartse windbelasting optreedt in de inslag en de spanningen zijn het hoogst waarbij er horizontale windbelasting optreedt in de schering. Echter blijkt dat de maximaal toegestane spanningen in geen enkele situatie overschreden wordt. Dat betekent dat voor dit model de membraanconstructie voldoet op sterkte en stijfheid. Op basis van de modellen in Easy kan daarom geconcludeerd worden dat PE geschikt is voor The Roundhouse.

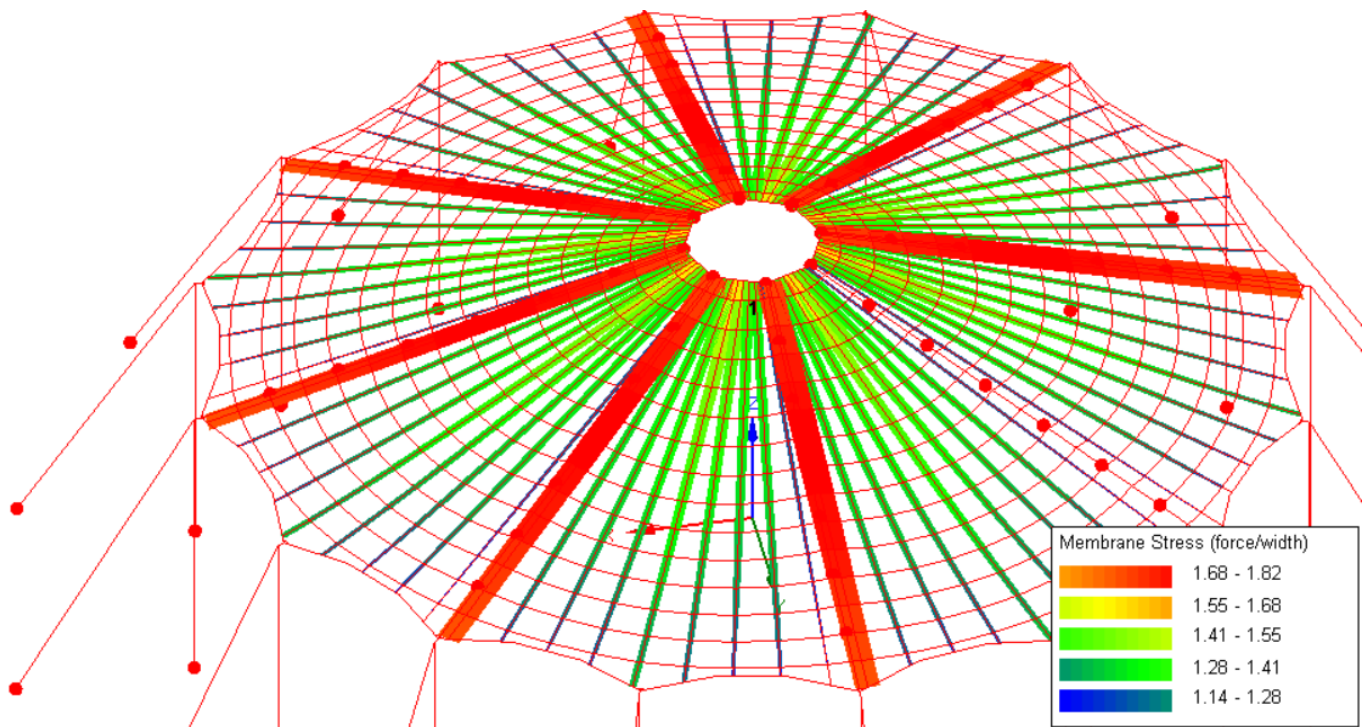
5.3.2 Ontwerp met PVC-gecoat polyester

De PVC-gecoat polyester die wordt toegepast op The Roundhouse heeft een E-modulus van rond de 1200 kN/m². Dit is namelijk een gemiddelde waarde voor PVC-gecoat polyester en tevens het standaard materiaal in Easy (Dulleman, 2019). Voordat er wordt gekeken naar de verschillende belastingsituaties wordt er eerst gekeken naar de spanningen in de constructie zonder dat er belastingen op staan. De spanningen in de constructie zijn weergegeven in Figuur 38. In deze figuur is te zien dat de spanningen voor geen enkele belastingcombinatie overschreden worden. De spanning is in het midden van de constructie het grootste en loopt af naar de buitenkant van de constructie. Waar het doek vastgemaakt is aan de vakwerkspanten is de spanning ook hoger dan op de andere plaatsen. Daarna wordt er gekeken naar drie belastingsituaties: de permante belasting, de sneeuwbelasting en de windbelasting. Deze belastingen zijn berekend in paragraaf 4.2.

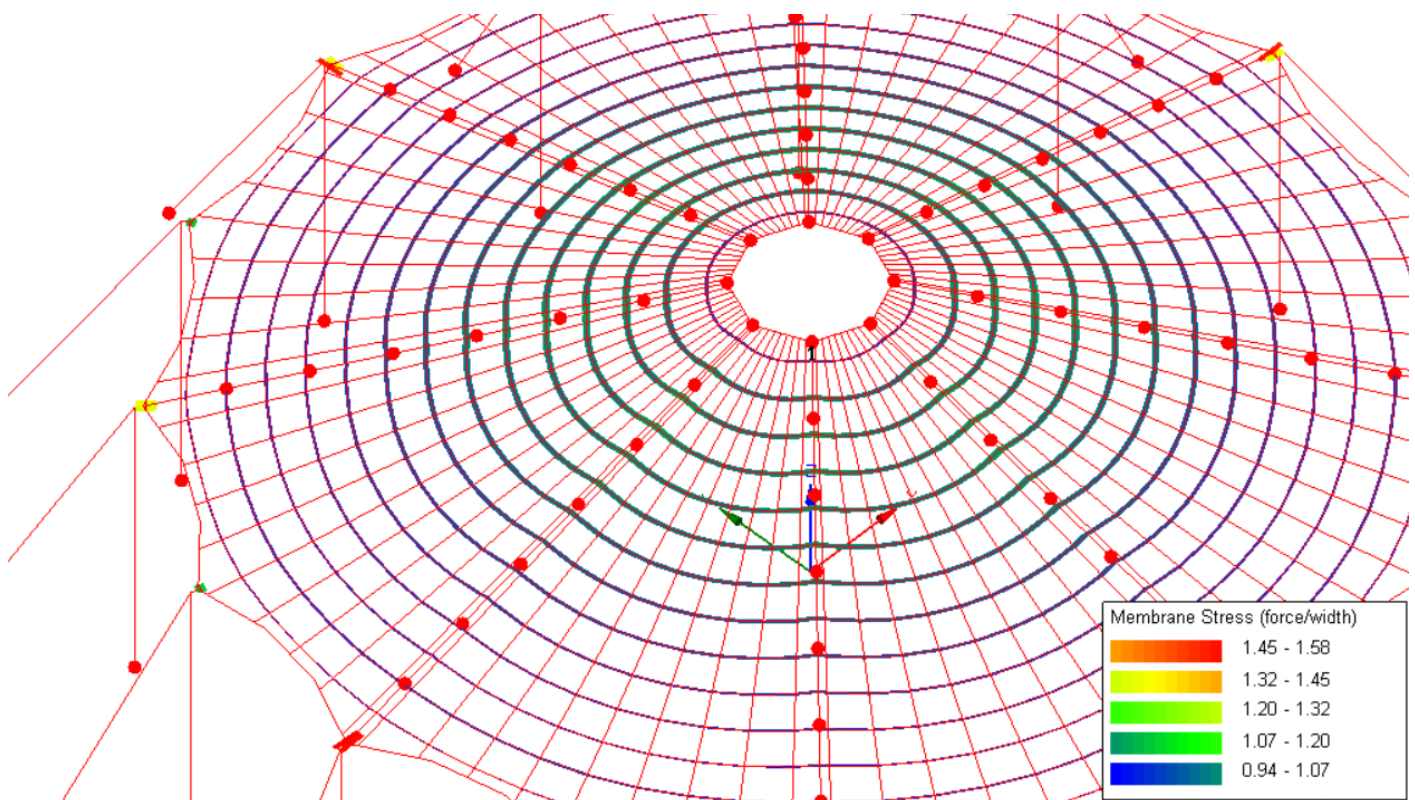


Figuur 38: Boveenaanzicht spanning [kN/m] in de membraanconstructie van PVC-gecoat polyester zonder belastingen.

Voor de permante belastingsituatie wordt gerekend met een eigen gewicht van PVC-gecoat polyester klasse Z2 van $5,7 \cdot 10^{-3}$ kN/m² en een voorspanning van 2,1 kN/m wat iets kleiner is dan de voorspanning dan PE, aangezien het materiaal iets minder stijf is. De spanningen in de membraanconstructie ten gevolge van de permanente belastingen zijn weergegeven in Figuur 39 en Figuur 40, waarbij Figuur 39 de spanningen in de schering weergeeft en Figuur 40 de spanningen in de inslag. In deze figuren is verder te zien dat de maximale spanning niet wordt overschreden. Ook is af te leiden dat de spanningen nagenoeg volledig bepaald worden door de voorspanning in het membraan en het eigen gewicht dus nauwelijks een bijdrage heeft.

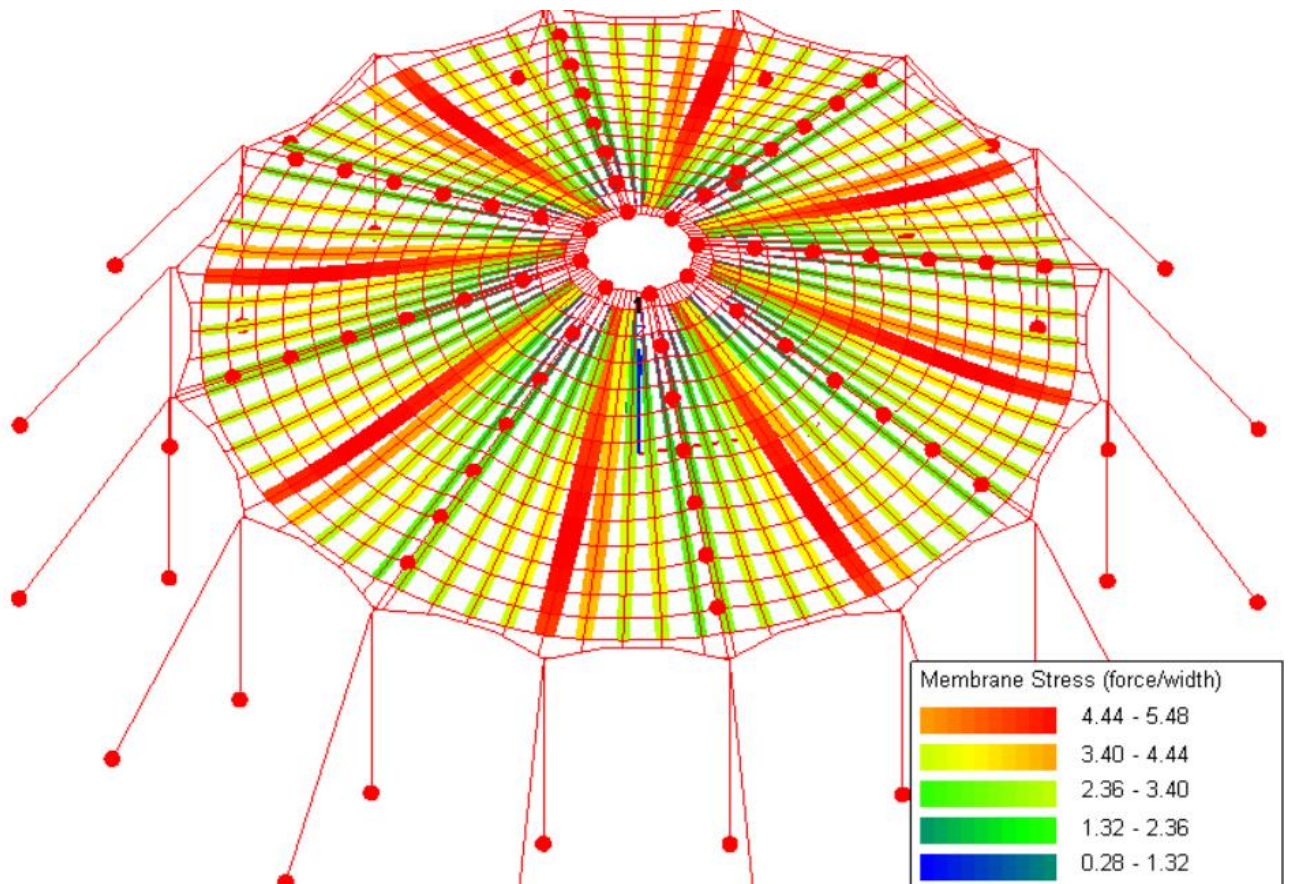


Figuur 39: Spanningen [kN/m] ten gevolge van de permanente belastingen in de schering.

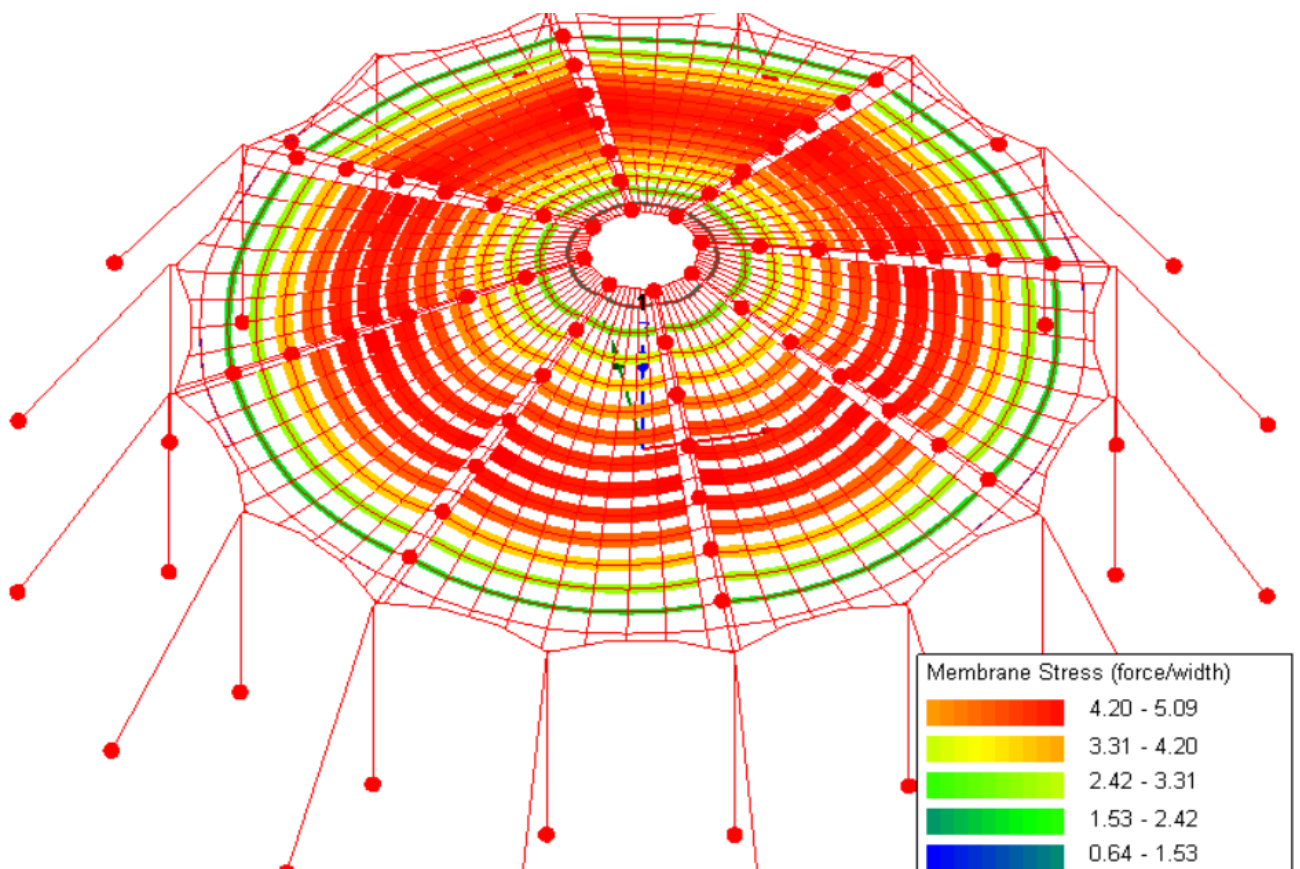


Figuur 40: Spanningen [kN/m] ten gevolge van de permanente belastingen in de inslag.

Voor de sneeuw- en windbelasting worden er dezelfde belastingen toegepast als bij de toetsing van PE. Het enige verschil is de belasting ten gevolge van het eigen gewicht. Dat maakt de totale neerwaartse belasting voor de sneeuw belastingssituatie ongeveer 0,566 kN/m². De spanningen in de membraanconstructie ten gevolge van de sneeuw belastingssituatie zijn weergegeven in Figuur 41 en Figuur 42, waarbij Figuur 41 de spanningen in de schering aangeeft en Figuur 42 de spanningen in de inslag. In deze figuren is te zien dat de spanningen de maximale spanningen in schering en de inslag niet overschrijden.



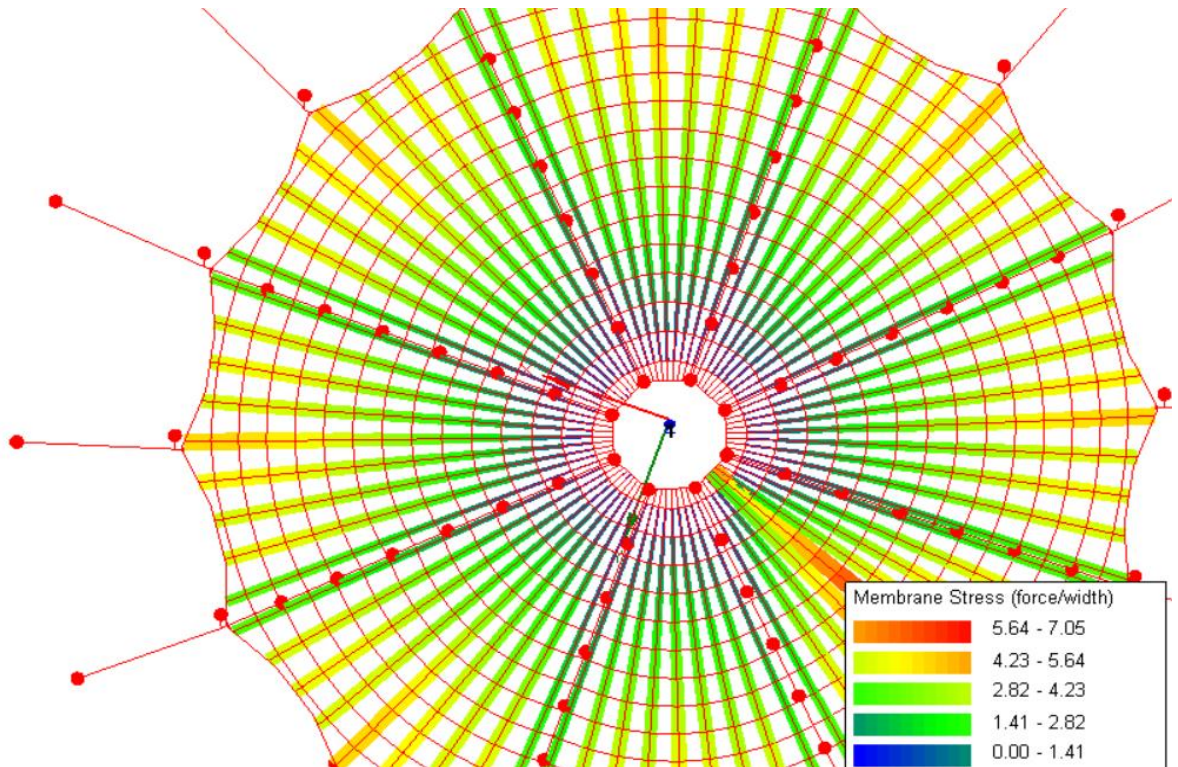
Figuur 41: Spanningen [kN/m] ten gevolge van de sneeuwbelasting in de schering.



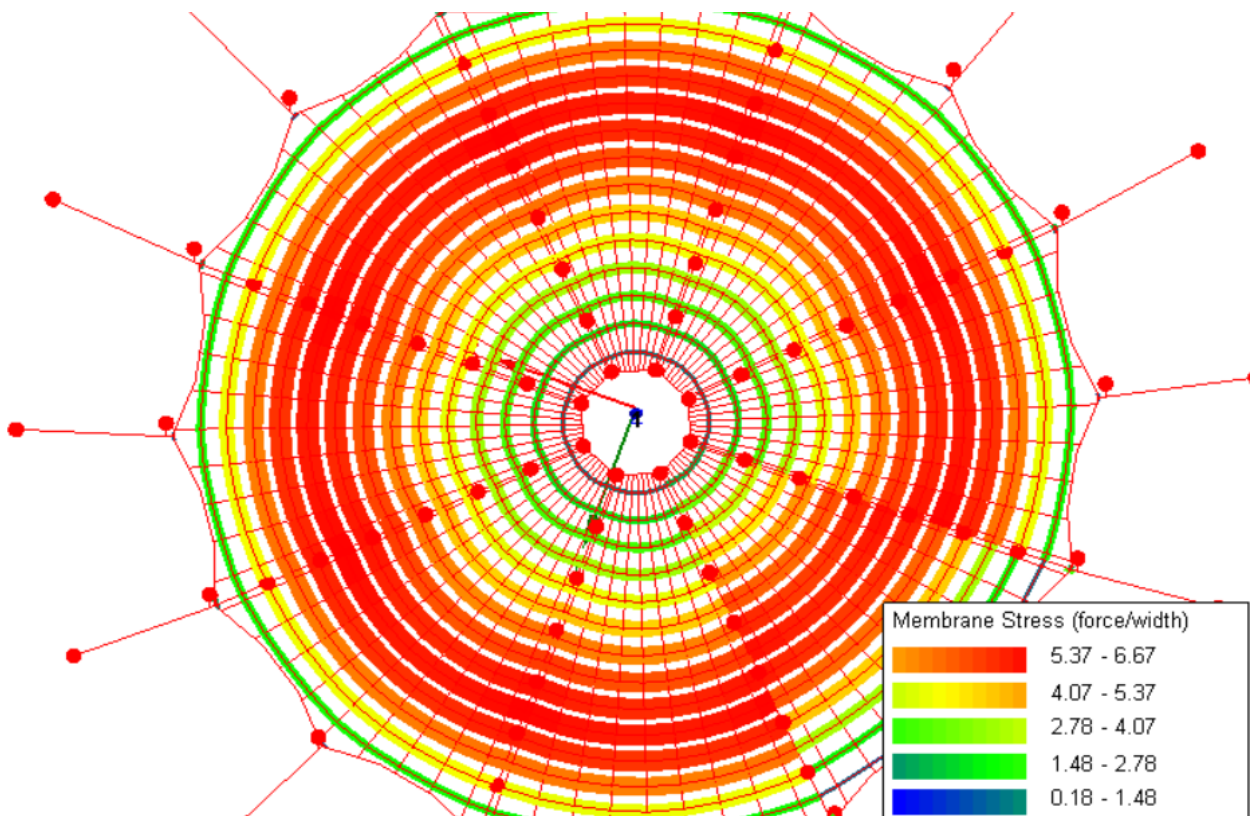
Figuur 42: Spanningen [kN/m] ten gevolge van de sneeuwbelasting in de inslag.

Voor de wind belastingsituatie wordt er onderscheid gemaakt in verschillende windrichtingen op de constructie. Zo kan de wind bijvoorbeeld zorgen voor uplift van de membraanconstructie, waardoor de

constructie als het ware wordt opgezogen. Hierin staat de windbelasting dus loodrecht op het oppervlak naar boven gericht. Daarnaast kan de wind ook horizontaal op de constructie staan, waardoor er spanningen optreden. De windbelasting in elk van deze situaties is gelijk aan $0,78 \text{ kN/m}^2$. De spanningen in de membraanconstructie ten gevolge van de uplift van de wind zijn weergegeven in Figuur 43 en Figuur 44, waarbij Figuur 43 de spanningen in de schering weergeeft en Figuur 44 de spanningen in de inslag. Hierin is te zien dat door de uplift van de wind de maximale spanningen voor de wind belastingcombinatie niet overschreden worden.

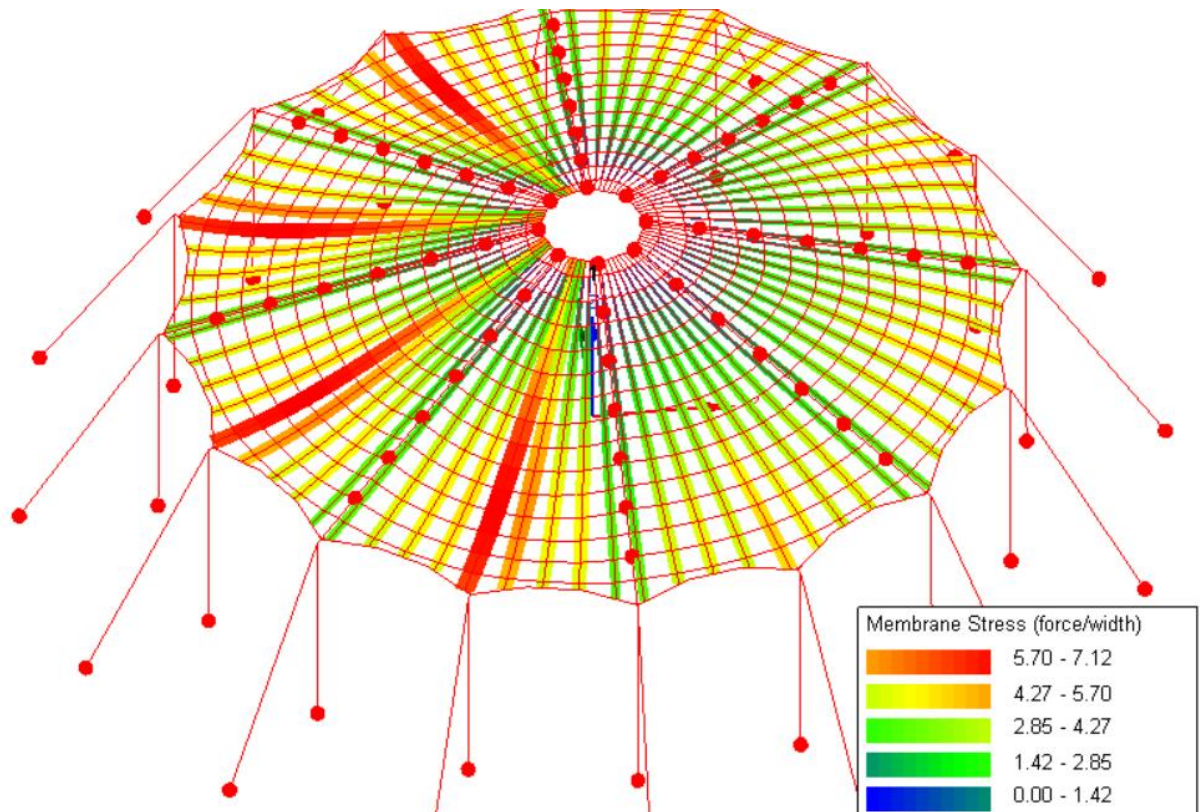


Figuur 43: Spanningen [kN/m] ten gevolge van de uplift van de windbelasting in de schering.

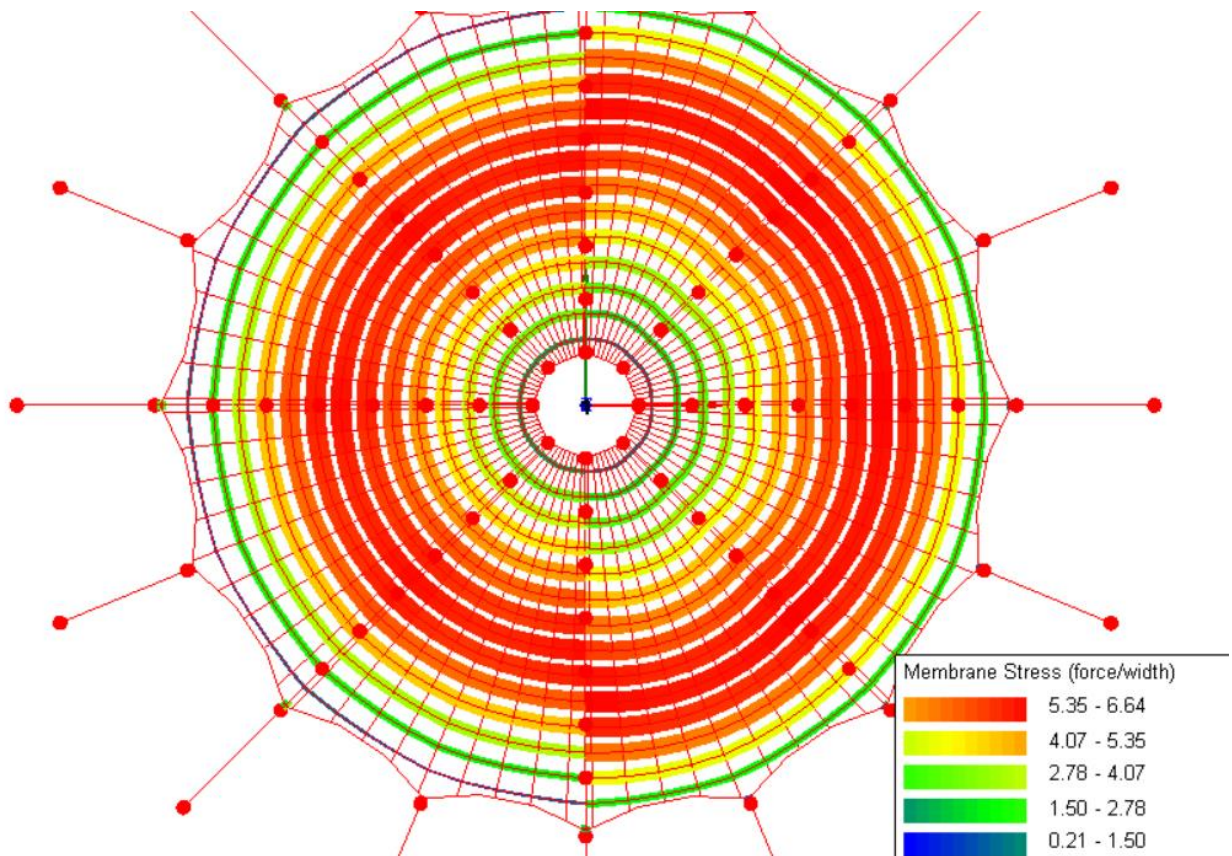


Figuur 44: Spanningen [kN/m] ten gevolge van de uplift van de windbelasting in de inslag.

Ten gevolge van de wind zijn de spanningen in x-richting en y-richting hetzelfde aangezien de constructie volledig symmetrisch is. De spanningen ten gevolge van de wind voor de schering is weergegeven in Figuur 45 en de spanningen in de inslag zijn weergegeven in Figuur 46. In deze figuren is ook af te leiden dat de spanningen voor de wind belastingcombinatie niet worden overschreden.



Figuur 45: Spanningen [kN/m] ten gevolge van horizontale windbelasting in de schering.



Figuur 46: Spanningen [kN/m] ten gevolge van de horizontale windbelasting in de inslag.

De grootste spanningen treden in het geval van PVC-gecoat polyester op wanneer de windbelasting maatgevend is in horizontale richting voor de schering en wanneer er uplift optreedt in de inslag. In deze situatie is de spanning maximaal 7,12 kN/m voor de schering en 6,67 kN/m voor de inslag en overschrijden de maximale spanning niet. The Roundhouse voldoet dus aan de toetsing van de belastingen en kan uitgevoerd worden met een membraanconstructie van PVC-gecoat polyester.

5.3.3 Vergelijking ontwerpen

Allereerst is er gekeken naar het verschil in belastingen op de constructie waarbij gebruik is gemaakt van PE en PVC-gecoat polyester. Deze belastingen verschillen grotendeels op maximaal ongeveer $1,0 \cdot 10^{-2}$ kN/m² of zelfs minder. Van daaruit blijkt ook dat de spanningen in de twee type constructies nauwelijks verschillen. Alleen in de windbelastingssituaties blijkt dat er een verschil in spanning tot 1 kN/m kan optreden. Dit kan komen door het feit dat PE een kleiner eigen gewicht heeft, waardoor de membraanconstructie makkelijker opgetild kan worden door de wind en waardoor er dus iets grotere spanningen kunnen ontstaan. Als tweede is er gekeken naar het verschil wanneer de stijfheid van het membraan wordt aangepast. PE is namelijk stijver dan PVC-gecoat polyester. Hieruit is gebleken dat de spanningen in dit geval ook minimaal verschillen, maar de spanningen voor het PVC-gecoat polyester iets hoger zijn dan de spanningen voor PE. Dat verklaart de grotere stijfheid van PE. Voor de rest blijkt dat The Roundhouse in beide materialen uitgevoerd kan worden, aangezien de maximaal toegestane spanningen voor de belastingssituaties niet overschreden worden. In de meeste gevallen staan de grootste spanningen op de verbinding tussen het doek en de vakwerkspanten en de buitenranden.

6. Conclusies & Aanbevelingen

6.1 Conclusies

Het doel van dit onderzoek was om te evalueren of PE een geschikt materiaal is om te gebruiken als membraanconstructie over een veestal genaamd The Roundhouse. Daarbij lag de focus vooral op de grotere stijfheid die PE heeft ten opzichte van PVC-gecoat polyester een probleem vormt voor het realiseren van The Roundhouse met PE. Dit is onderzocht en geëvalueerd door middel van een aantal stappen.

Allereerst zijn de technische specificaties in kaart gebracht door middel van een literatuuronderzoek. Op basis van deze technische specificaties is gebleken dat PE nagenoeg, op enkele minimale verschillen na, vergelijkbare mechanische eigenschappen heeft als PVC-gecoat polyester. De vergelijking tussen de belangrijkste materiaaleigenschappen is weergegeven in Tabel 7. Het voordeel is dat PE echter een veel kleinere oppervlakte gerelateerde massa heeft dan PVC-gecoat polyester. Dat betekent dat PE veel kosten effectiever is, doordat de hanteerbaarheid wordt vergroot en het transport en installatie proces vereenvoudigd wordt. Daarnaast is PE beter recyclebaar in vergelijking met PVC-gecoat polyester doordat PE niet eerst gescheiden hoeft te worden, waardoor de duurzaamheid ook nog wordt bevorderd.

Tabel 7: Vergelijking belangrijkste materiaaleigenschappen.

Parameter	Standaard	Membraanconstructie materialen			
		PVC-gecoat polyester			PE
		Klasse Z 1	Klasse Z 2	Klasse Z 3	NovaShield FR 400
Oppervlak gerelateerde massa [g/m ²]	DIN EN ISO 2286-2	≥ 450	≥ 580	≥ 650	407
Treksterkte schering/inslag [kN/5 cm]	DIN EN ISO 1421, procedure 1	2.0 / 1.6	2.5 / 2.5	3.0 / 3,0	2.3 / 2.2
Rek bij breuk [%]		≥ 15 / ≥ 15			22 / 18
Max. rek bij 10% van de treksterkte [%]		≤ 2 / ≤ 6			1.5 / 1.2

Als tweede is op basis van het schaalmodel een vergelijking gemaakt tussen een kunststof gaas wat heel stijf en moeilijk vervormbaar is en een vloerfolie wat juist heel flexibel en makkelijk te spannen is, maar waarbij de kans op bezwijken groter is. Daaruit is ondervonden dat het stijvere materiaal meer moeite kost en meer kracht om strak en stevig voor te spannen. Dat terwijl er bij het flexibele materiaal weinig moeite gedaan hoefde te worden om alles strak, stevig en netjes voor te spannen.

Tabel 8: Overzicht belastingen en maximaal toegestane spanningen per belastingcombinatie.

Belastingcombinatie		Belasting PVC-gecoat polyester	Belasting PE	f _d PVC-gecoat polyester (schering/inslag) [kN/m]	f _d PE (schering/inslag) [kN/m]
Permanent	Eigen gewicht	5,7*10 ⁻³ kN/m ²	4,0*10 ⁻³ kN/m ²	7,81 / 7,81	7,19 / 6,88
	Voorspanning	2,1 kN/m	2,3 kN/m		
Wind		0,78 kN/m ²		15,63 / 15,63	14,38 / 13,75
Sneeuw		0,56 kN/m ²		9,80 / 9,80	9,02 / 8,63

Tot slot is er door middel van beschrijvingen van belastingen en grenstoestanden gecontroleerd of de membraanconstructie niet zal bezwijken. Een overzicht van alle belastingen en grenstoestanden van de membranen zijn weergegeven in Tabel 8. De toetsing op sterkte en stijfheid is uitgevoerd door het modelleren van een computermodel van The Roundhouse in Easy, waarin materiaaleigenschappen zijn aangepast naar materiaal en waarin de spanningen door verschillende belastingsituaties getoetst zijn. Op deze manier zijn de spanningen als PE wordt gebruikt voor The Roundhouse bij verschillende belastingsituaties vergeleken met de spanningen als PVC-gecoat polyester wordt gebruikt. Uit deze modellen is gebleken dat de spanningen tussen de materialen voor de verschillende belastingsituaties nauwelijks verschillen. Verder is

tijdens de toetsing gebleken dat de maximaal toegestane spanningen in geen enkel geval wordt overschreden en zelfs ruimschoots voldoen. Dat geldt voor zowel PE als voor PVC-gecoat polyester.

Op basis van het literatuuronderzoek en de modellen in Easy kan dus geconcludeerd worden dat de grotere stijfheid van PE geen probleem vormt en dat de membraanconstructie zich nog voldoende kan vervormen doordat de spanningen ruimschoots voldoen aan de maximaal toegestane spanningen. Ook wordt door het gebruik van PE de duurzaamheid bevorderd. Aangezien de grotere stijfheid van PE geen problemen vormt volgens het literatuuronderzoek en de modellen in Easy kan The Roundhouse worden overspannen met een membraanconstructie van PE in plaats van met een membraanconstructie van PVC-gecoat polyester. Op basis van het fysiek schaalmodel en het literatuuronderzoek kan geconcludeerd worden dat, hoewel er misschien meer moeite gedaan moet worden om het stijvere PE strak en net te overspannen, de voordelen van het lichtere en meer duurzame PE sterker wegen. Als antwoord op de onderzoeksvraag kan dus geconcludeerd worden dat de grotere stijfheid van PE geen problemen vormt en dat The Roundhouse overspannen kan worden met een membraanconstructie van PE.

6.2 Discussie

In dit onderzoek is een aanname gedaan dat de elasticiteitsmodulus en dus de stijfheid in kN/m^2 van PE groter is dan de stijfheid van PVC-gecoat polyester. Deze aanname is op basis van gesprekken met Ir. R. Houtman gedaan. Dit bleek achteraf een miscommunicatie te zijn. In de gesprekken ging het om de afschuifstijfheid in plaats van de elasticiteitsmodulus. De afschuifstijfheid van PE is dus groter dan dat van PVC-gecoat polyester, terwijl de elasticiteitsmodulus van PE en PVC-gecoat polyester ongeveer hetzelfde is. Daarnaast is de eenheid van de afschuifstijfheid in kN/m en niet zoals de stijfheid in dit onderzoek in kN/m^2 . Door deze miscommunicatie kunnen de spanningen en vervormingen verkeerd gemodelleerd zijn. Hieruit kan ook voortkomen dat de spanningen en vervormingen ongeveer gelijk zijn terwijl dit waarschijnlijk helemaal niet het geval is.

6.3 Aanbevelingen

Binnen het rapport zijn enkele vereenvoudigingen gemaakt en aannames gedaan. Zo is er bijvoorbeeld niet gekeken naar de sterkte- en stabiliteitscontrole van de draagconstructie. Ook is er niet gekeken naar mogelijke aanpassingen van de indeling van The Roundhouse of eventuele aanpassingen in de draagconstructie. Een aanvullend rapport zou zich kunnen focussen op de draagconstructie aangepast kan worden en of deze vervolgens voldoet op sterkte, stijfheid en stabiliteit.

Ook zijn er vereenvoudigde aannames gedaan over bijvoorbeeld de windbelasting op The Roundhouse. In een aanvullend rapport zou getoetst moet worden op stuwdrukken waarbij de inwendige en uitwendige druk getoetst kan worden. The Roundhouse kan door wind namelijk opgetrokken worden doordat het een open constructie is of juist naar beneden gezogen kunnen worden. Daarbij kan in het rapport ook verdergegaan worden om een basis neer te leggen van richtlijnen voor dit soort type membraanconstructies of ronde constructies. In de eurocode zijn hier namelijk nog geen specifieke voorschriften voor opgesteld. Vanwege de tijd kon hier dus geen extra aandacht aan besteed worden en is de windbelasting vereenvoudigd.

Een andere aanbeveling is om bij een vervolgonderzoek te kijken naar een ander specifieke probleemstelling die zich vormt wanneer er PE als materiaal voor de membraanconstructie van The Roundhouse wordt gebruikt. Zo kan er bijvoorbeeld onderzocht worden wat er bij de verbinding van het doek en een vakwerkspant gebeurt en of er plooiing bij de naad kan optreden wanneer er PE gebruikt wordt. Ook is er een aanbeveling om bij een vervolgonderzoek te kijken naar de mogelijkheid of The Roundhouse is toe te passen in meerdere vormen, waarbij het doek zich met zowel PVC-gecoat polyester als met PE nog steeds voldoende kan vervormen en niet bezwijkt.

Naast de mogelijkheid om PE te gebruiken als membraanconstructie voor The Roundhouse, is het ook mogelijk om te kijken naar andere materialen of combinaties van verschillende materialen. Er kan bijvoorbeeld worden gekeken naar verschillende innovatieve kunststoffen, organische stoffen of materialen die al gerecycled zijn en hergebruikt kunnen worden in The Roundhouse. Het verdient aanbeveling de haalbaarheid en de uitvoerbaarheid van deze optie te onderzoeken, omdat het in de toekomst de duurzaamheid alleen maar kan bevorderen en daarnaast de uitstoot van stikstof en koolstofdioxide alleen maar kan reduceren.

Literatuurlijst

Alberghini, M., Hong, S., Lozano, L. M., Korolovych, V., Huang, Y., Signorato, F., . . . Boriskina, S. V. (2021). Sustainable polyethylene fabrics with engineered moisture transport for passive cooling. *Nature Sustainability*, 4(8), 715–724. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00688-5>

Barnes, M., Forster, B. & Dencher, M. (2004). Structural Design Basis and Safety Criteria. In *European Design Guide for Tensile Surface Structures* (pp. 177–190). Tensinet.

Beccarelli, P. (2015). The Design, Analysis and Construction of Tensile Fabric Structures. *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*, 9–33. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02228-4_2

Bletzinger, K. U., Oñate, E., Kröplin, B. & de Navarra, E. O. I. (2013). *Structural Membranes 2013*. CIMNE. Geraadpleegd van https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/185431/MEMBRANES_2013-18_Advantages%20of%20lightweight%20tensioned.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Bögner-Balz, H., Blum, R. & Köhnlein, J. (2015). Structural behaviour of fabrics and coatings for architectural fabric structures. *Fabric Structures in Architecture*, 123–157. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-233-4.00004-8>

Bridgens, B. N., Gosling, P. D. & Birchall, M. J. S. (2003). Tensile fabric structures: concepts, practice & developments. *Structural Engineer*, 82(14), 21–27. Geraadpleegd van https://www.researchgate.net/profile/Ben-Bridgens/publication/279708713_Tensile_fabric_structures_Concepts_practice_developments/links/559ccfa908ae898ed6520b1a/Tensile-fabric-structures-Concepts-practice-developments.pdf

Corne, E., Mollaert, M., Stranghöner, N., Uhleman, J., Bilginoglu, F., Bletzinger, K-U., ... Thomas, J-C. (2016). SaP-Report: Prospect for European guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures. (Science and Policy Report). Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Cremers, J. (2015). Environmental impact of architectural fabric structures. *Fabric Structures in Architecture*, 257–281. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-233-4.00010-3>

Dulleman, T. (z.d.). *SCHADUWZEIL OVER DE HILLEGONDATUIN* (Bachelorscriptie). Technische Universiteit Delft.

Eltahan, E. (2018). Structural parameters affecting tear strength of the fabrics tents. *Alexandria Engineering Journal*, 57(1), 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.12.005>

Forster, B. & Mollaert, M. (2004). *The European Design Guide for Tensile Surface Structures*. Tensinet.

Houtman, R. (2015). Materials used for architectural fabric structures. *Fabric Structures in Architecture*, 101–121. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-233-4.00003-6>

Houtman, R. & Orpana, M. (2000). Materials for membrane structures. *Bauen mit Textilien*, 4, 27–32. Geraadpleegd van http://faculty-legacy.arch.tamu.edu/anichols/index_files/courses/arch631/arch631old/NS13-1membrane.pdf

ID Agro BV. (2009a). *The Roundhouse* [Afbeelding]. Geraadpleegd van <https://www.idagro.nl/producten/the-roundhouse>

ID Agro BV. (2009b). *Vakwerkconstructie The Roundhouse* [Afbeelding]. Geraadpleegd van <https://www.idagro.nl/producten/the-roundhouse>

ID Agro BV. (2015). *The Roundhouse [Brochure]*. Geraadpleegd op 27 september 2022, van <https://www.idagro.nl/media/77216/brochure-roundhouse.pdf>

ID Agro BV. (2020). *Kolommen en binnenaanzicht van The Roundhouse [Afbeelding]*. Geraadpleegd van <https://www.idagro.nl/projecten/agrarisch/the-roundhouse/roundhouse-30-voor-belgisch-witblauw>

ID Agro BV. (z.d.). *The Roundhouse®*. Geraadpleegd op 19 september 2022, van <https://www.idagro.nl/producten/the-roundhouse>

João, L. S., Carvalho, R. & Figueiro, R. (2016). A Study on the Durability Properties of Textile Membranes for Architectural Purposes. *Procedia Engineering*, 155, 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.024>

Karatsi, P. (2022). *Literature review on shear behaviour of structural fabrics and possible shear test methods*. Tentech. Tentech.

Lentz, J. (2016). *Bovenaanzicht van The Roundhouse [Afbeelding]*. Geraadpleegd van <https://www.mechaman.nl/veehouderij-techniek/artikel/20160616/id-agro-nieuwe-eigenaar-roundhouse-concept/>

Li, Q., Su, Y., Wu, Y., Borgart, A. & Rots, J. G. (2017). Form-finding of shell structures generated from physical models. *International Journal of Space Structures*, 32(1), 11–33. <https://doi.org/10.1177/0266351117696577>

Mollaert, M., Dimova, S., Pinto, A., Denton, S., Stranghöner, N., Bilginoglu, F., . . . Llorens, J. (2016). *Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures: Support to the Implementation, Harmonization and Further Development of the Eurocodes*. Publications Office.

Natuur Beheer Limburg. [c. 2016]. *Kolommen van The Roundhouse [Afbeelding]*. Geraadpleegd van <http://www.herefords.nl/natuur-beheer/>

NEN. (2011a). *NEN-EN 1991-1-3+C1. NEN Connect*.

NEN. (2011b). *NEN-EN 1991-1-4+A1+C2. NEN Connect*.

Pasterkamp, S. (2016). *Quick Reference, Academic Year 2016. TU Delft*. TU Delft.

Patton, S. (2021). *Characterization of Polyethylene Structure Membrane (Masterscriptie)*. Anhalt University of Applied Sciences.

Pedreschi, R. & Lee, D. S. (2014). Structure, Form and Construction. *Fabric formwork for concrete*, 99–110. Geraadpleegd van http://anzasca.net/wp-content/uploads/2014/12/02_08_194.pdf

Qingpeng Li. (2018). *Form Follows Force: A theoretical framework for Structural Morphology, and Form-Finding research on shell structures (Vol. 2)*. <https://doi.org/10.7480/abe.2018.2.1993>

Smit, R. (z.d.). *Lichtgewicht Constructies: ontwikkeling van een flexibele, modulaire festivaltent (Bachelorscriptie)*. Hogeschool Utrecht.

Tentech B.V. (2019, 14 juni). *Over Tentech | Ontwerp- en adviesbureau voor lichtgewicht bouwen*. Geraadpleegd op 10 oktober 2022, van <https://tentech.nl/over-tentech/>

Van Weersch, I. E. A. (2018). *Tentboek 10x15m Stretchtent. Eurostretchtent Company*. Tentech BV. Geraadpleegd van <https://cdn.bluenotion.nl/0c3ac641085ba7696fb5a25b35ce0b87e4ce9276a500afbd64f0f392a0d4cff4.pdf>

Appendix A: Eigenschappen PVC-gecoat polyester

In deze Appendix worden de eigenschappen van PVC-gecoat polyester in tabellen op een rij gezet. Aan de hand van deze specifieke eigenschappen kunnen de overeenkomsten en verschillen en voor- en nadelen van PE ten opzichte van PVC-gecoat polyester in kaart worden gebracht. Dit is gedaan voor drie soorten PE-membranen: de NovaShield non-FR, de NovaShield FR Plus en de NovaShield FR Elite. Deze karakterisatie is op basis van DIN 18204-1 “Components for enclosures made of textile fabrics and plastic films” – Part 1: Structures and tents.

Tabel A 1: Requirements and performance classes and NovaShield FR Plus.

Parameter	Standaard	Membraanconstructie materialen			
		Klasse Z 1	Klasse Z 2	Klasse Z 3	NovaShield FR Plus
Carrier fabric	DIN EN ISO 2076	Polyester (PES)			High Density PE
Coating	-	Soft PVC			Low Density PE
Total area-related mass [g/m ²]	DIN EN ISO 2286-2	≥ 450	≥ 580	≥ 650	407
Tensile strength [kN/5 cm] Schering/Inslag	DIN EN ISO 1421, procedure 1	2.0 / 1.6	2.5 / 2.5	3.0 / 3,0	2.3 / 2.2
Elongation at break [%]		≥ 15 / ≥ 15			22 / 18
Max. elongation at 10% of the tensile force [%] Schering/Inslag		≤ 2 / ≤ 6			1.5 / 1.2
Tear propagation resistance [kN] Schering/Inslag	DIN EN 1875-3	0.1 / 0.1	0.13 / 0.13	0.2 / 0.2	0.5 / 0.4
Adhesive strength [N/5 cm]	DIN EN 15619: 2014-07, Appendix B	100	100	100	80
Weld strength [kN/5 cm] (weld width 15mm - < 40 mm) Schering/Inslag	DIN EN ISO 1421, procedure 1	At 23 °C: min. 70% of the tensile strength. At 70 °C: min. 40% of the tensile strength			23 °C: 85% 70 °C: 70%
Weld strength [kN/5 cm] (weld width ≥ 40 mm) Schering/Inslag		At 23 °C: min. 80% of the tensile strength. At 70 °C: min. 60% of the tensile strength			23 °C: 85% 70 °C: 70%
Strength f_{Ku} of the Keder connections [kN/5 cm]	Ø 8 mm	At 23 °C: 0.8 at 70 °C: 0.30			TBD
	Ø 10 mm	At 23 °C: 1.0 at 70 °C: 0.60			TBD
	Ø 12 mm	At 23 °C: 1.2 at 70 °C: 0.80			TBD

Tabel A 2: Requirements and performance classes and NovaShield non-FR.

Parameter		Standaard	Membraanconstructie materialen			
			Klasse Z 1	Klasse Z 2	Klasse Z 3	NovaShield non-FR
Carrier fabric		DIN EN ISO 2076	Polyester (PES)			High Density PE
Coating		-	Soft PVC			Low Density PE
Total area-related mass [g/m²]		DIN EN ISO 2286-2	≥ 450	≥ 580	≥ 650	407
Tensile strength [kN/5 cm] Schering/Inslag		DIN EN ISO 1421, procedure 1	2.0 / 1.6	2.5 / 2.5	3.0 / 3,0	2.2 / 2.1
Elongation at break [%]			≥ 15 / ≥ 15			19 / 16
Max. elongation at 10% of the tensile force [%] Schering/Inslag			≤ 2 / ≤ 6			1.5 / 0.95
Tear propagation resistance [kN] Schering/Inslag		DIN EN 1875-3	0.1 / 0.1	0.13 / 0.13	0.2 / 0.2	0.4 / 0.4
Adhesive strength [N/5 cm]		DIN EN 15619: 2014-07, Appendix B	100	100	100	70
Weld strength [kN/5 cm] (weld width 15mm - < 40 mm) Schering/Inslag		DIN EN ISO 1421, procedure 1	At 23 °C: min. 70% of the tensile strength. At 70 °C: min. 40% of the tensile strength			23 °C: 85% 70 °C: 70%
Weld strength [kN/5 cm] (weld width ≥ 40 mm) Schering/Inslag			At 23 °C: min. 80% of the tensile strength. At 70 °C: min. 60% of the tensile strength			23 °C: 85% 70 °C: 70%
Strength f _{Ku} of the Keder connections [kN/5 cm]	Ø 8 mm	DIN EN ISO 1421, procedure 1	At 23 °C: 0.8 at 70 °C: 0.30			TBD
	Ø 10 mm		At 23 °C: 1.0 at 70 °C: 0.60			TBD
	Ø 12 mm		At 23 °C: 1.2 at 70 °C: 0.80			TBD

Tabel A 3: Requirements and performance classes and NovaShield FR Elite.

Parameter		Standaard	Membraanconstructie materialen			
			Klasse Z 1	Klasse Z 2	Klasse Z 3	NovaShield FR Elite
Carrier fabric		DIN EN ISO 2076	Polyester (PES)			High Density PE
Coating		-	Soft PVC			Low Density PE / LLDPE
Total area-related mass [g/m²]		DIN EN ISO 2286-2	≥ 450	≥ 580	≥ 650	466
Tensile strength [kN/5 cm] Schering/Inslag		DIN EN ISO 1421, procedure 1	2.0 / 1.6	2.5 / 2.5	3.0 / 3,0	2.5 / 2.2
Elongation at break [%]			≥ 15 / ≥ 15			22 / 18
Max. elongation at 10% of the tensile force [%] Schering/Inslag			≤ 2 / ≤ 6			1.4 / 1.1
Tear propagation resistance [kN] Schering/Inslag		DIN EN 1875-3	0.1 / 0.1	0.13 / 0.13	0.2 / 0.2	0.4 / 0.4
Adhesive strength [N/5 cm]		DIN EN 15619: 2014-07, Appendix B	100	100	100	80
Weld strength [kN/5 cm] (weld width 15mm - < 40 mm) Schering/Inslag		DIN EN ISO 1421, procedure 1	At 23 °C: min. 70% of the tensile strength. At 70 °C: min. 40% of the tensile strength			23 °C: 85% 70 °C: 70%
Weld strength [kN/5 cm] (weld width ≥ 40 mm) Schering/Inslag			At 23 °C: min. 80% of the tensile strength. At 70 °C: min. 60% of the tensile strength			23 °C: 85% 70 °C: 70%
Strength f _{Ku} of the Keder connections [kN/5 cm]	Ø 8 mm	DIN EN ISO 1421, procedure 1	At 23 °C: 0.8 at 70 °C: 0.30			TBD
	Ø 10 mm		At 23 °C: 1.0 at 70 °C: 0.60			TBD
	Ø 12 mm		At 23 °C: 1.2 at 70 °C: 0.80			TBD

Appendix B: Eigenschappen PE

In deze Appendix worden de eigenschappen van PE laten zien. De eigenschappen komen voort uit een aantal testen die zijn uitgevoerd in Patton (2021) waarvan de gegevens zijn overgenomen. Deze testen bestaan uit: tensile tests, tear tests, burst tests, hydrostatic resistance, abrasion resistance, biaxial strength en weld testing. De gegevens verkregen uit deze testen worden in onderstaande tabellen weergegeven voor verschillen membranen van PE.

1. Algemene Test Data:

Tabel B 1: Fysieke Sterkte eigenschappen van PE membranen.

Parameter	Standard	NovaShield non-FR	NovaShield FR Plus	NovaShield FR Elite
Mass [g/m ²]	DIN EN ISO 2286	407	407	466
Strip Tensile Strength [kN/5cm] Schering/Inslag	DIN EN ISO 1421-1, Method 1	2.2 / 2.1	2.3 / 2.2	2.5 / 2.2
Elongation at break [%] Schering/Inslag		19 / 16	22 / 18	22 / 18
Strip Tensile Strength [lbs/in] Schering/Inslag	ASTM D4851	245 / 235	262 / 248	265 / 250
Elongation at break [%] Schering/Inslag		20 / 17	22 / 17	22 / 18
Grab Tensile Strength [kN] Schering/Inslag	DIN EN ISO 1421-1, Method 2	1.6 / 1.5	1.6 / 1.5	1.9 / 1.8
Grab Tensile Strength [lbs] Schering/Inslag	ASTM D5034	370 / 345	360 / 350	425 / 400
Trapezoidal Tear Strength [kN] Schering/Inslag	DIN 1875-3	0.42 / 0.40	0.49 / 0.40	0.38 / 0.35
Trapezoidal Tear Strength [lbs] Schering/Inslag	ASTM D4533	95 / 90	110 / 90	85 / 80
Tongue Tear Strength [kN] Schering/Inslag	DIN 53363	0.49 / 0.44	0.53 / 0.49	100 / 90
Tongue Tear Strength [lbs] Schering/Inslag	ASTM D2261	110 / 100	120 / 110	100 / 90
Mullen Burst Strength [kPa] Schering, Inslag	ASTM D751	4512	4650	4500
Mullen Burst Strenfgth [psi] Schering, Inslag	ASTM D751	655	675	650
Hydrostatic Resistance [kN]	ASTM D751	1199	1110	2997
Hydrostatic Resistance [lbs]	ASTM D751	270	250	675

2. Abrasion Resistance:

Tabel B 2: Abrasion weerstand data from ASTM D3889 testing.

	Average
1) NovaShield non-FR (white/white) <u>First side</u> Cycles to scrim: 30 Weight loss after 500 cycles (%): 0.88 Weight loss after 1000 cycles (%): 1.66 <u>Second side</u> Cycles to scrim: 40 Weight loss after 500 cycles (%): 1.02 Weight loss after 1000 cycles (%): 1.91	
2) NovaShield FR Plus (white/white) <u>First side</u> Cycles to scrim: 110 Weight loss after 500 cycles (%): 0.92 Weight loss after 1000 cycles (%): 1.57 <u>Second side</u> Cycles to scrim: 175 Weight loss after 500 cycles (%): 0.96 Weight loss after 1000 cycles (%): 1.63	
3) NovaShield FR Elite (white/white) <u>First side</u> Cycles to scrim: 110 Weight loss after 500 cycles (%): 0.92 Weight loss after 1000 cycles (%): 1.57 <u>Second side</u> Cycles to scrim: 1100 Weight loss after 500 cycles (%): 0.64 Weight loss after 1000 cycles (%): 1.14	

3. Biaxial Test Data:

Tabel B 3: **NovaShield non-FR**: Elastic Moduli ind. of stress ratio combination, courtesy of DEKRA Stuttgart, DE.

Elastic Moduli		Warp to Weft stress ratio combination					
		1:1	1:1	1:1	1:1	2:1	1:2
		2:1	1:2	1:0	0:1	1:0	0:1
Schering	kN/m	257	252	274	256	269	260
Fill	kN/m	250	287	273	284	245	284
Poisson Ratio Warp and fill		0.14	0.09	0.14	0.09	0.08	0.09
Poisson Ratio fill and Warp		0.14	0.08	0.14	0.08	0.09	0.08

Tabel B 4: NovaShield FR Plus: Elastic Moduli ind. of stress ratio combination, courtesy of DEKRA Stuttgart, DE.

Elastic Moduli		Warp to Weft stress ratio combination					
		1:1 2:1	1:1 1:2	1:1 1:0	1:1 0:1	2:1 1:0	1:2 0:1
Schering	kN/m	268	267	288	267	285	267
Fill	kN/m	282	315	273	312	262	313
Poisson Ratio Warp and fill		0.15	0.10	0.12	0.10	0.08	0.11
Poisson Ratio fill and Warp		0.15	0.09	0.12	0.09	0.09	0.10

Tabel B 5: NovaShield FR Elite: Elastic Moduli ind. of stress ratio combination, courtesy of DEKRA Stuttgart, DE.

Elastic Moduli		Warp to Weft stress ratio combination					
		1:1 2:1	1:1 1:2	1:1 1:0	1:1 0:1	2:1 1:0	1:2 0:1
Schering	kN/m	263	257	274	251	270	242
Fill	kN/m	250	312	273	313	266	313
Poisson Ratio Warp and fill		0.16	0.12	0.14	0.14	0.11	0.13
Poisson Ratio fill and Warp		0.15	0.10	0.14	0.11	0.11	0.10

4. Fire Resistance:

Tabel B 6: NFPA 701 Method 1.

	NovaShield non-FR	NovaShield FR Plus	NovaShield FR Elite
Mean Mass Loss (%)	N/A	1.7	13.6
Average Flaming Dripping Time (s)	N/A	0.0	0.0
Overall Result	N/A	Pass	Pass

Tabel B 7: NFPA 701 Method 2.

	NovaShield non-FR	NovaShield FR Plus	NovaShield FR Elite
Length of char (cm)	N/A	13.8	21.1
After flame time (s)	N/A	0.0	0.0
Average Flaming Dripping Time (s)	N/A	0.0	0.0
Overall Result	N/A	Pass	Pass

Tabel B 8: CAN/ULC S109.

Small Scale Burn Test	NovaShield non-FR	NovaShield FR Plus	NovaShield FR Elite
Damaged Length (mm)	N/A	116	94
After flame time (s)	N/A	0.0	3.1
Average Flaming Dripping Time (s)	N/A	0.0	0.0
Overall Result	N/A	Pass	Pass
Large Scale Burn Test	NovaShield non-FR	NovaShield FR Plus	NovaShield FR Elite
Max. Individual Damaged Length (mm)	N/A	125	67
After flame time (s)	N/A	0.0	0.0
Average Flaming Dripping Time (s)	N/A	0.0	0.0
Overall Result	N/A	Pass	Pass

Tabel B 9: ASTM E84.

	NovaShield non-FR	NovaShield FR Plus	NovaShield FR Elite
Flame Spread Index	5	0	0
Smoke Developed Index	55	75	175

Tabel B 10: CAN/ULC S102.

	NovaShield non-FR	NovaShield FR Plus	NovaShield FR Elite
Flame Spread Index	15	0	5
Smoke Developed Index	100	47	130

Tabel B 11: Fire Classification DIN EN 13501.

	NovaShield non-FR	NovaShield FR Plus	NovaShield FR Elite
Fire Behaviour	N/A	B	TBD
Smoke Production	N/A	S1	TBD
Flaming Droplets	N/A	D0	TBD

Noot. TBD: To Be Determined.

5. Durability:

Tabel B 12: QUV testing.

Specimen Code	FRU88X-6 4mil (Various Colour Combinations)			
	Schering		Inslag	
	Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation
Retained Tensile Strength (%) 1000 hours	97	4.0	98	3.7
Retained Tensile Strength (%) 4000 hours	100	6.6	102	5.4
Retained Trapezoidal Tear (%) 1000 hours	104	9.3	104	11.4
Retained Trapezoidal Tear (%) 4000 hours	109	9.0	112	10.8

6. Light Transmission/Translucency:

Tabel B 13: NovaShield FR Plus: Hemispherical Spectral Reflectance and Near-Normal/Hemispherical Spectral Transmittance as tested by ASTM E903.

	% Reflectance			% Transmittance		
	UV	VIS	NIR	UV	VIS	NIR
White/White	12.2	90.7	80.2	0.0	6.4	11.5
Sandstone/White	10.6	64.8	75.3	0.0	2.7	9.3

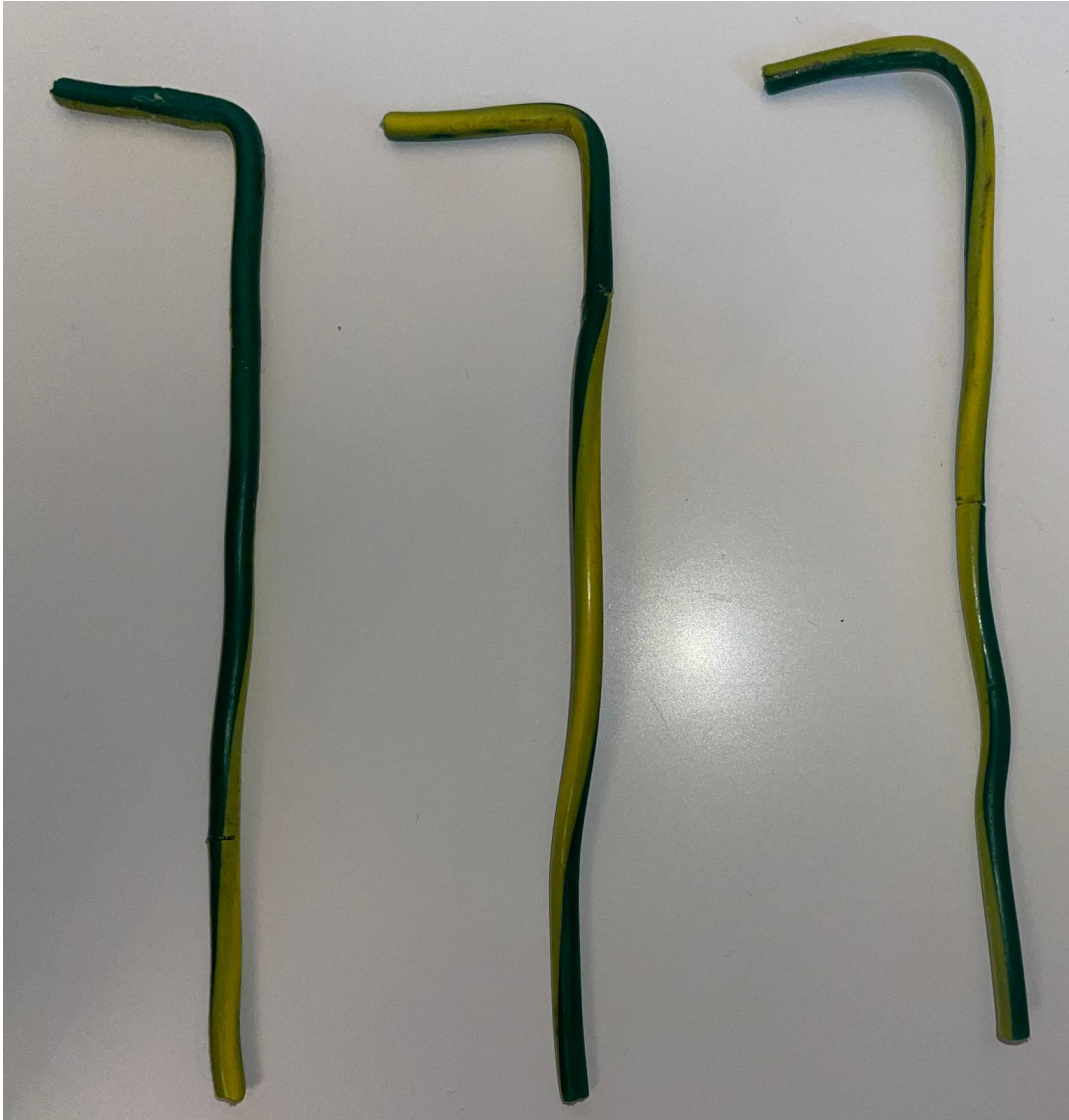
Tabel B 14: NovaShield non-FR: Hemispherical Spectral Reflectance and Near-Normal/Hemispherical Spectral Transmittance as tested by ASTM E903.

	% Reflectance			% Transmittance		
	UV	VIS	NIR	UV	VIS	NIR
Clear/Clear	18.2	35.0	31.2	26.0	61.8	61.8
White/White	11.0	86.4	74.5	0.0	10.7	16.4
Beige/White	10.2	62.2	66.6	0.0	8.2	18.7
Green/White	5.3	7.1	41.7	0.0	0.7	19.0
Blue/White	7.9	16.6	58.7	0.0	1.4	20.4

Appendix C: Materialen en aanzichten schaalmodel

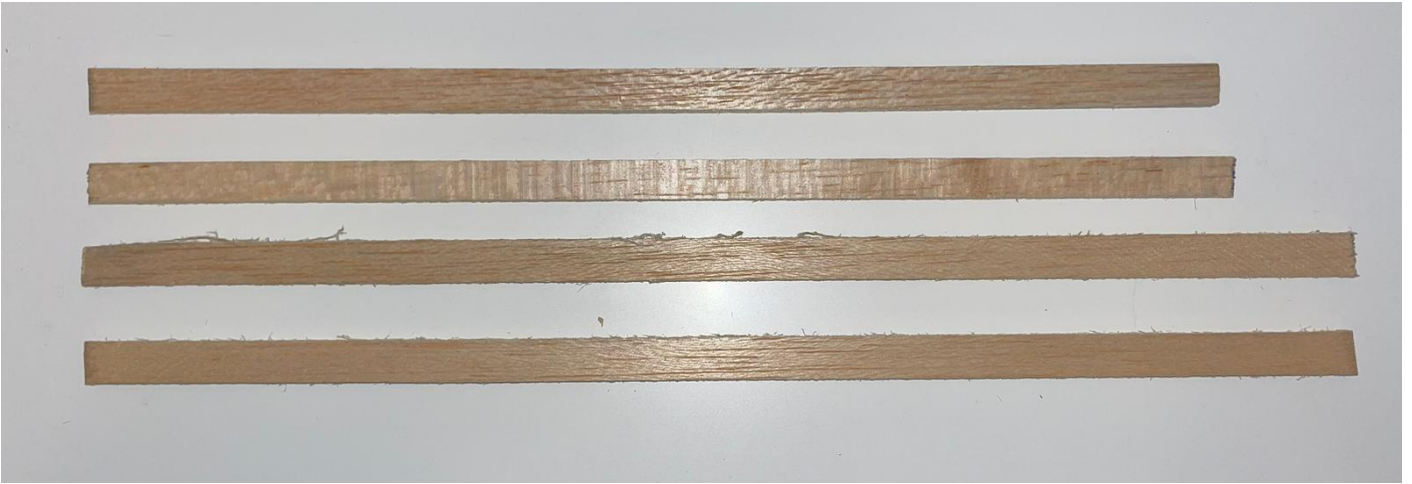
In deze Appendix zullen er foto's van de materialen worden weergegeven die zijn gebruikt voor het schaalmodel van The Roundhouse. Elk materiaal stelt een onderdeel van The Roundhouse voor om vervolgens inzicht te verkrijgen in het gedrag van verschillende stijfheden van doeken.

Buitenste kolommen en centrale middenkolom:

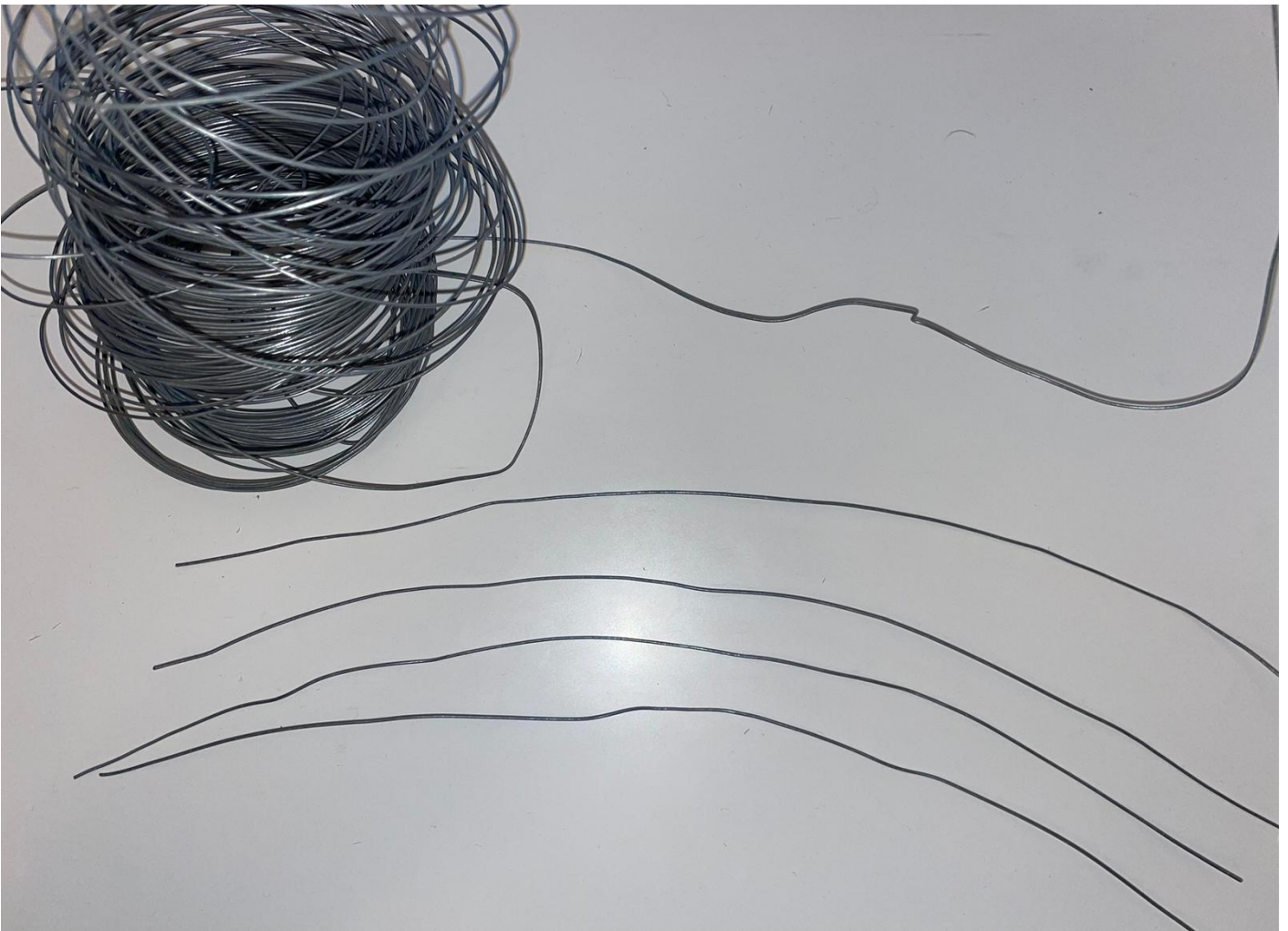


Figuur C 1: Koperdraad van 10 cm als buitenste kolommen.

Vakwerkspant:



Figuur C 2: Houten latjes als boven- en onderligger van het vakwerkspant.



Figuur C 3: Driehoeken tussen de houten latjes van het vakwerkspant.

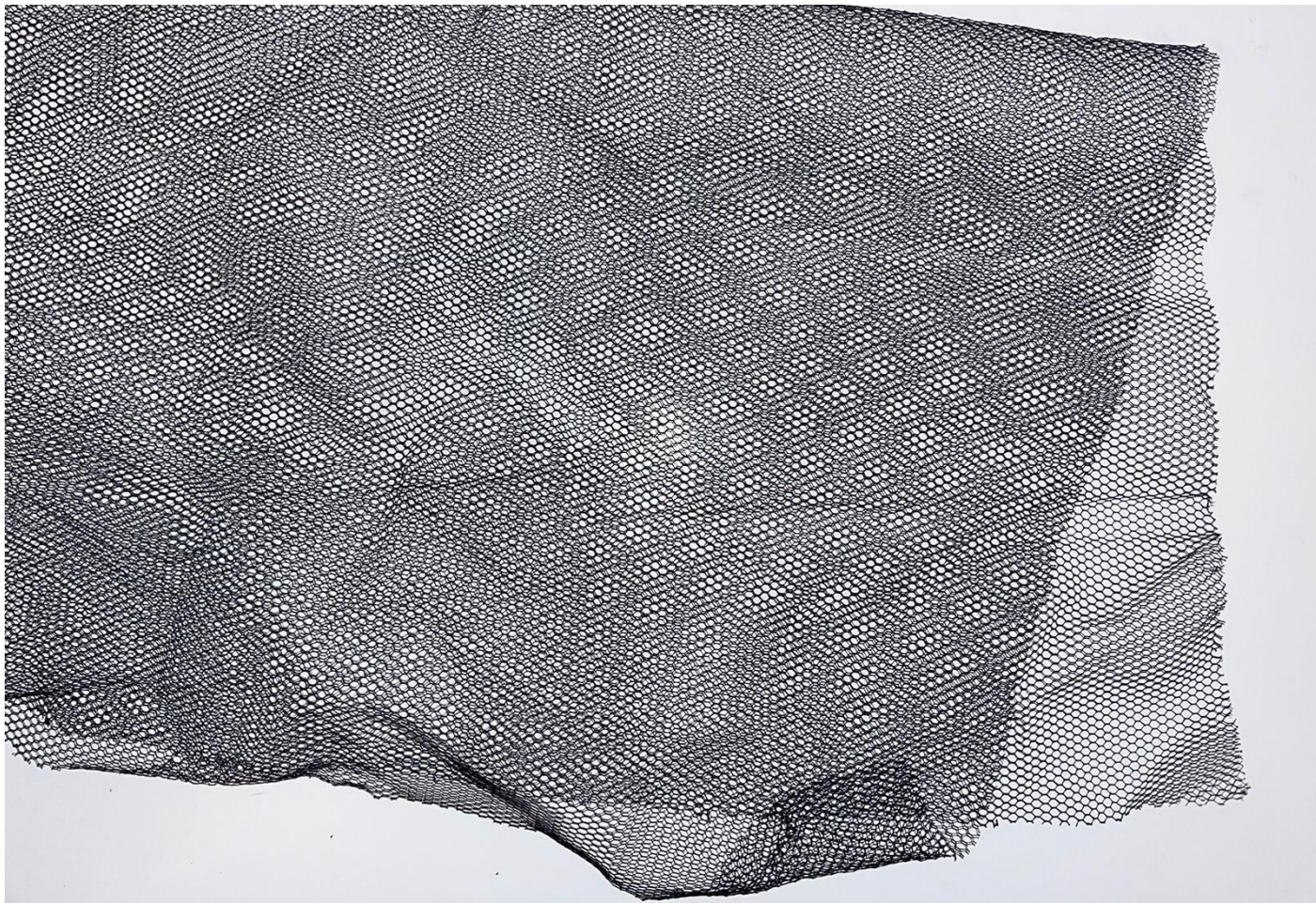
Doek:



Figuur C 4: Vloerfolio (plastic polymeer) als doek materiaal.



Figuur C 5: Panty (nylon en elastaan) als doek materiaal.



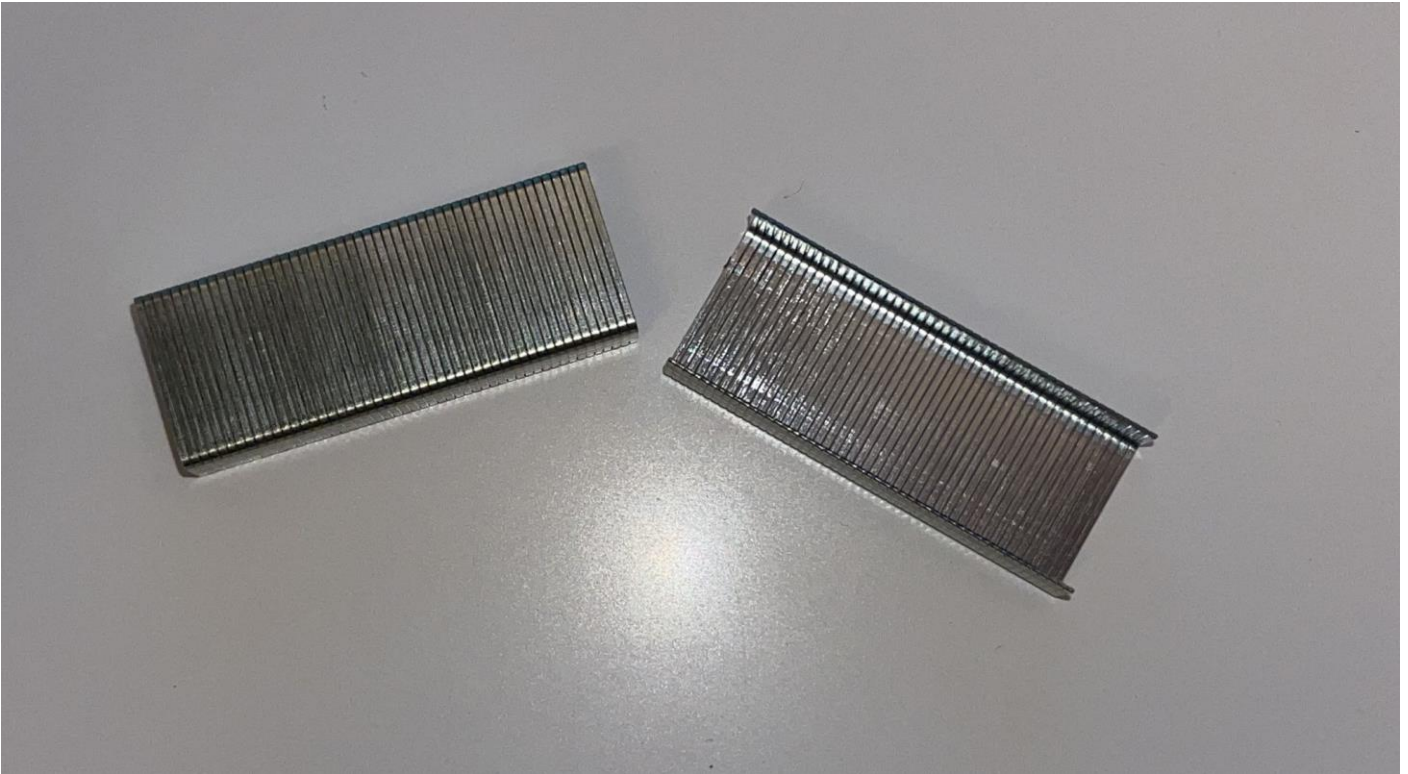
Figuur C 6: Kunststof gaas als doek materiaal.

Verbindingen tussen kolommen en vakwerkspant:



Figuur C 7: Samen met ijzerdraad zijn de spijkers verbindingen tussen de kolommen en het vakwerkspant.

Verbindingen tussen doek en vakwerkspant:



Figuur C 8: Nietjes als verbinding tussen het doek en het vakwerkspant.

Fundering:



Figuur C 9: Piepschuim plaat als fundering. Geraadpleegd van "Hornbach", gemaakt door Hornbach, 2020 (https://www.hornbach.nl/shop/Polystyreen-geexpandeerd-EPS-60-1000-x-500-x-20-mm-pak-van-12-isolatieplaten/4186691/artikel.html?wt_mc=nl.paid.sea.google.alwayson_lia.bau).

Aanzichten onderliggende constructie schaalmodel:



Figuur C 10: Onderaanzicht onderliggende constructie van het schaalmodel.



Figuur C 11: Zijaanzicht onderliggende constructie van het schaalmodel.

Aanzichten gehele constructie van het schaalmodel met twee type doeken:



Figuur C 12: Bovenaanzicht gehele schaalmodel met kunststof gaas.



Figuur C 13: Zijaanzicht gehele schaalmodel met kunststof gaas.



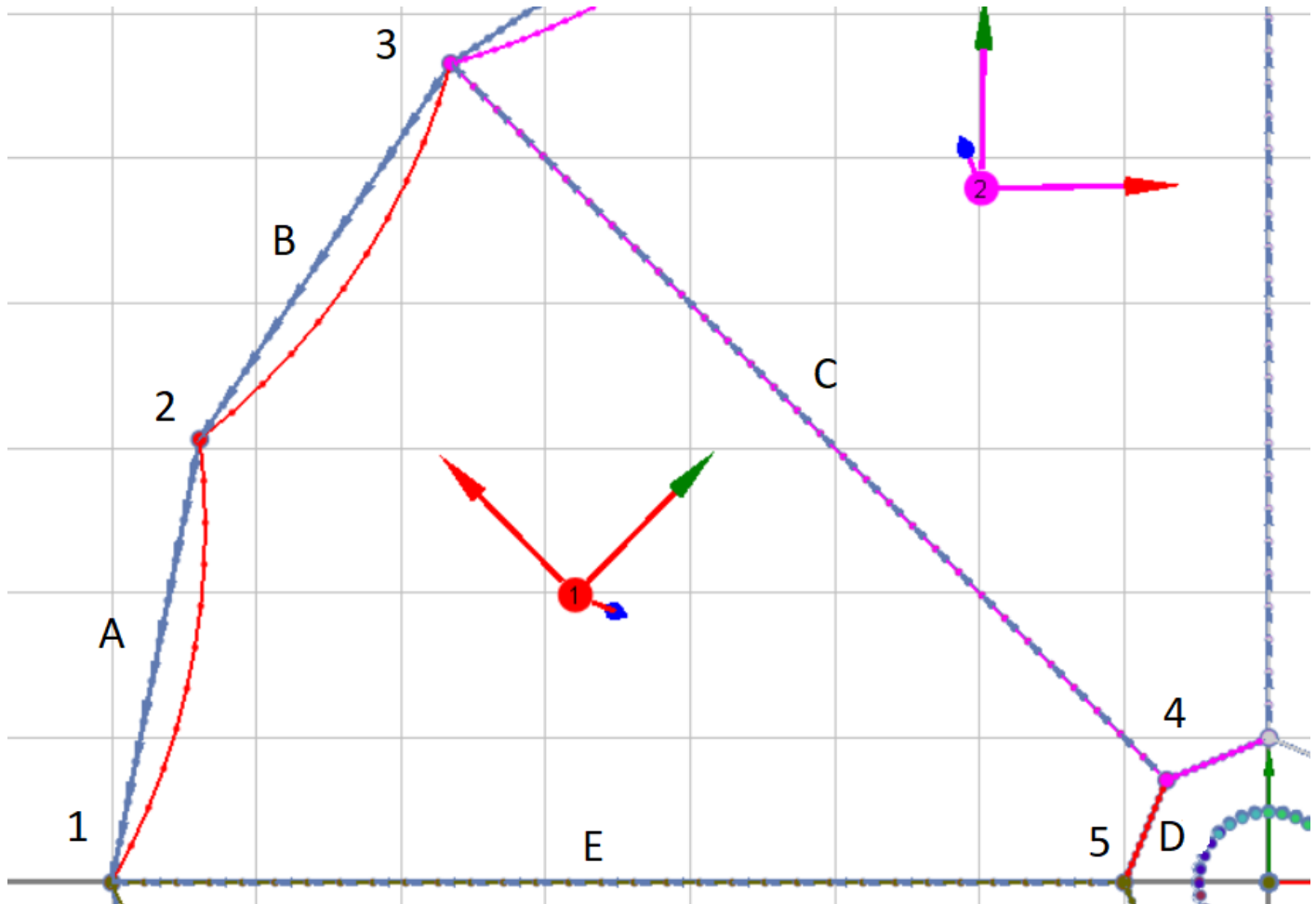
Figuur C 14: Bovenaanzicht gehele schaalmodel met vloerfolie.



Figuur C 15: Zijaanzicht gehele schaalmodel met vloerfolie.

Appendix D: Easy basisvormgeving invoerwaarden

In deze Appendix staan de relevante invoerwaarden voor de vorming van het model van The Roundhouse in dit rapport. Allereerst is er per deel een tabel weergegeven waarin coördinaten van punten zijn gegeven voor de 8 delen. Vervolgens zijn invoerwaarden gegeven voor de randen, de grensgegevens en middelpunten van deze delen. Een overzicht van de coördinaten zijn weergegeven in Tabel D.1. Een overzicht van alle randen, grensgegevens en middelpunten is weergegeven in Tabel D.2.



Figuur D. 1: Punten met cijfers en lijnen met letters in een los deel van het gehele model.

In Figuur D.1 zijn de punten in cijfers weergegeven en de lijnen met letters voor een gedeelte van het gehele model. Totaal bestaat het model uit acht van dit soort delen. De punten blijven hetzelfde als in dit geval, maar worden met de klok mee gedraaid bij het volgende gedeelte. Punt 3 in deel 1 wordt dus in deel 2 punt 1, enzovoort. De coördinaten van alle acht de delen staan in Tabel D.1. Het middelpunt van het model ligt op (0,0,0).

Tabel D. 1: Coördinaten punten van de acht delen van het model in Easy.

Punt	x-coördinaat	y-coördinaat	z-coördinaat
Deel 1			
1	-8	0	3
2	-7,3910	3,061467	3
3	-5,656850	5,656850	3
4	-0,707107	0,707107	5
5	-1	0	5
Deel 2			
1	-5,656850	5,656850	3
2	-3,061467	7,3910	3
3	0	8	3
4	0	1	5
5	-0,707107	0,707107	5
Deel 3			
1	0	8	3
2	3,061467	7,3910	3
3	5,656850	5,656850	3
4	0,707107	0,707107	5
5	0	1	5
Deel 4			
1	5,656850	5,656850	3
2	7,3910	3,061467	3
3	8	0	3
4	1	0	5
5	0,707107	0,707107	5
Deel 5			
1	8	0	3
2	7,3910	-3,061467	3
3	5,656850	-5,656850	3
4	0,707107	-0,707107	5
5	1	0	5
Deel 6			
1	5,656850	-5,656850	3
2	3,061467	-7,3910	3
3	0	-8	3
4	0	-1	5
5	0,707107	-0,707107	5
Deel 7			
1	0	-8	3
2	-3,061467	-7,3910	3
3	-5,656850	-5,656850	3
4	-0,707107	-0,707107	5
5	0	-1	5
Deel 8			
1	-5,656850	-5,656850	3
2	-7,3910	-3,061467	3
3	-8	0	3
4	-1	0	5
5	-0,707107	-0,707107	5



Figuur D. 2: Symbool "Select control lines".

Voor de lijnen is er in Easy gebruik gemaakt van de volgende gegevens, waarbij Figuur D.2 het symbool weergeeft dat wordt gebruikt om de controle lijnen te selecteren en de invoergegevens te wijzigen. De gebruikte gegevens voor de lijnen C, D en E zijn weergegeven in Figuur D.3a en de gegevens voor de lijnen A en B zijn weergegeven in Figuur D.3b.

Figuur D. 3: Control line settings van de control lines. Links van de lijnen C, D en E en rechts van de lijnen A en B.



Figuur D. 4: Symbool "Select boundary lines".

Vervolgens zijn voor alle grenslijnen de gegevens weergegeven in Figuur D.5, waarbij Figuur D.4 het symbool aangeeft om deze grenslijnen te selecteren zodat de gegevens gewijzigd kunnen worden. In Figuur D.5a zijn weer de gegevens weergegeven voor de grenslijnen C, D en E en in Figuur D.5b zijn de gegevens weergegeven voor de grenslijnen A en B, waarbij de "Sag in %" op 8% ingesteld moet worden.

Figuur D. 5: Boundary line settings met op links voor de lijnen C, D en E en op rechts voor de lijnen A en B.



Figuur D. 6: Symbool "Select boundary properties".



Figuur D. 7: Symbool "Select boundary centerpoint".

Daarna wordt met het symbool dat is weergegeven in Figuur D.6 de grenseigenschappen gewijzigd. Voor alle delen is dit hetzelfde zoals is weergegeven in Figuur D.7. Hierbij worden de grenzen gewijzigd naar radiaal in plaats van normaal. Tot slot worden de gegevens van het middelpunt van het deel gewijzigd door het symbool dat is weergegeven in Figuur D.7. De gegevens voor het model van The Roundhouse zijn weergegeven in Figuur D.9 en zijn voor alle acht de delen hetzelfde.

Figuur D. 8: Boundary centerpoint voor delen 1 t/m 8.

Figuur D. 9: Boundary properties voor delen 1 t/m 8.

Na deze stappen te doorlopen hebben is de basisvormgeving voltooid en kunnen de vervolgstappen zoals normaal doorlopen worden. Het model van The Roundhouse is dan compleet. Hierna kan eventueel doorgaan worden naar de statische analyse in Easy om het model te toetsen op spanningen en vervormingen.