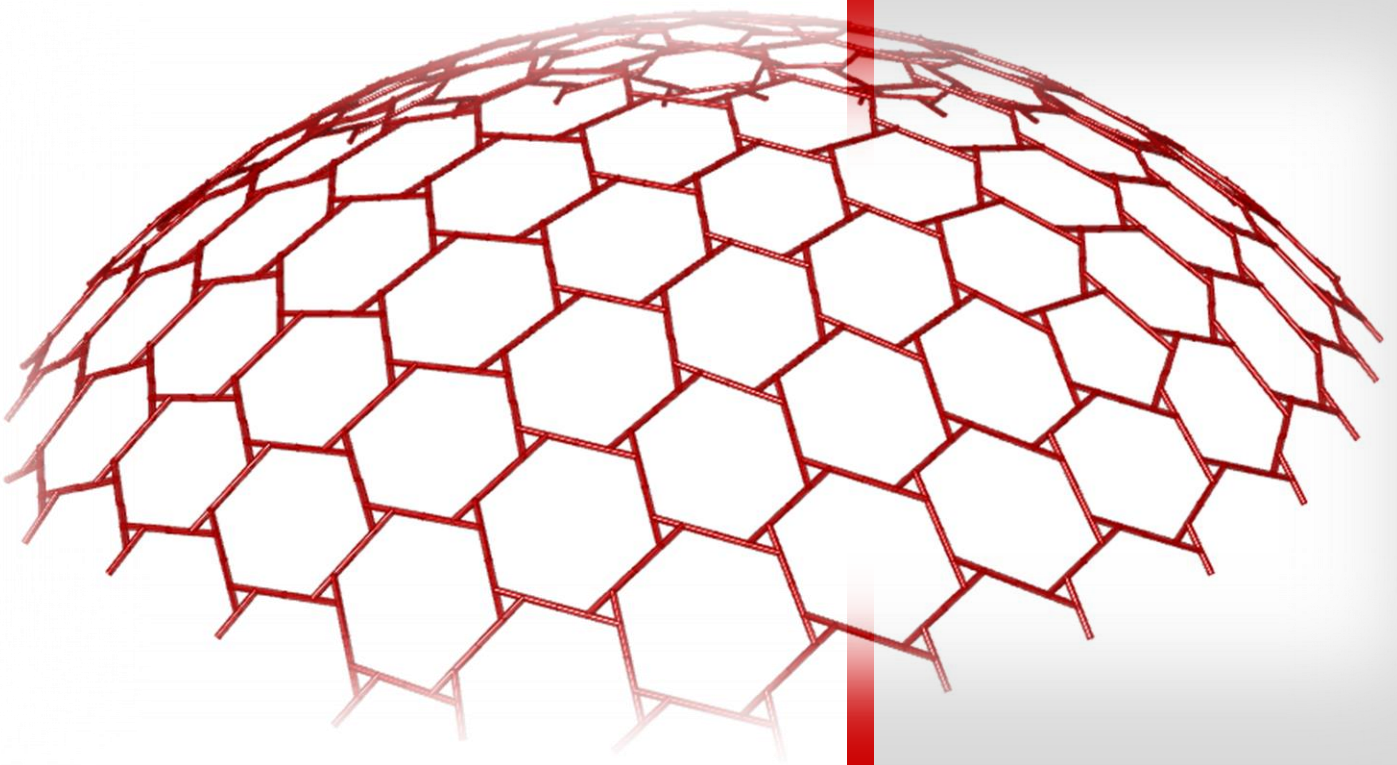


Koepelvormig reciprocal frame met behulp van resthout



Auteur: Hanco Bor

Koepelvormig reciprocal frame met behulp van resthout

~ Eindwerkstuk ~

Auteur:	Hanco Bor
Studentnummer:	4892968
Datum:	14-06-2021
Begeleiders:	Dr. Ir. H.R. Schipper Dr. Ir. P.C.J. Hoogenboom



Voorwoord

Dit bachelor eindwerkstuk is geschreven in opdracht voor de TU Delft. Het doel is om het inzicht in de werking van koepelvormige reciprocal frames te vergroten. Het gekozen onderwerp is een mooie afsluiting van de bachelor 'Civiele Techniek' en een goede opstap voor de master 'Building Engineering'.

Het rapport is bestemd voor studenten, engineers en andere belangstellenden die hun kennis op het gebied van reciprocal frames willen vergroten. Het rapport is een beschrijving van het gehele ontwerpproces. Theoretische informatie over reciprocal frames kan gevonden worden in hoofdstuk drie. Geïnteresseerden in de toegepaste vereenvoudiging en schematisering van het ontwerp kunnen terecht in hoofdstuk zeven. In hoofdstuk negen bevindt zich de toetsing van het ontworpen frame. In hoofdstuk veertien zullen discussiepunten, leerpunten en aanbevelingen voor vervolgonderzoek worden gegeven.

Ik wil dr. Ir. H.R. Schipper en dr. Ir. P.C.J. Hoogenboom bedanken voor de begeleiding van het bachelor eindwerkstuk. Tevens wil ik de Bethelkerk te Lelystad bedanken voor het verstrekken van bouwtekeningen van de kerk. Tot slot wil ik meneer T.S. Godthelp bedanken voor het verstrekken van het script 'The Reciprocal Frame Designer'.

Lelystad, Juni 2021
Hanco Bor

Samenvatting |

Duurzaamheid is een onderwerp wat steeds belangrijker wordt in de huidige maatschappij. De vereniging van bouw- en infrabedrijven, Bouwend Nederland, heeft als speerpunt om in 2050 volledig circulair te bouwen. Een vorm hiervan is het hergebruik van materialen. Iets waar nog veel kennis mist. In dit bachelor eindwerk wordt dan ook onderzocht of het mogelijk is om met behulp van resthout een koepelvormig reciprocal frame te bouwen. De onderzoeksvraag luidt als volgt:

“Wat is een constructief veilige, koepelvormige dakconstructie, bestaande uit een reciprocal frame, gegeven een gekozen locatie en een fictieve hoeveelheid resthout, overblijvend bij de sloop van een gebouw?”

Het onderzoek is uitgevoerd door middel van een fictief ontwerp. Op basis hiervan zijn lessen getrokken. Geen aandacht is besteed aan de kostenraming, fundering, bouwvoorbereiding en - onderhoud.

Een reciprocal frame betekent, letterlijk vertaald, een ‘wederkerig raamwerk’. Het frame is opgebouwd uit units, welke bestaan uit een minimum van drie lineaire balken die elkaar ondersteunen.

De locatie van de koepel is een sportpark, liggend aan de Elburglaan 53 in Eindhoven. Het resthout is fictief verkregen uit de Bethelkerk te Lelystad. Het hout bestaat uit een gordingen met een doorsnede van $b \times h = 75 \times 175$ [mm²]. Een overzicht van de beschikbare lengtes is weergegeven in tabel 1 in hoofdstuk 4. Op basis van NEN 8705 is het hout ingedeeld in een sterkteklasse C24.

De keuze van het patroon, toegepast in het reciprocal frame, is gemaakt op basis van de geometrie, de constructiekosten, de efficiency in resthoutgebruik en tot slot de esthetiek. Gekozen is voor een driehoekig patroon.

Met behulp van het voorlopige ontwerp zijn de belastingen bepaald, werkend op de constructie. Windbelasting en sneeuwbelasting zijn hierbij vereenvoudigd bepaald.

De software ‘Matrixframe’ is gebruikt voor de berekening van de krachten. Om het ontworpen model in Matrixframe in te voeren is een schematisering toegepast. Deze schematisering geeft realistische waarden voor momenten, maar minder realistische waardes voor doorbuiging.

Doordat het voorlopige ontwerp niet voldeed, is eenmalig een iteratie toegepast, waarbij het patroon verkleind is. Met dit nieuwe ontwerp zijn de toetsingen op sterkte, stijfheid en stabiliteit uitgevoerd. Concluderend is de toets op sterkte, specifiek de combinatie normaalkracht en buiging, maatgevend is voor het ontwerp.

Het definitieve ontwerp bestaat voor 224 van de 284 balken uit resthout van de Bethelkerk te Lelystad. Hiermee bestaat het ontwerp voor 79% uit hergebruikt hout. 97% van de beschikbare balken uit de kerk worden gebruikt. De verbindingen worden gerealiseerd door middel van M8 en M10 bouten.

Concluderend is gesteld dat het niet mogelijk is om het volledige ontwerp uit resthout te ontwikkelen. Wel bestaat het grootste gedeelte, 79% van de constructie, uit hergebruikt materiaal. Tevens is uit het ontwerp geleerd dat parametrisch ontwerpen goed werkt voor reciprocal frames. Rhino Grasshopper is hierbij een goede tool. Matrixframe is minder geschikt. Tot slot is geconcludeerd dat de krachtsafdracht hoofdzakelijk plaatsvindt door middel van normaalkracht en buiging.

Nader onderzoek dient gedaan te worden naar het krachtsverloop bij verstoring van het patroon. Tevens dient gekeken te worden naar verbindingen door middel van inkepingen. Tot slot dient het effect van de schematisering van de doorbuiging en belasting in kaart gebracht te worden.

Inhoud |

Voorwoord	2
Samenvatting	3
1. Inleiding	7
2. Probleemanalyse	8
2.1 Onderzoeksvraag.....	8
2.2 Deelvragen.....	8
2.3 Methode.....	8
2.4 Gekozen randvoorwaarden aan het ontwerp.....	9
3. Reciprocal frames	10
3.1 Wat is een reciprocal frame	10
3.2 De opbouw van een reciprocal frame	10
3.2.1 Definities.....	10
3.2.2 Verbinden van rods	11
3.2.3 Verbinden van units	11
3.2.4 Parameters	11
3.3 De krachtswerking van een reciprocal frame.....	11
3.4 Het ontwerpproces.....	12
3.5 Software	12
4. Programma van eisen	13
4.1 Omgevingsanalyse.....	13
4.1.1 Locatiekeuze.....	13
4.1.2 Afmetingen veld en omgeving.....	13
4.1.3 Hoogte toestellen	13
4.1.4 Bodemonster.....	14
4.1.5 Ontwerplevensduur en gevolgklasse	14
4.1.6 Ligging.....	14
4.2 Het resthout	15
4.2.1 Locatie	15
4.2.2 Afmetingen	15
4.2.3 Eigenschappen van het resthout.....	15
4.3 Programma van eisen	16
Randvoorwaarden	16
Eisen	16

Wensen.....	16
5. Varianten	17
5.1 Patronen	17
5.2 Afweging.....	18
5.3 Overzicht van de gekozen variant	19
6. Belastingen	20
6.1 Permanente belasting	20
6.1.1 Eigen gewicht	20
6.1.2 Dakbedekking.....	20
6.2 Variabele belasting.....	20
6.2.1 Sneeuwbelasting	20
6.2.2 Windbelasting.....	22
6.2.3 Opgelegde belasting.....	25
6.3 Overzicht belastingen.....	26
6.4 Belastingcombinaties	26
6.4.1 Toetsing in de uiterste grenstoestand (UGT)	26
6.4.2 Toetsing in de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT).....	26
7. Toegepaste vereenvoudiging	27
7.1 Wijze van schematisering.....	27
7.2 Rechtvaardiging.....	27
7.3 Geschematiseerde model.....	29
8. Aanpassing in ontwerp	30
8.1 Voorlopig ontwerp	30
8.2 Aanpassing ontwerp.....	30
8.3 Schematisering van het model.....	31
9. Toetsing definitieve variant	32
9.1 Belastingcombinaties	32
9.2 Toetsing op sterkte.....	32
9.2.1 Buiging.....	33
9.2.2 Dwarskracht.....	36
9.2.3 Normaalkracht.....	37
9.2.4 Combinatie normaalkracht en buiging.....	39
9.3 Stijfheid.....	42
9.4 Stabiliteit	44
9.4.1 Globale stabiliteit	44
9.4.2 Lokale stabiliteit	45

9.5 Conclusie	46
10. Verbindingen	47
10.1 Keuze voor verbinding.....	47
10.2 Dimensionering van de verbinding.....	47
10.3 Verbindingsdetail	50
10.4 Bevestiging glasplaten op de constructie.....	51
11. Definitief ontwerp	52
11.1 Ontwerp.....	52
11.2 Gebruikte hout	52
11.3 Programma van eisen.....	53
12. Bouw	54
13. Discussie en lessen	55
13.1 Discussie	55
13.2 Leerpunten	56
14. Conclusie en aanbeveling	57
14.1 Conclusie	57
14.2 Aanbevelingen.....	57
Literatuur	58
Bijlage 1: Mogelijke reciprocal units	60
Bijlage 2: Bouwtekeningen kerk	61
Bijlage 3: knopen (Voorlopig ontwerp)	63
Bijlage 4: Belastingbepaling (Voorlopig ontwerp)	64
Bijlage 5: Korte toets op buiging (Voorlopig ontwerp)	66
Bijlage 6: Krachten en momenten (Voorlopig ontwerp)	68
Bijlage 7: Overzicht knooppunten (Definitieve ontwerp)	78
Bijlage 8: Krachten en momenten (Definitief ontwerp)	80
Bijlage 9: Definitief ontwerp	94

1. Inleiding

Duurzaamheid, een onderwerp wat niet meer weg te denken is uit de huidige maatschappij. Na jaren bouwen, met nauwelijks besef van duurzaamheid, vindt er nu een verandering plaats. Steeds hoger worden de eisen wat betreft het verantwoord bouwen. Veel onderzoek wordt hier dan ook naar gedaan. Kijkend naar de vereniging van bouw- en infrabedrijven, Bouwend Nederland, is één van de speerpunten een volledig circulaire economie in 2050 (Bouwend Nederland, 2020). Een vorm van de circulaire economie is het hergebruik van materialen.

Het hergebruik van materialen brengt een aantal complicaties met zich mee. Er wordt namelijk gebruik gemaakt van bestaande materialen wat betekent dat de kwantiteit en kwaliteit vast staan. Eigenschappen die normaalgesproken een ontwerper zelf bepaalt. Noodzakelijk is het dan ook, dat er meer kennis komt wat betreft het ontwerpen van constructies door middel van resthout.

In dit bachelor eindwerk zal onderzoek gedaan worden naar hergebruik van restmateriaal bij koepelvormige overkappingen. Het grote voordeel van reciprocal frames is het gebruik van korte, rechte balken, waarmee complexe, driedimensionale vormen ontworpen kunnen worden (Larsen, 2014). Dit lijkt dan ook een ideaal constructietype, wanneer gebruik gemaakt wordt van resthout. De onderzoeksvraag luidt: *“Wat is een constructief veilige, koepelvormige dakconstructie, bestaande uit een reciprocal frame, gegeven een gekozen locatie en een fictieve hoeveelheid resthout, overblijvend bij de sloop van een gebouw?”*

Het onderzoek zal plaatsvinden door middel van een fictief ontwerp. Op basis hiervan zullen lessen getrokken worden. Het onderzoek beperkt zich tot koepelvormige reciprocal frames. Geen aandacht zal besteed worden aan de kostenraming, fundering, bouwvoorbereiding en -onderhoud.

De opbouw van het rapport is als volgt. In hoofdstuk twee zal een probleemanalyse plaatsvinden en zal de methode voor het onderzoek beschreven worden. In hoofdstuk drie zal een literatuurstudie over reciprocal frames plaatsvinden. Dit vormt de basis voor de studie van koepelvormige reciprocal frames. Vervolgens zal in hoofdstuk vier het programma van eisen worden opgesteld. Dit maakt de ontwerpopdracht duidelijk. Hierna zullen in hoofdstuk vijf meerdere ontwerpvarianten tegen elkaar worden afgewogen om uiteindelijk een definitieve variant te kiezen. Om de variant verder uit te werken, zullen in hoofdstuk zes de belastingen bepaald worden. In hoofdstuk zeven zal een vereenvoudiging van het ontwerp worden gerechtvaardigd en toegepast. In hoofdstuk acht wordt een aanpassing in het ontwerp besproken om uiteindelijk in hoofdstuk negen de definitieve variant te toetsen. Vervolgens zal in hoofdstuk tien op de verbindingen worden ingegaan. In hoofdstuk elf zal het definitieve ontwerp getoond worden. Vanwege de bijzondere constructie zal in hoofdstuk twaalf kort op de bouw van het ontwerp worden ingegaan. Hoofdstuk dertien zal discussiepunten uit het rapport weergeven en gaat in op de getrokken lessen. In hoofdstuk veertien wordt tot slot de onderzoeksvraag beantwoord en zullen aanbevelingen gedaan worden.

2. Probleemanalyse |

In dit hoofdstuk wordt de onderzoeksvraag getoond en onderverdeeld in deelvragen. Tevens wordt de methode uitgelegd en worden randvoorwaarden aan het ontwerp opgelegd.

2.1 Onderzoeksvraag

De onderzoeksvraag voor het Bachelor eindwerk luidt als volgt:

“Wat is een constructief veilige, koepelvormige dakconstructie, bestaande uit een reciprocal frame, gegeven een gekozen locatie en een fictieve hoeveelheid resthout, overblijvend bij de sloop van een gebouw?”

2.2 Deelvragen

Kijkend naar de onderzoeksvraag zijn er drie aspecten die extra deelvragen nodig hebben om tot het eindresultaat te komen. Dit zijn de aspecten: ‘constructief veilige dakconstructie’ (ontwerp), ‘reciprocal frame’ en ‘gekozen locatie en een fictieve hoeveelheid resthout’ (randvoorwaarden).

Reciprocal frames

Wat zijn reciprocal frames?

Hoe zijn de units van een reciprocal frame opgebouwd?

Hoe werkt de krachtsafdracht in een reciprocal frame?

Hoe zit het ontwerpproces in elkaar?

Welk ontwerp-/tekenprogramma kan gebruikt worden bij het ontwerp?

Randvoorwaarden

Waar is de gekozen locatie?

Wat zijn de eigenschappen van het resthout?

Ontwerp

Wat zijn de belastingen, waar de constructie mee te maken krijgt?

Wat zijn mogelijke type reciprocal frames die kunnen worden toegepast?

Wanneer voldoet de constructie aan sterkte, stijfheid en stabiliteit volgens de Eurocode?

Hoe en welk type verbinding wordt bij de definitieve variant gerealiseerd?

2.3 Methode

Om een antwoord te vinden op de onderzoeksvraag zal gebruik worden gemaakt van een ontwerp. Het eindwerk is dus ontwerpgericht en minder theoretisch van aard. Aan de hand van het gehele ontwerpproces zullen lessen worden getrokken. Moeilijkheden zullen gedocumenteerd worden om zo aan het eind een goed antwoord op de onderzoeksvraag te kunnen geven.

Allereerst zal een literatuurstudie worden gedaan naar reciprocal frames. Dit zal de theoretische basis vormen voor de studie.

Vervolgens zullen de randvoorwaardes voor het ontwerp worden bepaald aan de hand van een omgevingsanalyse en een analyse van het resthout. Dit vormt de basis voor het programma van eisen.

Op basis van dit programma met eisen zal een ontwerp gemaakt worden. Uit het ontwerp(proces) zullen lessen getrokken worden over koepelvormige reciprocal frames.

Concluderend wordt dus aan de hand van een concreet ontwerp, de kennis over koepelvormige reciprocal frames vergroot.

2.4 Gekozen randvoorwaarden aan het ontwerp

Er zijn een vijftal beperkingen, vooraf opgelegd aan het ontwerp.

1. Er zal niet gekeken worden naar de kostenraming van het ontwerp.
2. Bij deze constructie wordt uitsluitend uitgegaan van materiaal, verkregen uit resthout. Verbindingen zullen wel gerealiseerd worden met metaal.
3. Er wordt vooraf bepaald dat het een koepelvormige constructie is. Dit om inzicht in ontwerpen van reciprocal frames te vergroten.
4. De fundering wordt niet meegenomen in het ontwerp. Dit omdat dit algemener is en minder gespecificeerd is op reciprocal frames.
5. De gehele fase van bouwvoorbereidingen en -onderhoud wordt niet uitgewerkt.

3. Reciprocal frames |

In dit hoofdstuk wordt algemene informatie over een reciprocal frame weergegeven. Deze informatie is verkregen door middel van een literatuurstudie.

3.1 Wat is een reciprocal frame

Als het woord 'reciprocal frame' letterlijk van het Engels naar het Nederlands vertaald wordt, betekent het 'wederkerig raamwerk' of 'wederkerige lijst'. Dit heeft iets in zich van een patroon wat zich voortdurend herhaalt. Dit is dan ook wat een reciprocal frame inhoudt.

Een reciprocal frame is opgebouwd uit verschillende lineaire elementen, die elkaar ondersteunen. Samen vormen ze een gesloten kring, wat een unit wordt genoemd (Larsen, 2014). Een aantal van deze units samen vormt het reciprocal frame.

Een reciprocal frame is dus een heel netwerk van lineaire balken. Het grote voordeel van een reciprocal frame is dat er grote overspanningen gerealiseerd kunnen worden, zonder dat er interne kolommen nodig zijn (Asefi & Bahremandi-Tolou, 2019). De 'reciprocal frames' behoren daarom ook tot de 'space structures', een groep constructies die het probeert om een maximaal intern volume te realiseren bij een gegeven samenstelling van materiaal, aldus Asefi en Bahremandi-Tolou (2019).

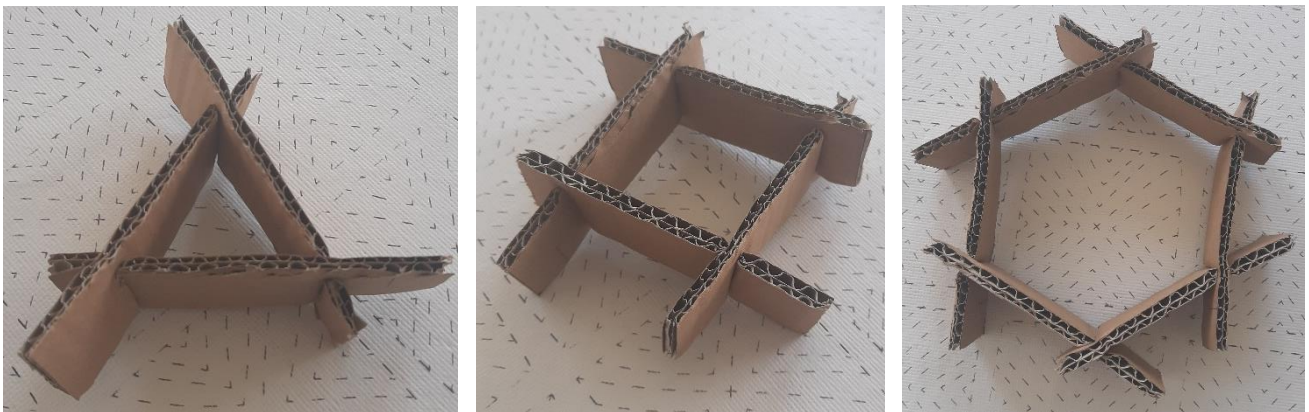
3.2 De opbouw van een reciprocal frame

In deze deelparagraaf wordt de opbouw van een reciprocal frame nader uitgewerkt.

3.2.1 Definities

Een reciprocal frame is opgebouwd uit losse lineaire balken, ook wel 'rods' genoemd (Cohen-or et al., 2013). Met een minimum van drie rods kan een unit gevormd worden. Een unit is een gesloten patroon, wat zich voortdurend herhaalt in het totale frame. Dit beschrijven ook Kohlhammer en Kotnik, als ze schrijven: "A reciprocal frame structure is decomposable into basic elements which circumscribe a polygon with at least three sides whereby the figure may be either regular or irregular" (Kohlhammer & Kotnik, 2011). Het totaal van alle units wordt een reciprocal frame genoemd.

Om gevoel te krijgen hoe deze constructies in elkaar zitten en hoe ze werken, zijn een aantal modelletjes gemaakt. Deze zijn in figuur 1 weergegeven. Dit zijn dus units die toegepast kunnen worden in een reciprocal frame. Te zien is dat iedere rod steunt en leunt op een andere rod, wat het principe van wederkerige ondersteuning illustreert.



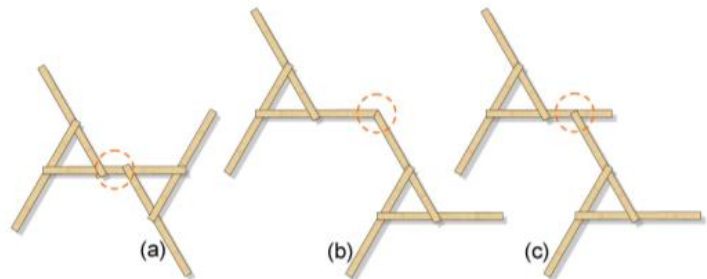
Figuur 1: Gemaakte schaalmodellen

3.2.2 Verbinden van rods

In figuur 1 zijn de rods verbonden door middel van inkepingen. Het grote voordeel hiervan, is dat bij grote balkdiktes de unitdikte beperkt blijft. Naast het verbinden door middel van inkepingen is het ook mogelijk om de verschillende units of rods te verbinden door middel van nagelen, samenbinden of wrijving (Cohen-or et al., 2013).

3.2.3 Verbinden van units

Er zijn drie mogelijke verbindingen mogelijk tussen verschillende rots. Het is allereerst mogelijk dat de units een gezamenlijke rod delen (figuur 2a). Daarnaast is het mogelijk om een 'endpoint-to-endpoint contact' (figuur 2b) te maken of een 'T-join contact' (figuur 2c) (Cohen-or et al., 2013).

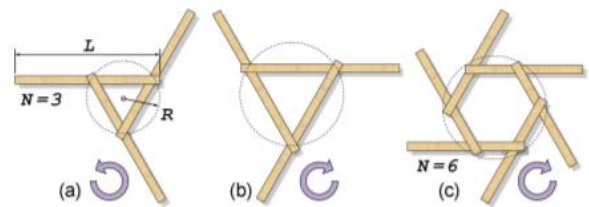


Figuur 2: Verbindingen van units (Cohen-or et al., 2013, p.4)

3.2.4 Parameters

Vanzelfsprekend zijn er vele patronen mogelijk. Daarom is in bijlage 1 een overzicht gegeven van vele patronen, om zo meer inzicht te verschaffen in de verschillende mogelijkheden.

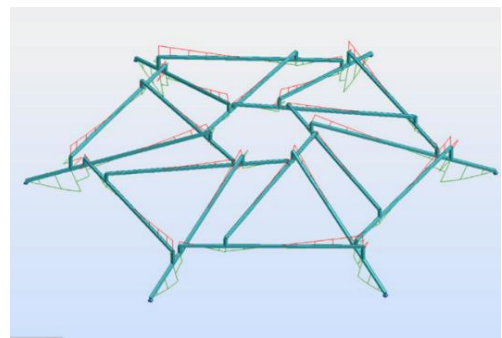
Bij de creatie van een unit spelen een aantal parameters een rol. Dit zijn het aantal rods waaruit de unit bestaat (N), de dikte van de rod, de straal van de binnenste cirkel (R), de lengte van de rods (L), de verticale stijging van de constructie en de wijze waarop de rods geroteerd zijn (met de klok mee, of juist ertegen in) (Cohen-or et al., 2013). De parameters zijn weergegeven in figuur 3.



Figuur 3: Parameters units (Cohen-or et al., 2013, p.3)

3.3 De krachtswerking van een reciprocal frame

Bij hellende frames vindt krachtsafdracht voornamelijk plaats door middel van axiale kracht en buiging. Bij meer horizontale frames vindt de krachtsafdracht hoofdzakelijk plaats via buiging. Op de plaatsen waar de balken op elkaar liggen, vindt krachtsoverdracht hoofdzakelijk plaats door middel van dwarskracht (Larsen, 2014). In figuur 4 is een voorbeeld weergegeven hoe de momenten- en dwarskrachtenlijn loopt, gegeven die dakconstructie. Hierbij is in groen de momentenlijn weergegeven en in rood de dwarskrachtenlijn. Duidelijk valt op dat ter plaatse van de knopen, sprongen in de dwarskrachtenlijn zijn, wat aangeeft dat ter plaatse van de knopen krachtsoverdracht voornamelijk plaatsvindt door middel van dwarskracht.

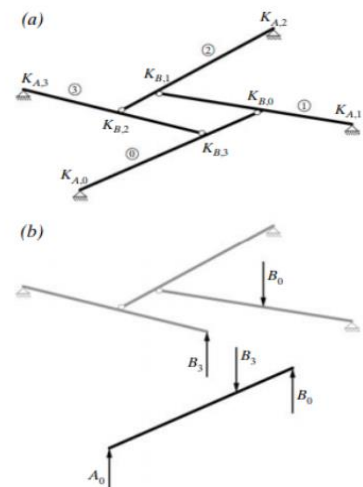


Figuur 4: Krachtswerking RF (Larsen, 2014, p.131)

3.3.1 Schematisering

Als er geen helling is, oftewel als het een horizontaal frame is, dan kunnen de individuele balken beschouwd worden als statisch bepaald (Kohlhammer & Kotnik, 2011).

Elke losse balk draagt een kracht, veroorzaakt door een balk die erop ligt. De balk zelf ligt vervolgens ook weer met haar uiteinden op andere balken, waar ook weer een kracht overgedragen wordt (Kohlhammer & Kotnik, 2011). Dit is weergegeven in figuur 5.



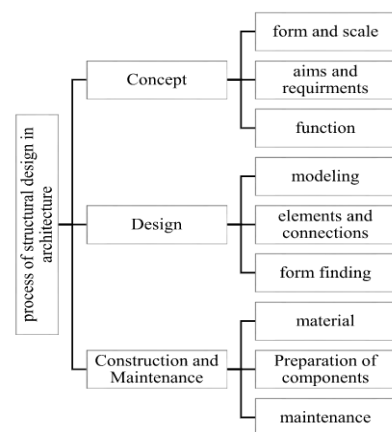
Figuur 5: Schematisering
(Kohlhammer & Kotnik, 2011, p.83)

3.4 Het ontwerpproces

Het ontwerpproces kan opgedeeld worden in drie stadia: concept uitwerking, het ontwerp en tot slot de bouw- en onderhoudsfase (Asefi & Bahremandi-Tolou, 2019). Dit is weergegeven in figuur 6. Dit alles is vergelijkbaar met een standaard ontwerpproces. Wat anders is bij het ontwerp van 'space structures', de groep zoals beschreven in paragraaf 3.1, is dat het ontwerp in een vroeg stadia al een exacte definitie van vorm, grid, structuurelementen en de locaties van de ondersteuning nodig heeft (Asefi & Bahremandi-Tolou, 2019).

Doordat het ontwerp van een reciprocal frame erg afhankelijk is van vele parameters die de geometrie van het ontwerp bepalen, is het proces een iteratief proces (Asefi & Bahremandi-Tolou, 2019).

De laatste fase van het ontwerpproces, constructie en onderhoud, zal in deze studie niet worden uitgewerkt.



Figuur 6: Ontwerpproces
(Asefi & Bahremandi-Tolou, 2019, p.2)

3.5 Software

Bij het ontwerpproces zal gebruik worden gemaakt van de software 'Rhino Grasshopper'. Dit op aanbeveling van meneer Schipper. Het voordeel van Rhino-GH is dat de coördinaten van de knopen bepaald kunnen worden. Daarnaast is het mogelijk om verbindingen als inkepingen te visualiseren.

Bij de toetsing zal gebruik worden gemaakt van Matrixframe. Hierbij zal dan de informatie over de ligging van de knopen bepaald worden uit Rhino-GH.

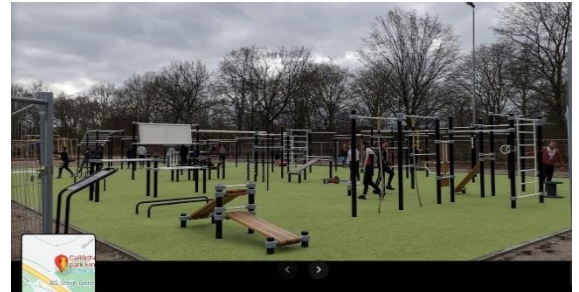
4. Programma van eisen

In dit hoofdstuk wordt het programma van eisen opgesteld aan de hand van een omgevingsanalyse, een analyse van het resthout en de wensen van de 'klanten'.

4.1 Omgevingsanalyse

4.1.1 Locatiekeuze

Gekozen is om een overkapping te bouwen bij een buitensportpark in Eindhoven. Gedurende de huidige corona-periode is de behoefte voor buitensportparkjes gegroeid. Kijkend naar het weer in Nederland is er regelmatig neerslag. Daarom het initiatief om de overkapping te realiseren voor het sportpark in Eindhoven, liggend aan de Elburglaan. Een afbeelding van het sportpark is weergegeven in figuur 7.



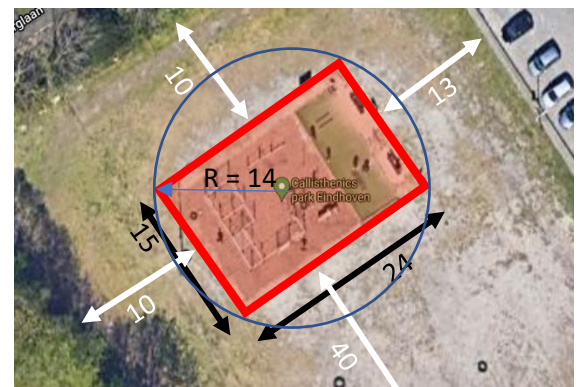
Figuur 7: Locatie: Elburglaan 53, Eindhoven (Keyner, D., 2021)

4.1.2 Afmetingen veld en omgeving

Met behulp van Google Maps zijn de afmetingen van het veld bepaald. Deze zijn weergegeven in figuur 8. In het figuur is gearceerd welk gebied is meegenomen voor de bepaling van de afmetingen van het sportveld.

Concluderend kan gezegd worden dat het veld een afmeting heeft van 15 x 24 meter.

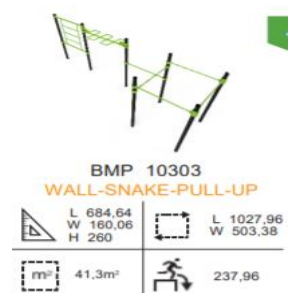
Het park is geplaatst op een groot grasveld, omgeven door bomen. In de figuur 8 is per zijde aangegeven hoeveel ruimte er beschikbaar is, waar eventueel de constructie geplaatst kan worden.



Figuur 8: Afmetingen veld in meter [m] (Google Maps, 2021)

4.1.3 Hoogte toestellen

De hoogte van het hoogste toestel is geschat op basis van figuur 7. Gekeken is in de catalogus van BarManiaPro, een leverancier voor Calisthenics toestellen, om te kijken wat de hoogte is van dit soort toestellen. Een voorbeeld van een vergelijkbaar toestel wat in het park staat, is weergegeven in figuur 9. Op basis daarvan blijkt dat de hoogte 2 meter 60 is. Aangezien de sporters met hun hoofd boven de stang uitkomen, zal een minimale eis van 3 meter aangehouden moeten worden. Voor het comfort zou het beter zijn als de overkapping wel iets hoger is dan de aangenomen 3 meter. Er zal daarom bij het ontwerp gerekend worden met 3.50 meter hoogte in het centrum van de constructie. Voor de minimale hoogte aan de randen kan 3 meter aangehouden worden. Daar staan nog geen toestellen.

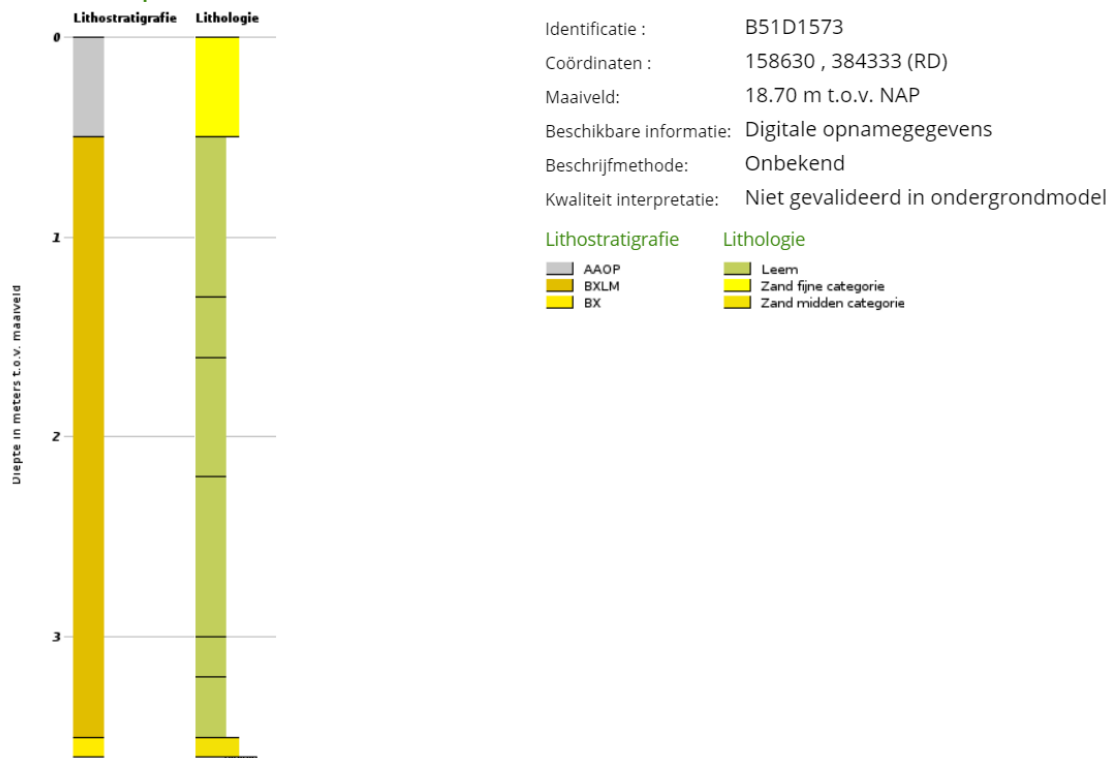


Figuur 9: Hoogte toestellen (BarManiaPro, 2020)

4.1.4 Bodemonster

Met behulp van het DINOloket is een bodemprofiel verkregen. Deze is weergegeven in figuur 10. Hieruit blijkt dat de toplaag fijn zand is (0.5 meter). Daaronder ligt een laag leem (2 meter). Onder de laag leem ligt dan een zandgrond. Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat een fundering op staal mogelijk is.

Boormonsterprofiel



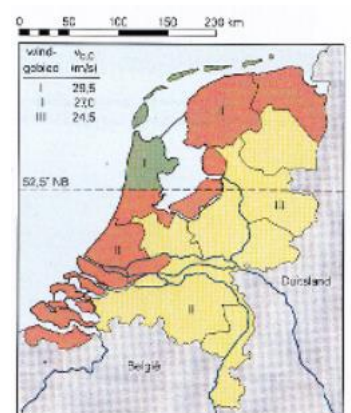
Figuur 10: Bodemprofiel (DINOloket, 2021)

4.1.5 Ontwerplevensduur en gevolgklasse

Het ontwerp is geen gebouw, maar ook geen tijdelijke constructie. Dit leidt ertoe dat deze wordt ingedeeld in de ontwerplevensduurklasse 2, wat inhoudt dat de ontwerplevensduur 25 jaar is (Fennis et al., 2013). Het ontwerp zal worden ingedeeld in de CC2 klasse. De economische of gevolgen zijn verwaarloosbaar. Echter kan het wel gezien worden als een publiekelijke ruimte, waardoor het toch in CC2 ingedeeld wordt (Fennis et al., 2013). Het gevolg van de CC2 klasse is dat alle factoren met 1 vermenigvuldigd worden. Voor de permanente belasting betekent dit dus een factor van 1.2 ($1 * 1.2$) en voor de variabele belasting een factor van 1.5 ($1 * 1.5$).

4.1.6 Ligging

De locatie kan ingedeeld worden in windgebied 3, aldus figuur 11. Tevens is het een bebouwd gebied.



Figuur 11: Windgebieden (Fennis et al., 2013, p.21)

4.2 Het resthout

Om het ontwerp te maken is ook resthout nodig. In deze deelparagraaf zal de locatie, waar het fictieve resthout vandaan gehaald wordt, bepaald worden. Tevens wordt de hoeveelheid en de kwaliteit ervan bepaald.

4.2.1 Locatie

Het fictieve resthout zal gehaald worden uit de dakconstructie van de Bethelkerk in Lelystad. De keuze hiervoor is, omdat de auteur in deze kerk zit en wist dat in de dakconstructie een hoop hout zich bevindt. Naast hout in de dakconstructie bevindt zich in de rest van het gebouw nauwelijks hout.

4.2.2 Afmetingen

Om de hoeveelheid hout in de dakconstructie te bepalen wordt gebruik gemaakt van de bouwtekeningen, weergegeven in bijlage 2. Te zien is dat de

dakconstructie met name bestaat uit gordingen, welke een afmeting hebben van $b \times h = 7.5 \times 17.5 \text{ [cm}^2\text{]}$. Het dak is afgewerkt met behulp van schrootjes. Deze schrootjes hebben de functie als aftimmerhout en zullen dan ook niet gebruikt kunnen worden in de nieuw te bouwen constructie. In tabel 1 is een overzicht gegeven van alle verschillende lengtes gordingen die zich in de constructie bevinden.

Afmeting [mm]	Aantal
75*175*3000	48
75*175*4000	30
75*175*5000	22
75*175*6000	59
75*175*6400	6

Tabel 1: Afmetingen aanwezig hout

4.2.3 Eigenschappen van het resthout

Een visuele kwaliteitscontrole is niet mogelijk, aangezien het dak niet toegankelijk is. Wel is bekend dat de Bethelkerk in 1976 in gebruik is genomen (Reliwiki, 2017). Aangezien het hout waarschijnlijk niet langdurig is blootgesteld aan vocht, mag voor dit ontwerp aangenomen worden dat de kwaliteit van het resthout nog in goede staat verkeert. Met zekerheid is dit niet te zeggen, maar omdat dit een fictief ontwerp is, wordt hiervan uitgegaan. In een niet-fictief geval kan de het resthout fysiek bekeken worden en worden ingedeeld in een kwaliteitsklasse, zoals beschreven in NEN 5499. Deze kwaliteitsklasse bepaalt de sterkteklasse waarin het naaldhout mag worden ingedeeld.

Aangezien het hout uit de dakconstructie gemaakt is van Europees naaldhout, mag op basis van NEN 8705 gesteld worden dat de sterkteklasse van het materiaal C24 is (Scharringa, 2021). Dit omdat het hout wordt toegepast als zijnde constructiehout. In tabel 2 zijn de eigenschappen weergegeven.

MATERIAALEIGENSCHAP	AFKORTING	GROOTTE	EENHEID
BENDING	$f_{m;k}$	24	N/mm^2
TENSION //	$f_{t;0;k}$	14	N/mm^2
TENSION $\perp$	$f_{t;90;k}$	0,4	N/mm^2
COMPRESSION //	$f_{c;0;k}$	21	N/mm^2
COMPRESSION $\perp$	$f_{c;90;k}$	2,5	N/mm^2
SHEAR	$f_{v;k}$	4,0	N/mm^2
MEAN MOE //	$E_{0;\text{mean}}$	11000	N/mm^2
5% MOE //	$E_{0,05}$	7400	N/mm^2
MEAN MOE $\perp$	$E_{90;\text{mean}}$	370	N/mm^2
MEAN SHEAR MODULUS	G_{mean}	690	N/mm^2
5% SHEAR MODULUS	$G_{0,05}$	460	N/mm^2

Tabel 2: Eigenschappen resthout (Soons et al., 2014)

4.3 Programma van eisen

Randvoorwaarden

- Het ontwerp dient een koepel te zijn.
- Het ontwerp dient in het centrum een minimale hoogte van 3.50 meter te hebben. Aan de randen is dit 3 meter.
- De koepel heeft een minimale straal van 14 meter.
- Het gebouw dient gebouwd te worden met het fictieve resthout van de Bethelkerk in Lelystad.
- De constructie is een reciprocal frame.

Eisen

- Het ontwerp heeft een minimale levensduur van 25 jaar.
- Het ontwerp dient bestand te zijn voor gevolgklasse CC2.
- Het ontwerp dient veilig te zijn.
- Het ontwerp dient waterdicht te zijn.
- De constructie dient bestand te zijn tegen de optredende belastingen in de winter: storm en sneeuw.

Wensen

- Het ontwerp ziet er esthetisch mooi uit.

5. Varianten

In dit hoofdstuk zullen drie verschillende patronen tegen elkaar afgewogen worden en zal een beslissing gemaakt worden voor het definitieve patroon. De patronen zijn geïnspireerd door bijlage 1. Afweging van de verschillende patronen zal plaatsvinden op basis van eenvoud van de geometrie, de constructiekosten, de efficiency in resthoutgebruik en tot slot de esthetiek.

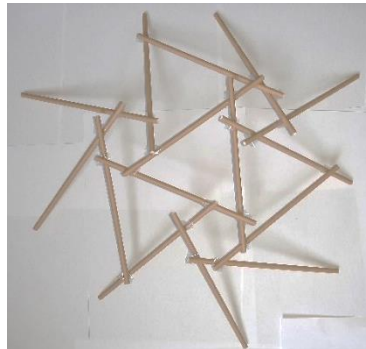
5.1 Patronen

In de onderstaande deelparagraaf zullen de verschillende patronen gewogen worden.

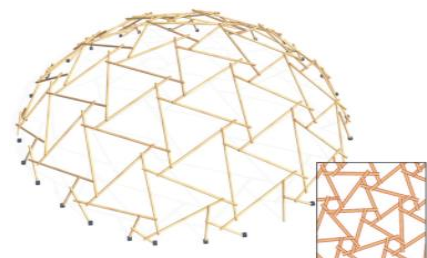
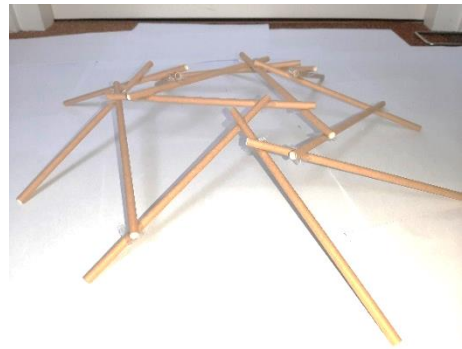
Patroon 1: Driehoekpatroon

Het eerste mogelijke patroon is opgebouwd uit units die bestaan uit driehoeken. De uiteindes van de balken liggen op elkaar, wat resulteert in kleine zeshoekjes. Het voordeel van dit patroon is dat het volledig gebouwd is uit één type unit. Dit verlaagt de complexiteit van de geometrie en daarmee ook de constructieduur en kosten.

Tevens stelt het in staat één lengte balken te gebruiken, wat de mogelijkheid creëert om slechts lengtes van drie meter te gebruiken. Hierdoor wordt het resthout efficiënt en optimaal benut. Tot slot heeft de constructie een zeer mooie uitstraling.



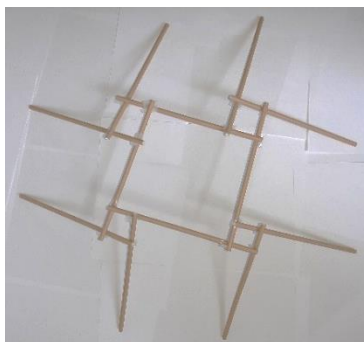
Figuur 12: Schaalmodel driehoekpatroon



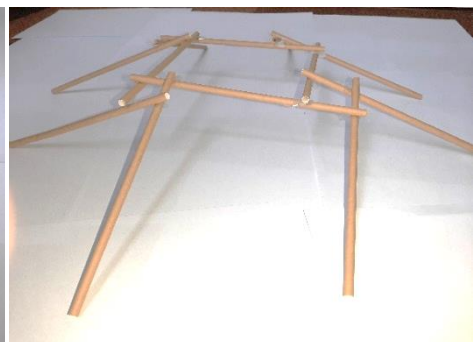
Figuur 13: Driehoekpatroon 3D
(Cohen-or et al., 2013, p.8)

Patroon 2: Vierkantpatroon

Het tweede patroon is opgebouwd uit losse units, bestaande uit vierkanten. Het voordeel van dit patroon is dat de geometrie erg eenvoudig is. Dit verlaagt de constructietijd en daarmee de constructiekosten. Tevens wordt in het overgrote gedeelte van de constructie gebruik gemaakt van dezelfde lengte balken. Dit geeft hetzelfde voordeel als patroon 1, namelijk efficiënt gebruik van het resthout.



Figuur 14: Schaalmodel vierkantpatroon



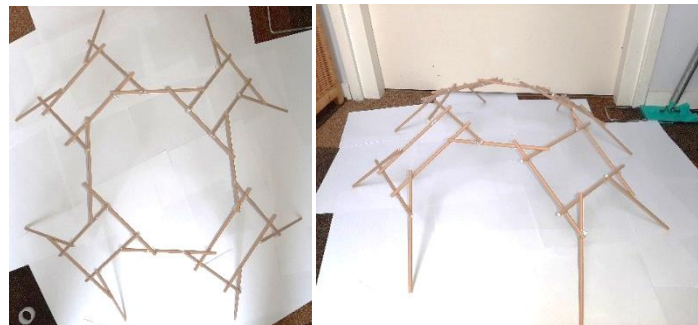
Een nadeel is de onderkant van de constructie. Zoals te zien in figuur 15, kan onderaan de constructie het patroon niet meer gehandhaafd worden. Hierdoor ontstaan losse balken. Dit verlaagt de stijfheid van de constructie. Tevens is dit esthetisch gezien minder mooi.



Figuur 15: Vierkantpatroon 3D
(Cohen-or et al., 2013, p.8)

Patroon 3: Combinatiepatroon

Bij het laatste patroon wordt gebruik gemaakt van zowel driehoeken als rechthoeken. Zoals te zien is in figuur 16, is de geometrie van deze constructie erg complex. Dit vergroot de constructieduur en daarmee ook de constructiekosten. Tevens is het een zeer ingewikkelde geometrie om in een tekenprogramma te realiseren.



Figuur 16: Schaalmodel Combinatiepatroon

Doordat gebruik gemaakt wordt van verschillende vormen ontstaan grote open stukken in de constructie. Om hier een dakafwerking op te plaatsen, zullen gordingen gebruikt moeten worden. Dit zal vermoedelijk niet alleen met het resthout gerealiseerd kunnen worden, waardoor deze constructie niet efficiënt is in het gebruik van resthout.

Voor de esthetiek geldt persoonlijk dat de constructie er niet fraai uitziet. Naar de mening van de auteur ziet het er wat rommelig uit.



Figuur 17: Combinatiepatroon 3D
(Cohen-or et al., 2013, p.8)

5.2 Afweging

Om een afweging te maken is in tabel 3 een overzicht gegeven tussen de verschillende scores per beoordelingscategorie. De scores liggen tussen de 0 en de 2. 0 is hierbij negatief, wat inhoudt dat de constructieduur erg lang is, de complexiteit van de constructie heel groot is, er geen efficiënt gebruik van het resthout plaatsvindt en de constructie esthetisch niet mooi is. 2 is hierbij het tegenovergestelde en juist zeer positief.

Patroon	Eenvoud van de geometrie	Lage Constructie-kosten	Efficiency in resthout-gebruik	Esthetiek	Totaalscore
1: Driehoek	2	2	2	2	8
2: Vierkant	2	2	2	1	7
3: Combinatie	0	1	1	0	2

Tabel 3: Afweging van de verschillende patronen

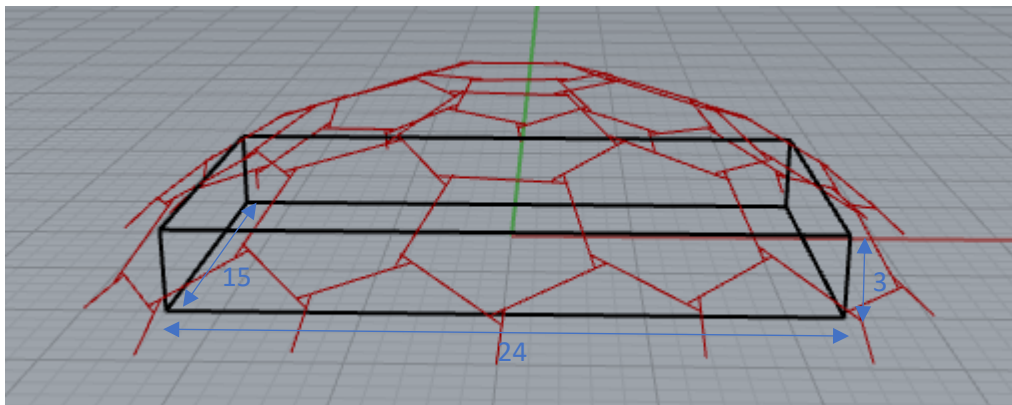
Zoals te zien is in tabel 3 scoort het driehoekpatroon het hoogste, wat dan ook het definitief uitgewerkte patroon zal worden.

5.3 Overzicht van de gekozen variant

In de onderstaande paragraaf wordt het voorlopig ontwerp van het gekozen patroon getoond.

5.3.1 Overzichtstekening

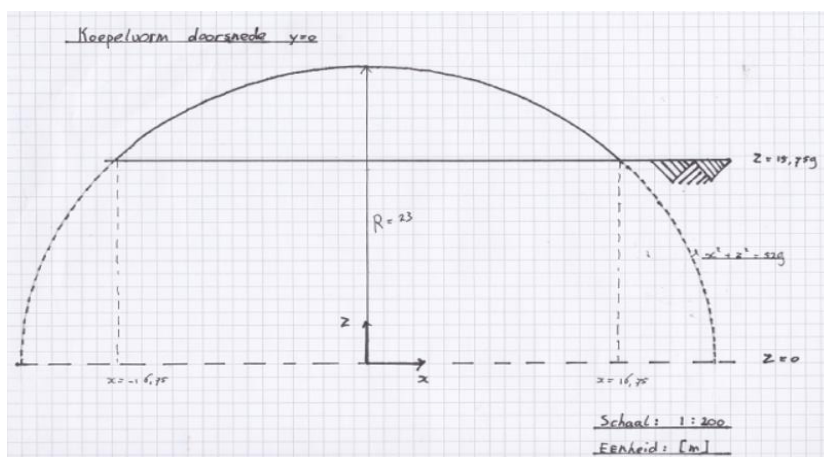
Met behulp van het script van T.S. Godthelp is het mogelijk om een 3D weergave van de koepel te produceren. Meneer Godthelp heeft een masterscriptie geschreven, waarin hij een 'reciprocal frame designer' heeft ontworpen. Met behulp van dit script is een parametrisch ontwerp van een reciprocal frame mogelijk. In figuur 18 is een voorlopig ontwerp weergegeven van de gekozen variant. Gekozen is om de parameter 'straal van de binnenste cirkel', zoals beschreven in paragraaf 3.2.4, erg klein te kiezen. Hierdoor ontstaan mooie, zeshoekige vlakken. In de variant is een box getekend met de afmetingen $l \times b \times h = 24 \times 15 \times 3$ meter. Dit is de minimale vrije ruimte, benodigd onder de koepel.



Figuur 18: Overzichtstekening gekozen variant

5.3.2 Afmetingen van de koepel

Om tot een juiste vorm te komen is gebruik gemaakt van een bol. Deze bol kan in z-richting getransleerd worden en de straal kan aangepast worden. De definitieve vorm is dan ook het resultaat van een iteratief proces, waarbij de bol net zo lang getransleerd, vergroot en verkleind is, tot deze de gewenste vorm had. Het resultaat is onderstaand weergegeven in figuur 19. De weergegeven doorsnede bevindt zich op $y=0$. Het spreekt voor zich dat een doorsnede in het yz-vlak hetzelfde resultaat geeft, aangezien het een bol is.



Figuur 19: Schets van de koepelvorm

6. Belastingen |

In dit hoofdstuk zal de belasting op de constructie bepaald worden. Allereerst zal worden ingegaan op de permanente belasting. Vervolgens zal de variabele belasting bepaald worden. Tot slot zullen de belastingcombinaties worden weergegeven.

Dit is de belastingbepaling wat betreft het geïtereerde definitieve ontwerp, weergegeven in hoofdstuk 8. De belastingbepaling van het voorlopige ontwerp is te vinden in bijlage 4.

6.1 Permanente belasting

Het grootste gedeelte van de permanente belasting bestaat uit het eigen gewicht. Dit is het gewicht van het resthout (eigen gewicht) en tevens het gewicht van de dakbedekking op de constructie.

6.1.1 Eigen gewicht

Het resthout is grenenhout. Grenen heeft een massa van 400 tot 600 [kg/m³] (Gadero, 2021). Uitgegaan wordt van de gemiddelde waarde: 500 [kg/m³]. De balken hebben elk een doorsnede van 75 * 175 = 13125 [mm²]. Dit resulteert in een lijnbelasting van 0.013125 [m²] * 500 [kg/m³] * 10 [m/s²] = 65.63 [N/m].

6.1.2 Dakbedekking

Gekozen wordt voor een volledig glazen overkapping. De reden hiervoor is dat dit goed licht en een vrij gevoel geeft tijdens het sporten. Een plafond is niet nodig. Voor de bepaling van het gewicht van een dakplaat wordt gebruik gemaakt van 'Glasmaatje', een leverancier voor beglazing van overkappingen. Voor grote overspanningen (tot 4500 [mm]) wordt een beglazingsdikte van 55.2 geadviseerd (glasmaatje, z.d.). Dit houdt in dat er tweemaal een glasplaat van 5 millimeter wordt toegepast met daartussen een lijmlaag. Dit zorgt ervoor dat bij glasbreuk het glas niet naar beneden valt. Deze glasdikte komt neer op een glasdikte van 10.76 [mm]. Het soortelijk gewicht van een glasplaat is 2497 [kg/m³] (Soons et al., 2014). Dit resulteert in een gewicht van 2497[kg/m³] * 0.01076 [m] * 10[m/s²] / 1000 = 0.269 [kN/m²].

Eventuele gordingen zijn niet nodig, aangezien de glasplaten een overspanning van 4.5 meter halen.

6.2 Variabele belasting

In deze deelparagraaf zal de variabele belasting, bestaande uit sneeuw-, wind en opgelegde belasting worden weergegeven.

6.2.1 Sneeuwbelasting

De sneeuwbelasting wordt bepaald door middel van de volgende formule:

$$s = \mu_i * C_e * C_t * s_k \quad (\text{Soons et al., 2014})$$

μ_i = Vormcoëfficiënt, afhankelijk van de helling van het dak.

C_e = Bloedstellingscoëfficiënt = 1.0

C_t = Warmte coëfficiënt = 1.0

s_k = Karakteristieke waarde voor sneeuw = 0.7 [kN/m²]

$$s = \mu_i * 0.7 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Bepaling van de vormcoëfficiënt

Aangezien de norm NEN-EN 1991-1-3 geen voorschriften geeft voor koepeldaken, maar slechts voor cilindervormige daken, wordt bij de bepaling van de vormcoëfficiënt uitgegaan van een cilindervormig dak. De vormcoëfficiënt die hierbij gebruikt moet worden is μ_4 . Hierbij dient de hoek β gedefinieerd te worden, weergegeven in figuur 20.

Om deze te bepalen dient eerst de lengte l_s bepaald te worden. Dit zal gedaan worden aan de hand van de schets, weergegeven in paragraaf 5.3.2. De formule voor de cirkel is $z = \sqrt{23^2 - x^2}$. Hieruit volgt dat $\frac{dz}{dx} = \frac{-x}{\sqrt{529 - x^2}}$. De gevraagde richtingscoëfficiënt is $\tan(60) = \sqrt{3}$. Gelijktelling van $\frac{dz}{dx}$ aan $\sqrt{3}$ levert een locatie x op van -19.91 wat groter is dan de straal op $z = 15.759$. Vanzelfsprekend draait het teken om als aan de andere kant van de cirkel gekeken wordt en een richtingscoëfficiënt van $-\sqrt{3}$ wordt ingevoerd. Hieruit valt te concluderen dat ter hoogte van het maaiveld, de koepel een hoek heeft die kleiner is dan 60° en dat l_s gelijk is aan de breedte van de koepel.

De hoek β dient op $0.25 * l_s$ bepaald te worden. De x -coördinaat is dan $0.5 * -16.75 = -8.375$.

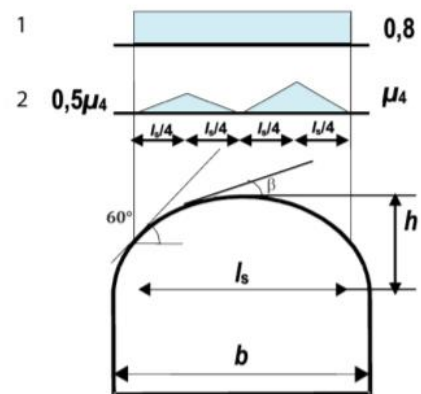
$$\frac{dz}{dx}(x = -8.375) = 0.39. \text{ Oftewel, } \beta = \tan^{-1}(0.39) = 21.3^\circ.$$

Volgens de NEN-EN-1991-1-3 geldt:

Als $\beta > 60^\circ$, $\mu_4 = 0$

Als $\beta \leq 60^\circ$, $\mu_4 = 0.2 + 10 * h/b \leq 2.0$ (h, b weergegeven in figuur 20.)

Hieruit volgt dat $\mu_4 = 2.0$, want $0.2 + 10 * 7.24/33.5 = 2.36 > 2.0$.



Figuur 20: vormcoëfficiënt op cilinderdaken (NEN-EN 1991-1-3)

Mogelijke scenario's

Zoals weergegeven in figuur 20 dienen bij cilindervormige daken twee scenario's doorgerekend te worden. Scenario 1 geeft een uniform verdeelde sneeuwbelasting, met een μ van 0.8 en scenario 2 geeft een niet-uniform verdeelde sneeuwbelasting weer. Doordat het dak een hoek maakt die al kleiner is dan 60° , ter plaatse van het maaiveld en dit in feite een verdeling is van een cilindervormig scenario, zal in het ontwerp verder gerekend worden met $\mu = 0.8$, uniform verdeeld. Aangezien de helling ter plaatse van het maaiveld slechts 47° is (dz/dx , $x=-16.75$), begint het ontwerp erg op een zadeldak te lijken met een hoek van 45° . Hierbij zou een factor $\mu=0.4$ toegepast worden. Door de vormfactor 0.8 toe te passen wordt dus gerekend met een veilige waarde. Tevens verminderd deze aanname de complexiteit van de studie.

Waarde van de sneeuwbelasting

Met een vormfactor van 0.8, een karakteristieke sneeuwbelasting van $0.7 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ en een blootstellings- en warmtecoëfficiënt van 1.0, komt de sneeuwbelasting op $0.56 \text{ [kN/m}^2\text{]}$, uniform verdeeld over het dak.

6.2.2 Windbelasting

Voor de bepaling van de windbelasting wordt gebruik gemaakt van de norm NEN-EN 1991-1-4.

De algemene formule voor de windkracht luidt:

$$F_i = c_s c_d * c_{net} * q_p(z_e) * A_{ref} \quad (\text{Soons et al., 2014})$$

Bepaling van de uitwendige drukcoëfficiënten, C_{pe}

Om de uitwendige drukcoëfficiënten te bepalen voor een koepel met een cirkelvormige ondergrond, moet volgens de norm NEN-EN 1991-1-4 gebruik worden gemaakt van figuur 21. De koepel wordt hierbij opgedeeld in drie locaties: A, B en C.

h = hoogte van de gevels = 0 [m].

d = diameter van de koepel = 33.5 [m]. Zie hiervoor paragraaf 5.3.2.

f = hoogte van de koepel = 7.24 [m]. Zie hiervoor paragraaf 5.3.2.

Met behulp van deze waardes kunnen de volgende factoren bepaald worden:

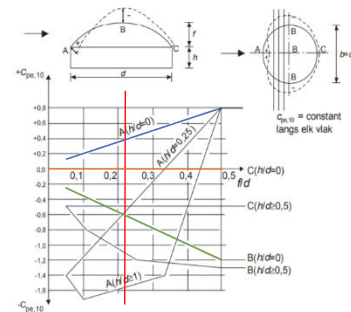
$h/d = 0/33.5 = 0$ [m]

$f/d = 7.24/33.5 = 0.22$ [-]

Met behulp van figuur 21 zijn de volgende waardes bepaald:

Gebied	A	B	C
$C_{pe,10}$	+0.4	-0.61	0

Tabel 4: Uitwendige drukcoëfficiënten



Figuur 21: Bepaling uitwendige drukcoëfficiënten (NEN-EN 1991)

Aangezien $C_{pe,1}$ waardes niet gegeven worden in de norm

NEN-EN 1991, wordt ervan uitgegaan dat deze gelijk is aan nul. Hierdoor is C_{pe} gelijk aan $C_{pe,10}$.

Bepaling inwendige druk coëfficiënten

Volgens de eurocode NEN-EN 1991 geldt dat op het moment de inwendige drukcoëfficiënt niet te rechtvaardigen is, er uitgegaan moet worden van de meest ongunstige situatie. Dit houdt in dat $\mu = +0.2$ of $\mu = -0.3$. Aangezien de constructie geen gevels kent, is het lastig te bepalen welk percentage van het geveloppervlak bestaat uit open ruimtes. Aangezien dit het geval is, zal dus gerekend worden met deze twee ongunstige waardes. Bij negatieve druk zal dit dus vergroot worden met -0.3 en bij positieve druk zal dit dus vergroot worden met +0.2.

Bepaling extreme stuwdruk $q_p(z_e)$

Zoals beschreven in hoofdstuk 4.1.6 bevindt het gebouw zich in een bebouwd gebied, gestationeerd in windgebied 3. De referentiehoogte is de hoogte van de koepel boven het maaiveld, wat gelijk is aan 7.24 meter. Dit is alreeds weergegeven in paragraaf 5.3.2. Om de waarde $q_p(7.24)$ te bepalen is lineair geïnterpoleerd tussen $q_p(7)$ en $q_p(8)$, wat resulteert in een referentiedruk van 0.4872 [kN/m²].

Bepaling winddruk

De winddruk aan de buitenzijde wordt volgens NEN-EN 1991 berekend via formule (1), onderstaand weergegeven. De winddruk aan de binnenzijde wordt volgens NEN-EN 1991 berekend via formule (2), onderstaand weergegeven. Het verschil in deze twee drukken levert de netto winddruk, weergegeven in formule (3).

$$(1): w_e = C_{pe} * q_p$$

$$(2): w_i = C_{p,i} * q_p$$

$$(3): w_{net} = (C_{pe} - C_{p,i}) * q_p = C_{net} * q_p$$

Situatie 1: onderdruk

Locatie	w_{net}
A	$(0.4 - -0.3) * 0.4872 = 0.3410 \text{ [kN/m}^2\text{]}$
B	$(-0.61 - -0.3) * 0.4872 = -0.1510 \text{ [kN/m}^2\text{]}$
C	$(0 - -0.3) * 0.4872 = 0.1462 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

Tabel 5: Winddruk bij onderdruk

Situatie 2: Overdruk

Locatie	w_{net}
A	$(0.4 - 0.2) * 0.4872 = 0.0974 \text{ [kN/m}^2\text{]}$
B	$(-0.61 - 0.2) * 0.4872 = -0.3946 \text{ [kN/m}^2\text{]}$
C	$(0 - 0.2) * 0.4872 = -0.0974 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

Tabel 6: Winddruk bij overdruk

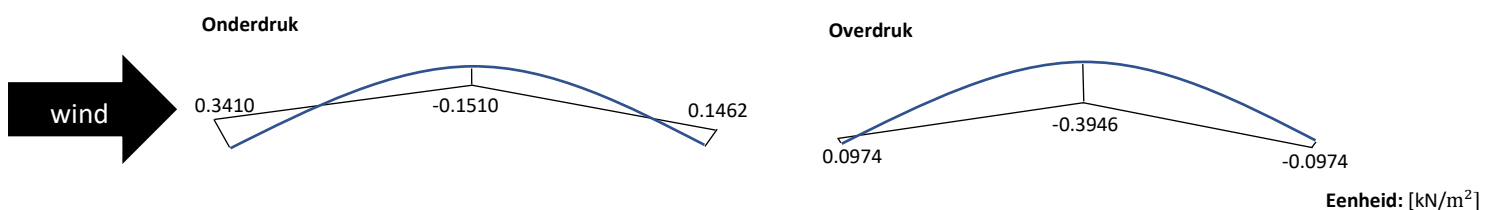
Bepaling bouwwerkfactor $c_s c_d$

Volgens de norm NEN-EN 1991 geldt dat gebouwen met een hoogte kleiner dan 15 meter, een bouwwerkfactor van 1.0 aangenomen mag worden. Aangezien het ontwerp een hoogte heeft van 7.24 meter, zal deze factor dus 1.0 zijn. Vermenigvuldiging van de winddruk met de bouwfactor zal dus geen verschil opleveren.

Vertaling naar een q-last

De norm NEN-EN 1991 stelt dat loodrecht op de windrichting de uitwendige windkrachtcoëfficiënt en daarmee ook de netto windkrachtcoëfficiënt constant is. Daarmee kan de windbelasting omgezet worden tot q-last door te vermenigvuldigen met de breedte van de koepel op die locatie.

Tevens stelt de eurocode dat voor een eerste-orde benadering lineair geïnterpoleerd kan worden tussen de waarden in A, B en C. Dit is schematisch weergegeven in figuur 22.



Figuur 22: Verloop windkracht over de koepel

6.2.2.1 Schematisering windbelasting

Aangezien een verlopende windlast erg ingewikkeld is, wordt een vereenvoudiging toegepast. Elke staaf bevat een q-last die een deel van de oppervlakte vertegenwoordigt. De windlast is gegeven in $[\text{kN}/\text{m}^2]$. Door de totale oppervlakte te delen door het aantal staven, wordt het maatgevende oppervlak voor die staaf verkregen. Door dit te delen door de lengte van een staaf, wordt de lengte verkregen, waarmee de q-last, weergegeven in tabel 7, bepaald wordt. Op deze wijze wordt de wind als het ware over de staven verdeeld.

De oppervlakte van een bolsegment is $2 * \pi * R * h$, waarbij h de hoogte is van het maaiveld, ten opzichte van het middelpunt van de bol en R de straal van de bol is (pandd, z.d.).

Vanzelfsprekend is dit niet de exacte oppervlakte van de koepel, aangezien deze uit vlakken bestaat, maar voor een 1^e berekening volstaat deze aanname. Zeker in combinatie met de onzekerheid over de wind.

$$\text{Oppervlakte} = 2 * \pi * R * h = 2 * \pi * 23 * 15.759 = 2277.39 [\text{m}^2].$$

$$\text{Aantal staven} = 284$$

$$\text{Oppervlak bij knoop} = 2277.39 / 284 = 8.0 [\text{m}^2]$$

$$\text{Lengte enkele staaf gemiddeld} = 3.5 [\text{m}]$$

$$\text{Afstand dat iedere staaf draagt} = 8.02 / 3.5 = 2.2 [\text{m}]$$

Formules, gebaseerd op figuur 22

Windbelasting met onderdruk (wind van links)

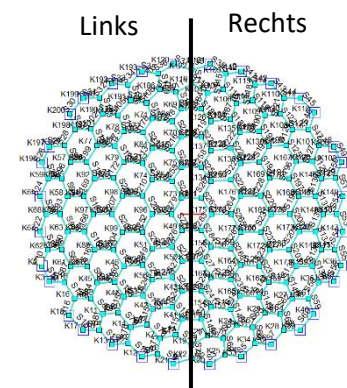
$$\text{Linkerhelft: } w(x) = -0.029x + 0.341 [0 \leq x \leq 16.75]$$

$$\text{Rechterhelft: } w(x) = 0.018x - 0.448 [16.75 \leq x \leq 33.5]$$

Windbelasting met overdruk (wind van links)

$$w(x) = -0.029x + 0.098 [0 \leq x \leq 16.75]$$

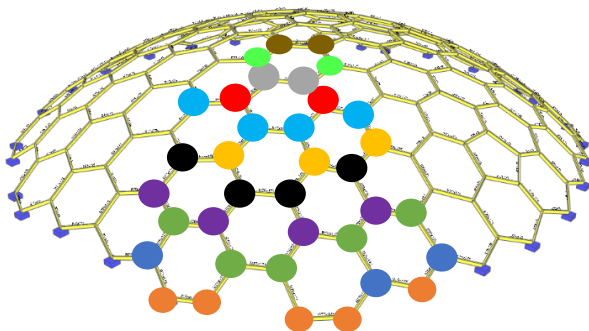
$$w(x) = 0.018x - 0.692 [16.75 \leq x \leq 33.5]$$



Figuur 23: Indeling links / rechts

Indeling niveaus

In figuur 24 zijn de verschillende knooppunten weergegeven. De schematisering van deze knopen, wordt nader toegelicht in hoofdstuk 7. In tabel 7 worden de waarden van de windbelasting per knooppunt weergegeven. Aangenomen wordt dat de gekleurde knooppunten op exact dezelfde hoogte zitten. Vanzelfsprekend zit daar in werkelijkheid iets variatie in.



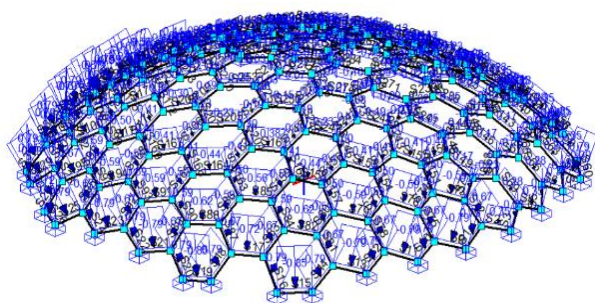
Figuur 24: Indeling verschillende niveaus

In de onderstaande tabel 7 zijn de waardes van de windbelasting op de verschillende balken weergegeven. Per knooppunt is aangegeven wat de waarde van de q-last op die locatie is. Voor balken tussen verschillende knooppunten, bijvoorbeeld een balk van knooppunt oranje naar groen, wordt de gemiddelde waarde in beide knooppunten toegepast. Dit om de complexiteit van de belasting te verkleinen.

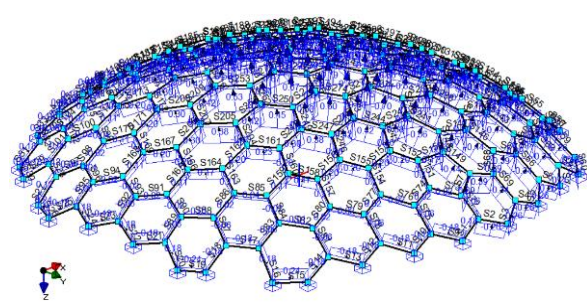
Kleur	z	x [m]	Onderdruk [kN/m ²]	q-last knoop onderdruk [kN/m]	Overdruk [kN/m ²]	q-last knoop overdruk [kN/m]
		links/ rechts	links / rechts	links/ rechts	links/ rechts	links / rechts
	0	0 / 33.5	0.341/ 0.155	0.853/ 0.388	0.098/ -0.089	0.245/ -0.222
	1.59	1.79/ 31.71	0.289/ 0.122	0.723/ 0.307	0.046/ -0.121	0.115/ -0.303
	2.762	3.21/ 30.29	0.248/ 0.097	0.620/ 0.243	0.005/ -0.147	0.012/ -0.367
	3.190	3.99/ 29.51	0.225/ 0.083	0.563/ 0.208	-0.018/ -0.161	-0.044/ -0.402
	4.21	5.68/ 27.82	0.176/ 0.052	0.441/ 0.132	-0.067/ -0.191	-0.167/ -0.478
	4.76	6.59/ 26.91	0.150/ 0.036	0.375/ 0.091	-0.093/ -0.208	-0.233/ -0.519
	5.63	8.58/ 24.92	0.092/ 0.001	0.230/ 0.001	-0.151/ -0.243	-0.377/ -0.609
	5.92	9.63/ 23.87	0.061/ -0.018	0.154/ -0.046	-0.181/ -0.262	-0.453/ -0.656
	6.49	11.67/ 21.83	0.003/ -0.055	0.006/ -0.138	-0.240/ -0.299	-0.601/ -0.748
	6.78	12.67/ 20.83	-0.026/ -0.073	-0.067/ -0.183	-0.269/ -0.317	-0.673/ -0.792
	7.05	14.70/ 18.80	-0.085/ -0.085	-0.213/ -0.274	-0.328/ -0.354	-0.821/ -0.884

Tabel 7: Bepaling q-lasten per balk ten gevolge van de windbelasting

In de onderstaande figuren 25 en 26 is de ingevoerde windbelasting zonder belastingfactoren weergegeven. Duidelijk zijn de gewenste vormen, zoals weergegeven in figuur 22 te herkennen. Dit duidt op een correcte invoer van de belasting.



Figuur 25: Windbelasting onderdruk



Figuur 26: Windbelasting overdruk

6.2.3 Opgelegde belasting

Voor daken die niet toegankelijk zijn, dient afhankelijk van de hoek van het dak te worden bepaald wat de opgelegde belasting is. Echter zijn de gegeven waardes voor zadeldaken. Het koepelvormige dak heeft bovenaan een kleine hellingshoek (0°) en onderaan een grotere hellingshoek (47°). Gekozen wordt om te rekenen met een dakhelling tussen de 0 en 15 graden. Zeker omdat het dak niet toegankelijk is, wordt gekozen voor een waarde van 0.5 [kN/m²] (Fennis et al., 2013).

6.3 Overzicht belastingen

In de onderstaande tabel 8 is een totaaloverzicht gegeven van de belastingen. Om de bloklasten [kN/m²] om te zetten naar een lijnlast wordt vermenigvuldigd met 1.8 meter.

Bij de ingevoerde belasting is van een bloklast [kN/m²] naar een lijnlast gegaan door te vermenigvuldigen met 1.8 meter. In paragraaf 6.2.2.1 was beschreven gebruik te maken van 2.2 meter. Echter bleek na goed bestuderen van de constructie dat het oppervlakte van de bol kleiner is dan een perfecte bol. Het gevolg is dat een waarde van 2.2 wellicht een stuk te groot is, daarom wordt gerekend met 1.8 meter.

	Waarde	Eenheid	$\psi_{0,i}$ (Fennis et al., 2013)	Belastingfactor
Permanente belasting				
Eigen gewicht	0.066	[kN/m balk]	-	1.35 of 1.2
Glasplaten	$0.269 * 1.8 = 0.48$	[kN/m]	-	1.35 of 1.2
Totaal	0.546	[kN/m]		
Variabele belasting				
Sneeuwbelasting	$0.56 * 1.8 = 1.00$	[kN/m]	0	1.5
Windbelasting	Zie tabel 7	[kN/m]	0	1.5
Opgelegde belasting	$0.5 * 1.8 = 0.9$	[kN/m]	0	1.5

Tabel 8: Overzicht van de belastingen

6.4 Belastingcombinaties

In de onderstaande deelparagraaf worden de verschillende belastingcombinaties weergegeven.

6.4.1 Toetsing in de uiterste grenstoestand (UGT)

Voor toetsing in de uiterste grenstoestand, oftewel sterkte en stabiliteit, dienen de onderstaande belastingcombinaties gewogen te worden.

$$1.35G + \sum_{i \geq 1} 1.5 \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (\text{Fundamentele belastingcombinatie 1})$$

$$1.2G + 1.5Q_{k,1} + \sum_{i > 1} 1.5 \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (\text{Fundamentele belastingcombinatie 2})$$

Wetend dat $\psi_{0,i}$ gelijk is aan nul, levert dat de volgende twee vergelijkingen:

$$1.35G \quad (\text{Fundamentele belastingcombinatie 1})$$

$$1.2G + 1.5Q_{k,1} \quad (\text{Fundamentele belastingcombinatie 2})$$

6.4.2 Toetsing in de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT)

Voor toetsing in de bruikbaarheidsgrenstoestand, oftewel stijfheid, dient de onderstaande belastingcombinatie gewogen te worden.

$$1.0G + 1.0Q_{k,1} + \sum_{i > 1} 1.0 \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Wetend dat $\psi_{0,i}$ gelijk is aan nul, levert dat de volgende vergelijking:

$$1.0G + 1.0Q_{k,1}$$

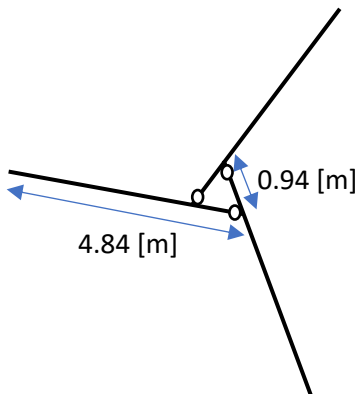
7. Toegepaste vereenvoudiging |

In dit hoofdstuk zal de schematisering van het ontwerp beschreven worden.

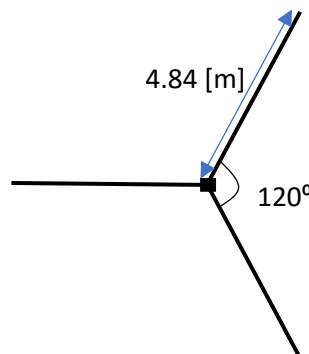
7.1 Wijze van schematisering

Vanwege de grote hoeveelheid staven, wordt de precieze invoer van de constructie in Matrixframe erg complex. Daarom wordt er een schematisering toegepast. De onderstaande afbeelding, links weergegeven is hoe de knopen in werkelijkheid geschematiseerd lopen. De rechterafbeelding van figuur 27 is hoe de knopen vereenvoudigd geschematiseerd worden in matrixframe.

Werkelijkheid



Vereenvoudigd



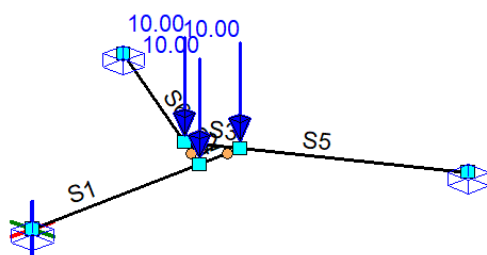
Figuur 27: Schematisering knopen

7.2 Rechtvaardiging

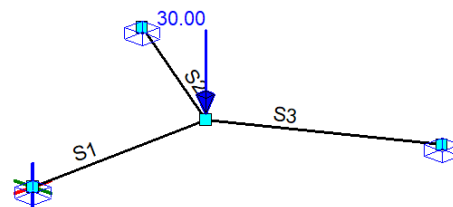
Om te bepalen of de bovenstaande schematisering gerechtvaardigd is, worden de twee patronen in matrixframe ingevoerd. Hierbij worden de uiteindes ingeklemd. Bij het werkelijke patroon zal op elke knoop $\frac{1}{3}F = 10$ [kN] worden toegepast, terwijl bij de vereenvoudigde schematisering op de geschematiseerde knoop $F = 30$ [kN] wordt toegepast. Tevens worden de profieieigenschappen van het resthout ingevoerd (afmetingen $b \times h = 75 \times 175$ [mm], sterkteklasse C24). Onderstaand zijn de invoer, de momentenlijnen en dwarskrachtenlijnen weergegeven.

7.2.1 Matrixframe-modellen

Werkelijkheid



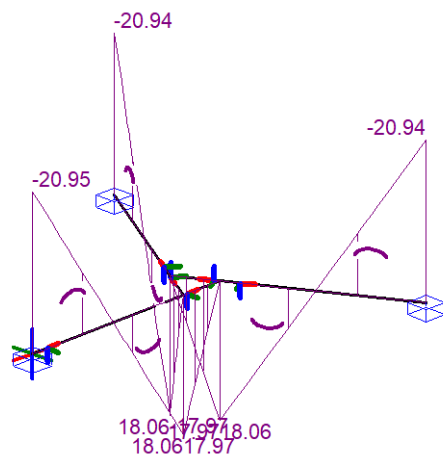
Vereenvoudigd



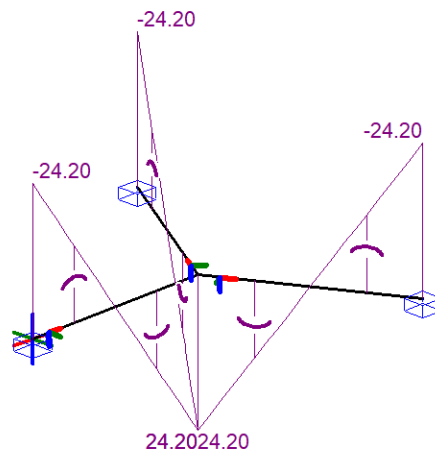
Figuur 28: Matrixframe modellen

7.2.2 Momentenlijn

Werkelijkheid



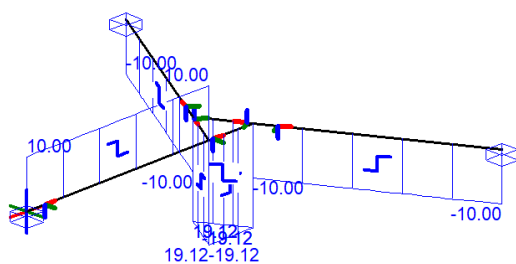
Vereenvoudigd



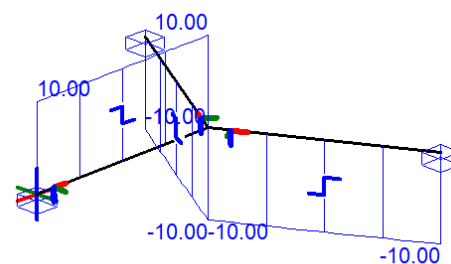
Figuur 29: Momentenlijnen

7.2.3 Dwarskrachtenlijn

Werkelijkheid



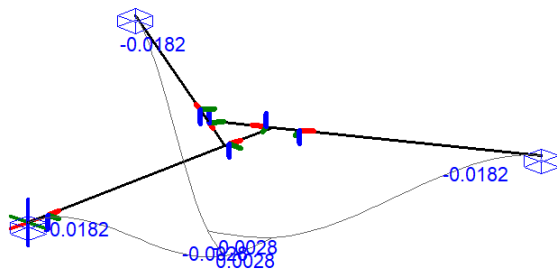
Vereenvoudigd



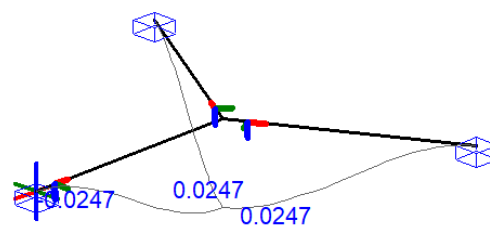
Figuur 30: Dwarskrachtenlijnen

7.2.4 Doorbuigingslijn

Werkelijkheid



Vereenvoudigd



Figuur 31: Doorbuigingslijnen

7.2.5 Conclusie

Uit de bovenstaande figuren 29, 30 en 31 blijkt dat over het gedeelte van de lange balken de lijnen grotendeels te kloppen. Ter plaatse van de geschematiseerde knoop gebeuren echter soms wat vreemdere verschijnselen.

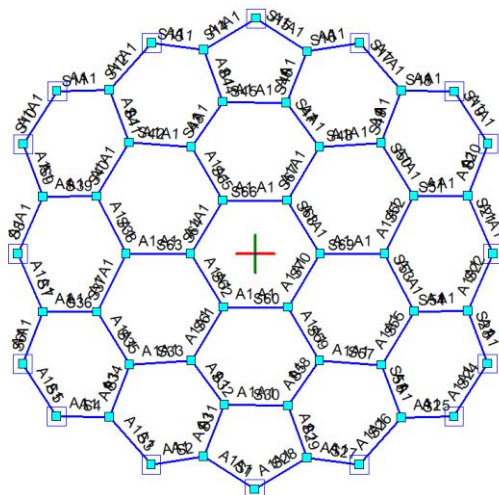
Zo moet in het achterhoofd gehouden worden dat de dwarskracht in de vereenvoudigd, geschematiseerde knoop tweemaal zo hoog is als de dwarskracht buiten de knoop. Dit is namelijk niet te zien in het vereenvoudigde, geschematiseerde model.

Ook is de doorbuiging in de vereenvoudigde schematisering veel groter dan in de werkelijke schematisering. Echter is de geschematiseerde doorbuiging groter dan de werkelijke doorbuiging, waardoor de schematisering aan de veilige kant zich bevindt. Deze factor is 8.8.

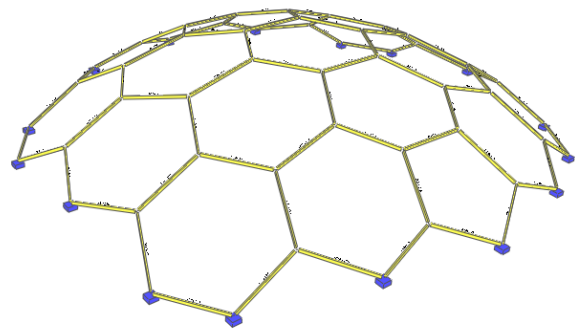
De momentenlijn van de vereenvoudigde schematisering levert iets hogere momenten dan die van de werkelijke schematisering. Deze factor is 1.3. Deze afwijking is niet groot en zit aan de veilige kant. Deze schematisering is dus gerechtvaardigd.

7.3 Geschematiseerde model

Onderstaand het bovenaanzicht en het gedenderde 3D-model. In bijlage 3 zijn alle coördinaten van de knooppunten weergegeven.



Figuur 32: Bovenaanzicht



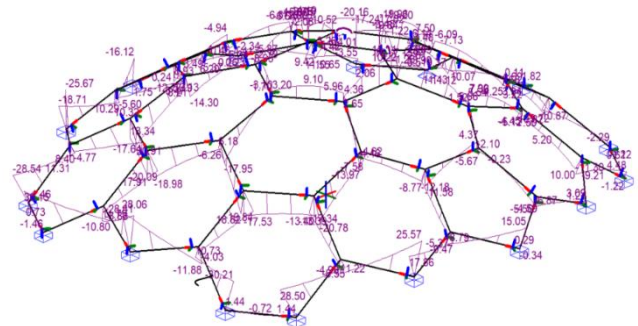
Figuur 33: 3D-weergave

8. Aanpassing in ontwerp

In dit hoofdstuk zal allereerst ingegaan worden op de reden waarom er een aanpassing in het voorlopig ontwerp plaatsvindt. Vervolgens zal het nieuwe geschematiseerde model getoond worden.

8.1 Voorlopig ontwerp

Na invoering van het voorlopige ontwerp in matrixframe, volgens de belastingen beschreven in bijlage 4, bleek het ontwerp erg grote buigende momenten te hebben. Dit is te zien in figuur 34. Deze momenten leveren een unity check van ongeveer 3.5 op. Dit is dan ook de reden dat gestopt is met de toetsing van dit voorlopige ontwerp en gekozen is voor een ontwerp wat lagere buigende momenten oplevert. De korte toetsing op buiging van het voorlopige ontwerp is te vinden in bijlage 5.

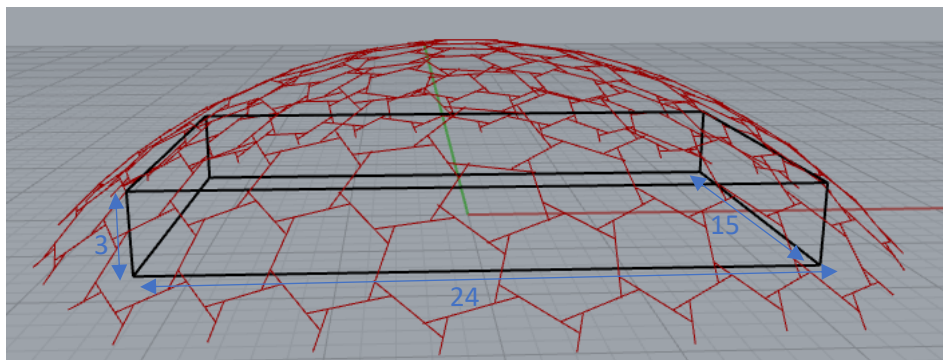


Figuur 34: Momentenlijn_voorlopig ontwerp, wind bij overdruk

8.2 Aanpassing ontwerp

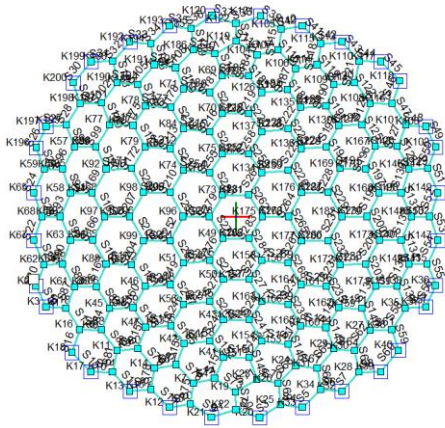
Zoals blijkt uit de unity check op buiging voldoet het voorlopig ontwerp niet. Daarom zal het ontwerp worden aangepast. Gebruik zal gemaakt worden van kleinere overspanningen van de staven. Dit zal ertoe leiden dat de buigende momenten in de staven kleiner worden. Hierbij zijn de balken van 4.5 meter naar 3 meter overspanning gegaan. Het maximale moment bij een ligger op twee steunpunten, belast met een gelijkmatig verdeelde belasting, is $\frac{1}{8} * q * l^2$. De lengte speelt kwadratisch een rol. Nu kunnen deze balken niet geschematiseerd worden als een ligger op twee steunpunten belast met een gelijkmatig verdeelde belasting. Toch geeft het een indicatie dat het moment fors zal afnemen, door de lengte met 1.5 meter te verkleinen.

In figuur 35 is het nieuwe patroon weergegeven inclusief het profiel van vrije ruimte. Het voldoet aan het profiel van vrije ruimte. Dit was ook te verwachten. De bolvorm is namelijk niet aangepast. Slechts het patroon erop. De dimensies in figuur 19 zijn dus nog steeds geldig.

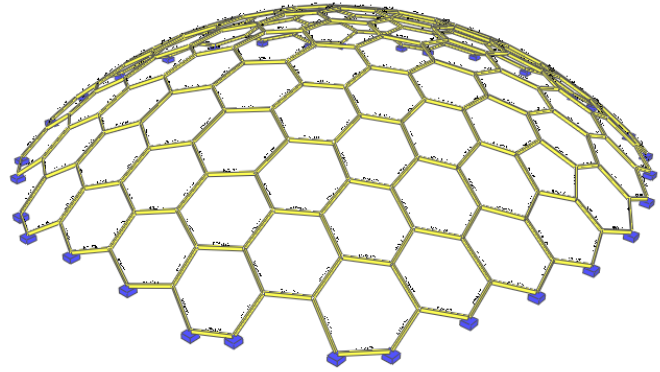


Figuur 35: Nieuwe ontwerp, afmetingen in meter

De schematisering van het model vindt plaats op dezelfde wijze als het voorlopige ontwerp. Het verschil is dat van 70 staven overgegaan wordt naar 284 staven, wat ertoe leidt dat er een stuk meer knooppunten zijn. In figuur 36 een de schematisering van het model weergegeven en in figuur 37 een 3D-weergave van de schematisering.



Figuur 36: Schematisering



Figuur 37: 3D-weergave schematisering

In bijlage 7 is een overzicht gegeven van de ingevoerde knooppunten van het definitieve ontwerp.

9. Toetsing definitieve variant

In dit hoofdstuk zal de definitieve variant getoetst worden volgens de norm NEN-EN 1995-1-1. Allereerst zullen de mogelijke belastingcombinaties getoond worden. Vervolgens zal achtereenvolgens de toets op sterkte, stijfheid en stabiliteit plaatsvinden.

9.1 Belastingcombinaties

Op basis van de belastingcombinaties in paragraaf 6.4 en de berekende belastingen, weergegeven in tabel 8 in paragraaf 6.3 is de onderstaande tabel 9 te bepalen. In de tabel staat per combinatie de ingevoerde waarde in Matrixframe. Deze waarde is standaard loodrecht naar beneden (of naar boven) gericht voor eigengewicht, sneeuwbelasting en opgelegde belasting. De wijze van invoering van de windbelasting is beschreven in hoofdstuk 6.2.2.1. Deze staat loodrecht op de as waar hij op werkt. Een totaaloverzicht van de ingevoerde belastingen en de daarbij behorende lijnen van moment, dwarskracht en normaalkracht zijn weergegeven in bijlage 8.

Combinatie	Met veiligheidsfactoren	Zonder veiligheidsfactoren
FB1	0.737 [kN/m]	-
FB2: Sneeuwbelasting	2.15 [kN/m]	1.546 [kN/m]
FB2: Opgelegde belasting	2.00 [kN/m]	1.046 [kN/m]
FB2: Windbelasting onderdruk*	$0.655 + 1.5 * \text{windlast}$ [kN/m]	$0.546 + \text{windlast}$ [kN/m]
FB2: Windbelasting overdruk*	$0.491 + 1.5 * \text{windlast}$ [kN/m]	$0.546 + \text{windlast}$ [kN/m]

Tabel 9: Overzicht ingevoerde belastingen

*Voor windbelasting wordt bij overdruk een factor van 0.9 op het eigen gewicht toegepast en bij onderdruk een factor 1.2. Dit zorgt ervoor dat de meest ongunstige situatie gecreëerd wordt.

9.2 Toetsing op sterkte

Voor de toetsing op sterkte is het van belang de maatgevende waardes van moment, normaalkracht en dwarskracht te bepalen. Deze zijn onderstaand weergegeven in tabel 10. Deze waardes zijn inclusief belastingfactoren, aangezien het gaat over de toetsing op sterkte. Deze vindt plaats in de uiterste grenstoestand. Opgemerkt moet worden dat de momenten, die onderstaand in tabel 10 zijn weergegeven, de momenten zijn van het middengedeelte. Randen en inkepingen zijn niet meegenomen, weergegeven in figuur 38.

Belastingcombinatie	Normaalkracht [kN]	Dwarskracht [kN]	Moment y (kNm)	Moment z (kNm)
FB1	-24.97	-3.04	2.06	0.1
FB2_Sneeuwbelasting	-68.43	-8.88	6.00	0.3
FB2_Opgelegde belasting	-67.75	-8.25	5.58	0.2
FB2_Wind onderdruk	-32.49	-3.87	-4.07	-1.3
FB2_Wind overdruk	10.80	2.94	-3.69	-1.7

Tabel 10: Maatgevende waardes voor de toetsing op sterkte

9.2.1 Buiging

De toetsing op buiging zal plaatsvinden volgens de norm NEN-EN 1995-1-1. Deze toetsing plaatsvinden in drie stappen. Allereerst zal het middelste gedeelte van de constructie getoetst worden. Vervolgens zullen de randen getoetst worden en tot slot de inkepingen.

9.2.1.1 Middengedeelte

Allereerst zal de toetsing van het 'middengedeelte' plaatsvinden. Dit is weergegeven in figuur 38.

Toetsing van buiging bij een houten constructie gebeurt met de volgende twee unity checks volgens de NEN-EN 1995-1-1:

$$1. \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

$$2. k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

Waarden

k_m = factor die voor gezaagd hout, met een rechthoekige doorsnede gelijk is aan 0.7 (NEN-EN 1995).

$\gamma_m = 1.3$ (solid timber)

$k_{mod} = 1.1$ (voor wind) en 0.9 (voor sneeuw). Sneeuwbelasting is langer aanwezig dan wind.

$$f_{m,d_wind} = k_{mod} * \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} = 1.1 * \frac{24}{1.3} = 20.31 \text{ [N/mm}^2\text{]}.$$

$$f_{m,d_sneeuw} = k_{mod} * \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} = 0.9 * \frac{24}{1.3} = 16.62 \text{ [N/mm}^2\text{]}.$$

$$W_y = \frac{1}{6} * b * h^2 = \frac{1}{6} * 75 * 175^2 = 382812.5 \text{ [mm}^3\text{]}$$

$$W_z = \frac{1}{6} * b * h^2 = \frac{1}{6} * 175 * 75^2 = 164062.5 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Er zijn twee mogelijke maatgevende combinaties, zoals blijkt uit tabel 10. Zowel de belastingcombinatie waarbij de sneeuwbelasting maatgevend is en de belastingcombinatie waarbij er overdruk is. Beide varianten zullen onderstaand getoetst worden.

1. Sneeuwbelasting maatgevend

In figuur 39 is de maatgevende staaf weergegeven, waarop de toets zal plaatsvinden.

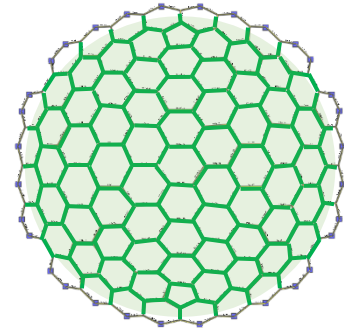
$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{6.00 * 10^6}{382812.5} = 15.67 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} = \frac{0.3 * 10^6}{164062.5} = 1.83 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

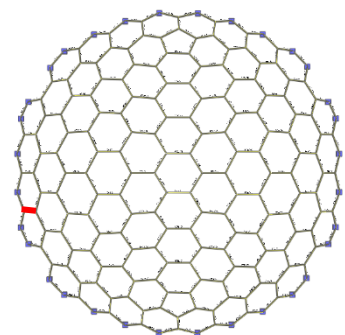
$$1) \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d_sneeuw}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d_sneeuw}} = \frac{15.67}{16.62} + 0.7 * \frac{1.83}{16.62} = 1.0$$

$$2) k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d_sneeuw}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d_sneeuw}} = 0.7 * \frac{15.67}{16.62} + \frac{1.83}{16.62} = 0.77 < 1$$

Beide unity checks zijn kleiner of gelijk aan 1. Wel is de eerste unity check precies één. Echter zo blijkt uit hoofdstuk 7, zijn de geschematiseerde momenten iets hoger zijn dan de werkelijke momenten. Deze factor is $24/18 = 1.3$. Door de geschematiseerde momenten te verkleinen met een factor 1.3 ontstaan respectievelijk 0.78 en 0.59 als unity check. Dit is veel kleiner dan 1.0.



Figuur 38: Definitie middengedeelte



Figuur 39: Maatgevende staaf sneeuwbelasting

2. Windbelasting overdruk

In figuur 40 is de maatgevende staaf weergegeven, waarop de toets zal plaatsvinden.

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{3.69 * 10^6}{382812.5} = 9.64 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

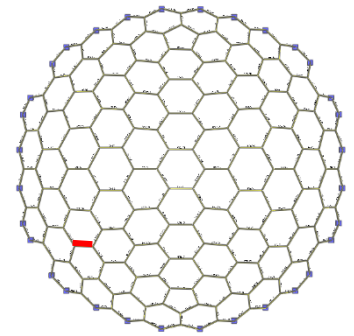
$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} = \frac{1.7 * 10^6}{164062.5} = 10.36 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$1) \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d,wind}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d,wind}} = \frac{9.64}{20.31} + 0.7 * \frac{10.36}{20.31} = 0.83 < 1$$

$$2) k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d,wind}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d,wind}} = 0.7 * \frac{9.64}{20.31} + \frac{10.36}{20.31} = 0.84 < 1$$

Beide unity checks zijn kleiner dan 1. Dit betekent dat wat betreft de windbelasting de constructie voldoet.

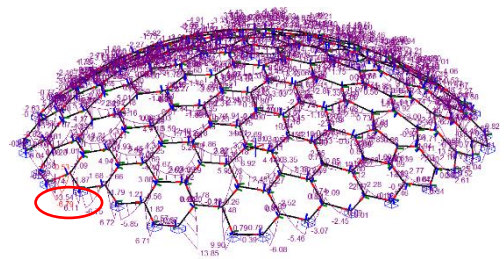
Zowel bij de sneeuwbelasting als bij de windbelasting voldoet de controle, wat betekent dat het middengedeelte van de constructie veilig is, wat betreft buiging.



Figuur 40: Maatgevende staaf windbelasting overdruk

9.2.1.2 Randbalken

Op de locaties van de randbalken treden relatief hoge momenten op. Deze zijn hoger dan in de constructie zelf, maar lager dan bij de inkepingen. Daarom zal in deze paragraaf apart naar deze balken gekeken worden. De maatgevende combinatie is de combinatie waarbij sneeuwbelasting maatgevend is. In figuur 41 is een overzicht gegeven van de momentenlijn. In figuur 42 is te zien om welke balken het gaat.



Figuur 41: Momentenlijn My, maatgevend voor de randen

Maatgevende waardes

$$M_y = -6.79 \text{ [kNm]}$$

$$M_z = -1.1 \text{ [kNm]}$$

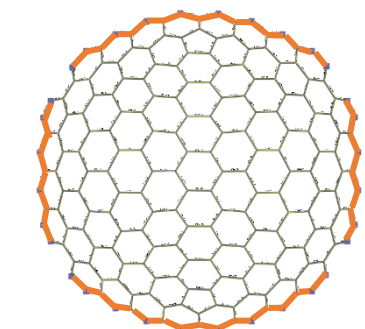
$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{6.79 * 10^6}{382812.5} = 17.74 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} = \frac{1.1 * 10^6}{164062.5} = 6.70 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Toets buiging

$$1) \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d,sneeuw}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d,sneeuw}} = \frac{17.74}{16.62} + 0.7 * \frac{6.70}{16.62} = 1.3 > 1.0$$

$$2) k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d,sneeuw}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d,sneeuw}} = 0.7 * \frac{17.74}{16.62} + \frac{6.70}{16.62} = 1.1 > 1.0$$



Figuur 42: Relatief hoge momenten in randen

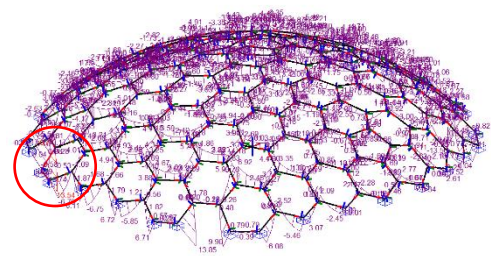
Voor de randbalken geldt dat de unity check net iets boven de 1 ligt. De werkelijke momenten zullen echter een factor 1.3 kleiner zijn, zoals beschreven in paragraaf 9.2.1.1. Door de momenten M_y en M_z te verkleinen met een factor 1.3, worden de unity checks respectievelijk 1.0 en 0.9. Op basis van deze gegevens kan theoretisch gesteld worden dat de constructie veilig is.

Echter liggen de waardes erg dicht bij de 1.0. Als er de mogelijkheid voor is, zou uit veiligheidsoverwegingen aan de randen balken gebruikt kunnen van één sterkteklasse hoger, C27. Dit zou de robuustheid van de constructie vergroten. Echter is dit niet noodzakelijk en kan de constructie ook geconstrueerd worden met het huidige resthout. De unity checks zijn immers, na correctie, kleiner dan 1.0.

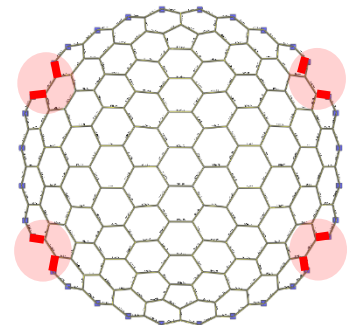
9.2.1.3 Inkepingen

In figuur 43 is de momentenlijn bij sneeuwbelasting weergegeven. Opmerkelijk zijn een aantal hoge waardes. Dit zijn exact de locaties van de inkepingen zoals weergegeven in figuur 44. Deze hoge momenten leiden tot unity checks groter dan 1.

Ter onderbouwing zal voor de combinatie sneeuwbelasting de unity check op buiging uitgerekend worden. Deze combinatie levert de hoogste momenten op de locatie van de inkepingen.



Figuur 43: Hoge momenten M_y bij de inkepingen.



Figuur 44: Balken met hoge momenten

Maatgevende waardes

$M_y = -13.85$ [kNm]

$M_z = -0.4$ [kNm]

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{13.85 \cdot 10^6}{382812.5} = 36.18 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} = \frac{0.4 \cdot 10^6}{164062.5} = 2.44 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Toets buiging

$$1) \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d,sneeuw}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d,sneeuw}} = \frac{36.18}{16.62} + 0.7 \cdot \frac{2.44}{16.62} = 2.28 \gg 1.0$$

$$2) k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d,sneeuw}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d,sneeuw}} = 0.7 \cdot \frac{36.18}{16.62} + \frac{2.44}{16.62} = 1.67 \gg 1$$

Zoals blijkt uit de unity checks liggen deze ver boven de 1.0. Nu is te onderbouwen dat de optredende momenten iets groter zijn dan in werkelijkheid. Echter is dit niet erg veel, zoals blijkt uit hoofdstuk 7. De geschematiseerde momenten zijn $24/18 = 1.3$ groter dan in werkelijkheid. Als deze factor wordt meegenomen komen de unity checks respectievelijk uit op 1.75 en 1.29 uit. Dit voldoet nog steeds niet.

Het is dus verstandig deze acht balken te ontwerpen met een hogere sterkteklasse. Gekozen wordt voor balken met dezelfde afmetingen om het patroon van het reciprocal frame niet te verstoren. Gebruik zal dan gemaakt moeten worden van balken met sterkteklasse D60. Onderstaand zal de toets nogmaals uitgevoerd worden.

Nieuwe toets buiging

$$f_{m,d_sneeuw_nieuw} = \frac{f_{m,k} * k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{60 * 0.9}{1.3} = 41.54 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$1) \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d_sneeuw_nieuw}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d_sneeuw_nieuw}} = \frac{36.18}{41.54} + 0.7 * \frac{2.44}{41.54} = 0.91 < 1.0$$

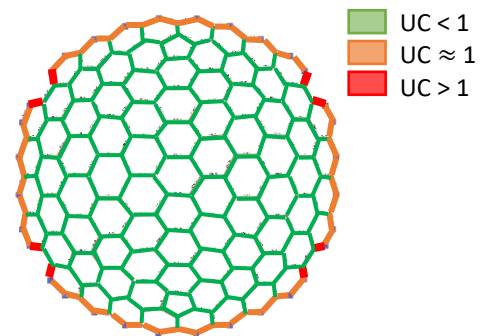
$$2) k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d_sneeuw}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d_sneeuw}} = 0.7 * \frac{36.18}{41.54} + \frac{2.44}{41.54} = 0.67 < 1.0$$

Zoals blijkt voldoen de balken nu wel op buiging.

9.2.1.4: Overzicht toets op buiging

Aangezien in de vorige deelparagrafen steeds een gedeelte van de constructie getoetst is op buiging, zal in figuur 45 een overzicht gegeven worden van de totale constructie.

In de rode gedeeltes zullen balken toegepast moeten worden met een sterkteklasse D60. In de oranje gedeeltes, indien mogelijk balken met een sterkte klasse C27.



Figuur 45: Overzicht unity checks buiging

9.2.2 Dwarskracht

Wat betreft de dwarskracht dient gekeken te worden of de schuifspanning de toelaatbare schuifspanning in de balk overschrijdt. De maatgevende dwarskracht treedt op bij fundamentele combinatie 2, waarbij de sneeuwbelasting maatgevend is. De waarde van de dwarskracht is dan 8880 [N]. Dit is de grootste dwarskracht in de gehele constructie. De locatie is weergegeven in figuur 46.

Toets volgens de norm NEN-EN 1995:

$$\frac{\tau_{v,d}}{f_{v,d}} \leq 1$$

Waarden

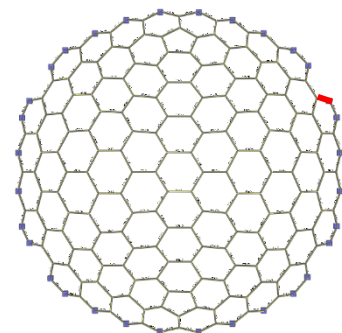
$$k_{mod} = 0.9$$

$$\gamma_m = 1.3 \text{ (solid timber)}$$

$$f_{v,k} = 4.0 \text{ (zie tabel 2)}$$

$$\tau_{v,d} = \frac{1.5 * V_{ed}}{b * h} = \frac{1.5 * 8880}{75 * 175} = 1.01 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (\text{NEN-EN 1995})$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k} * k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{4.0 * 0.9}{1.3} = 2.77 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (\text{Soons et al., 2014})$$



Figuur 46: Maatgevende staaf
Dwarskracht

Toets

$$\frac{\tau_{v,d}}{f_{v,d}} = \frac{1.01}{2.77} = 0.36 < 1.0$$

Zoals blijkt uit de unity check is de schuifspanning in de uitkepende staaf lager dan de sterkte van de staaf zelf. De volledige constructie zal dus voldoen op schuifsterkte. Dit betekent dat de constructie voldoet op dwarskracht.

9.2.3 Normaalkracht

Wat betreft de normaalkracht zijn drie toetsen van belang. Enerzijds moet de staaf voldoen op druksterkte. Anderzijds zal gekeken worden naar de staven, belast op trek. Tot slot zal gekeken worden naar druk, loodrecht op de vezelrichting.

Wat betreft de op druk belaste staven is de maatgevende belastingcombinatie de windbelasting met onderdruk. Wat betreft de op trek belaste staven is windbelasting met overdruk maatgevend.

1. Op druk belaste staven, evenwijdig aan vezelrichting

De maatgevende staaf is weergegeven in figuur 47.

Toets volgens de norm NEN-EN 1995:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d}$$

Waarden

$$F_{c,0,d} = -32.49 \text{ [kN]} = -32490 \text{ [N]}$$

$$A = 75 * 175 = 13125 \text{ [mm}^2\text{]}$$

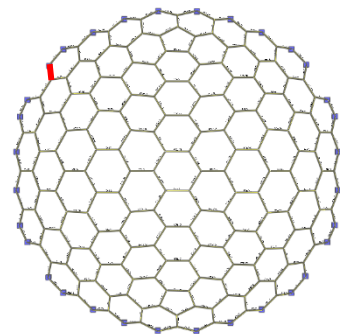
$$k_{mod} = 1.1 \text{ (windbelasting)}$$

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} * k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{21 * 1.1}{1.3} = 17.78 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{F_{c,0,d}}{A} = \frac{32490}{13125} = 2.48 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Toets

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{2.48}{17.78} = 0.14 < 1.0$$



Figuur 47: Maatgevende staaf
druk belasting loodrecht op staaf

Voor deze check geldt evenals bij de dwarskracht, dat dit de hoogste drukkracht was die in de constructie kan voorkomen. Dit betekent dat alle staven voldoen aan het criteria van de druk.

2. Op trek belaste staven, evenwijdig aan vezelrichting

De maatgevende staaf is weergegeven in figuur 48.

Toets volgens de norm NEN-EN 1995:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d}$$

Waarden

$$F_{t,0,d} = 10.80 \text{ [kN]} = 10800 \text{ [N]}$$

$$A = 75 * 175 = 13125 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$k_{mod} = 1.1 \text{ (windbelasting)}$$

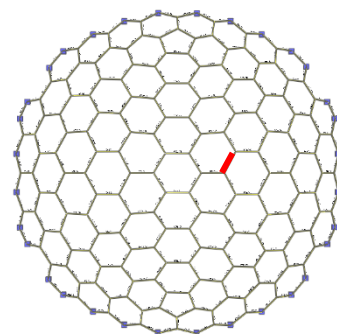
$$f_{t,0,d} = \frac{f_{t,0,k} * k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{14 * 1.1}{1.3} = 11.84 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{F_{t,0,d}}{A} = \frac{10800}{13125} = 0.82 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Toets

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} = \frac{0.82}{11.84} = 0.07 \ll 1.0$$

De staven voldoen dus ruimschoots op trek, evenwijdig aan de vezelrichting.



Figuur 48: Maatgevende staaf
trek belasting loodrecht op staaf

3. Druk, loodrecht op de vezelrichting

Doordat de constructie een reciprocal frame is, veroorzaken de op elkaar liggende balken een drukkracht, loodrecht op de vezelrichting. Dit leidt tot spanningen. Ook deze moeten getoetst worden. Door de schematisering van de koepel zijn echter de krachten in de knopen niet exact te bepalen. Bekend is uit hoofdstuk 7, dat de dwarskracht binnen in een knoop tweemaal zo hoog is als de dwarskracht in de geschematiseerde knoop. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de kracht die de balk overbrengt op de volgende balk gelijk is aan de dwarskracht. Deze is maximaal wanneer de sneeuwbelasting maatgevend is en is dan gelijk aan 8880 [N], als beschreven in paragraaf 9.2.2.

Toets volgens de norm NEN-EN 1995:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} f_{c,90,d}$$

Waarden

$$F_{c,90,d} = 8880 \text{ [N]}$$

$$l = b = 75 \text{ [mm]}$$

$$l_1 = 1650 \text{ [mm]}, \text{ verkregen uit Grasshopper.}$$

$$a = 637 \text{ [mm]}$$

$$h = 175 \text{ [mm]}$$

$$l_{eff} = l + \min(60; a; l; l_1 * 0.5) = 135 \text{ [mm]}$$

$$A_{eff} = l_{eff} * b = 135 * 75 = 10125 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$k_{c,90} = 1.5 \text{ (waarde voor naaldhout als geldt dat } l_1 \geq 2 * h\text{).}$$

$$k_{mod} = 1.1 \text{ (windbelasting)}$$

$$f_{c,90,d} = \frac{f_{c,90;k} * k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{2.5 * 1.1}{1.3} = 2.12 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

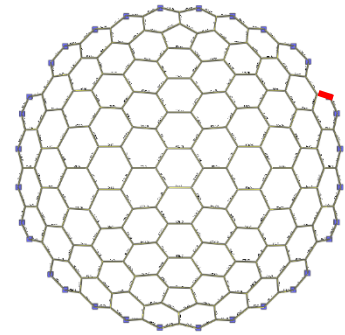
$$k_{c,90} f_{c,90,d} = 1.5 * 2.12 = 3.18 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{eff}} = \frac{8880}{10125} = 0.88 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

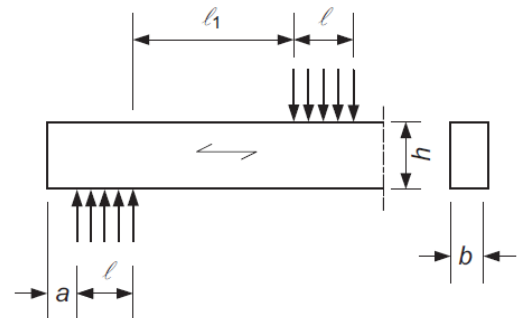
Toets

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,90} f_{c,90,d}} = \frac{0.88}{3.18} = 0.42 < 1.0$$

De constructie voldoet dus ook op druk loodrecht op de vezelrichting.



Figuur 49: Maatgevende staaf druk loodrecht op vezelrichting



Figuur 50: Definitie verschillende parameters (NEN-EN 1995)

9.2.4 Combinatie normaalkracht en buiging

Doordat de balken belast worden op een combinatie van normaalkracht en moment, zal ook gekeken worden naar de combinatie van normaalkracht en moment. Hierbij zullen wederom het middengedeelte, de randbalken en de acht balken van de inkepingen getoetst worden.

Toets 1: Middengedeelte

Allereerst wordt het middengedeelte getoetst, zoals weergegeven in figuur 38. De maatgevende belastingcombinatie is die, waarbij sneeuwbelasting maatgevend is. In figuur 51 is de getoetste staaf weergegeven.

Krachten

Moment M_y : 6.0 [kNm]

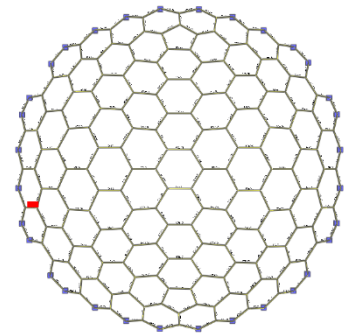
Moment M_z : 0.3 [kNm]

Normaalkracht: -68.43 [kN]

Uit te voeren toets volgens NEN-EN 1995:

$$1) \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$2) \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$



Figuur 51: Maatgevende staaf combinatie druk en buiging middengedeelte.

Waarden

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{6.0 \cdot 10^6}{382812.5} = 15.67 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} = \frac{0.3 \cdot 10^6}{164062.5} = 1.83 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N}{A} = \frac{68.43 \cdot 10^3}{75 \cdot 175} = 5.21 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k \cdot k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{21 \cdot 0.9}{1.3} = 14.53 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$f_{m,d,sneeuw} = 16.62 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$k_c = 0.7 \text{ (aanname)}$$

Toets

$$1) \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d,sneeuw}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d,sneeuw}} = \left(\frac{5.21}{0.7 \cdot 14.53} \right)^2 + \frac{15.67}{16.62} + 0.7 \frac{1.83}{16.62} = 1.27$$

$$2) \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d,sneeuw}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d,sneeuw}} = \left(\frac{5.21}{0.7 \cdot 14.53} \right)^2 + 0.7 \frac{15.67}{16.62} + \frac{1.83}{16.62} = 1.0$$

Zoals uit de toetsing blijkt liggen de unity checks net iets boven de 1.0. Als echter de momenten verminderd worden met een factor 1.3, zoals beschreven staat in paragraaf 9.2.1.1, dan worden de unity checks respectievelijk 1.0 en 0.85, wat betekent dat het middengedeelte voldoet op combinatie van moment en normaalkracht.

Toets 2: Randbalken

Ten tweede zullen de randstaven getoetst worden, zoals weergegeven in figuur 42. De maatgevende belastingcombinatie is die, waarbij sneeuwbelasting maatgevend is. In figuur 52 is de getoetste, maatgevende staaf weergegeven.

Krachten

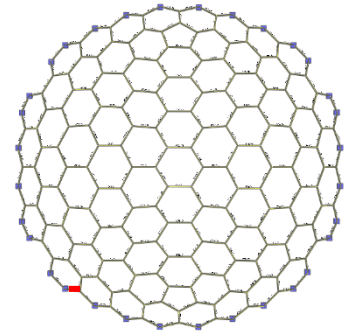
Moment M_y : -6.79 [kNm]

Moment M_z : -1.1 [kNm]

Normaalkracht: -67.58 [kN]

Uit te voeren toets volgens NEN-EN 1995:

$$\begin{aligned} 1) & \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \\ 2) & \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \end{aligned}$$



Figuur 52: Maatgevende staaf combinatie druk en buiging bij de randbalken

Waarden

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{6.79 \cdot 10^6}{382812.5} = 17.73 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} = \frac{1.1 \cdot 10^6}{164062.5} = 6.70 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N}{A} = \frac{67.58 \cdot 10^3}{75 \cdot 175} = 5.15 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{21 \cdot 0.9}{1.3} = 14.53 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$f_{m,d,sneeuw} = 16.62 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$k_c = 0.7 \text{ (aanname)}$$

Toets

$$\begin{aligned} 1) & \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d,sneeuw}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d,sneeuw}} = \left(\frac{5.15}{0.7 \cdot 14.53} \right)^2 + \frac{17.73}{16.62} + 0.7 \frac{6.70}{16.62} = 1.6 \\ 2) & \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d,sneeuw}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d,sneeuw}} = \left(\frac{5.15}{0.7 \cdot 14.53} \right)^2 + 0.7 \frac{17.73}{16.62} + \frac{6.70}{16.62} = 1.4 \end{aligned}$$

Zoals blijkt uit de toetsing voldoen de randen niet als er een combinatie van moment en normaalkracht optreedt. Daarom zullen de randbalken met een hogere sterkteklasse gebouwd moeten worden. Balken met een sterkteklasse C50 leveren respectievelijk een unity check van 0.78 en 0.69 op. Rekening houden met het feit dat de momenten een factor 1.3 kleiner zullen zijn, is dit een veilige dimensionering. De randbalken zullen dus gebouwd moeten worden met sterkte C50.

Toets 3: Balken in de inkeping

Voor toets 3 worden de acht balken bij de inkepingen getoetst, zoals weergegeven in figuur 44. De maatgevende combinatie hiervoor is de combinatie waarbij sneeuwbelasting maatgevend is. In figuur 53 is de maatgevende balk weergegeven.

Krachten

Moment y: 13.85 [kNm]

Moment z: 0.3 [kNm]

Normaalkracht: -66.48 [kN]

Waarden

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N}{A} = \frac{66.48 \cdot 10^3}{75 \cdot 175} = 5.07 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

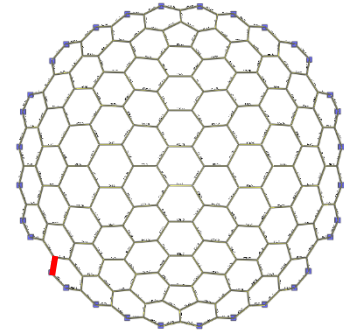
$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{13.85 \cdot 10^6}{382812.5} = 36.18 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} = \frac{0.3 \cdot 10^6}{164062.5} = 1.83 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{60 \cdot 0.9}{1.3} = 41.54 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (\text{Sterkteklasse D60})$$

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{32 \cdot 0.9}{1.3} = 22.15 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$k_c = 0.7 \quad (\text{aanname})$$



Figuur 53: Maatgevende staaf combinatie druk en buiging bij inkeping.

Toets

$$1) \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d,sneeuw}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d,sneeuw}} = \left(\frac{5.07}{0.7 \cdot 22.15} \right)^2 + \frac{36.18}{41.54} + 0.7 \frac{1.83}{41.54} = 1.0$$

$$2) \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d,sneeuw}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d,sneeuw}} = \left(\frac{5.07}{0.7 \cdot 22.15} \right)^2 + 0.7 \frac{36.18}{41.54} + \frac{1.83}{41.54} = 0.76$$

Zoals uit de unity check blijkt ligt de eerste toets net iets boven de 1.0. Redenerend vanuit het feit dat de momenten iets hoger liggen in het geschematiseerde model kan gesteld worden dat de balk veilig is. Aangezien de balk toch aangepast dient te worden, zal geadviseerd worden om gebruik te maken van een balk met sterkteklasse D70. Onderstaand zal de unity check voor balken met sterkteklasse D70 worden weergegeven.

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{70 \cdot 0.9}{1.3} = 48.46 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{34 \cdot 0.9}{1.3} = 23.54 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$1) \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d,sneeuw}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d,sneeuw}} = \left(\frac{5.07}{0.7 \cdot 23.54} \right)^2 + \frac{36.18}{48.46} + 0.7 \frac{1.83}{48.46} = 0.86$$

$$2) \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d,sneeuw}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d,sneeuw}} = \left(\frac{5.07}{0.7 \cdot 23.54} \right)^2 + 0.7 \frac{36.18}{48.46} + \frac{1.83}{48.46} = 0.66$$

De unity checks zijn nu kleiner dan 1.0, wat betekent dat de constructie veilig is.

9.3 Stijfheid

De toets op stijfheid zal plaatsvinden in de bruikbaarheidsgrenstoestand. Dit houdt in dat er geen belastingfactoren zullen worden toegepast.

9.3.1 Belangrijke waarden

In de onderstaande tabel is per belastingcombinatie aangegeven wat de maximale doorbuiging bij een individuele balk is en wat de maximale knoopverplaatsing is. Een negatief teken betekent een buiging naar boven.

Combinatie	Doorbuiging individuele balk [mm]	Maximale knoopverplaatsing [mm]
Sneeuwbelasting maatgevend	4.5	258.1
Opgelegde belasting maatgevend	2.9	174.6
Windbelasting onderdruk	-3.6	-127.2
Windbelasting overdruk	-5.7	-293.7

Tabel 11: Belangrijke waarden stijfheid

Uit tabel 11 blijkt dat zowel voor doorbuiging van een individuele balk als voor het geheel de belastingcombinatie, waarbij windbelasting overdruk niet in de gelijktijdigheid staat, maatgevend is.

9.3.2 Doorbuiging

De uiteindelijke doorbuiging kan bepaald worden aan de hand van de volgende formule:

$$w_{net,fin} = w_{inst} + w_{creep} - w_c \quad (\text{NEN-EN 1995})$$

Doordat de constructie gemaakt is van resthout kan worden aangenomen dat er geen restzettingen meer optreden. Deze hebben namelijk in de oorspronkelijke constructie al plaatsgevonden. Tevens wordt er geen zeeg aangebracht, wat ertoe leidt dat $w_{net,fin} = w_{inst}$.

Volgens de eurocode geldt de onderstaande eis, met betrekking tot doorbuiging van een ligger op twee steunpunten:

$$w_{net,fin} \leq l/300 - l/500 \quad (\text{NEN-EN 1995})$$

1. Individuele balk

De balken hebben gemiddeld een lengte van 2500 mm. Dit houdt in dat de maximale toegestane doorbuiging van een losse balk gelijk is aan $2500/300 = 8.33$ [mm]. De maatgevende belastingcombinatie is de windbelasting met overdruk. In figuur 54 is een overzicht van de staafdoorbuigingen gegeven.

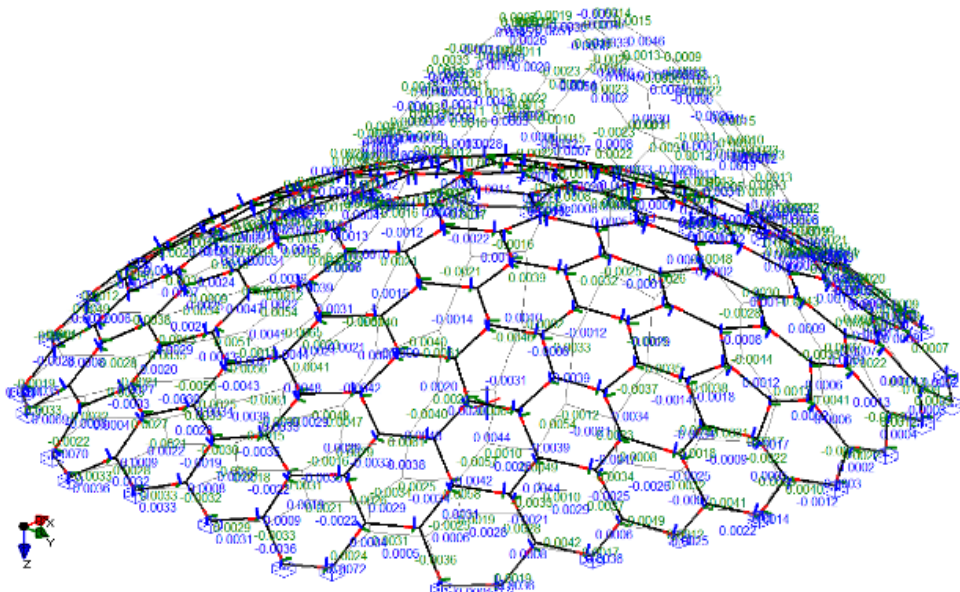
Zoals blijkt uit tabel 11 is de maximale staafdoorbuiging gelijk aan 5.7 [mm]. Dit levert een unity check van $5.7/8.3 = 0.68$. De constructie voldoet dus ruimschoots aan het criterium van de doorbuiging van individuele balken.

2. Totale constructie

De totale overspanning van de constructie is 33.5 meter. Echter is het een cirkelvormige constructie. De totale overspanning voor de doorbuiging is dus gelijk aan het gedeelte van de omtrek boven de grond. Met behulp van eenvoudige goniometrie is uit figuur 19 te bepalen dat het deel boven de grond 93/360 deel is. Dit resulteert in een omtrek van $(93/360) * 2 * \pi * 33500 = 54663$ [mm].

Dit houdt in dat de maximale toegestane knoopverplaatsing gelijk is aan $54663/300 = 182$ [mm]. Uit tabel 11 blijkt dat de maximale knoopverplaatsing gelijk is aan 293.7 [mm]. Dit levert een unity check van $293.7 / 182 = 1.6$ wat groter is dan 1. Op basis van deze gegevens zou geconcludeerd moeten worden dat de constructie niet voldoet op stijfheid.

Echter, zoals geconcludeerd werd uit hoofdstuk 7, reageert het reciprocal frame een stuk stijver dan het geschematiseerde model. Het verschil was een factor $0.0247 / 0.0028 = 8.82$. Stel in werkelijkheid is, in het volledige correcte model, deze factor 80% kleiner. Dan blijft het nog een factor van $8.82 * 0.2 = 1.764$ over. Als de maximale optredende doorbuiging gedeeld wordt door deze factor, ontstaat een maximale knoopverplaatsing van $293.7 / 1.764 = 166$ [mm]. Dit levert een unity check van $166 / 182 = 0.91$. In werkelijkheid zal de reductiefactor vermoedelijk niet 80% lager zijn, maar een stuk minder. Op basis hiervan kan met grote zekerheid gesteld worden dat het ontwerp voldoet op stijfheid.



Figuur 54: Maatgevende combinatie staafdoorbuigingen

9.4 Stabiliteit

De toetsing van stabiliteit vindt plaats in de uiterste grenstoestand en daarmee inclusief belastingfactoren. De toetsingen zullen wederom plaats vinden aan de hand van de norm NEN-EN 1995. Er zal getoetst worden op globale stabiliteit van de constructie en lokale stabiliteit van staven.

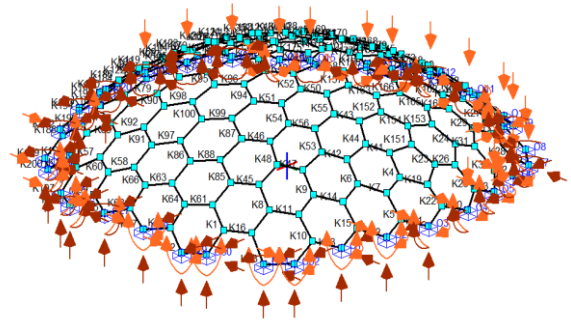
9.4.1 Globale stabiliteit

Bij globale stabiliteit van een koepel dient enerzijds gekeken te worden of er trek in de fundering op treedt en anderzijds of de koepel kan uitknikken.

Trek in de fundering

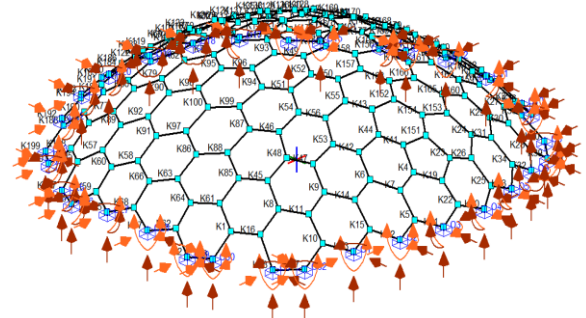
Bij globale stabiliteit wordt gecontroleerd of ergens in de constructie trek optreedt. De enige belastingcombinaties waarbij het mogelijk zou kunnen zijn dat er trek in de fundering optreedt is bij windbelasting met over- of onderdruk. Bij deze beide combinaties is namelijk een belasting naar boven gericht aanwezig.

In figuur 55 is de belastingcombinatie weergegeven met overdruk. Duidelijk is te zien dat de helft van de opleggingen een omlaag gerichte opleggingsreactie heeft, wat betekent dat er trek optreedt. Echter is de maximale waarde van deze, omlaag gerichte, oplegreacties 1.897 [kN]. Dit is goed op te lossen met behulp van een fundering. Stalen injectiepalen kunnen bijvoorbeeld 1000-1200 [kN] opnemen (Rijkswaterstaat bouwdienst, 2005). Deze trekkrachten zijn dus geen probleem.



Figuur 55: Oplegreacties, wind met overdruk

In figuur 56 zijn de oplegreacties weergegeven van wind met onderdruk. Te zien is dat er nergens trek optreedt in de fundering.

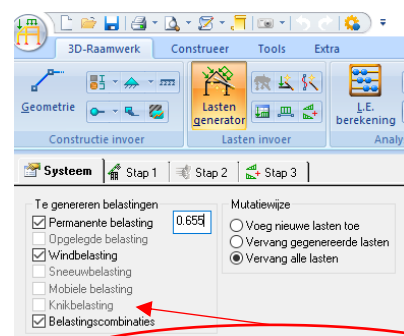


Figuur 56: Oplegreacties, wind met onderdruk

Concluderend kan gesteld worden dat de constructie niet verzwaard hoeft te worden. De kleine aanwezige trekkrachten bij wind met overdruk kunnen eenvoudig worden opgevangen door een fundering.

Uitknikken van de koepel

Bij koepels kan het verschijnsel van plotseling uitknikken optreden. Een verschijnsel wat normaalgesproken berekend dient te worden. Door de beperkingen van de matrixframe versie is het echter niet mogelijk om dit te onderzoeken. Bij de volledige versie is er een automatische kniklast rekentool, zoals weergegeven in figuur 57. Bij een definitief onderzoek zou hier dus naar gekeken moeten worden.



Kniklast niet aanklikbaar

Figuur 57: Kniklast in matrixframe

9.4.2 Lokale stabiliteit

Liggers onderworpen aan een combinatie van druk en buiging moeten getoetst worden op kip, aldus de norm NEN-EN 1995. Dit zal dan ook in deze paragraaf plaats vinden.

Aan de hand van tabel 10 is een schatting gemaakt in welke belastingcombinatie de maatgevende combinatie van moment en dwarskracht zit. Dit omdat het niet mogelijk is om alle staven en combinaties handmatig te controleren. De maatgevende balken die getoetst worden zijn de balken bij de inkepingen en een balk met oorspronkelijke 'resthout-sterkte'. Doordat, na de toetsing op combinatie normaalkracht en moment, de randbalken versterkt zijn, zullen deze niet meer maatgevend zijn. De balken die getoetst worden zijn te zien in figuur 58 en 59.

Combinatie 1

De eerste combinatie die gecontroleerd wordt is de maatgevende combinatie van normaalkracht en dwarskracht in het 'middengedeelte'. De maatgevende balk is te zien in figuur 58. De maatgevende combinatie is de combinatie waarbij sneeuwbelasting maatgevend is.

Krachten

Moment γ : 5.48 [kNm]

Normaalkracht: 54.68 [kN]

Uit te voeren toets volgens NEN-EN 1995:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit}f_{m,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} \leq 1$$

Waarden

$E_{0.05} = 7400$ [N/mm²] (zie tabel 2)

$l_{ef} = 0.9 * l = 0.9 * 2500 = 2250$ [mm] (NEN-EN 1995)

$b = 75$ [mm]

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0.78 * b^2}{h * l_{ef}} * E_{0.05} = \frac{0.78 * 75^2}{175 * 2250} * 7400 = 82.46 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{24}{82.46}} = 0.54$$

$k_{crit} = 1$ (want $\lambda_{rel,m} < 0.75$)

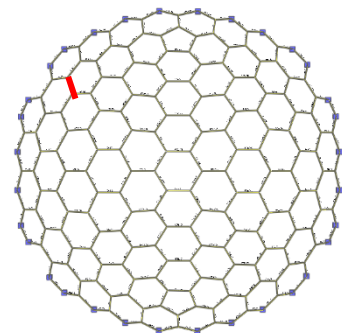
$$\sigma_{m,d} = \frac{My}{Wy} = \frac{5.48 * 10^6}{382812.5} = 14.32 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$f_{m,d} = k_{mod} * \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} = 0.9 * \frac{24}{1.3} = 16.62 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} * k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{21 * 0.9}{1.3} = 14.54 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{Ned}{A} = \frac{54.68 * 10^3}{75 * 175} = 4.17 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$k_{c,z} = 0.7$ (aanname)



Figuur 58: Maatgevende staaf combinatie druk en buiging

Toets

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit}f_{m,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} = \left(\frac{14.32}{1 * 16.62}\right)^2 + \frac{4.17}{0.7 * 14.54} = 1.2$$

Zoals blijkt uit de toets komt de unity check iets boven de 1 uit. Echter moet opgemerkt worden dat de werkelijke momenten iets lager zijn, dan in het gebruikte model. Dit is te zien in hoofdstuk 7. Dit vanwege de schematisering. Verlaging van het moment met een factor 1.3 levert een unity check van 0.85 op. Op basis hiervan mag geconcludeerd worden dat de lokale stabiliteit voor combinatie 1 in orde is.

Combinatie 2

Voor combinatie 2 is een balk gepakt in één van de uitkepingen. De maatgevende combinatie hiervoor is de combinatie waarbij sneeuwbelasting maatgevend is. De maatgevende balk is te zien in figuur 59.

Krachten

Moment: 6.0 [kNm]

Normaalkracht: -66.48 [kN]

Waarden

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N}{A} = \frac{66.48 \cdot 10^3}{75 \cdot 175} = 5.07 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{13.85 \cdot 10^6}{382812.5} = 36.18 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{70 \cdot 0.9}{1.3} = 48.46 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (\text{Sterkteklasse D70})$$

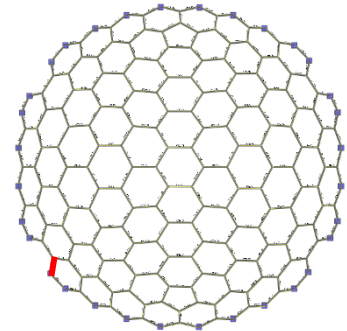
$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{34 \cdot 0.9}{1.3} = 23.54 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$k_{crit} = 1.0 \quad (\text{zie combinatie 1})$$

$$k_{c,z} = 0.7$$

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} f_{m,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} = \left(\frac{36.18}{1 \cdot 48.46}\right)^2 + \frac{5.07}{0.7 \cdot 23.54} = 0.87 < 1.0$$

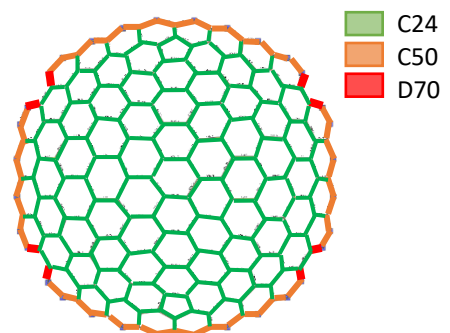
De unity check ligt onder de 1, waardoor gesteld kan worden dat ook combinatie 2 veilig is wat betreft kip.



Figuur 59: Maatgevende staaf combinatie druk en buiging

9.5 Conclusie

Zoals blijkt uit de paragrafen 9.1 tot 9.4 is de meest cruciale check bij een reciprocal frame, de check op buiging in combinatie met normaalkracht. Dit is ook in overeenstemming met de theorie van Larsen, zoals beschreven in paragraaf 3.3, dat bij hellende frames de krachtsafdracht voornamelijk plaatsvindt door middel van buiging en axiale kracht (Larsen, 2014). Concluderend kan gezegd worden dat de constructie voldoet op sterkte, stijfheid en stabiliteit indien deze gebouwd wordt met de sterkteklassen onderstaand in figuur 60 weergegeven.



Figuur 60: Overzicht sterkteklassen balken

10. Verbindingen |

In dit hoofdstuk zal achtereenvolgens de keuze voor het type verbinding, de dimensionering van de verbinding en tot slot een detailtekening van de verbinding worden weergegeven. Afsluitend zal getoond worden hoe de glasplaten op het dak bevestigd kunnen worden.

10.1 Keuze voor verbinding

Zoals in hoofdstuk 3.2.2 beschreven is zijn er vier type verbindingen mogelijk: Inkeping, nagelen/bouten, samenbinden of wrijving. Wrijving is geen verbindingsmethode om een veilige, langdurige constructie te ontwerpen. Deze verbindmethode is meer voor korte, kleinschalige constructies. Ook samenbinden is geen geschikte oplossing. Enerzijds vergroot het erg de constructieduur. Anderzijds is het esthetisch niet mooi.

De keuze die dan overblijft is tussen inkeping of nagelen/bouten. Nu blijkt de toetsing van een inkeping een erg complexe aangelegenheid. Tevens omdat dit in het bachelor programma nog niet gegeven wordt, maar pas in het masterprogramma. Gekozen wordt daarom voor een geboute verbinding. Dit vanwege de grote hoogte van de balken. Bouten kunnen aangetrokken worden waardoor de verbinding steviger wordt.

10.2 Dimensionering van de verbinding

Vooraf dient het aantal bouten per verbinding bepaald te worden. Gekozen wordt voor een enkele bout per verbinding. De reden hiervoor is dat een reciprocal frame vanuit zichzelf al erg stijve knopen heeft. Een enkele bout per verbinding zal dus voldoende zijn. Voor de acht balken, beschreven in paragraaf 9.2.1.3 zullen andere bouten gebruikt worden dan voor de ander verbindingen.

10.2.1 Constructie, uitgezonderd inkepingen

In deze deelparagraaf worden de bouten bepaald voor de verbinding van de constructie, uitgezonderd de acht balken beschreven in paragraaf 9.2.1.3.

10.2.1.1 Toegepaste bout

8.8 – M8

Binnendraad kerndiameter $d_{kern} = 6.65$ [mm] (bouwsales, 2018)

Treksterkte $f_{u,k} = 8 * 100 = 800$ [N/mm²]

Vloeigrens $f_{y,bout} = 8 * 8 * 10 = 640$ [N/mm²]

10.2.1.2 Bepaling $F_{v,Rk}$

Voor het bepalen van de karakteristieke sterkte per snede voor een hout-hout verbinding dient de onderstaande vergelijking gebruikt te worden volgens de NEN-EN 1995.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right.$$

$f_{h,1,k,t1,d} = f_{h,2,k,t1,d}$ = karakteristieke stuiksterkte van het hout

$\beta = f_{h,2,k,t1,d} / f_{h,1,k,t1,d} = 1.0$

$t1 = t2$ = dikte van de houten balk = 175 [mm]

d = diameter van het verbindingsmiddel = 8 [mm]

$M_{y,Rk}$ = Karakteristieke vloeimoment van het verbindingsmiddel

$F_{ax,Rk}$ = De karakteristieke uittreksterkte van het verbindingsmiddel

Bepaling karakteristieke stuiksterkte hout

$f_{h,0,k} = 0.082(1-0.01d)\rho_k = 0.082(1 - 0.01*8) * 500 = 37.72 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

Bepaling karakteristieke vloeimoment verbindingsmiddel

$M_{y,Rk} = 0.3f_{u,k}d^{2.6} = 0.3*800*8^{2.6} = 53486.63 \text{ [Nmm]}$

Bepaling karakteristieke uittreksterkte van het verbindingsmiddel

Zelfstandig opgestelde formule, aangezien NEN-EN 1995 geen formule geeft voor de karakteristieke uittreksterkte voor bouten.

$F_{ax,Rk} = A_{s,kern}f_{u,k} = \frac{1}{4}\pi d_{kern}^2 f_{u,k} = \frac{1}{4} * \pi * 6.65^2 * 800 = 27786 \text{ [N]}$

Karakteristieke sterkte per snede

Invoering van de bovenstaande waardes resulteert in de onderstaande vergelijking:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 52808 \\ 52808 \\ 28820 \\ 25749 \\ 25749 \\ 7033 \end{cases} = 7033 \text{ [N]}$$

10.2.1.3 Randafstand

De bouten die worden toegepast hebben een diameter van 8 millimeter. De minimale afstand van het boorgat tot de rand moet minimaal $4d = 32 \text{ mm}$ zijn. De toegepaste balk heeft een breedte van 75 [mm]. De ruimte tussen bout en rand is dus $(75 - 8)/2 = 33.5 \text{ millimeter}$. Dit is groter dan de minimale 32 millimeter. De overige ruimte, 1.5 millimeter per zijde is voldoende voor het boren van de gaten.

De eindafstanden hebben geen invloed. Dit omdat deze veel groter zijn dan de minimale $4d$.

10.2.1.4 Toets

De maximaal optredende dwarskracht, uitgezonderd de acht balken beschreven in paragraaf 9.2.1.3, is 4.77 [kN]. Hierbij is de sneeuwbelasting maatgevend.

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rk} / \gamma_{m2}} \leq 1 \quad (\text{NEN-EN 1995})$$

$$\frac{4.77 * 10^3}{7033 / 1.25} = 0.85 < 1.0$$

De unity check is kleiner dan 1.0, wat betekent dat de verbinding veilig is.

10.2.2 Inkepingen

In deze deelparagraaf worden de verbindingen voor de acht balken, beschreven in paragraaf 9.2.1.3, gedimensioneerd.

10.2.2.1 Toegepaste bout

8.8 – M10

Binnendraad kerndiameter $d_{kern} = 8.38$ [mm] (bouwsales, 2018)

Treksterkte $f_{u,k} = 8 * 100 = 800$ [N/mm²]

Vloeigrens $f_{y,bout} = 8 * 8 * 10 = 640$ [N/mm²]

10.2.2.2 Bepaling $F_{v,Rk}$

$f_{h,1,k,t1,d} = f_{h,2,k,t1,d}$ = karakteristieke stuiksterkte van het hout

$\beta = f_{h,2,k,t1,d} / f_{h,1,k,t1,d} = 1.0$

$t1 = t2$ = dikte van de houten balk = 175 [mm]

d = diameter van het verbindingsmiddel = 10 [mm]

$M_{y,Rk}$ = Karakteristieke vloeimoment van het verbindingsmiddel

$F_{ax,Rk}$ = De karakteristieke uittreksterkte van het verbindingsmiddel

Bepaling karakteristieke stuiksterkte hout

$f_{h,0,k} = 0.082(1 - 0.01d)\rho_k = 0.082(1 - 0.01*10) * 500 = 36.90$ [N/mm²]

Bepaling karakteristieke vloeimoment verbindingsmiddel

$M_{y,Rk} = 0.3f_{u,k}d^{2.6} = 0.3*800*10^{2.6} = 95545.72$ [Nmm]

Bepaling karakteristieke uittreksterkte van het verbindingsmiddel

$F_{ax,Rk} = A_{s,kern}f_{u,k} = \frac{1}{4}\pi d_{kern}^2 f_{u,k} = \frac{1}{4} * \pi * 8.83^2 * 800 = 48989$ [N]

Karakteristieke sterkte per snede

Invoering van de bovenstaande berekende waarden in de vergelijking, beschreven in paragraaf 10.2.1.2, levert de onderstaande waarde voor $F_{v,Rk}$.

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 64575 \\ 64575 \\ 38995 \\ 35418 \\ 35418 \\ 12353 \end{cases} = 12353 \text{ [N]}$$

10.2.1.3 Randafstand

De bouten die worden toegepast hebben een diameter van 10 millimeter. De minimale afstand van het boorgat tot de rand moet minimaal $4d = 40$ [mm] zijn. De toegepaste balk heeft een breedte van 75 [mm]. Dit is dus te smal om een goede verbinding te maken. Daarom wordt geadviseerd, aangezien deze acht balken niet van het resthout geproduceerd worden, te kiezen voor een doorsnede $b*h = 100 * 175$. Op deze wijze blijft er tussen de bout en de rand een afstand over van $(100 - 10) / 2 = 45$ [mm]. Dit maakt het mogelijk om tevens een boorgat te plaatsen.

De eindafstanden hebben wederom geen invloed.

10.2.1.4 Toets

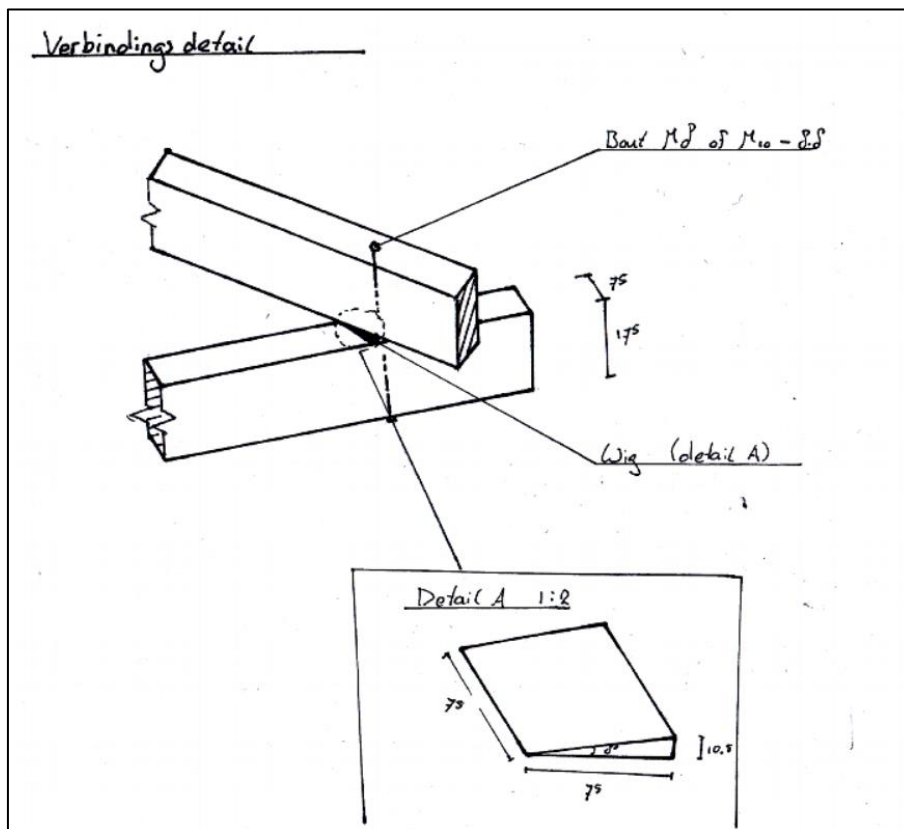
De maximaal optredende dwarskracht is 8880 [N].

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rk} / \gamma_{m2}} \leq 1 \quad (\text{NEN-EN 1995})$$
$$\frac{8880}{12353 / 1.25} = 0.9 < 1.0$$

De unity check is kleiner dan 1.0, wat betekent dat de verbinding veilig is.

10.3 Verbindingsdetail

In de onderstaande figuur 61 is een schets van de verbinding gemaakt. Doordat de balken iets hellend op elkaar liggen zullen wigjes tussen de balken worden toegevoegd. Dit maakt de verbinding esthetisch mooier. Tevens verbetert dit de krachtsoverdracht van de balken op elkaar.



Figuur 61: Verbindingsdetail

10.4 Bevestiging glasplaten op de constructie

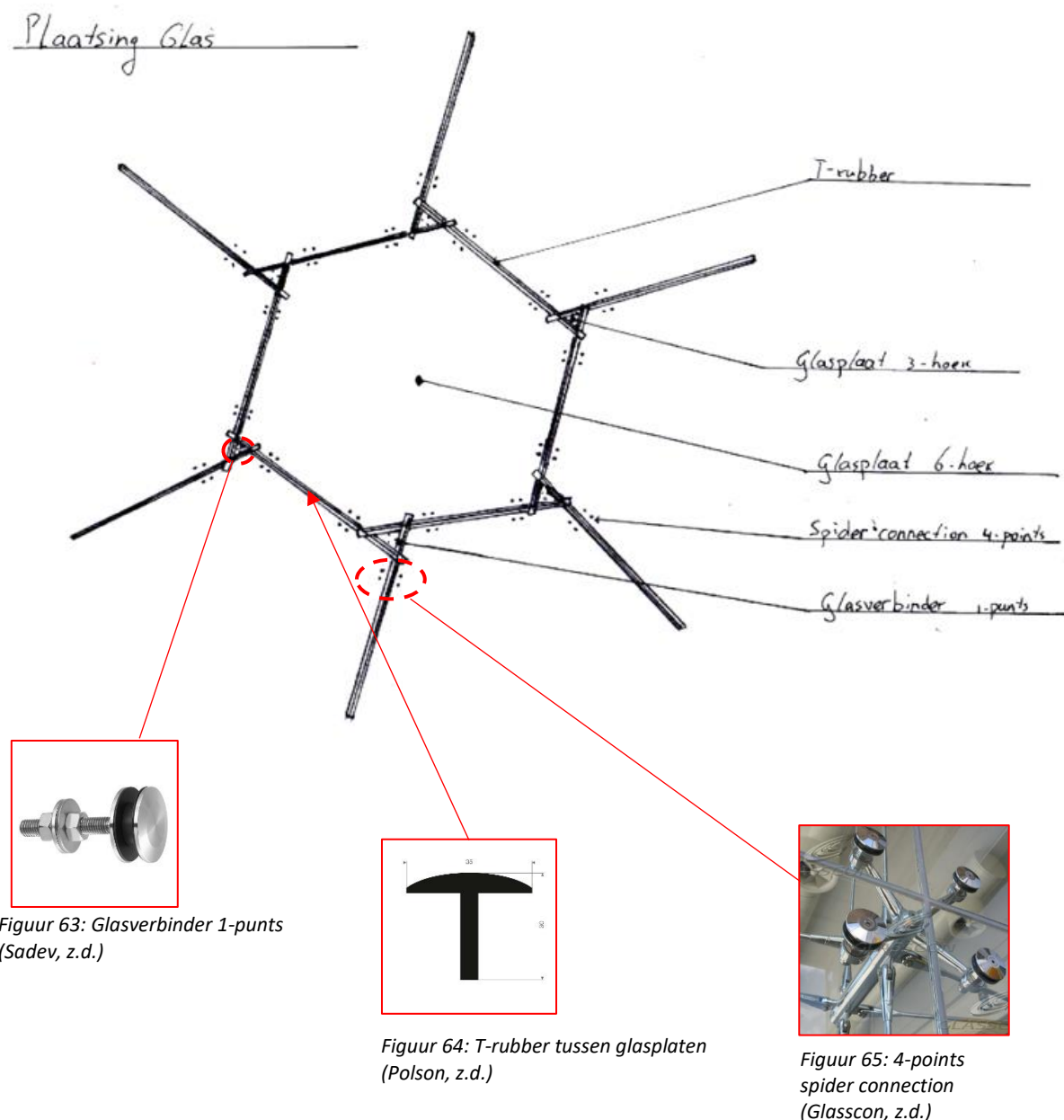
Het reciprocal frame zal worden opgedeeld in driehoeken en zeshoeken, onderstaand weergegeven in figuur 62.

De zeshoekige glasplaat zal verbonden worden met behulp van een '4-points spider connection'. Doordat deze zowel, in hoogte te verstellen is en tevens ook kan roteren, kan met één verbinder twee platen gekoppeld worden. Dit is weergegeven door aan beide kanten van de balk twee punten te zetten. Tevens is het verbindingsmiddel te zien in figuur 65. De verbindingen zullen ter plaatse op hoogte gesteld moeten worden.

De driehoekige glasplaten zullen vastgezet worden met behulp van 1-punts glasverbindingen. Dit is weergegeven met een enkel puntje. Tevens te zien in figuur 63.

De glasplaten worden onderling verbonden met behulp van een T-rubber. Dit zorgt ervoor dat het dak waterdicht is. Het T-rubber is te zien in figuur 64.

In bijlage 9 is een detail getekend van de verbinding tussen glas en constructie.



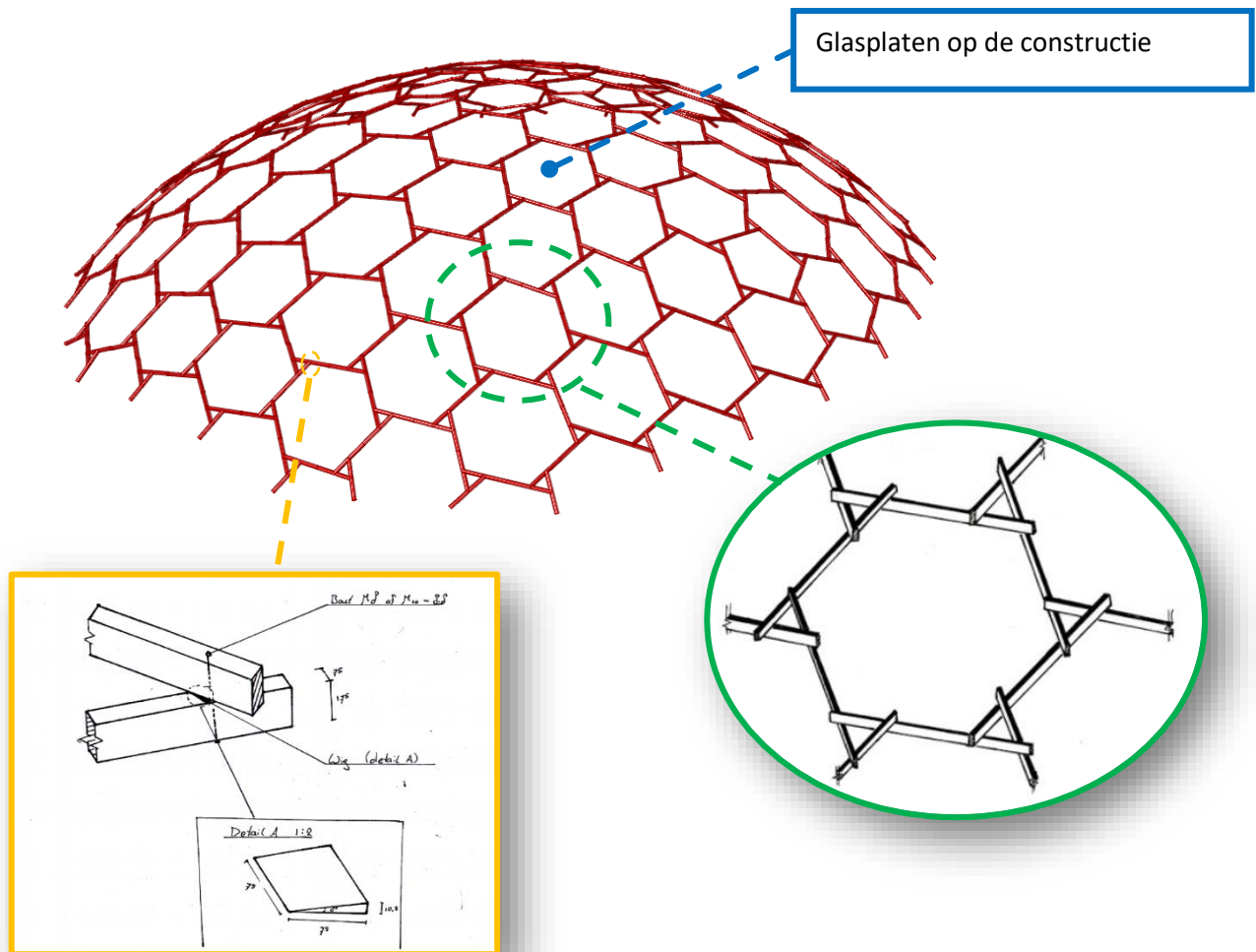
Figuur 62: Montage van de glasplaten

11. Definitief ontwerp

In dit hoofdstuk zal een overzicht gegeven worden van het definitieve ontwerp en de benodigde materialen ervoor.

11.1 Ontwerp

Onderstaand in figuur 66 is een 3D weergave van het gebruikte Grasshopper model weergegeven. Opgemerkt dient te worden dat de weergegeven balken rond zijn. Het werkelijke ontwerp bevat rechthoekige balken. In bijlage 9 is een technische tekening van het ontwerp weergegeven.



Figuur 66: Definitief ontwerp

11.2 Gebruikte hout

In de onderstaande tabel is weergegeven, welk hout uit de constructie hergebruikt kan worden. De overige materialen, glas inclusief bevestigingsmateriaal, kunnen niet hergebruikt worden.

Type	Aantal	Herbruikbaar (Ja / Nee)
C24 - 75 x 175 x 3000	224	Ja, volledig herbruikbaar (230 beschikbaar)
C50 - 75 x 175 x 3000	52	Nee
D70 - 100 x 175 x 3000	8	Nee

Tabel 12: Hergebruik resthout

11.3 Programma van eisen

In de onderstaande tabel 13 wordt per voorwaarde uit het programma van eisen aangegeven of het ontwerp voldoet. Geconcludeerd kan worden dat het ontwerp aan alle eisen voldoet.

	Voldaan (Ja / Nee)	Bewijs
Randvoorwaarde		
Het ontwerp is een koepel.	Ja	Zie het definitieve ontwerp in paragraaf 11.1.
Minimale hoogte centrum: 3.50 meter.	Ja	Hoogte centrum is 7.27 [m], zo blijkt uit figuur 19.
Minimale hoogte rand: 3 meter.	Ja	Zie figuur 35.
Minimale straal koepel: 14 meter.	Ja	De koepel heeft een straal van 16.76 [m]. Zie hiervoor figuur 19.
Bouwmateriaal: resthout Bethelkerk.	Grotendeels	Voor 79% bestaat het ontwerp uit resthout uit de Bethelkerk. Zie hiervoor tabel 12.
De constructie is een reciprocal frame.	Ja	Zie het definitieve ontwerp in paragraaf 11.1.
Eis		
Minimale ontwerplevensduur: 25 jaar.	Ja	Zie hiervoor de toegepaste veiligheidsfactoren in paragraaf 6.4.
Ontwerp is bestand tegen gevolgklasse CC2.	Ja	Zie hiervoor de toegepaste veiligheidsfactoren in paragraaf 6.4.
Het ontwerp is veilig.	Ja	Zie hiervoor de toetsing in hoofdstuk 9.
Het ontwerp is waterdicht.	Ja	Zie hiervoor de plaatsing van glas inclusief T-rubbers in paragraaf 10.4.
Het ontwerp is bestand tegen de optredende belasting: wind en sneeuwbelasting.	Ja	Zie hiervoor de toetsing in hoofdstuk 9.
Wens		
Het ontwerp ziet er esthetisch mooi uit.	Ja	Zie hiervoor tabel 3.

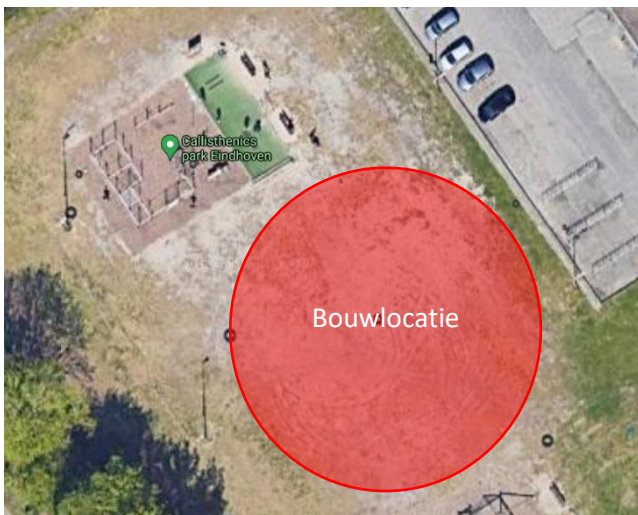
Tabel 13: Controle programma van eisen

12. Bouw

Aangezien een reciprocal frame een nog onbekender constructietype is, zal in dit hoofdstuk een globaal overzicht gegeven worden, hoe een reciprocal frame gebouwd kan worden.

1. Start: losse unit

Zoals in hoofdstuk 3 beschreven is, werkt een reciprocal frame door wederkerige ondersteuning. Het grote voordeel hiervan is dat tijdens de bouw een losse unit erg stijf reageert, waar gebruik van gemaakt kan worden. In de figuur 68 is te zien hoe deze startunit eruitziet. De balken dienen direct verbonden te worden met bouten om te voorkomen dat het frame gedurende de bouw haar vorm verliest. Het losse frame dient op het grote veld, naast het sportveld gebouwd te worden, zoals weergegeven in figuur 67.

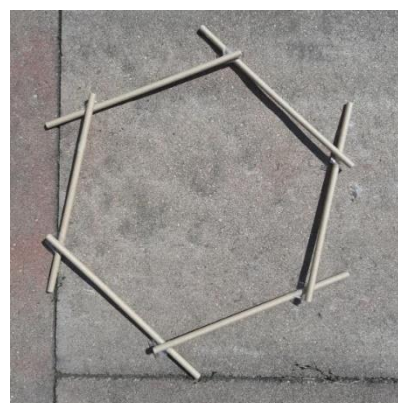


Figuur 67: Bouwlocatie (Google Maps, 2021)

2. Vervolg: uitbreiding

Nadat een enkele unit gebouwd is, kan de losse unit uitgebreid worden. Door de ligging van de balken op elkaar, zal automatisch de juiste vorm ontstaan. Zo is het ontwerp namelijk opgesteld. De kleine overspanning maakt het in het begin nog mogelijk handmatig het frame op te tillen en de balken te plaatsen.

De startunit is de middelste unit van het ontwerp. Het ontwerp wordt dus om deze unit steeds verder uitgebreid, zoals weergegeven in figuur 69. Op deze wijze kunnen voortdurend units worden toegevoegd. Het gewicht van het ontwerp wordt hierdoor steeds groter. Als het gewicht te groot wordt, kan gebruik gemaakt worden van een hijskraan, die de constructie iets optilt. Op deze wijze kunnen steeds aan de buitenrand nieuwe units worden toegevoegd.



Figuur 68: Start unit (centrum ontwerp)

3. Plaatsing

Als het houten frame staat, kan deze door middel van één of twee hijskranen op zijn plaats worden gezet. Dit dient te gebeuren voordat het glas geplaatst is. Dit voorkomt extra gewicht.

4. Afwerking

Als het volledige ontwerp staat, kunnen de glasplaten bevestigd worden op het ontwerp. Daarvoor dienen de '4-points spider connections' en '1-punts glasverbinders' per glasplaat gesteld te worden. De glasplaten kunnen daarvoor door middel van een hijskraan op hoogte gebracht worden.



Figuur 69: Connectie naar nieuwe unit

13. Discussie en lessen

Op basis van het ontwerp zijn er een aantal discussiepunten en leerpunten. Deze zullen in dit hoofdstuk nader beschreven worden.

13.1 Discussie

In hoofdstuk 7 is een schematisering van het reciprocal frame weergegeven. Hierbij zijn de 'kleine driehoekige knooppjes' vervangen door een inklemming. In hoofdstuk 7 is het effect hiervan bestudeerd. Wat betreft de momentenlijn was deze schematisering redelijk nauwkeurig. Echter was de doorbuiging veel minder accuraat. In de stijfheidstoets is hier dan ook rekening mee gehouden door de factor tussen het geschematiseerde model en de werkelijkheid te verminderen met 80%. Om echter goed inzicht te krijgen in het doorbuigingsverloop van het ontwerp zal een nauwkeuriger model gebruikt moeten worden.

Gedurende de toetsing van het ontwerp is het noodzakelijk te bepalen wat de maatgevende staaf is. Doordat het ontwerp uit 284 staven bestaat is het handmatig vrijwel onmogelijk om exact de maatgevende combinatie te vinden. Zeker door de vele belastingcombinaties. Er is dus een mogelijkheid dat in het model zich een staaf bevindt, die een unity check iets hoger heeft dan 1. In een definitieve uitwerking van het ontwerp zal dan ook met behulp van computersoftware unity checks uitgevoerd moeten worden.

Tijdens de schematisering van de belastingen zijn er zowel op de sneeuw- als windbelasting schematiseringen toegepast.

Enerzijds is de sneeuwbelasting geschematiseerd als zijnde een gelijkmatig verdeelde belasting met een karakteristieke waarde van $0.56 \text{ [kN/m}^2\text{]}$. Hierbij is de variant van driehoek belasting, weergegeven in figuur 20 niet doorgerekend. Dit om de complexiteit te verminderen.

Anderzijds is de windbelasting sterk vereenvoudigd. Er is gebruikgemaakt van een schematisering die geldt voor een cilinder. Vervolgens is deze lineair geïnterpoleerd en geveegd tot lijnlast op de staven. Dit om een eerste indicatie te geven van de windbelasting. Vanzelfsprekend is dit een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid. In een definitieve uitwerking van het ontwerp zal dit dan in software ook nauwkeuriger gemodelleerd dienen te worden.

Voor zowel de sneeuw- als de windbelasting geldt dat deze geschematiseerd als lijnlast ingevoerd in Matrixframe zijn. Dit omdat matrixframe geen bloklust meer kon verwerken vanwege het grote aantal staven. Hierbij is het totale oppervlak gelijk verdeeld over de staven en op basis hiervan de q-last bepaald. In werkelijkheid verloopt de afdracht van een zeshoek niet in deze wijze, waardoor de bepaling van de q-last niet volledig correct is. Zeker in combinatie met het feit dat de zeshoek gekanteld is. Dit dient in een vervolgon ontwerp dan ook nauwkeuriger gemodelleerd te worden.

Zoals in paragraaf 9.4.1 beschreven is, was het niet mogelijk om het uitknikken van de gehele koepel te toetsen in Matrixframe. Vanzelfsprekend is dit wel iets wat mogelijk kan gebeuren in een koepelconstructie. Daarom dient dit wel degelijk getoetst te worden bij een definitief ontwerp.

Tot slot kan bediscussieerd worden of een koepelconstructie wel de juist gekozen vorm is, als overkapping van een sportparkje. Wellicht had een tongewelf minder ruimte ingenomen. Echter was dit een opgelegde eis, om zo het inzicht in koepelvormige reciprocal frames te vergroten. Bij werkelijke realisatie van deze constructie dient hier wel over nagedacht te worden.

13.2 Leerpunten

Op basis van het ontwerp(proces) zijn een aantal lessen getrokken die onderstaand beschreven zullen worden.

1. Gebruik van software

Wat betreft de gebruikte software is Grasshopper een erg efficiënte en handige tool om parametrisch te ontwerpen. Door een parametrische basisvorm te genereren is het mogelijk het ontwerp naar de gewenste afmetingen te maken. Vervolgens kan, bijvoorbeeld met behulp van het script van T.S. Godthelp, het gewenste patroon bepaald worden. Opgemerkt moet worden dat het script van Godthelp gelimiteerd is tot een driehoekig en vierhoekig patroon.

Matrixframe daarentegen is een minder geschikte software voor het ontwerp van een groot reciprocal frame. Doordat elke staaf een lokaal assenstelsel kent, gaat invoering van de belasting erg ingewikkeld. Tevens worden het aantal knopen en staven te groot indien gebruik gemaakt wordt van een volledig nauwkeurige schematisering, zoals weergegeven in hoofdstuk 7. Geadviseerd wordt daarom dan ook gebruik te maken van 'Karamba'. Een rekensoftware die gekoppeld kan worden aan Grasshopper. Op deze wijze kan direct het ontworpen frame in Grasshopper getoetst worden.

2. Unity check

De meest kritische unity check, zo bleek uit hoofdstuk 9, is de toetsing op normaalkracht in combinatie met buiging. Met name ter plaatse van de fundering treden hoge momenten op, wat leidt tot hoge unity checks in de buigingstoets. Geadviseerd wordt daarom dan ook eerst te controleren of de constructie voldoet op buiging, of de combinatie van buiging en normaalkracht, voordat naar dwarskracht, stijfheid of stabiliteit gekeken wordt. Als de constructie niet voldoet, dient het patroon verkleint te worden. Dit resulteert in lagere momenten, zo bleek uit de iteratie.

Opvallend zijn de hoge momenten, normaalkrachten en dwarskrachten bij de inkepingen. Het lijkt erop dat verstoring van het patroon, leidt tot grote krachten. Echter dient dit verder onderzocht te worden om hier stellige beweringen over te doen. Wel is dit een aandachtspunt voor toekomstige ontwerpen.

Zoals beschreven in de discussie, is het geschematiseerde doorbuigingsgedrag van de constructie erg anders dan het werkelijke doorbuigingsgedrag. Wel kunnen conclusies getrokken worden op basis van de schematisering in hoofdstuk 7. Hieruit blijkt namelijk dat het reciprocal frame zich erg stijf gedraagt ten opzichte van het model met de inklemmingen.

3. Parametrisch ontwerpen

Uit het ontwerp blijkt dat parametrisch ontwerpen bij een reciprocal frame erg goed werkt. Door eerst de keuze te maken voor een parametrische basisvorm, kan voldaan worden aan de juiste afmetingen wat betreft het profiel van vrije ruimte. Vervolgens kan parametrisch het patroon net zo lang worden aangepast, tot het ontwerp voldoet op sterkte, stijfheid en stabiliteit.

Zeker doordat een reciprocal frame bestaat uit een repeterend patroon is hierbij zeer goed gebruik te maken van een parametrisch ontwerp. Opgemerkt moet worden dat het maken van een script voor een reciprocal frame, een hele studie op zich is.

4. Hergebruik van hout

Zoals uit het ontwerp bleek is het erg goed mogelijk om hout uit een bestaand gebouw te hergebruiken in een reciprocal frame. Het ontwerp bestaat namelijk voor 79% uit hergebruikt hout. Opgemerkt dient te worden dat het hout wat hergebruikt wordt, min of meer dezelfde doorsnede moet hebben. Kleine verschillen kunnen opgevangen worden door gebruik te maken van een verbinding met inkepingen. Grote verschillen zorgen echter voor verstoring van het patroon.

14. Conclusie en aanbeveling |

In dit hoofdstuk wordt de onderzoeksvraag beantwoord en worden aanbevelingen gegeven.

14.1 Conclusie

De onderzoeksvraag luidde:

“Wat is een constructief veilige, koepelvormige dakconstructie, bestaande uit een reciprocal frame, gegeven een gekozen locatie en een fictieve hoeveelheid resthout, overblijvend bij de sloop van een gebouw?”

Concluderend is de koepelvormige constructie, weergegeven in bijlage 9, een constructief veilige constructie voor het sportpark aan de Elburglaan 53 in Eindhoven, gebouwd uit het beschikbare hout in het dak van de Bethelkerk te Lelystad.

Het weergegeven ontwerp in hoofdstuk 10 bestaat uit 224 van de 230 beschikbare balken uit het resthout. Zes staven van het resthout worden dus niet gebruikt. Echter zijn er naast deze 224 balken uit het resthout ook nog 60 balken nieuw nodig, zoals beschreven in hoofdstuk 10. De ontworpen constructie bestaat dus voor 79% uit hergebruikt hout. 97% van de beschikbare balken zijn gebruikt.

14.2 Aanbevelingen

Praktijk

Bij een volgend ontwerp van een reciprocal frame wordt geadviseerd eerst de toets op buiging in combinatie met normaalkracht uit te voeren, voordat de andere unity-checks uitgevoerd worden. Dit is namelijk de maatgevende toets. Dit omdat de krachtsafdracht hoofdzakelijk verloopt door middel van normaalkracht en buiging.

Tevens wordt bij een volgend ontwerp aanbevolen om extra goed de locaties waar het patroon wordt verstoord te controleren op sterkte. Op deze locatie kunnen de krachten namelijk erg groot worden.

Indien een constructie met behulp van afvalhout gerealiseerd moet worden, wordt geadviseerd een reciprocal frame te gebruiken. Zeker als het om grotere overspanningen gaat, in combinatie met kortere balklengtes.

Tot slot wordt geadviseerd parametrisch te ontwerpen bij een reciprocal frame. Voor software wordt Grasshopper geadviseerd. Matrixframe wordt echter afgeraden.

Vervolgonderzoek

Als vervolgonderzoek op het ontwerp kan onderzocht worden hoe bij dit ontwerp een verbinding door middel van inkepingen gerealiseerd kan worden. Iets wat gedurende dit ontwerp niet gelukt is, maar wat zeker realiseerbaar is. Dit is tevens erg handig indien gebruik gemaakt wordt van resthout met verschillende doorsnedegrootheden.

Tevens kan als vervolgonderzoek het volledige ontwerp in een andere software als ‘Karamba’ geprogrammeerd worden. Op basis hiervan kunnen dan nauwkeurigere conclusies getrokken worden met betrekking tot stijfheid en stabiliteit van een koepelvormig reciprocal frame.

Zoals beschreven staat bij de leerpunten lijkt het erop dat verstoring van het patroon, zoals bij de inkepingen, leidt tot hoge momenten, normaalkrachten en dwarskrachten. Dit dient echter in een vervolgonderzoek nader onderzocht te worden. Op basis van één ontwerp kan niet gesteld worden of dit de daadwerkelijke oorzaak is van deze hoge krachten.

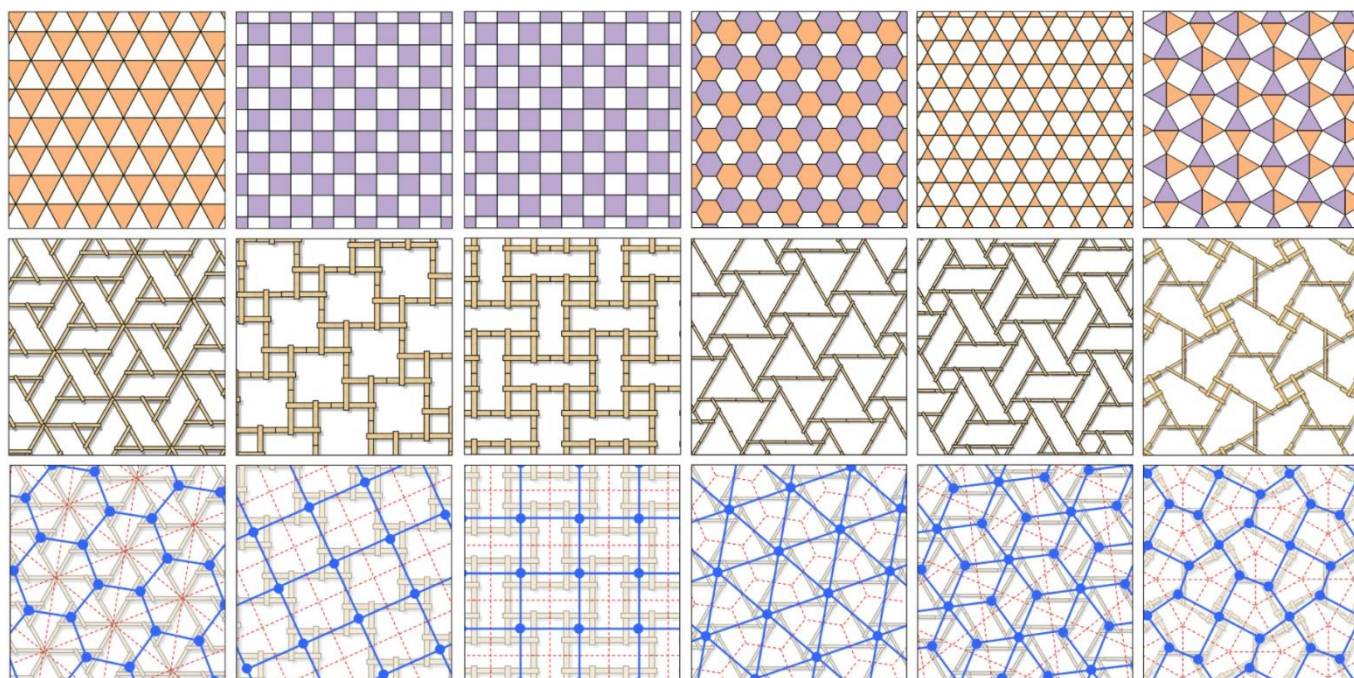
Tot slot dient met behulp van vervolgonderzoek het effect van de schematisering van de windbelasting en sneeuwbelasting in kaart gebracht te worden.

Literatuur

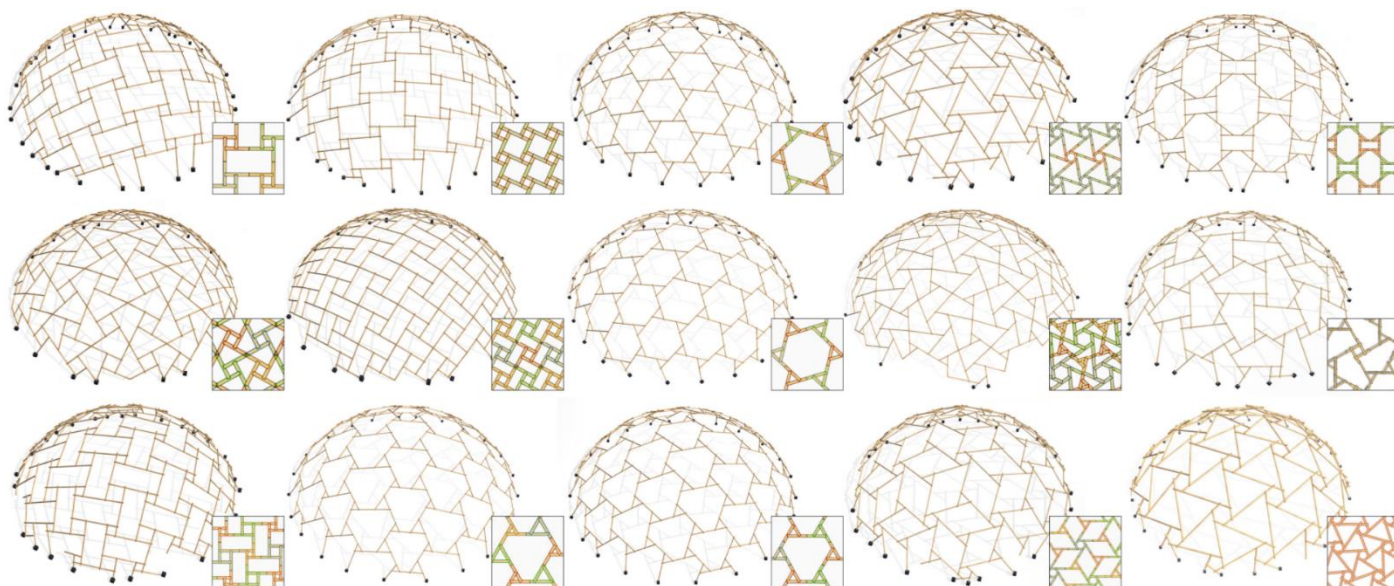
- Asefi, M. & Bahremandi-Tolou, M. (2019). Design challenges of reciprocal frame structures in architecture. *Journal of building engineering*, 29(1), 1-16, <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100867>
- BarManiaPro (2020). *CATALOGUE URBAN SPORTS*. Geraadpleegd op 26-4-2021, van <https://barmaniapro.com/wp-content/uploads/2020/06/BarManiaPro%C2%AE-Catalogue-Urban-Sports-2020-01.pdf>
- Bouwend Nederland (2020). *Feiten en cijfers Kengetallen uit de bouw en infra*. Bouwend Nederland. Geraadpleegd op 20-4-2021, van <https://www.bouwendnederland.nl/service/feiten-en-cijfers>
- Bouwsales (2018). *Welke sleutelmaat hoort bij welke bout en moer?* Bouwsales. Geraadpleegd op 25-5-2021, van <https://www.bouwsales.nl/welke-sleutelmaat-hoort-bij-welke-bout-en-moer>
- Cohen-or, D. Fu, C., Goswami, P., Mitra, N.J., Song, P., Zheng, J. (2013). Reciprocal frames structures made easy. *ACM Transactions on Graphics*, 32(4), 1-13, <https://doi.org/10.1145/2461912.2461915>
- DINoloket (2021) *Geologisch booronderzoek: identificatie B51D1573*. DINoloket. Geraadpleegd op 26-4-2021, van <https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens>
- Fennis, S.A.A.M., Pasterkamp, S. & Vries, de P.A. (2013). *De drie windgebieden in Nederland en bijbehorende waarden voor de fundamentele basiswindsnelheid vb,0* [Figuur]. *Veiligheid* (C.H., Van Eldik, Red) (1de ed.). Zoetermeer, Nederland: Bouwen met Staal.
- Fennis, S.A.A.M., Pasterkamp, S. & Vries, de P.A. (2013). *Veiligheid* (C.H., Van Eldik, Red) (1de ed.). Zoetermeer, Nederland: Bouwen met Staal.
- Gadero (2021) *Grenenhout*. Gadero. Geraadpleegd op 3-5-2021, van <https://gadero.nl/grenenhout/#:~:text=Grenenhout%20is%20een%20naaldhoutsoort%20en,tot%20600%20kg%20per%20m3.>
- Glasmaatje (z.d.) *Welke dikte / maat gelaagd- of dubbel glas*. Glasmaatje.nl. Geraadpleegd op 8-5-2021, van <https://www.glasmaatje.nl/Glas-voor-dakbeglazing-of-overkapping-info>
- Glasscon (z.d.). *PR-04.01* [Online afbeelding]. Geraadpleegd op 26-5-2021, van <https://www.glasscon.com/products/spider-glass-suspended-glass-fins-cable-system/spider-glass-curtain-walls-bolted-point-fixed-glazing>
- Google Maps (2021) *Calisthenics park Eindhoven* [foto]. Geraadpleegd van <https://www.google.com/maps/@51.4473939,5.4370163,72m/data=!3m1!1e3>
- Keyner, D. (2021). *Calisthenicspark Eindhoven* [foto]. Geraadpleegd van: <https://www.google.com/maps/contrib/114579454342180563442/photos/@51.4474058,5.4370302,3a,75y,90t/data=!3m8!1e2!3m6!1sAF1QipMwOad2AYbHV2ABWOAGtHwaAAoH3zS2eWzp3h8V!2e10!3e12!6shttps:%2F%2Fh5.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipMwOad2AYbHV2ABWOAGtHwaAAoH3zS2eWzp3h8V%3Dw179-h86-k-no!7i3648!8i1744!4m3!8m2!3m1!1e1?hl=nl>
- Kohlhammer, T. & Kotnik, T. (2011). Systemic Behaviour of Plane Reciprocal Frame Structures. *Structural engineering international*, 21(1), 80-86. <https://doi.org/10.2749/101686611X12910257102596>
- Larsen, O.P. (2014). Reciprocal Frame (RF) Structures: Real and Exploratory. *Nexus Network Journal*, 16(1), 119–134. <https://doi.org/10.1007/s00004-014-0181-0>
- Normcommissie 351 001 “Technische Grondslagen voor Bouwconstructies” (2011). *NEN-EN 1995-1-3. Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-3: Algemene belastingen – Sneeuwbelasting*. Stichting Koninklijk Nederlandse Normalisatie Instituut.
- Normcommissie 351 001 “Technische Grondslagen voor Bouwconstructies” (2011). *NEN-EN 1991-1-4. Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-4: Algemene belastingen – Windbelasting*. Stichting Koninklijk Nederlandse Normalisatie Instituut.

- Normcommissie 351 001 “Technische Grondslagen voor Bouwconstructies” (2011). *NEN-EN 1995-1-1. Eurocode 5: Ontwerp en berekening van houtconstructies - Deel 1-1: Algemeen - Gemeenschappelijke regels en regels voor gebouwen*. Stichting Koninklijk Nederlandse Normalisatie Instituut.
- Normcommissie 353 001 “Hout” (2007). *NEN 5499: Kwaliteitseisen voor visueel gesorteerd naaldhout voor constructieve toepassingen*. Stichting Koninklijk Nederlandse Normalisatie Instituut.
- Pandd (z.d.). *Oppervlakte van een bol, bolsegment en bolschijf*. Pandd. Geraadpleegd op 13-5-2021, van [https://www.pandd.nl/stereo/oppbol.htm#:~:text=De%20oppervlakte%20O%20van%20een,bolsegmenten%20\(zie%20figuur%20c\).&text=De%20oppervlakte%20van%20een%20bolschijf,hoogte%20is%20van%20die%20bolschijf](https://www.pandd.nl/stereo/oppbol.htm#:~:text=De%20oppervlakte%20O%20van%20een,bolsegmenten%20(zie%20figuur%20c).&text=De%20oppervlakte%20van%20een%20bolschijf,hoogte%20is%20van%20die%20bolschijf)
- Polson (z.d.) *Rubber T-profiel 15x12 mm* [figuur]. Geraadpleegd op 26-5-2021, van <https://www.polson.nl/producten/rubber-t-profiel-15x12-mm>
- Reliwiki (2017). *Lelystad – Zuiderwagenplein 12 – Bethelkerk*. Reliwiki. Geraadpleegd op 28-4-2021, van [http://www.reliwiki.nl/index.php/Lelystad, Zuiderwagenplein 12 - Bethelkerk](http://www.reliwiki.nl/index.php/Lelystad,_Zuiderwagenplein_12_-_Bethelkerk)
- Rijkswaterstaat bouwdienst (2005). *Tunneldetails 7*. Geraadpleegd op 19-5-2021, van https://www.cob.nl/wp-content/uploads/2018/01/SATO_5.Tunneldetails7_tcm21-37381.pdf
- Sadev (z.d.). *R 1003 LC* [figuur]. Geraadpleegd op 26-5-2021, van <https://www.sadev.com/products/building-envelopes/swivel-fittings-rotules/r-1003-lc/>
- Scharringa, J. (2021). *Gebruik van afvalhout voor grote overspanningen met behulp van reciprocal frames* [Ongepubliceerde scriptie]. TU Delft.
- Soons, F.A.M., Van Raaij, B.P.M. & Wagemans, L.A.G. (2014). *Quick References* (S. Pasterkamp & S.H.J. van Es, red.)(editie 2014). Delft, Nederland: Section Structural and Building Engineering.

Bijlage 1: Mogelijke reciprocal units



Figuur 70: Mogelijke patronen (Cohen-or et al., 2013, p.4)

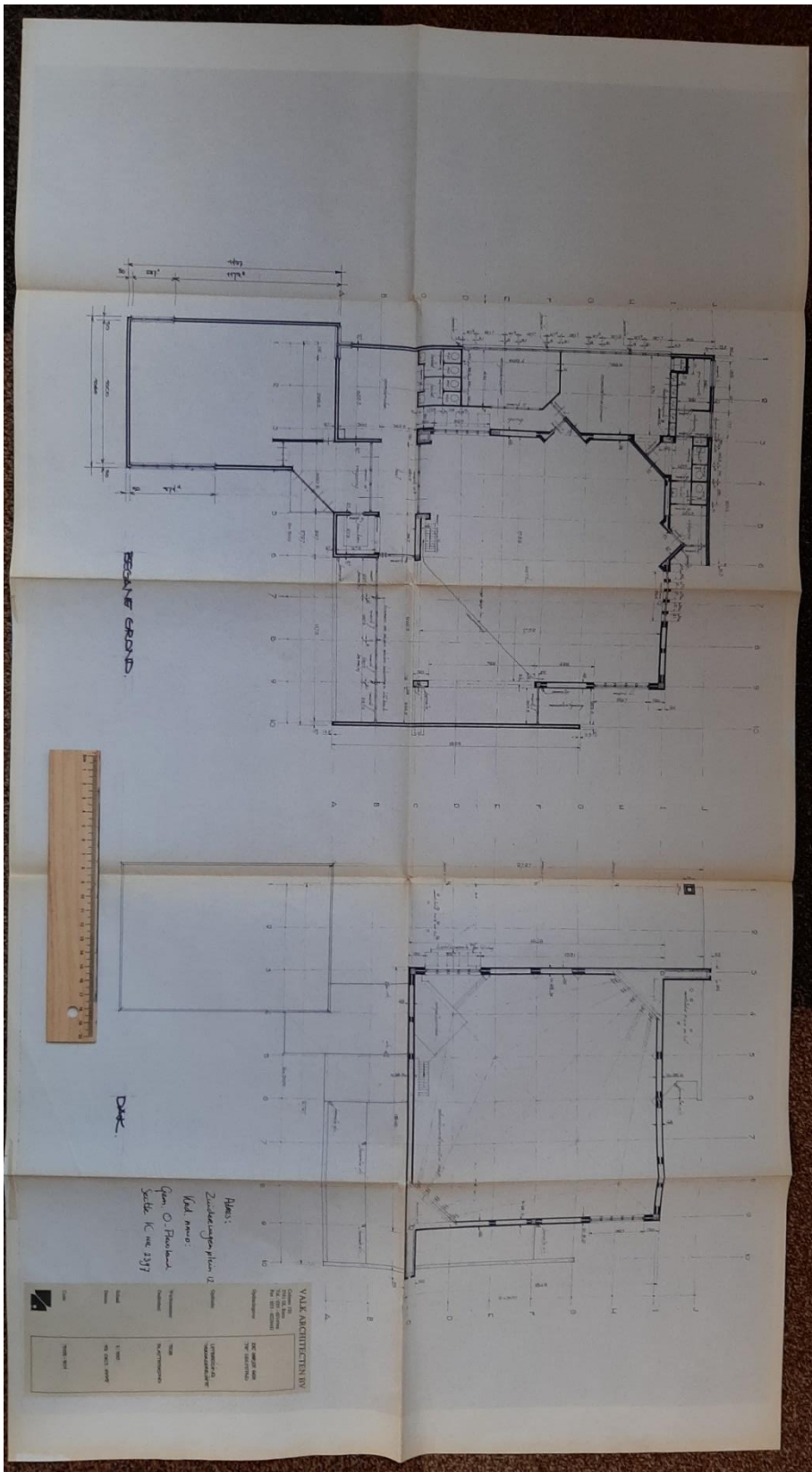


Figuur 71: Patronen in 3D (Cohen-or et al. 2013, p.8)



Figuur 72: Plattegrond dak van de kerk

2. Plattegrond kerk



Figuur 73: Plattegrond kerk

Bijlage 3: knopen (Voorlopig ontwerp)

Knopen				
	Knoop	X	Y	Z
	K1	-14.499	6.874	-0.257
	K2	-3.247	12.634	-2.783
	K3	-9.093	10.185	-2.342
	K4	-6.487	13.152	-1.513
	K5	-12.383	10.133	-0.218
	K6	-0.056	14.673	-1.523
	K7	3.214	12.720	-2.730
	K8	9.090	10.219	-2.320
	K9	6.483	13.153	-1.513
	K10	14.479	6.858	-0.282
	K11	12.360	10.147	-0.227
	K12	-1.954	9.420	-4.770
	K13	-7.831	6.924	-4.357
	K14	-1.999	3.329	-6.579
	K15	-4.009	6.668	-5.520
	K16	-13.240	-3.581	-2.291
	K17	-13.244	3.621	-2.283
	K18	-14.796	-0.003	-1.400
	K19	-2.040	-9.473	-4.737
	K20	-2.037	-3.343	-6.570
	K21	-7.858	-6.950	-4.341
	K22	-4.006	-6.667	-5.521
	K23	-9.868	3.616	-4.262
	K24	-9.886	-3.604	-4.255
	K25	-4.036	-0.011	-6.489
	K26	-8.061	0.000	-5.345
	K27	14.499	-6.874	-0.257
	K28	3.247	-12.634	-2.783
	K29	9.093	-10.185	-2.342
	K30	6.487	-13.152	-1.513
	K31	12.383	-10.133	-0.218
	K32	0.056	-14.673	-1.523
	K33	1.954	-9.420	-4.770
	K34	7.831	-6.924	-4.357
	K35	1.999	-3.329	-6.579
	K36	4.009	-6.668	-5.520
	K37	13.240	3.581	-2.291
	K38	13.244	-3.621	-2.283
	K39	14.796	0.003	-1.400
	K40	2.040	9.473	-4.737
	K41	2.037	3.343	-6.570
	K42	7.858	6.950	-4.341
	K43	4.006	6.667	-5.521
	K44	9.868	-3.616	-4.262
	K45	9.886	3.604	-4.255
	K46	4.036	0.011	-6.489
	K47	8.061	0.000	-5.345
	K48	-3.214	-12.720	-2.730
	K49	-9.090	-10.219	-2.320
	K50	-6.483	-13.153	-1.513
	K51	-14.479	-6.858	-0.282
	K52	-12.360	-10.147	-0.227

Figuur 74: Coördinaten van de knooppunten

Bijlage 4: Belastingbepaling (Voorlopig ontwerp)

Slechts de bepaling van de windbelasting is anders bij het voorlopig ontwerp dan bij de belastingbepaling van het definitieve ontwerp. Daarnaast was bij het voorlopig ontwerp nog gerekend met een eigen gewicht van $600 \text{ [kg/m}^3\text{]}$. Onderstaand zal de schematisering van de windbelasting van het voorlopige ontwerp worden weergegeven.

1. Schematisering windbelasting

Aangezien een verlopende windlast erg ingewikkeld wordt om dit in te voeren in matrix-frame wordt een vereenvoudiging toegepast. Elke staaf bevat een q-last die een deel van de oppervlakte vertegenwoordigt. De windlast is gegeven in $\text{[kN/m}^2\text{]}$. Door de totale oppervlakte te delen door het aantal staven, wordt het maatgevende oppervlak voor die staaf verkregen. Door dit te delen door de lengte van een staaf, wordt de lengte verkregen, waarmee de q-last bepaald wordt. Op deze wijze wordt de wind als het ware over de staaf uitgesmeerd.

De oppervlakte van een bolsegment is $2 * \pi * R * h$, waarbij h de hoogte is van het maaiveld, ten opzichte van het middelpunt van de bol en R de straal van de bol is (pandd, z.d.). Vanzelfsprekend is dit niet de exacte oppervlakte van de koepel, aangezien deze uit vlakken bestaat, maar voor een 1^e berekening volstaat deze aanname. Zeker in combinatie met de onzekerheid over de wind.

$$\text{Oppervlakte} = 2 * \pi * R * h = 2 * \pi * 23 * 15.759 = 2277.39 \text{ [m}^2\text{]}.$$

$$\text{Aantal staven} = 70$$

$$\text{Oppervlak bij knoop} = 2277.39 / 70 = 32.53 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\text{Lengte enkele staaf gemiddeld} = 4.5 \text{ [m]}$$

$$\text{Afstand dat iedere staaf draagt} = 32.53 / 4.5 = 7.23 \text{ [m]}$$

Windbelasting met onderdruk (wind van links), gebaseerd op figuur 22

$$\text{Linkerhelft: } w(x) = -0.029x + 0.341 \text{ [} 0 \leq x \leq 16.75 \text{]}$$

$$\text{Rechterhelft: } w(x) = 0.018x - 0.448 \text{ [} 16.75 \leq x \leq 33.5 \text{]}$$

Windbelasting met overdruk (wind van links)

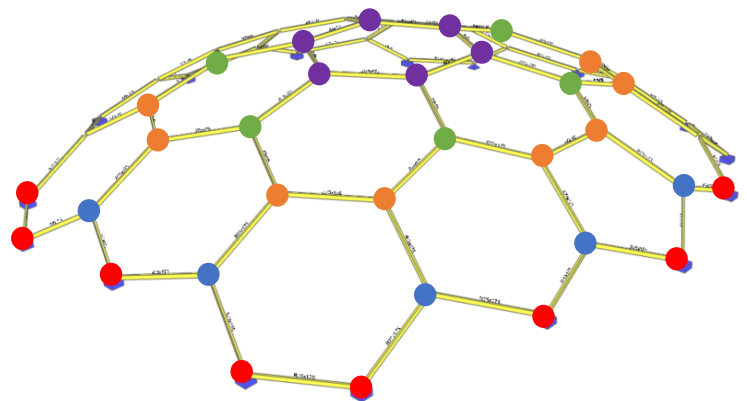
$$w(x) = -0.029x + 0.098 \text{ [} 0 \leq x \leq 16.75 \text{]}$$

$$w(x) = 0.018x - 0.692 \text{ [} 16.75 \leq x \leq 33.5 \text{]}$$

Indeling niveaus

In figuur 75 zijn de verschillende knooppunten weergegeven. In tabel 14 worden deze nader uitgewerkt. Aangenomen wordt dat de gekleurde knooppunten op exact dezelfde hoogte zitten. Vanzelfsprekend zit daar in werkelijkheid iets variatie in.

In bijlage 6 staan overzichten van ingevoerde belastingen, waarbij deze tabel gebruikt is, voor de maatgevende windbelasting.



Figuur 75: Indeling niveaus

Kleur	z	X [m],		Onderdruk [kN/m ²]		q-last ter plaatse van knoop _ Onderdruk		Overdruk [kN/m ²]		q-last ter plaatse van knoop _ Overdruk	
		Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
	0	0	33.5	0.341	0.146	2.47	1.06	0.097	-0.097	0.70	-0.70
	2.3	2.5	31	0.269	0.101	1.94	0.73	0.026	-0.134	0.18	-0.97
	4.3	5.5	28	0.182	0.048	1.32	0.35	-0.062	-0.188	-0.45	-1.36
	5.4	7.7	25.8	0.118	0.009	0.85	0.07	-0.125	-0.228	-0.90	-1.65
	6.5	11.0	22.5	0.022	-0.050	0.16	-0.36	-0.221	-0.287	-1.60	-2.08

Tabel 14: Verdeling q-lasten (zonder belastingfactoren)

2. Overzicht belastingen

In de onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de belastingen en de bijbehorende factoren.

	Waarde	Eenheid	$\psi_{0,i}$ (Fennis et al., 2013)	Belastingfactor
Permanente belasting				
Eigen gewicht	78.75	[N/ m balk]	-	1.35 of 1.2
Glasplaten	0.269	[kN/m ²]	-	1.35 of 1.2
Variabele belasting				
Sneeuwbelasting	0.56	[kN/m ²]	0	1.5
Windbelasting	Zie figuur 22	[kN/m ²]	0	1.5
Opgelegde belasting	0.5	[kN/m ²]	0	1.5

Tabel 15: Overzicht belastingen en factoren

Bijlage 5: Korte toets op buiging (Voorlopig ontwerp) |

Belastingcombinaties

Bij de toetsing op sterkte, moeten de belastingfactoren worden meegerekend. Hierbij zijn vijf verschillende soorten belastingcombinaties mogelijk, onderstaand weergegeven. Hierbij zijn de formules van hoofdstuk 6 gebruikt. Alle belastinginvoer, momenten-, dwarskrachten- en normaalkrachtenlijnen zijn weergegeven in bijlage 6.

FB1: $1.35G = 1.35 * 65.625 = 88.59 \text{ [N/m balk]} = 0.088 \text{ [kN/m]}$

FB2: $1.2G + 1.5Q_{k,1}$

1. Sneeuwbelasting maatgevend

$1.2 * 0.0656 \text{ (Lijnlast op balk)} + 1.5 * 0.56 \text{ (Bloklast over constructie)} =$
 $0.07875 \text{ [kN/m balk]} + 0.84 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

2. Windbelasting maatgevend (zowel over- als onderdruk)

Voor overdruk zal gerekend worden met een ongunstige factor (0.9) voor het eigen gewicht en voor onderdruk met een gunstige factor (1.2).

$(1.2 \text{ of } 0.9) * 0.0656 \text{ (Lijnlast op balk)} + 1.5 * \text{windlast}$

3. Opgelegde belasting maatgevend

$1.2 * 0.0656 \text{ (Lijnlast op balk)} + 1.5 * 1 \text{ (bloklast over constructie)} =$
 $0.07872 \text{ [kN/m balk]} + 1.5 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

Toets op buiging

Toetsing van buiging bij een houten constructie gebeurt met de volgende twee unity checks volgens de NEN-EN 1995-1-1:

$$\begin{aligned} 1. \quad & \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \\ 2. \quad & k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \end{aligned}$$

Waarden

k_m = factor die voor gezaagd hout, met een rechthoekige doorsnede gelijk is aan 0.7 (NEN-EN 1995).

$\gamma_m = 1.3$ (solid timber)

k_{mod} = modificatiefactor = 0.6 (Blijvende belastingsduurklasse & duurzaamheidsklasse 2)

$f_{m,d} = k_{mod} * \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} * k_h = 0.6 * \frac{24}{1.3} = 11.08 \text{ [N/mm}^2\text{]}.$

$W_y = \frac{1}{6} * b * h^2 = \frac{1}{6} * 75 * 175^2 = 382812.5 \text{ [mm}^3\text{]}$

$W_z = \frac{1}{6} * b * h^2 = \frac{1}{6} * 175 * 75^2 = 164062.5 \text{ [mm}^3\text{]}$

De maatgevende combinatie is wind bij overdruk. Hierbij geldt één aantekening. De gebruikte momenten zijn bij een eigen gewicht van $600 \text{ [kg/m}^3\text{]}$. Dit was de eerst gebruikte waarde voor de tussenbeoordeling. Echter voldoet de constructie ruimschoots niet op buiging. Een iets lagere waarde van het eigen gewicht zal de unity check niet onder de 1 brengen. Vandaar dat de ingevoerde belastingen niet volledig zijn aangepast.

$M_y = 19.98 \text{ [kNm]}$

$M_z = 0.2 \text{ [kNm]}$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{19.98 * 10^6}{382812.5} = 52.19 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} = \frac{0.2 * 10^6}{164062.5} = 1.22 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$1. \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} = \frac{52.19}{11.08} + 0.7 * \frac{1.22}{11.08} = 4.79 \gg 1$$

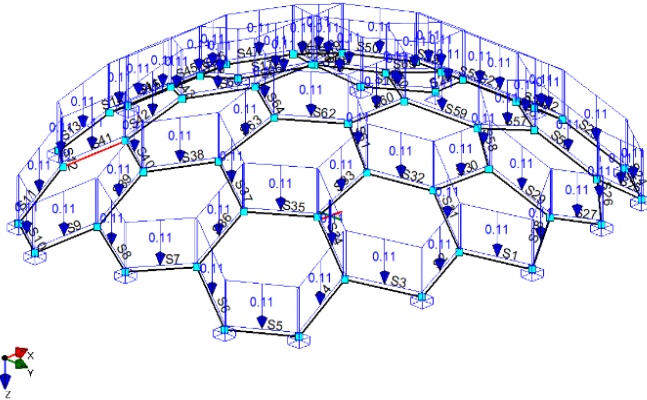
$$2. k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} = 0.7 * \frac{52.19}{11.08} + \frac{1.22}{11.08} = 3.04 \gg 1$$

Uit de unity check blijkt dat de constructie ruimschoots niet bestand is tegen de optredende windbelasting wat betreft buiging. Het ontwerp dient aangepast te worden.

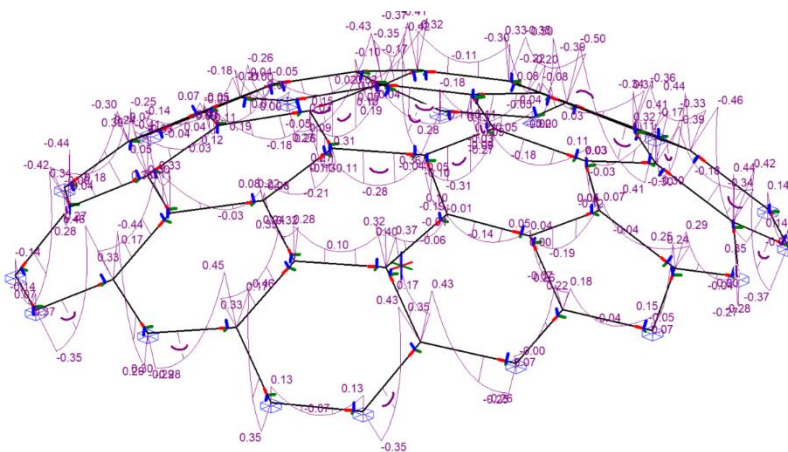
Bijlage 6: Krachten en momenten (Voorlopig ontwerp)

In deze bijlage zullen de momenten-, dwarskrachten- en normaalkrachtenlijnen getoond worden, inclusief veiligheidsfactoren.

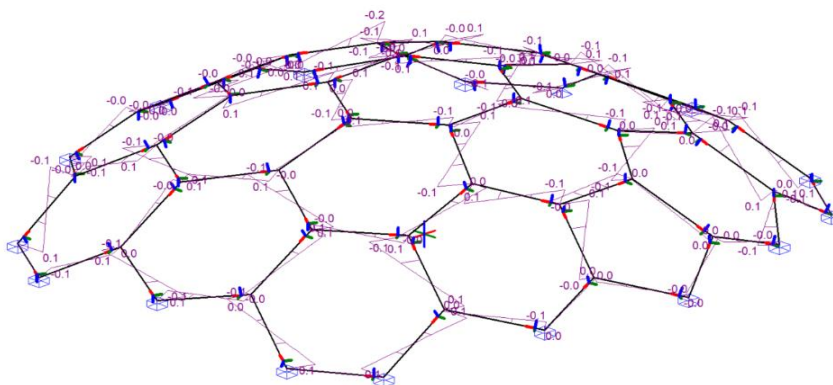
1. Fundamentele belastingcombinatie 1



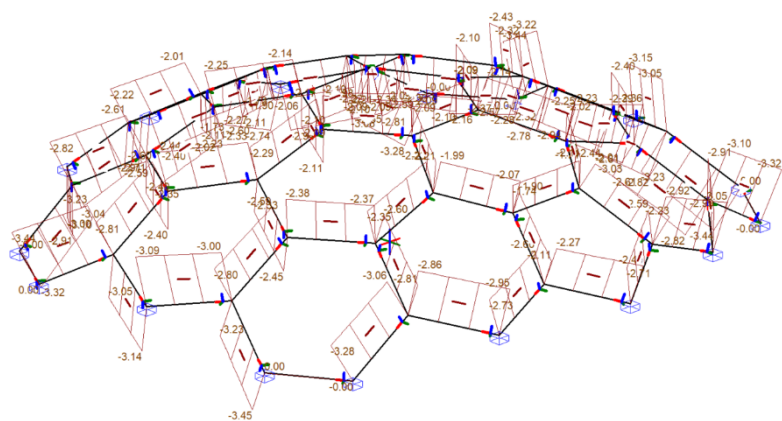
Figuur 76: FB1_Belastinginvoer



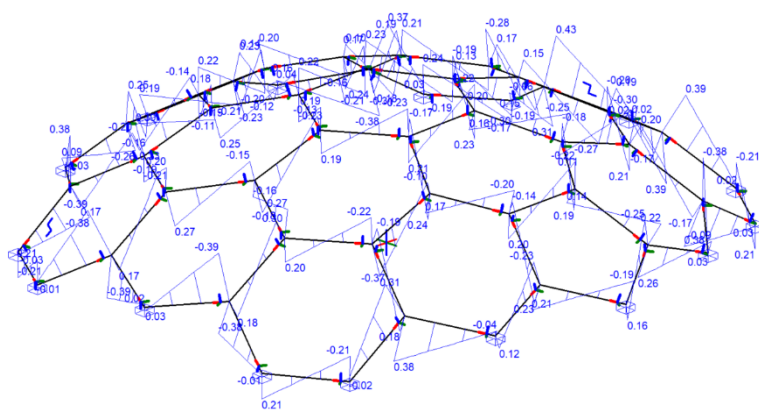
Figuur 77: FB1_Momentenlijn My



Figuur 78: FB1_Momentenlijn Mz

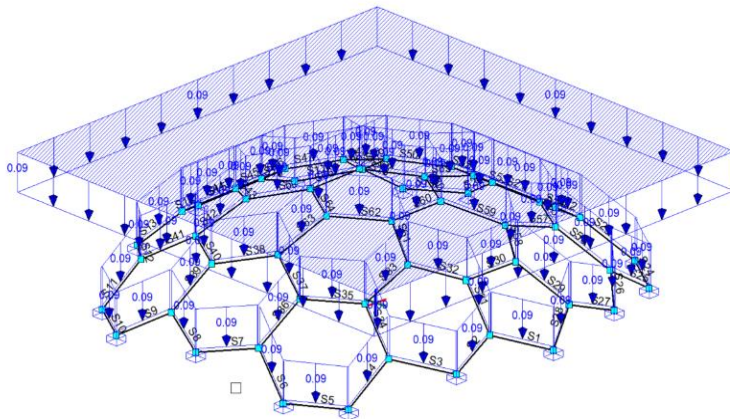


Figuur 79: FB1_Normaalkrachtenlijn

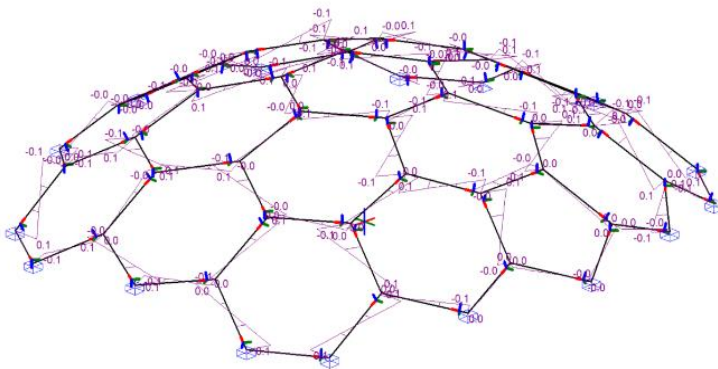


Figuur 80: FB1_Dwarskrachtenlijn

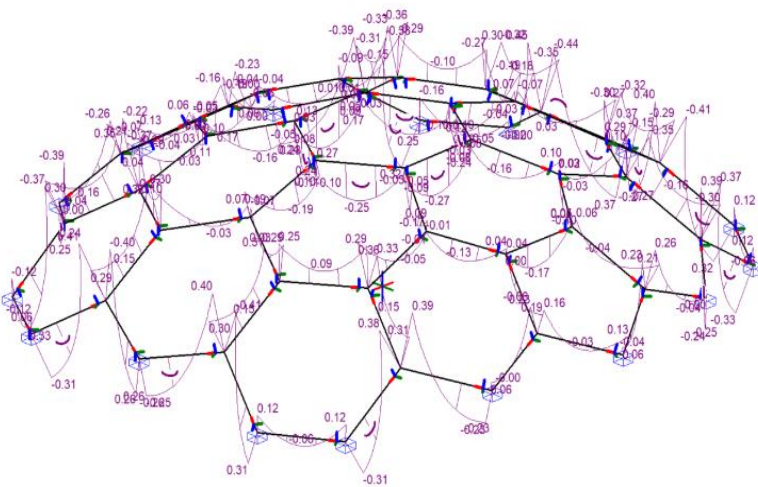
2. FB2: Sneeuwbelasting maatgevend



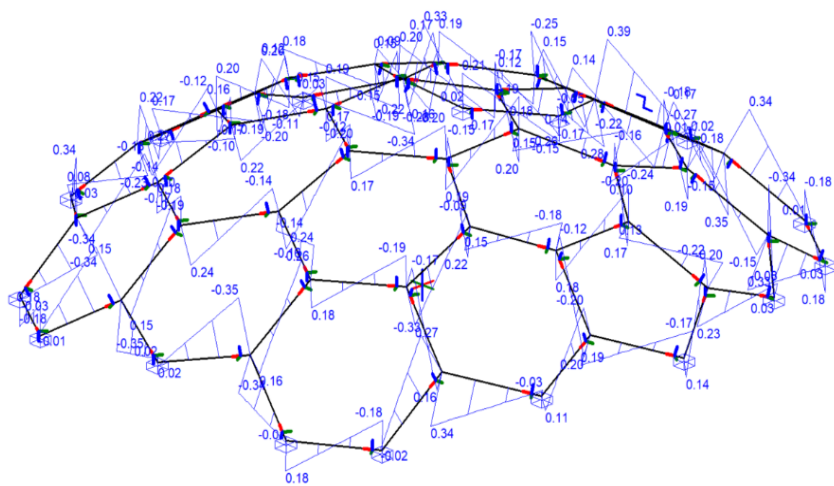
Figuur 81: FB2_Sneeuw_Belastinginvoer



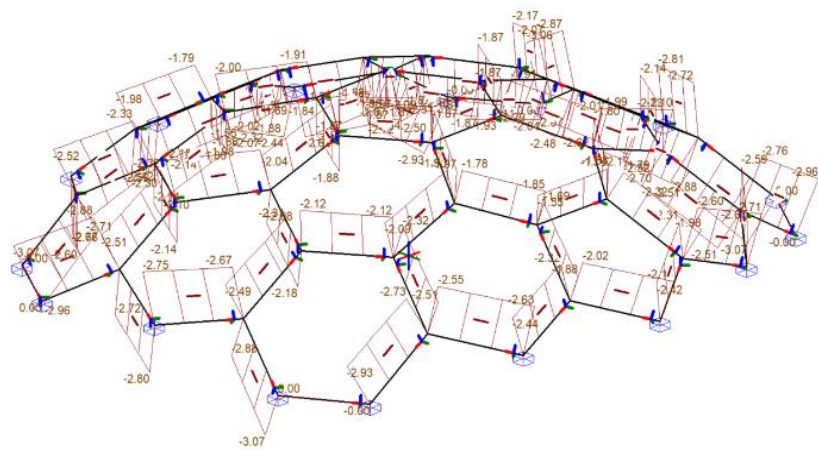
Figuur 82: FB2_Sneeuw_Mz



Figuur 83: FB2_Sneeuw_My

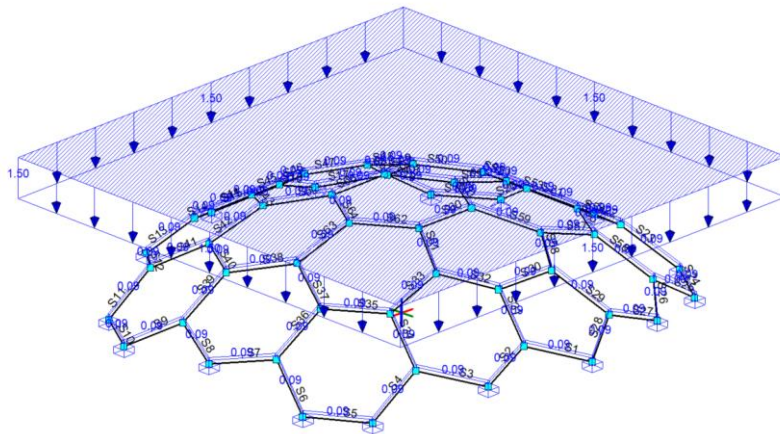


Figuur 84: FB2_Sneeuw_Dwarskracht

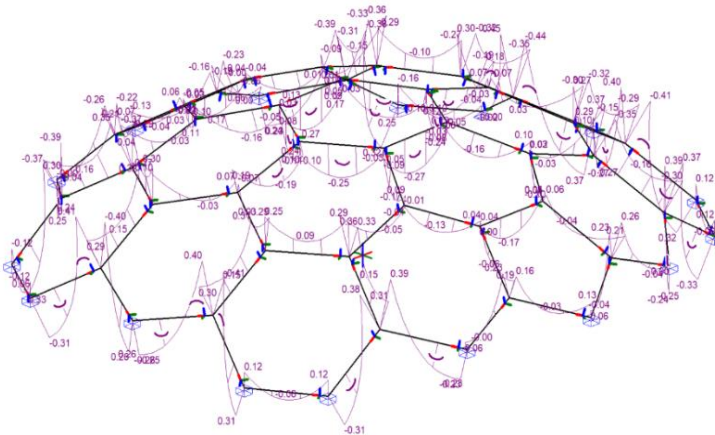


Figuur 85: FB2_Sneeuw_Normaalkracht

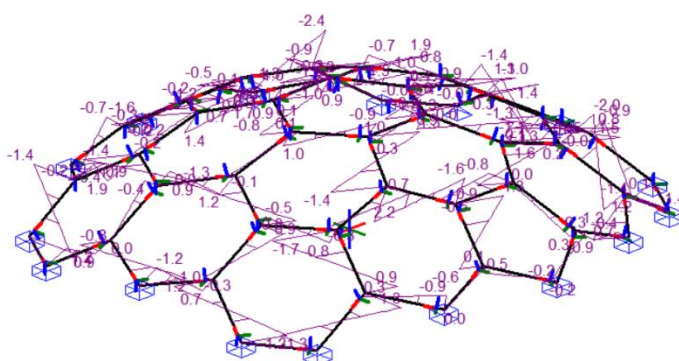
3. FB2: Opgelegde belasting maatgevend



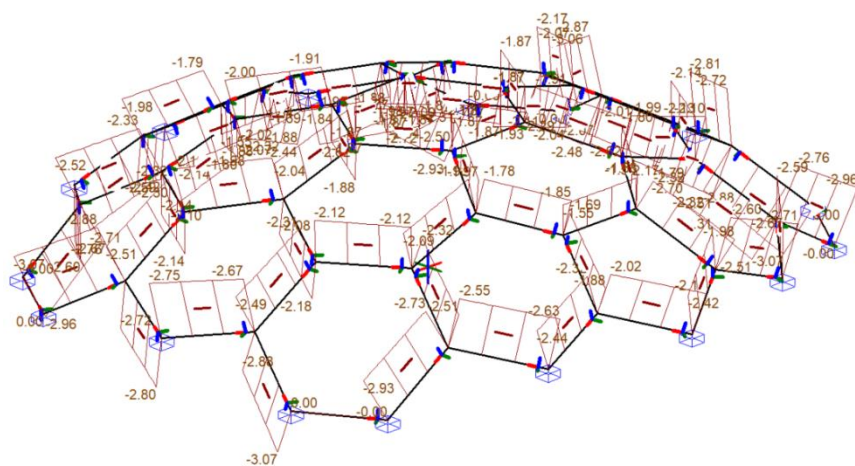
Figuur 86: FB2_Opgelegde belasting_Belastinginvoer



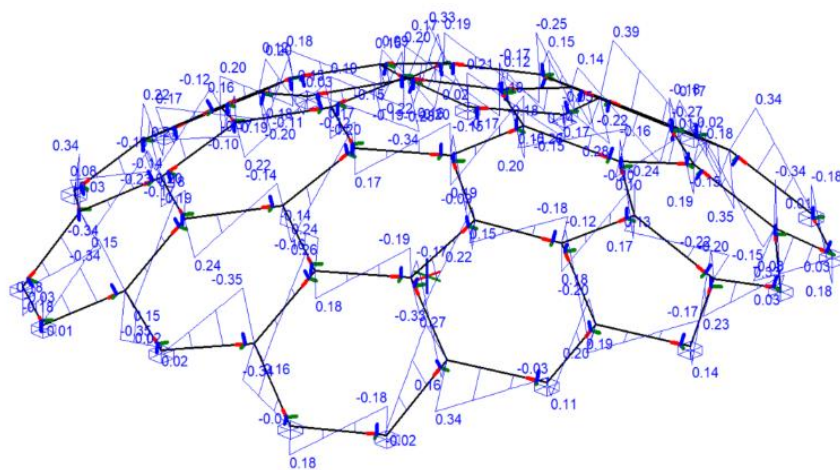
Figuur 87: FB2_Opgelegde belasting_My



Figuur 88: FB2_Opgelegde belasting_Mz

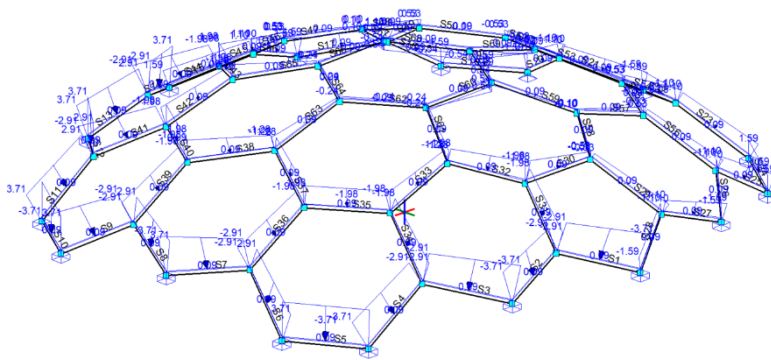


Figuur 89: FB2_Opgelegde belasting_Normaalkrachtenlijn

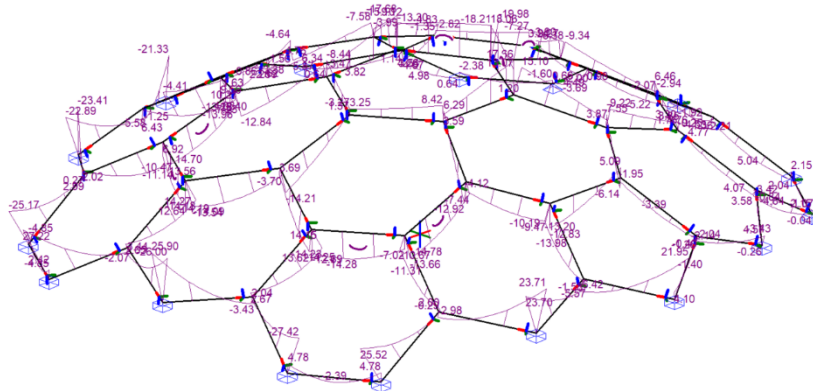


Figuur 90: FB2_Opgelegde belasting_Dwarskrachtenlijn

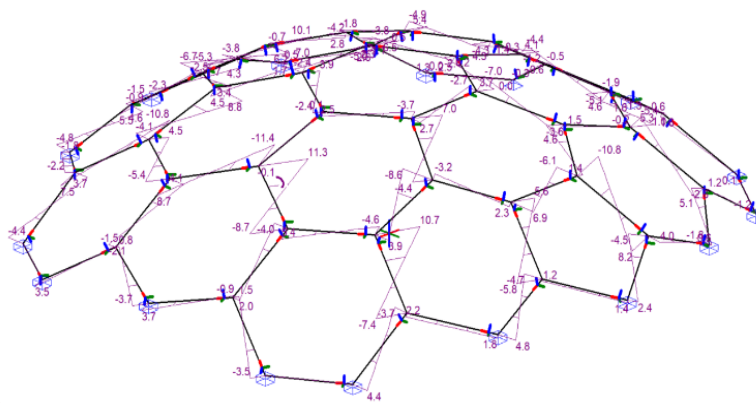
4.FB2: windbelasting onderdruk maatgevend



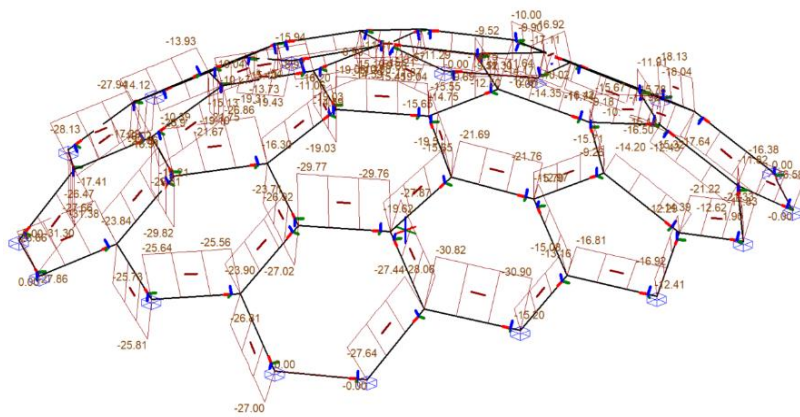
Figuur 91: FB2_Wind onderdruk_Belastinginvoer



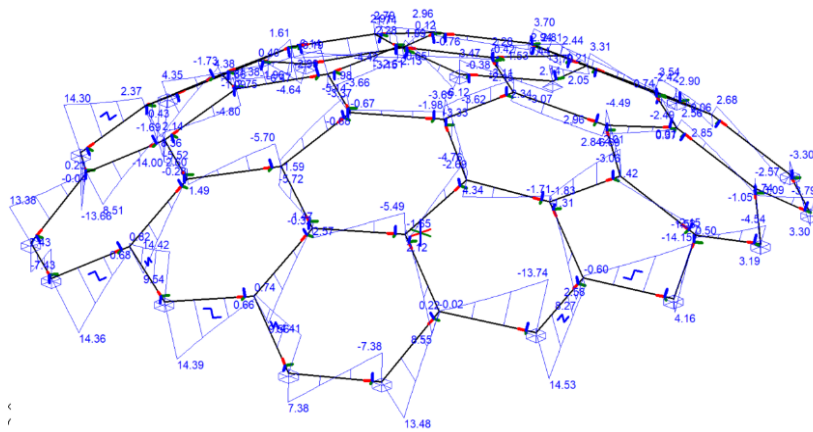
Figuur 92: FB2_Wind onderdruk_My



Figuur 93: FB2_wind onderdruk_Mz

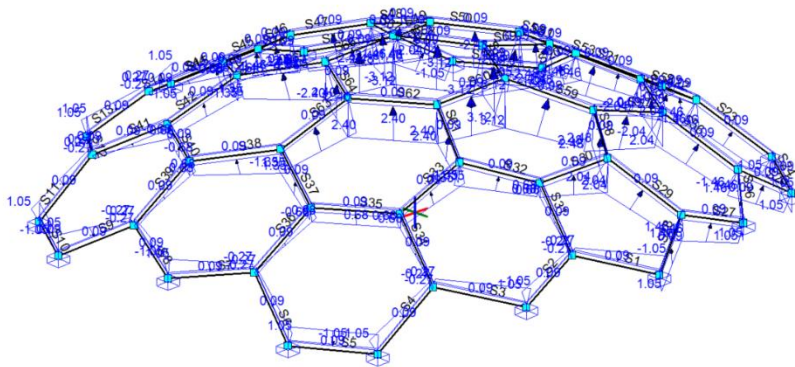


Figuur 94: FB2_Wind onderdruk_Normaalkracht

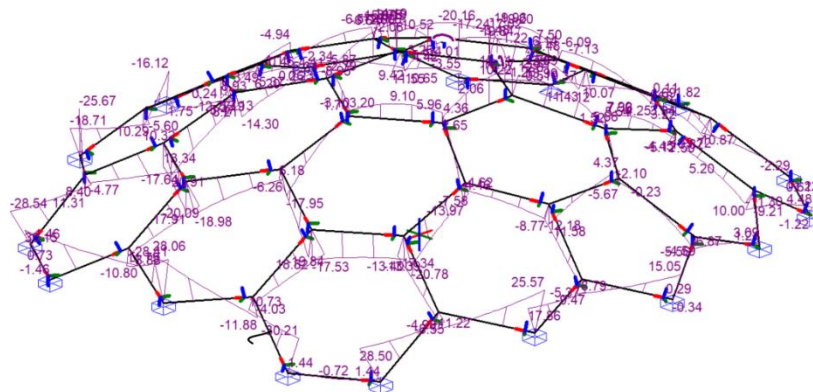


Figuur 95: FB2_Wind onderdruk_Dwarskracht

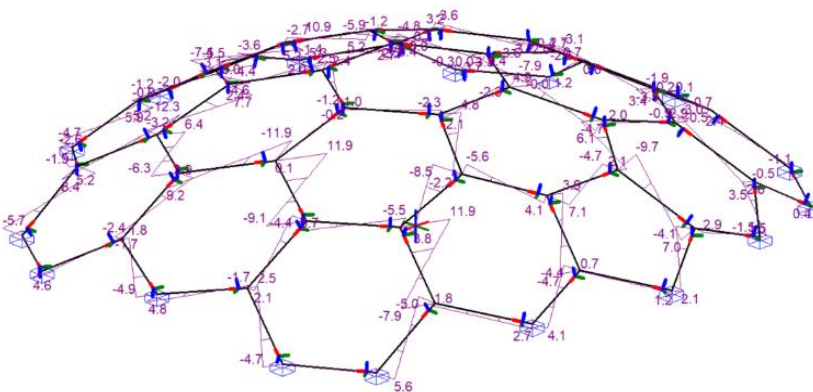
5. FB2: windbelasting overdruk maatgevend



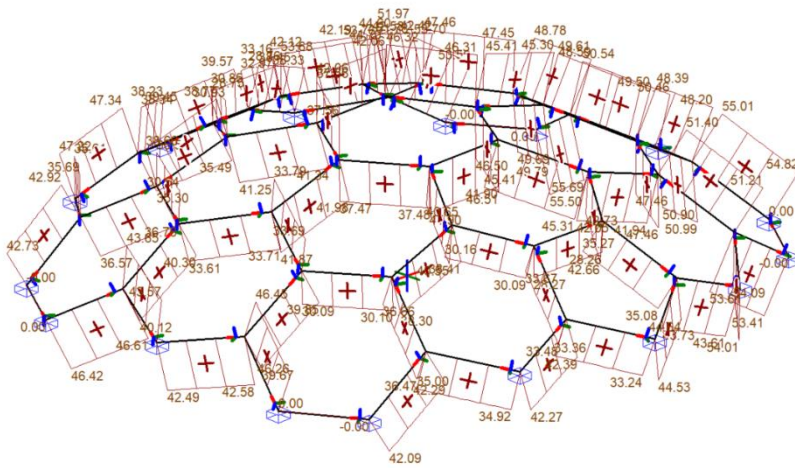
Figuur 96: FB2_Wind overdruk_Belastinginvoer



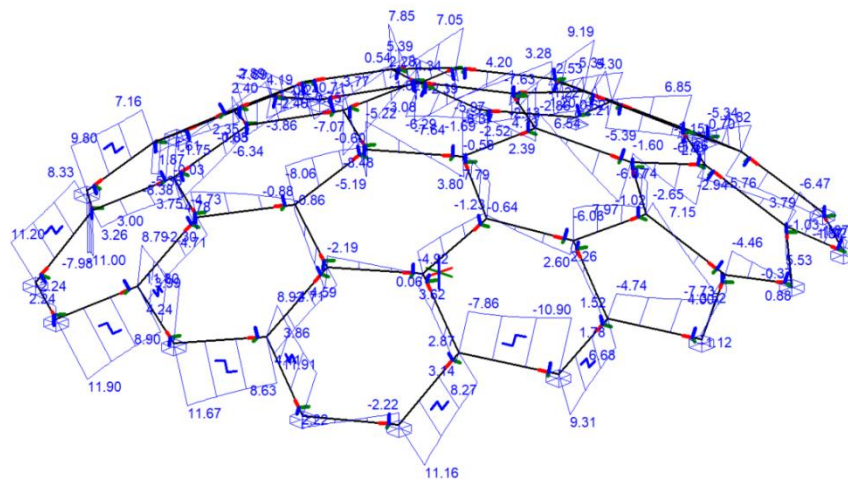
Figuur 97: FB2_Wind overdruk_My



Figuur 98: FB2_Wind overdruk_Mz



Figuur 99: FB2_Wind overdruk_Normaalkracht



Figuur 100: FB2_Wind overdruk_Normaalkracht

Bijlage 7: Overzicht knooppunten (Definitieve ontwerp)

Knoop	X	Y	Z	Knoop	X	Y	Z
K1	-13.101	7.050	-1.672	K51	-4.060	3.560	-6.513
K2	-15.421	5.337	-0.331	K52	-2.038	3.376	-6.816
K3	-14.649	6.937	-0.442	K53	-5.024	8.382	-4.966
K4	-1.650	12.428	-3.425	K54	-5.059	5.245	-5.965
K5	-3.513	14.407	-1.713	K55	-2.030	6.527	-6.111
K6	-4.632	11.391	-3.581	K56	-4.052	6.743	-5.761
K7	-3.260	12.813	-2.959	K57	-12.461	-5.373	-2.708
K8	-10.374	8.712	-2.726	K58	-12.767	-1.821	-3.185
K9	-7.587	10.138	-3.343	K59	-14.780	-3.655	-1.370
K10	-9.511	11.947	-1.330	K60	-13.389	-3.639	-2.480
K11	-9.186	10.313	-2.528	K61	-12.461	5.400	-2.702
K12	-5.134	14.662	-1.085	K62	-14.793	3.694	-1.351
K13	-8.183	13.428	-0.908	K63	-12.762	1.818	-3.190
K14	-6.282	11.664	-2.937	K64	-13.389	3.639	-2.480
K15	-6.557	13.300	-1.709	K65	-15.592	-1.851	-0.930
K16	-12.048	8.700	-1.667	K66	-13.542	-0.003	-2.726
K17	-11.185	11.925	-0.279	K67	-15.590	1.853	-0.931
K18	-12.649	10.429	-0.242	K68	-14.963	0.000	-1.593
K19	-0.048	13.477	-2.776	K69	-1.050	-10.855	-4.397
K20	1.833	15.446	-1.072	K70	-1.038	-7.927	-5.718
K21	-1.887	15.417	-1.093	K71	-4.028	-9.810	-4.558
K22	0.000	14.829	-1.713	K72	-2.015	-9.553	-4.974
K23	1.621	12.505	-3.377	K73	-1.036	-1.688	-7.072
K24	4.646	11.440	-3.547	K74	-4.054	-3.564	-6.514
K25	3.467	14.442	-1.695	K75	-1.040	-4.837	-6.618
K26	3.261	12.813	-2.959	K76	-2.038	-3.376	-6.816
K27	10.370	8.738	-2.715	K77	-9.749	-7.075	-3.738
K28	9.506	11.944	-1.335	K78	-6.972	-8.527	-4.338
K29	7.597	10.175	-3.318	K79	-7.002	-5.378	-5.390
K30	9.186	10.312	-2.528	K80	-7.927	-7.015	-4.567
K31	6.278	11.664	-2.937	K81	-2.030	-6.531	-6.111
K32	8.183	13.427	-0.908	K82	-5.055	-5.243	-5.966
K33	5.136	14.662	-1.085	K83	-5.027	-8.380	-4.966
K34	6.556	13.300	-1.709	K84	-4.052	-6.744	-5.761
K35	13.085	7.037	-1.691	K85	-10.763	5.397	-3.723
K36	15.408	5.304	-0.355	K86	-11.068	1.828	-4.208
K37	14.648	6.937	-0.442	K87	-8.039	3.704	-5.364
K38	12.029	8.712	-1.674	K88	-10.006	3.660	-4.513
K39	11.177	11.923	-0.285	K89	-10.782	-5.386	-3.716
K40	12.529	10.267	-0.430	K90	-8.043	-3.698	-5.364
K41	-0.972	10.807	-4.427	K91	-11.074	-1.829	-4.204
K42	-4.005	9.760	-4.585	K92	-10.006	-3.660	-4.513
K43	-0.977	7.925	-5.723	K93	-2.048	-0.012	-7.051
K44	-2.015	9.553	-4.974	K94	-5.084	1.870	-6.494
K45	-9.730	7.061	-3.752	K95	-5.080	-1.876	-6.494
K46	-7.000	5.385	-5.388	K96	-4.083	0.000	-6.775
K47	-6.954	8.491	-4.359	K97	-10.156	0.002	-4.763
K48	-7.927	7.015	-4.566	K98	-7.125	-1.876	-5.920
K49	-1.012	1.675	-7.075	K99	-7.120	1.873	-5.922
K50	-0.995	4.833	-6.621	K100	-8.170	0.000	-5.630

Figuur 101: Knopen 1-100

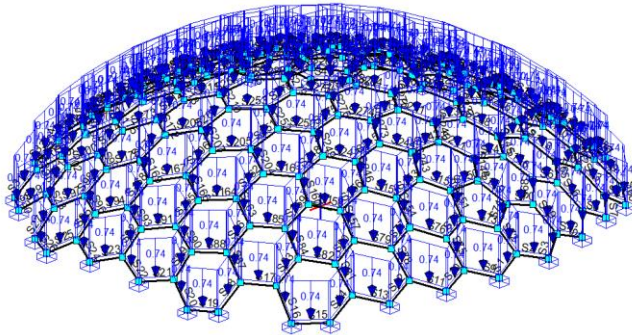
Knoop	X	Y	Z	Knoop	X	Y	Z
K101	13.101	-7.050	-1.672	K151	1.050	10.855	-4.397
K102	15.421	-5.337	-0.331	K152	1.038	7.927	-5.718
K103	14.648	-6.938	-0.442	K153	4.028	9.810	-4.558
K104	1.650	-12.428	-3.425	K154	2.015	9.553	-4.974
K105	3.513	-14.407	-1.713	K155	1.036	1.688	-7.072
K106	4.632	-11.391	-3.581	K156	4.054	3.564	-6.514
K107	3.260	-12.814	-2.959	K157	1.040	4.837	-6.618
K108	10.374	-8.712	-2.726	K158	2.038	3.376	-6.816
K109	7.587	-10.138	-3.343	K159	9.749	7.075	-3.738
K110	9.511	-11.947	-1.330	K160	6.972	8.527	-4.338
K111	9.186	-10.313	-2.528	K161	7.002	5.378	-5.390
K112	5.134	-14.662	-1.085	K162	7.926	7.015	-4.567
K113	8.183	-13.428	-0.908	K163	2.029	6.531	-6.111
K114	6.282	-11.665	-2.937	K164	5.055	5.243	-5.966
K115	6.557	-13.300	-1.709	K165	5.027	8.380	-4.966
K116	12.048	-8.700	-1.667	K166	4.052	6.743	-5.761
K117	11.185	-11.925	-0.279	K167	10.763	-5.397	-3.723
K118	12.649	-10.429	-0.242	K168	11.068	-1.829	-4.208
K119	0.048	-13.477	-2.776	K169	8.039	-3.704	-5.364
K120	-1.833	-15.446	-1.072	K170	10.005	-3.660	-4.513
K121	1.887	-15.417	-1.093	K171	10.782	5.386	-3.716
K122	0.000	-14.829	-1.713	K172	8.043	3.698	-5.364
K123	0.972	-10.807	-4.427	K173	11.074	1.828	-4.204
K124	4.005	-9.760	-4.585	K174	10.005	3.660	-4.513
K125	0.977	-7.925	-5.723	K175	2.048	0.012	-7.051
K126	2.015	-9.553	-4.974	K176	5.084	-1.870	-6.494
K127	9.730	-7.061	-3.752	K177	5.080	1.876	-6.494
K128	7.000	-5.385	-5.388	K178	4.083	0.000	-6.775
K129	6.954	-8.491	-4.359	K179	10.156	-0.003	-4.763
K130	7.926	-7.015	-4.566	K180	7.125	1.876	-5.920
K131	1.012	-1.675	-7.075	K181	7.120	-1.873	-5.922
K132	0.995	-4.833	-6.621	K182	8.170	0.000	-5.630
K133	4.060	-3.560	-6.513	K183	-1.621	-12.505	-3.377
K134	2.038	-3.376	-6.816	K184	-4.646	-11.440	-3.547
K135	5.024	-8.382	-4.966	K185	-3.467	-14.442	-1.695
K136	5.059	-5.245	-5.965	K186	-3.261	-12.814	-2.959
K137	2.029	-6.527	-6.111	K187	-10.370	-8.738	-2.715
K138	4.052	-6.744	-5.761	K188	-9.506	-11.944	-1.335
K139	12.460	5.373	-2.708	K189	-7.597	-10.175	-3.318
K140	12.767	1.821	-3.185	K190	-9.186	-10.312	-2.528
K141	14.780	3.655	-1.370	K191	-6.278	-11.665	-2.937
K142	13.389	3.639	-2.480	K192	-8.183	-13.427	-0.908
K143	12.460	-5.400	-2.702	K193	-5.136	-14.662	-1.085
K144	14.793	-3.694	-1.351	K194	-6.556	-13.300	-1.709
K145	12.762	-1.818	-3.190	K195	-13.085	-7.037	-1.691
K146	13.389	-3.639	-2.480	K196	-15.408	-5.304	-0.355
K147	15.592	1.851	-0.930	K197	-14.649	-6.938	-0.442
K148	13.542	0.002	-2.726	K198	-12.029	-8.712	-1.674
K149	15.590	-1.853	-0.931	K199	-11.177	-11.923	-0.285
K150	14.963	0.000	-1.593	K200	-12.529	-10.267	-0.430

Figuur 102: Knopen 101-200

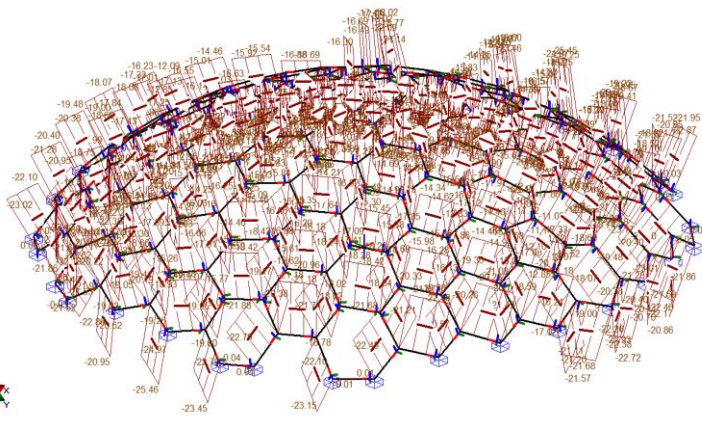
Bijlage 8: Krachten en momenten (Definitief ontwerp) |

In deze bijlage zullen de momenten-, dwarskrachten- en normaalkrachtenlijnen getoond worden. Tevens zullen de doorbuigingslijnen en knoopverplaatsingen getoond worden. De doorbuigingslijnen en knoopverplaatsingen zijn zonder veiligheidsfactoren. De momenten-, dwarskrachten- en normaalkrachtenlijnen wel.

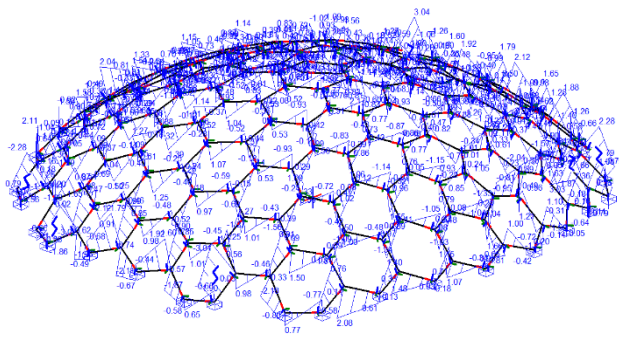
1: Fundamentele belastingcombinatie 1



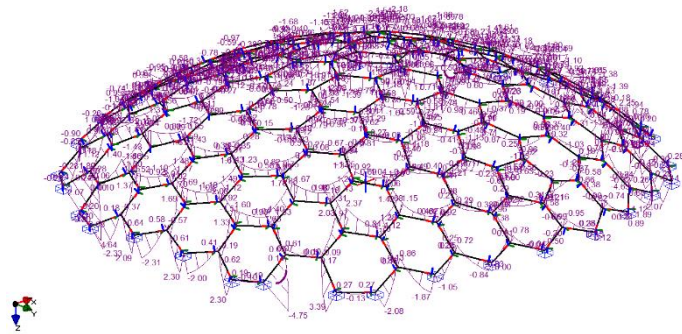
Figuur 103: FB1_Belastinginvoer



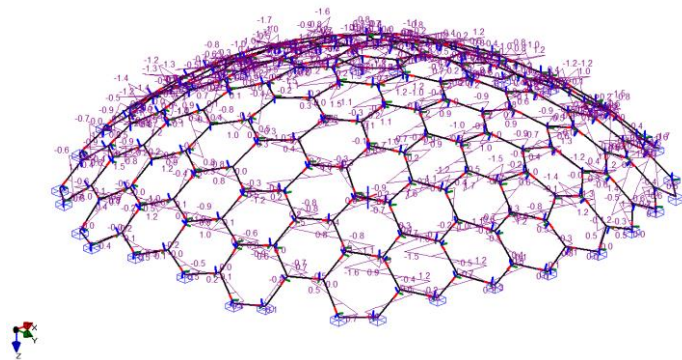
Figuur 104: FB1_Normaalkrachtenlijn



Figuur 105: FB1_Dwarskrachtenlijn

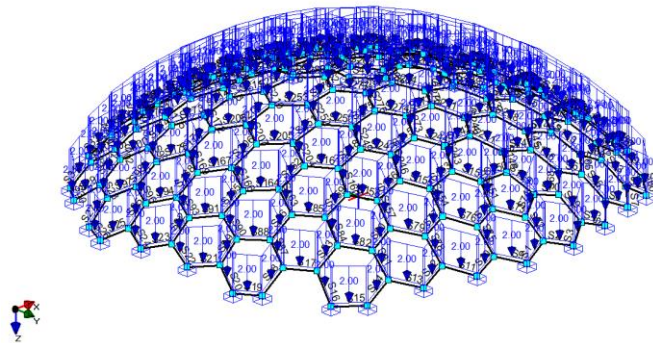


Figuur 106: FB1_Momentenlijn M_y

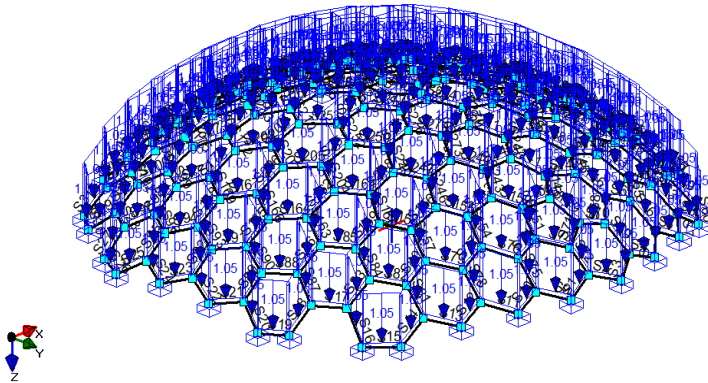


Figuur 107: FB1_Momentenlijn M_z

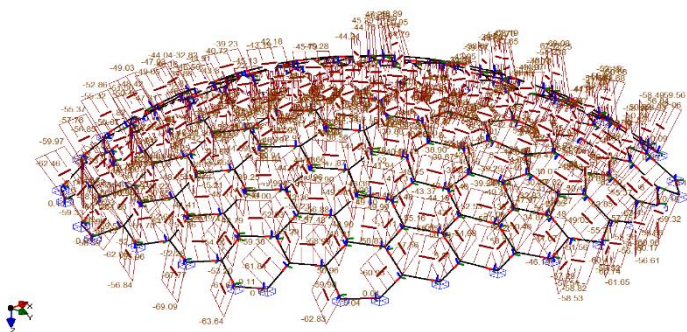
2: FB2: Opgelegde belasting maatgevend



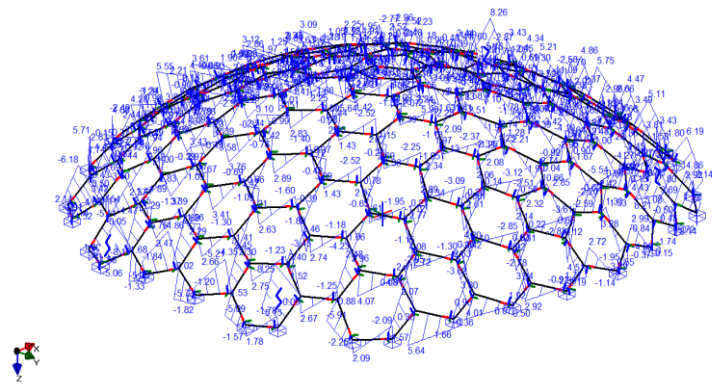
Figuur 108: FB2_Opgelegde belasting_Belastinginvoer met veiligheidsfactoren



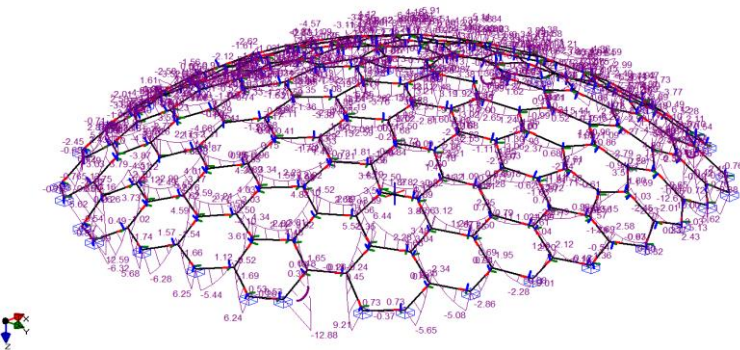
Figuur 109: FB2_Opgelegde belasting_Belastinginvoer zonder belastingfactoren



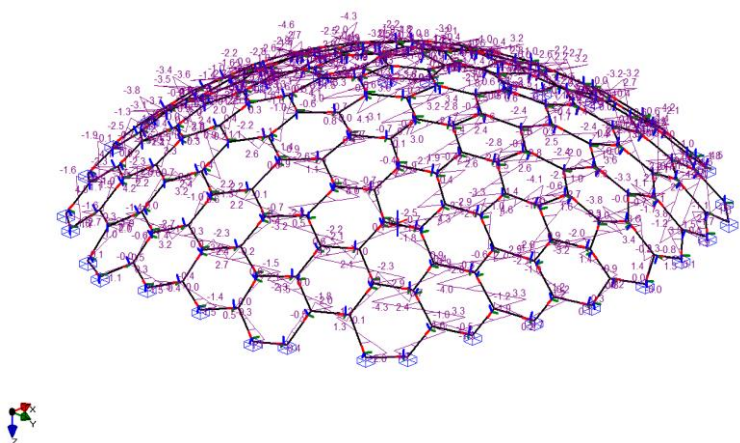
Figuur 110: FB2_Opgelegde belasting_Normaalkracht



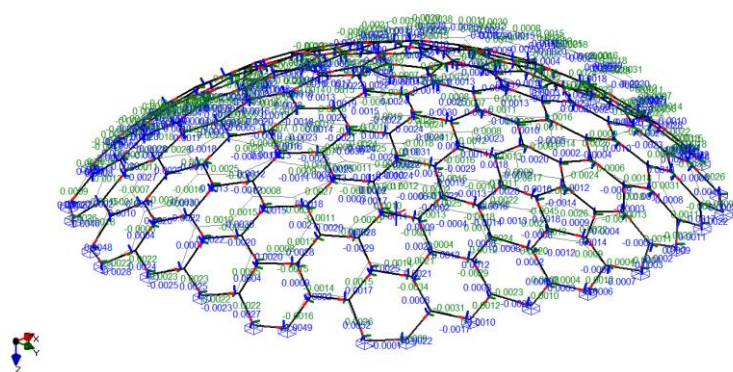
Figuur 111: FB2_Opgelegde belasting_Dwarskracht



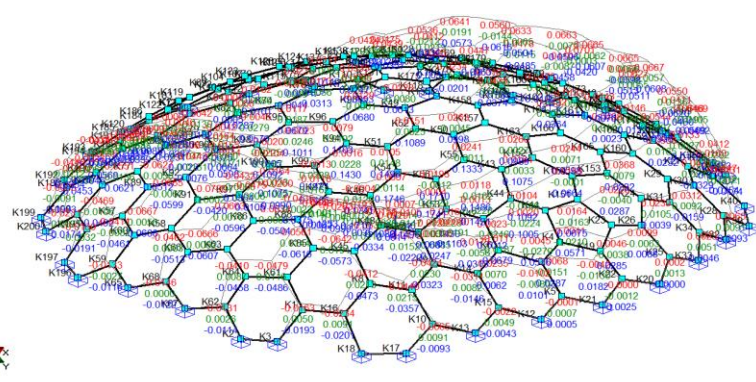
Figuur 112: FB2_Opgelegde belasting_My



Figuur 113: FB2_Opgelegde belasting_Mz

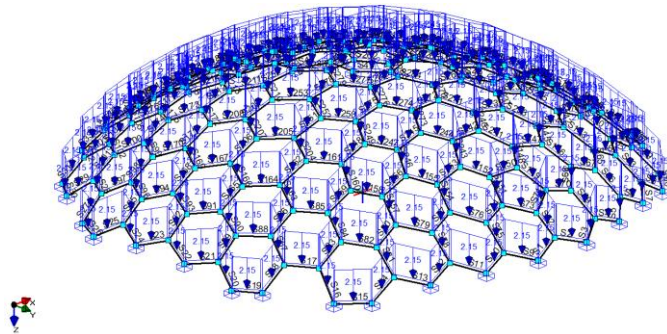


Figuur 114: FB2_Opgelegde belastingen_Staafdoorbuigingen

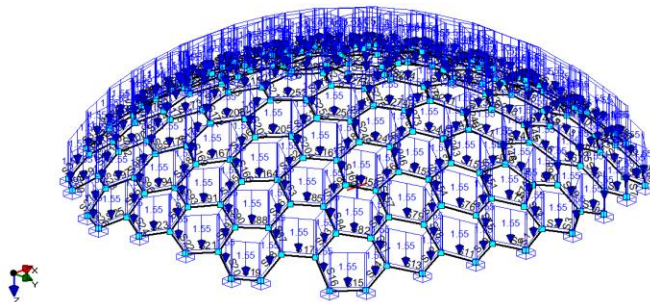


Figuur 115: FB2_Opgelegde belastingen_Knoopverplaatsingen

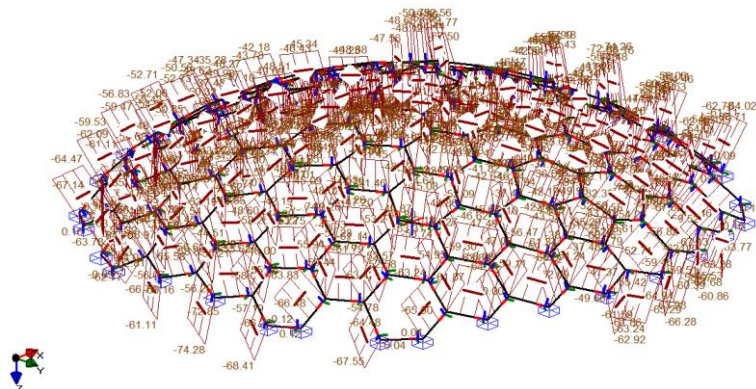
3: FB2: Sneeuwbelasting maatgevend



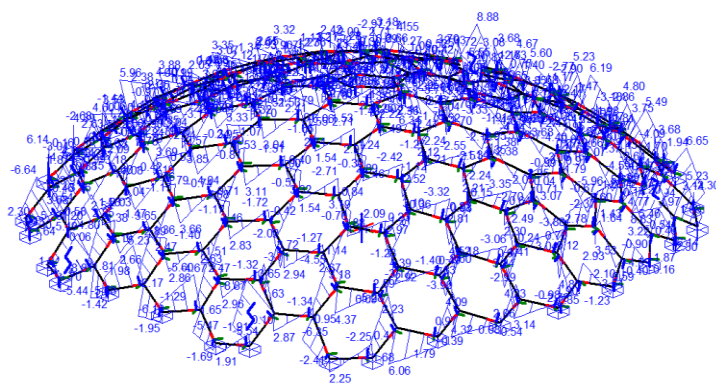
Figuur 116: FB2_Sneeuwbelasting_Ingevoerde belasting met veiligheidsfactoren



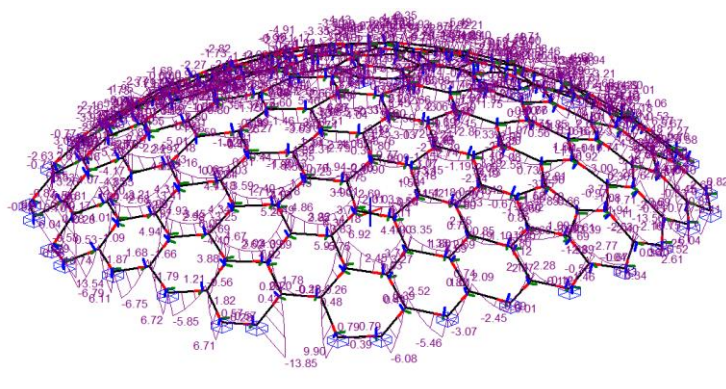
Figuur 117: Sneeuwbelasting_Ingevoerde belasting zonder veiligheidsfactoren



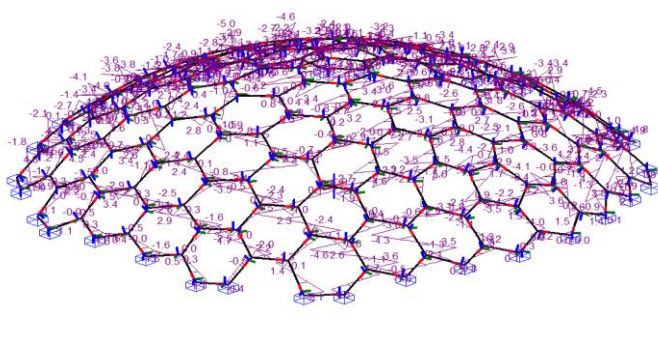
Figuur 118: FB2_Sneeuwbelasting_Normaalkracht



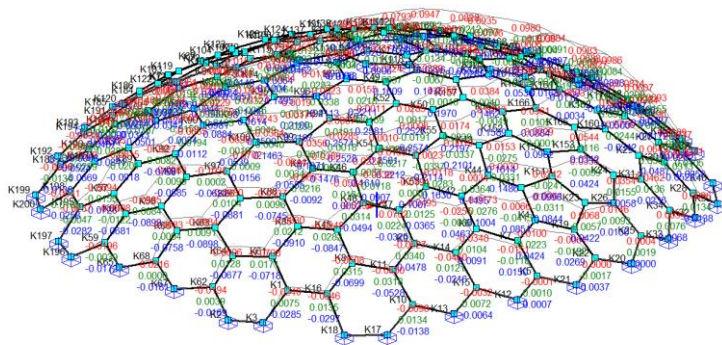
Figuur 119: FB2_Sneeuwbelasting_Dwarskracht



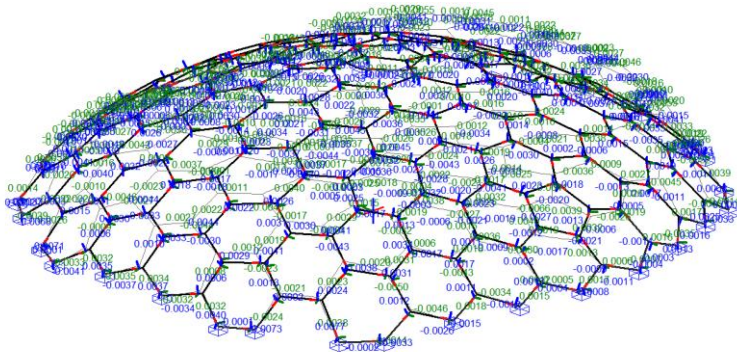
Figuur 120: FB2_Sneeuwbelasting_My



Figuur 121: FB2_Sneeuwbelasting_Mz

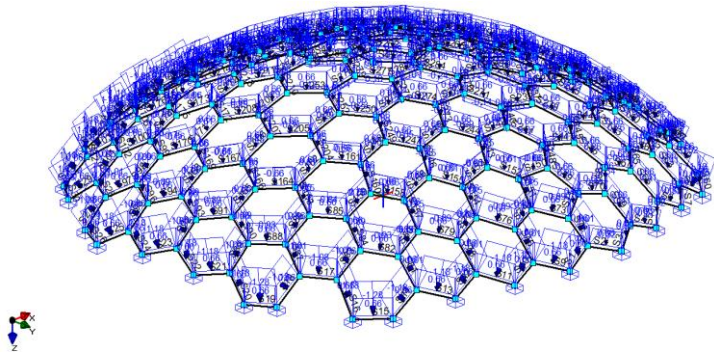


Figuur 122: FB2_Sneeuwbelasting_Knoopverplaatsingen

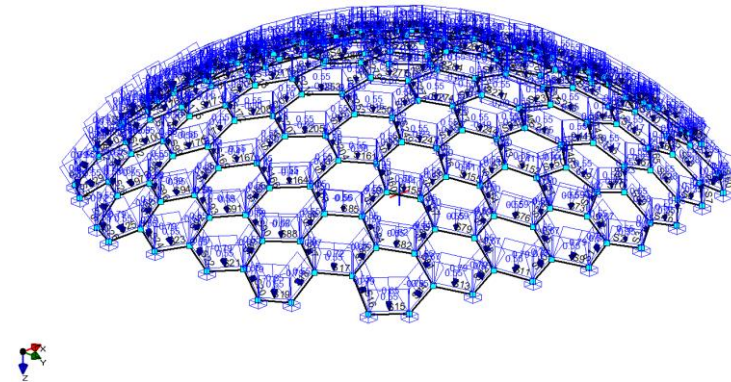


Figuur 123: FB2_Sneeuwbelasting_Staafdoorbuigingen

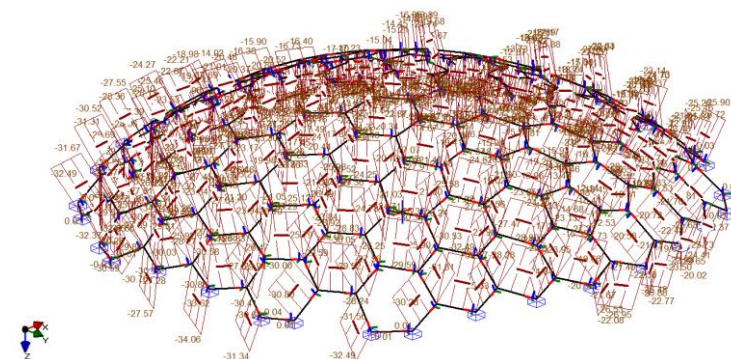
4: FB2: Wind onderdruk maatgevend



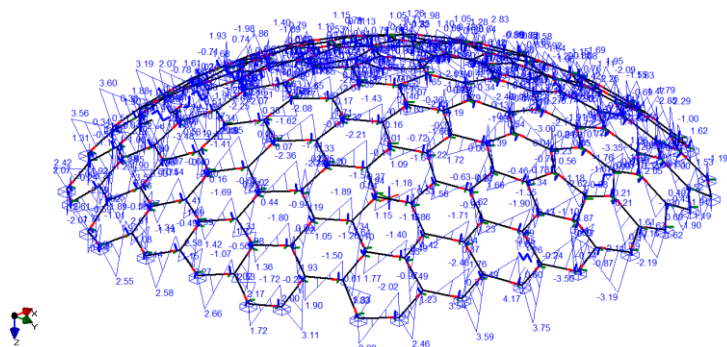
Figuur 124: FB2_Wind onderdruk_Belastinginvoer met belastingfactoren



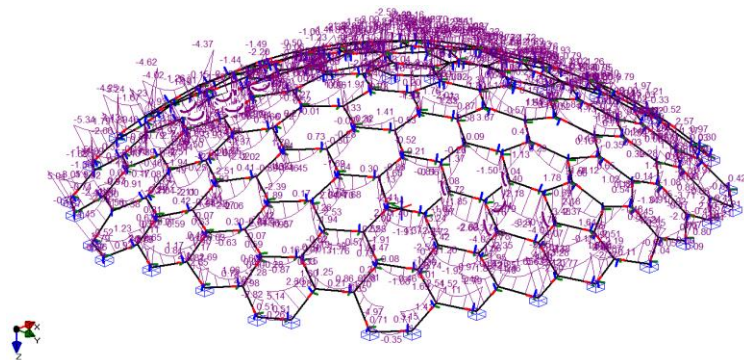
Figuur 125: FB2_Wind onderdruk_Belastinginvoer zonder belastingfactoren



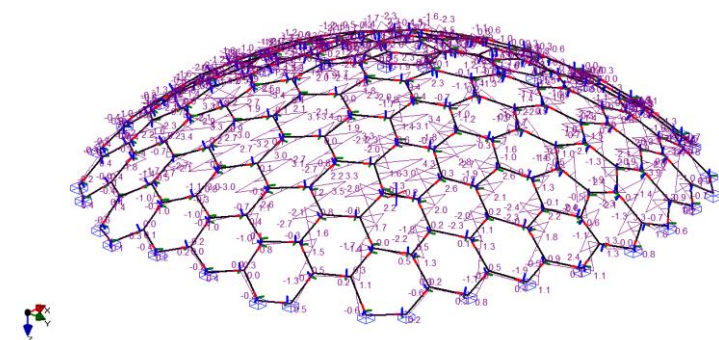
Figuur 126: FB2_Wind onderdruk_Normaalkracht



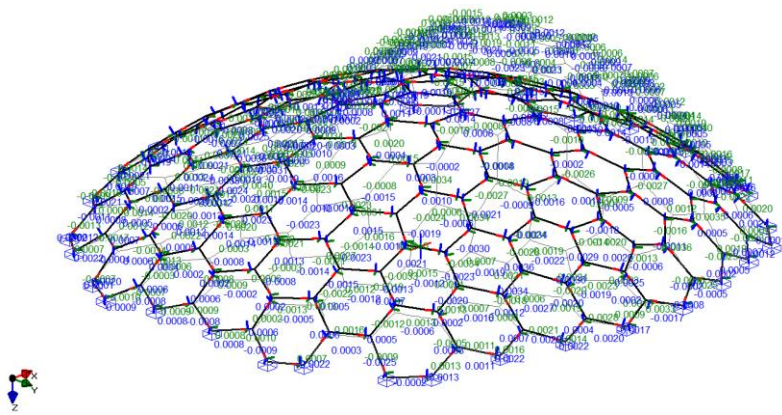
Figuur 127: FB2_Wind onderdruk_Dwarskracht



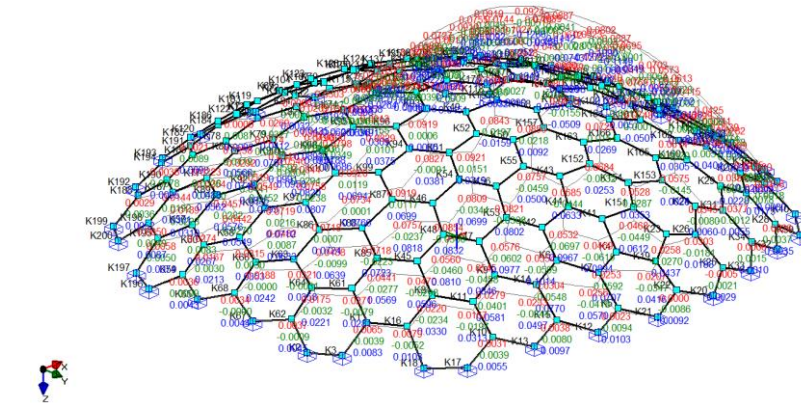
Figuur 128: FB2_Wind onderdruk_My



Figuur 129: FB2_Wind onderdruk_Mz

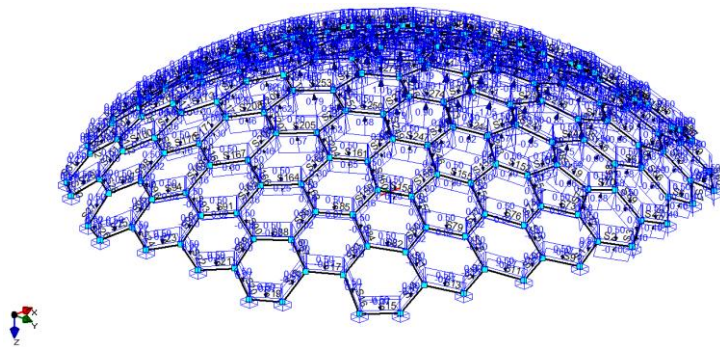


Figuur 130: FB2_Wind onderdruk_Staafdoorbuigingen

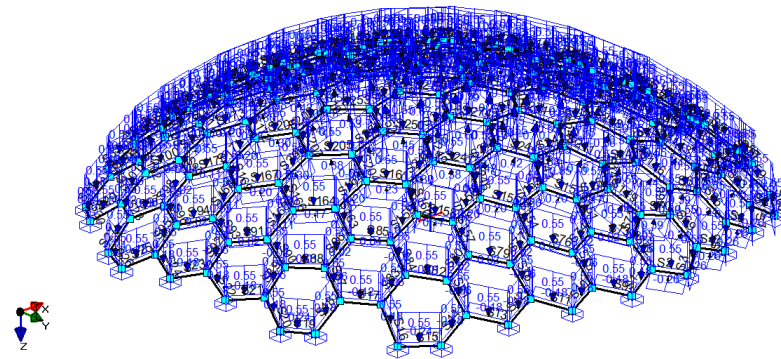


Figuur 131: FB2_Wind onderdruk_Knoopverplaatsingen

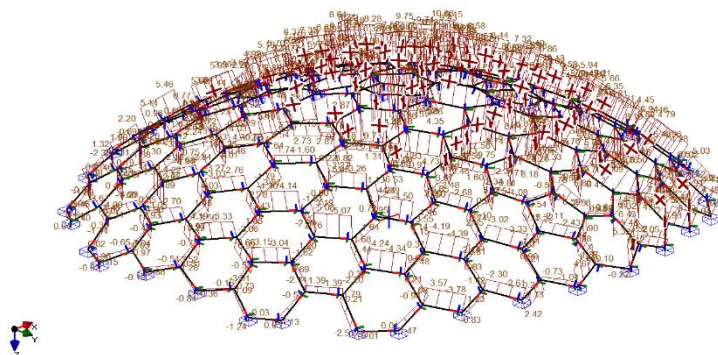
5: FB2: Wind overdruk maatgevend



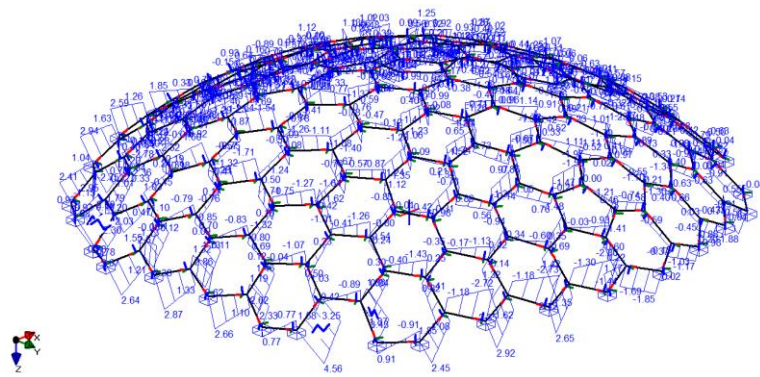
Figuur 132: FB2_Wind overdruk_Belastinginvoer met belastingfactoren



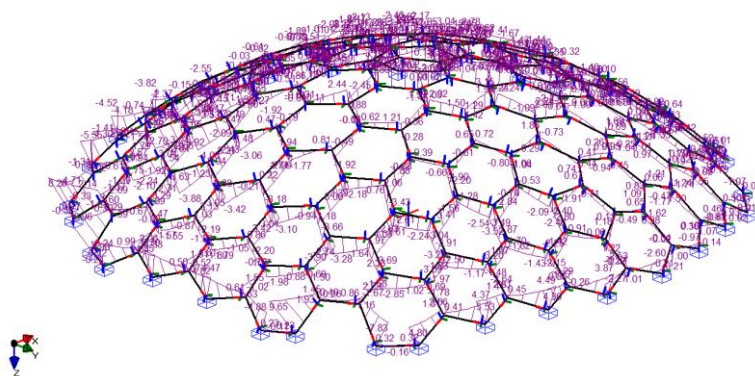
Figuur 133: FB2_Wind overdruk_Belastinginvoer zonder belastingfactoren



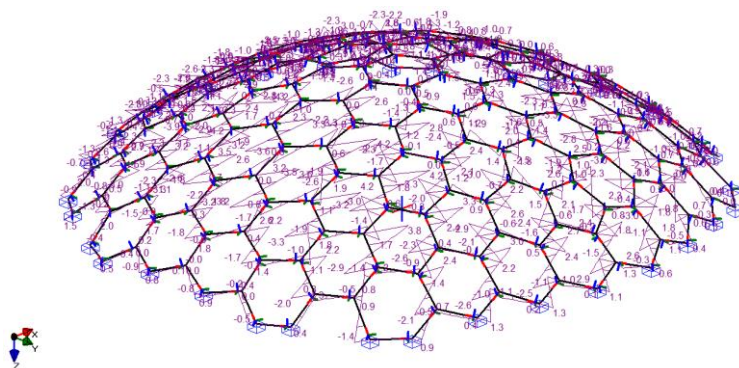
Figuur 134: FB2_Wind overdruk_Normaalkracht



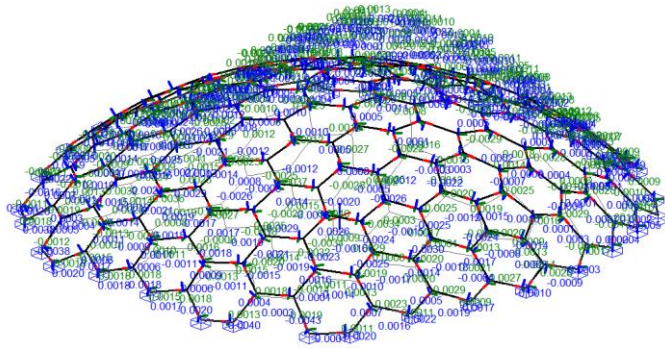
Figuur 135: FB2_Wind overdruk_Dwarskracht



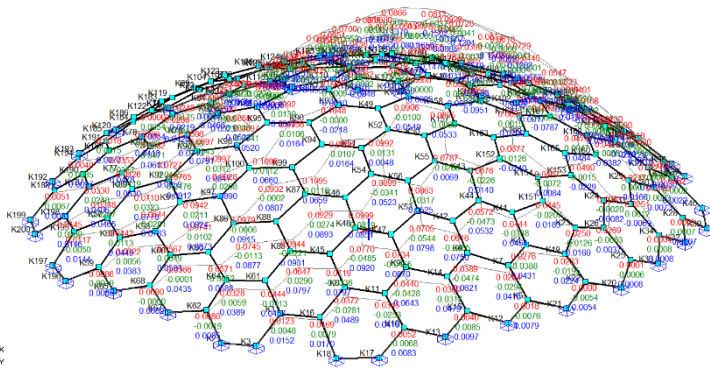
Figuur 136: FB2_Wind overdruk_My



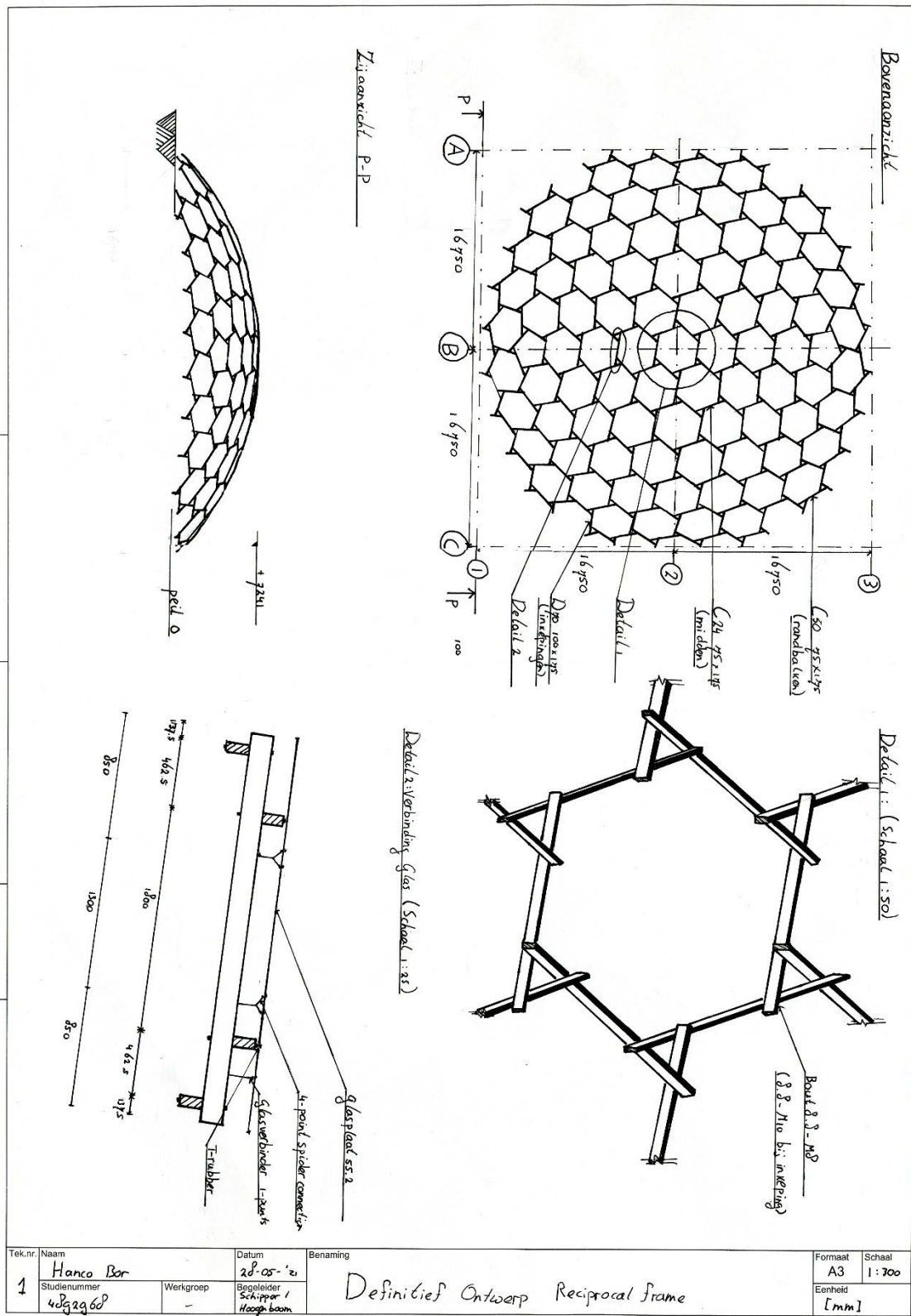
Figuur 137: FB2_Wind overdruk_Mz



Figuur 138: FB2_Wind overdruk_staafdoorbuigingen



Figuur 139: FB2_Wind overdruk_knoopverplaatsingen



Figuur 140: Definitief ontwerp