

MASTER

**De duurzame weg
'een constructieve optimalisatie'**

van Welie, J.M.

Award date:
2010

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

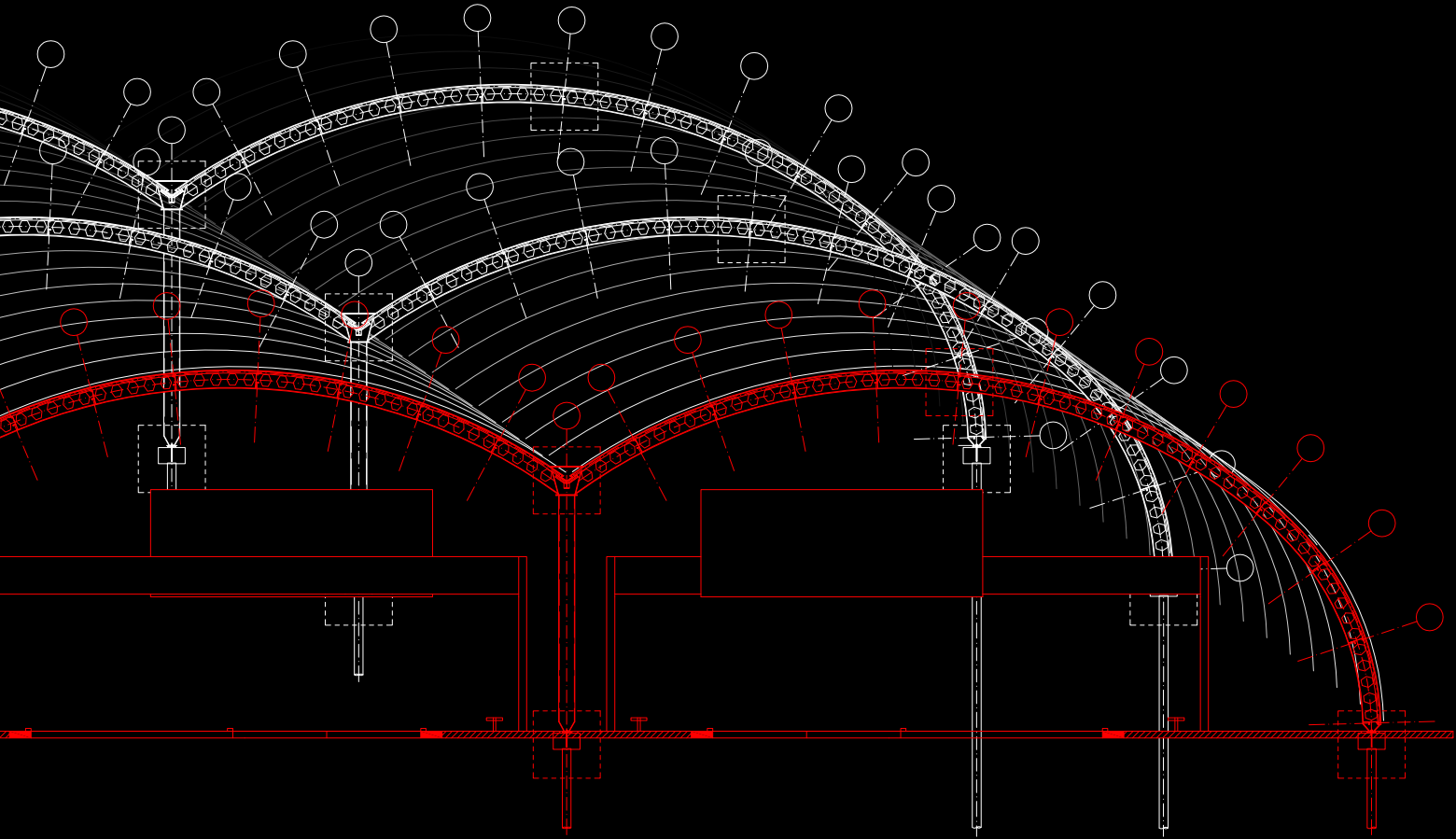
General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

DE DUURZAME WEG

'een constructieve optimalisatie'



\\ RAPPORT

ing. Anne-Marie van Welie
december 2010


Movares

TU/e

De Duurzame Weg

'Een constructieve optimalisatie'

Ing. Anne-Marie van Welie (J.M.) 0537244

02 december 2010

Rapportnummer:

A-2010.10

Technische Universiteit Eindhoven

Faculteit Bouwkunde

Capaciteitsgroep Constructief Ontwerpen

Afstudeerbegeleidingscommissie:

Prof. Ir. H.H. Snijder

Ir. L.I. Vákár

Ir. R. Blok

Technische Universiteit Eindhoven

Movares Nederland BV

Technische Universiteit Eindhoven

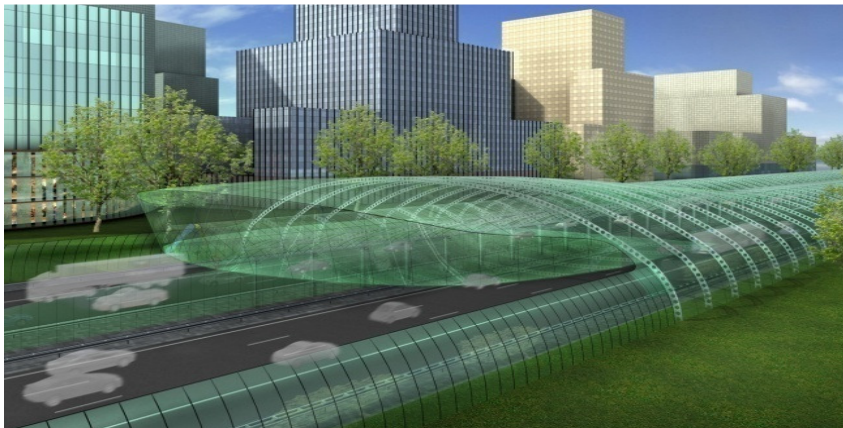
Samenvatting

Luchtvervuiling is tegenwoordig een onderwerp wat een grote rol speelt. Men streeft naar het beperken van de uitstoot van schadelijke stoffen. In de bouwwereld spelen geluidsoverlast en luchtkwaliteit ook een steeds belangrijkere rol. Dit komt namelijk door de strenger wordende regelgeving voor het aanleggen van nieuwe en het uitbreiden van bestaande infrastructuur.

In Nederland is er vraag naar om de groeiende mobiliteitsstromen te combineren met de behoefte aan rust en ruimtelijke kwaliteit. Dit om meerdere redenen:

- Omwonenden ervaren last van het verkeer.
- Gemeenten willen de effecten van het wegverkeer voor omwonenden beperken.
- Ontwikkelaars willen de vrije ruimte naast bestaande wegen benutten voor woningen en kantoren.
- Wegbeheerders willen de capaciteit van de wegvlakken verruimen, maar ook de omgeving beschermen.

Advies- en ingenieursbureau Movares ontwikkelde hiervoor een concept dat de oplossing zou bieden voor de heersende problematiek, namelijk De Duurzame Weg (figuur 1). Deze oplossing bestaat uit een overkapping over de snelweg met koud buigbaar glas. Hiervoor is gekozen omdat dit visueel aantrekkelijk is, veilig, goedkoop en zeer duurzaam in vergelijking met andere materialen. Er wordt gebruik gemaakt van Freeformglass®, dat Movares heeft gepatenteerd.



figuur 1 De Duurzame Weg (Bron: Movares)

De warmte die onder de overkapping ontstaat, kan worden opgeslagen en worden gebruikt om huizen in de omgeving te verwarmen in de winter. Dit levert een belangrijke besparing op het verbruik van fossiele brandstoffen. De milieuzone rondom de infrastructuur wordt door het concept verkleind en levert extra bouwgrond op in stedelijk gebied.

De Duurzame Weg maakt capaciteitsuitbreiding van wegen mogelijk en zorgt voor een goede bereikbaarheid van steden, terwijl tegelijkertijd wordt bijgedragen aan het overheidsbeleid om meer binnenstedelijk te bouwen.

Een belangrijk uitgangspunt is dat iedere rijbaan een eigen overkapping krijgt. Dit in verband houden met de luchtstroom en de brandcompartimentering. De rijbanen worden gescheiden door een absorberende gesloten wand (figuur 2).



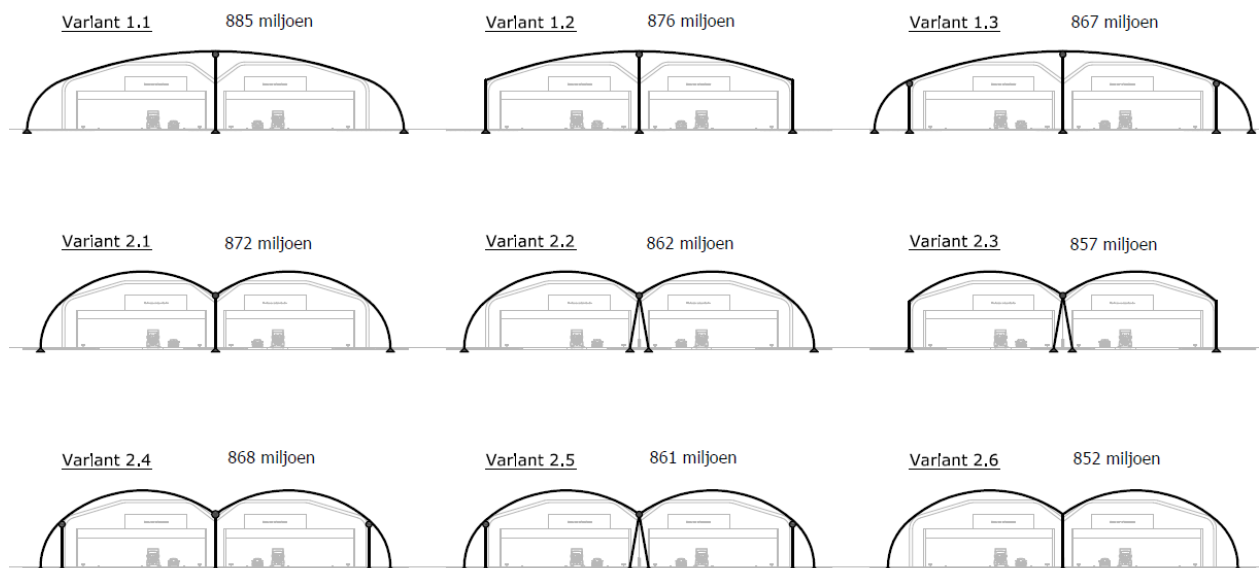
figuur 2 De Duurzame Weg – gescheiden rijrichtingen (Bron: Movares)

Een transparante overkapping heeft door het daglicht dat overdag invalt geen verlichting nodig. Wat een groot voordeel is ten opzichte van een gesloten overkapping. Hiermee is bij calamiteiten de oriëntatie eenvoudig, zowel van binnenuit als van buitenaf.

De Duurzame Weg is echter nog een concept. Dat betekent dat nog niet alles volledig is uitgezocht. Hierbij valt te denken aan spantafstanden, profilering, op- en afritten, begin en eind van de overkapping en detaillering van de bevestiging van de koudgebogen glasplaten.

Het concept van Movares is in dit afstudeerproject constructief geoptimaliseerd. Buiten de constructieve aspecten zullen tevens de afbouwtechnische aspecten in acht worden genomen, zoals de bevestiging van de koud gebogen glasplaten op de onderliggende constructie.

De constructieve optimalisatie gebeurt aan de hand van een aantal variantenonderzoeken. Er is onderzocht wat de optimale manier van overkappen is (hoe kunnen de spanten ten opzichte van elkaar worden geplaatst) en ook naar de optimale spantvorm (in één keer of in twee keer overkappen) (figuur 3).



figuur 3 Variantenstudie spantvorm

Het uitvoeringsaspect speelt ook een rol; hoe kan de kap worden opgebouwd. En als laatste onderdeel is er gekeken naar temperatuursspanningen; hoe kan de overkapping gedilateerd worden.

Tijdens de verschillende variantenstudies is er gezocht naar een constructief optimaal systeem. Door het maken van definitieve berekeningen van de constructie-elementen is het volledige constructieve systeem bekend.

Voorwoord

In dit rapport beschrijf ik een afstudeerproject dat betrekking heeft op het constructief optimaliseren van een door Movares ontwikkeld concept; namelijk De Duurzame Weg.

Het rapport bestaat uit drie delen, namelijk het hoofdrapport, de bijlagen en de tekeningen. Dit afstudeerproject vormt de afsluiting van mijn studie bij de capaciteitsgroep Constructief Ontwerpen, Faculteit Bouwkunde aan de Technische Universiteit Eindhoven.

Mijn dank gaat hierbij uit naar de leden van mijn begeleidingscommissie (Prof. Ir. H.H. Snijder, Ir. R. Blok en Ir. L.I. Vákár) voor hun begeleiding.

Bovenal wil ik de collega's bij Movares en mijn medestudenten van KOers bedanken voor hun hulp bij vragen en onduidelijkheden. Voor de morele steun en het opgebrachte begrip gedurende mijn studie en vooral gedurende deze afsluitende afstudeerperiode wil ik in het bijzonder mijn vriend Sjoerd, mijn ouders Jan en Dinie, mijn zus Marloes en mijn zwager Bas bedanken.

Anne-Marie van Welie

Eindhoven, december 2010

Inhoud

1. Inleiding.....	1
1.1 Algemeen.....	1
1.2 Probleem- en doelstelling.....	2
1.3 Introductie De Duurzame Weg.....	2
1.4 Opbouw rapport.....	2
2. Programma van Eisen	5
2.1 Locatiekeuze.....	5
2.2 Materiaalkeuze	5
2.3 Bouwmethode en montage.....	5
2.4 Onderhoud	5
2.5 Veiligheid.....	6
2.6 Bewegwijzering	10
2.7 Afmetingen	10
2.8 Belastingen	12
3. Variantenstudie overkapping	13
3.1 Varianten.....	13
3.1.1 Variant 1 Concept Movares	14
3.1.2 Variant 2 Concept Movares met ander ritme.....	14
3.1.3 Variant 3 Diagonaal.....	14
3.1.4 Variant 4 Geroteerd.....	15
3.1.5 Variant 5 Diagonaal en geroteerd.....	15
3.1.6 Variant 6 Geroteerd en recht.....	16
3.1.7 Variant 7 Diagonaal gehalveerd.....	16
3.1.8 Variant 8 Visgraat.....	17
3.2 Keuze ontwerp.....	18
4. Variantenstudie spantvorm	19
4.1 Hoofdvorm varianten	19
4.1.1 Uitgangspunten.....	19
4.2 Berekening en toetsing varianten	21
4.2.1 Belastingen	21
4.2.2 Belastingcombinaties	24
4.2.3 Toetsing varianten.....	25
4.3 Varianten.....	26
4.3.1 Hoofdvorm 1	26
4.3.2 Hoofdvorm 2.....	28
4.4 Vergelijken varianten.....	33
4.4.1 Materiaalgebruik.....	33

4.4.2	Fundering	34
4.4.3	Goot en riolering	35
4.5	Overzicht varianten	37
4.6	Keuze spantvorm	38
5.	Variantenstudie profilering	39
5.1	Profilering algemeen	39
5.1.1	Profielstaal	39
5.1.2	Breedflensprofielen	40
5.1.3	Buizen en kokers	40
5.1.4	Raatliggers	40
5.2	Profilering constructie-elementen	42
5.2.1	Bogen	42
5.2.2	Middenkolom	42
5.2.3	Gordingen	42
5.2.4	Glasdragers	43
6.	Variantenstudie spantopbouw	45
6.1	Uitgangspunten	45
6.2	Standaard opbouw	46
6.3	Tafelopbouw	47
6.3.1	Optimalisatie op moment	47
6.3.2	Optimalisatie op doorbuiging	48
6.4	Keuze spantopbouw	50
6.5	Keuze spantafstand	50
7.	Variantenstudie temperatuurspanningen en dilataties	51
7.1	Temperatuuruitzettingen	51
7.2	Mogelijkheden ter plaatse van oplegging	54
7.2.1	Glijdende oplegging	55
7.2.2	Oplegging die elastisch vervormt	57
7.2.3	Pendelstaaf als oplegging	57
7.2.4	Rubber oplegging	58
7.2.5	Keuze	60
7.3	Mogelijkheden ter plaatse van gording- en glasaansluiting	61
7.3.1	Dubbel spant	61
7.3.2	Glijverbinding	64
7.3.3	Staalplaat die elastisch kan vervormen	65
7.3.4	Keuze	66
7.4	Varianten dilatatie overkapping totaal systeem	67
7.4.1	Variant 1 totaal systeem	67

7.4.2	Variant 2 totaal systeem.....	70
7.4.3	Variant 3 totaal systeem.....	72
7.4.4	Variant 4 totaal systeem.....	74
7.4.5	Keuze variant dilatatie overkapping	85
7.4.6	Keuze spantopbouw en -afstand.....	85
8.	Definitieve berekening constructie-elementen	87
8.1	Opbouw Scia Engineer model.....	87
8.1.1	Opleggingen en aansluitingen	87
8.1.2	Belastingen	88
8.1.3	Belastingcombinaties	88
8.2	Boogspanten.....	89
8.3	Kolommen.....	90
8.4	Gordingen	90
8.5	Gootprofiel.....	91
8.6	Glasdragers.....	91
9.	Conclusie en aanbevelingen.....	93
9.1	Conclusie	93
9.2	Aanbevelingen.....	93
10.	Reflectie	95
Bronnen	97

1. Inleiding

1.1 Algemeen

Luchtvervuiling is tegenwoordig een onderwerp wat een steeds grotere rol gaat spelen. Men streeft naar het beperken van de uitstoot van schadelijke stoffen. In de bouwwereld spelen geluidsoverlast en luchtkwaliteit ook een steeds belangrijkere rol. Dit komt namelijk door de strenger wordende regelgeving voor het aanleggen van nieuwe en het uitbreiden van bestaande infrastructuur.

In Nederland is er vraag naar om de groeiende mobiliteitsstromen te combineren met de behoefte aan rust en ruimtelijke kwaliteit. Dit om meerdere redenen:

- Omwonenden ervaren last van het verkeer.
- Gemeenten willen de effecten van het wegverkeer voor omwonenden beperken.
- Ontwikkelaars willen de vrije ruimte naast bestaande wegen benutten voor woningen en kantoren.
- Wegbeheerders willen de capaciteit van de wegvlakken verruimen, maar ook de omgeving beschermen.

Advies- en ingenieursbureau Movares ontwikkelde hiervoor een concept dat de oplossing zou bieden voor de heersende problematiek, namelijk De Duurzame Weg (figuur 4). Deze oplossing bestaat uit een overkapping over de snelweg met koud buigbaar glas. Hiervoor is gekozen omdat dit visueel aantrekkelijk is, veilig, goedkoop en zeer duurzaam in vergelijking met andere materialen. Er wordt gebruik gemaakt van Freeformglass®, dat Movares heeft gepatenteerd.



figuur 4 Het door Movares ontwikkelde concept De Duurzame Weg (Bron: Movares)

Bij het ontwikkelen van het concept zijn de aspecten duurzaamheid, veiligheid, kosten en opbrengsten bijzondere aandachtspunten geweest. Het concept levert een reductie van geluid en fijnstof. Daarnaast levert het concept extra bouwgrond op in stedelijk gebied door het verkleinen van de milieuzone rondom de infrastructuur.

Movares won met dit concept de Nationale Geluid en Trillingen Innovatieprijs 2007 en de Nationale Innovatieprijs Luchtkwaliteit 2007.

1.2 Probleem- en doelstelling

De Duurzame Weg is echter nog een concept. Dat betekent dat nog niet alles volledig is uitgezocht. Hierbij valt te denken aan spantafstanden, profilering, op- en afritten, begin en eind van de overkapping en detaillering van de bevestiging van de koudgebogen glasplaten. Een aantal van deze onderdelen zijn uitgezocht in dit afstudeerproject.

De doelstelling die aan de hand van de aanleiding en probleemstelling kan worden opgesteld, luidt als volgt:

Het optimaliseren van het door Movares ontwikkelde concept voor “De Duurzame Weg” en het verfijnen en constructief onderbouwen hiervan. Buiten de constructieve aspecten zullen tevens de afbouwtechnische aspecten in acht worden genomen, zoals de bevestiging van de koud gebogen glasplaten op de onderliggende constructie.

1.3 Introductie De Duurzame Weg

Hier volgt een korte introductie op De Duurzame Weg. Voor een gedetailleerde uitleg wordt verwezen naar bijlage A (Vooronderzoek).

Het concept De Duurzame Weg bestaat uit een overkapping van koud buigbaar glas. Het ontwerp biedt een integrale oplossing voor de geschetste problematiek. Bijzondere aandacht hierbij is gegeven aan duurzaamheid, veiligheid, kosten en opbrengsten. Het concept levert een aanzienlijke reductie van geluid, fijnstof, NO_x, SO_x en CO₂. De warmte onder de overkapping kan worden opgeslagen en worden gebruikt om huizen in de omgeving te verwarmen in de winter. Dit levert een belangrijke besparing van het verbruik van fossiele brandstoffen. De milieuzone rondom de infrastructuur wordt door het concept verkleind en levert extra bouwgrond op in stedelijk gebied.

De Duurzame Weg maakt capaciteitsuitbreiding van wegen mogelijk en zorgt voor een goede bereikbaarheid van steden, terwijl tegelijkertijd wordt bijgedragen aan het overheidsbeleid om meer binnenstedelijk te bouwen.

De overkapping in het concept De Duurzame Weg bestaat uit een stalen constructie met koudgebogen gelaagd glas. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van Freeformglass® dat Movares heeft gepatenteerd. Koudgebogen gelaagd glas is aantrekkelijk, veilig, goedkoop en erg duurzaam in vergelijking met andere materialen.

Een belangrijk uitgangspunt is dat iedere rijbaan een eigen overkapping krijgt. De rijbanen worden gescheiden door een absorberende gesloten wand.

Een transparante overkapping heeft door het daglicht dat overdag invalt geen verlichting nodig. Wat een groot voordeel is ten opzichte van een gesloten overkapping. Hiermee is bij calamiteiten de oriëntatie eenvoudig, zowel van binnenuit als van buitenaf.

1.4 Opbouw rapport

Dit rapport bestaat uit een aantal hoofdstukken, dat in logische volgorde aan de orde komt.

Het programma van eisen voor De Duurzame Weg, dat de conclusie vormt van het vooronderzoek, wordt in hoofdstuk 2 nader toegelicht. Dit programma van eisen dient als basis voor het uiteindelijke ontwerp.

Vervolgens volgt een aantal variantenstudies. In hoofdstuk 3 zijn een aantal varianten ontworpen voor de totale overkapping (de manier waarop de spanten worden geplaatst). De voor- en nadelen van de varianten zijn met elkaar vergeleken wat leidt tot een keuze.

Nu bekend is waarop de spanten ten opzichte van elkaar worden geplaatst, wordt er in hoofdstuk 4 gekeken naar de mogelijkheden voor de spantvorm (in 2D). Er zijn een aantal varianten opgesteld, waar voor iedere variant een passend HE-profiel is berekend om de varianten onderling met elkaar te vergelijken. In eerste instantie worden de varianten met elkaar vergeleken op basis van kosten

(materiaalgebruik, fundering, goot en riolering). Dit alles leidt tot een definitieve keuze voor de spantvorm.

Een logische vervolgstap is om de mogelijke profileringen met elkaar te vergelijken. Hierbij valt te denken aan aspecten als het maken van verbindingen, het gewicht en het onderhoud. In hoofdstuk 5 wordt een eerste aanzet gemaakt voor de profilering van de verschillende constructie-elementen. De definitieve berekening van de verschillende elementen volgt in hoofdstuk 8.

In hoofdstuk 6 worden twee opties met elkaar vergeleken wat betreft de spantopbouw. Hier volgt nog geen definitieve keuze uit. De definitieve keuze volgt na het variantenonderzoek van de dilataties.

De temperatuurspanningen en de uitzettingen hierdoor zijn een belangrijk onderdeel bij het ontwerp van de overkapping. In hoofdstuk 7 wordt een aantal varianten met elkaar vergeleken. Er worden vier 'dilatatiesystemen' opgesteld welke met elkaar vergeleken worden. Na de keuze voor het dilatatiesysteem volgt tevens de keuze voor de spantopbouw en –afstand.

Na de variantenstudies komen de definitieve berekeningen van de verschillende constructie-elementen aan bod in hoofdstuk 8. Een 3D-model is opgesteld in Scia Engineer 2008 ten behoeve van deze berekeningen.

Het constructieve systeem van de overkapping is nu bekend. In hoofdstuk 9 volgt een conclusie op het project en aanbevelingen voor eventuele vervolgprojecten.

Het rapport wordt afgesloten met een reflectie op het afstudeerproject en –traject in hoofdstuk 10. Is er voldaan aan de in het begin gestelde doelstelling en hoe is het traject verlopen?

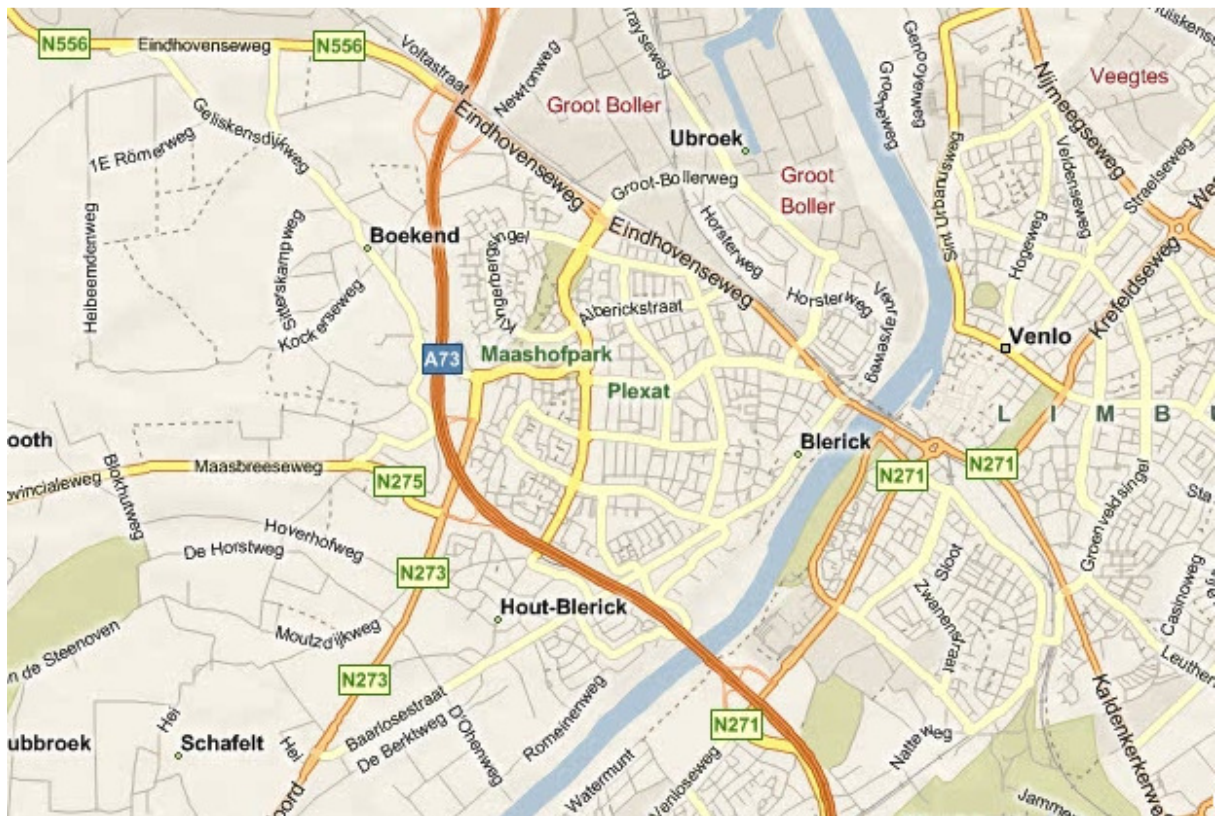
Om de omvang het rapport enigszins beperkt te houden, zijn de berekeningen en tekeningen opgenomen in de bijlage.

2. Programma van Eisen

Als conclusie van het vooronderzoek (bijlage A) is er een Programma van Eisen opgesteld voor De Duurzame Weg. In dit hoofdstuk zal dit 'voorlopige' Programma van Eisen worden aangevuld tot een 'definitief' Programma van Eisen.

2.1 Locatiekeuze

De snelweg die overkapt gaat worden, is de A73 in Venlo. De overkapping zal beginnen bij de Venloseweg en eindigen bij de kruising met de Eindhovenseweg (figuur 5). De lengte van de overkapping bedraagt ongeveer 4,0 kilometer. De Shakespearelaan en de Baarlosestraat kruisen de A73 door middel van een viaduct. Op het gekozen stuk snelweg bevinden zich ook enkele op- en afritten die mee ontworpen dienen te worden.



figuur 5 Plattegrond locatie De Duurzame Weg te Venlo (Bron: maps.live.nl)

2.2 Materiaalkeuze

De constructie zal bestaan uit nader te bepalen stalen profielen. De bekleding van de overkapping zal gebeuren door middel van koudgebogen glasplaten, het zogenaamde Freeformglass®.

2.3 Bouwmethode en montage

Wat betreft de bouwmethode en montage geldt dat dit in een vlot tempo moet kunnen gebeuren. De Duurzame Weg moet zo gedetailleerd worden dat montage ter plaatse eenvoudig gerealiseerd kan worden. De snelweg moet tijdens de opbouw namelijk worden afgezet en dit is niet wenselijk.

2.4 Onderhoud

Voor het reinigen van de lucht is een reinigingsinstallatie benodigd. Er is voor gekozen om deze installatie niet op te hangen aan de constructie (de spanten).

Voor het reinigen van de glasplaten is een gevelonderhoudsinstallatie benodigd, zowel aan de binnens als buitenzijde. Het gewicht van de gevelonderhoudsinstallatie wordt meegenomen in berekening van

de spanten. De afmetingen van de gevelonderhoudsinstallatie worden meegenomen bij het bepalen van het profiel van vrije ruimte.

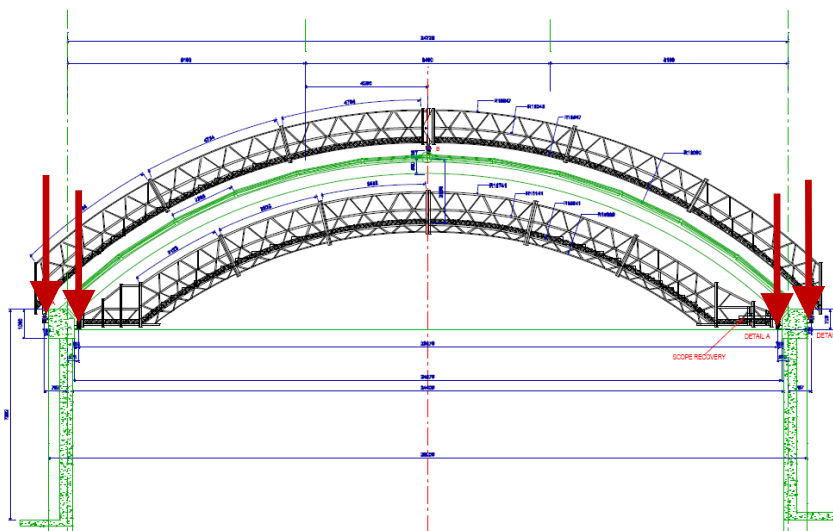
De gevelonderhoudsinstallatie bestaat uit een mobiele aluminium installatie en één of meerdere rails waarover deze beweegt (figuur 6). Door het gebruik van het materiaal aluminium worden het relatief lichte installaties.



figuur 6 Gevelonderhoudsinstallatie (Bron: Jomy B.V.)

Vanaf de mobiele installatie kan men veilig aan de gevel werken. Hierbij valt te denken aan reiniging, onderhoud en vervanging van gebroken glasplaten.

De vaste rails is bevestigd aan het gebouw en deze dragen de installatie die erover heen beweegt. Zowel aan de binnen- als buitenzijde is een mobiele installatie benodigd (figuur 7).



figuur 7 Doorsnede gevelonderhoudsinstallatie (Bron: Jomy B.V.)

2.5 Veiligheid

Mechanische ventilatie

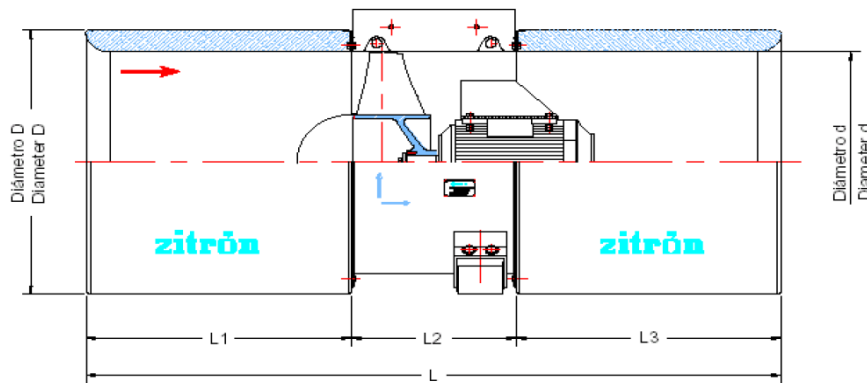
Volgens de Tunnelwet is vanaf 500 meter gesloten lengte mechanische ventilatie altijd noodzakelijk. Dit is dus ook het geval bij De Duurzame Weg. Er zullen tunnelventilatoren worden toegepast. Het gewicht van deze ventilatoren wordt mee genomen in de berekening van de spanten. De tunnelventilatoren hebben als functie:

- Het beheersen van de verontreinigingsgraad van de lucht.
- Het in een gewenste richting wegventileren van rook en gassen die bij een calamiteit kunnen voorkomen.

Om aanrijding van ventilatoren aan het plafond te beperken, dienen deze altijd buiten bereik van het verkeer opgehangen te worden. Bij voorkeur minimaal 4,70 meter boven het wegdek en boven de linker rijstroken. Hier rijdt namelijk geen of aanzienlijk minder vrachtverkeer.

Voor tunnels geldt dat individuele ventilatoren op regelmatige afstanden van elkaar verdeeld moeten worden over de langdoorsnede. Er wordt gestreefd naar een onderlinge afstand van 75 – 100 meter.

Na overleg binnen Movares is er gekozen voor bepaalde afmetingen van een ventilator. Een voorbeeld van een tunnelventilator (Zitron Nederland B.V.) wordt getoond in figuur 8 en tabel 1.



figuur 8 Tunnelventilator Zitron type JZ 9 (Bron: Zitron Nederland B.V.)

Type	D [mm]	d [mm]	L [mm]	L1 [mm]	L2 [mm]	L3 [mm]	Gewicht [kg]
JZ 9	1100	900	2700	1025	650	1025	750

tabel 1 Gegevens tunnelventilator type JZ 9 (Bron: Zitron Nederland B.V.)

Vluchtdeuren

Voor de afstand tussen vluchtdeuren geldt dat bij een afstand van 60 meter wordt voldaan aan het Bouwbesluit (namelijk binnen 30 meter een vluchtdeur).

Gescheiden rijrichting

De twee rijrichtingen dienen van elkaar gescheiden te worden vanwege rookverspreiding en het in stand houden van de luchtstroom. Tevens dient de constructie een brandwerendheid te hebben van 60 minuten.

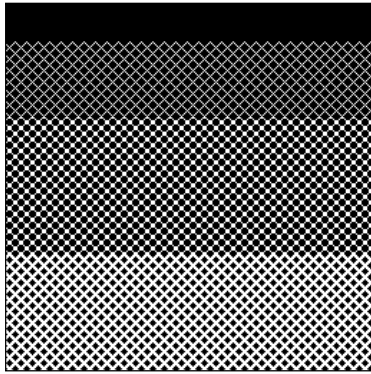
Stroboscopisch effect

Er dient rekening te worden gehouden met het ontstaan van stroboscopisch effect door bepaalde spantafstanden. Over dit fenomeen heeft er een gesprek plaatsgevonden bij SEIN te Heemstede (Stichting Epilepsie Instellingen Nederland).

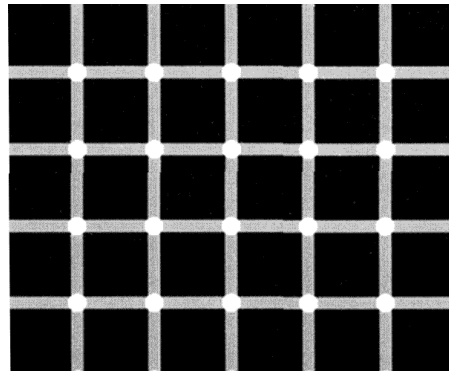
De belangrijkste uitkomsten van dit gesprek zijn:

- Stroboscopisch effect is niet alleen gevaarlijk voor mensen met epilepsie, maar kan ook als vervelend worden ervaren door “gezonde mensen”. Vooral als het een grote lengte betreft zoals bij De Duurzame Weg het geval is (4 km).
- Stroboscopisch effect is niet zozeer gevaarlijk/vervelend voor bestuurder, maar meer voor de bijrijder(s) die naar buiten kijken.
- Het toepassen van een ‘sinusoidal pattern’ oftewel een verlopend patroon (figuur 9) is beter dan een ‘square pattern’ (figuur 10).
- Kleur heeft invloed op de mate van het effect. Zo versterkt de kleur rood het stroboscopisch effect. De beste kleur die kan worden toegepast ligt in de trant van blauw/groen. In ieder geval moet het een kleur zijn die de kleur rood uit het licht filtert.

- Het contrast tussen licht – donker dient zo klein mogelijk te zijn.
- De frequentie dient zo laag mogelijk gehouden te worden (het liefst $< 3\text{Hz}$).
- Het stroboscopisch effect wordt verkleind door het doorbreken van het patroon en het afwisselen van kleurnuances (in lengterichting overgang van donker – licht).



figuur 9 Sinusoidal patterns (Bron: onbekend)



figuur 10 Square pattern (Bron: onbekend)

De optredende frequenties zijn afhankelijk van de snelheid en de spantafstand. In een overzicht is weergegeven bij welke snelheden en spantafstanden de frequentie zich in het verboden of afgeraden gebied bevindt (zie tabel 2).

Uit dit overzicht blijkt dat een spantafstand van 11 meter een veilige waarde is. Bij een h.o.h.-afstand tussen de glasdragers van 1,1 meter ontstaat er bij 30 en 40 km/u een gevaarlijke frequentie. Bij deze snelheid zal er sprake zijn van een file en ligt de focus eerder op het verkeer dan op de overkapping, waardoor deze frequentie niet als gevaarlijk wordt beschouwd. Het risico kan echter volledig worden weggenomen door strepen te schilderen op het glas. De h.o.h.-afstand wordt dan verkleind van 1,1 meter naar 0,55 meter.

Snelheid km/u	Snelheid m/s	H.o.h.-afstand in m				
		1,1 m	2,2 m	3,3 m	4,4 m	5,5 m
30	8	7,6 Hz	3,8 Hz	2,5 Hz	1,9 Hz	1,5 Hz
40	11	10,1 Hz	5,1 Hz	3,4 Hz	2,5 Hz	2,0 Hz
50	14	12,6 Hz	6,3 Hz	4,2 Hz	3,2 Hz	2,5 Hz
60	17	15,2 Hz	7,6 Hz	5,1 Hz	3,8 Hz	3,0 Hz
70	19	17,7 Hz	8,8 Hz	5,9 Hz	4,4 Hz	3,5 Hz
80	22	20,2 Hz	10,1 Hz	6,7 Hz	5,1 Hz	4,0 Hz
90	25	22,7 Hz	11,4 Hz	7,6 Hz	5,7 Hz	4,5 Hz
100	28	25,3 Hz	12,6 Hz	8,4 Hz	6,3 Hz	5,1 Hz
110	31	27,8 Hz	13,9 Hz	9,3 Hz	6,9 Hz	5,6 Hz
120	33	30,3 Hz	15,2 Hz	10,1 Hz	7,6 Hz	6,1 Hz

Snelheid km/u	Snelheid m/s	H.o.h.-afstand in m				
		6,6 m	7,7 m	8,8 m	9,9 m	11 m
30	8	1,3 Hz	1,1 Hz	0,9 Hz	0,8 Hz	0,8 Hz
40	11	1,7 Hz	1,4 Hz	1,3 Hz	1,1 Hz	1,0 Hz
50	14	2,1 Hz	1,8 Hz	1,6 Hz	1,4 Hz	1,3 Hz
60	17	2,5 Hz	2,2 Hz	1,9 Hz	1,7 Hz	1,5 Hz
70	19	2,9 Hz	2,5 Hz	2,2 Hz	2,0 Hz	1,8 Hz
80	22	3,4 Hz	2,9 Hz	2,5 Hz	2,2 Hz	2,0 Hz
90	25	3,8 Hz	3,2 Hz	2,8 Hz	2,5 Hz	2,3 Hz
100	28	4,2 Hz	3,6 Hz	3,2 Hz	2,8 Hz	2,5 Hz
110	31	4,6 Hz	4,0 Hz	3,5 Hz	3,1 Hz	2,8 Hz
120	33	5,1 Hz	4,3 Hz	3,8 Hz	3,4 Hz	3,0 Hz

Uitgegaan van "verboden gebied" tussen 3 - 15 Hz

Glasdragers h.o.h. 1,1 meter
 Spanten h.o.h. $n \times 1,1$ meter

4 - 11 Hz	Verboden gebied volgens NSVV-richtlijn
2,5 - 4 Hz	Afgeraden frequenties volgens NSVV-richtlijn
11 - 15 Hz	Afgeraden frequenties volgens NSVV-richtlijn
< 20 Hz	Afgeraden frequenties volgens SEIN
< 2,5 of > 20 Hz	Veilige frequentie

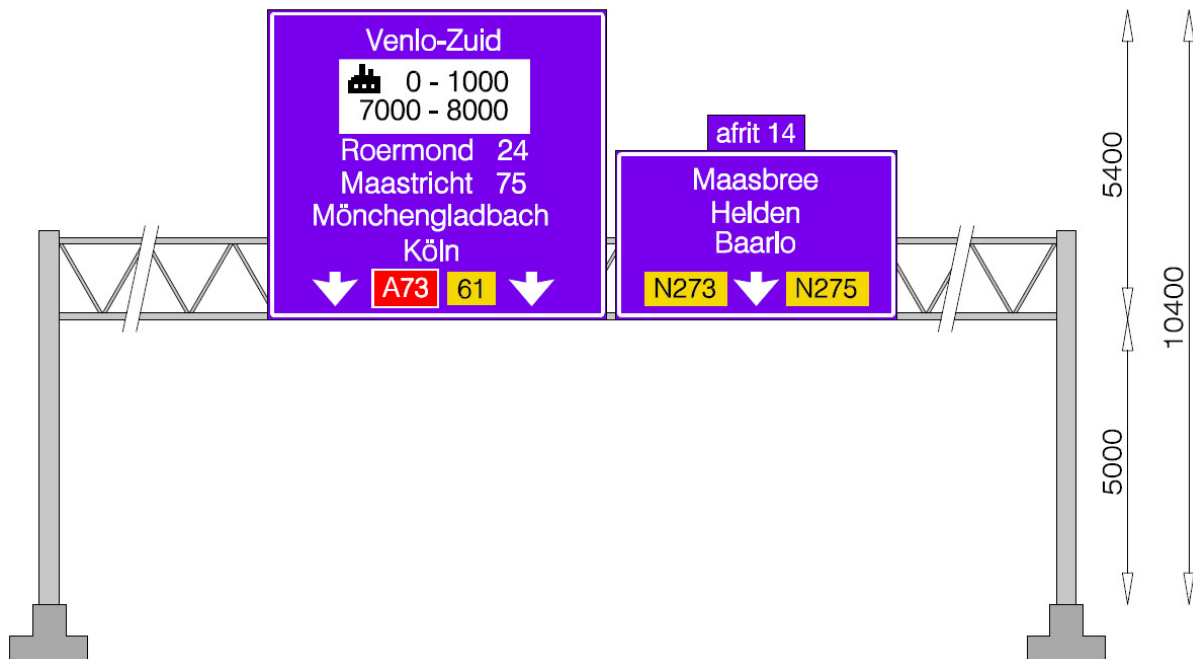
tabel 2 Overzicht frequenties bij verschillende spantafstanden en snelheden

2.6 Bewegwijzering

De overkapping dient voldoende hoogte te hebben zodat de verkeersportalen er onder passen. Er geldt een obstakelvrije zone van 4,6 meter en een minimale hoogte onder de verkeersportalen van 5,0 meter. Er dient ook rekening mee te worden gehouden dat boven de verkeersportalen nog een onderhoudsmachine past.

Het grootste verkeersbord op het traject van de A73 heeft een hoogte van 5,4 meter (figuur 11). Met een hoogte van 5,0 meter onder het portaal komt de totale hoogte neer op 10,4 meter. Er is gekozen om een maximale hoogte aan te houden van 9,0 meter, aangezien 10,4 meter een erg grote maat is.

Voor de gevelonderhoudsinstallatie wordt een hoogte van 2,0 meter boven het verkeersbord aangehouden.

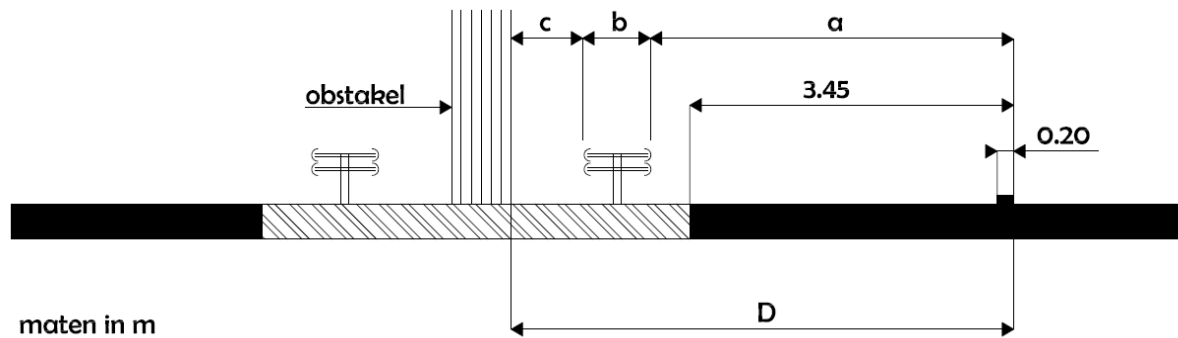


figuur 11 Wegportaal A73 met hoogste verkeersbord ($h = 5,4$ m) (Bron: Gemeente Venlo)

2.7 Afmetingen

De afmetingen van de A73 te Venlo verschillen wat betreft de afmetingen van de middenberm en het wegdek. Voor het ontwerp van De Duurzame Weg wordt uitgegaan van de breedste middenberm en de breedste weghelft. De breedste middenberm heeft een afmeting van 9,28 meter. De breedste weghelft heeft een afmeting van 16,12 meter. Het profiel van vrije ruimte wordt op deze afmetingen gebaseerd.

Er dient rekening te worden gehouden met de vrije ruimte achter de geleiderail tot een obstakel (in dit geval het verkeersportaal). De vrije ruimte achter de geleiderail dient minimaal 500 mm te zijn bij toepassing van een middenstijve geleiderail (volgens CROW Publicatie 'Veilige inrichting van bermen' figuur 12 en tabel 3). Na overleg met Rijkswaterstaat is besloten om een minimale vrije ruimte aan te houden van 600 mm.



figuur 12 Middenberm in aardebaan met obstakels tussen hoofdrijbanen met vluchtstrook (2x4-rijstroken) (Bron: CROW)

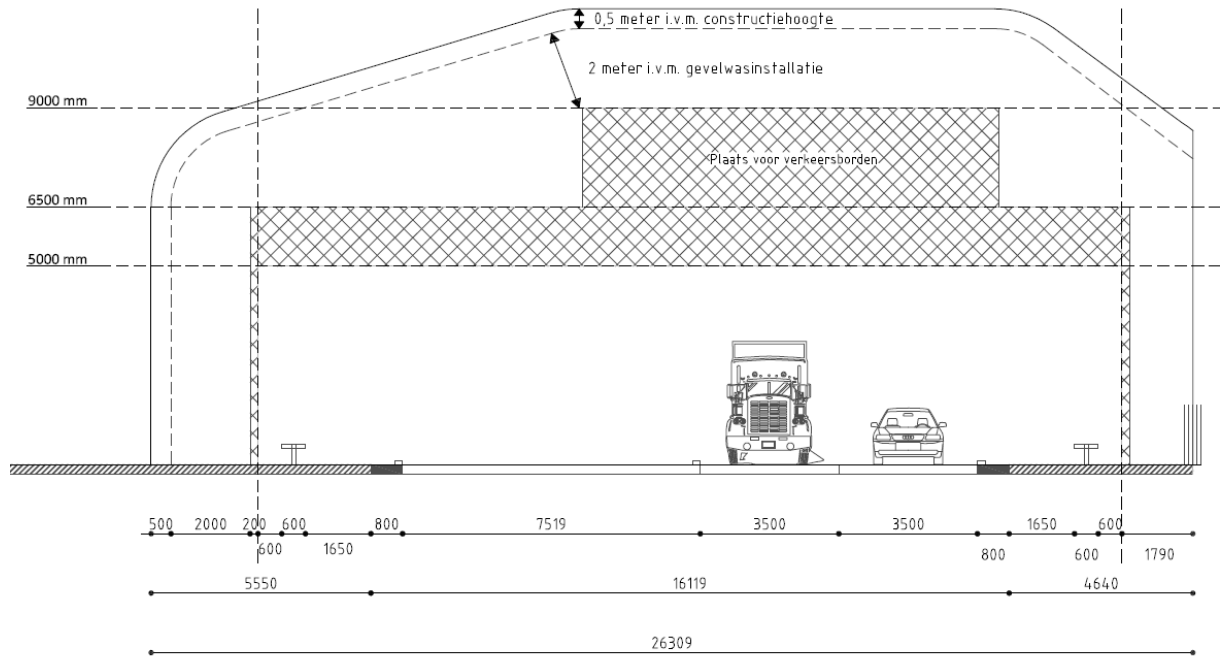
maten in m					
D	a	b	c	stijfheidsklasse	constructietype
$D \geq 13,00$	-	-	-	-	n.v.t.
$8,00 \leq D < 13,00$	$5,70 \leq a < 10,70^1)$	0,80	1,50	flexibel	F 2M 400-80
$6,25 \leq D < 8,00$	$3,95 \leq a < 5,70$	0,80	1,50	flexibel	F 2M 400-80
$5,75 \leq D < 6,25$	3,95	0,80	$1,00 \leq c < 1,50$	flexibel	F 2M 400-80
$5,55 \leq D < 5,75$	<u>3,95</u>	<u>0,80</u>	<u>$0,80 \leq c < 1,00$</u>	<u>middenstijf</u>	<u>VLP 2Z 267-80²⁾</u>
$5,35 \leq D < 5,75$	<u>3,95</u>	<u>0,60</u>	<u>$0,80 \leq c < 1,00$</u>	<u>middenstijf</u>	<u>VLP 1Z 267-60²⁾</u>
$5,25 \leq D < 5,75$	<u>3,95</u>	<u>0,80</u>	<u>$0,50 \leq c < 1,00$</u>	<u>middenstijf</u>	<u>VLP 2Z 133-80</u>
$5,05 \leq D < 5,55$	<u>3,95</u>	<u>0,60</u>	<u>$0,50 \leq c < 1,00$</u>	<u>middenstijf</u>	<u>VLP 1Z 133-80</u>
$5,05 \leq D < 5,25$	3,95	0,68	$0,30 \leq c < 0,50$	stijf	VLP 2Z C 133-80
$4,85 \leq D < 5,05$	3,95	0,60	$0,30 \leq c < 0,50$	stijf	VLP 2Z C 133-60
$4,00 \leq D < 4,85$	$3,45 \leq a < 3,95^3)$	0,55	$0,00 \leq c < 0,30$	stijf	Stepbarrier
$4,00 \leq D < 4,50$	$3,45 \leq a < 3,95^3)$	0,55	0,00	star	Stepbarrier
$D < 4,00$	-	-	-	-	⁴⁾

¹⁾ Bergingszone $\leq 2,25$ m; deze zone is overigens niet noodzakelijk bij vluchtstrook aan middenbermzijde.
²⁾ Alleen toepassen bij grote lengte.
³⁾ Reductie van de effectieve breedte vluchtstrook door wegvallen van uitstapruimte / obstakelvrees.
⁴⁾ Indien mogelijk 1/2 Stepbarrier toepassen, anders dwarsprofiel aanpassen.

tabel 3 Maten middenberm in aardebaan met obstakels tussen hoofdrijbanen met vluchtstrook (2x4-rijstroken) (Bron: CROW)

Naast de weg- en verkeersportaalafmetingen dient er rekening te worden gehouden met een gevelonderhoudsinstallatie. Hiervoor wordt 2 meter boven het verkeersportaal gereserveerd. Tevens wordt er een constructiehoogte gereserveerd van 0,5 meter.

Samen met de afmetingen van de bewegwijzering (zie paragraaf 2.6) kan er minimaal wegprofiel worden opgesteld. Dit minimale wegprofiel wordt weergegeven in figuur 13.



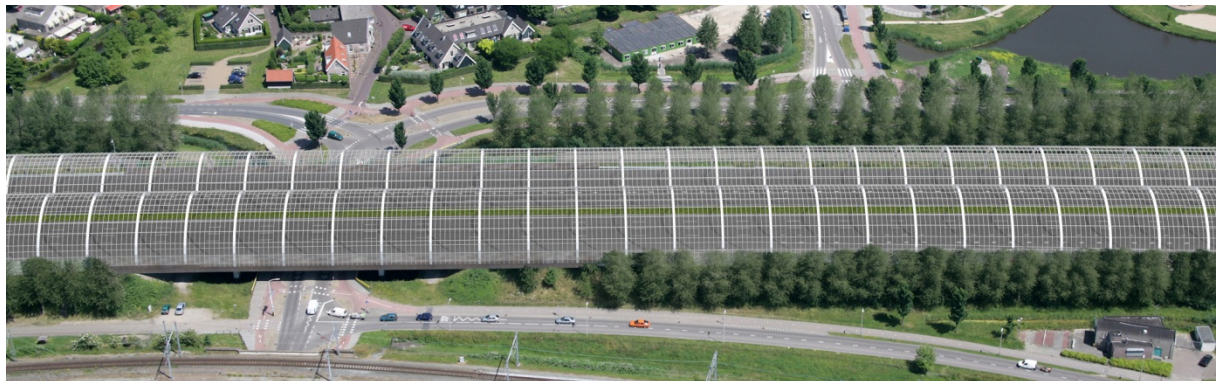
figuur 13 Profiel van vrije ruimte voor De Duurzame Weg

2.8 Belastingen

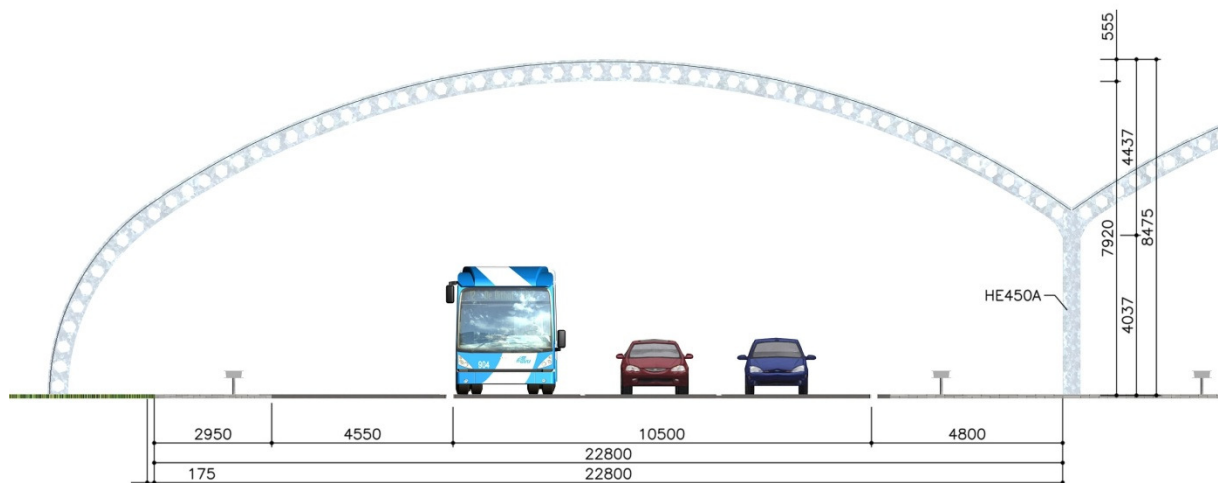
Naast de permanente belasting dient er rekening te worden gehouden met sneeuw-, regenwater-, wind- en onderhoudsbelasting. De belastingen zullen verder toegelicht worden in paragraaf 4.2.

3. Variantenstudie overkapping

Movares heeft een concept ontwikkeld voor De Duurzame Weg. Dit concept bestaat uit een overkapping met een spant dat zich herhaalt om een bepaalde afstand (figuur 14 en figuur 15).



figuur 14 Concept Movares De Duurzame Weg (Bron: Movares)



figuur 15 Afmetingen concept Movares De Duurzame Weg (Bron: Movares)

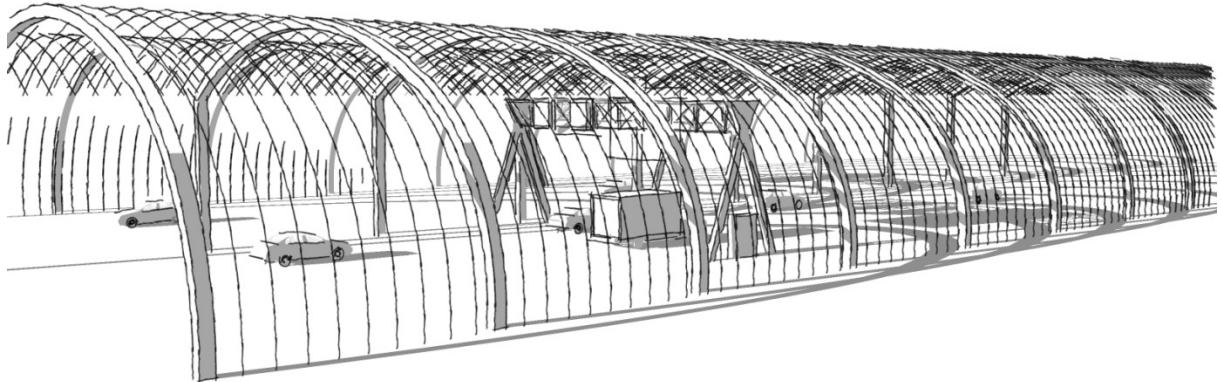
Voor dit afstudeerproject is onderzocht of dit de meest optimale variant is. In de volgende paragraaf worden de onderzochte varianten besproken met de voor- en nadelen en als conclusie zal er keuze volgen.

3.1 Varianten

Naast het bestaande concept van Movares zijn er zeven varianten ontworpen die met elkaar vergeleken zullen worden. Deze variantenstudie omvat het plaatsen van de spanten ten opzichte van elkaar en gaat nog niet in op de manier van overkappen (in een keer of in twee keer overkappen).

3.1.1 Variant 1 Concept Movares

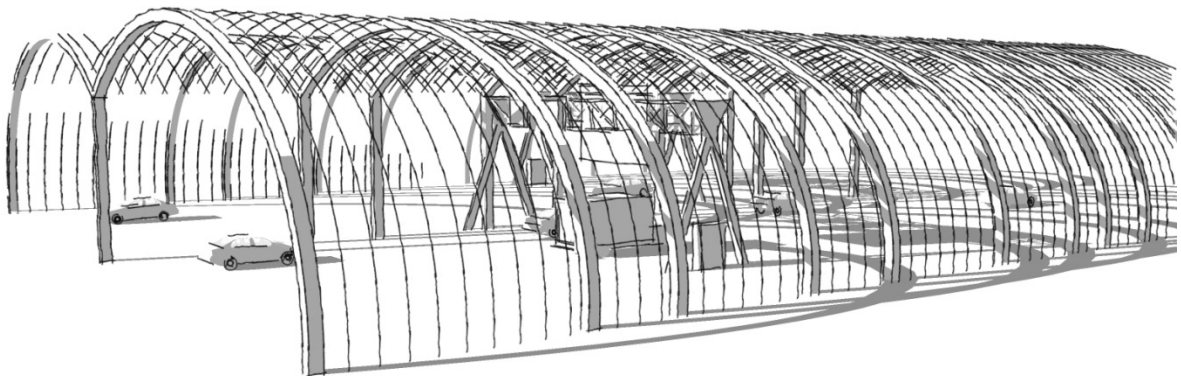
Het concept van Movares (figuur 16) bestaat uit spanten die steeds op dezelfde afstand van elkaar worden geplaatst.



figuur 16 Variant 1 Concept Movares

3.1.2 Variant 2 Concept Movares met ander ritme

Een variatie op het concept van Movares is om de spanten op wisselende afstanden van elkaar te zetten (figuur 17). Door wisselende afstanden toe te passen wordt 'het patroon' doorbroken wat het gevaar op stroboscopisch effect verlaagt. Het materiaalgebruik is echter minder efficiënt dan bij variant 1.



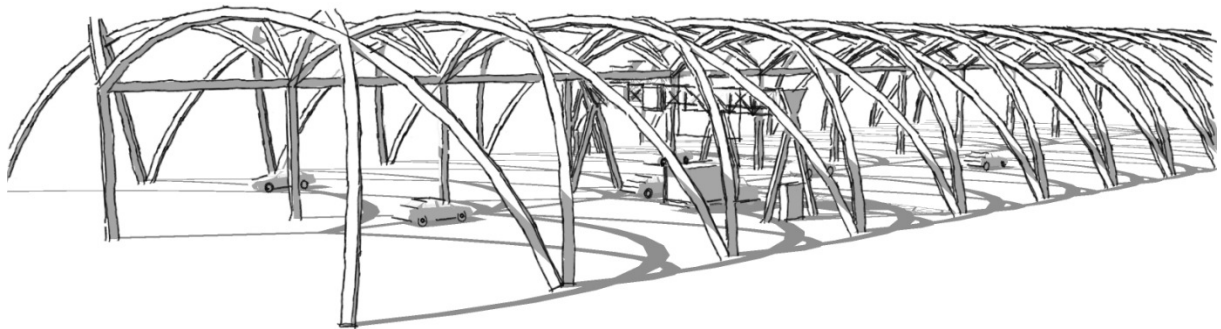
figuur 17 Variant 2 Concept Movares met ander ritme

3.1.3 Variant 3 Diagonaal

Bij variant 3 worden de spanten diagonaal geplaatst waarbij twee spanten elkaar steeds overlappen en er dus een extra knooppunt ontstaat (figuur 18). Hierdoor ontstaan driehoeken en schoort de constructie zichzelf. Dit heeft als gevolg dat de constructie niet kan uitzetten ten gevolge van temperatuurschommelingen. Dit is nadelig omdat er extra voorzieningen getroffen moeten worden om de uitzettingen op te kunnen vangen.

Een ander nadeel is dat de gordingen steeds een andere afmeting hebben en iedere staaf gedilateerd dient te worden in verband met temperatuuruitzetting.

In principe zijn de glasplaten die worden toegepast rechthoekig. De glasdragers zullen daarom niet de vorm van de spanten vormen, maar ze zullen geplaatst worden zoals bij variant 1 en 2.

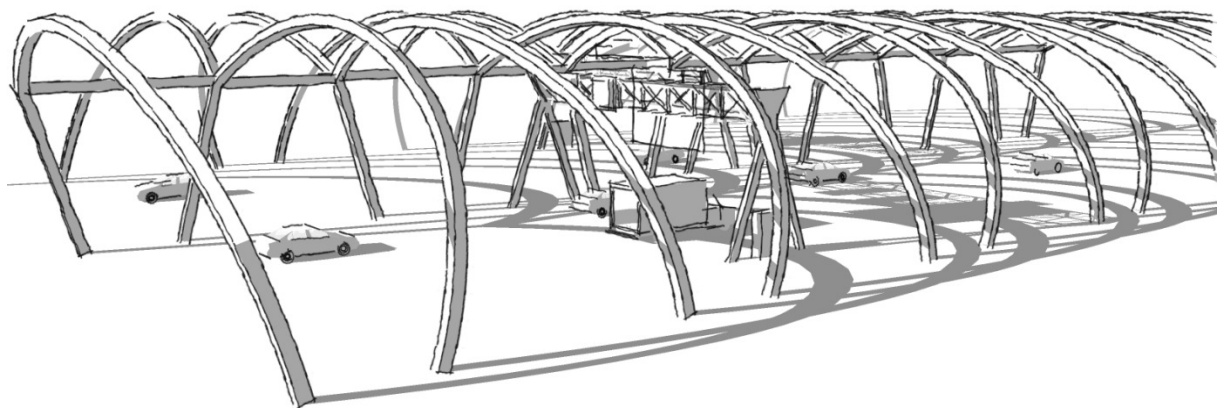


figuur 18 Variant 3 Diagonaal

3.1.4 Variant 4 Geroteerd

Variant 4 (figuur 19) is een variatie op het concept van Movares door de spanten te roteren (afwisselend naar links of naar rechts). Door de uitzetting ten gevolge van temperatuurverschil zullen de spanten afwisselend hoger of lager komen te staan en ontstaat er een soort van golfbeweging in het dak. Tevens hebben bij deze variant de gordingen steeds een andere afmeting en zal iedere staaf gedilateerd dienen te worden.

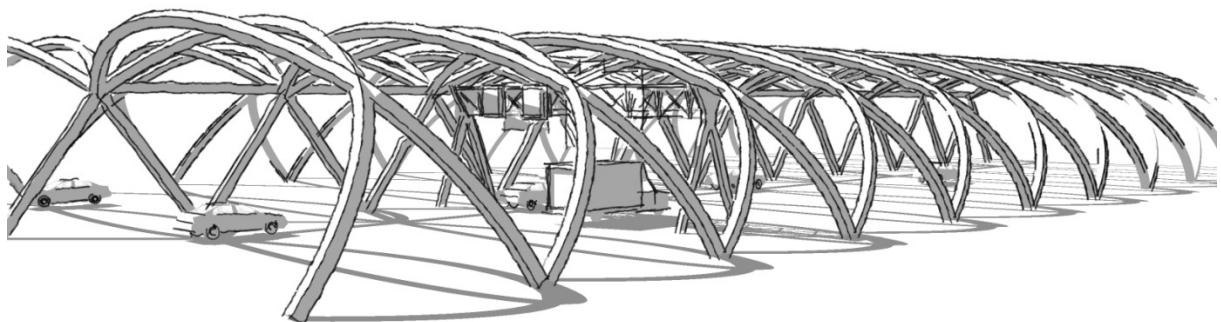
Door de schuinstand van de spanten is het ook niet mogelijk om rechte dilataties te maken.



figuur 19 Variant 4 Geroteerd

3.1.5 Variant 5 Diagonaal en geroteerd

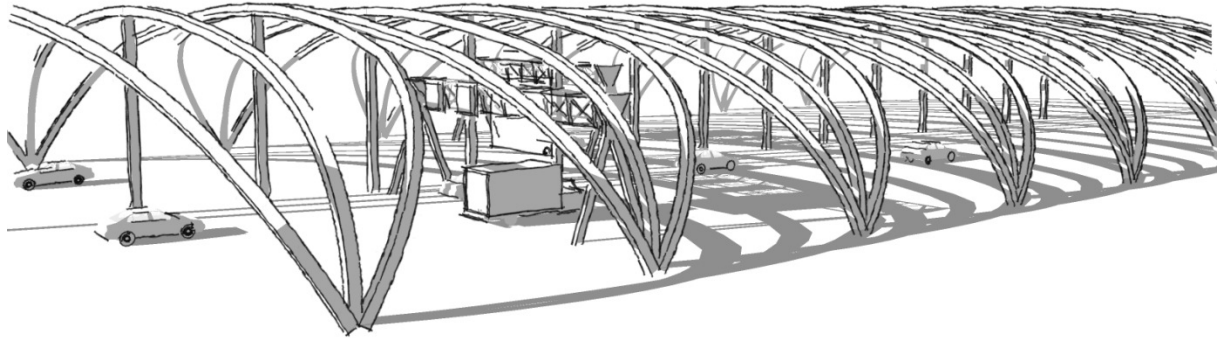
Variant 5 is een combinatie van variant 3 en 4 (figuur 20). Dit geldt ook voor de problemen die hierbij komen kijken.



figuur 20 Variant 5 Diagonaal en geroteerd

3.1.6 Variant 6 Geroteerd en recht

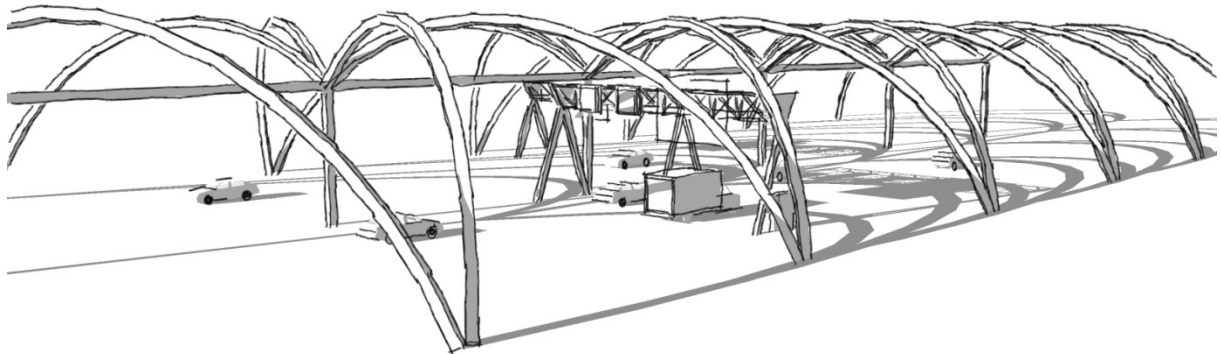
Variant 6 (figuur 21) is een combinatie van het concept van Movares (variant 1) en variant 4. Bij deze variant is het probleem van de schuine spanten hetzelfde als bij variant 4.



figuur 21 Variant 6 Geroteerd en recht

3.1.7 Variant 7 Diagonaal gehalveerd

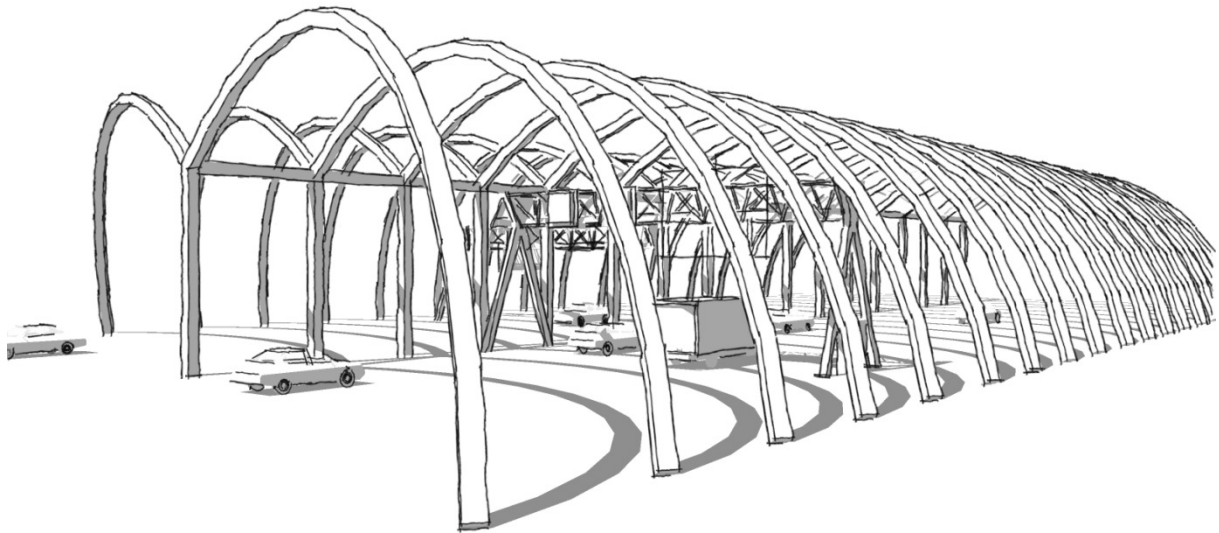
Variant 7 (figuur 22) is een variatie op variant 4, waarbij het aantal diagonalen gehalveerd wordt. Het voordeel hiervan is dat de spanten elkaar niet meer overlappen. Het nadeel dat de gordingen steeds andere afmetingen hebben, blijft echter.



figuur 22 Variant 7 Diagonaal gehalveerd

3.1.8 Variant 8 Visgraat

Bij variant 8 (figuur 23) worden de spanten niet loodrecht op het wegdek geplaatst zoals bij variant 1, maar de spanten worden geroteerd ten opzichte van de middenkolom, zodat er een halve visgraat ontstaat. De beweging van de overkapping is nu tegengesteld aan de luchtstroom die ontstaat door de rijrichting. De achterliggende gedachte van het schuin plaatsen van de spanten is dat op deze manier het fijnstof naar de middenwand wordt geblazen. Deze eigenschap zou positief kunnen werken bij toepassing van een speciale middenwand, die vuil absorbeert. Een nadeel van deze variant is echter wel dat de overspanning van de spanten groter wordt.



figuur 23 Variant 8 Visgraat

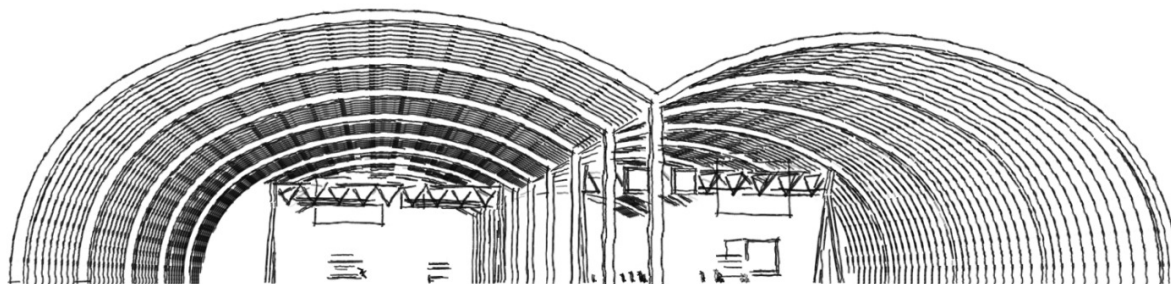
3.2 Keuze ontwerp

Een belangrijk onderdeel, waar bij het ontwerpen van de overkapping rekening mee moet worden gehouden, is de uitzetting ten gevolge van temperatuurverschillen. De kap bevindt zich namelijk in de buitenlucht waardoor het temperatuurverschil erg groot kan zijn. Hoe groot deze uitzettingen zijn en hoe hier voorzieningen voor worden getroffen, komt aan de orde in hoofdstuk 7.

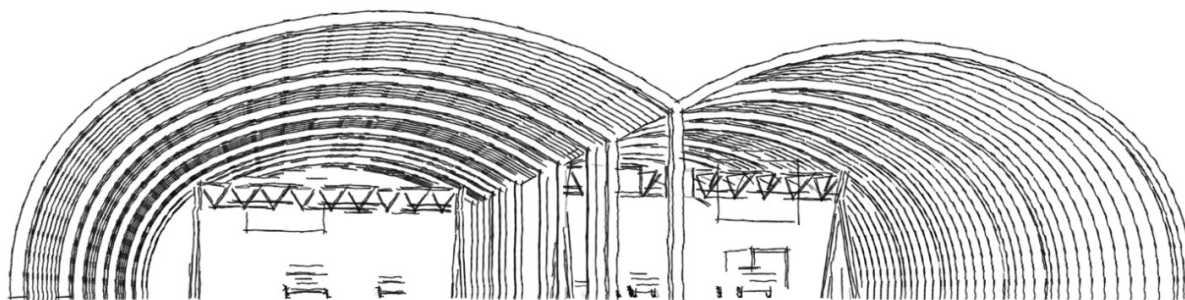
Het nadeel van geroteerde en diagonale spanten is dat er extra voorzieningen moeten worden getroffen om de problemen door uitzetting op te vangen. Deze varianten zijn logischerwijs kostbaarder dan rechte spanten. De varianten 3 tot en met 7 vallen daarom af.

Mogelijke varianten die overblijven, zijn variant 1 (concept Movares), variant 2 (concept Movares met ander ritme) en variant 8 (visgraat). Variant 8 is alleen 'zinnig' bij het toepassen van een speciale wand. Ook moet nog onderzocht worden in welke mate het schuin plaatsen van de spanten invloed heeft op de luchtstroom onder de overkapping. Voor dit project wordt hier verder geen onderzoek naar gedaan en variant 8 valt daarom ook af.

De varianten die overblijven zijn het concept van Movares (figuur 24) en het concept van Movares met een ander ritme (figuur 25). Aangezien het uitvoeringstechnische aspect van de overkapping invloed kan hebben op het ritme van de spanten, wordt nu nog geen definitieve keuze gemaakt. De definitieve keuze volgt in hoofdstuk 6. In dit hoofdstuk zullen de twee varianten nader worden onderzocht wat betreft spantafstand en -opbouw om tot een definitieve keuze te komen.



figuur 24 Optie 1 voor de overkapping; concept Movares



figuur 25 Optie 2 voor de overkapping; concept Movares met ander ritme

4. Variantenstudie spantvorm

Na de variantenstudie voor het ontwerp van de overkapping zal er een optimale variant voor de spantvorm worden gezocht. De variantenstudie van de spantvorm en de definitieve keuze voor de spantvorm worden in dit hoofdstuk toegelicht.

Voorafgaand aan de variantenstudie worden de uitgangspunten voor het ontwerp opgesteld en worden de berekening en toetsing van de varianten toegelicht. Tijdens de variantenstudie zal blijken waarom bepaalde keuzes zijn gemaakt.

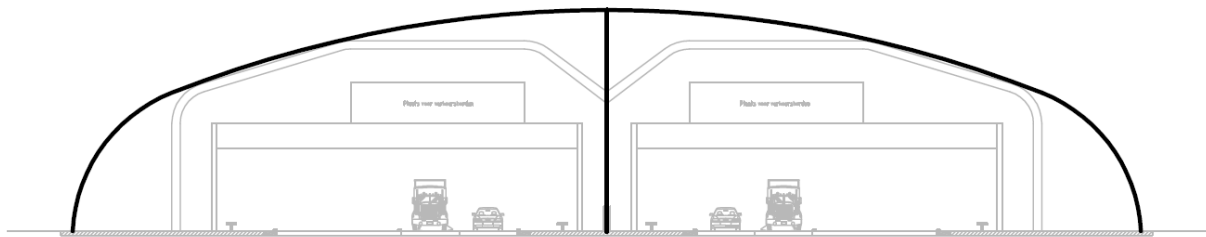
Om tot een optimale variant te komen is er van elke variant een kostenoverzicht gemaakt. De factoren die hierbij een rol spelen, worden nader toegelicht.

Uiteindelijk zal de variantenstudie leiden tot een definitieve keuze voor de spantvorm.

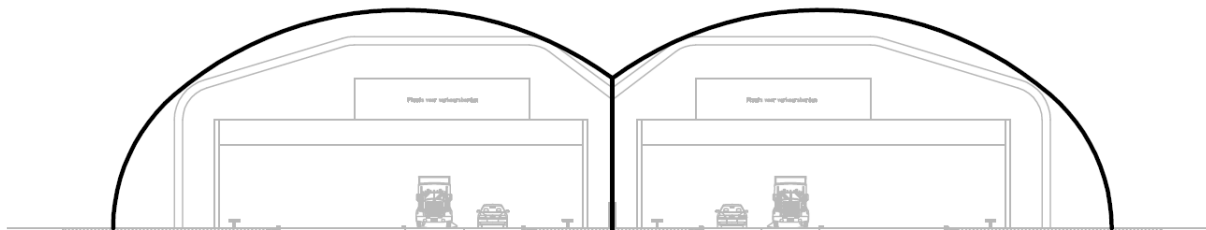
4.1 Hoofdvorm varianten

Voor het overkappen van de snelweg om het profiel van vrije ruimte zijn er in principe twee hoofdvormen:

- In een keer overkappen (figuur 26)
- In twee keer overkappen (figuur 27)



figuur 26 Hoofdvorm 1: in een keer overkappen



figuur 27 Hoofdvorm 2: in twee keer overkappen

Per hoofdvorm zullen een aantal varianten bedacht worden, die met elkaar vergeleken zullen worden.

4.1.1 Uitgangspunten

Voor het ontwerp van de verschillende varianten zijn enkele uitgangspunten opgesteld.

Geometrie

De varianten worden geconstrueerd met twee verschillende cirkelbogen (veel verschillende cirkelbogen betekent namelijk ook meer kosten in fabricage) waarbij de hoogte van de overkapping tot een minimum wordt beperkt; dat wil zeggen zo laag mogelijk over het profiel van vrije ruimte.

Verbindingen

Tijdens het opbouwen van de overkapping moet de snelweg worden afgezet. Dit is uiteraard niet wenselijk en daarom is snel bouwen gewenst. Een streven is dan ook om waar mogelijk scharnierende verbindingen toe te passen, omdat deze verbindingen minder montagetijd benodigd hebben dan momentvaste verbindingen. Scharnierende verbindingen zijn zodoende goedkoper momentvaste verbindingen.

Middenkolom

Om de boog van hoofdvorm 1 (in een keer overkappen) optimaal te benutten, zou het een keuze kunnen zijn om geen steunpunt in het midden te creëren. Voor het scheiden van de twee rijrichtingen (i.v.m. brandcompartimentering) wordt er echter in ieder geval een middenwand toegepast. Het is dan ook logisch om wel een middenkolom toe te passen.

Profilering

Om de varianten op een reëel niveau met elkaar te kunnen vergelijken, zal er voor alle varianten een passend HE-profiel worden gekozen. Dit is echter nog geen definitieve keuze in profilering. De definitieve keuze voor profilering wordt gemaakt in hoofdstuk 5.

Spantafstand

In paragraaf 2.5 is bepaald dat een spantafstand vanaf 11 meter een veilige waarde is (geen gevaar voor stroboscopisch effect). Voor de berekening van de variant wordt een spantafstand aangehouden van 11 meter.

4.2 Berekening en toetsing varianten

De varianten met de bijbehorende belastingen worden ingevoerd in het programma Scia Engineer 2008 en hiermee doorgerekend. De toegepaste belastingen en belastingcombinaties worden in deze paragraaf nader toegelicht, voordat de varianten zullen worden toegelicht.

4.2.1 Belastingen

Voor deze variantenstudie worden globale belastingen toegepast volgens NEN6702. Er wordt onderscheid gemaakt in eigen gewicht, rustende belastingen, windbelasting en sneeuwbelasting.

4.2.1.1 Eigen gewicht

Het eigen gewicht van de spanten wordt meegenomen door Scia Engineer 2008 en hoeft niet apart te worden ingevoerd.

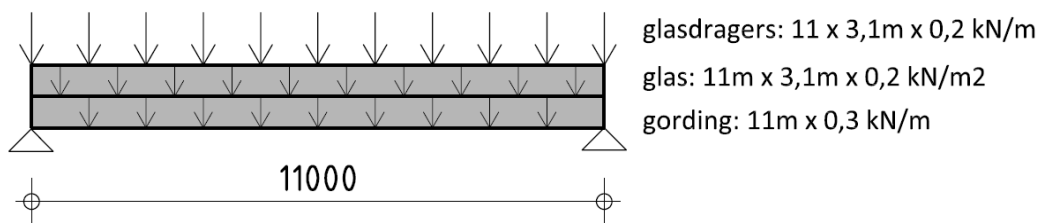
4.2.1.2 Rustende belastingen

De rustende belastingen op de overkapping bestaan uit:

- Reactiekrachten van de gordingen
- Gevelonderhoudsinstallatie
- Ventilatoren

Reactiekracht gordingen

De gordingen (met ook de glasdragers en het glas) rusten op de spanten en werken daardoor als puntlasten op de spanten. De h.o.h.-afstand van de gordingen is 3,1 meter. Deze maat hangt namelijk samen met de afmetingen van de glasplaten; 1,1 x 3,1 meter. Voor het gewicht van de glasdragers wordt 0,2 kN/m aangehouden. De glasplaten wegen 0,2 kN/m². Het gewicht van de gordingen wordt geschat op 0,3 kN/m (figuur 28).

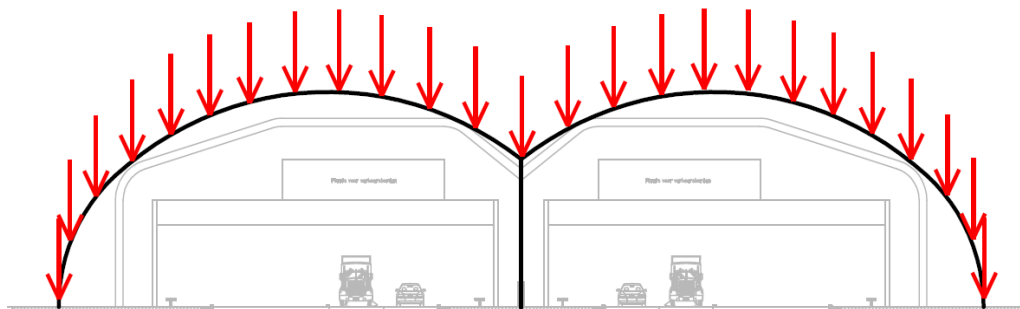


figuur 28 Gording met bijbehorende belastingen

Dit komt per puntlast neer op:

$$11 \cdot \left(3,1 \text{ m} \cdot 0,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) + 11 \text{ m} \cdot 0,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 11 \text{ m} \cdot 0,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 16 \text{ kN}$$

De puntlasten van 16 kN zullen worden geplaatst om de 3,1 meter (figuur 29).



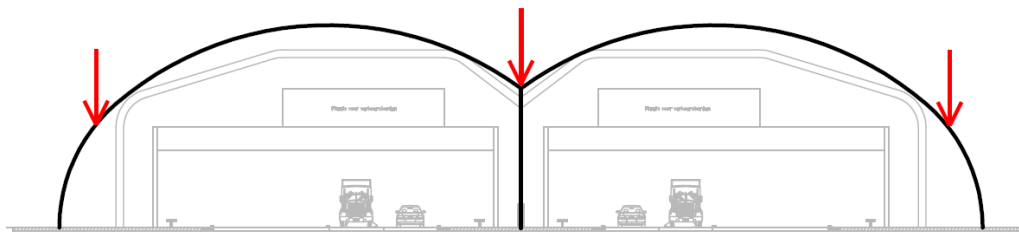
figuur 29 Aangrijpen belasting gordingen

Gevelonderhoudsinstallatie

Een gevelonderhoudsinstallatie heeft een gewicht van 50 kg/m¹ (bron: Jomy B.V.) Voor een breedte van ongeveer 28 meter (één weghelft) komt neer op 1400 kg oftewel 14 kN. Voor de berekening wordt er vanuit gegaan dat de buiten- en de binneninstallatie zich niet tegelijkertijd op dezelfde locatie bevinden. Behalve het eigen gewicht van de installatie, moet er ook rekening gehouden worden met twee personen die zich op de gevelonderhoudsinstallatie bevinden met een glasplaat. Voor twee personen wordt 2 kN aangehouden en voor de glasplaat 0,8 kN. Dit komt dus neer op een totaal van 16,8 kN per weghelft.

Een aandachtspunt voor de gevelonderhoudsinstallatie is het aangrijppunt. Voor hand ligt om de rails te bevestigen bij de steunpunten. Een risico hierbij is wel vandalisme. Er kan gemakkelijk op de gevelonderhoudsinstallatie geklommen worden. Om deze reden is er ook voor gekozen om de gevelonderhoudsinstallatie op vijf meter hoogte te laten beginnen.

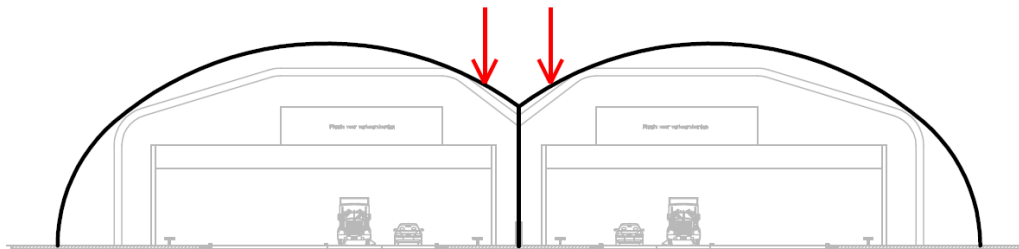
De belasting wordt verdeeld over drie puntlasten; één in het midden en twee aan de zijkanten op vijf meter hoogte (figuur 30).



figuur 30 Aangrijpen belasting gevelonderhoudsinstallatie

Ventilatoren

Na overleg binnen Movares is er gekozen voor een ventilator met een bijbehorend gewicht (zie paragraaf 2.5). Behalve de ventilator zelf moet er tevens rekening worden gehouden met geluiddempers en bevestigingsmiddelen voor de ventilator. Dit zou neerkomen op een totaal gewicht van 850 kg (= 8,5 kN). Deze puntlast komt minimaal 4,70 meter boven het wegdek (boven de linkerrijbaan aangezien hier de minste vrachtwagens rijden). Er wordt gekozen om de tunnelventilatoren 3 meter vanuit het midden aan te brengen (figuur 31).



figuur 31 Aangrijpen belasting ventilatoren

4.2.1.3 Windbelasting

De windbelasting wordt bepaald met de volgende formule:

$$P_{rep} = c_{dim} \cdot c_{index} \cdot c_{eq1} \cdot \varphi_1 \cdot P_w$$

c_{dim} = de factor die de afmetingen van het bouwwerk in rekening brengt = 0,89

c_{eq} = de drukvereffeningsfactor = 1,0

φ_1 = de vergrotingsfactor = 1,0

p_w = de extreme waarde van de stuwdruk (afhankelijk van hoogte en windgebied) = 0,84

c_{index} = de windfactoren

Aangezien het een globale berekening is, wordt er voor $c_{t,ex} + 0,8$ aangehouden en voor $c_{t,in} - 1,3$.

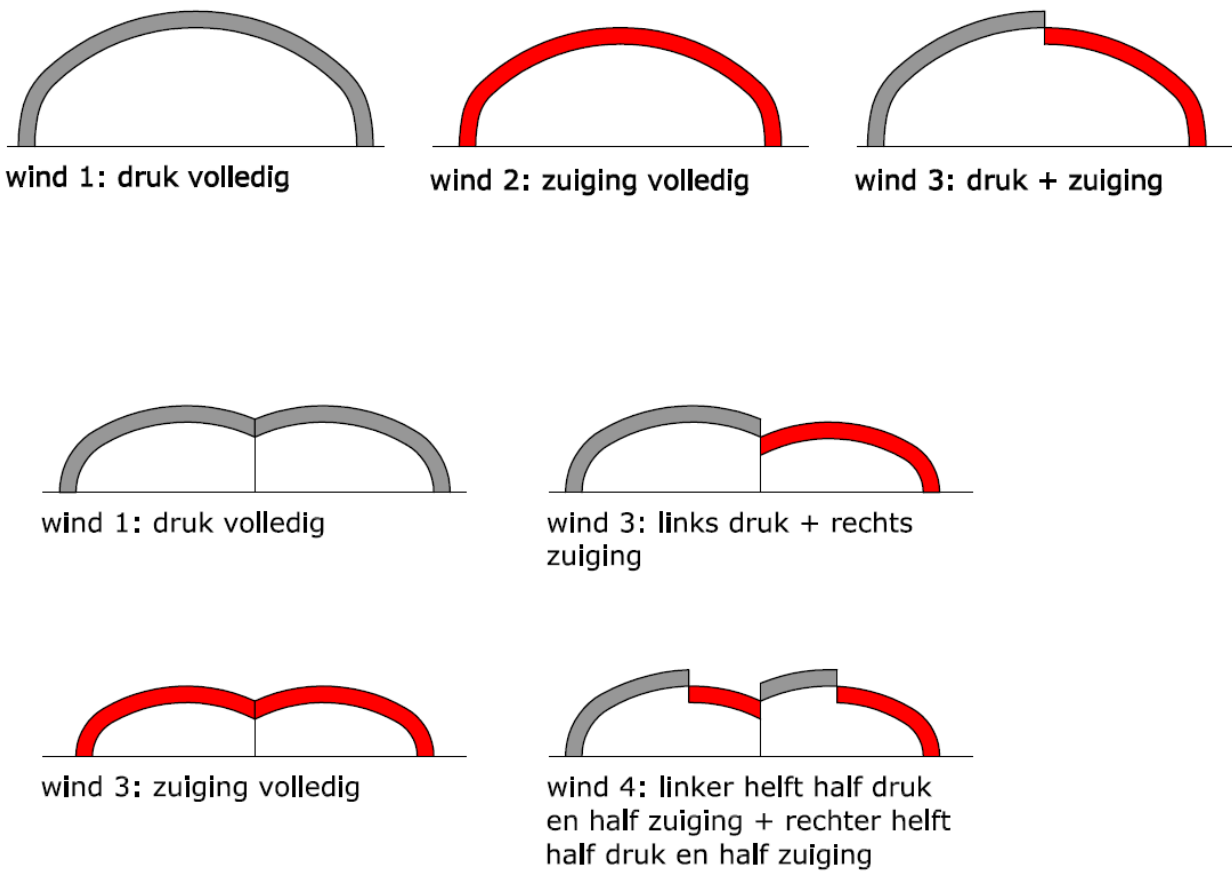
Druk :

$$p_{rep} = 0,89 \cdot 0,84 \cdot 0,8 = 0,6 \frac{kN}{m^2} \cdot 11 m = 6,6 \frac{kN}{m}$$

Zuiging :

$$p_{rep} = 0,89 \cdot 0,84 \cdot -1,3 = -1,0 \frac{kN}{m^2} \cdot 11 m = -11,0 \frac{kN}{m}$$

Voor de windbelasting moeten verschillende belastinggevallen worden beschouwd. Deze zijn voor beide hoofdvormen weergegeven in figuur 32.



figuur 32 Windgevallen

4.2.1.4 Sneeuwbelasting

Voor de globale berekening wordt voor de sneeuwbelasting alleen uitgegaan van belastinggeval 1 volgens NEN 6702. Dit betreft een symmetrische lijnlast waarvoor geldt:

$$P_{rep} = c_1 \cdot P_{sn,rep}$$

c_1 is de vormfactor:

0,8 bij een dakhelling $< 60^\circ$

0,0 bij een dakhelling

P_{rep} is de sneeuwbelasting op de grond:

0,7 kN/m²

$$P_{rep} = 0,8 \cdot 0,7 = 0,56 \frac{kN}{m^2} \cdot 11 m = 6,16 \frac{kN}{m}$$

4.2.2 Belastingcombinaties

Voor het berekenen van de spanten worden twee verschillende toestanden getoetst; de uiterste grenstoestand (UGT) en de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT).

4.2.2.1 Samenvatting belastinggevallen

De belastinggevallen zoals beschreven in paragraaf 4.2.1 zijn vertaald naar acht aparte belastinggevallen (tabel 4).

	Hoofdvorm 1	Hoofdvorm 2
BG1	Eigen gewicht	Eigen gewicht
BG2	Installaties	Installaties
BG3	Reactiekracht gordingen	Reactiekracht gordingen
BG4	Sneeuw	Sneeuw
BG5	Wind 1; druk volledig	Wind 1; druk volledig
BG6	Wind 2; zuiging volledig	Wind 2; zuiging volledig
BG7	Wind 3; linker helft druk + rechter helft zuiging	Wind 3; linker helft druk + rechter helft zuiging
BG8	--	Wind 4; linker helft half druk en half zuiging + rechter helft half druk + half zuiging

tabel 4 Belastinggevallen hoofdvorm 1 en 2

4.2.2.2 Belastingfactoren

De Duurzame Weg kan volgens NEN 6702 worden ingedeeld in veiligheidsklasse 3 (*Bouwwerk geen gebouw zijnde*). De bijbehorende belastingcombinaties en veiligheidsfactoren zijn weergegeven in tabel 5.

Combinatie	Veiligheids- klasse	Permanente belasting		Veranderlijke belasting
		Normaal (ongunstig)	Gunstig	
UGT	3	1,2	0,9	1,5
	3	1,35	0,9	--
BGT	3	1,0	1,0	1,0

tabel 5 Belastingcombinaties met bijbehorende veiligheidsfactoren (Bron: NEN 6702)

4.2.2.3 Overzicht belastingcombinaties

De UGT- en BGT-combinaties zijn opgebouwd volgens tabel 6. UGT5 en BGT5 gelden alleen voor de varianten van hoofdvorm 2.

	BG1	BG2	BG3	BG4	BG5	BG6	BG7	BG8
UGT1	1,2	1,2	1,2	1,5				
UGT2	1,2	1,2	1,2		1,5			
UGT3	1,2	1,2	1,2			1,5		
UGT4	1,2	1,2	1,2				1,5	
UGT5*	1,2	1,2	1,2					1,5
UGT6	1,35							
BGT1	1,0	1,0	1,0	1,0				
BGT2	1,0	1,0	1,0		1,0			
BGT3	1,0	1,0	1,0			1,0		
BGT4	1,0	1,0	1,0				1,0	
BGT5*	1,0	1,0	1,0					1,0
BGT6	1,0	1,0	1,0					

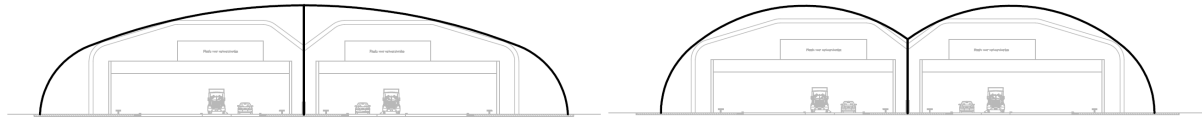
tabel 6 Overzicht UGT- en BGT-combinaties (*: alleen van toepassing op hoofdvorm 2) (Bron: NEN 6702)

4.2.3 Toetsing varianten

De varianten worden getoetst op krachswerking en verplaatsingen. Voor de krachswerking worden de eisen aangehouden uit NEN 6770. Voor de verplaatsingen wordt uitgegaan van de 'eisen' uit het Bouwbesluit voor zowel doorbuiging als horizontale verplaatsing.

4.3 Varianten

De varianten voor de overkapping worden onderverdeeld in de twee hoofdvormen; in één keer of in twee keer overkappen (figuur 33).



figuur 33 De twee hoofdvormen voor de overkapping

Iedere variant wordt ingevoerd in het programma Scia Engineer 2008 met de belastingen en belastingcombinaties zoals beschreven in paragraaf 4.2. Vervolgens zullen de varianten worden getoetst op sterkte, stabiliteit en stijfheid en zal een passend HE-profiel worden bepaald voor alle constructie-elementen.

In deze paragraaf wordt beschreven hoe gekomen is tot de varianten met de bijbehorende schematisatie en profilering. De volledige berekeningen zijn terug te vinden in bijlage B tot en met bijlage K.

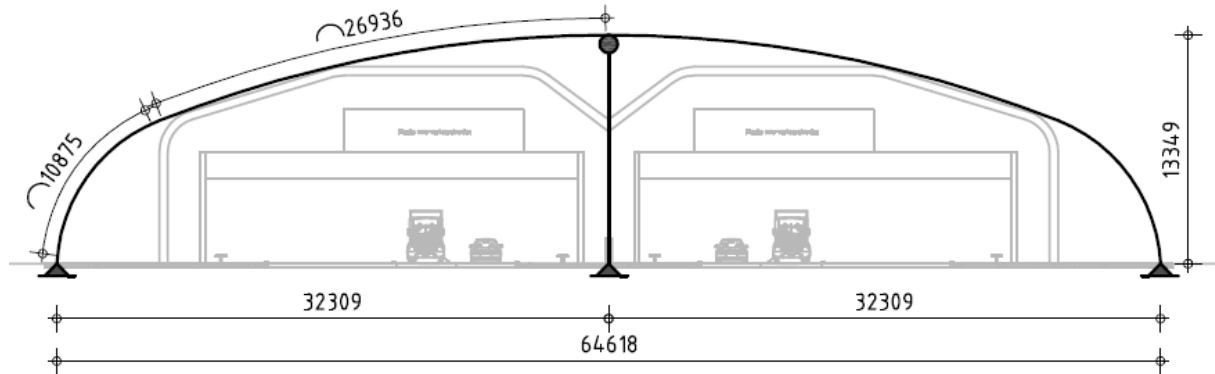
Als algemene conclusie kan gezegd worden dat bij de berekening van de varianten de horizontale verplaatsing sterk maatgevend bleek boven de sterkte en stabiliteit. Tijdens de variantenstudie is er daarom gezocht naar manieren om de horizontale verplaatsing te reduceren. Tevens is er gezocht naar een variant die het profiel van vrije ruimte zo krap mogelijk volgt.

4.3.1 Hoofdvorm 1

Voor hoofdvorm 1 zijn drie varianten bedacht die kort zullen worden omschreven.

4.3.1.1 Variant 1.1

De schematisatie van hoofdvorm 1 wordt weergegeven in figuur 34. De hoofdvorm is tevens de eerste variant; variant 1.1. De profilering van variant 1.1 wordt weergegeven in tabel 7. De volledige berekening van variant 1.1 is terug te vinden in bijlage B.



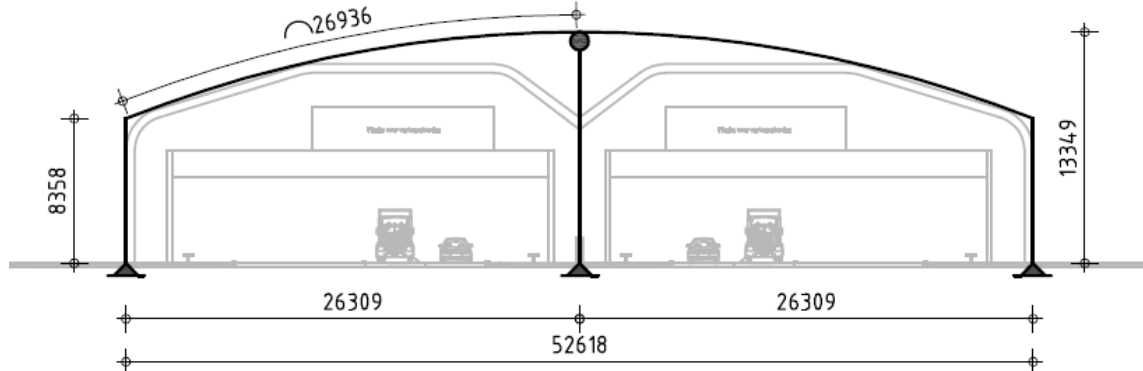
figuur 34 Schematisatie hoofdvorm 1 / variant 1.1

	Profilering
Boog	HE1000x494
Middenkolom	HE300A

tabel 7 Profilering variant 1.1

4.3.1.2 Variant 1.2

Een variant op variant 1.1 is het toepassen van verticale wanden aan de zijkant. Op deze manier wordt het profiel van vrije ruimte zo nauw mogelijk gevolgd. De schematisatie van variant 1.2 wordt weergegeven in figuur 35 en de profilering in tabel 8. De volledige berekening van variant 1.2 is terug te vinden in bijlage C.



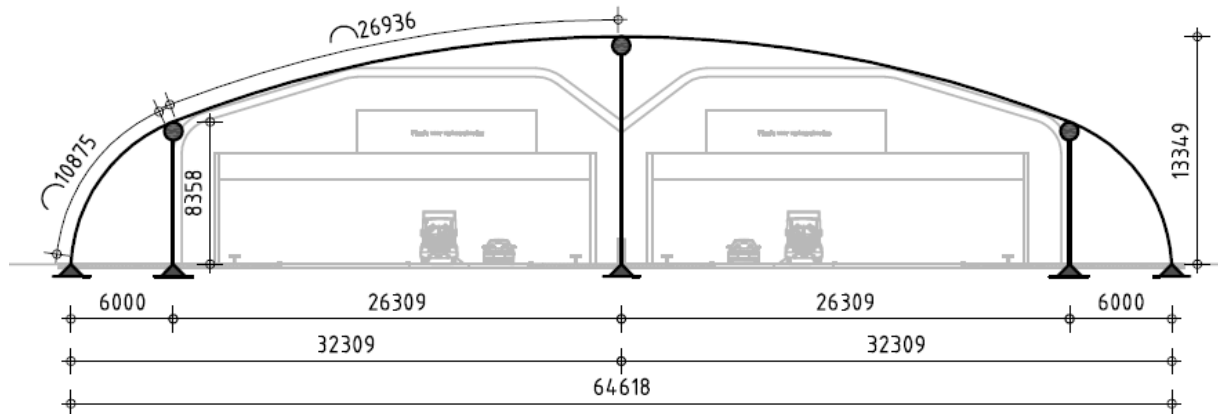
figuur 35 Schematisatie variant 1.2

	Profilering
Boog	HE1000x438
Kolommen zijkant	HE1000x438
Middenkolom	HE300A

tabel 8 Profilering variant 1.2

4.3.1.3 Variant 1.3

De laatste variant van hoofdvorm 1 is een variatie op variant 1.1. Bij variant 1.3 worden pendelstaven aan de zijkant toegevoegd. Op deze manier wordt er een extra steunpunt voor de boog gecreëerd waardoor de verplaatsing vermindert. De pendelstaaf is toegepast op de maximale situatie; namelijk als verticale pendelstaaf naast het profiel van vrije ruimte. De schematisatie van variant 1.3 wordt weergegeven in figuur 36 en de profilering in tabel 9. De volledige berekening van variant 1.3 is terug te vinden in bijlage D.



figuur 36 Schematisatie variant 1.3

	Profilering
Boog	HE700A
Kolommen zijkant	HE240A
Middenkolom	HE300A

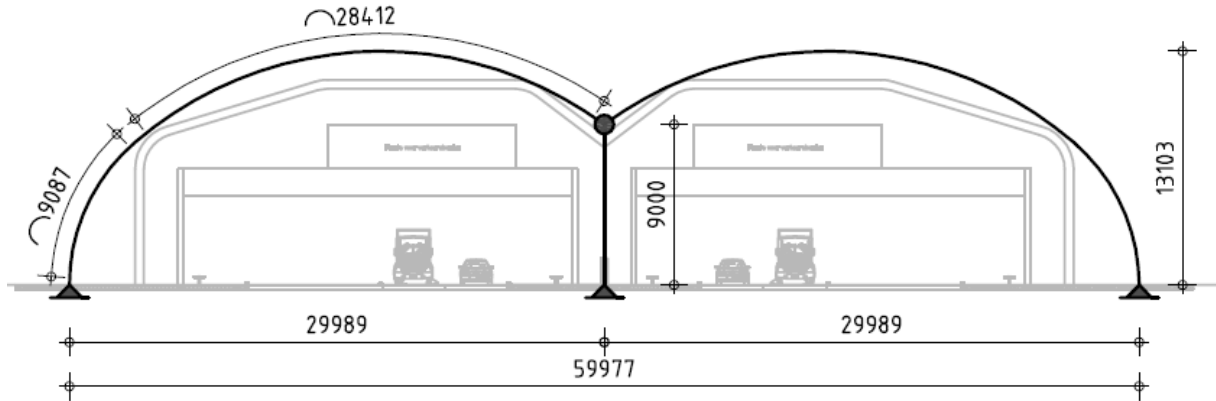
tabel 9 Profilering variant 1.3

4.3.2 Hoofdvorm 2

Voor hoofdvorm 2 zijn zes varianten bedacht die kort zullen worden omschreven.

4.3.2.1 Variant 2.1

De schematisatie van hoofdvorm 2 wordt weergegeven in figuur 34. De hoofdvorm is tevens de eerste variant; variant 2.1. De profilering van variant 2.1 wordt weergegeven in tabel 10. De volledige berekening van variant 2.1 is terug te vinden in bijlage E.

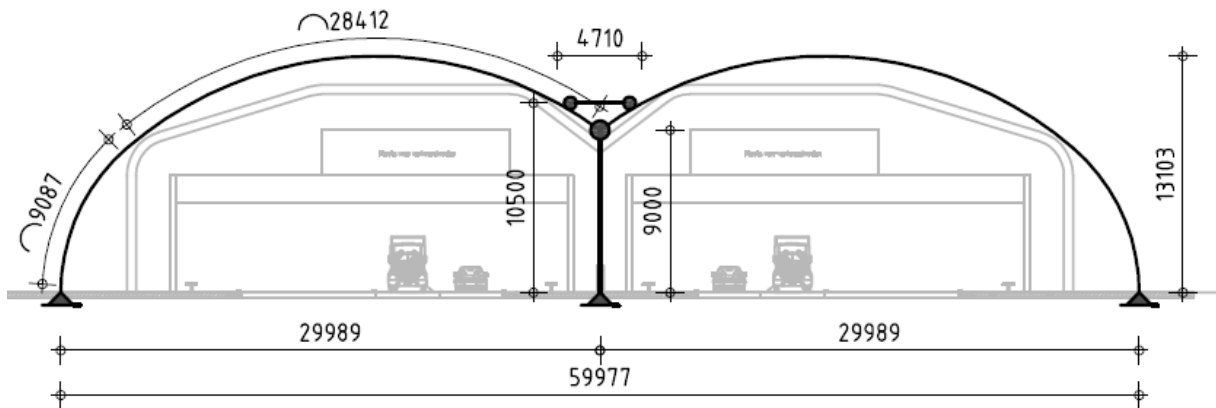


figuur 37 Schematisatie hoofdvorm 2 / variant 2.1

	Profilering
Boog	HE1000x584
Middenkolom	HE260A

tabel 10 Profilering variant 2.1

Bij variant 2.1 bleek de horizontale verplaatsing sterk maatgevend boven sterkte en stabiliteit. Om deze verplaatsing te verkleinen is een vast punt in het midden wenselijk. Om een momentvaste verbinding in het midden te benaderen kan er een horizontaal pendelstaafje in het midden worden toegevoegd zoals is weergegeven in figuur 38. De profilering van deze variant wordt weergegeven in tabel 11. De volledige berekening is terug te vinden in bijlage F.



figuur 38 Schematisatie variant 2.1 met horizontaal pendelstaafje

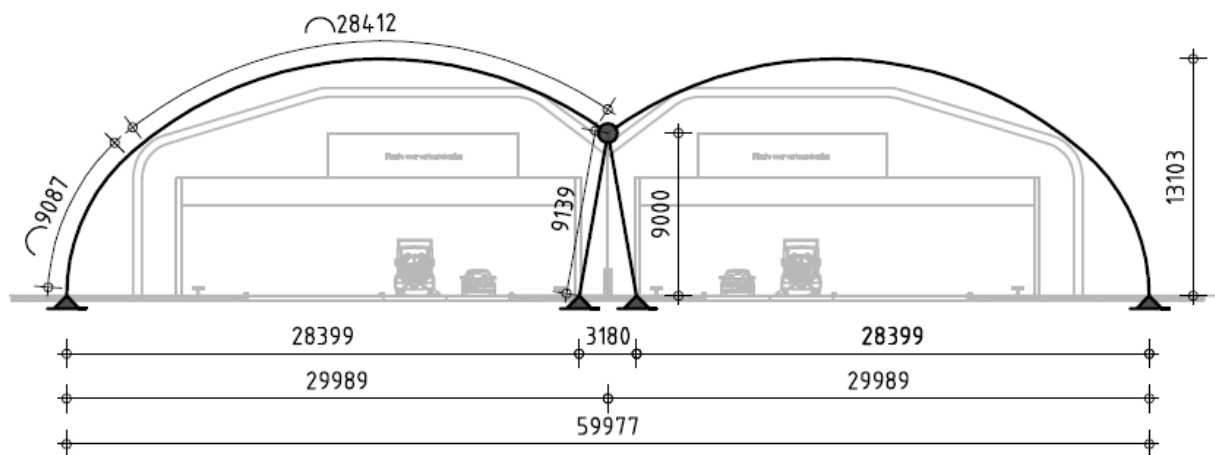
	Profiling
Boog	HE1000x494
Middenkolom	HE260A
Horizontale pendel	HE260A

tabel 11 Profiling variant 2.1 met horizontaal pendelstaafje

De invloed van het horizontale pendelstaafje is dat er met één profiel lichter geconstrueerd kan worden. Een nadeel is echter wel dat er per spant twee verbindingen bijkomen. Dit weegt niet op tegen één profiel lichter. Het horizontale pendelstaafje wordt om deze reden niet verder meegenomen in de variantenstudie.

4.3.2.2 Variant 2.2

Een mogelijkheid voor het creëren van een vast punt is het toepassen van een gespreide middenkolom. Hierdoor vermindert de horizontale verplaatsing. De schematisatie van variant 2.2 wordt weergegeven in figuur 39 en de profiling in tabel 12. De volledige berekening van variant 2.2 is terug te vinden in bijlage G.



figuur 39 Schematisatie variant 2.2

	Profiling
Boog	HE600A
Middenkolom	HE300A

tabel 12 Profiling variant 2.2

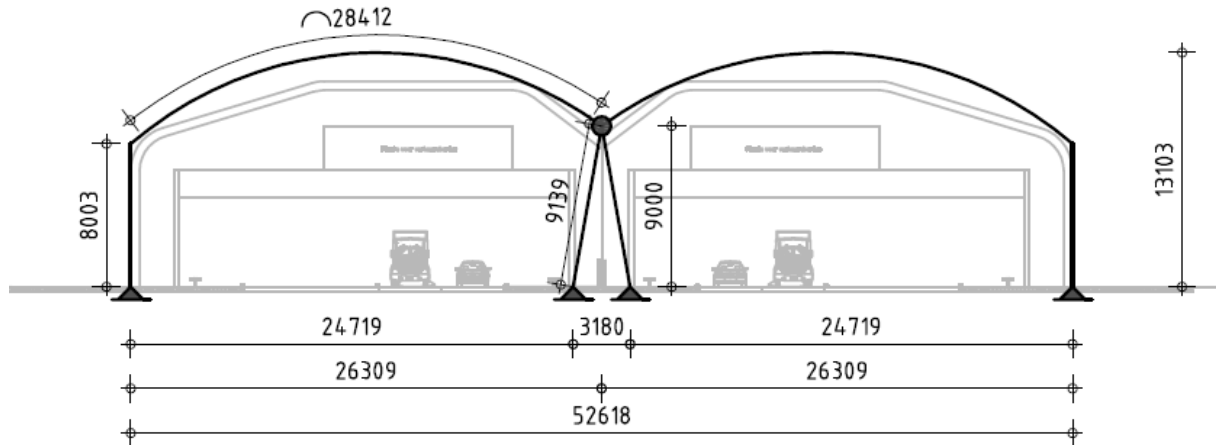
De gespreide middenkolom is niet toegepast bij de varianten van hoofdvorm 1.

De 'vrije' afstand in het midden is 1790 mm per weghelft. Bij de varianten met twee bogen is de hoogte in het midden ongeveer 9 meter. Met een breedte van ongeveer 1500 mm (200 mm in rekening gebracht voor de constructiebreedte) betekent dit een verhouding van 1:6.

Bij de varianten met één boog is de hoogte in het midden ongeveer 13,5 meter. Dit betekent een verhouding van 1:10. De gespreide kolom wordt bij deze verhouding erg steil en hierdoor niet efficiënt. Tevens hebben de kolommen bij een dergelijke verhouding een grote overlap ter plaatse van de aansluiting wat erg lastig is om te construeren. De gespreide kolom is om deze reden alleen een optie zijn bij de varianten met twee bogen.

4.3.2.3 Variant 2.3

Een variatie op variant 2.1 is het toepassen van verticale wanden aan de zijkant. Op deze manier wordt het profiel van vrije ruimte zo nauw mogelijk gevolgd. De gespreide middenkolom is ook hier toegepast om de horizontale verplaatsing te verkleinen. De schematisatie van variant 2.3 wordt weergegeven in figuur 40 en de profilering in tabel 13. De volledige berekening van variant 2.3 is terug te vinden in bijlage H.



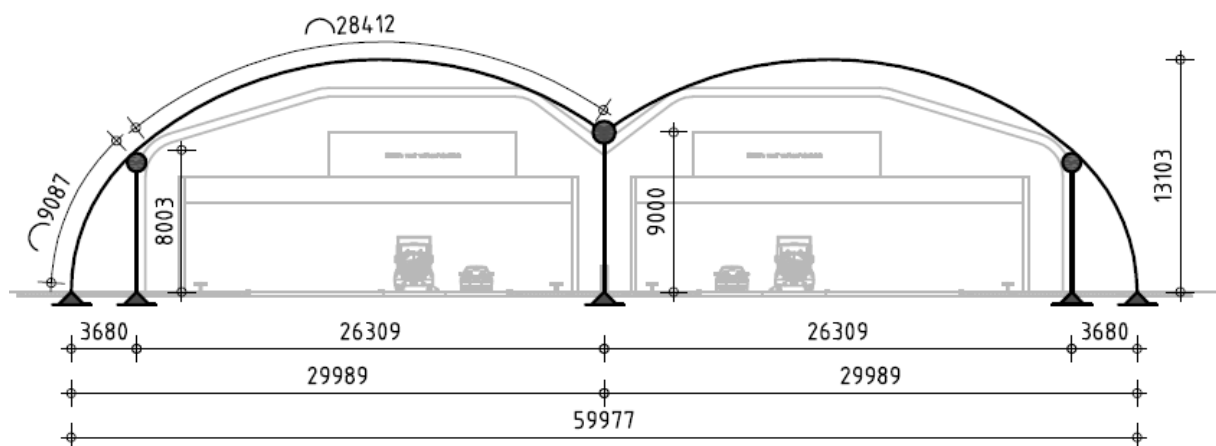
figuur 40 Schematisatie variant 2.3

	Profilering
Boog	HE550A
Gespreide middenkolom	HE280A
Kolommen zijkant	HE550A

tabel 13 Profilering variant 2.3

4.3.2.4 Variant 2.4

Bij variant 2.4 worden pendelstaven aan de zijkant toegevoegd. Op deze manier wordt er een extra steunpunt voor de bogen gecreëerd waardoor de verplaatsing vermindert. De pendelstaaf is toegepast op de maximale situatie; namelijk als verticale pendelstaaf naast het profiel van vrije ruimte. De schematisatie van variant 2.4 wordt weergegeven in figuur 41 en de profilering in tabel 14. De volledige berekening van variant 2.4 is terug te vinden in bijlage I.



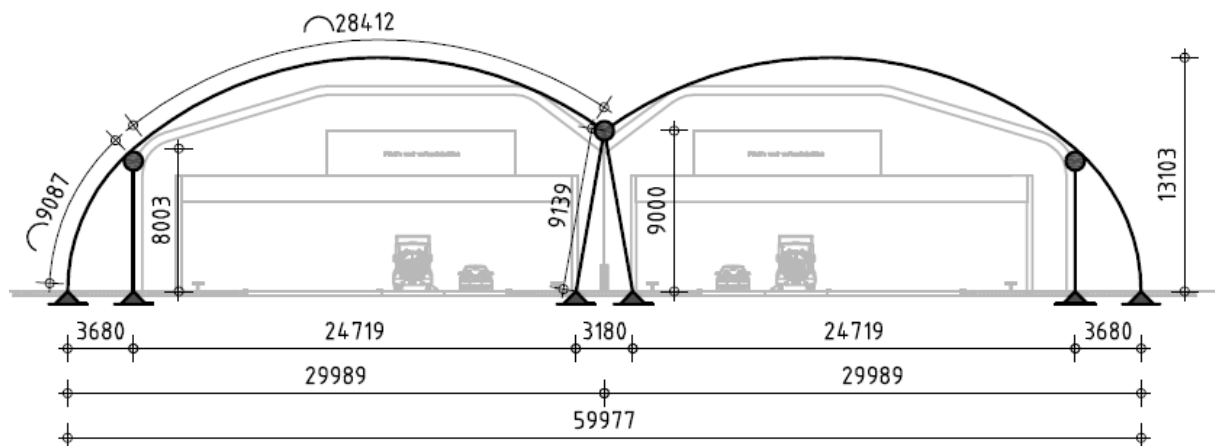
figuur 41 Schematisatie variant 2.4

	Profilering
Boog	HE600A
Middenkolom	HE240A
Kolommen zijkant	HE240A

tabel 14 Profilering variant 2.4

4.3.2.5 Variant 2.5

Een variatie op variant 2.4 is het toepassen van een gespreide middenkolom om de horizontale verplaatsing nog meer te reduceren. De schematisatie van variant 2.5 wordt weergegeven in figuur 42 en de profilering in tabel 15. De volledige berekening van variant 2.5 is terug te vinden in bijlage J.



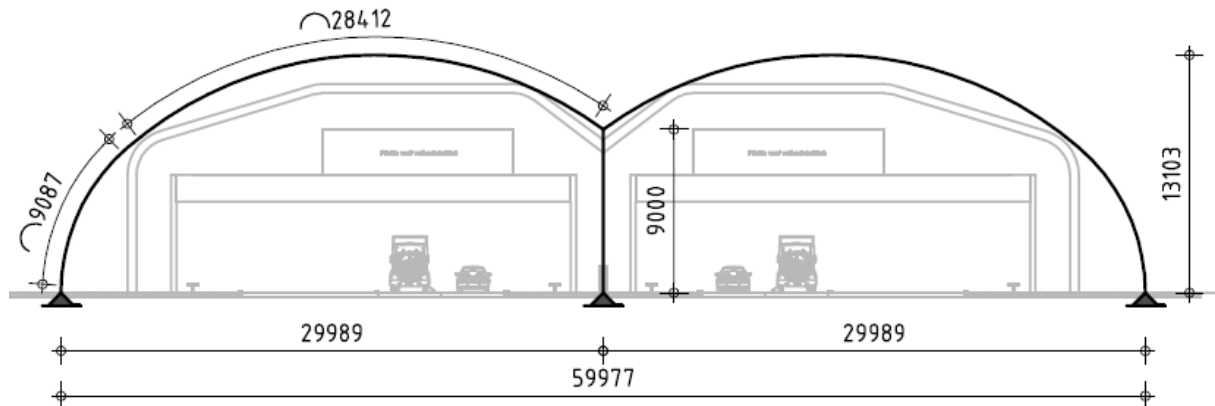
figuur 42 Schematisatie variant 2.5

	Profilering
Boog	HE500A
Gespreide middenkolom	HE300A
Kolommen zijkant	HE240A

tabel 15 Profilering variant 2.5

4.3.2.6 Variant 2.6

De laatste variant van hoofdvorm 2 is variant 2.6. Bij deze variant is de kolom momentvast aan de bogen verbonden. De schematisatie van variant 2.6 wordt weergegeven in figuur 43 en de profilering in tabel 16. De volledige berekening van variant 2.6 is terug te vinden in bijlage K.



figuur 43 Schematisatie variant 2.6

	Profilering
Boog	HE700A
Middenkolom	HE700A

tabel 16 Profilering variant 2.6

4.4 Vergelijken varianten

Nu de profilering van de varianten bekend is, zullen de varianten qua kosten met elkaar vergeleken worden om tot een definitieve keuze te komen. De onderdelen die hierbij worden beschouwd zijn:

- Het materiaalgebruik (het aantal kg staal, m² glas, m² wand);
- De fundering (het aantal palen en aantal poeren);
- De eventuele aanwezigheid van een goot in het midden en/of zijkant.

Indien de kosten van enkele varianten vrijwel gelijk zijn, kunnen de volgende criteria de doorslag geven:

- Ruimteverlies naast het profiel van vrije ruimte: minder ruimte naast het profiel van vrije ruimte betekent minder grond onteigenen en dus minder kosten en meer ruimte om te bouwen.
- Het maken van vluchtdeuren: vluchtdeuren zijn in rechte wanden eenvoudiger te construeren dan in gebogen wanden en hebben zodoende minder kosten tot gevolg.
- De 'moeilijkheid' van de fundering in het midden: aangezien het project een bestaande snelweg betreft zijn de uitvoeringstechnische aspecten van belang. Tussen de twee rijbanen is er relatief weinig ruimte voor het maken van een fundering. Minder funderingspalen in het midden hebben dan ook de voorkeur.
- Het aantal verbindingen: meer verbindingen hebben uiteraard meer montagetijd tot gevolg en daarmee meer kosten.

4.4.1 Materiaalgebruik

Voor het materiaalgebruik wordt onderscheid gemaakt in de spanten, de glasdragers, de gordingen, het glas en de middenwand.

4.4.1.1 Spanten

Voor de spanten wordt de profilering aangehouden zoals eerder berekend. De spanten staan 11 meter h.o.h. van elkaar. De kosten voor staal zijn geschat op €3,-/kg.

4.4.1.2 Glasdragers

Voor de profilering van de glasdragers is een aanname gedaan. Het toegepaste profiel is een HE100AA. De glasdragers hebben een h.o.h.-afstand van 1,1 meter. Een HE100AA weegt 16,7 kg/m en de kosten voor staal zijn €3,-/kg.

4.4.1.3 Gordingen

Voor de gordingen is ook een aanname gedaan. Het toegepaste profiel is een IPE300. De gordingen hebben een h.o.h.-afstand van 3,1 meter. Een IPE300 weegt 42,2 kg/m en de kosten voor staal zijn €3,-/kg.

4.4.1.4 Freeformglass®

Als beglazing van de Duurzame Weg wordt Freeformglass® toegepast. De kosten van dit glas zijn geschat op €200,-/m² (Bron: Movares B.V.).

4.4.1.5 Middenwand

De middenwand dient geluidsabsorberend te zijn en tevens bestand zijn tegen uit koers geraakte auto's. De prijs voor een absorberende middenwand wordt geschat op €600,-/m² (Bron: Movares B.V.).

4.4.2 Fundering



figuur 44 Tubex-paal (Bron: www.fundexgroup.com)

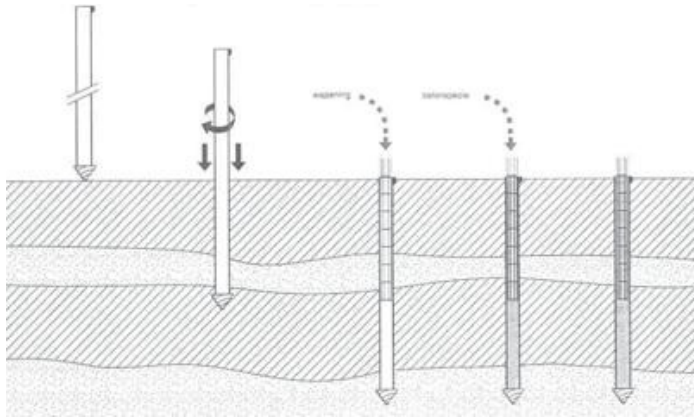
Voor de fundering voor De Duurzame Weg wordt vanwege de grote opwaartse kracht een paalfundering toegepast. In Venlo bevindt de draagkrachtige laag zich op 9,5 m onder het maaiveld.

Als paaltype is gekozen voor de Tubex-paal (figuur 44). Dit is een trillingsvrije, grondverdringende betonpaal met permanente stalen buis, schroevend op diepte gebracht. Voordelen van dit paaltype zijn:

- Trillingsvrij, en 100% grondverdringend (geen ontspanning van de grond of reductie van de conusweerstand).
- Geen gevaar voor schade aan belendende percelen tijdens het vervaardigen van de paal.
- Uitermate geschikt voor het opnemen van grote druk- en trekkrachten, momenten en het beperken van vervormingen.
- Geen geluidshinder, zoals bij heien of trillen. Enige geluid is de motor van de boormachine.
- Geen grondafvoer. Grond wordt zijdelings weggedrukt.

De werkwijze van de Tubex-paal gaat op de volgende manier (figuur 45):

- Een stalen buis, voorzien van een aangelaste stalen boorpunt, wordt geplaatst op het maaiveld;
- De buis wordt schroevend op diepte gebracht door het aanbrengen van een axiale druk en een draaimoment;
- Bij het bereiken van het gewenste paalpuntniveau, is de paal geïnstalleerd;
- De stelling kan verplaatst worden naar de volgende paallocatie;
- In een latere fase wordt de stalen buis op de exacte hoogte afgebrand;
- De wapening wordt in de buis aangebracht;
- De buis wordt gevuld met beton;
- De paal is nu vervaardigd.



figuur 45 Werkwijze Tubex-paal (Bron: www.fundexgroup.com)

De berekening van de funderingspalen gebeurt volgens NEN 6743. Bij het optreden van zowel druk- als trekkrachten in hetzelfde punt, zal de maatgevende berekening worden aangehouden. Horizontale krachten worden opgenomen door het 'schoor' plaatsen van de palen (maximale verhouding is 4 : 1).

In bijlage L wordt het aantal palen per variant berekend. Aangenomen is dat per variant overall dezelfde paal wordt toegepast (diameter en lengte) en dat er onder één steunpunt minimaal twee palen worden geplaatst.

De kosten voor een Tubex-paal met een diameter kleiner dan 400 mm zijn ongeveer €3500,-/stuk en voor een diameter groter dan 400 mm zijn de kosten €4500,-/stuk (Bron: Movares B.V.). Deze prijs is inclusief bevels, boorpunten, wapeningskorven en vulbeton.

Per steunpunt zal er één poer worden toegepast. Om een indruk te krijgen wat voor afmetingen benodigd zijn, is er een poer berekend op een gemiddelde kracht van 600 kN. De berekening van de poer is terug te vinden in bijlage M. De berekende afmetingen van de poer zijn 1400 x 1000 x 600 mm (l x b x h). De kosten per poer zijn €1000,- (Bron: Movares B.V.).

4.4.3 Goot en riolering

Voor de goot en de riolering wordt er onderscheid gemaakt in drie gevallen:

- Goot in het midden benodigd;
- Goot aan de zijkant benodigd;
- Geen goot benodigd.

4.4.3.1 Goot in het midden

Voor de goot in het midden worden de volgende onderdelen in rekening gebracht:

- *Afvoerpijpen*

Per spant zal er een afvoerpijp benodigd zijn (om de 11 meter). De kosten voor een afvoerpijp zijn €100,-/stuk (Bron: Movares B.V.).

- *Onderhoud goot*

Er wordt aangenomen dat de goot eenmaal per jaar wordt schoongemaakt (tegelijktijd met het schoonmaken van de glasplaten). De kosten hiervoor bedragen €5,-/m. De referentieperiode voor de overkapping wordt gesteld op 50 jaar.

- *Riolering*

Voor het afvoeren van het water is een riolering benodigd. De kosten hiervoor zijn €100,-/m (Bron: Movares). Deze prijs is inclusief de rioleringspijpen en het grondwerk.

Het materiaal waarvan de goot is gemaakt, wordt niet in rekening gebracht. Bij het ontbreken van een middengoot bevindt zich namelijk op dezelfde plaats staal en glas. De kosten van het staal en glas worden als gelijk beschouwd als de kosten van het gootmateriaal. Het gootmateriaal hoeft daarom niet in rekening te worden gebracht.

4.4.3.2 Goot aan de zijkant

Voor de goot aan de zijkant worden dezelfde kosten beschouwd als voor een goot in het midden. Tevens wordt voor de goot aan de zijkant wel het gootmateriaal in rekening gebracht:

- *Materiaal goot*

De goot wordt gemaakt van 5 mm dik plaatstaal. Er zal ongeveer een meter breed te benodigd zijn. De kosten voor staal bedragen €3,-.

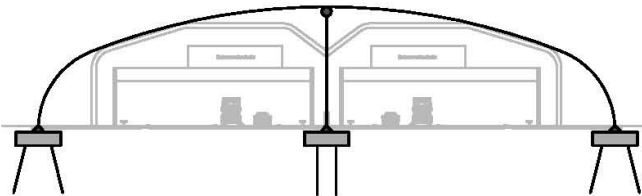
4.4.3.3 Geen goot

Bij het ontbreken van een goot moet er wel een riolering worden aangebracht waar het water door de overkapping naar de grond wordt geleid. De kosten voor deze riolering zijn €100,-/m.

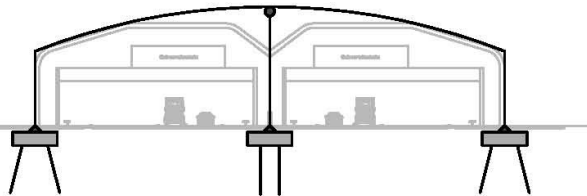
4.5 Overzicht varianten

Een overzicht van de varianten met funderingspalen en -poeren voor de spantvorm is weergegeven in figuur 46.

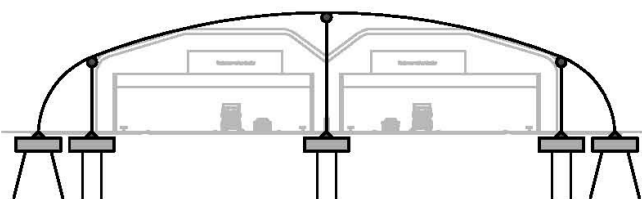
Variant 1.1 - 6 palen Ø 324 mm lengte 14 meter



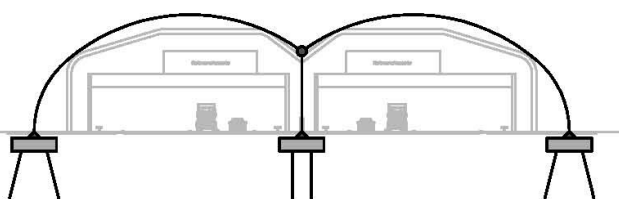
Variant 1.2 - 6 palen Ø 219 mm lengte 14 meter



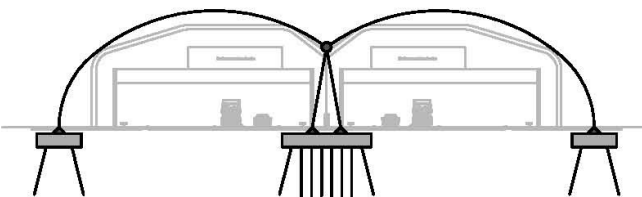
Variant 1.3 - 10 palen Ø 324 mm lengte 14 meter



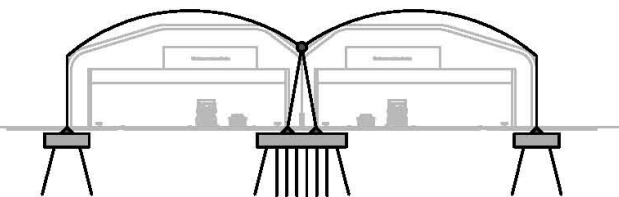
Variant 2.1 - 6 palen Ø 219 mm lengte 14 meter



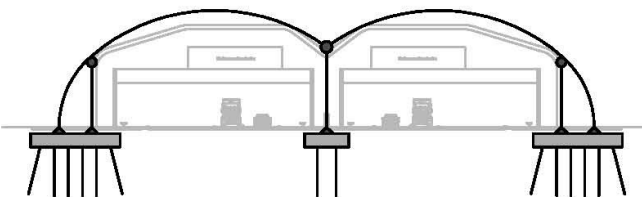
Variant 2.2 - 12 palen Ø 406 mm lengte 14 meter



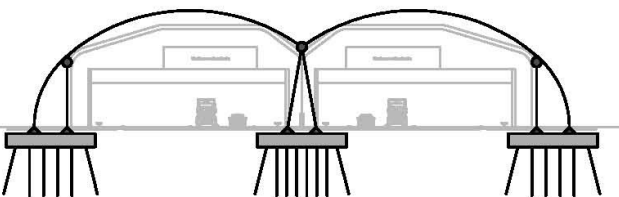
Variant 2.3 - 12 palen Ø 324 mm lengte 14 meter



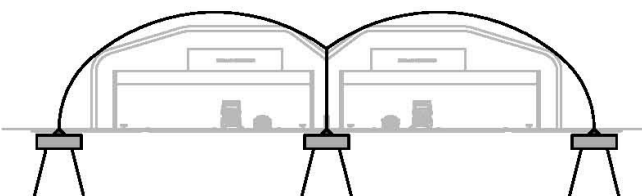
Variant 2.4 - 14 palen Ø 324 mm lengte 14 meter



Variant 2.5 - 20 palen Ø 406 mm lengte 14 meter



Variant 2.6 - 6 palen Ø 324 mm lengte 14 meter



figuur 46 Overzicht varianten met funderingspalen en -poeren

4.6 Keuze spantvorm

De eerder genoemde kosten zijn per variant uitgewerkt tot een kostenoverzicht. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 17. De volledige kostenoverzichten zijn te vinden in bijlage N.

Variant	Kosten voor 4 km overkapping
Variant 1.1	885 miljoen €
Variant 1.2	876 miljoen €
Variant 1.3	867 miljoen €
Variant 2.1	878 miljoen €
Variant 2.2	862 miljoen €
Variant 2.3	857 miljoen €
Variant 2.4	861 miljoen €
Variant 2.5	875 miljoen €
Variant 2.6	852 miljoen €

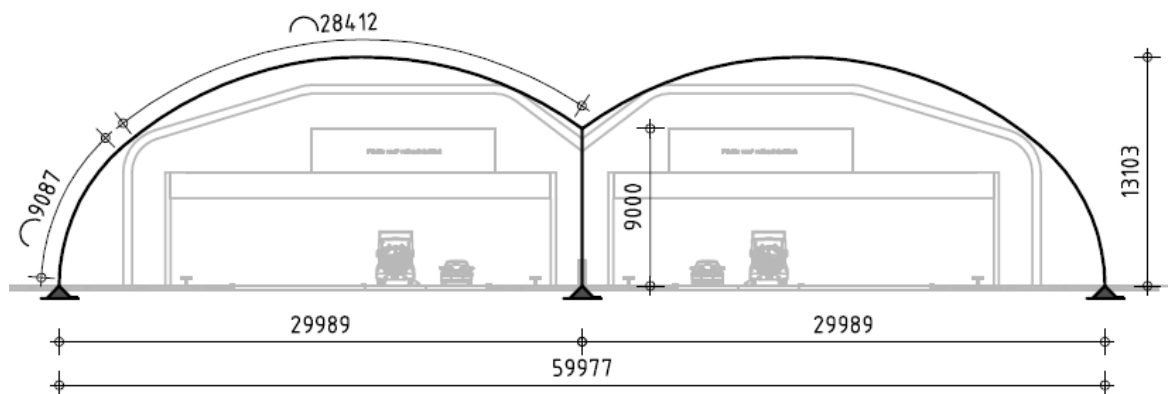
tabel 17 Overzicht kosten van de varianten

Uit tabel 17 is af te lezen dat de kosten variëren van 852 miljoen euro (variant 2.6) tot 885 miljoen euro (variant 1.1). Dit is een verschil van 33 miljoen euro. Op een bedrag van 852 miljoen euro is dit een verschil van 3,9%. De kostenoverzichten van de varianten zijn niet nauwkeurig genoeg om een definitieve keuze te maken met een verschil van 3,9% in kosten.

De definitieve keuze gaat gemaakt worden door varianten weg te selecteren. Dit gebeurt op basis van de volgende argumenten:

- *Ruimteverlies naast het profiel van vrije ruimte*
Variant 1.1 en 1.3 vallen af op basis van ruimteverlies naast het profiel van vrije ruimte.
- *De 'moeilijkheid' van de fundering in het midden*
Variant 2.2, 2.3 en 2.5 vallen af op basis van het grote aantal funderingspalen in de middenberm.
- *Profilering*
Variant 1.2 en 2.1 vallen af vanwege de grote profilering (HE1000).
- *Het aantal verbindingen*
Variant 2.4 valt af vanwege het maken van meer verbindingen dan bij variant 2.6

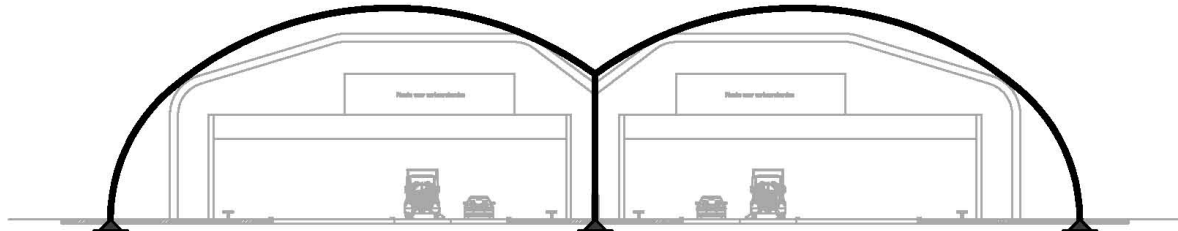
De definitieve keuze voor de spantvorm is variant 2.6 (figuur 47).



figuur 47 Definitieve keuze spantvorm (variant 2.6)

5. Variantenstudie profilering

De varianten voor de spantvorm zijn tijdens het variantenonderzoek berekend met passende HE-profielen. Dit is gedaan om de varianten onderling te vergelijken. Een HE-profiel is misschien niet de meest optimale keuze. In dit hoofdstuk wordt onderzocht welke profilering het beste kan worden toegepast voor de verschillende constructie-elementen van de overkapping (figuur 48). De definitieve berekening van de constructie-elementen gebeurt in hoofdstuk 8.



figuur 48 Definitieve variant spantvorm

De overkapping bestaat uit vier onderdelen:

- De bogen
- De middenkolom
- De gordingen
- De glasdragers

Voor de profilering van de constructieonderdelen zijn verschillende mogelijkheden. De varianten die met elkaar vergeleken worden zijn profielstaal, breedflensprofielen, buizen en kokers en raatliggers. Deze profileringen zullen per variant worden beoordeeld op verschillende aspecten. De belangrijkste daarvan is het maken van verbindingen. Vervolgens zijn het onderhoud (corrosiebestrijding en afvoeren van vocht) en het gewicht per strekkende meter punten waarop de profileringen beoordeeld worden.

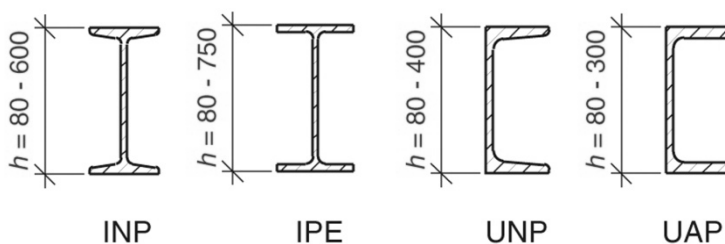
Voordat er gekeken wordt naar ieder constructieonderdeel afzonderlijk, worden eerst de soorten profilering besproken met de algemene eigenschappen. De berekening en toetsing van de definitieve profilering zal toegelicht worden in deel II.

5.1 Profilering algemeen

5.1.1 Profielstaal

Aan profielstaal worden het lijf en de flenzen onderscheiden. Bij de varianten INP- en UNP-profiel verlopen de flenzen schuin. Hierdoor worden verbindingen minder gemakkelijk gemaakt. Varianten met rechte randen zijn het IPE- en het UAP-profiel (figuur 49).

Profielstaal wordt hoofdzakelijk toegepast in liggers door de geschiktheid voor het opnemen van dwarskrachten. Het I-profiel is minder geschikt voor constructiedelen die in meer dan één richting belast worden of die worden belast door een grote normaalkracht.

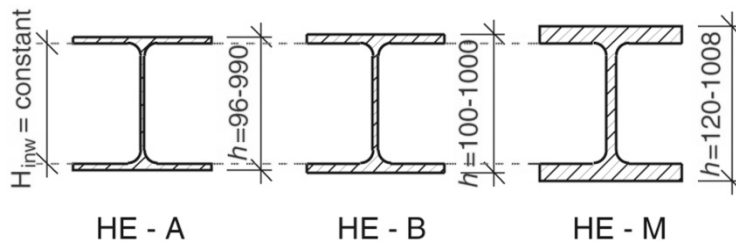


figuur 49 Varianten profielstaal (Bron: www.jellema-online.nl)

5.1.2 Breedflensprofielen

Indien een profiel op buiging of normaalkracht wordt belast, is er een zekere stijfheid benodigd in twee richtingen. Breedflensprofielen zijn hiervoor zeer geschikt. De flenzen van breedflensprofielen

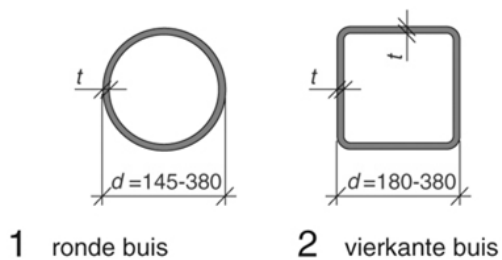
De hoofdgroep breedflensprofielen kan worden onderverdeeld in drie soorten; HEA, HEB en HEM zijn breder dan de flenzen bij profielstaal. (figuur 50). De letters A, B en M geven de relatieve dikte van het profiel aan, waarbij HEA-profielen het dunst zijn en HEM het dikst. Deze laatste profielen worden niet veel toegepast.



figuur 50 Varianten breedflensprofielen (Bron: www.jellema-online.nl)

5.1.3 Buizen en kokers

Er bestaan ronde en vierkante buizen met of zonder lasnaad. Het voordeel van buizen en vierkante kokers is de dat de stijfheid om zowel de sterke als de zwakke as even groot is. Nadeel is het maken van aansluitingen. Door het dichte profiel zullen er altijd extra voorzieningen moeten worden getroffen om verbindingen te kunnen maken.

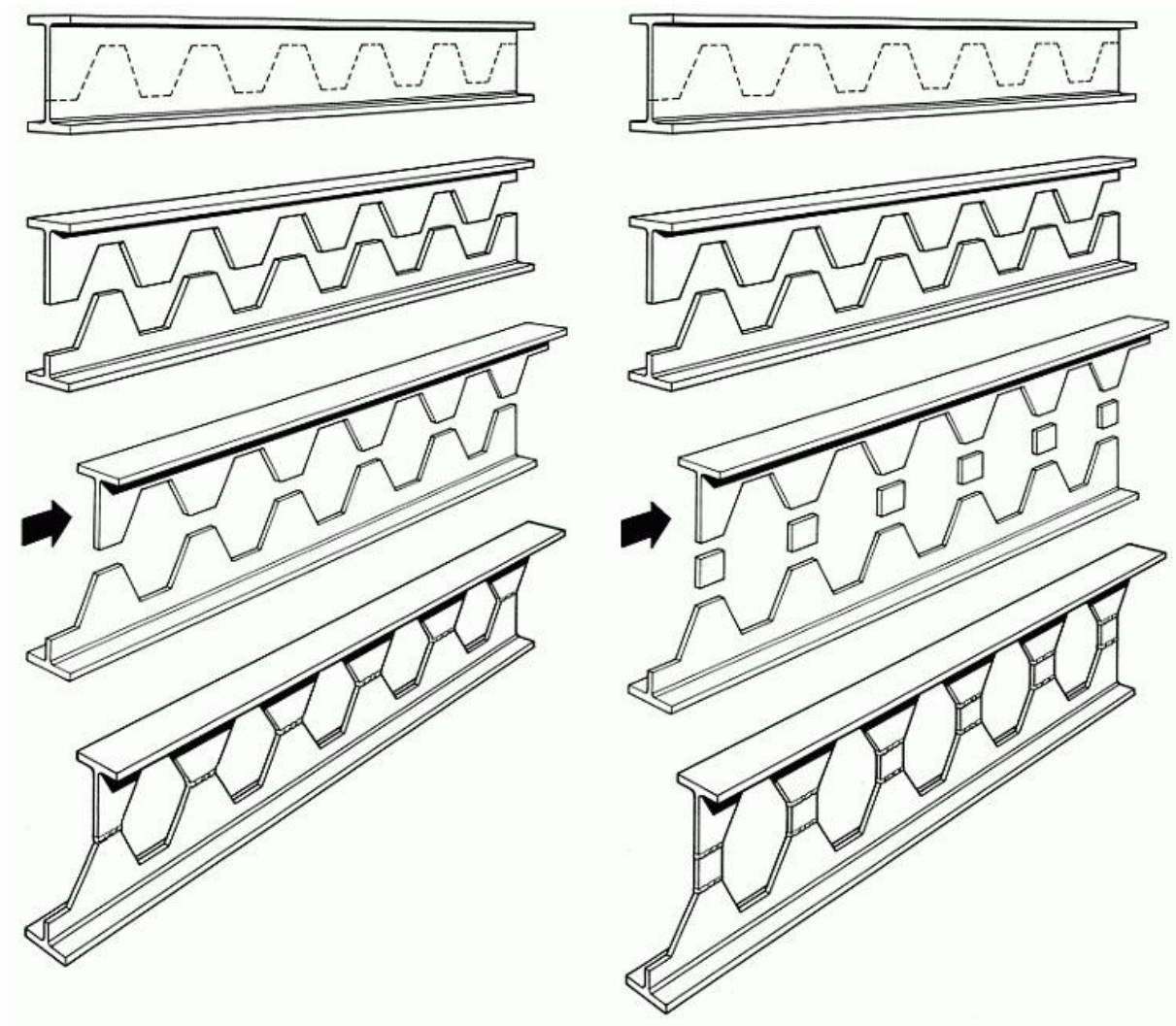


figuur 51 Varianten buizen en kokers (Bron: www.jellema-online.nl)

5.1.4 Raatliggers

Een bijzondere vorm van een HE- of I-profiel is een raatligger. Een raatligger ontstaat door een gewalst HE- of IPE-profiel door te snijden volgens een zigzag, een trapeziumvormige of ronde lijn. De beide delen worden vervolgens ten opzichte van elkaar verschoven en met of zonder tussenplaten aan elkaar gelast.

Door de transformatie van een walsprofiel naar een raatligger nemen de sterkte en vooral de stijfheid van de ligger belangrijk toe. Raatliggers zijn minder geschikt voor het opnemen van grote dwarskrachten.



figuur 52 Varianten raatligger (Bron: www.grunbauer.nl)

In de volgende paragrafen zal er per constructie-element worden bepaald wat de beste profilering is.

5.2 Profilering constructie-elementen

5.2.1 Bogen

De bogen worden voornamelijk belast op moment en normaalkracht. Bij de berekening van het spant bleek de horizontale verplaatsing maatgevend te zijn boven de sterkte en de stabiliteit. Door van een HE- of IPE-profiel een raatligger te construeren, neemt de stijfheid toe door de ontstane grotere hoogte. Er kan dus lichter geconstrueerd worden. Daarom wordt er gekozen voor het toepassen van raatliggers.

Een ander voordeel van het toepassen van raatliggers is dat de gordingen eventueel door de raten heen kunnen worden gestoken, wat een positieve uitwerking heeft op de (kip)stabiliteit van het spant.

5.2.2 Middenkolom

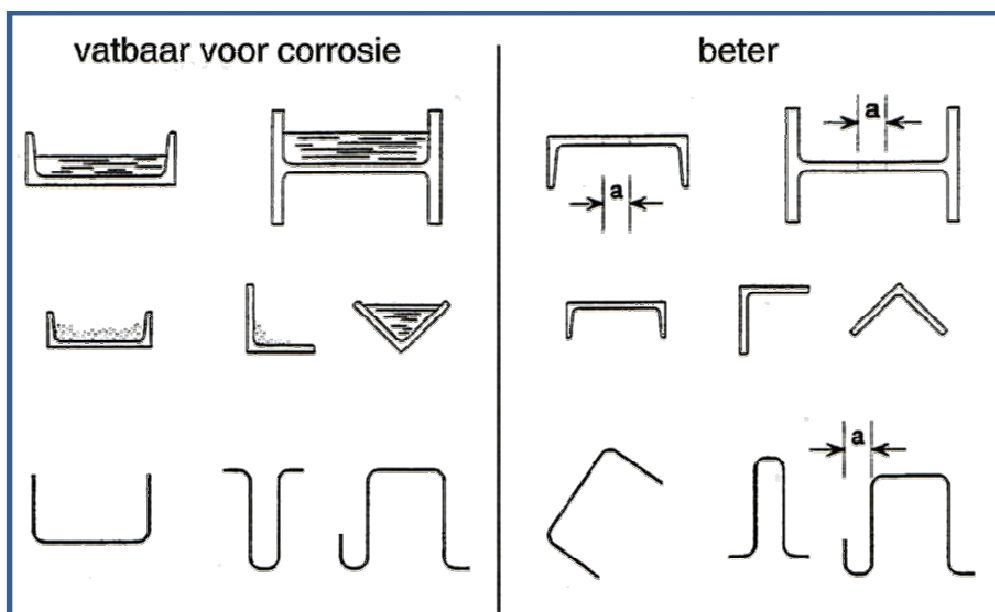
De middenkolom wordt voornamelijk belast op moment en normaalkracht. Bij de berekening van de middenkolom bleek, net zoals bij het spant, de horizontale verplaatsing maatgevend te zijn boven de sterkte en de stabiliteit. De middenkolom zal ook gebruikt worden voor het bevestigen van de middenwand.

Breedflensprofielen zijn erg geschikt voor constructie-elementen die belast worden op buiging en/of normaalkracht. Tevens is het ook eenvoudig om verbindingen te maken. Voor de middenkolom heeft een HEA-profiel dan ook de voorkeur. Als er uit de definitieve berekeningen blijkt dat een HEA-profiel niet voldoet of te groot wordt, kan er worden overwogen om een koker toe te passen.

5.2.3 Gordingen

Het maken van verbindingen is bij de gordingen een belangrijk aspect. De gordingen moeten aan de hoofdspanten worden bevestigd en de glasdragers weer aan de gordingen. Dit maakt het niet praktisch om buizen of kokers toe te passen.

De gordingen lopen tussen de spanten en zijn telkens geroteerd onder een andere hoek. Bij het doordringen van water door de gevel of het ontstaan van condens moet het vocht afgevoerd kunnen worden, zodat het water geen schade aan kan richten aan het staal (corrosiegevoeligheid). Bij het toepassen van een I- of HE-profiel ontstaan er door de rotatie 'water- en vuilbakken' (figuur 53). Er zullen dan extra voorzieningen moeten worden getroffen om het eventuele water af te voeren (bijvoorbeeld plaatselijk perforaties).



figuur 53 Voorbeelden voor het voorkomen van ophoping van vocht vuil en corrosieve stoffen (Bron: www.bouwenmetstaal.nl)

Een U-profiel heeft om bovenstaande redenen de voorkeur. Het U-profiel moet wel zo geplaatst worden dat er geen water in kan blijven staan (met de opening naar beneden).

Voor het maken van verbindingen hebben flenzen met een constante dikte de voorkeur boven flenzen met een verlopende dikte. Om deze reden wordt er gekozen voor een UPE-profiel.

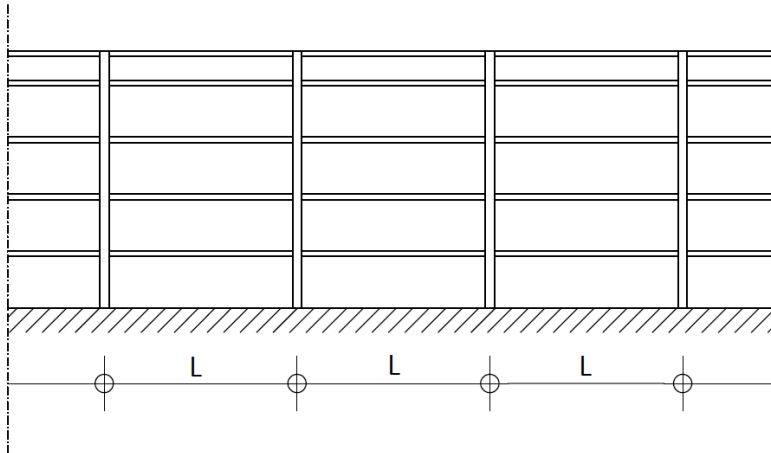
5.2.4 Glasdragers

De glasdragers dragen weinig gewicht en er zal daarom kunnen worden volstaan met een klein profiel. Wel van belang is dat op de glasdragers beglazingsprofielen dienen te worden bevestigd. Hiervoor is een bepaalde breedte nodig. De profielen die om deze reden de voorkeur hebben zijn IPE- en HE-profielen. Het maken van verbindingen bij deze profielen gaat ook eenvoudiger dan bijvoorbeeld bij kokerprofielen.

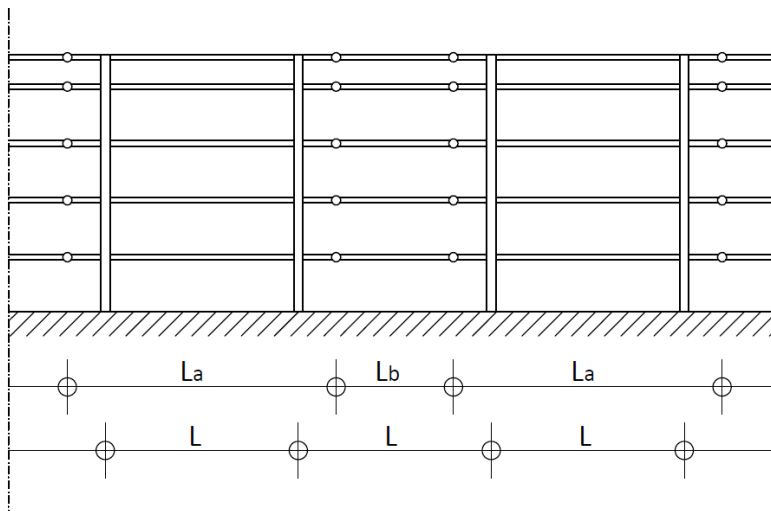
Er wordt gekozen voor een HE-profiel aangezien deze breder zijn dan IPE-profielen. In een later stadium wordt berekend welk profiel minimaal benodigd is. De voorkeur gaat uit naar het lichtste HE-profiel; namelijk een HEAA-profiel.

6. Variantenstudie spantopbouw

In dit hoofdstuk wordt bekeken wat de meest optimale oplossing is voor de spantopbouw. De opties die bekeken worden zijn de 'standaard opbouw' en de 'tafelopbouw'. Bij de standaard opbouw lopen de gordingen van spant tot spant (figuur 54). Bij de tafelopbouw steken de gordingen door de spanten heen. Op deze manier kunnen twee spanten met doorstekende gordingen als 'tafel' worden neergezet (figuur 55).



figuur 54 Standaard opbouw



figuur 55 Tafelopbouw

Er wordt gekeken wat de invloed van de opbouw is op de gordingafmetingen en wat de gevolgen zijn voor de uitvoering van de overkapping. Voor iedere variant van de spantbouw is het minimaal benodigde profiel bepaald.

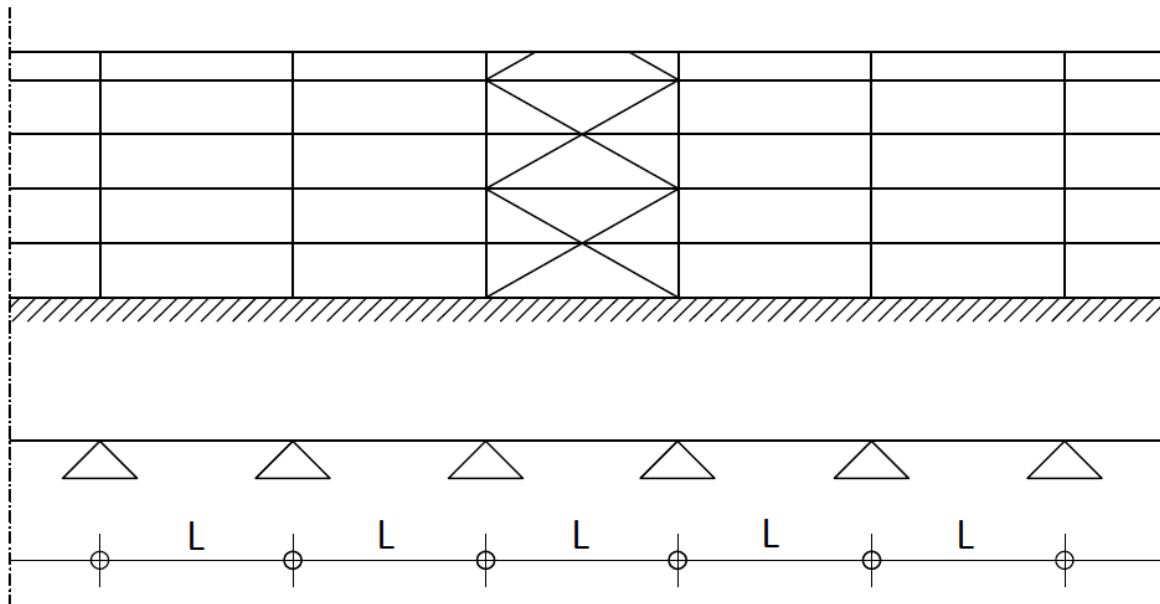
6.1 Uitgangspunten

Bij het vergelijken van de verschillende soorten spantopbouw worden enkele uitgangspunten gehanteerd:

- Het toegepaste profiel is een UPE (eerder bepaald in hoofdstuk 5).
- Het UPE-profiel als gording staat telkens onder een andere hoek. Voor het maken van een keuze wat betreft de spantopbouw wordt alleen de sterke as beschouwd.
- De gordingen worden getoetst op sterkte en stijfheid. Stabiliteit wordt voorlopig buiten beschouwing gelaten en wordt in een later stadium uitgebreid bekeken.
- Er worden bij de standaard opbouw twee spantafstanden bekeken; 11 meter en 15,4 meter. Deze spantafstanden worden ook gehanteerd bij de 'tafel' van het tafelmodel.

6.2 Standaard opbouw

Bij de standaard opbouw lopen de gordingen van spant tot spant en worden de gordingen beschouwd als doorgaande ligger (figuur 56). De gordingen worden geschematiseerd als ingeklemde liggers.



figuur 56 Schematisatie standaard opbouw

Een nadeel van de standaard opbouw is dat er tijdens de uitvoering extra stabiliteitsvoorzieningen benodigd zijn aangezien de losse spanten geen stabiel geheel vormen.

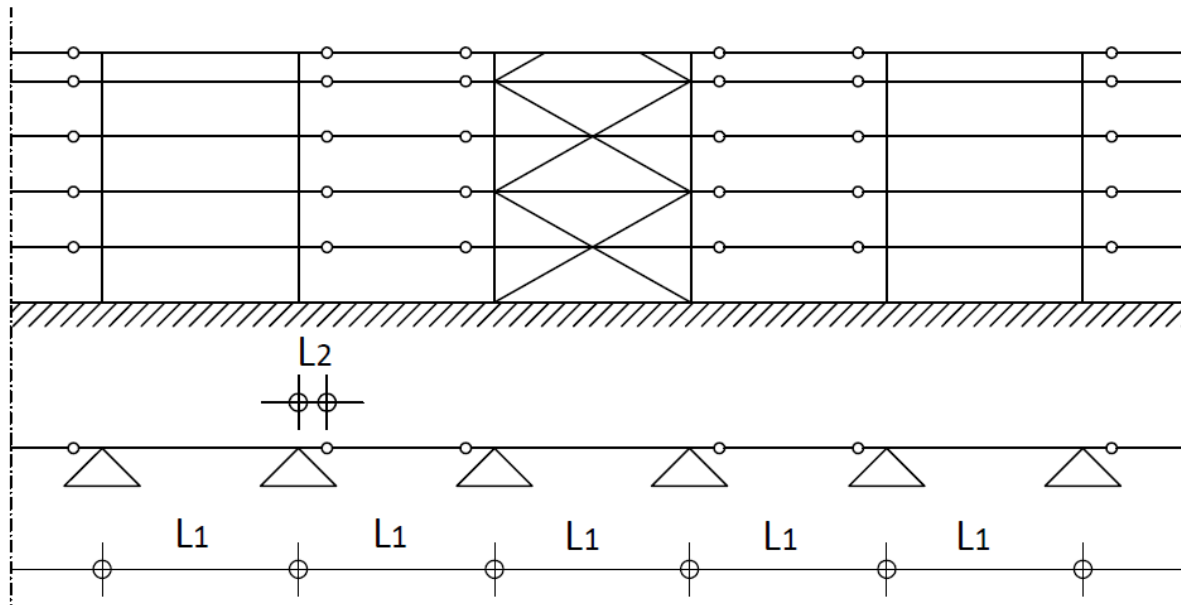
De berekening van de gordingen van de standaard opbouw is opgenomen in bijlage O. Uit de berekening blijkt dat de stijfheid maatgevend is boven de sterkte. De uitkomsten van de berekening zijn weergegeven in tabel 18.

<i>h.o.h. afstand spanten</i>	<i>Berekende profilering</i>
11 meter	UPE220
15,4 meter	UPE300

tabel 18 Berekende profilering standaard opbouw

6.3 Tafelopbouw

De gordingen lopen bij de tafelopbouw door over de spanten. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het principe van een gerberligger (figuur 57). Een gerberligger is een op meerdere steunpunten rustende ligger waarin om het andere veld scharnierende verbindingen zijn aangebracht.



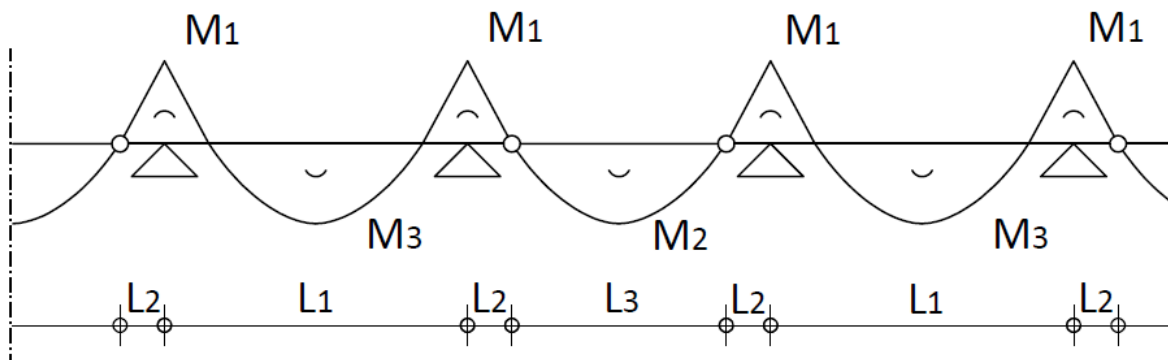
figuur 57 Schematisatie tafelopbouw

Een voordeel van de tafelopbouw is dat twee spanten en de gordingen ('tafel') als stabiel element kunnen worden geplaatst. De verbindingen van de tafel dienen wel zo gedetailleerd te worden dat de tafel als stabiel element kan staan. De tafels kunnen vervolgens worden doorgekoppeld door middel van tussengordingen. Tijdens de uitvoering zijn dus geen extra stabiliteitsvoorzieningen benodigd.

De gerberligger wordt op twee manieren geoptimaliseerd: op moment en op doorbuiging.

6.3.1 Optimalisatie op moment

Een eigenschap van een gerberligger is dat de momentenlijn wordt beïnvloed door de plaats van het scharnier. De meest optimale situatie is als de momenten in de ligger aan elkaar gelijk zijn; $M_1 = M_2 = M_3$ (figuur 58). Er is onderzocht of het effectief is om wisselende spantafstanden toe te passen. Uit de berekening (bijlage P) blijkt echter dat voor gelijke momenten, de spantafstanden aan elkaar gelijk dienen te zijn; oftewel $L_1 = 2 \cdot L_2 + L_3$. Voor de optimalisatie op moment wordt dus uitgegaan van gelijke spantafstanden. Bij gelijke spantafstanden L_1 (figuur 57) is afstand L_2 gelijk aan $0,1464 \cdot L_1$ (bijlage P).



figuur 58 Momentenlijn gerberligger tafelopbouw

De berekening van de gordingen van de tafelopbouw geoptimaliseerd op moment is opgenomen in bijlage P. Uit de berekening blijkt dat de stijfheid maatgevend is boven de sterkte. De uitkomsten van de berekening zijn weergegeven in tabel 19.

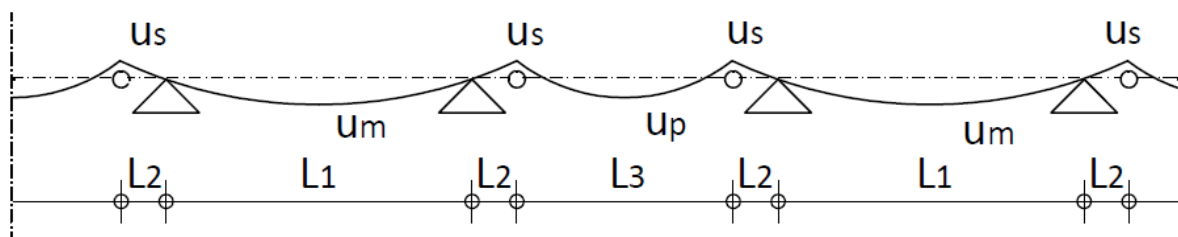
<i>h.o.h. afstand spanten</i>	<i>Berekende profilering</i>	<i>Afstand L2</i>	<i>Afstand L3</i>
11 meter	UPE240	1,610 m	7,779 m
15,4 meter	UPE330	2,255 m	10,891 m

tabel 19 Berekende profilering tafelopbouw bij optimalisatie moment

De gordingen voldoen bij optimalisatie op moment ruim op sterkte (unity check = 0,50). De verplaatsing is maatgevend bij bepaling van het minimale profiel. Om deze reden worden de gordingen ook geoptimaliseerd op verplaatsing.

6.3.2 Optimalisatie op doorbuiging

Bij de berekening van de gordingen bij de optimalisatie op moment is gebleken dat de stijfheid (verplaatsing) maatgevend is boven de sterkte. Naast optimaliseren op moment kan de ligger ook geoptimaliseerd worden op doorbuiging. Hierbij dient u_m gelijk te zijn aan u_p (figuur 59). Dit betekent dat de plaats van het scharnier (L2) variabel wordt. Hierdoor verandert ook afstand L3. De spantafstand wordt regelmatig gehouden; oftewel $L1 = 2 \cdot L2 + L3$.



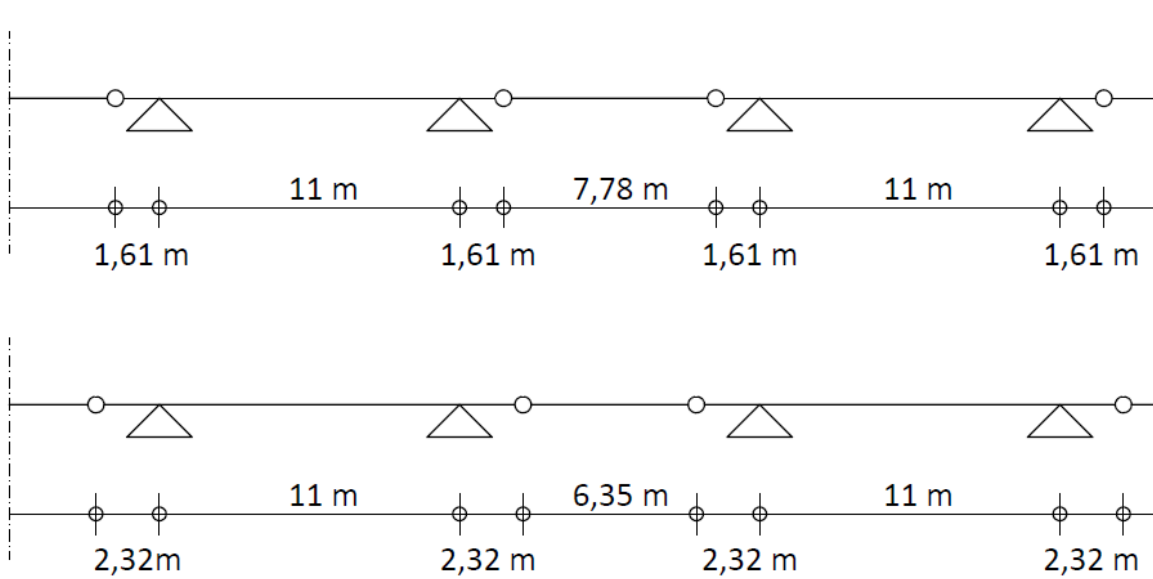
figuur 59 Doorbuigingslijn gerberligger tafelopbouw

De bepaling van de plaats van het scharnier en de lengte van de tussengording en de berekening van de gordingen van de tafelopbouw geoptimaliseerd op doorbuiging zijn opgenomen in bijlage P. De uitkomsten van de berekening zijn weergegeven in tabel 20.

<i>h.o.h. afstand spanten</i>	<i>Berekende profilering</i>	<i>Afstand L2</i>	<i>Afstand L3</i>
11 meter	UPE220	2,325 m	6,350 m
15,4 meter	UPE300	3,254 m	8,892 m

tabel 20 Berekende profilering tafelopbouw bij optimalisatie doorbuiging

Door de gordingen te optimaliseren op doorbuiging kan er met een kleinere profilering worden volstaan als bij de optimalisatie op moment. Voor een spantafstand van 11 meter zijn de verschillen tussen de optimalisatie op moment en doorbuiging voor de afstanden weergegeven in figuur 60.



figuur 60 Verschillen afstanden optimalisatie moment of doorbuiging

6.4 Keuze spantopbouw

Het voordeel van de tafelopbouw ten opzichte van de standaard opbouw is het uitvoeringsaspect. De 'tafel' is een stabiel element wat als gevolg heeft dat er tijdens de uitvoering geen extra stabiliteitsvoorzieningen benodigd zijn. De tafels worden naast de snelweg opgebouwd en met behulp van een kraan in zijn geheel over de snelweg geplaatst. Vervolgens kunnen de tafels worden doorgekoppeld met behulp van de tussengordingen.

Bij de standaard opbouw worden de spanten los van elkaar geplaatst en zullen tijdelijk moeten worden geschoord. Zodra één spant met stabiliteitsverband staat, kunnen de andere spanten echter vrij snel worden doorgekoppeld met behulp van enkele gordingen.

De berekende profilering voor de verschillende varianten wordt weergegeven in tabel 21. Hieruit kan worden afgelezen dat de standaard opbouw en de tafelopbouw geoptimaliseerd op doorbuiging op basis van profilering de voorkeur hebben.

h.o.h. afstand spanten	Standaard	Tafel (moment)	Tafel (doorbuiging)
11 meter	UPE220	UPE240	UPE220
15,4 meter	UPE300	UPE330	UPE300

tabel 21 Overzicht berekende profilering voor varianten spantopbouw

Een ander voordeel van de tafelopbouw zijn de te maken verbindingen. Bij de standaard opbouw zijn alle verbindingen momentvast. Bij de tafelopbouw zijn het scharnierende verbindingen en deze zijn gemakkelijker en dus sneller te maken.

Op basis van het uitvoeringsaspect en de te maken verbindingen heeft de tafelopbouw (geoptimaliseerd op doorbuiging) de voorkeur.

Er is echter een aspect nog niet bekeken en dat is de uitzetting ten gevolge van temperatuurspanningen. Oftewel; hoe gaat de overkapping gedilateerd worden? Dit aspect wordt in het volgende hoofdstuk besproken. Er wordt bekeken hoe de overkapping het beste gedilateerd kan worden en wat voor invloed dit heeft op de spantopbouw. Aan het eind van het volgende hoofdstuk wordt dan ook de definitieve keuze gemaakt voor de spantopbouw.

6.5 Keuze spantafstand

De keuze voor de spantafstand gebeurt op basis van profilering. De voorlopige keuze voor de spantafstand is 11 meter. Bij de variantenstudie dilataties wordt bekeken of deze waarde gehandhaafd kan blijven.

7. Variantenstudie temperatuurspanningen en dilataties

De Duurzame Weg bevindt zich in de buitenlucht en zal onderhevig zijn aan temperatuurschommelingen. Onder invloed van temperatuurverhoging zetten materialen uit. Wanneer de temperatuurbewegingen te groot worden, kunnen er scheuren in het materiaal ontstaan. Een lengteverandering van enkele millimeters kan worden opgevangen, al dan niet met behulp van speciale voorzieningen. Om de lengteverandering binnen beperking te houden, dient de constructie te worden opgedeeld in delen, oftewel de constructie dient gedilateerd te worden.

Er bestaan in Nederland geen specifieke richtlijnen voor maximale constructieafmetingen voor dilataties. De reden is dat dit onderdeel van een constructief ontwerp in principe wordt afgeschermd door de regelgeving op het gebied van de bruikbaarheidsgrenstoestand. Het type constructie en de aanvaardbaarheid van een bepaalde scheefstand bepalen verder de toelaatbare afmetingen van een gebouw met een staalconstructie.

In dit hoofdstuk wordt eerst bepaald hoe groot de temperatuuruitzettingen zijn om vervolgens te bepalen hoe de constructie gedilateerd gaat worden.

7.1 Temperatuuruitzettingen

De mate van uitzetten van een constructie is voor ieder materiaal anders. De grootte waarmee dit wordt aangegeven is de lineaire uitzettingscoëfficiënt α . Deze geeft aan hoeveel meter een staaf van het betreffende materiaal per lengte van één meter uitzet bij een temperatuurverhoging van één graad, tabel 22.

Materiaal	Lineaire uitzettingscoëfficiënt α (m/m · K)
Baksteen	$5 \cdot 10^{-6}$
Beton	$10 \cdot 10^{-6}$
Staal	$12 \cdot 10^{-6}$
Aluminium	$23 \cdot 10^{-6}$

tabel 22 Uitzetting van diverse materialen (Bron: NEN 6702)

De lengteverandering ΔL van een constructie kan berekend worden met de volgende formule:

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L$$

Hierin is:

α de lineaire uitzettingscoëfficiënt in m/m·K. Voor staal bedraagt α $12 \cdot 10^{-6}$ m/m · K.

ΔT het temperatuurverschil over de beschouwde constructie (tabel 23)

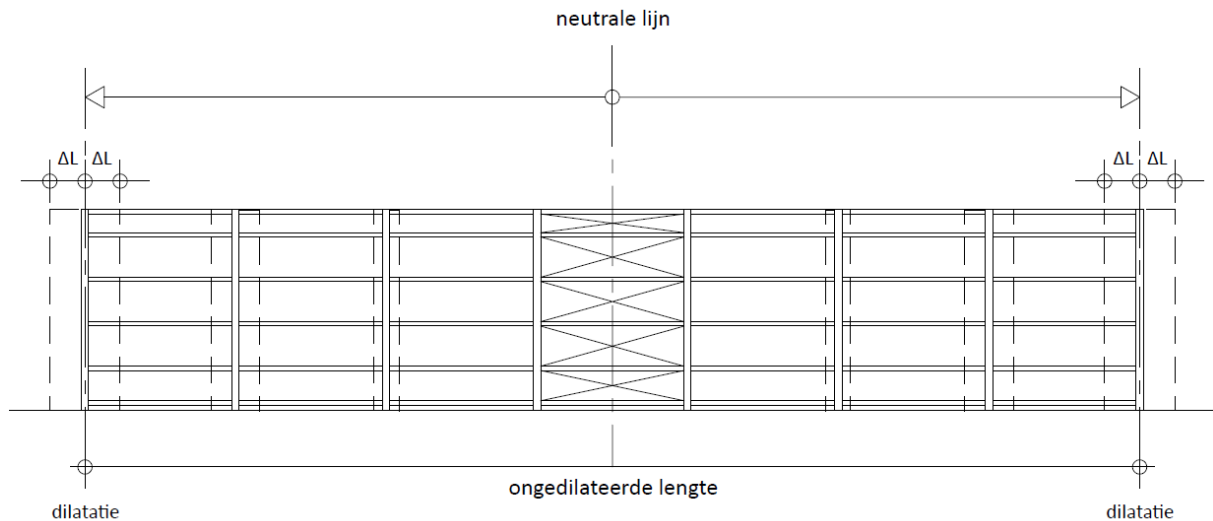
L de lengte van de beschouwde constructie

Situatie	Temperatuur	
	Momentsaan °C	Extreem °C
Zomer – buiten		
Niet directe zonbestraling	17	30
Directe zonbestraling		
- zeer lichte kleur ^a	17	50
- lichte kleur ^b	17	60
- donkere kleur ^c	17	75
Zomer – binnen	17	25
Winter – buiten	4	-25
Winter – binnen	17	20
Constructies in de grond	10	10
^a Wit, lichtgrijs, geel, crème. ^b Oker, beige, grijs, groen, lichtblauw. ^c Zwart, blauw, bruin, rood.		

tabel 23 Temperatuur (Bron: NEN 6702)

Voor het temperatuurverschil wordt voor de wintersituatie -25 °C aangehouden en voor de zomersituatie +60 °C (lichte kleur). Het totale temperatuurverschil komt neer op 85 °C. Uitgaande van een temperatuur van 20°C bij montage komt die neer op +/- 45°C.

De constructie wordt ten behoeve van de dilataties opgedeeld in een aantal elementen. Voor ieder element dient de stabiliteit in langsricting apart te worden verzorgd. Het stabiliteitselement is het vaste punt in het element (de neutrale lijn); van hieruit vindt de lengteverandering plaats. Een en ander is verduidelijkt in figuur 61. ΔL is in deze figuur de verlenging / verkorting aan het eind van een element.



figuur 61 Lengteverandering van een element ten gevolge van temperatuurspanningen

De verplaatsing die ter plaatse van de dilatatie moet worden opgenomen is echter het dubbele van de verplaatsing van één element. Dit komt doordat de elementen achter elkaar zijn geplaatst.

Voor verschillende lengtes (veelvoud van spantafstand 11 m) kan de lengteverandering worden berekend (tabel 24).

Ongedilateerde lengte [m]	Lengteverandering ΔL [mm]	Totaal op te nemen door dilatatie ($2 \cdot \Delta L$) [mm]
11,0 m	2,97 mm	5,94 mm
22,0 m	5,94 mm	11,88 mm
33,0 m	8,91 mm	17,82 mm
44,0 m	11,88 mm	23,76 mm
55,0 m	14,85 mm	29,7 mm
66,0 m	17,82 mm	35,64 mm
77,0 m	20,79 mm	41,58 mm
88,0 m	23,76 mm	47,52 mm
99,0 m	26,73 mm	53,46 mm
...
4000 m (volledig ongedilateerd)	1080 mm	--

tabel 24 Lengteverandering bij verschillende dilatatielengtes – veelvoud 11 meter

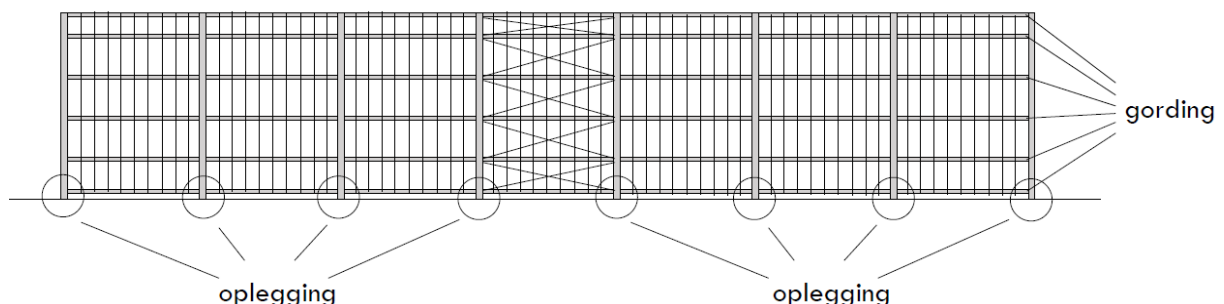
In principe zijn er twee mogelijkheden voor het dilateren van de constructie:

- dilateren per gording
- dilateren (van een gedeelte) van de constructie in zijn geheel

Indien er per gording gedilateerd gaat worden, kan er bijvoorbeeld gedacht worden aan het toepassen van slobgaten voor het verbinden van de gordingen aan de spanten. Een nadeel van het dilateren per gording is dat er een staal-op-staalverbinding ontstaat. Een staal-op-staalverbinding heeft een hoge wrijvingsweerstand en is daardoor een onderhoudsintensieve verbinding. Indien er slobgaten worden toegepast kan er tevens niet meer vanuit worden gegaan dat de spanten uit het vlak worden gesteund door de gordingen. De stabiliteit uit het vlak neemt hierdoor af.

Dilateren per gording heeft om bovenstaande redenen niet de voorkeur. In eerste instantie zal er naar een oplossing worden gezocht waarbij de overkapping om een bepaald aantal meter gedilateerd wordt.

De keuze van de afstand waarop de overkapping gedilateerd gaat worden, hangt voornamelijk af van de mate van lengteverandering. De lengteverandering moet kunnen worden opgenomen door de dilatatie. Dit geldt voor zowel de oplegging als de gordingen met de glasaansluiting (figuur 62). De keuze voor de te dilateren lengte wordt later in dit hoofdstuk gemaakt.



figuur 62 Overzicht onderdelen dilatatie

Dit hoofdstuk bestaat uit een uiteenzetting van de mogelijkheden voor het dilateren van de constructie ter plaatse van de oplegging en ter plaatse van de gordingaansluiting. Aansluitend volgen de mogelijkheden voor een totaal dilatatiesysteem met uiteindelijk een keuze.

7.2 Mogelijkheden ter plaatse van oplegging

Een oplegging van een bouwconstructie maakt onder bepaalde voorwaarden en tot bepaalde limieten het volgende mogelijk:

- De overbrenging van de lasten enerzijds;
- De vrijheid van verplaatsen en roteren anderzijds waarbij de stabiliteit van het geheel wordt gegarandeerd.

Aandachtspunten voor de dilatatie ter plaatse van de oplegging en de onderste gording:

- De overkapping is onderhevig aan zowel neerwaartse als opwaartse belasting. Ook dienen eventuele spatkrachten opgevangen te worden.
- De oplegging dient zo min mogelijk slijtage te ondervinden en zo min mogelijk onderhoud.
- De eerste gording bevindt zich vlak boven de grond en zet uit. De grond zet echter niet uit.
- De hoogte van de oplegging moet bepaald worden, ook aan de hand van de afbouw. Denk hierbij aan bijvoorbeeld rubberen slabben.
- Het toe te passen materiaal moet geluidsdicht zijn en CO₂ en stikstof tegenhouden zodat er geen lek in de overkapping ontstaat.

Voor de opleggingen zijn er een aantal mogelijkheden waar een keuze uit gemaakt zal worden:

- Glijdende oplegging
- Oplegging die elastisch vervormt
- Pendelstaaf als oplegging
- Rubber oplegging

Van al deze opleggingen zullen in deze paragraaf de voor- en nadelen bekeken worden waar uiteindelijk een (voorlopige) keuze uit volgt.

7.2.1 Glijdende oplegging

7.2.1.1 Railconstructie

Een referentieproject waarbij de constructie ook onderhevig is aan temperatuurspanningen is de halte- en sporenoverkapping Hemboog in Amsterdam-Sloterdijk (figuur 63).



figuur 63 Project Hemboog Amsterdam-Sloterdijk (Bron: VHB-Hollandia)

De dilatatie ter plaatse van de opleggingen is gerealiseerd door de spanten te laten schuiven / glijden over een rail (buisprofiel) (figuur 64 en figuur 65).



figuur 64 Glijdende oplegging over rail onderaanzicht
(Bron: Movares)



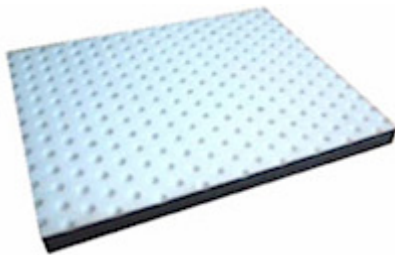
figuur 65 Glijdende oplegging over rail zij aanzicht
(Bron: Movares)

Een nadeel van deze oplossing is dat de ontstane staal-op-staalverbindingen onderhoudsintensief zijn. De railconstructie is tevens een extra constructie die gemaakt dient te worden wat extra tijd kost en extra kosten met zich mee brengt.

7.2.1.2 Teflon

Glij-opleggingen kunnen ook worden gecreëerd door twee platen over elkaar heen te laten schuiven (glijden). Meestal wordt hiervoor het materiaal teflon gebruikt. Dit materiaal heeft namelijk de eigenschap om onder een hoge druk een lage wrijvingscoëfficiënt te hebben. Deze oplegging is dus erg geschikt voor een constructie met een (grote) neerwaartse belasting.

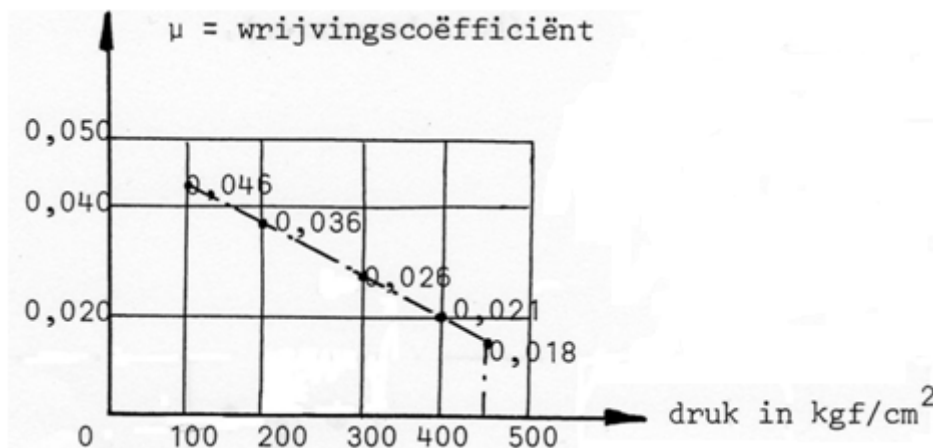
Voor het creëren van een glij-oplegging wordt een teflonplaat enige millimeters in de grondplaat gelaten en vastgelijmd. De glijplaat brengt de druk over op de teflonlaag. Deze glijplaat moet verchromd en gepolijst zijn (figuur 66).



figuur 66 Voorbeeld van glij-oplegging (Bron: KonstruKom)

De voordelen van teflon zijn:

- Temperatuurbestendig
- Vertoont geen slijtage
- Heeft bij hoge drukken een lage wrijvingscoëfficiënt (figuur 67)
- Binnendringen van vuil wordt verhinderd door een afdichting
- Geringe constructiehoogte (bij grote neerwaartse belasting)

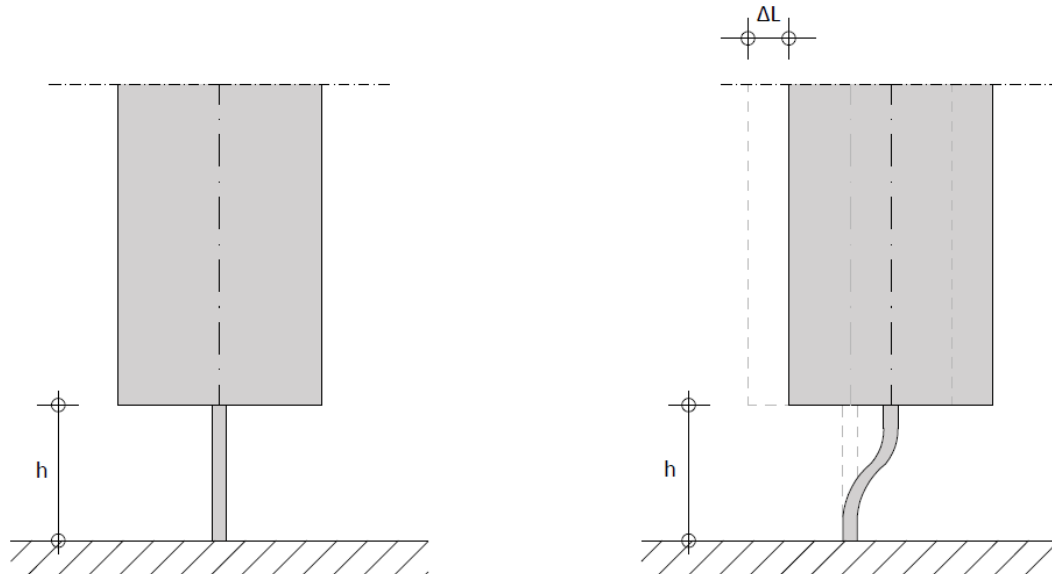


figuur 67 Grafiek relatie tussen druk en wrijvingscoëfficiënt bij teflon glijlagen ($1 \text{ kgf/cm}^2 \approx 98,07 \text{ kN/m}^2$) (Bron: Dictaat Brugopleggingen Technische Hogeschool Delft)

De glij-oplegging functioneert goed bij een (grote) neerwaartse belasting. Bij een opwaartse belasting heeft het gebruikte materiaal teflon juist een hoge wrijvingscoëfficiënt. Dit maakt een glij-oplegging geen goed alternatief voor een oplegging die ook onderhevig is aan opwaartse belasting.

7.2.2 Oplegging die elastisch vervormt

Een andere oplossing ter plaatse van de oplegging is een stalen plaat die elastisch kan vervormen (figuur 68). Dit kan bijvoorbeeld gerealiseerd worden door het lijf van de spanten door te zetten.



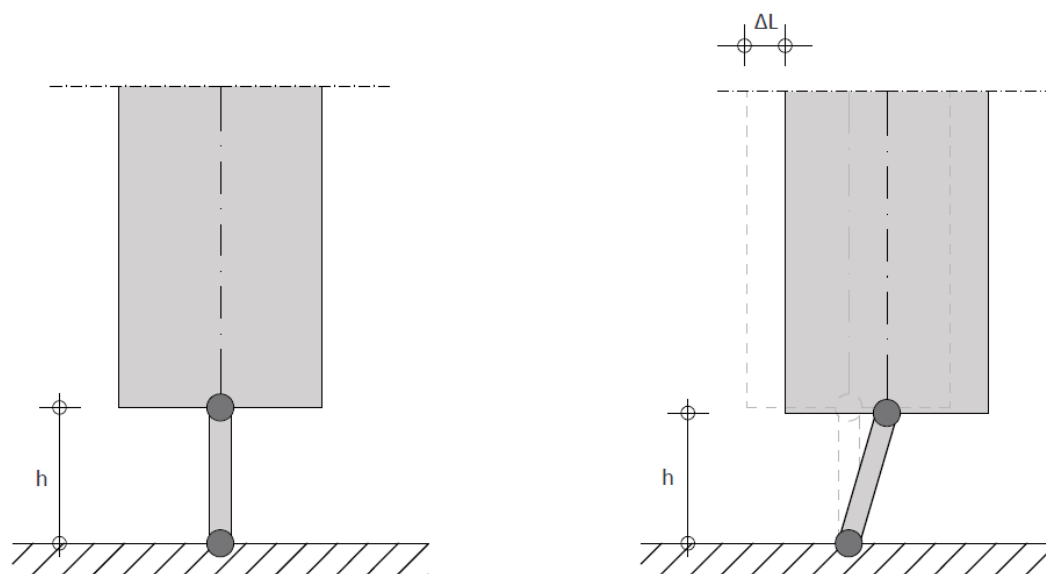
figuur 68 Oplegging met stalen plaat die elastisch vervormt

De stalen plaat wordt aan de onderzijde ingeklemd. Het spant kan nu zijdelings bewegen doordat de stalen plaat elastisch kan vervormen. Hierbij is van belang dat de optredende spanning in het staal kleiner of gelijk is aan de vloeispanning van het staal; $\sigma \leq f_{y,d}$.

Het voordeel van deze oplossing is dat het een vrij eenvoudig alternatief is en dat de oplegging geen extra onderhoud vereist.

7.2.3 Pendelstaaf als oplegging

Een pendelstaaf als oplegging kan bijvoorbeeld gerealiseerd worden door een koker pendelend te bevestigen aan zowel het spant als de onderzijde (figuur 69). De pendelstaaf wordt enkel belast op normaalkracht.



figuur 69 Oplegging met pendelstaaf

Een nadeel van deze oplossing is dat de verbindingen staal-op-staalverbindingen zijn. Deze zijn erg onderhoudsintensief, ook door de eventuele aanwezigheid van vocht in de verbinding.

7.2.4 Rubber oplegging

Rubber opleggingen worden gevormd door een blok natuurrubber met eventueel daarin verwerkt een of meerdere stalen platen, eventueel omgeven met een dunne laag neopreen.

Bij rubber opleggingen wordt gebruik gemaakt van de elastische en plastische vervormbaarheid van rubber voor het opnemen van horizontale verschuivingen en draaiing. Een rubberblok van een bepaalde dikte zal onder een verticale belasting een vrij grote indrukking ondergaan. Om deze indrukking te verkleinen wordt het rubberblok voorzien van één of meer dunne stalen platen. Hierdoor wordt de verticale indrukking beperkt.

Een globale maat voor de dikte van een rubber oplegging is $d = 1/1000 \cdot \text{de overspanning}$. De breedte b van de oplegging (in de richting van de overspanning) dient bij voorkeur $\geq 5d$ te zijn en voor de lengte l (loodrecht op de overspanning) wordt meestal de profielbreedte aangehouden.

Een aantal voordelen van rubber opleggingen:

- De zeer geringe constructiehoogte
- Het geringe eigen gewicht ten opzichte van andere opleggingen
- Lage kosten
- Vrijwel onderhoudsvrij
- Zeer eenvoudige verankering

Bij de dimensionering moet rekening worden gehouden met:

- De zijdelingse verplaatsingen ten gevolge van temperatuur, krimp, kruip, buiging en eventueel zetting
- De maximale en minimale oplegreactie
- De maximale rotatie
- De horizontale belasting

Bij rubber opleggingen kan er onderscheid gemaakt worden tussen ongewapende en gewapende elastomeeropleggingen.

7.2.4.1 Ongewapende elastomeeropleggingen

Ongewapende elastomeeropleggingen worden vooral gebruikt in de utiliteitsbouw als oplegging bij hoofdzakelijk in ruststand belaste bouwonderdelen. Bij niet hoofdzakelijk in ruststand belaste bouwonderdelen zijn gewapende elastomeer opleggingen noodzakelijk.

Ongewapende elastomeeropleggingen worden als elastische oplegging gebruikt en vangen verplaatsingen op en voorkomen oncontroleerbare spanningsconcentraties. De ongewapende elastomeeropleggingen bestaan standaard uit een hoogwaardig polychloropreen (CR of neopreen).

De maximale werkspanning bedraagt 5 N/mm^2 en de minimale dikte bedraagt 5 mm .

Voordelen van ongewapende elastomeeropleggingen:

- Eenvoudige plaatsing van de opleggingen
- Minimale inbouwhoogte
- Licht gewicht

- Onderhoudsvrij
- Weerbestendig

Bij grote horizontale verplaatsingen is het noodzakelijk om gewapende opleggingen toe te passen.

7.2.4.2 Gewapende elastomeeropleggingen

Gewapende elastomeeropleggingen zijn samengesteld uit een kern van neopreen of natuurrubber, die gevulkaniseerd is aan staalplaten (figuur 70). Het grootste verschil tussen neopreen en natuurrubber ligt voornamelijk in de koudebestendigheid. Bij neopreen neemt de glijdingsmodulus bij lage temperaturen sterker toe dan bij natuurrubber.

Gewapende elastomeeropleggingen worden toegepast bij constructies in beton of in staal, zowel in de utiliteitsbouw (onder andere balken, TT platen), als in de civiele bouw (o.a. brugliggers, ter plaatse gestorte brugdekken).



figuur 70 Staalgewapende elastomeer oplegging (Bron: KonstruKom)

Het verkregen blok kan nog omhuld worden met een buitenlaag van neopreen:

- Gedeeltelijke omhulde opleggingen

Deze worden enkel toegepast in de utiliteitsbouw. De opleggingen worden op maat gesneden uit moederplaten. De snijkanten worden beschermd met een roestwerende neopreenverf. De opleggingen bestaan uit staalplaten 2 mm dik en eenheidslagen neopreen van 8 mm of 12 mm dik. De buitenste lagen zijn van neopreen, waarvan de dikte gelijk is aan de halve dikte van een eenheidslaag (4 mm of 6 mm).

- Geheel omhulde opleggingen

Deze worden toegepast in de utiliteitsbouw en in de civiele bouw. De opleggingen worden in matrijzen met bepaalde standaardafmetingen gemaakt. De opleggingen bestaan uit:

- staalplaten 2 mm of 3 mm dik
- eenheidslagen van neopreen of natuurrubber 8 mm of 12 mm dik
- omhulling van neopreen 3 mm of 2,5 mm dik

Voordelen van gewapende elastomeeropleggingen zijn:

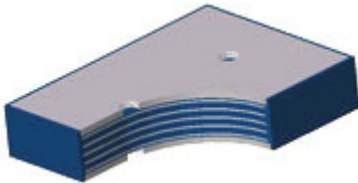
- Grote capaciteit om krachten en vervormingen op te nemen
- Groot toepassingsgebied
- Aantrekkelijke prijs
- Weersbestendig

- Onderhoudsvrij
- Duurzaam

Gewapende elastomeeropleggingen kunnen ook in speciale uitvoeringen worden toegepast:

- Verankerde opleggingen

Wanneer de verticale belasting relatief laag is (drukspanningen $< 2 \text{ N/mm}^2$), moet de oplegging tegen verschuiven worden verankerd. Aan de onder- en bovenzijde van de elastomeeroplegging zijn dikke staalplaten gevulkaniseerd (figuur 71).



figuur 71 Verankerde oplegging (Bron: Konstrukom)

- Begrensde opleggingen

Voor de gevallen waar de horizontale verplaatsing in één of twee richtingen beperkt wordt, moet de oplegging begrensd worden. Deze begrenzing gebeurt door middel van stootnokken, gelast op de boven en onderplaten. Hierdoor ontstaan eenzijdig beweegbare of geblokkeerde opleggingen (figuur 72).



figuur 72 Eenzijdig beweegbare oplegging (Bron: Konstrukom)

- Vaste opleggingen met deugel

Door het toepassen van een oplegsysteem met deugel worden zowel de horizontale als de verticale krachten overgedragen op de onderbouw en wordt een grote rotatie toegestaan.

7.2.5 Keuze

De twee belangrijkste criteria voor de keuze van de dilatatie ter plaatse van de oplegging zijn de opwaartse belasting en het onderhoud. Vanwege de opwaartse belasting is een glijdende oplegging geen optie (zowel de railconstructie als de oplegging met teflon). De glijdende oplegging functioneert namelijk niet goed bij opwaartse belasting. Een pendelstaaf als oplegging valt af aangezien dit een onderhoudsintensieve verbinding is; een staal-op-staalverbinding met eventueel aanwezig vocht.

De opties die overblijven zijn de stalen plaat als oplegging die elastisch vervormt en de rubber oplegging. In paragraaf 7.4 wordt bekeken wat dit betekent voor het totale dilatatiesysteem en wat de mogelijkheden zijn met de staalplaat die elastisch vervormt en de rubber oplegging.

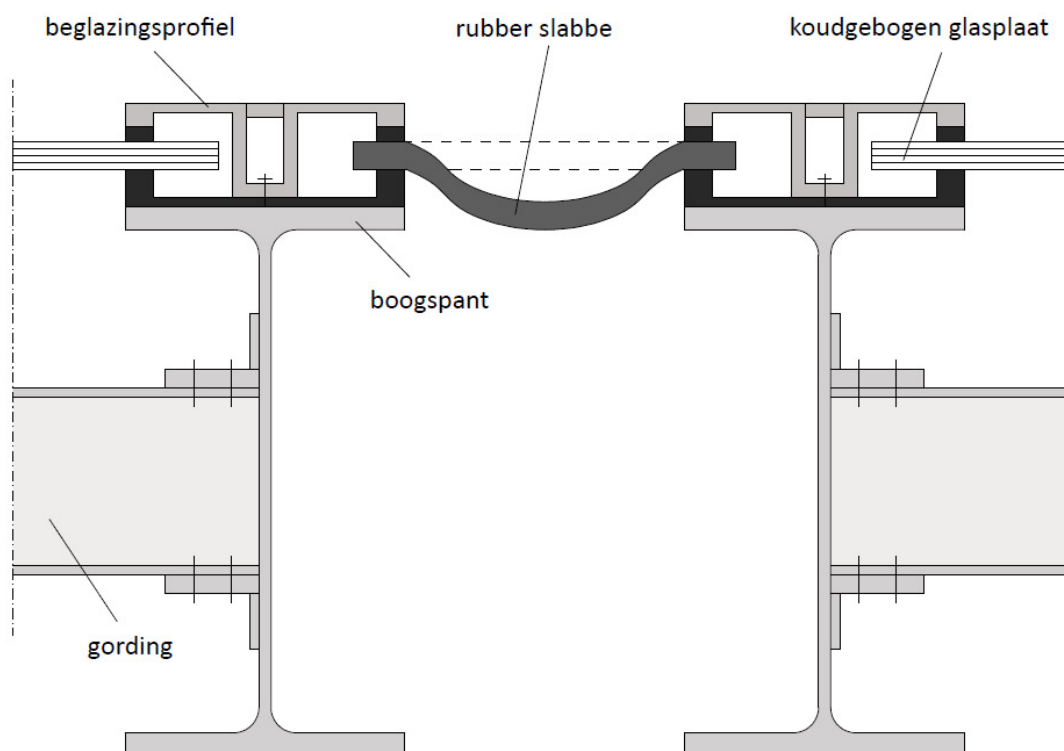
7.3 Mogelijkheden ter plaatse van gording- en glasaansluiting

De belangrijkste uitgangspunten van de dilatatie ter plaatse van de gording- en glasaansluiting zijn dat de oplossing de optredende verplaatsing op kan nemen en dat de oplossing lucht- en waterdicht is. In deze paragraaf worden de verschillende mogelijkheden besproken voor zowel de gording- als glasaansluiting.

7.3.1 Dubbel spant

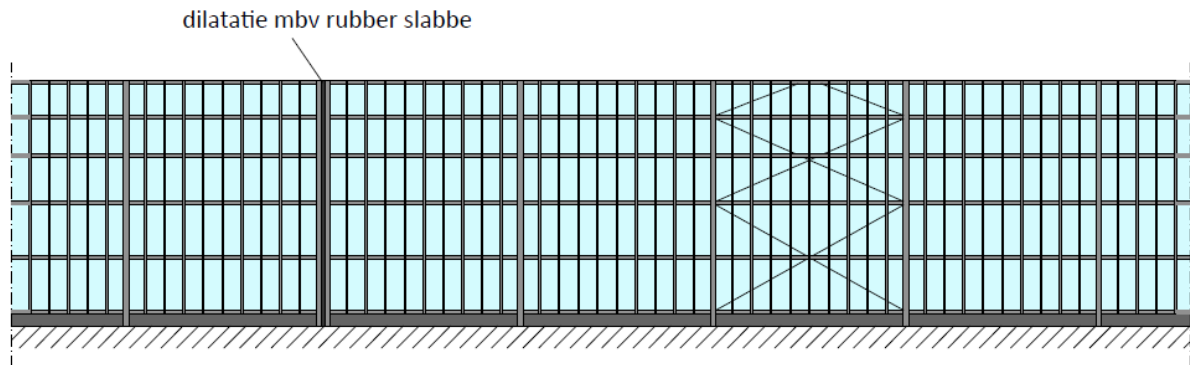
De meest voor de hand liggende oplossing voor de dilatatie ter plaatse van de gording- en glasaansluiting is de constructie op te knippen in delen. Deze oplossing heeft een dubbel spant tot gevolg. De gordingen blijven momentvast verbonden aan de spanten. De spanten nemen de verplaatsing op doordat ze ter plaatse van de oplegging zo zijn verbonden dat het opnemen van verplaatsing mogelijk wordt gemaakt.

De verschillende delen dienen wel met elkaar te worden verbonden. De makkelijkste oplossing is het toepassen van een rubber slabbe (figuur 73).



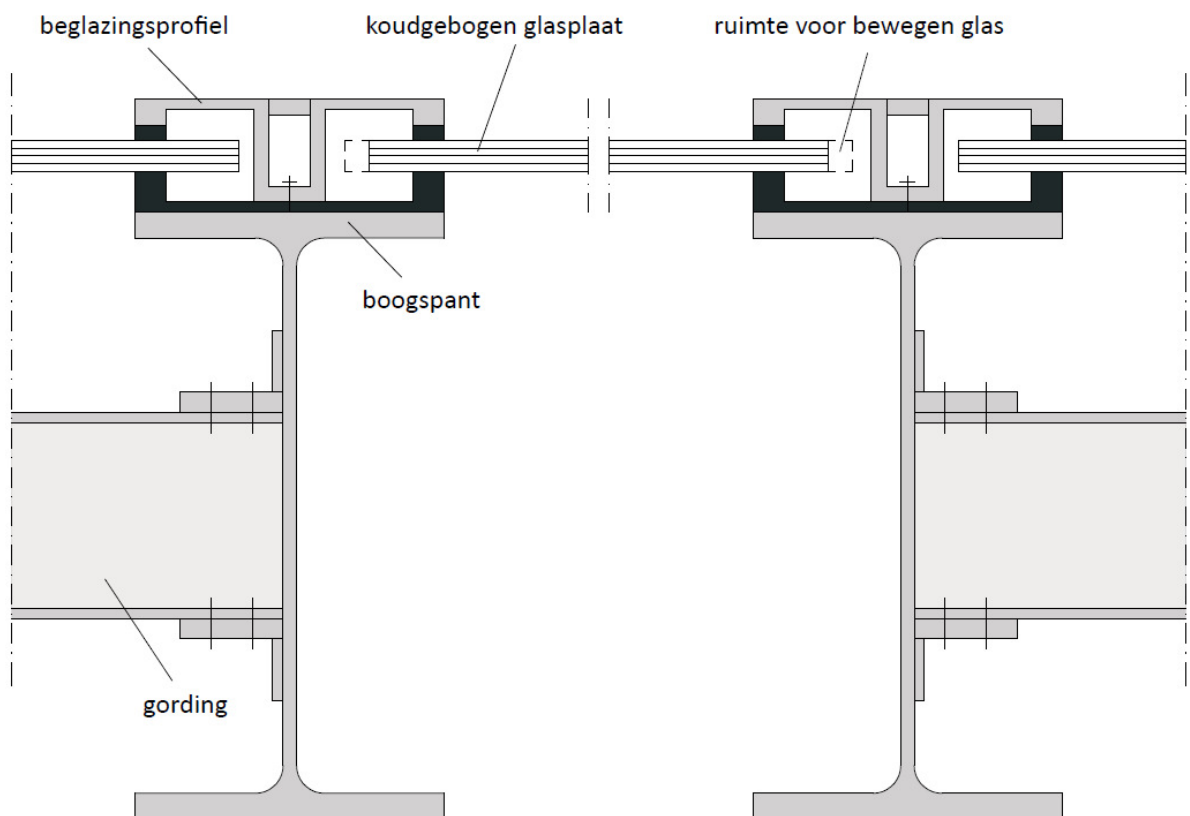
figuur 73 Dilatatie met behulp van rubber slabbe

De oplossing met de rubber slabbe is echter geen fraaie oplossing. De doorlopende beglazing wordt op deze manier namelijk om een bepaald aantal meter onderbroken (figuur 74).

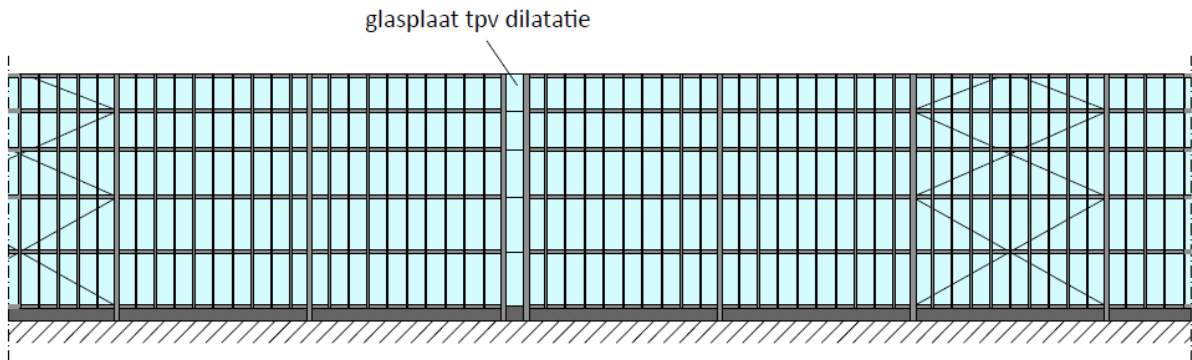


figuur 74 Aanzicht overkapping met rubber slabbe tpv dilatatie

Een andere mogelijkheid is om de dubbele spanten op een afstand van 1,1 meter van elkaar af te plaatsen; de breedte van een glasplaat. Op deze manier wordt de beglazing niet onderbroken (figuur 75 en figuur 76). De glasplaat tussen het dubbele spant moet wel voldoende oplegbreedte hebben om de verplaatsing op te kunnen nemen. De dilatatielengte is dus afhankelijk van de oplegbreedte van de glasplaat.

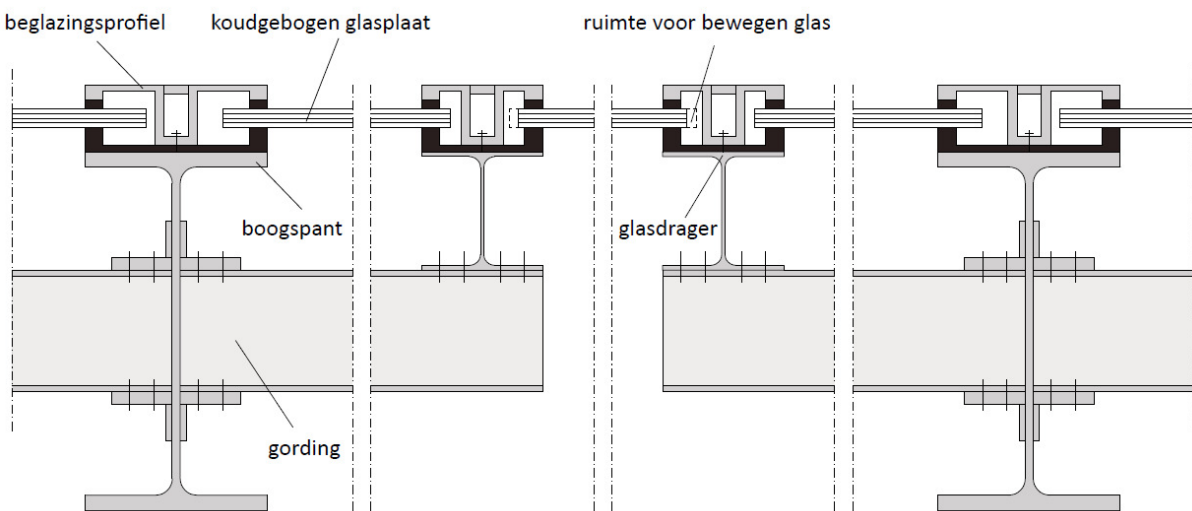


figuur 75 Dilatatie mbv glasplaat

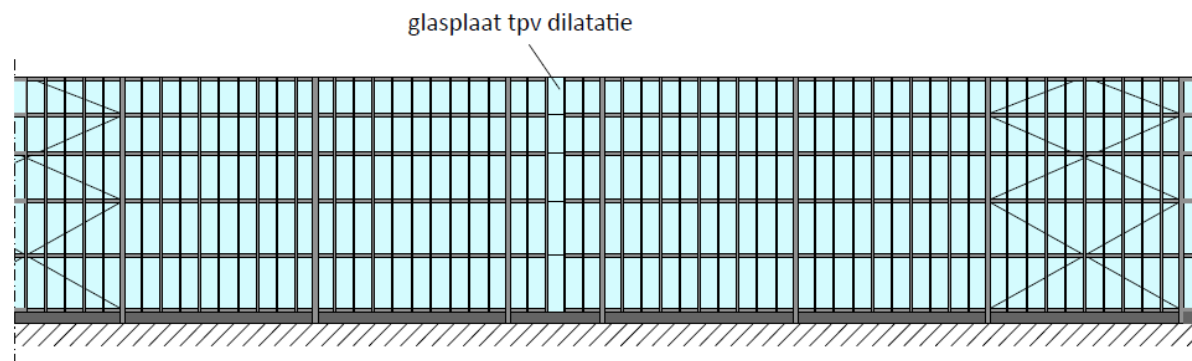


figuur 76 Aanzicht overkapping met glasplaat tpv dilatatie

Naast de oplossing die gegeven is in figuur 75 en figuur 76 is er nog een andere oplossing mogelijk. Ter plaatse van het dubbele spant kan de gording door worden gestoken, zodat de afstand tussen de twee bogen van het dubbele spant wordt vergroot (figuur 77 en figuur 78).



figuur 77 Dilatatie mbv glasplaat (tafelopbouw)

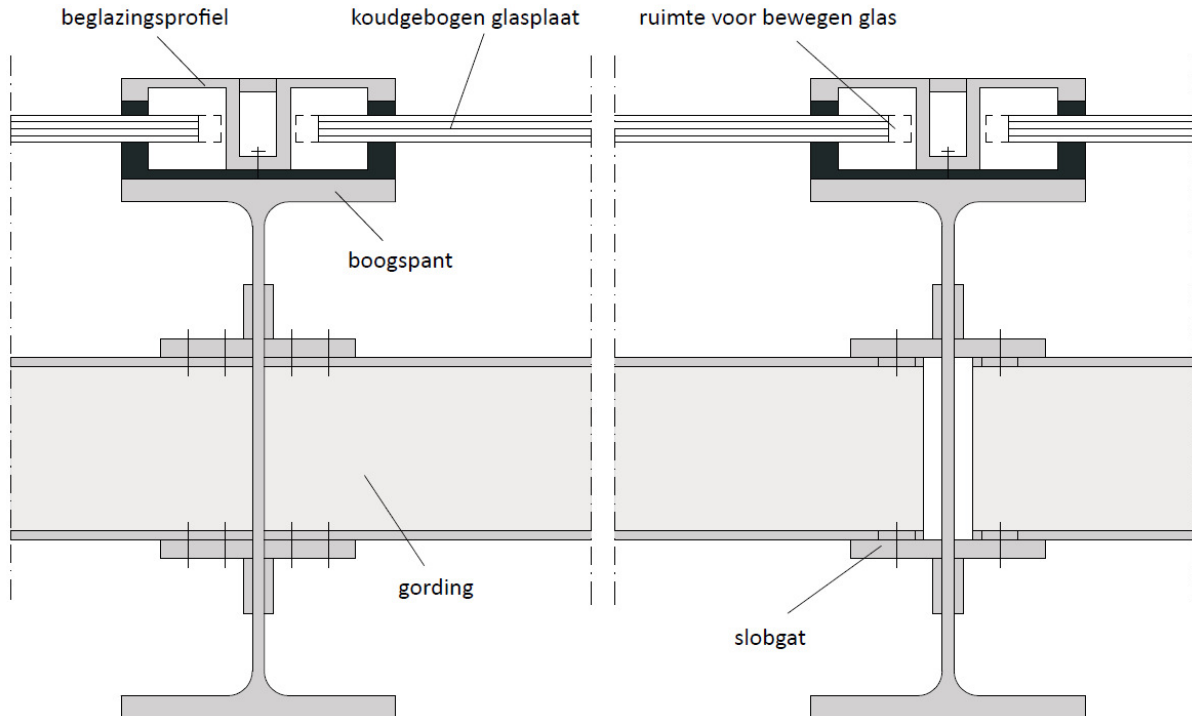


figuur 78 Aanzicht overkapping met glasplaat tpv dilatatie tafelopbouw

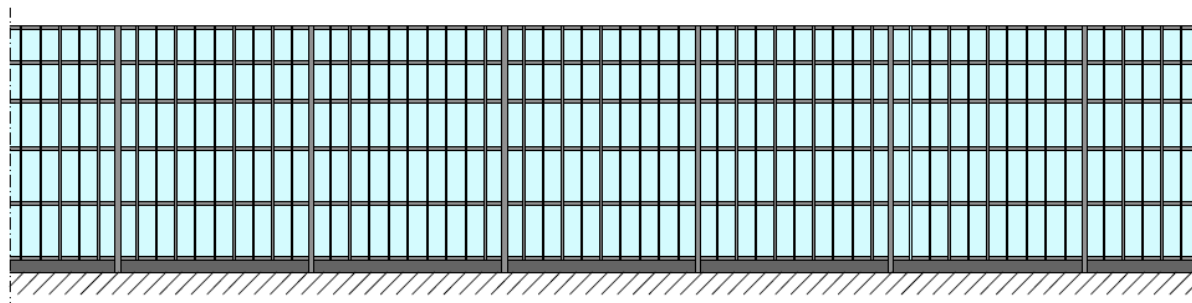
Een aandachtspunt bij deze variant is de oplegbreedte van de glasplaat ter plaatse van de dilatatie. De glasplaat die moet kunnen bewegen is nu niet bevestigd ter plekke van een boogspant, maar van een glasdrager en heeft dus minder ruimte om te kunnen bewegen. Dit heeft tot gevolg dat de dilatatielengte afhankelijk is van de mate waarin het glas kan bewegen. Ter plaatse van een glasdrager heeft het glas minder ruimte dan ter plaatse van een boogspant.

7.3.2 Glijverbinding

Een andere mogelijkheid om een doorlopende beglazing (oftewel een onzichtbare dilatatie) te creëren, is het toepassen van een glijverbinding ter plaatse van de aansluiting van de gording op het boogspant (figuur 79). Door het toepassen van slobgaten kan de gording ter plaatse van de dilatatie de optredende verplaatsingen opnemen.



figuur 79 Dilatatie met behulp van glijverbinding



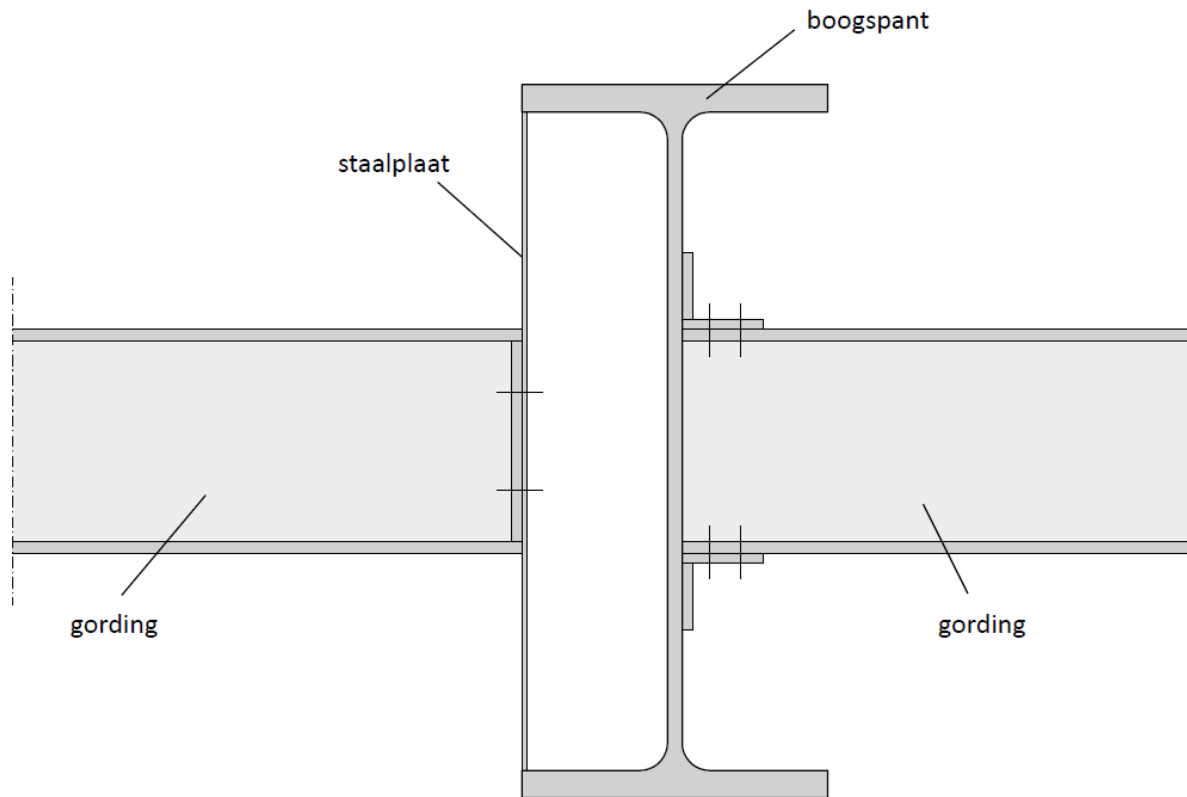
figuur 80 Aanzicht overkapping doorlopende beglazing

Een aandachtspunt van deze variant is dat het spant ter plaatse van de dilatatie, waarbij de gordingen glijdend zijn verbonden aan het spant, niet meer uit het vlak gesteund wordt door de gordingen. Het spant moet zichzelf nu voorzien in de stabiliteit en zal bij de oplegging moeten worden ingeklemd.

Een nadeel van het toepassen van slobgaten is dat er een staal-op-staalverbinding ontstaat. Zoals al eerder toegelicht heeft een staal-op-staalverbinding een hoge wrijvingsweerstand en is daardoor een onderhoudsintensieve verbinding. Tevens wordt het spant bij het toepassen van slobgaten niet meer uit het vlak gesteund door de gordingen en neemt de stabiliteit van het spant af. Het toepassen van slobgaten is dus geen optimale oplossing.

7.3.3 Staalplaat die elastisch kan vervormen

Een oplossing zodat de dilatatie vrijwel onzichtbaar is, is het toepassen van een soortgelijke dilatatie als ter plaatse van de oplegging; een stalen plaat die elastisch kan vervormen (figuur 81). De gording kan horizontaal verplaatsen doordat de staalplaat elastisch kan vervormen.



figuur 81 Schematische detaillering gordingaansluiting mbv staalplaat

Het grote voordeel van het toepassen van een stalen plaat die elastisch kan vervormen, is dat de dilatatie niet zichtbaar is en dat het spant uit het vlak door de stalen plaat blijft gesteund (de stabiliteit blijft gehandhaafd).

De hoogte van de staalplaat is bepalend voor de op te nemen vervorming; tot welke mate van vervorming kan de staalplaat elastisch vervormen? Voor een dilatatielengte van vijf velden met een spantafstand van 11 meter is bekeken of dit mogelijk zou zijn met stalen platen ter plaatse van de gordingaansluiting. Deze berekening is uitgewerkt in bijlage Q. Uit deze berekening blijkt dat het toepassen van een stalen plaat ter plaatse van de gordingaansluiting geen oplossing is voor meerdere velden. De spanningen worden te hoog en de staalplaat zal plastisch gaan vervormen.

De staalplaat ter plaatse van de gordingaansluiting kan nog wel een optie zijn wanneer er per gording wordt gedilateerd; de vervorming is dan namelijk vele malen kleiner.

7.3.4 Keuze

Voor de dilatatie ter plaatse van de gording – en glasaansluiting zijn drie mogelijkheden onderzocht; het dubbele spant (met rubber slabbe of glasplaat), de glijverbinding en de staalplaat die elastisch kan vervormen. De glijverbinding is geen optimale oplossing vanwege de het onderhoudsaspect door de staal-op-staal-verbinding.

De opties die overblijven zijn:

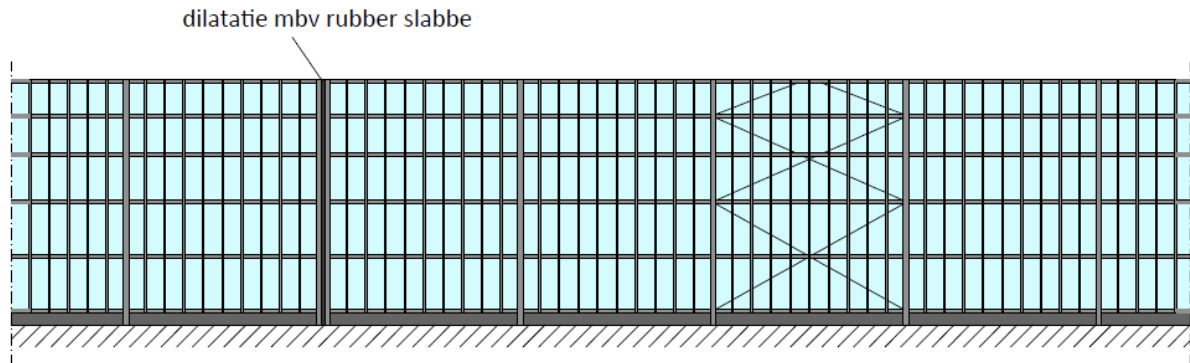
- Een dubbel spant met daartussen een rubber slabbe
- Een dubbel spant met daartussen een glasplaat
- Een dubbel spant met doorstekende gordingen en een glasplaat
- Een staalplaat die elastisch kan vervormen ter plaatse van de gordingaansluiting. Al eerder is gebleken dat deze oplossing enkel een mogelijkheid is wanneer er per gording gedilateerd gaat worden.

In paragraaf 7.4 wordt bekeken wat nu de opties zijn voor het totale dilatatiesysteem van de overkapping.

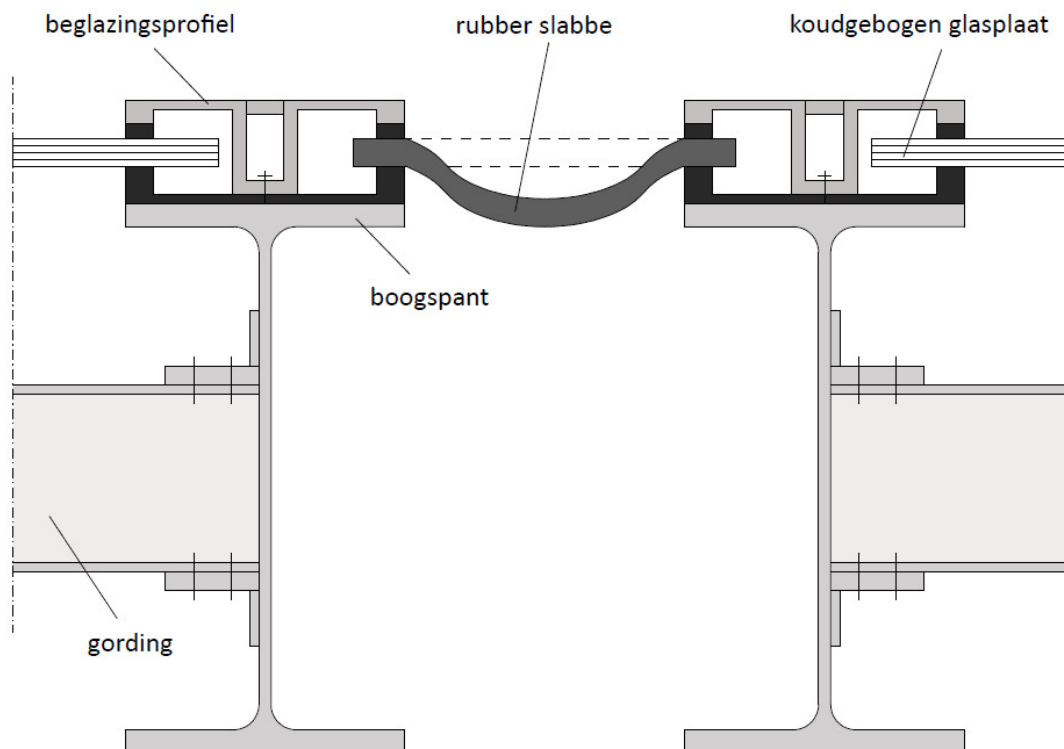
7.4 Varianten dilatatie overkapping totaal systeem

7.4.1 Variant 1 totaal systeem

Bij variant 1 (figuur 82) wordt de constructie opgeknipt in delen. Dit heeft een dubbel spant tot gevolg. Om de overkapping lucht- en waterdicht te houden wordt een rubber slabbe toegepast ter plaatse van de dilatatie (figuur 83). De spanten nemen bij deze variant de vervorming op en moeten kunnen verplaatsen.



figuur 82 Variant 1



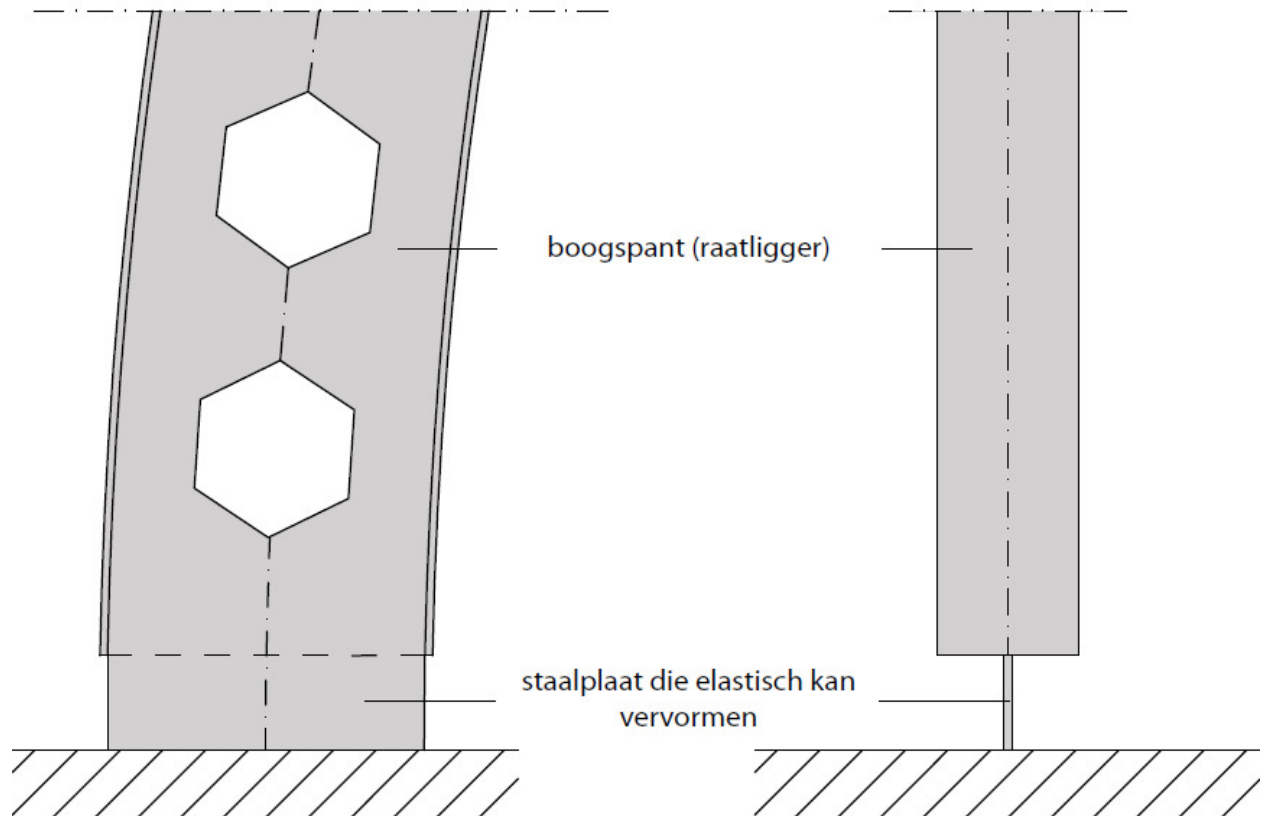
figuur 83 Rubber slabbe ter plaatse van dilatatie

Het voordeel van deze variant is dat de spanten ter plaatse van de oplegging scharnierend zijn verbonden. Nadelen zijn echter wel dat een rubber slabbe niet fraai is. Tevens zijn de gordingaansluitingen lastiger te realiseren (momentvaste verbindingen) en is er iedere vijf velden een stabiliteitsverband benodigd.

De mogelijkheden ter plaatse van de oplegging zijn een staalplaat die elastisch vervormt of een rubber oplegblok. Voor de staalplaat die elastisch vervormt geldt dat ter plaatse van de oplegging de reactiekracht vele malen groter is dan ter plaatse van de gordingaansluiting. Hierdoor ontstaat er een grotere normaalspanning en buigspanning. Uit bijlage K_blijkt dat de reactiekracht ter plaatse van

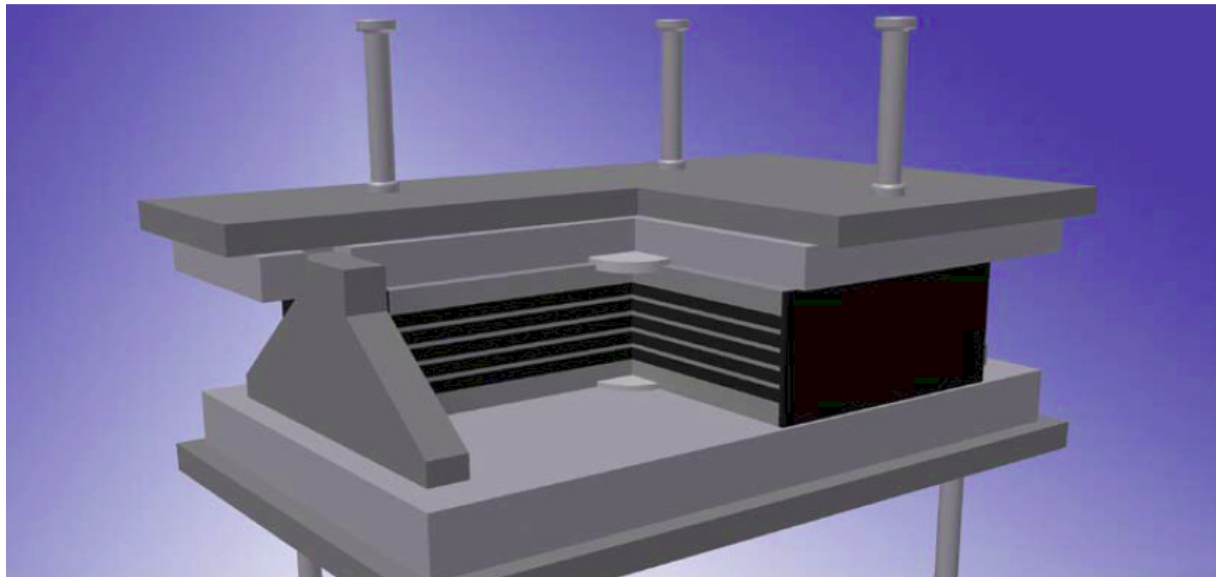
de oplegging 552 kN is. De dikte van de staalplaat wordt gelijk gehouden aan de dikte van het lijf van het boogspant (het lijf wordt doorgezet). In bijlage R is berekend welke minimale hoogte benodigd is voor de staalplaat ter plaatse van de oplegging. Dit komt neer op een minimale hoogte van 700 mm.

Door de grote benodigde lengte voor de staalplaat is het toepassen van een staalplaat ter plaatse van de oplegging geen goede oplossing (figuur 84).



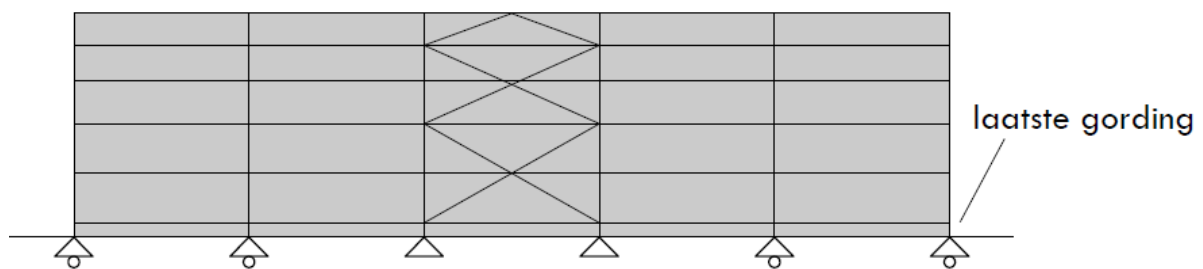
figuur 84 Staalplaat die elastisch kan vervormen ter plaatse van oplegging

Een staalplaat die elastisch kan vervormen is dus geen optie voor de oplegging. Een andere optie is een rubber oplegblok ter plaatse van de oplegging (figuur 85). Een en ander is overlegd met Vilton bv en hieruit kwam naar voren dat een rubber oplegblok een goede optie is. Het rubber oplegblok dient wel in dwarsrichting verankerd te worden, aangezien in dwarsrichting geen verplaatsing moet kunnen optreden.



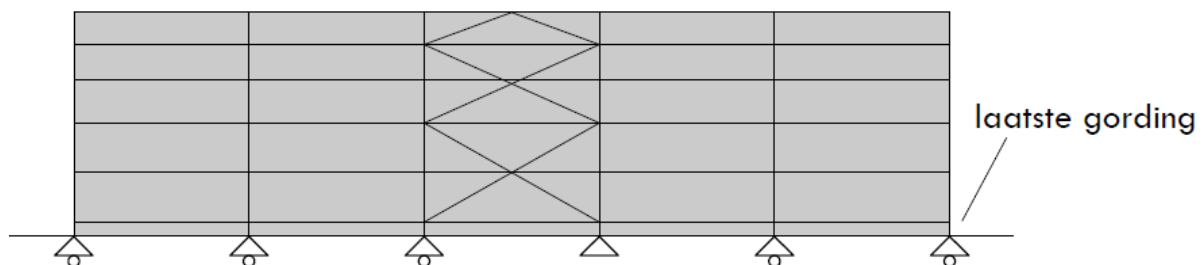
figuur 85 Rubber oplegblok verankerd in één zijde (Bron: Reisner & Wolff Engineering)

Een aandachtspunt bij variant 1 (en ook bij variant 2 en 3) is de onderste gording ter plaatse van het windverband. Deze laatste gording bevindt zich namelijk vlak boven de grond (en daarmee vlak boven de vaste steunpunten) en moet toch kunnen uitzetten (figuur 86).



figuur 86 Laatste gording ter plaatse van windverband met twee scharnierende opleggingen

De overige steunpunten worden geschematiseerd als rol en kunnen verplaatsen in langsrichting. Om er voor te zorgen dat de onderste gording ook kan uitzetten ten gevolge van temperatuurspanningen wordt ervoor gekozen om één van de twee steunpunten ter plaatse van het stabiliteitsverband ook als rol te schematiseren (figuur 87).

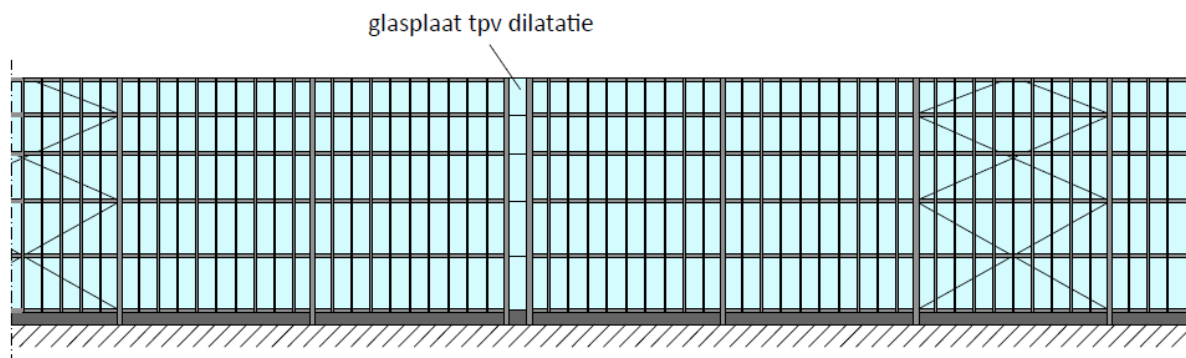


figuur 87 Laatste gording ter plaatse van windverband met zowel scharnierende als roloplegging

De conclusie die over variant 1 getrokken kan worden, is dat het een mogelijke variant is die echter niet fraai is. Deze variant kan eigenlijk altijd.

7.4.2 Variant 2 totaal systeem

Bij variant 2 (figuur 88) wordt de constructie opgeknipt in delen en bevindt zich ter plaatse van de dilatatie een dubbel spant. De ruimte tussen het dubbele spant wordt bij variant 2 opgevuld met een glasplaat. De spanten nemen bij deze variant de vervorming op en moeten kunnen verplaatsen.

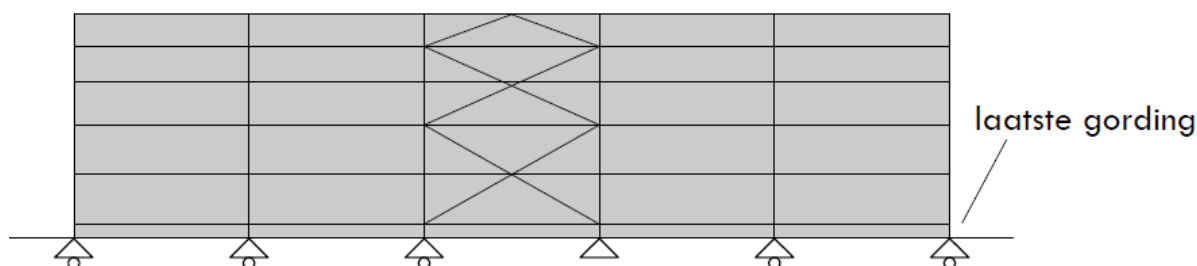


figuur 88 Variant 2

Het voordeel van deze variant is dat de spanten ter plaatse van de oplegging scharnierend zijn verbonden. De dilatatie valt door de glasplaat ook minder op dan de variant met de rubber slabbe. Nadelen zijn echter wel dat de gordingaansluitingen lastiger te realiseren (momentvaste verbindingen) en is er iedere vijf velden een stabiliteitsverband benodigd.

Ter plaatse van de oplegging wordt een rubber oplegblok toegepast, zodat de spanten de vervorming in langsrichting kunnen opnemen. Bij variant 1 is namelijk aangetoond dat een staalplaat die elastisch kan vervormen ter plaatse van de oplegging geen goede mogelijkheid is.

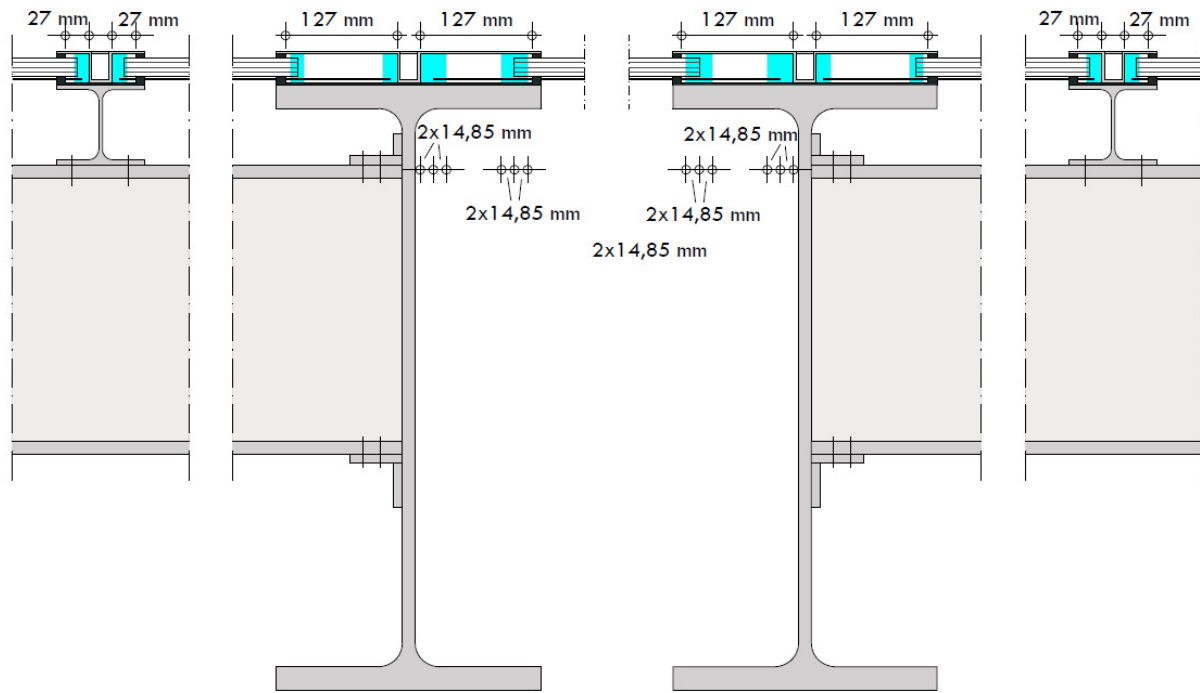
Aandachtspunt is dat één van de twee steunpunten ter plaatse van het stabiliteitsverband als rol moet worden geschematiseerd (evenals bij variant 1 en 3). Dit in verband met het kunnen uitzetten van de onderste gording ter plaatse van het windverband (figuur 87).



figuur 89 Laatste gording ter plaatse van windverband met zowel scharnierende als roloplegging

Van belang is dat de glasplaat ter plaatse van de dilatatie niet uit de beglazingsprofielen kan vallen. Ter plaatse van een boogspant ($b = 300 \text{ mm}$) is er meer ruimte van ter plaatse van een glasdrager ($b = 100 \text{ mm}$). Om er voor te zorgen dat de glasplaat niet uit het beglazingsprofiel valt, kan het RVS-profiel onder de glasplaat worden verlengd. Op deze manier wordt de mate van verplaatsing van een glasplaat beperkt. De verplaatsing die de glasplaat zijdelings moet kunnen ondergaan is 15 mm .

In figuur 90 is te zien dat het mogelijk is om de glasplaat ter plaatse van de dilatatie 15 mm zijdelings te laten verplaatsen zonder uit het beglazingsprofiel te vallen.



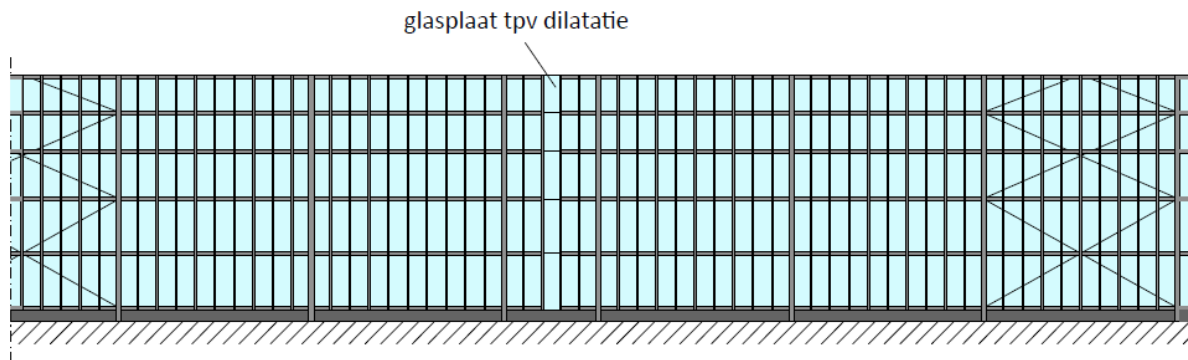
figuur 90 Detaillering glasplaat ter plaatse van dilatatie

Hiermee is aangetoond dat variant 2 een mogelijke variant is.

7.4.3 Variant 3 totaal systeem

Bij variant 3 (figuur 91) wordt net als bij variant 1 en 2 de constructie opgeknipt in delen en bevindt zich ter plaatse van de dilatatie een dubbel spant. De ruimte tussen het dubbele spant wordt bij deze variant opgevuld met een glasplaat. De spanten nemen bij deze variant de vervorming op en moeten kunnen verplaatsen.

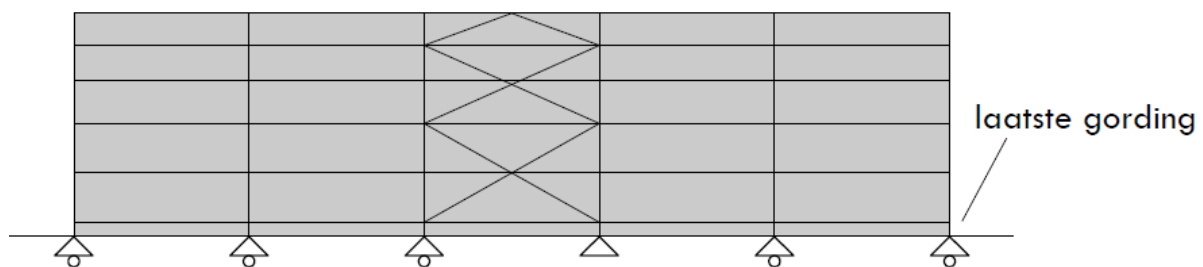
Het verschil met variant 2 is echter dat de gordens doorlopen en hierdoor de afstand tussen het dubbele spant vergroot wordt.



figuur 91 Variant 3

De voor- en nadelen zijn hetzelfde als bij variant 2. Het voordeel van deze variant is dat de spanten ter plaatse van de oplegging scharnierend zijn verbonden. De dilatatie valt door de glasplaat ook minder op dan de variant met de rubber slabbe. Nadelen zijn echter wel dat de gordingaansluitingen lastiger te realiseren (momentvaste verbindingen) en is er iedere vijf velden een stabiliteitsverband benodigd.

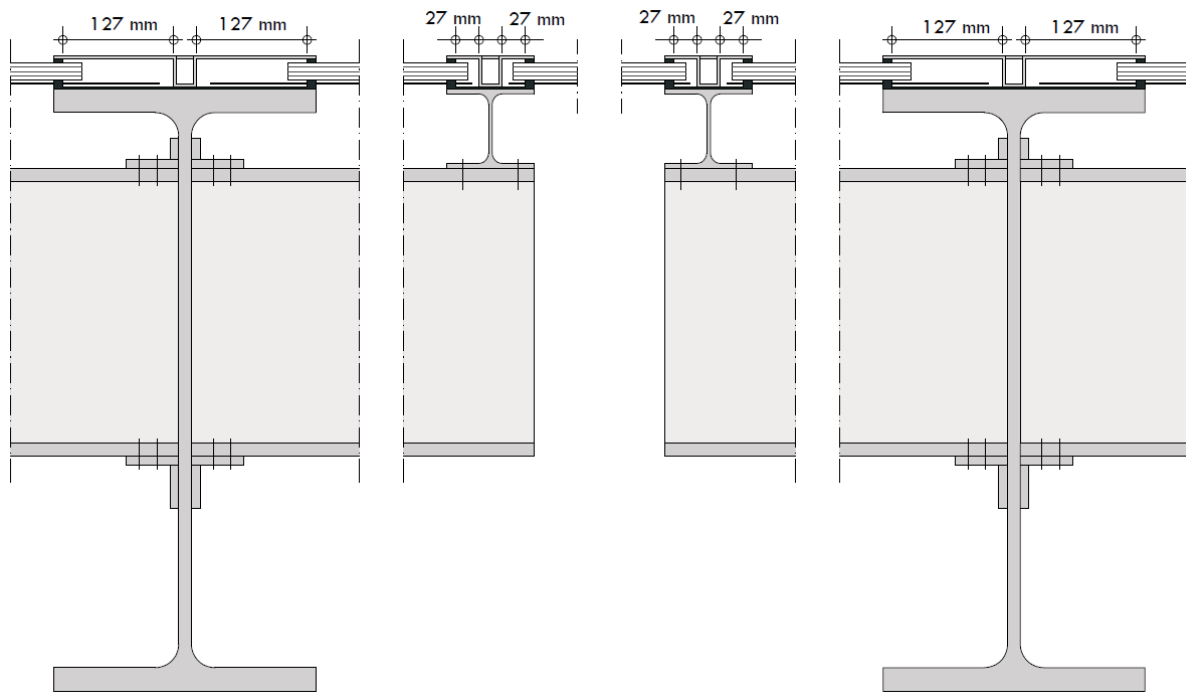
Ter plaatse van de oplegging wordt een rubber oplegblok worden toegepast, zodat de spanten de vervorming in langsrichting kunnen opnemen. Eén van de twee steunpunten ter plaatse van het stabiliteitsverband wordt als rol geschematiseerd in verband met het kunnen uitzetten van de onderste gording ter plaatse van het windverband (figuur 92).



figuur 92 Laatste gording ter plaatse van windverband met zowel scharnierende als roloplegging

Van belang is dat de glasplaat ter plaatse van de dilatatie niet uit de beglazingsprofielen kan vallen. De glasplaat bevindt zich nu ter plaatse van een glasdrager en is er weinig ruimte beschikbaar om te kunnen verplaatsen ($b = 100 \text{ mm}$). De verplaatsing die de glasplaat zijdelings moet kunnen ondergaan is 15 mm .

Het RVS-profiel steekt 10 mm uit ten opzichte van het glas en hierdoor is er tussen het beglazingsprofiel en het RVS-profiel maar 17 mm ruimte aanwezig (figuur 93). Dit is niet voldoende om een maat van 30 mm ($2 \times 15 \text{ mm}$) op te kunnen nemen.

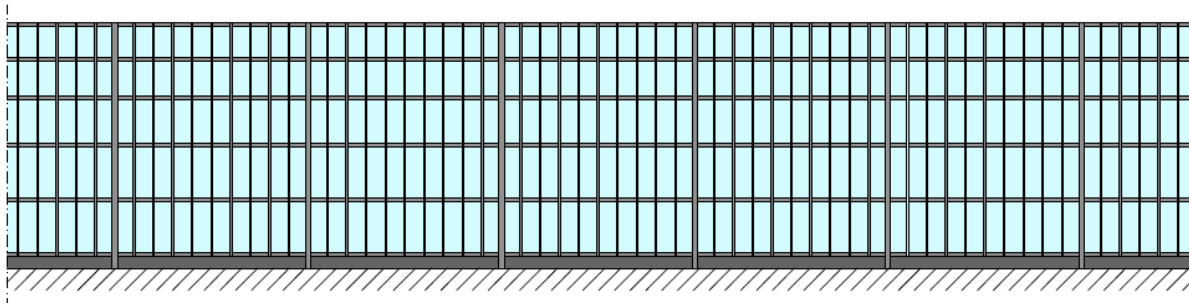


figuur 93 Detaillering glasplaat ter plaatse van dilatatie met uitstekende gordingen

Variante 3 is om deze reden geen mogelijke variant.

7.4.4 Variant 4 totaal systeem

Bij variant 4 (figuur 94) worden de spanten aan de onderzijde ingeklemd en zijn de gordingen aan een of twee zijden bevestigd aan de boogspanten met behulp van een staalplaat.



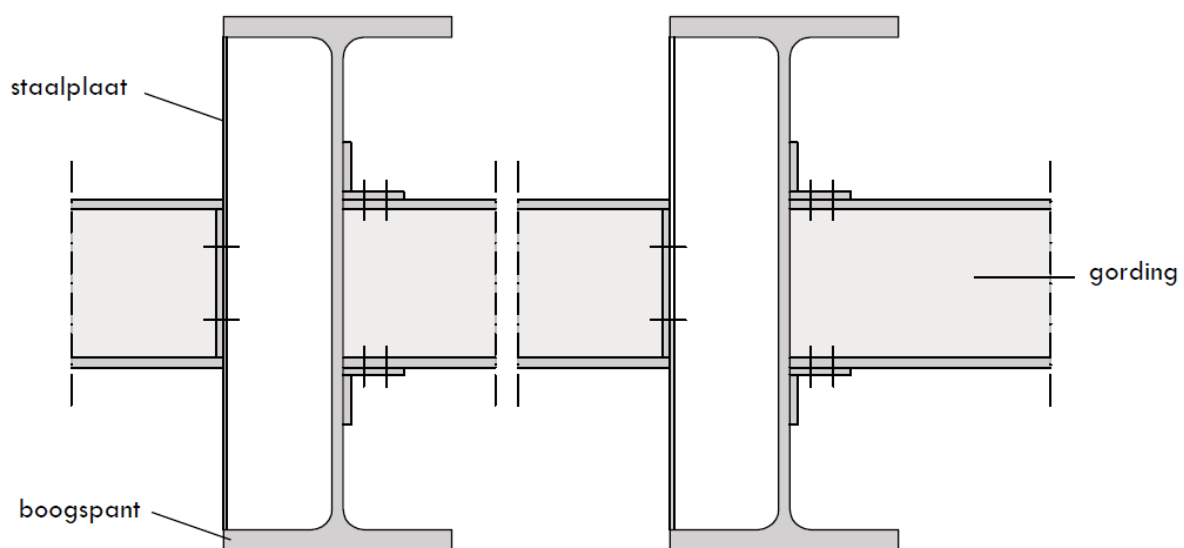
figuur 94 Variant 4

Het grote voordeel van deze variant is dat de dilatatie onzichtbaar is en dat er geen stabiliteitsverband benodigd is. De bevestiging van de gording aan het boogspant met behulp van een staalplaat is tevens een eenvoudige verbinding (ten opzichte van een momentvaste verbinding ter plaatse van de gordingaansluiting).

Nadelen zijn echter wel dat er over een lengte van 4 km 364 spanten ingeklemd moeten worden.

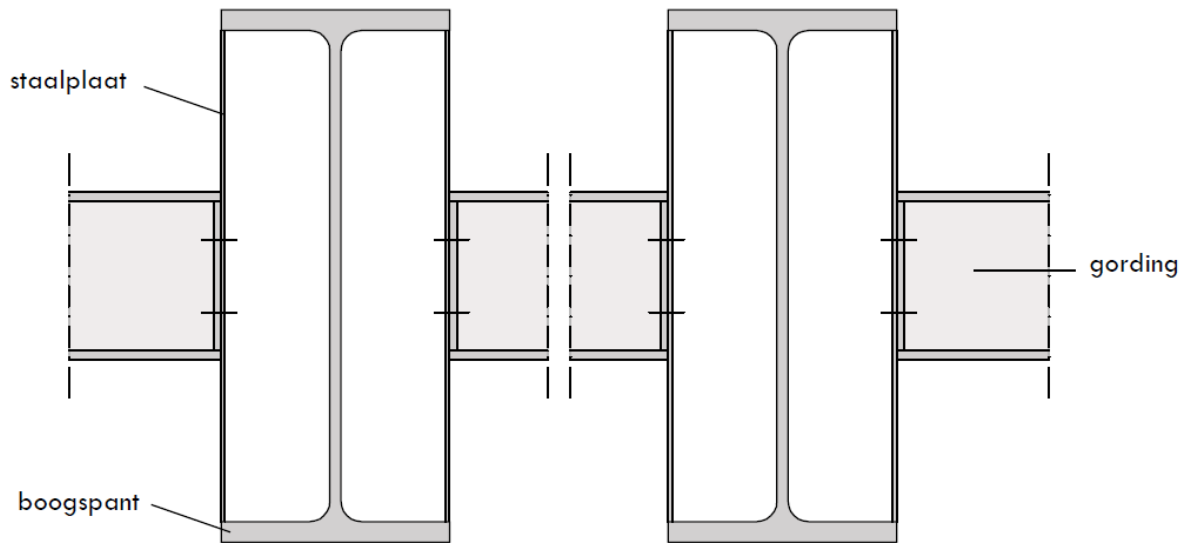
In paragraaf 7.3.3 is bekeken of de gordingaansluiting met behulp van een staalplaat mogelijk was voor vijf velden van 11 meter. De conclusie die hieruit getrokken kon worden, is dat de staalplaat geen mogelijkheid is voor meerdere velden, maar eventueel wel als er per gording gedilateerd gaat worden.

Voor het dilateren per gording zijn er twee varianten opgesteld; variant A en variant B. Bij variant A is de gording met meerdere bouten in verticale richting bevestigd aan de staalplaat. Bij variant B is de gording met meerdere bouten in horizontale richting bevestigd aan de staalplaat. De manier waarop de gording aan de staalplaat wordt bevestigd, heeft invloed op de schematisering en zo ook op de krachtswerking van de staalplaat. Voor iedere variant geldt ook dat de gordingaansluiting met behulp van een staalplaat aan een zijde (variant A1 en B1) of aan twee zijden (variant A2 en B2) kan worden toegepast. Deze keuze heeft invloed op de uitzetting ten gevolge van temperatuurspanningen. De vier varianten zijn weergegeven in figuur 95 t/m figuur 98.



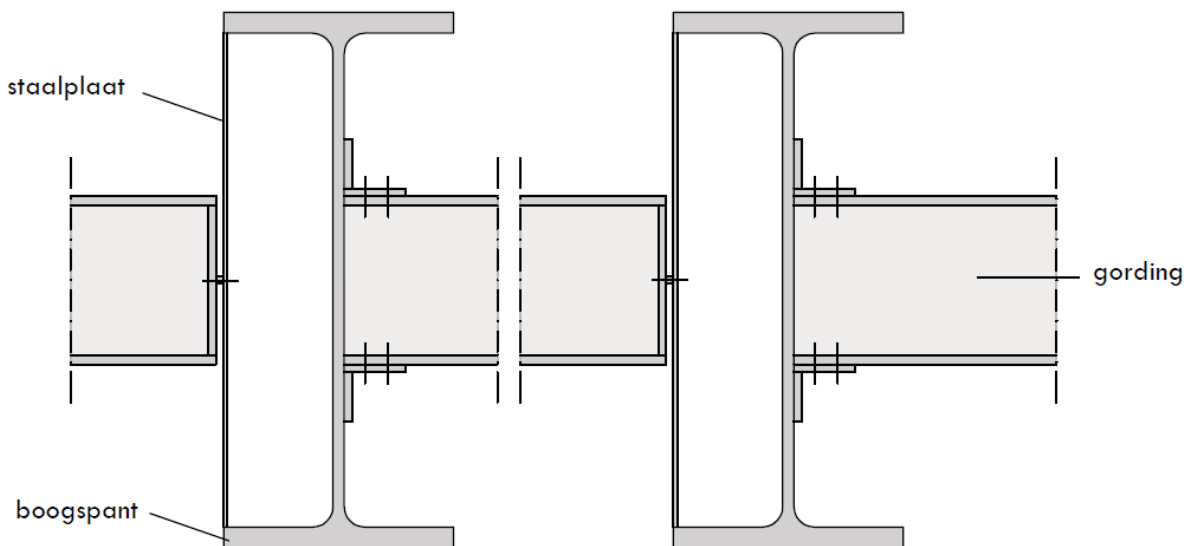
Variant A1 - staalplaat aan een zijde - meerdere bouten verticaal

figuur 95 Variant A1



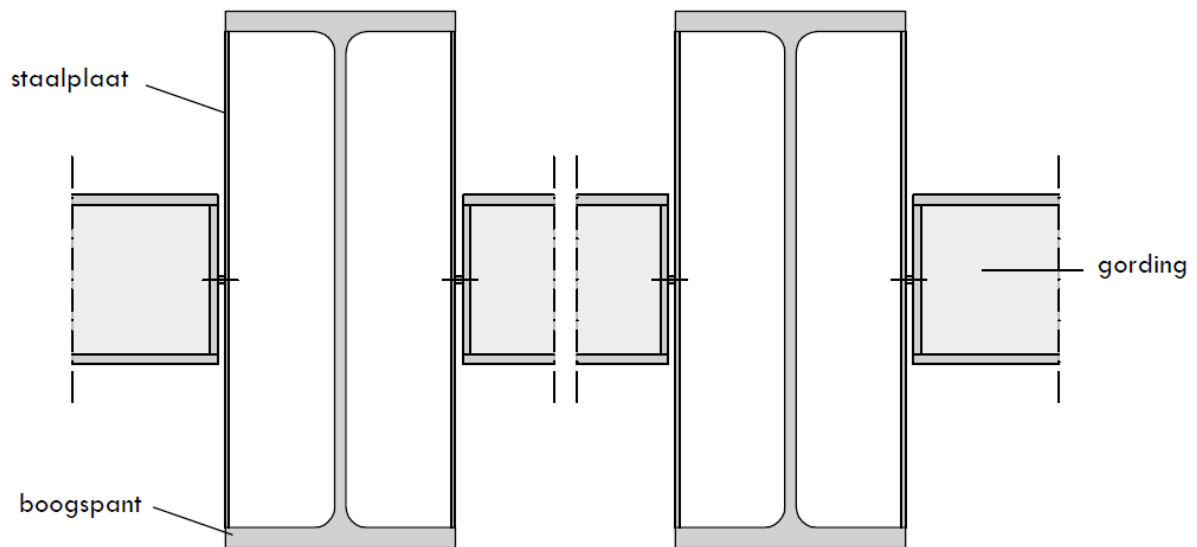
Variant A2 - staalplaat aan twee zijden - meerdere bouten verticaal

figuur 96 Variant A2



Variant B1 - staalplaat aan een zijde - meerdere bouten horizontaal

figuur 97 Variant B1



Variant B2 - staalplaat aan twee zijden - meerdere bouten horizontaal

figuur 98 Variant B2

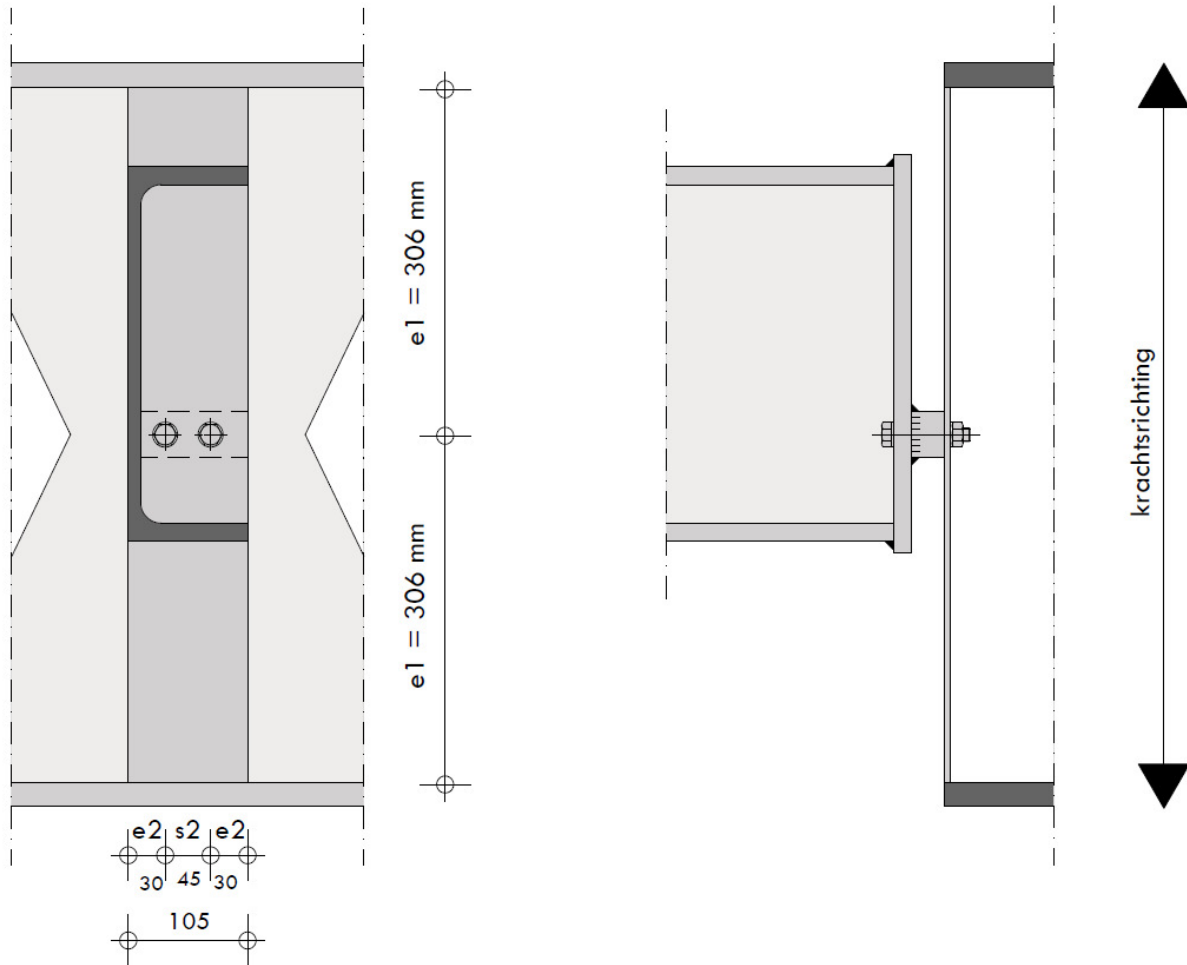
Voor de staalplaat wordt een minimale dikte aangehouden van 5 mm. De berekening van de verschillende varianten zijn terug te vinden in bijlage S. De uitkomsten hiervan zijn weergegeven in tabel 25.

Plaatdikte t	Vergelijkingsspanning σ_{vgl}			
	Variant A1	Variant A2	Variant B1	Variant B2
5 mm	609 N/mm ²	462 N/mm ²	235 N/mm ²	155 N/mm ²

tabel 25 Overzicht vergelijkingsspanning variant A en B

Uit de tabel is af te lezen dat variant A1 en A2 geen mogelijke opties zijn. De vergelijkingsspanning is namelijk te hoog. De mogelijke varianten die overblijven zijn variant B1 en B2.

Doordat de staalplaat slechts 5 mm dik is, moet er gecontroleerd worden of het plaatmateriaal niet bezwijkt; de stuiksterkte van de verbinding dient gecontroleerd te worden (figuur 99).



figuur 99 Boutverbinding gording met staalplaat

De toets op stuik is uitgevoerd volgens NEN 6770 artikel 13.3.2 tabel 30. De toetsingsformule is:

$$F_{c;s;d} \leq F_{c;u;d}$$

Uit bijlage T blijkt dat de verbinding ruim voldoet op stuik.

Bij toepassing van een staalplaat ter plaatse van de dilatatie en het inklemmen van de spanten is er geen stabiliteitsverband benodigd. De windwrijving in langsrichting kan echter voor moeilijkheden zorgen. De gordingen zullen namelijk door de windwrijving een vervorming ondergaan in langsrichting.

De vervorming die optreedt door windwrijving in langsrichting is bepaald met Scia Engineer 2008. De waarde voor de windwrijving kan bepaald worden met de volgende formule:

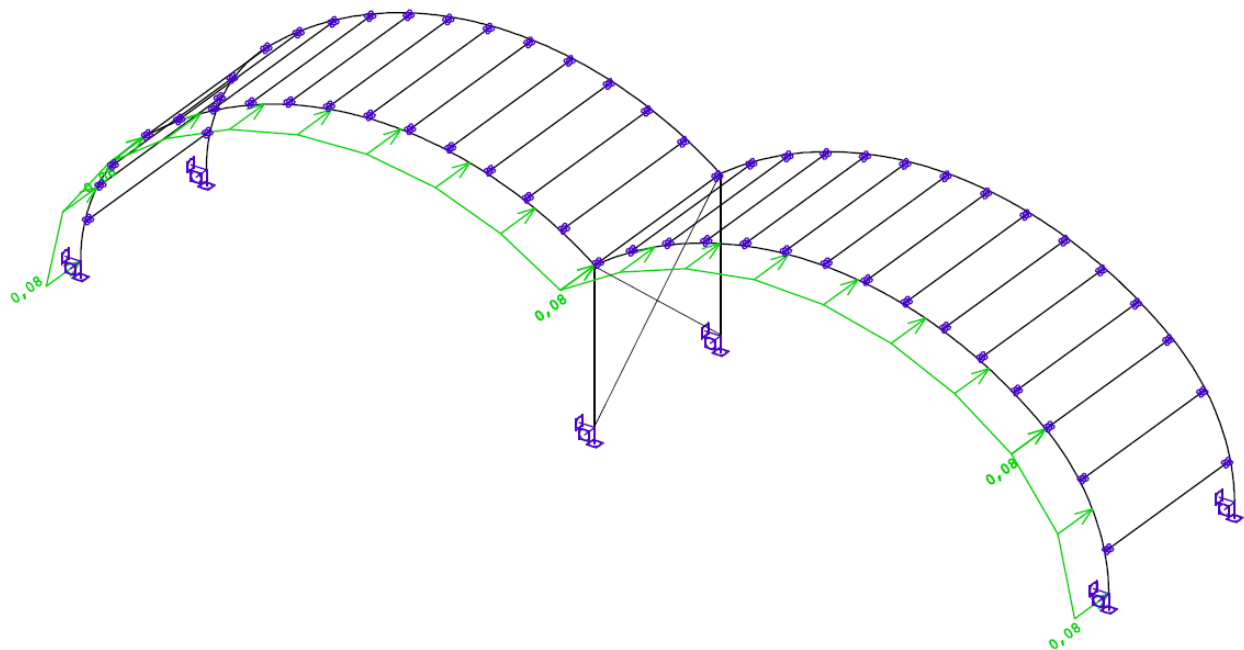
$$p_{rep} = c_{dim} \cdot c_w \cdot p_w = 0,89 \cdot 0,01 \cdot 0,84 = 0,0075 \frac{kN}{m^2}$$

Voor de windvormfactor voor wrijving c_w is 0,01 aangehouden (glad oppervlak).

Over een lengte van 11 meter geeft dit een waarde voor de windwrijving van:

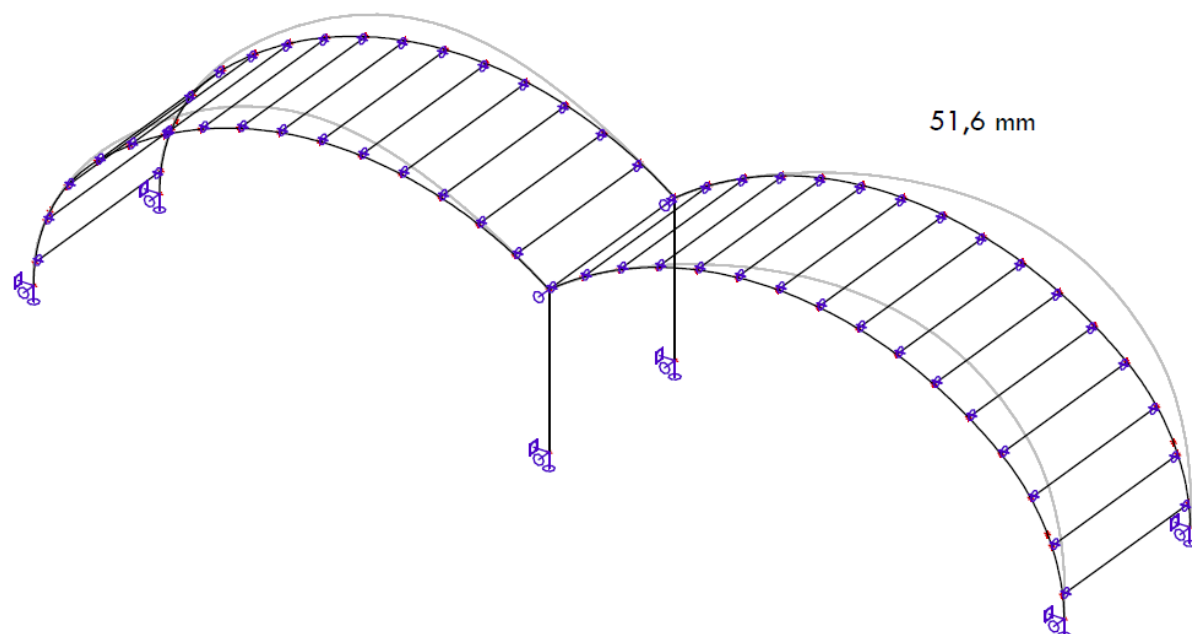
$$0,0075 \frac{kN}{m^2} \cdot 11m = 0,08 \frac{kN}{m}$$

Deze waarde voor windwrijving is in langsrichting op het boogspant geplaatst (figuur 100). Het boogspant kan in langsrichting vrij bewegen.



figuur 100 Gedeelte overkapping met windwrijving in Scia Engineer 2008

De vervorming van de spanten is weergegeven in figuur 101. Hieruit blijkt dat de vervorming in langsrichting die optreedt door de windwrijving 51,6 mm is.



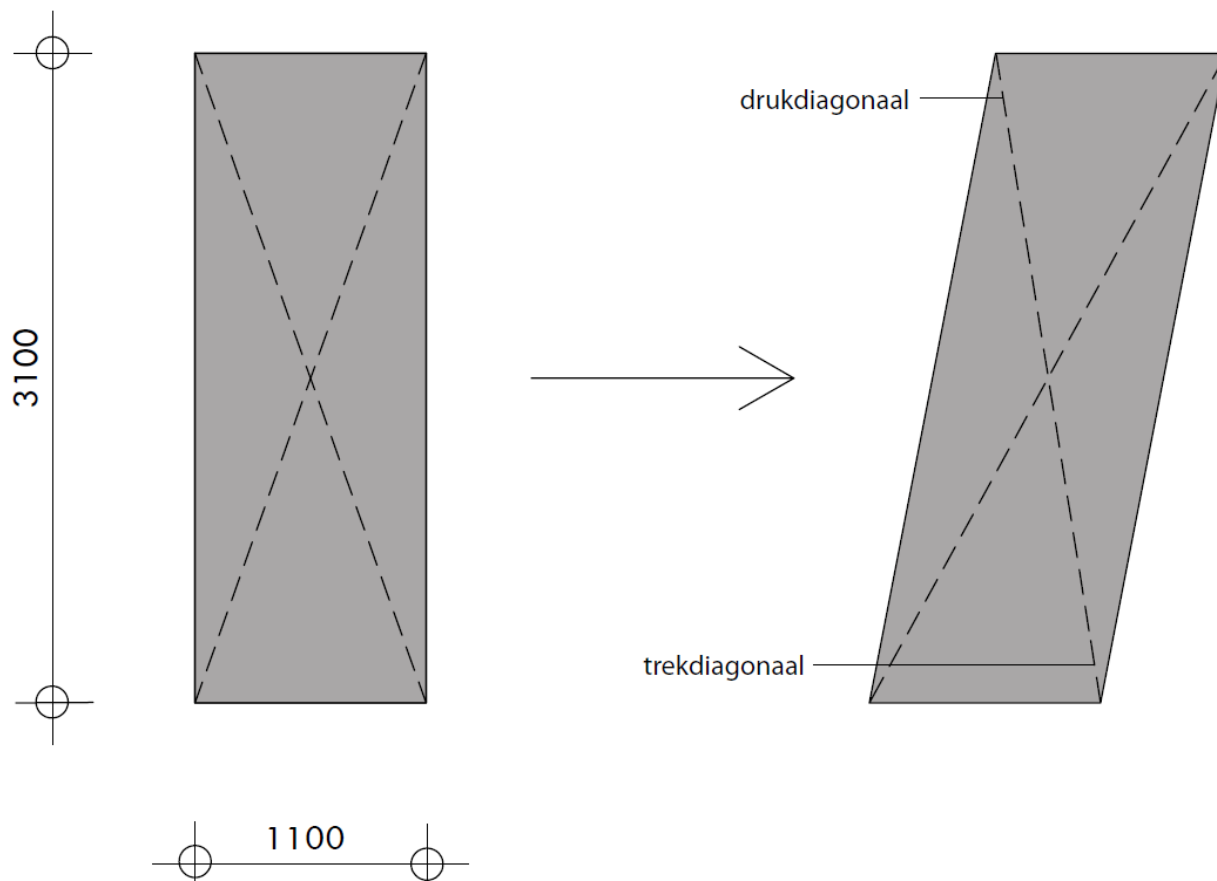
figuur 101 Vervormde constructie ten gevolge van windwrijving

De vervorming in langsrichting die optreedt door de windwrijving is 51,6 mm. Indien alle boogspanten deze 51,6 mm meebewegen is er geen probleem. Hier mag echter niet van worden uitgegaan. Dit betekent dat de staalplaat ter plaatse van de gordingsaansluiting extra vervorming moet kunnen opnemen door elastisch te vervormen. De vorming ten gevolge van windwrijving is echter zo groot dat dit niet mogelijk zal zijn en de staalplaat plastisch gaat vervormen.

Voor de vervorming door windwrijving moet dus een andere oplossing worden bedacht. Het toepassen van een stabiliteitsverband is geen optie, omdat de gordingen een- of tweezijdig verend zijn verbonden aan het boogspant. Tevens was het hele idee van deze variant dat er juist geen stabiliteitsverbanden benodigd zouden zijn.

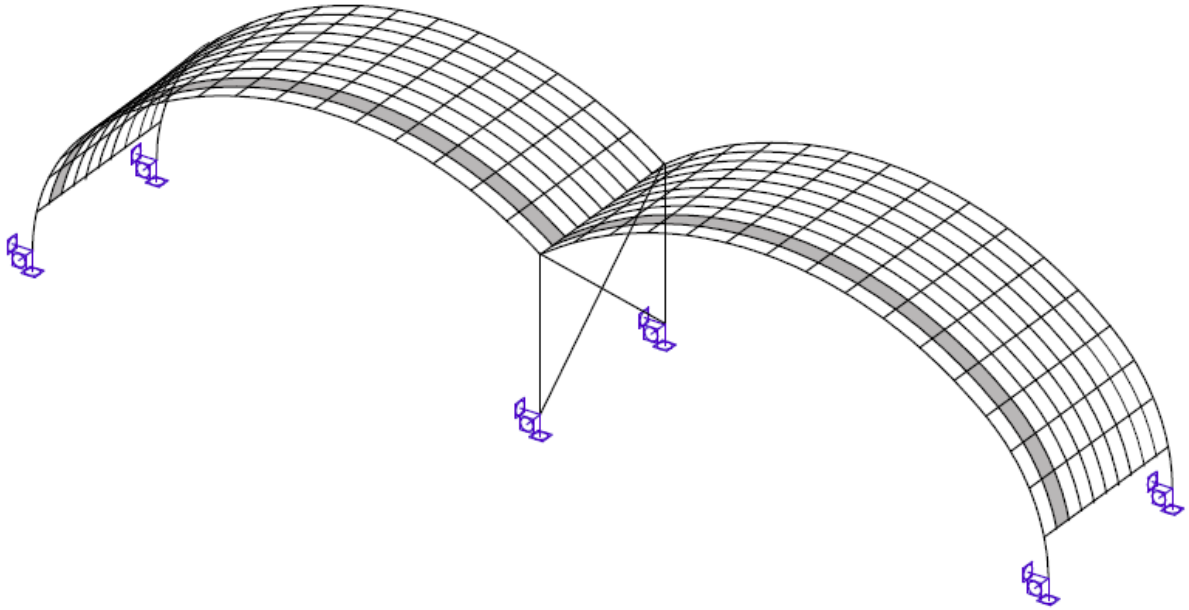
Een mogelijkheid zou kunnen zijn dat de glasplaten de windwrijving opnemen. Er moet nu bekeken worden hoe groot de spanningen in de glasplaten zijn door de windwrijving en of de glasplaten deze spanningen kunnen opnemen (oftewel dat de glasplaten niet kapot gaan).

De staalconstructie vervormt ten gevolge van de windwrijving. De glasplaten zijn aan vier zijden omgeven door staal en zullen dus willen vervormen als een 'wybertje' (figuur 102).



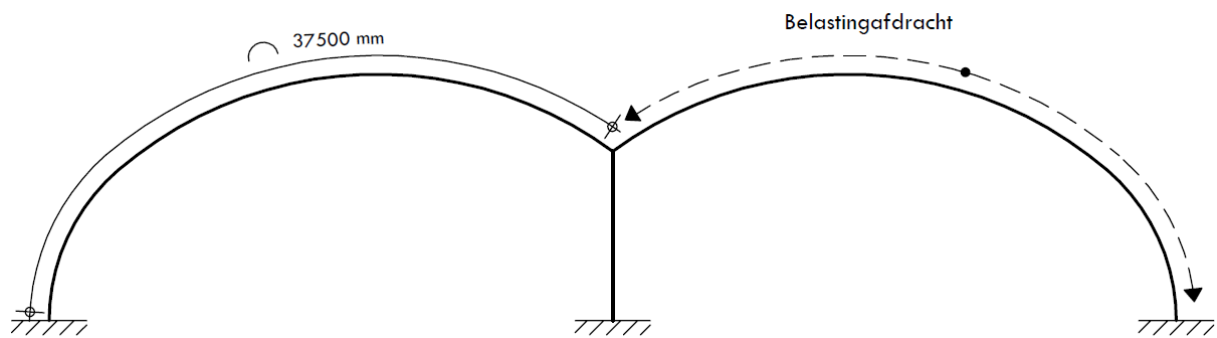
figuur 102 Vervorming glasplaten ten gevolge van windwrijving

Er wordt van uit gegaan dat per veld van 11 meter één rij glasplaten de windwrijving op zal nemen (figuur 103). Op deze manier kunnen er ruiten kapot gaan zonder dat de spanten uit zullen buigen ten gevolge van de windwrijving (veilige aanname).



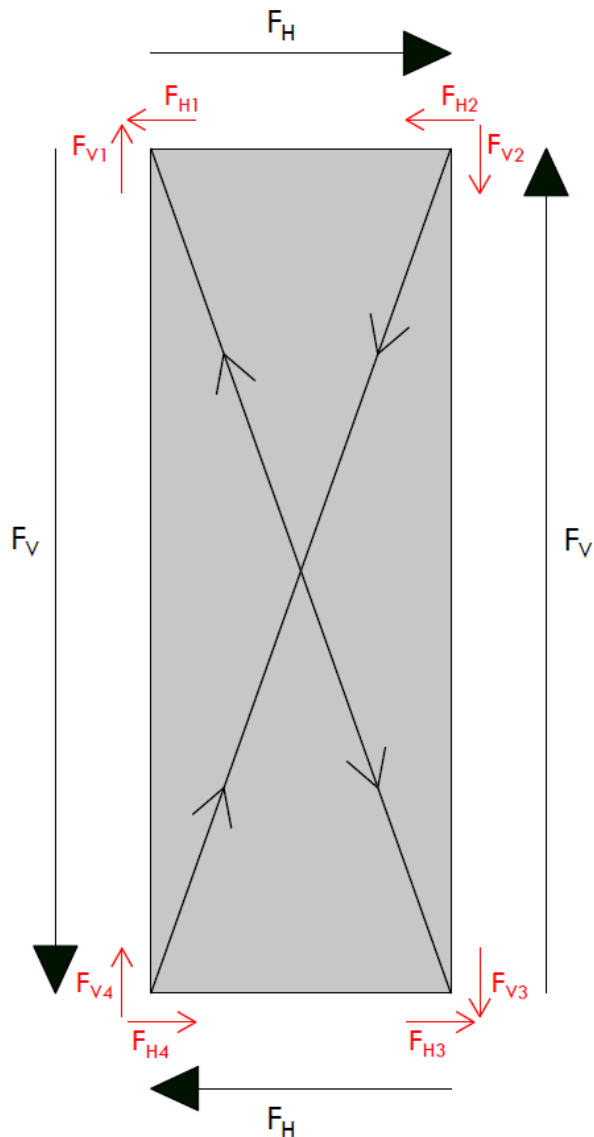
figuur 103 Glasplaten voor opnemen krachten door windwrijving

De windwrijving dient vanuit het midden van een boog te worden afgedragen naar de fundering. Dit is dus over een lengte van $37,5 / 2 = 18,75$ meter (figuur 104).



figuur 104 Belastingafdracht windwrijving

De 'bovenste' en 'onderste' glasplaat krijgen de grootste belasting. De grootste kracht F wordt bepaald volgens figuur 105.



figuur 105 Krachten in onderste glasplaat

$$F_H = \gamma_q \cdot p_{rep} \cdot \frac{1}{2} \cdot L_{boog} \cdot L_{spantafstand}$$

$$= 1,5 \cdot 0,0075 \cdot \frac{1}{2} \cdot 37,5 \cdot 11 = 2,32 \text{ kN}$$

$$F_V = \frac{2,32 \text{ kN}}{1,1 \text{ m}} \cdot 3,1 \text{ m} = 6,54 \text{ kN}$$

De diagonaal F wordt dan:

$$F = \sqrt{2,32^2 + 6,54^2} = 6,94 \text{ kN}$$

Deze kracht F wordt verdeeld over de druk- en trekdiagonaal: $\frac{6,94}{2} = 3,47 \text{ kN}$.

De trekspanning in het glas is maatgevend zijn. Als maximale trekspanning in het glas wordt een waarde van 6 N/mm² aangehouden. Het glas bestaat uit twee platen van 4 en 5 mm dikte. De totale

dikte is 9 mm. Met deze gegevens kan nu de minimaal benodigde breedte bepaald worden voor het opnemen van de trekkracht in het glas.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{b_{\min} \cdot t}$$

$$6 = \frac{3,47 \cdot 10^3}{b_{\min} \cdot 9}$$

$$b_{\min} = 64 \text{ mm}$$

Uit deze berekening blijkt dat de minimale breedte zo klein is dat het opnemen van de krachten door de glasplaat geen probleem is.

De krachten die in het glas ontstaan ten gevolge van de windwrijving moeten echter nog worden overgebracht van glasplaat naar glasplaat, maar ook van glasplaat naar staal.

Krachtsoverdracht van glasplaat naar glasplaat

De krachten worden door middel van aan kitnaad die belast wordt op afschuiving, overgebracht van glasplaat naar glasplaat. Er moet wel berekend worden of dit mogelijk is. Een aanname voor een kitkeuze is de Sikaflex®-552 (productinformatie is te vinden in bijlage U). Dit is een weersbestendige kitsoort. Deze kit heeft een afschuifsterkte van 2,0 N/mm².

De kitnaad aan de korte zijde (1100 mm) van de glasplaat moet F_H (2,32 kN) kunnen overbrengen op de volgende glasplaat.

$$\tau = \frac{F_H}{A}$$

$$2,0 = \frac{2,32 \cdot 10^3}{1100 \cdot t_{\min}}$$

$$t_{\min} = 1,0 \text{ mm}$$

De minimale dikte van de kitnaad is 1,0 mm. Er is 9 mm glasdikte beschikbaar (4 + 5 mm). Een kitnaad van 9 mm voldoet dus ruim.

De kitnaad aan de lange zijde (3100 mm) van de glasplaat moet F_V (6,54 kN) kunnen overbrengen op de volgende glasplaat.

$$\tau = \frac{F_V}{A}$$

$$2,0 = \frac{6,54 \cdot 10^3}{3100 \cdot t_{\min}}$$

$$t_{\min} = 1,0 \text{ mm}$$

De minimale dikte van de kitnaad is 1,0 mm. Er is 9 mm glasdikte beschikbaar (4 + 5 mm). Een kitnaad van 9 mm voldoet dus ruim.

Krachtsoverdracht van glasplaat naar staalconstructie

Er is nu aangetoond dat de krachten in ieder geval van glasplaat naar glasplaat kunnen worden overgebracht. De krachten in de 'onderste' en 'bovenste' glasplaat moeten echter nog wel overgebracht worden naar de staalconstructie. Het overbrengen van de kracht F_V van glasplaat naar staalconstructie (glasdrager) is geen probleem; dit gebeurt immers door de aanwezige kitnaad aan de lange zijde van de glasplaat.

Kracht F_H moet in principe door de kitnaad aan de lange zijde van de glasplaat overgebracht moeten worden. Het probleem is echter dat kracht F_H loodrecht op deze kitnaad werkt. Om erachter te komen wat er met een kitnaad gebeurt wanneer deze loodrecht wordt belast, is verder onderzoek noodzakelijk. In dit afstuderen wordt hier niet verder op in gegaan.

Er kunnen echter wel alternatieven worden geboden overbrengen van kracht F_H van de glasplaten naar de staalconstructie.

Op de koudgebogen glasplaten zit een RVS C-profiel verlijmd. De bovenflens van het C-profiel steekt uit ten opzichte van het glas en ligt op het onderrubber. Hiermee wordt voorkomen dat de ruiten gaan aanliggen en daardoor aan de andere zijde van de oplegging gaan afschuiven waardoor de ruit valt of breekt. Dit C-profiel is in principe niet nodig bij het verlijmen van de glasplaten. Er kan echter voor gekozen worden om dit C-profiel echter wel toe te passen bij de onderste en bovenste glasplaten. Door het C-profiel te koppelen aan onderliggende staalconstructie kunnen de krachten uit het glas worden overgedragen op het staal. Voor het koppelen van het C-profiel met onderliggende constructie zijn twee mogelijkheden:

- Het C-profiel vastbouten op de glasdrager. Hierdoor dient een bout $\frac{1}{2} F_H$ (1,16 kN) over te brengen.
- Het C-profiel in het midden te koppelen aan de onderliggende gording door middel van een "extra" C-profiel. Dit "extra" C-profiel dient kracht F_H (2,32 kN) over te brengen van het C-profiel naar de gording.

Nu is aangetoond dat de glasplaten zorgen voor opname van de windwrijving, is het wel van belang dat de gordingen maar aan één zijde met behulp van een staalplaat die elastisch kan vervormen aan het boogspant worden verbonden (variant B1). De stijve verbinding aan de andere zijde moet namelijk in staat zijn om de kracht ten gevolge van de windwrijving over te brengen naar de fundering via het boogspant.

Een ander aandachtspunt is dat het glasvlak tussen twee spanten aan één zijde moet kunnen schuiven. Dit in verband met de mogelijkheid voor het uitzetten van de staalconstructie ten gevolge van temperatuurspanningen. Het glasvlak kan zo de vervorming volgen.

De conclusie die getrokken kan worden over het opnemen van de windwrijving door de glasplaten is dat het zeker mogelijk is, maar dat dit nog wel onderzocht dient te worden.

Edwin Huveners is aan de TU/e gepromoveerd op het verlijmen van glasplaten¹. Hij heeft vlakke glasplaten onderzocht die gelijmd zijn aan een lijstwerk. Uit zijn onderzoek blijkt dat het wel degelijk mogelijk is om glas te gebruiken als zijdelingse steun (schijf). Er is echter nog veel onderzoek nodig. Edwin Huveners geeft in zijn onderzoek de voorkeur aan het prefabriceren van glasplaten. Hierbij wordt een gelaagde ruit twee-, drie-, of vierzijdig verlijmd aan een lijst. De lijmverbinding zorgt ervoor dat de krachten meer gelijkmatig worden verdeeld over de glazen ruit. De lijmnaad fungeert tevens als een flexibele laag tussen het brosse glas en de lijst. Het lijstwerk moet voorzien zijn van bevestigingsmogelijkheden. Op deze manier kan een kapotte ruit snel en eenvoudig worden vervangen.

Voordelen van prefabriceren van glasplaten:

- Er wordt onder geconditioneerde omstandigheden gelijmd
- Er worden gecontroleerde (eventuele versnelde) technieken toegepast voor het uitharden van de lijm
- Het composiet heeft meer maatvastheid
- De prefab glazen elementen kunnen snel op de plaats van bestemming worden gemonteerd.

Op de bouwplaats lijmen is geen goede optie. De constructie is namelijk nog beweeglijk tijdens het uitharden van de lijm. Dit komt de uitharding van de lijm niet ten goede.

Wat betreft de lijmsorten is er nog wetenschappelijk onderzoek benodigd. Er bestaan duizenden soorten lijm.

¹ E.M.P. Huveners - Circumferentially adhesive bonded glass panes for bracing steel frames in facades (2009)

Tot slot dient er wel te vermeld worden dat het verlijmen van koudgebogen glasplaten aanzienlijk anders is dan het verlijmen van vlakke glasplaten. Dit dient ook nog wetenschappelijk te worden onderzocht.

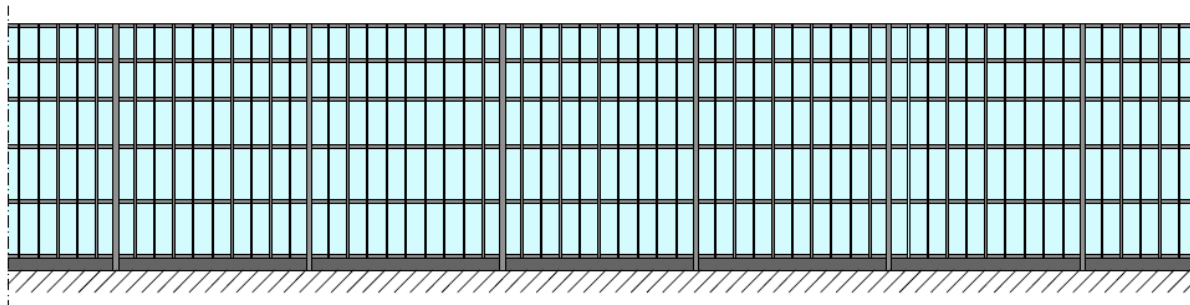
7.4.5 Keuze variant dilatatie overkapping

De mogelijke varianten die overblijven zijn variant 1, variant 2 en variant 4. Variant 3 bleek namelijk geen mogelijke optie.

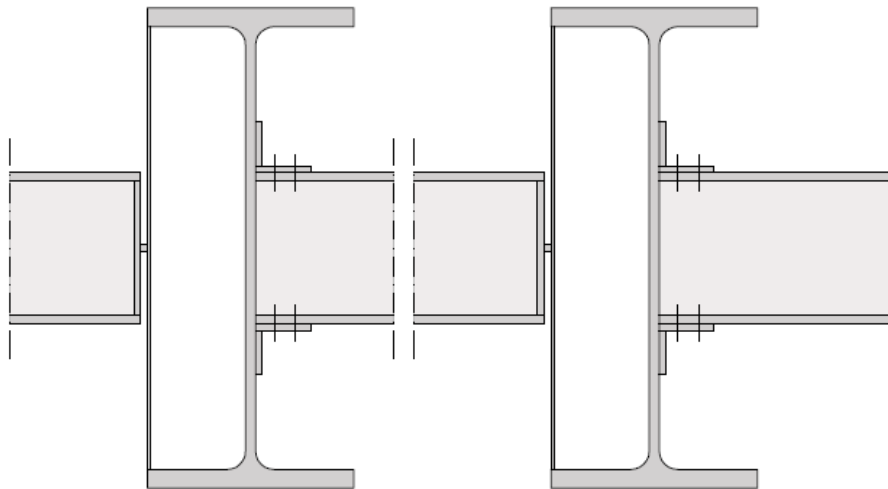
Variant 1 is een variant die eigenlijk altijd kan, maar die niet fraai is door de rubber slabbe. Om deze reden valt variant 1 dan ook af.

Variant 4 heeft de voorkeur boven variant 2 vanwege de continuïteit van de overkapping. Bij variant 4 kan er eindeloos worden doorgebouwd zonder een onderbreking. Bij variant 2 bevindt zich om de 55 meter een dubbel spant.

De definitieve keuze wat betreft het dilateren van de overkapping is variant 4 (figuur 106) waarbij de gordingen aan een zijde met behulp van een staalplaat aan de boogspanten zijn verbonden (figuur 107).



figuur 106 Definitieve variant



Variant B1

figuur 107 Detaillering definitieve variant

7.4.6 Keuze spantopbouw en -afstand

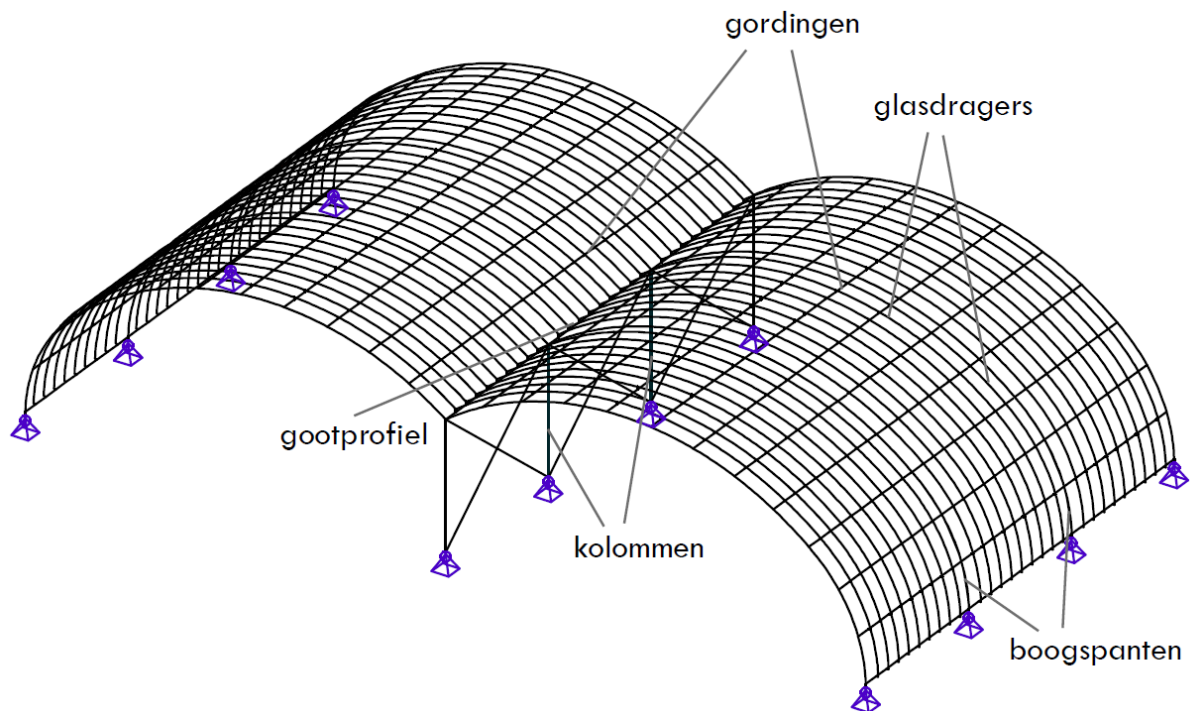
Een tafelopbouw voor variant 4 is geen mogelijkheid. Variant 4 wordt opgebouwd met de standaard opbouw en om de uitzetting ten gevolge van temperatuurspanningen zo klein mogelijk te houden wordt gekozen voor een spantafstand van 11 meter.

8. Definitieve berekening constructie-elementen

Nu bekend is hoe de overkapping gedilateerd gaat worden en wat de spantopbouw en –afstand is, kunnen de definitieve berekeningen worden gemaakt van de verschillende constructie-elementen. De krachten in de verschillende elementen zijn bepaald met behulp van Scia Engineer 2008.

De constructie-elementen die berekend zijn, zijn (figuur 108):

- Boogspanten
- Kolommen
- Gordingen
- Gootprofiel
- Glasdragers



figuur 108 Constructiemodel met de verschillende elementen

In dit hoofdstuk wordt eerst toegelicht hoe constructiemodel in Scia Engineer is opgebouwd. Hierna wordt besproken welke profilering is toegepast en getoetst voor de verschillende constructie-elementen. De daadwerkelijke berekeningen en toetsingen van de verschillende constructie-elementen zijn terug te vinden in bijlage V.

8.1 Opbouw Scia Engineer model

Het 3D model is opgebouwd uit drie velden van 11 meter. Op deze manier worden het middelste veld en de twee middelste boogspanten maximaal belast.

8.1.1 Opleggingen en aansluitingen

De boogspanten en de kolommen zijn volledig scharnierend opgelegd. De verbinding tussen het boogspant en de kolommen is stijf gemodelleerd.

Tussen de kolommen wordt een wand geplaatst. Deze kolommen worden hierdoor in lengterichting geschoord en de wand kan daarom worden gemodelleerd met twee diagonalen tussen de kolommen. De kolommen kunnen hierdoor in langsrichting niet verplaatsen.

De gordingen en het gootprofiel zijn aan één zijde momentvast aan het boogspant gemodelleerd. Aan de andere zijde zijn de gordingen en het gootprofiel met behulp van een translatieveer in langsrichting verbonden ($k = 0,15 \text{ MN/m}$).

De gordingen en het gootprofiel zijn ook zo gemodelleerd dat er rotatie op kan treden om de twee assen loodrecht op de lengteas. Rotatie om de lengteas is verhinderd.

De glasdragers zijn volledig scharnierend op de gordingen bevestigd.

De opbouw van het Scia Engineer model wordt in bijlage V uitvoeriger besproken.

8.1.2 Belastingen

De volgende belastingen zijn gehanteerd in het Scia Engineer model:

- Permanente belastingen
 - Eigen gewicht constructie
 - Eigen gewicht dakhuid
 - Rustende belastingen
 - Gevelwasinstallatie
 - Ventilatoren
- Veranderlijke belastingen
 - Sneeuwbelasting
 - Symmetrische sneeuwbelasting
 - Asymmetrische sneeuwbelasting
 - Sneeuwophoping
 - Windbelasting
 - Winddruk
 - Windzuiging
 - Windwrijving

De verschillende belastingen worden in bijlage V nader toegelicht.

8.1.3 Belastingcombinaties

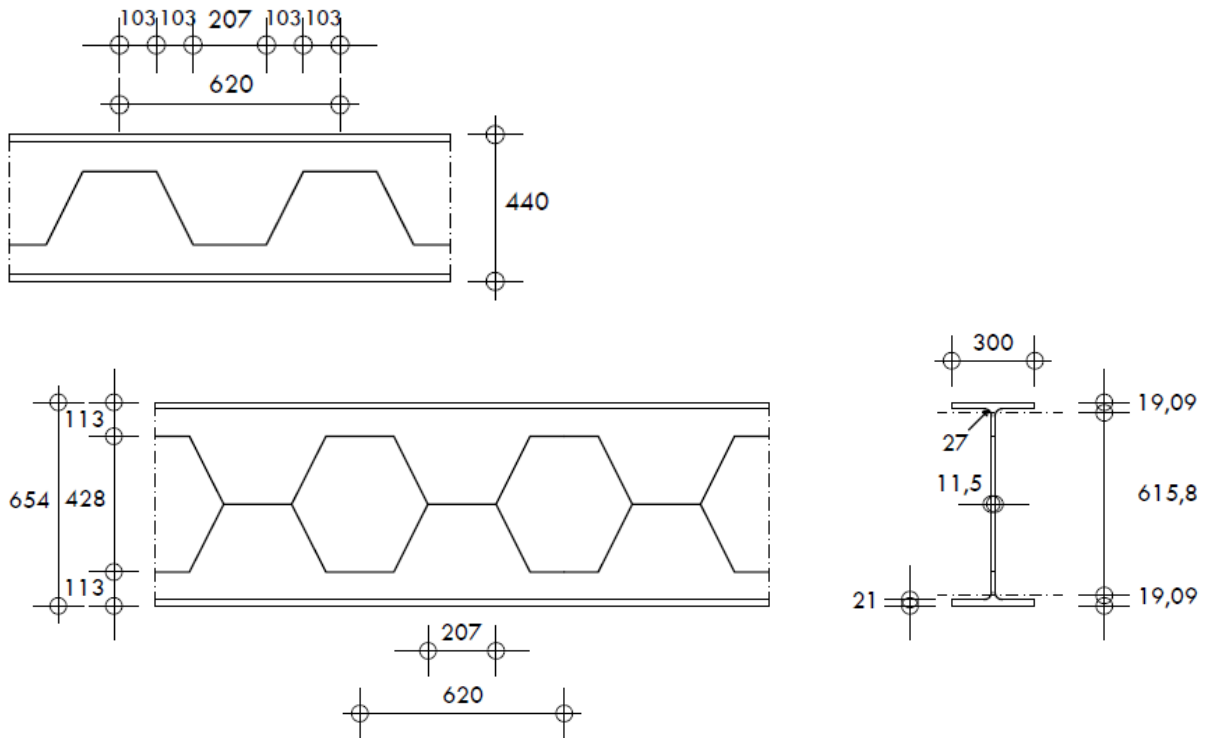
De belastingcombinaties worden opgesteld volgens tabel 26.

Combinatie	Veiligheids- klasse	Permanente belasting		Veranderlijke belasting
		Normaal (ongunstig)	Gunstig	
UGT	3	1,2	0,9	1,5
	3	1,35	0,9	--
BGT	3	1,0	1,0	1,0

tabel 26 Belastingcombinaties met bijbehorende veiligheidsfactoren (Bron: NEN 6702)

8.2 Boogspanten

Het boogspant betreft een raatligger met een hoogte van 654 mm en een steek van 620 mm uit een HE450A. De afmetingen van deze raatligger zijn weergegeven in figuur 109.



figuur 109 Gegevens toegepaste raatligger

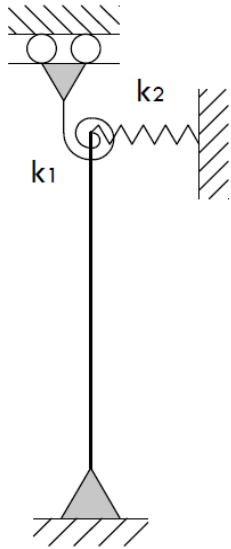
De methode die is toegepast voor de toetsing van de boogspanten is de methode gebaseerd op een gereduceerde spanning. Een zestal doorsneden (grootste optredende krachten) worden getoetst. Voor de sterkte wordt gecontroleerd of het optredende moment binnen de (plastische) momentcapaciteit valt. Tevens wordt de afschuiving van het V-stuk wordt gecontroleerd. Wat betreft de stabiliteit wordt de kipstabiliteit, het plooiën van het lijf en het plooiën van de flenzen gecontroleerd. De vervormingen van het boogspant (stijfheid) die voortkomen uit het 3D model in Scia Engineer worden getoetst aan de gestelde vervormingseisen.

Een aandachtspunt bij de boogspanten in de vervorming in langsrichting. De gordingen zijn aan een zijde met behulp van een staalplaat aan de boogspanten bevestigd. Deze staalplaat dient ervoor om de uitzettingen ten gevolge van de temperatuurspanningen op te nemen. Deze staalplaten kunnen maximaal 10 mm (elastisch) doorbuigen. Door de temperatuurspanningen treden er verplaatsingen van 6 mm op. Nu is het van belang dat de vervorming van de spanten in langsrichting onderling niet veel van elkaar verschilt. Is dit verschil namelijk erg groot, dan zal de staalplaat extra gaan vervorming (plastisch). Door het 3D model asymmetrisch te belasten is er gezocht naar het grootste verschil in vervorming in langsrichting van boogspant 2 en 3 en is er gekeken of deze binnen de grenzen valt.

8.3 Kolommen

Voor de kolommen is er in eerste instantie gezocht naar een passend HEA-profiel. Dit in verband met het maken van eenvoudige verbindingen. Uit de berekening bleek echter dat, door het grote optredende moment, kip sterk maatgevend werd. Om deze reden is er gekozen voor een kokerprofiel (600x400x16). Om de profielgrootte te beperken is er gekozen voor de staalsoort S355.

Een aandachtspunt bij de kolom is de kniklengte. De kniklengte is bepaald door de bogen te schematiseren als rotatie- en translatievoor (figuur 110).



figuur 110 Schematisatie kolom

De sterkteoets van dit profiel resulteert in een unity check van 0,71 en de stabiliteitsoets resulteert in een unity check van 0,82. De profielen voldoen aan de stijfheidseis met een maximale doorbuiging van 16,7 mm, terwijl 36,0 mm is toegestaan.

8.4 Gordingen

Voor de gordingen is gekozen voor een UPE330 profiel dat aan een zijde stijf verbonden is aan de spanten. Aan de andere zijn de gordingen met behulp van een staalplaat bevestigd aan de spanten. Deze verbinding wordt gemodelleerd met een translatievoor in langsrichting.

De "open" zijde van het profiel wordt neerwaarts gemonteerd, zodat vuilophoping wordt voorkomen.

Een UPE profiel is een relatief slap asymmetrisch profiel. De toegepaste staalsoort is daarom ook S355. De gordingen zijn loodrecht op hun lengteas ten opzichte van elkaar gefixeerd door middel van glasdragers.

Voor enkelsymmetrische profielen zoals een UPE zijn er geen toetsingsregels voor handen in de voorschriften. Aan de TU/e heeft er echter een onderzoek plaatsgevonden door K. de Louw waarbij er een nieuwe toetsingsregel is opgesteld voor kipstabiliteit van U-profielen met belastingen op het lijf. Deze toetsingsformule wordt toegepast voor de toetsing van de gordingen.

Wat betreft de stabiliteit kunnen er zich twee situaties voordoen: druk in de boven- of druk in de onderflens. Bij druk in de bovenflens van de gording zullen de glasdragers steun geven aan de bovenflens van de gordingen wat de kiplengte aanzienlijk verkleint. Bij druk in de onderflens kan deze steun niet in rekening worden gebracht wat de invloed van de kipinstabiliteit aanzienlijk vergroot. Dit laatste geval treedt op bij volledige windzuiging. Beide situaties zullen worden getoetst.

De toetsing van situatie 1 (druk in de bovenflens) resulteert in een unity check van 0,67. De toetsing van situatie 2 (druk in de onderflens) resulteert in een unity check van 0,84.

De profielen voldoen aan de stijfheidseis met een maximale doorbuiging van 30,2 mm, terwijl 44,0 mm is toegestaan.

8.5 Gootprofiel

Voor het gootprofiel is gekozen voor een HEA-profiel in verband met de relatief eenvoudige verbindingsmogelijkheden met andere constructie-elementen. Een HE200A is getoetst voor de gootprofielen.

De sterkte-toets van het gootprofiel resulteert in een unity check van 0,43. De stabiliteitstoets resulteert in een unity check van 0,46. De profielen voldoen aan de stijfheidseis met een maximale doorbuiging van 9,2 mm, terwijl 44,0 mm is toegestaan.

De unity checks zijn vrij ruim. De glasdragers (HE100AA) sluiten namelijk op het gootprofiel aan. En om deze verbindingen eenvoudig te kunnen maken, is gekozen voor een ruimer profiel.

8.6 Glasdragers

Voor de glasdragers zijn HE100AA-profielen toegepast.

De sterkte-toets van de glasdragers resulteert in een unity check van 0,26 en het profiel voldoet daarmee ruim. Dit komt door de praktische keuze van het profiel in verband met de gewenste oplegbreedte ten behoeve van de glasbevestiging.

De profielen voldoen aan de stijfheidseis met een maximale doorbuiging van 6,3 mm, terwijl 12,4 mm is toegestaan.

Voor verduidelijking van de constructie wordt verwezen naar het deel 'tekeningen' dat deel uitmaakt van deze rapportage.

9. Conclusie en aanbevelingen

In dit hoofdstuk wordt er bekeken of de eerder gestelde doelstelling gehaald is en of er aanbevelingen zijn voor eventuele vervolgonderzoeken of – projecten.

9.1 Conclusie

De doelstelling van het afstudeerproject luidt als volgt:

Het optimaliseren van het door Movares ontwikkelde concept voor “De Duurzame Weg” en het verfijnen en constructief onderbouwen hiervan. Buiten de constructieve aspecten zullen tevens de afbouwtechnische aspecten in acht worden genomen, zoals de bevestiging van de koud gebogen glasplaten op de onderliggende constructie.

Het uiteindelijke (constructieve) ontwerp voor De Duurzame Weg is tot stand gekomen door een aantal variantenonderzoeken. Binnen deze variantenonderzoeken zijn de verschillende mogelijkheden uitvoerig met elkaar vergeleken wat steeds heeft geleid tot een definitieve goed onderbouwde keuze. De Duurzame Weg is hierdoor verfijnd en constructief onderbouwd. Tevens zijn de bouwtechnische aspecten in acht genomen. Het glas maakt bijvoorbeeld deel uit van het constructieve systeem; de glasplaten nemen de windwrijving in langsrichting op. Tevens is er rekening gehouden met het plaatsen van een goot.

Er kan dus geconcludeerd worden dat aan de doelstelling van dit afstudeerproject is voldaan.

Een aantal zaken dient echter uitvoeriger te worden onderzocht. Een en ander zal in de volgende paragraaf worden besproken.

9.2 Aanbevelingen

Tijdens het afstudeerproject werd er op een aantal ‘problemen’ gestuit waarvoor in dit afstudeerproject geen ruimte was. Deze ‘problemen’ dienen echter wel verder onderzocht te worden om van het geheel een goed werkend systeem te maken.

De verschillende aanbevelingen zullen hieronder worden genoemd.

Verlijmen van de koudgebogen glasplaten

In dit afstudeerproject is aangetoond dat de koudgebogen glasplaten de windwrijving in langsrichting op kunnen nemen. Het verlijmen van koudgebogen glasplaten verdient echter wel extra aandacht. Er zal onderzocht moeten worden of het in de praktijk ook daadwerkelijk zo werkt zoals in dit rapport is aangetoond. Kan het glas direct op de stalen constructie worden verlijmd of dienen de glasplaten in stalen frames te worden verlijmd? En hoe gedraagt de lijm/kit zich als deze loodrecht op de lengteas wordt belast?

Bouwkundige afwerking

De bouwkundige aspecten zijn in dit project in acht genomen, echter hadden ze niet de hoogste prioriteit. Hierbij valt te denken aan de bevestiging van de koudgebogen glasplaten (hangt samen met het verlijmen van de koudgebogen glasplaten), het maken van een goot en het luchtdicht maken van de kap. Een en ander zal tot stand kunnen komen door samenwerking tussen een constructeur en een bouwtechnicus.

Uitvoeringsaspect

Aangezien er over een bestaande weg gebouwd gaat worden, speelt het uitvoeringsaspect een belangrijke rol. Het is namelijk niet wenselijk om de weg af te zetten. Er moet worden nagedacht hoe er op een slimme manier gebouwd kan worden, zodanig dat de weg niet of nauwelijks hoeft te worden afgezet. Hierbij kan gedacht worden aan bijvoorbeeld de overkapping naast de snelweg opbouwen, zodat de weg alleen tijdens het plaatsen hoeft te worden afgezet. Of een valbescherming onder de kap zodat het glas kan worden aangebracht en het verkeer zonder hinder door kan rijden.

Begin en eind van de overkapping

Het begin en het eind van de overkapping moeten nog ontworpen worden. Hierbij moet rekening worden gehouden dat de luchtstroom die aanwezig is in de overkapping in stand wordt gehouden. Er moet ook een luchtzuiveringsinstallatie worden geplaatst die de verontreinigde lucht zuivert, voordat de lucht de overkapping verlaat.

Op- en afritten

Een snelweg bevat uiteraard op- en afritten. De overkapping moet hier worden doorgezet. Er zal een goede aansluiting ontworpen moeten worden tussen het rechte stuk snelweg en de op- en afritten.

10. Reflectie

Na een kleine twee jaar is mijn afstuderen ten einde gelopen. In dit laatste hoofdstuk volgt een reflectie op mijn afstudeerperiode.

Ik ben mijn afstuderen bij Movares begonnen in februari 2009. De eerste paar maanden was ik voornamelijk bezig met het opstellen van het afstudeerplan bestaande uit een aanleiding, probleemstelling en doelstelling. Deze doelstelling heb ik zo geformuleerd om zodoende er altijd op terug te kunnen vallen. Na het opstellen van het afstudeerplan volgde het vooronderzoek waarbij De Duurzame Weg onder de loep is genomen. Wat ik van deze periode heb geleerd is dat je te allen tijde je bevindingen goed moet formuleren; ga altijd na waarom je iets typt en is het duidelijk voor de lezer.

De tweede periode van mijn afstuderen betrof het variantenonderzoek. Al snel werd duidelijk dat er nooit maar één goede oplossing bestaat. Door het opstellen van duidelijke uitgangspunten en randvoorwaarden en door onderling afwegingen te maken en te selecteren, blijft een goed werkende oplossing over.

Tijdens de laatste periode van mijn afstuderen, ben ik bezig geweest met het maken van definitieve berekeningen, overzichtstekeningen en details. Bij het maken van de definitieve berekeningen werd duidelijk dat de uitkomsten van computerprogramma's niet altijd de juiste uitkomsten waren. Een leermomentje; ga (handmatig) na of de uitkomsten logisch zijn. Bij het maken van de detaillering heb ik geleerd om te bedenken welke krachten in het knooppunt zitten en hoe deze worden afgedragen naar de fundering. De bouwtechnische aspecten zijn wel minder beduidend geweest in het project. Er is wel over nagedacht, maar een en ander zou in samenwerking met een bouwtechnicus beter uitgedacht kunnen worden.

Conclusie: het afstuderen is voor mij de leerzaamste periode geweest op de TU/e. Na twee jaar afstuderen is het nu hoog tijd voor een nieuwe uitdaging.

Bronnen

Boeken

- Nijenhuis, W. & W. van Winden (2007). *De diabolische snelweg*. Rotterdam: Uitgeverij 010.
- Verburg, W.H. et al (1996). *(Over)spannend staal: deel 1 – Basisboek*. Den Haag: Koninklijke De Swart.
- Man, G. de et al (2001). *(Over)spannend staal: deel 2 – Construeren A*. Den Haag: Koninklijke De Swart.
- Man, G. de et al (2006). *(Over)spannend staal: deel 3 – Construeren B*. Den Haag: Koninklijke De Swart.
- Man, G. de et al (2006). *(Over)spannend staal: deel 4 – Rekenvoorbeelden*. Den Haag: Koninklijke De Swart.
- Broek, T.J. van de (2007). *(Over)spannend staal: deel 5 – Staalprofielen*. Den Haag: Koninklijke De Swart.
- Brouwer, J.J.M. (2000). *Jellema 2 – Onderbouw – bouwtechniek*. Utrecht/Zutphen: ThiemeMeuelenhoff.
- Spierings, T.G.M. et al (1998). *Jellema 3 – Draagstructuur – bouwtechniek*. Utrecht/Zutphen: ThiemeMeuelenhoff.
- Quist, P.G. et al (2002). *Jellema 4a – Omhulling – prestatie-eisen/daken – bouwtechniek*. Utrecht/Zutphen: ThiemeMeuelenhoff.
- Rentier, Ch. et al (2001). *Jellema 4b – Omhulling – gevels – bouwtechniek*. Utrecht/Zutphen: ThiemeMeuelenhoff.
- Hakkers, B. et al (2000). *Jellema 4c – Omhulling – gevelopeningen – bouwtechniek*. Utrecht/Zutphen: ThiemeMeuelenhoff.

Documenten

- Bos, C.W.J. e.a. (2006). *TNO-Rapport GreenRoad (concept)*. Delft: TNO Bouw en Ondergrond.
- Cornelissen, T. (2007). *Overkappen van wegen en luchtbehandeling; een maatregel voor de luchtkwaliteit langs hoofdwegen (Rapportnummer: DWW-2007-009)*. Delft: Dienst Weg- en Waterbouwkunde.
- Hamers, D. & K. Nabielek (2006). *Bloeiende berm; Verstedelijking langs de snelweg*. Rotterdam: NAI Uitgevers.
- DHV in samenwerking met NIO architecten (2006), *Lichte overkapping voor autosnelwegen; Haalbaarheidsstudie naar het overkappen van wegen om plaatselijk de luchtkwaliteit te verbeteren (Conceptueel Ontwerp) – dossier: X4111.01.001, registratienummer: DT-SE20060322, versie 1*.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2004). *Veiligheids Richtlijnen Deel C; Basismaatregelen (versie 1.0 januari 2004)*.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2005). *VRC Richtlijnen; Hoofdstuk 11 – Vluchten (versie 7.0 7 september 2005)*.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2005). *Specifieke Aspecten TunnelOntwerp (versie 2005)*.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2005). *Nota Mobiliteit; Deel III Kabinetstandpunt (versie 2 september 2005)*.

- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2006). *Nota Mobiliteit; Deel IV Kabinetstandpunt (versie april 2006)*.
- Ministeries van VROM, LNV, VenW en EZ (2006). *Nota Ruimte, Ruimte voor ontwikkeling; Deel 4: tekst na parlementaire instemming (versie 17 januari 2006)*.
- Technische Universiteit Eindhoven – Faculteit Bouwkunde – Lichtenberg, L.N. en G.J.M. van der Zanden (2006). *Toepassing van de Booghal als overkapping van autowegen ter bestrijding van de fijnstof en NO₂ problematiek; Een technisch / economisch haalbaarheidsonderzoek (versie 20 maart 2006)*.
- Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (2006). *Besluit geluidhinder (BWBR0020445 – geldigheidsdatum 28 februari 2006)*.
- Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (2009). *Wet geluidhinder (BWBR0003227 – geldigheidsdatum 10 maart 2009)*.

Documenten Movares

- Vákár, L.I. (2008). *Businesscase De Duurzame Weg A73/A74 te Venlo* (Kenmerk LC-LIV-080027602 – Versie 1.0, Movares Nederland B.V.)
- Heijde, M.R.C. van der (2008). *Amsterdam Sloterdijk Spoor 9/10 (Halte Hemboog) Sporenkap; Besteksberekening* (Kenmerk LC-C.B-080004812 – Versie 1.0, Movares Nederland B.V.)

Afstudeerverslagen en proefschriften

- Huvener, E.M.P. (2009). *Circumferentially adhesive bonded glass panes for bracing steel frames in facades*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- Louw, K. de (2007). *Design rule for lateral torsional buckling of channel sections*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.

Kranten- en tijdschriftartikelen

- Calis, M. & F. Tamsma (19 januari 2009). *Fijnstofgrens maakt nog geen frisse lucht*. *Deventer Dagblad*.
- Heijde, P. van der (7 december 2004). *Stedelijke ontwikkeling rond snelwegen; Mogelijkheden en problemen bij bouwen boven en langs hoofdinfrastructuur*. *Building Business*.
- Pleijster, E. & C. van der Veeke (oktober 2002). *Visie of blik op de weg? Rooilijn*, 8, p. 392 – 396.

NEN-Normen

- Normcommissie 351 001 “Technische Grondslagen voor Bouwconstructies” (2007). *NEN 6702 Technische grondslagen voor bouwconstructies – TGB 1990 – Belastingen en vervormingen*. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.
- Normcommissie 351 001 “Technische Grondslagen voor Bouwconstructies” (1997). *NEN 6770 Technische grondslagen voor bouwconstructies – TGB 1990 – Staalconstructies – Basiseisen en basisregels voor overwegend statisch belaste constructies*. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.
- Normcommissie 351 001 “Technische Grondslagen voor Bouwconstructies” (2000). *NEN 6771 Technische grondslagen voor bouwconstructies – TGB 1990 – Staalconstructies – Stabiliteit*. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.

Internetbronnen

- BRS Groep (z.d.).
<http://www.brs.nl/>
- Den Haag Nieuw Centrum (z.d.).
<http://www.denhaagnieuwcentrum.nl/>
- Freeformglass® (z.d.).
<http://www.freeformglass.nl/>
- Movares Nederland B.V. (z.d.).
<http://www.movares.nl/Home.htm>
- Road Energy Systems® (z.d.).
<http://www.roadenergysystems.nl/>
- Jomy BV (z.d.)
<http://www.jomy.nl>
- Fundex Group (z.d.)
<http://www.fundexgroup.com>
- KonstruKom (z.d.).
<http://www.konstruKom.nl>
- Gabel Rubber en Vilt BV (z.d.)
<http://www.gabel.nl>
- Vebo Beton & Staal (z.d.)
<http://www.vebo.nl>
- Reisner & Wolff Engineering (z.d.)
<http://www.reisnerwolff.at>