

TNO-rapport**TNO-060-DTM-2012-00423****Onderzoek naar de oorzaak van het ongeval
in de Grolsch Veste - Deelrapport C:
Constructieve beoordeling van de overkapping****Technical Sciences**Van Mourik Broekmanweg 6
2628 XE Delft
Postbus 49
2600 AA Delftwww.tno.nlT +31 88 866 30 00
F +31 88 866 30 10
infodesk@tno.nl

Datum	7 februari 2012
Auteur(s)	Ir. L.M. Abspoel Ir. H.G. Burggraaf Ir. H. Borsje
Aantal pagina's	36 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	Arbeidsinspectie (namens het Openbaar Ministerie) Onderzoeksraad voor Veiligheid
Projectnaam	Ongeval Grolsch Veste
Projectnummer	054.01688/01.01

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

© 2012 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Algemene informatie	5
3	Second opinion oorspronkelijke constructieberekening	7
3.1	Algemeen.....	7
3.2	Opmerkingen op de berekeningen	8
3.3	Samenvattend.....	11
4	Uitgangspunten voor de constructieve beoordeling	12
4.1	Algemeen.....	12
4.2	Modellering van de constructie.....	12
4.3	Belastingen op de hoofddraagconstructie	13
4.4	Getoetste constructieve aspecten	14
5	Resultaten van de constructieve beoordeling.....	15
5.1	Beoordeling gerealiseerde situatie	15
5.2	Beoordeling situatie inclusief koppelstaven.....	17
6	Conclusies van de constructieve beoordeling	20
7	Documenten – specifiek voor deelrapport C	21
8	Ondertekening	22
	Bijlage(n)	
	A Beschrijving computermodel voor constructieberekeningen	

1 Inleiding

Op donderdag 7 juli 2011 heeft bij De Grolsch Veste een ongeval plaatsvonden. Tijdens bouwwerkzaamheden in verband met de overkapping van de 2^e ring, aan de korte zijde van het stadion, is een deel van die overkapping ingestort.

Teneinde de oorzaak van dit ongeval te achterhalen zijn de Onderzoeksraad voor Veiligheid, het Openbaar Ministerie en de Arbeidsinspectie een onderzoek gestart. In het kader van het onderzoek hebben deze partijen aan TNO ondersteuning gevraagd. Het onderzoek door TNO is uitgevoerd in gezamenlijke opdracht van de Arbeidsinspectie (namens het Openbaar Ministerie) en de Onderzoeksraad voor Veiligheid.

Het onderzoek dat door TNO is uitgevoerd heeft bestaan uit het beoordelen van de door de Arbeidsinspectie beschikbaar gestelde stukken met betrekking tot het projectdossier en het uitgevoerde veldonderzoek. Verder heeft TNO de overkapping constructief beoordeeld. De resultaten van deze onderzoeken zijn door TNO gebruikt voor een analyse van de oorzaak van de instorting.

Van de verschillende onderdelen van het onderzoek zijn separate rapportages opgesteld. Deze deelrapportages zijn:

- Rapport TNO-060-DTM-2012-00421; deelrapport A: Algemene informatie
- Rapport TNO-060-DTM-2012-00422; deelrapport B: Veldonderzoek
- Rapport TNO-060-DTM-2012-00423; deelrapport C: Constructieve beoordeling van de overkapping
- Rapport TNO-060-DTM-2012-00424; deelrapport D: Analyse van de oorzaak van de instorting
- Rapport TNO-060-DTM-2012-00425; deelrapport E: Foto's

De onderhavige rapportage is deelrapport C, met de resultaten van de constructieve beoordeling van de overkapping. In dit rapport geeft hoofdstuk 2 enige algemene informatie over de coderingen die zijn gebruikt voor de plaatsbepaling. Hoofdstuk 3 geeft een second opinion met betrekking tot de oorspronkelijke constructieberekening van de overkapping. Daarna geeft hoofdstuk 4 de uitgangspunten voor de constructieve beoordeling van de overkapping ten tijde van de instorting en geeft hoofdstuk 5 de resultaten van die constructieve beoordeling. Hoofdstuk 6 geeft de conclusies van de constructieve beoordeling. In het kader van de constructieve beoordeling van de overkapping is een aantal algemene documenten geraadpleegd. Hoofdstuk 7 geeft een overzicht van deze documenten. Ten slotte geeft hoofdstuk 8 de ondertekening.

In aanvulling op het voorgaande geldt:

- Op diverse plaatsen in de deelrapporten wordt verwezen naar de stukken die ten behoeve van het onderzoek beschikbaar zijn gesteld door de Arbeidsinspectie. Deze verwijzing is gedaan in de vorm van [...], met tussen de haakjes het documentnummer. Een overzicht van deze documenten is opgenomen in deelrapport A (hoofdstuk 3 en bijlage A).
- In dit deelrapport wordt op diverse plaatsen verwezen naar algemene documenten die zijn geraadpleegd. De verwijzing naar deze documenten is gedaan in de vorm van [N....]. Hoofdstuk 7 geeft een overzicht van die documenten.
- Ten behoeve van de plaatsbepaling in het project is gebruik gemaakt van de nummering van de spanten, zoals aangegeven op de oorspronkelijke construc-

tietekeningen en van een codering van de knooppunten van de spanten. De figuren met deze coderingen zijn opgenomen in hoofdstuk 2 van het onderhavige deelrapport.

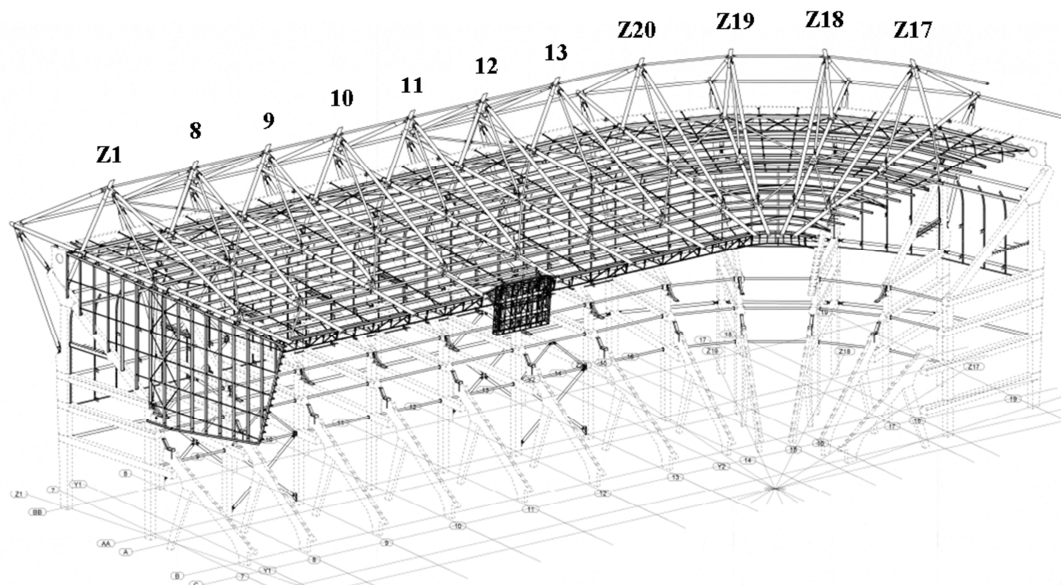
2 Algemene informatie

Ten behoeve van de plaatsbepaling in de constructie zijn de elf spanten van de U-uitbreiding gecodeerd aan de hand van de spannummers die zijn weergegeven op de beschikbaar gestelde constructietekeningen. Deze codering is als volgt (figuur 2.1):

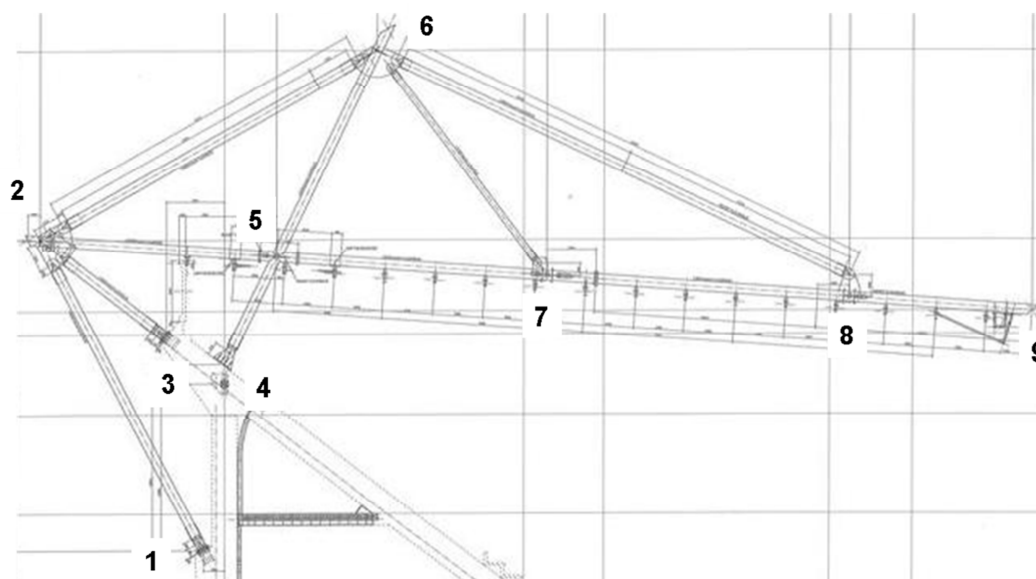
- De vier spanten in de hoek die aansluit aan de L-uitbreiding zijn, vanaf de L-uitbreiding, gecodeerd met Z17 tot en met Z20.
- De zes daarop volgende spanten, die loodrecht op de lengterichting van de tribune zijn gesitueerd, zijn achtereenvolgens gecodeerd van 13 tot en met 8.
- Het eindspant is gecodeerd met Z1.

Voor de plaatsbepaling is verder gebruik gemaakt van de coderingen binnen- en buitenzijde, die betrekking hebben op de binnen- en de buitenzijde van het stadion.

Ten slotte zijn de knooppunten van de spanten gecodeerd met de cijfers 1 tot en met 9, zoals weergegeven in figuur 2.2.



Figuur 2.1: Codering spanten (aanzicht vanaf binnenzijde stadion)



Figuur 2.2: Codering knooppunten van de spanten

3 Second opinion oorspronkelijke constructieberekening

3.1 Algemeen

Teneinde inzicht te verkrijgen in de constructieve aspecten van de overkapping van de U-uitbreiding, is de oorspronkelijke constructieberekening van de overkapping van de U-uitbreiding beoordeeld. Daar waar voor de berekening van een aantal constructie elementen van de U-uitbreiding wordt verwezen naar de berekening van de L-uitbreiding, is het betreffende onderdeel van de berekening van de L-uitbreiding beoordeeld.

De second opinion beperkt zich tot de berekening van de stalen hoofddraagconstructie van de overkapping van de U-uitbreiding. De berekening van de betonnen tribune is buiten beschouwing gelaten, omdat alleen de staalconstructie van de overkapping is ingestort en de verankering van die staalconstructie aan de betonnen tribuneconstructie niet is bezwaken.

De voor deze second opinion benodigde documenten zijn door de Arbeidsinspectie geselecteerd uit de dossiers van de gemeente Enschede ([A.03] en [A.04]). Vanuit het dossier van de gemeente Enschede met betrekking tot de U-uitbreiding [A.03] zijn dit de volgende documenten:

- Document [D.06] betreft een statische berekening van de staalconstructie van de U-uitbreiding en is gedateerd op 27 augustus 2010. In deze berekening wordt voor het berekenen van de gordingen en spanten verwezen naar de L-uitbreiding.
- Document [D.07] betreft de gewichts- en stabiliteitsberekening van de prefab betonconstructie en is gedateerd op 27 augustus 2010. Deze berekening heeft niet direct betrekking op de stalen hoofddraagconstructie. Van deze berekening zijn daarom alleen de uitgangspunten en de berekening van één spanttype (type 2; de spanten 10 en 11) beoordeeld, omdat dit het zwaarst belaste spanttype is.

Vanuit het dossier van de gemeente Enschede met betrekking tot de L-uitbreiding [A.04], zijn dit de volgende documenten:

- Document [D.01] betreft een tekening met een plattegrond van de overkapping van de L-uitbreiding en is gedateerd op 27 augustus 2007. Op deze tekening zijn gewichten aangegeven van de elektrotechnische installaties aan de overkapping van de L-uitbreiding.
- Document [D.02] betreft een statische berekening van de staalconstructie van de L-uitbreiding en is gedateerd op 28 september 2007. De berekening van de stalen hoofddraagconstructie van de L-uitbreiding is een onderdeel van dit document. In dit document zijn met een rode kleur opmerkingen van de gemeente Enschede geschreven (in het dossier van de gemeente Enschede is dit document samengevoegd met document [D.03]).
- Document [D.03] betreft een e-mail d.d. 9 oktober 2007, met daarin opgenomen de opmerkingen van de gemeente Enschede op document [D.02]. Verder bevat dit document de reactie van de constructeur op de opmerkingen van de gemeente Enschede, inclusief aanvullende tekeningen en berekeningen.

- Document [D.04] betreft een statische berekening van de staalconstructie van de L-uitbreiding en is gedateerd op 10 oktober 2007. In deze berekening worden de stalen spanten van de hoofddraagconstructie van de L-uitbreiding doorgerekend aan de hand van de gegevens van de volgens tekening [D.01] aanwezige installaties.
- Document [D.05] betreft een statische berekening van de voorzieningen ten behoeve van de vidi-wall op as 10 en 11 van de L-uitbreiding en is gedateerd op 12 augustus 2008.

De second opinion omvat het beoordelen van de berekeningen op de volgende punten:

- Algemene uitgangspunten.
- Schematisatie van de constructie
- Belastingen (locatie en grootte)
- Interpretatie van de resultaten van de berekeningen
- Vergelijking resultaat berekeningen met constructietekeningen.

Naast de inhoud van de berekeningen, wordt ook ingegaan op de volledigheid van de berekeningen.

3.2 Opmerkingen op de berekeningen

3.2.1 Algemene uitgangspunten

De van toepassing zijnde normen voor de stalen hoofddraagconstructie van de overkapping zijn:

- Voor de belastingen NEN 6702: "Technische grondslagen voor bouwconstructies, TGB 1990 – Belastingen en vervormingen".[N.07]
- Voor de toetsing van de uiterste grenstoestand NEN 6770: "Technische grondslagen voor bouwconstructies, TGB 1990 – Staalconstructies – Basiseisen en basisrekenregels voor overwegend statisch belaste constructies". [N.06].

Deze twee normen zijn toegepast in de berekening.

Conform NEN 6702 [N.07] wordt de hoofddraagconstructie van de overkapping, voor de gebruiksfase, ingedeeld in veiligheidsklasse 3 met een referentieperiode van 50 jaar.

Dit is in de berekeningen op een juiste wijze gedefinieerd.

In de documenten [D.02], [D.04], [D.05], [D.06] en [D.07] is bij de algemene uitgangspunten aangegeven: *"Belastingen die ontstaan t.g.v. de uitvoering dienen door de aannemer tijdig te worden opgegeven en gecoördineerd met o.a. zijn leveranciers. Tenzij anders vermeld zijn deze niet verwerkt in de berekening."* De beschikbaar gestelde berekeningen hebben derhalve alleen betrekking op de hoofddraagconstructie in de uiteindelijk beoogde situatie.

3.2.2 Schematisatie van de constructie

De schematisatie van de hoofddraagconstructie van de overkapping geeft aanleiding tot de volgende opmerkingen:

a. Scharnieren in de onderregel van de spanten

In de berekeningen [D.04] en [D.07] is in de onderregel van de spanten, ter plaatse van knooppunt 5, een scharnier geschematiseerd, hetgeen in de gerealiseerde situatie niet het geval is. Het al dan niet aanwezig zijn van een scharnier ter plaatse van knooppunt 5 beïnvloedt de krachtswerking in de spanten en daarmee de dimensionering van de profielen en de belasting uit de spanten op de betonnen tribune elementen. De exacte invloed op de dimensionering van de individuele onderdelen van de spanten is onbekend.

b. Staaft ter plaatse van betonnen gevelelement

Ter plaatse van het betonnen gevelelement aan de bovenzijde van de tribune is een staaf geschematiseerd [D.07]. Uit de figuren is niet op te maken of deze staaf in het model al dan niet een dragende functie heeft, of alleen is toegepast ten behoeve van de inleiding van een belasting. Wanneer deze staaf als dragend element is gemodelleerd heeft dit invloed op de belastingafdracht van de spanten op de betonnen tribune elementen.

c. Geschoord (star of flexibel)/ Ongeschoord

In de berekeningen [D.02] tot en met [D.04] zijn de spanten zowel in de y-richting als in de z-richting geschoord aangenomen. Er is niet aangetoond dat dit een terechte aanname is (NEN 6770 10.1.3.2 [N.06]).

3.2.3 Belastingen

De in de berekeningen van de hoofddraagconstructie aangehouden belastingen geven aanleiding tot de volgende opmerkingen:

a. Permanente belasting

- i In de gewichtsberekening [D.07] is ten behoeve van de belasting uit installaties op elk spant een puntlast van 20 kN gemodelleerd aan het einde van het spant. Het gewicht van de vidi-wall, inclusief het frame waarop het is gemonteerd en inclusief de erachter gesitueerde ophangconstructie, bedraagt 91,0 kN (deelrapport B, hoofdstuk 5), wat een belasting van 45,5 kN per spant geeft. De aangenomen 20 kN in de berekening is dus onvoldoende. Voor de spanten 10 en 11 is wel een aanvullende berekening gemaakt ter controle van de spanten op deze hogere belasting [D.05], maar voor de gewichtsberekening [D.07] is geen aanvulling gemaakt.
- ii Belasting "F2,ver" op pagina 201 (spant 2) [D.07] is ongelijk aan de in het model op pagina 204 opgegeven belasting.
- iii Onbekend is op welke wijze de belasting ten gevolge van de gootconstructie, de reclameborden en de belasting ten gevolge van de opvang van regenwater is bepaald. [D.01] en [D.04] (pagina 5).
- iv Onbekend is hoe de tribuneverlichting is meegenomen in de belasting [D.01] en [D.04].
- v De kabelgoot aan spant 9 en spant 12 bevindt zich volgens de tekening van document [D.01] op een andere plaats dan aangegeven in [D.04] op pagina 200.
- vi De veldverlichting, zoals aangenomen op spant 9 en spant 12 [D.04], is niet aanwezig volgens de tekening uit document [D.01].
- vii De belasting uit de luidspreker (1 kN) volgens [D.01] is niet meegenomen in [D.04].
- viii Onbekend is wat bedoeld wordt met de belasting ten gevolge de ophangpunten van de 'kabelbaan' op spant 8 en spant 13 [D.04].

b. Veranderlijke belasting

- i Het gewicht van de hangbruggen is niet opgenomen in de berekening [D.04].

c. Windbelasting

- i In NEN 6702 bijlage A [N.07] is beschreven dat het aangrijppunt van de resulterende windkracht op eenzijdig hellende overkappingen ligt op $\frac{1}{4}$ van de overspanning vanaf de loefzijde. Dit is niet meegenomen in de schematisatie van de windbelasting in [D.04].
Document [D.03; bijlage 6] geeft wel een berekening van de spanten met het aangrijppunt van de windbelasting op $\frac{1}{4}$ vanaf de loefzijde. Hier wordt een algemene berekening gemaakt voor alle spanten en alleen voor neerwaartse winddruk. Er wordt geen conclusie getrokken over het doorwerken van de resultaten van deze berekening voor de specifieke spanten (bijvoorbeeld de spanten 10 en 11). Ook de gecorrigeerde berekening van de opwaartse winddruk is niet aanwezig.
- ii In de omschrijving van de belastinggevallen in [D.02] en [D.04] zijn de windrichtingen omgedraaid: bij het belastinggeval 'wind van links' komt de wind van rechts. Bij het belastinggeval 'wind van rechts' komt de wind van links. Dit is van invloed op de berekening wanneer de opwaartse of neerwaartse windbelasting wordt gecombineerd met windbelasting op andere elementen (zoals de vidi-wall), met windwrijving en krachten in de onderregel van de spanten ten gevolge van het stabiliteitssysteem.
- iii In de belastinggevallen voor windbelasting in [D.02] en [D.04] is ook een belasting van 1/-1 kN/m' in de lokale x-richting van het dak opgenomen. Onduidelijk is of dit de windwrijving is.
- iv Voor alle spanten, met uitzondering van de spanten 10 en 11, is een berekening gemaakt [D.04] waarin de permanente belasting ten gevolge van technische installaties niet is meegenomen. Dit daar voor een aantal staven de belastingcombinatie met opwaartse windbelasting maatgevend is. Gezien het gewicht van de vidi-wall is deze aanvullende berekening juist voor de assen 10 en 11 van belang.
- v De onderregel van het eindspant is wel gecontroleerd op wind loodrecht op het spant ([D.02], pagina 237 - 239), maar de combinatie met verticale belasting wordt niet gemaakt.
- vi Op pagina 420 van [D.02] is een extra trekkracht ten gevolge van een combinatie van wind uit twee richtingen op spantdeel 2-3 aan de achterkant van het spant geplaatst in belastinggeval 4. De waarde van deze extra trekkracht is 130 kN. Dit zou 310 kN moeten zijn.

3.2.4 Interpretatie van de resultaten van de berekeningen

De controle van de verschillende spantdelen en het stabiliteitsverband is uitgevoerd met behulp van de zogenaamde unity-check (u.c.-waarde). Deze u.c.-waarde wordt berekend als het quotiënt van het belastingseffect en de sterkte. Aan de sterkte-eis wordt voldaan indien de u.c.-waarde niet groter is dan 1,0.

Uit een vergelijking van de optredende spanning in de spantdelen met de opneembare spanning door deze spantdelen volgt dat de constructie op basis van de in de berekening aangenomen uitgangspunten voldoet, daar alle unity checks kleiner zijn dan 1,0.

3.2.5 Vergelijking resultaat berekeningen met constructietekeningen

Een vergelijking tussen de resultaten van de berekeningen en de beschikbaar gestelde constructietekeningen geeft aanleiding tot de volgende opmerkingen:

a. De wanddikte van de profielen:

- i Voor de wanddikte van de stabiliteitsverbanden in het dak is in de stabiliteitsberekeningen [D.02] (pagina 334) en [D.06] (pagina 7 (blad 473)), ten behoeve van de modellering van het gehele dak', uitgegaan van een wanddikte van 8 mm (code B219.1/8). Daarnaast is in de berekening ter controle van een individueel deel van het stabiliteitsverband uitgegaan van een wanddikte van 6,3 mm (code B219.1/6,3) [D.02] (pagina 400). In tekening [T.07] is voor de wanddikte van die stabiliteitsverbanden 4 mm (code B193.7/4) aangegeven.
- ii De wanddikten van de verschillende onderdelen van spant type 2 (de spanten 10 en 11) in het model [D.07], zijn afwijkend van de wanddikten van deze onderdelen in tekening [T.03].
- iii Voor spantdeel 1-2 (profiel type 5) van de spanten 8 en 13 is in het model [D.04] een wanddikte van 22,2 mm aangehouden. Op de tekening [T.01] is deze wanddikte 20 mm.
- iv Voor spantdeel 6-7 (profiel type 7) van de spanten Z16 en Z10 is in het model [D.04] een wanddikte van 22,5 mm aangehouden. Op de tekening [T.04], van het overeenkomstige spant Z1, is deze wanddikte 22,2 mm.
- v Voor spantdeel 2-6 (profiel type 3) van de spanten Z16 en Z10 is in het model [D.04] een wanddikte van 10 mm aangehouden. Op de tekening [T.04], van het overeenkomstige spant Z1, is deze wanddikte 12,5 mm.
- vi Voor spantdeel 1-2 (profiel type 2) van de spanten Z16 en Z10 is in het model [D.04] een wanddikte van 12,5 mm aangehouden. Op de tekening [T.04], van het overeenkomstige spant Z1, is deze wanddikte 14,2 mm.
- vii Voor de profiel typen 3 en 5 van de stabiliteitsverbanden tussen de betonspanten is in het model [D.02] (pagina 455) een wanddikte van 8 mm aangehouden. Op tekening 'G3 map 6 overzicht staal tussen betonnen spanten/ scan 8917/aanzicht as BB/ Buiten-as' is voor de stabiliteitsverbanden boven 9,362 m de wanddikte 6,3 mm aangegeven, voor de wanddikte van de stabiliteitsverbanden onder 9,362m is 10 mm aangegeven.
- viii Voor profiel type 3 van de stabiliteitsverbanden tussen de betonspanten is in het model [D.02] (pagina 462) een wanddikte van 8 mm aangehouden. Op tekening 'G3 map 6 overzicht staal tussen betonnen spanten/ scan 8917/aanzicht as AA/ Binnen-as' is voor de stabiliteitsverbanden de wanddikte 6,3 mm aangegeven.

b. Materialen:

- i Op de tekening [T.07] zijn geen materiaalkwaliteiten aangegeven.

3.3 Samenvattend

De second opinion van de oorspronkelijke constructieberekeningen van de overkapping van de U-uitbreiding heeft aanleiding gegeven tot een aantal opmerkingen. Een deel van deze opmerkingen heeft een negatieve invloed op de resultaten van de constructieberekeningen en dus op het veiligheidsniveau van de hoofddraagconstructie van de overkapping.

Teneinde vast te stellen wat de daadwerkelijke invloed is van deze opmerkingen op het veiligheidsniveau van de hoofddraagconstructie van de overkapping, wordt geadviseerd om in overleg te treden met de oorspronkelijke constructeur(s).

4 Uitgangspunten voor de constructieve beoordeling

4.1 Algemeen

Teneinde na te gaan of de instorting rekenkundig verklaard kan worden, is de overkapping constructief beoordeeld. Omdat de bouw van de overkapping ten tijde van de instorting nog niet was afgerond, is de daadwerkelijk gerealiseerde situatie beoordeeld. Dit betreft de situatie met de ten tijde van de instorting gerealiseerde hoofddraagconstructie van de overkapping in combinatie met de aanwezige belastingen. Deze situatie wordt in het vervolg van dit rapport aangeduid met de “gerealiseerde situatie”.

In de “gerealiseerde situatie” ontbraken van de hoofddraagconstructie een aantal stabiliteitsverbanden en koppelstaven. Omdat uit een eerste, kwalitatieve, analyse van de hoofddraagconstructie volgt dat het ontbreken van de koppelstaven aan de buitenzijde van de overkapping (tussen de knooppunten 2 van de spanten) een belangrijke invloed heeft op het constructief gedrag van de spanten, is aanvullend beoordeeld of de hoofddraagconstructie ook ingestort zou zijn, als de ten tijde van de instorting ontbrekende koppelstaven aan de buitenzijde van de overkapping wel gemonteerd zouden zijn. Op deze wijze wordt inzicht verkregen in het effect van het niet monteren van die koppelstaven.

Deze situatie wordt in het vervolg van dit rapport aangeduid met de “situatie inclusief koppelstaven”.

De situatie waarbij naast de koppelstaven ook de stabiliteitsverbanden zijn gemonteerd is niet constructief beoordeeld, omdat die situatie gelijk is aan of gunstiger is dan de situatie waarbij alleen de koppelstaven zijn gemonteerd.

TNO heeft, ten behoeve van de constructieve beoordeling van de hoofddraagconstructie van de overkapping, zelf constructieberekeningen uitgevoerd. Deze constructieberekeningen zijn uitgevoerd met het eindige elementenprogramma DIANA. Een beschrijving van het toegepaste model is weergegeven in bijlage A.

4.2 Modelleren van de constructie

Ten behoeve van de beoordeling van het constructief gedrag van de overkapping is het deel vanaf spant 9 tot spant Z20 gemodelleerd. De reden hiervoor is als volgt:

- Het deel van de U-uitbreiding dat is ingestort is het deel van spant Z1 tot spant Z20. Spant Z20 is niet bezwaken en daarom is de dakconstructie tot aan spant Z20 gemodelleerd.
- Uit de opnamen van de beveiligingscamera's blijkt dat de drie spanten Z1, 8 en 9 na de spanten 10 en 11 zijn bezwaken (deelrapport B, hoofdstuk 3). Verder geldt dat deze drie spanten, direct voorafgaand aan de instorting, geen zijdelingse steun gaven aan de spanten 10 en 11, omdat er tussen die spanten nog onvoldoende stabiliteitsverbanden gemonteerd waren. Daarom zijn deze drie spanten niet als geheel in de constructieve beoordeling meegenomen. Van deze drie spanten is alleen spant 9 in de beoordeling meegenomen, in verband met de modellering van de dakconstructie aan spant 10.

De opbouw van de hoofddraagconstructie van spant 9 tot aan spant Z20 is gemodelleerd zoals daadwerkelijk gerealiseerd ten tijde van de instorting. Die opbouw is weergegeven in deelrapport B, hoofdstuk 4. Ook de dakconstructie is gemodelleerd zoals daadwerkelijk gerealiseerd ten tijde van de instorting (deelrapport B, hoofdstuk 4). Verder geldt dat er bij de modellering vanuit is gegaan dat de spantdelen 1-2 op een juiste wijze gemonteerd zijn (deelrapport D, hoofdstuk 4).

Aanvullend hieraan is ook de situatie inclusief koppelstaven gemodelleerd, dus inclusief de ten tijde van de instorting ontbrekende koppelstaven aan de buitenzijde van de spanten, tussen de knooppunten 2.

De afmetingen van de individuele onderdelen van de hoofddraagconstructie en de materiaaleigenschappen zijn overgenomen uit de tekeningen [T.01] tot en met [T.09]. In de beschrijving van het computermodel (bijlage A) zijn de waarden van de hiervoor genoemde eigenschappen weergegeven.

In de beschrijving van het computermodel (bijlage A) is ook aangegeven op welke wijze de aansluitingen van alle individuele onderdelen van de overkapping zijn gemodelleerd.

4.3 Belastingen op de hoofddraagconstructie

Ten tijde van de instorting was sprake van de volgende belastingen op de hoofddraagconstructie (deelrapport B, hoofdstuk 5):

- Eigen gewicht van de constructie
- Dakplaten
- Frame en goot aan dakrand
- Vidi-wall
- Frame van de eindwand
- Hangbruggen
- Elektrische installaties en bekabeling
- Personen

Uit informatie van het KNMI station Twente volgt dat ten tijde van de instorting het uurgemiddelde van de windsnelheid 3 m/s bedroeg en de hoogste windstoot 6 m/s. Verder blijkt uit die gegevens dat de windrichting circa 230 graden was. Dit is een wind uit zuid-westelijke richting.

Op basis van deze gegevens wordt geconcludeerd dat de windbelasting op het ingestorte deel van de U-uitbreiding, ten tijde van de instorting, verwaarloosbaar was. Enerzijds omdat de windsnelheid gering was en anderzijds omdat het ingestorte deel van de U-uitbreiding in de luwte lag van de lange zijde van de L-uitbreiding en het aansluitende, niet-ingestorte deel van de U-uitbreiding.

Voor de beoordeling van een ontworpen constructie in relatie tot de geldende normen wordt de totale belasting op de constructie in rekening gebracht, inclusief de voorgeschreven belastingsfactoren. Door het hanteren van belastingsfactoren wordt rekening gehouden met de mogelijkheid dat belastingen in ongunstige zin afwijken van de daadwerkelijk aanwezige waarden, onzekerheden in het belastingsmodel, de gevolgen van bezwijken van de constructie en de beschouwde grenstoestand. Bij toepassing van de in de normen vermelde belastingsfactoren mag worden aangenomen dat het wettelijk vereiste veiligheidsniveau aanwezig is.

Voor de beoordeling van de overkapping in relatie tot de mogelijkheid van instorten is de totale belasting op de overkapping in rekening gebracht, exclusief de voorge-

schreven belastingsfactoren. Deze waarden zijn voor de beoordeling van het feitelijke gedrag van de overkapping ten tijde van de instorting het meest representatief.

4.4 Getoetste constructieve aspecten

De norm NEN 6770 [N.06] bevat algemeen geldende rekenregels voor staalconstructies. Deze rekenregels zijn ook van toepassing op de hoofddraagconstructie van de overkapping. De rekenmethode zoals gedefinieerd in NEN 6770 [N.06] bestaat uit het schematiseren van de constructie en het vervolgens bepalen van de respons van de constructie.

De wijze waarop de schematisatie van de hoofddraagconstructie heeft plaatsgevonden is weergegeven in bijlage A. Daarbij is niet alleen aangegeven op welke wijze de verschillende onderdelen zijn gemodelleerd, maar is ook aangegeven op welke wijze de belastingen zijn ingevoerd.

Voor het bepalen van de respons van de hoofddraagconstructie is de gevoeligheid van de hoofddraagconstructie voor instabiliteit beoordeeld. De hiervoor toegepaste berekeningsmethodiek is de Euler stabiliteitsanalyse. Met behulp van een dergelijke analysetechniek wordt het in de kern niet-lineaire stabiliteitsverschijnsel, via een lineair elastische benadering opgelost. In deze aanpak is het begrip “n-waarde” belangrijk. Deze n-waarde, ook wel “Eulerse knikfactor” genoemd, is het quotiënt tussen de “knikkracht” (F_k) en de daadwerkelijk aanwezige belasting (F). De knikkracht is de belasting waarbij niet langer een evenwicht kan worden gevormd tussen de vervormingen en deze belasting.

Indien de n-waarde kleiner is dan 1,0, dan is er zeker sprake van instabiliteit van de constructie. Verder geldt, hoe hoger de n-waarde ten opzichte van 1,0, des te ongevoeliger de constructie is voor instabiliteit. Als de n-waarde groter is dan 10, dan mag de betreffende constructie beschouwd worden als ongevoelig voor instabiliteit.

5 Resultaten van de constructieve beoordeling

De constructieve beoordeling is uitgevoerd voor de gerealiseerde situatie en voor de situatie inclusief koppelstaven. De resultaten van deze beoordelingen zijn weergegeven in de volgende twee paragrafen.

5.1 Beoordeling gerealiseerde situatie

De gerealiseerde situatie betreft de situatie met de ten tijde van de instorting daadwerkelijk gerealiseerde opbouw van de constructie en de daadwerkelijk aanwezige belastingen.

5.1.1 Resultaten van de berekening

Met de Euler analyse is voor de gerealiseerde situatie een Eulerse knikfactor berekend van $n=1,67$.

In het algemeen geldt ten aanzien van de Eulerse knikfactor het volgende:

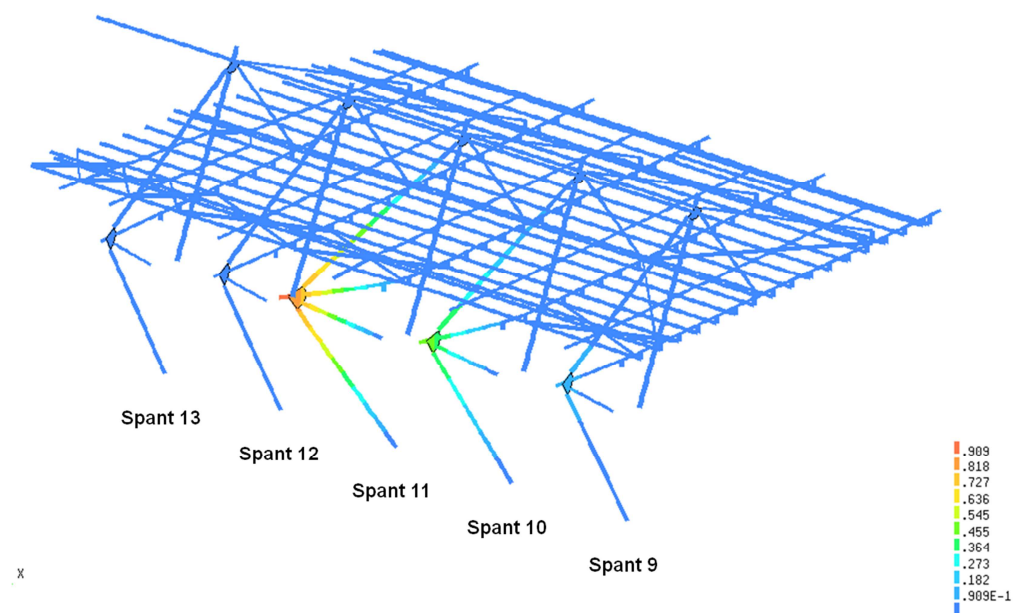
- Indien de n -waarde kleiner is dan 1,0, dan is er zeker sprake van instabiliteit van de constructie.
- Hoe hoger de n -waarde ten opzichte van 1,0, des te ongevoeliger de ondersteuningsconstructie is voor instabiliteit.
- Indien de n -waarde groter is dan 10, dan mag de betreffende constructie beschouwd worden als ongevoelig voor instabiliteit.

Op basis van de berekende Eulerse knikfactor van $n=1,67$ kan voor de gerealiseerde situatie geconcludeerd worden dat de constructie gevoelig is voor instabiliteit. Bij deze constructieve beoordeling is geen rekening gehouden met de excentriciteiten in de belastingen en de geometrie, zoals die zeker in de hoofddraagconstructie aanwezig zijn geweest. Door deze excentriciteiten is de situatie in werkelijkheid gevoeliger voor instabiliteit geweest dan is berekend.

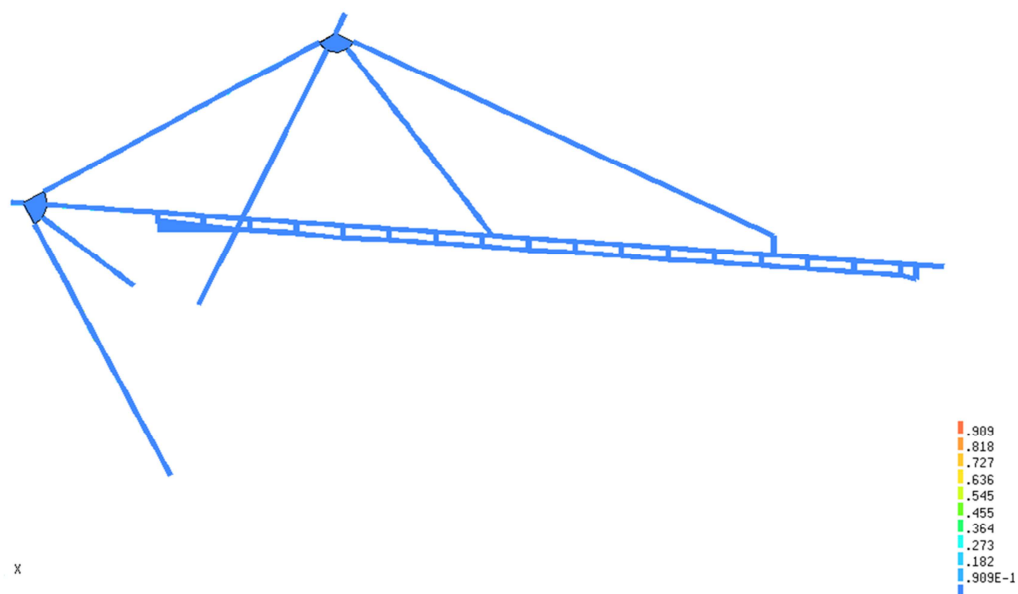
5.1.2 Bezwijkvorm van de hoofddraagconstructie

Uit de Euler analyse van de gerealiseerde situatie volgt een bezwijkvorm die is weergegeven in de figuren 5.1 – 5.3.

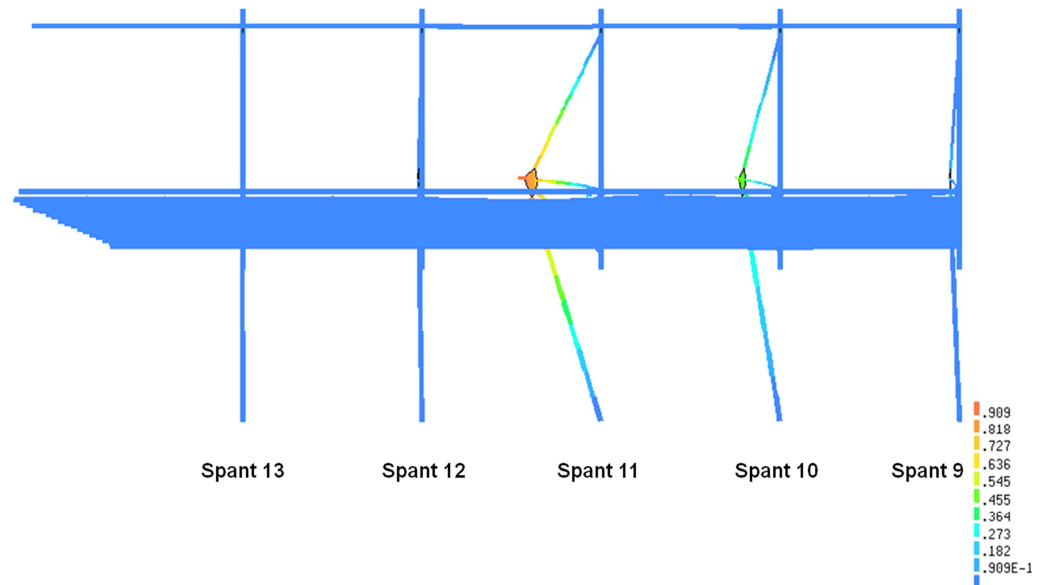
Deze figuren tonen een schematische weergave van de gerealiseerde situatie, waarbij alle individuele onderdelen van de constructie zijn weergegeven als lijnvormige elementen. In deze figuur zijn schematisch de vervormingen ingetekend die behoren bij de bezwijkvorm. De met blauw aangegeven onderdelen van de constructie zijn de onderdelen die bij deze bezwijkvorm niet vervormen. De anders gekleurde onderdelen zijn de vervormde onderdelen, waarbij de kleurverschillen duiden op relatieve verschillen in de vervormingen. De kleur groen duidt op de kleinste vervormingen en de kleur rood op de grootste vervormingen.



Figuur 5.1: Bezwijkvorm behorende bij de gerealiseerde situatie – ruimtelijk beeld



Figuur 5.2: Bezwijkvorm behorende bij de gerealiseerde situatie – aanzicht loodrecht op de spanten, vanaf spant 9, waarbij alle onderdelen zijn weergegeven die vanuit het aanzicht zichtbaar zijn



Figuur 5.3: Bezwijkvorm behorende bij de gerealiseerde situatie - aanzicht vanaf de buitenzijde van het stadion

Uit de bezwijkvorm zoals weergegeven in de figuren 5.1 – 5.3 blijkt het volgende:

- De spanten 10 en 11 bezwijken als eerste. Dit zijn de twee zwaarst belaste spanten, enerzijds als gevolg van de grotere wanddikte van de onderregel (tussen de knooppunten 5 en 9) en het op een deel van de onderregel opgelaste profiel en anderzijds als gevolg van de reeds gemonteerde vidi-wall.
- Onder de ten tijde van de instorting aanwezige belasting vertonen de spanten 10 en 11 een ongeschoord gedrag (enkele knooppunten verplaatsen).
- De bezwijkvorm betreft het wegbuigen van het buitenste deel van de spanten 10 en 11, in de richting loodrecht op het vlak van de spanten, in de richting van spant 12.
- Ten aanzien van de berekende richting van het uitbuigen van de spantdelen wordt opgemerkt dat het uitbuigen in de richting van spant 9 even waarschijnlijk is als het uitbuigen in de richting van spant 12.
- Van de spantdelen 2–5 buigt het gedeelte vanaf de buitenste gording tot en met knooppunt 2 weg, omdat die spantdelen ter plaatse van de buitenste gording, in de richting loodrecht op het vlak van de spanten, gesteund worden.
- Het buitenste deel van spant 11 buigt verder weg dan het buitenste deel van spant 10. Dit komt doordat de belasting op spant 11, ten tijde van de instorting, groter was dan die op spant 10 (vanwege de hangbrug nabij spant 11).

5.2 Beoordeling situatie inclusief koppelstaven

De situatie inclusief koppelstaven betreft de situatie met de ten tijde van de instorting daadwerkelijk gerealiseerde opbouw van de constructie, maar dan inclusief de ten tijde van de instorting ontbrekende koppelstaven aan de buitenzijde van de overkapping, tussen de knooppunten 2. Verder zijn ook bij deze situatie de ten tijde van de instorting daadwerkelijk aanwezige belastingen in rekening gebracht.

5.2.1 Resultaten van de berekeningen

Met de Euler analyse is voor de gerealiseerde situatie een Eulerse knikfactor berekend van $n=12,0$.

In het algemeen geldt ten aanzien van de Eulerse knikfactor het volgende:

- Indien de n -waarde kleiner is dan 1,0, dan is er zeker sprake van instabiliteit van de constructie.
- Hoe hoger de n -waarde ten opzichte van 1,0, des te ongevoeliger de ondersteuningsconstructie is voor instabiliteit.
- Indien de n -waarde groter is dan 10, dan mag de betreffende constructie beschouwd worden als ongevoelig voor instabiliteit.

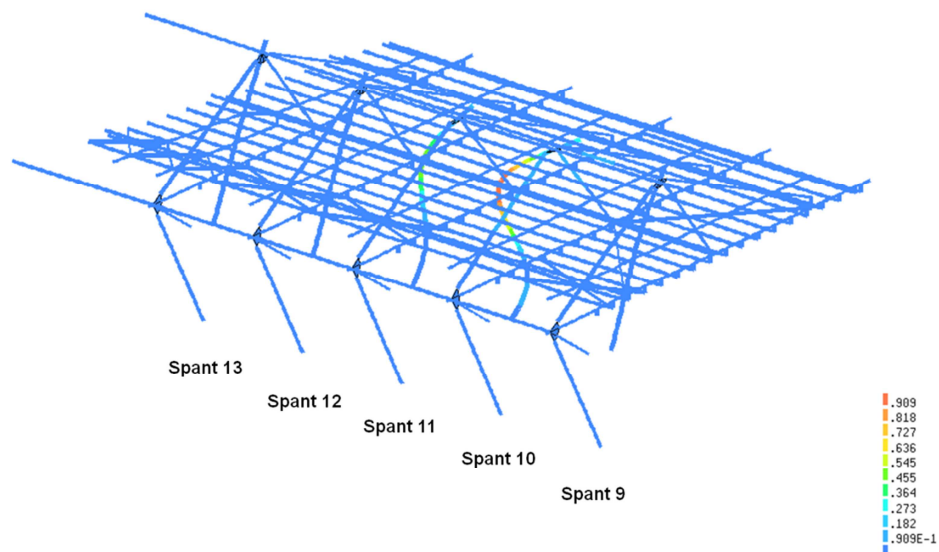
Op basis van de berekende Eulerse knikfactor van $n=12,0$ wordt voor de situatie inclusief koppelstaven geconcludeerd dat de constructie ongevoelig is voor instabiliteit.

Bepalend voor het grote verschil in n -waarde tussen de gerealiseerde situatie en de situatie inclusief koppelstaven zijn de koppelstaven tussen de knooppunten 2 van de spanten. Het niet monteren van die koppelstaven heeft erin geresulteerd dat de constructie ten tijde van de instorting gevoelig was voor instabiliteit, terwijl dat met die koppelstaven niet het geval geweest zou zijn.

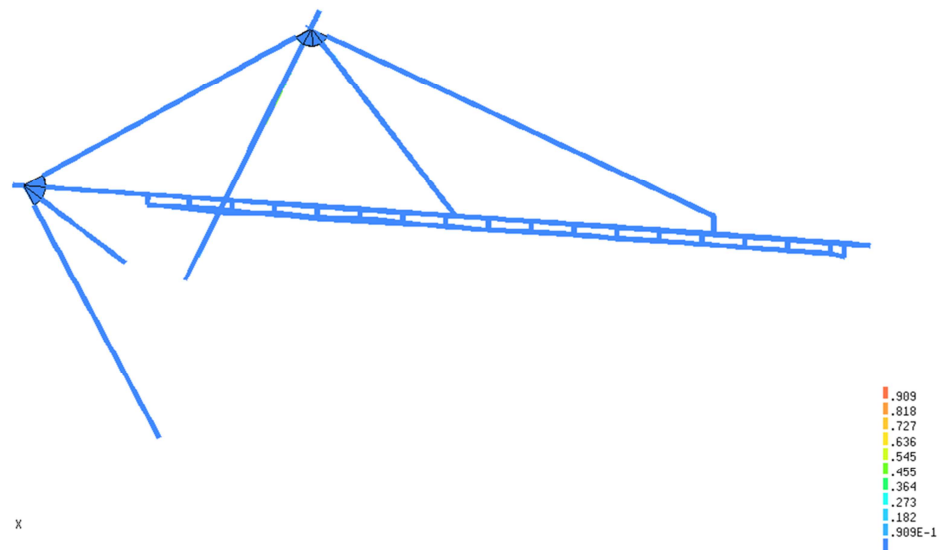
5.2.2 Bezwijkvorm van de hoofddraagconstructie

Uit de Euler analyse van de situatie inclusief koppelstaven volgt een bezwijkvorm die is weergegeven in figuur 5.4 – 5.6.

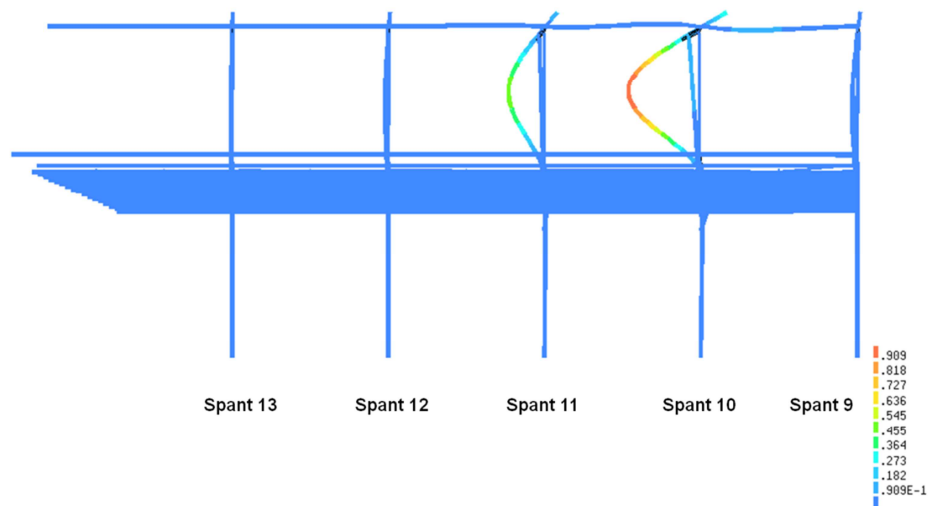
Deze figuren tonen een schematische weergave van de situatie inclusief koppelstaven, waarbij alle individuele onderdelen van de constructie zijn weergegeven als lijnvormige elementen. In deze figuur zijn schematisch de vervormingen ingetekend die behoren bij de bezwijkvorm. De met blauw aangegeven onderdelen van de constructie zijn de onderdelen die bij deze bezwijkvorm niet vervormen. De anders gekleurde onderdelen zijn de vervormde onderdelen, waarbij de kleurverschillen duiden op relatieve verschillen in de vervormingen. De kleur groen duidt op de kleinste vervormingen en de kleur rood op de grootste vervormingen.



Figuur 5.4: Bezwijkvorm behorende bij de situatie inclusief koppelstaven – ruimtelijk beeld



Figuur 5.5: Bezwijkvorm behorende bij de situatie inclusief koppelstaven – aanzicht loodrecht op de spanten, vanaf spant 9, waarbij alle onderdelen zijn weergegeven die vanuit het aanzicht zichtbaar zijn



Figuur 5.6: Bezwijkvorm behorende bij de situatie inclusief koppelstaven - aanzicht vanaf de buitenzijde van het stadion

Uit de bezwijkvorm zoals weergegeven in de figuren 5.4 – 5.6 blijkt het volgende:

- Onder de ten tijde van de instorting aanwezige belasting vertonen de spanten een geschoord gedrag (de knooppunten verplaatsen niet).
- De bezwijkvorm van de situatie inclusief koppelstaven betreft het initieel wegnikken van spantdeel 5-6 van de spanten 10 en 11, in de richting loodrecht op het vlak van de spanten.

Uit de bezwijkvorm wordt geconcludeerd dat de verplaatsing van de knooppunten 2, zoals optreedt in de gerealiseerde situatie, niet optreedt in de situatie inclusief koppelstaven, vanwege de aanwezigheid van de koppelstaven tussen de knooppunten 2 van de spanten.

6 Conclusies van de constructieve beoordeling

Op basis van de second opinion van de oorspronkelijke constructieberekeningen van de overkapping van de U-uitbreiding wordt geconcludeerd dat de berekeningen een aantal punten bevatten die aanleiding geven tot opmerkingen. Een deel van deze opmerkingen heeft een negatieve invloed op de resultaten van de constructieberekeningen en dus op het veiligheidsniveau van de hoofddraagconstructie van de overkapping.

Teneinde vast te stellen wat de daadwerkelijke invloed is van deze opmerkingen op het veiligheidsniveau van de hoofddraagconstructie van de overkapping, wordt geadviseerd om in overleg te treden met de oorspronkelijke constructeur(s).

Op basis van de door TNO uitgevoerde controleberekening van de ten tijde van de instorting daadwerkelijk gerealiseerde constructie, met de daadwerkelijk aanwezige belastingen, wordt het volgende geconcludeerd:

- De gerealiseerde situatie was ten tijde van de instorting gevoelig voor instabiliteit.
- Dit geldt voor de situatie zonder excentriciteiten in de constructie. Omdat dergelijke excentriciteiten zeker in de hoofddraagconstructie aanwezig zijn geweest, is de situatie in werkelijkheid nog gevoeliger voor instabiliteit geweest dan is berekend.
- De maatgevende spanten zijn de spanten 10 en 11, de spanten die direct voorafgaand aan de instorting het zwaarst belast waren.
- De maatgevende onderdelen van de spanten 10 en 11 zijn de buitenste delen van die spanten. Die delen zijn instabiel en buigen weg, waardoor knooppunt 2 verplaatst, loodrecht op het vlak van de spanten.

Ten tijde van de instorting waren de koppelstaven tussen de knooppunten 2 van de spanten Z1 tot en met Z20 niet gemonteerd. Indien die koppelstaven wel aanwezig geweest zouden zijn (de situatie inclusief koppelstaven), dan zou de constructie ongevoelig geweest zijn voor instabiliteit.

7 Documenten – specifiek voor deelrapport C

In het kader van de constructieve beoordeling van de overkapping is een aantal algemene documenten geraadpleegd. Onderstaand volgt een overzicht van deze documenten.

- [N.01] Blaauwendraad, J., Kok, A.W.M., *Elementenmethode 1 voor constructeurs*, Agon Elsevier, 1973
- [N.02] Blaauwendraad, J., Kok, A.W.M., *Elementenmethode 2 voor constructeurs*, Agon Elsevier, 1973
- [N.03] *User's Manual – Release 9.4.3, First edition* –, TNO DIANA BV, november 2010
- [N.04] Leijendeckers, P.H.H. et al., *Polytechnisch zakboek*, 49^e druk, Elsevier, 2002
- [N.05] Maljaars, J. et al., TNO-rapport 2003-BC-R0065, *Amer-9: Beschrijving 3D computermodel van de steiger*, augustus 2004
- [N.06] Staalconstructies TGB 1990 – Basiseisen en basisrekenregels voor overwegend statisch belaste constructies (NEN 6770), NEN, mei 1997
- [N.07] NEN 6702:2007 Technische grondslagen voor bouwconstructies – TGB 1990 – Belastingen en vervormingen, NEN, augustus 2007

8 Ondertekening

Naam en adres van de opdrachtgever:

Arbeidsinspectie (namens het Openbaar Ministerie)
Postbus 820
3500 AV UTRECHT

De Onderzoeksraad voor Veiligheid
Postbus 95404
2509 CK Den Haag

Namen van de projectmedewerkers:

Ir. L.M. Abspoel
Ir. H. Borsje
Ir. H.G. Burggraaf

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaats gehad:

Juli 2011 – januari 2012

Ondertekening tweede lezer:

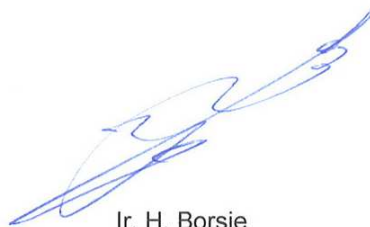


Ir. F.B.J. Gijsbers

Ondertekening:



Ir. L.M. Abspoel



Ir. H. Borsje



Ir. H.G. Burggraaf

A Beschrijving computermodel voor constructieberekeningen

Om het constructieve gedrag van de overkapping rekenkundig te bepalen, zijn twee driedimensionale computermodellen ontwikkeld, één voor de daadwerkelijk gerealiseerde overkapping en één voor de daadwerkelijk gerealiseerde overkapping, maar dan aangevuld met de ten tijde van de instorting ontbrekende koppelstaven in het buitenste deel van de overkapping (tussen de knooppunten 2). In het vervolg van deze bijlage wordt het eerste model aangeduid met de “gerealiseerde situatie” en het tweede model met de “situatie inclusief koppelstaven”.

De modellen zijn zo vormgegeven, dat de daadwerkelijke eigenschappen van de constructieonderdelen zo goed mogelijk zijn gemodelleerd en dientengevolge het werkelijke constructiegedrag zo goed mogelijk is benaderd. Met behulp van deze Eindige Elementen Modellen wordt de eerste orde elastische krachtsverdeling bepaald, evenals de eerste orde elastische vervormingen. Ook wordt met deze modellen de stabiliteit van de hoofddraagconstructie van de overkapping bepaald (Eulerse stabiliteitsberekening).

Deze bijlage beschrijft de opbouw van de computermodellen. Deel A.1 beschrijft het programma waarin de modellen zijn opgebouwd en de gebruikte elementen. De geometrie van de modellen is gegeven in deel A.2 en de modellering van de verbindingen is gegeven in deel A.3. Deel A.4 geeft de opleggingen van de spanten. Ten slotte is de modellering van de belastingen beschreven in deel A.5.

A.1 Gebruikt programma en gebruikte elementen

De modellen zijn opgebouwd in het eindige elementenpakket DIANA, release 9.4.3. Voor een introductie in de werking van eindige elementenpakketten in het algemeen wordt verwezen naar Blaauwendraad en Kok [N.01] en [N.02]. Voor de werking van DIANA en een gedetailleerde beschrijving van onderstaande elementen wordt verwezen naar de handleiding [N.03].

Voor de modellering van staven is gebruik gemaakt van direct geïntegreerde Class-I balkelementen van het type L12BE met twee knopen en zes vrijheidsgraden per knoop (drie translaties in de hoofdrichtingen en drie rotaties in de hoofdrichtingen). Voor iedere staaf zijn de elasticiteitsmodulus, de dwarscontractiecoëfficiënt, de volumieke massa (dichtheid) en de statische waarden van de staaf opgegeven. Deze statische waarden betreffen het oppervlak van de doorsnede, het buigtraagheidsmoment om iedere hoofdas, het traagheidsproduct en het torsietraagheidsmoment.

Een staaf is opgebouwd uit meerdere elementen. In het algemeen geldt: hoe meer elementen toegepast zijn, hoe nauwkeuriger de uitkomst, maar hoe langer de rekentijd is. Uit testen in Maljaars et al. [N.04] blijkt dat de uitkomsten voldoende nauwkeurig zijn indien iedere staaf wordt gemodelleerd met ten minste vier elementen. In het model is iedere staaf gemodelleerd met ten minste acht elementen. De stabiliteitsverbanden in het dakvlak van de overkapping die ten tijde van de instorting gemonteerd waren zijn gemodelleerd met één element.

Om de aansluitingen tussen twee staven te modelleren is gebruik gemaakt van directe (momentvaste) verbindingen en verbindingen met aansluitvoorwaarden (tyings). De tyings zijn gebruikt om de translaties van op elkaar liggende knopen van twee staven te koppelen, zodat een scharnierende verbinding ontstaat. Voor de verbindingen die momentvast zijn, zijn de rotaties in de betreffende richtingen gekoppeld.

Met de twee modellen zijn Euler stabiliteitsberekeningen uitgevoerd. Dit houdt in dat de stijfheden van de constructieonderdelen (verbindingen, staven) van belang zijn in de modellen. De stijfheid bepaalt namelijk mede de krachtsverdeling in de overkapping.

De gebruikte eenheden waarmee de modellen zijn opgebouwd, zijn: kilogram (kg), millimeter (mm) en seconde (s). Voor de kracht is de eenheid Newton (N) aangehouden.

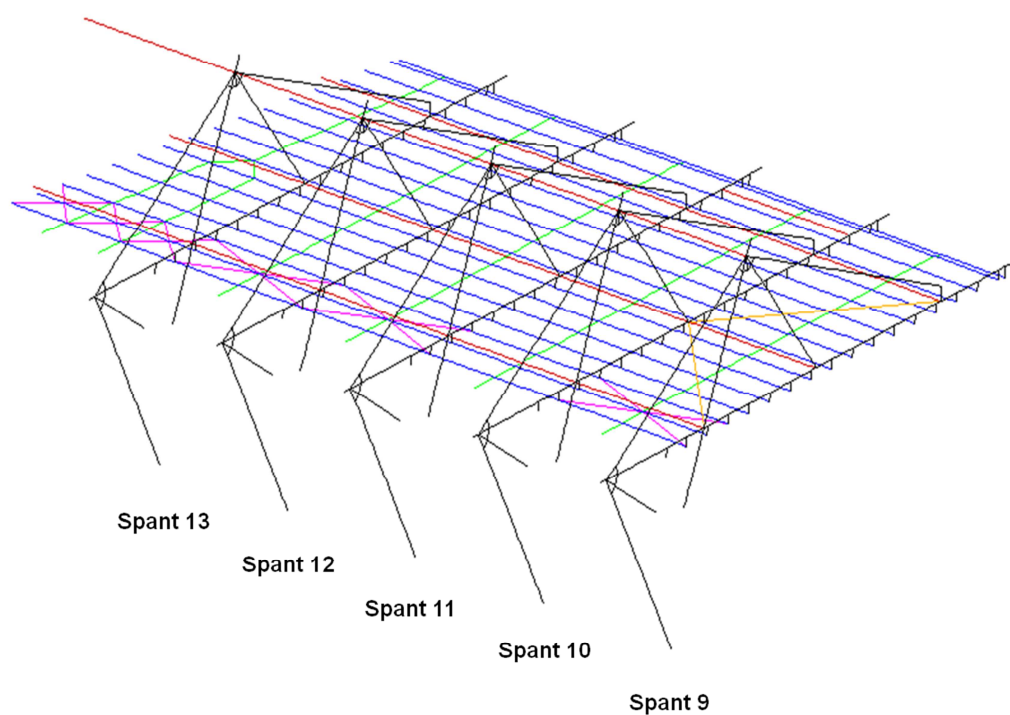
A.2 Geometrie modellen

Voor de opbouw van de modellen van de overkapping is uitgegaan van de tekeningen [T.01] tot en met [T.09] en de resultaten van het veldonderzoek (zie deelrapport B).

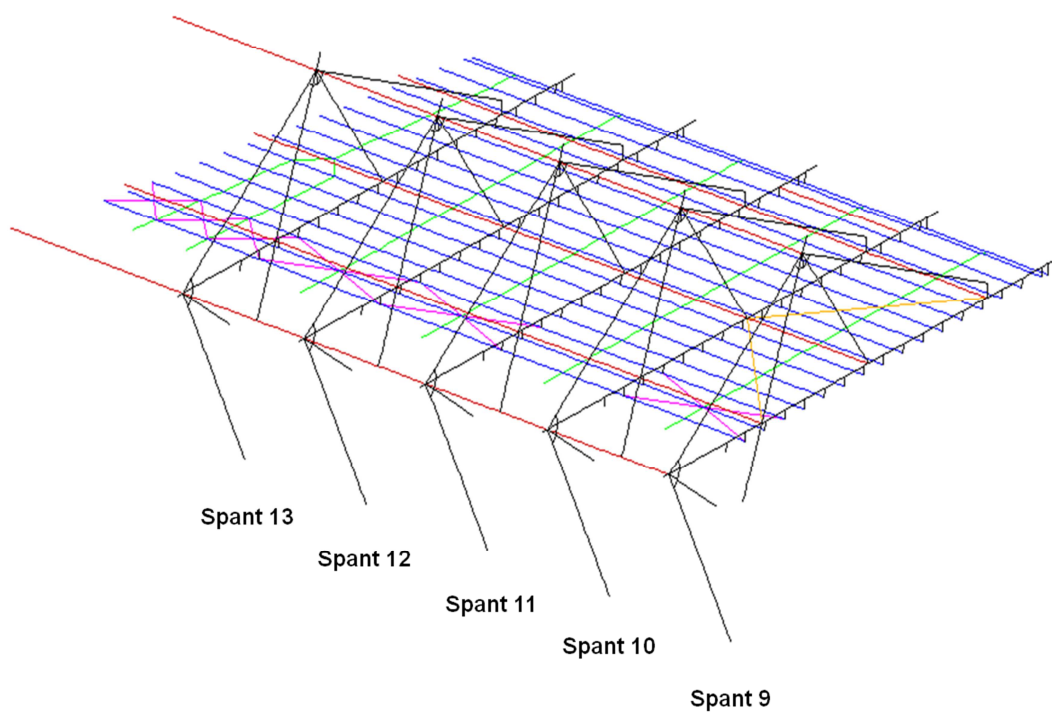
A.2.1 Globale geometrie van de modellen

De geometrie van het model van de gerealiseerde situatie is weergegeven in figuur 1. De geometrie van het model van de situatie inclusief koppelstaven is weergegeven in figuur 2. In beide figuren is in kleur onderscheid gemaakt tussen de volgende onderdelen:

- Spanten (zwart);
- Koppelstaven tussen spanten (rood);
- Stabiliteitsverbanden tussen de spanten (oranje);
- Gordingen, goot en frame voor reclameborden (blauw);
- Kokerprofielen tussen gordingen (groen);
- Stabiliteitsverbanden tussen gordingen (violet).



Figuur 1: Geometrie gerealiseerde situatie



Figuur 2: Geometrie situatie inclusief koppelstaven

A.2.2 Spanten, koppelstaven en stabiliteitsverbanden tussen de spanten

De constructieonderdelen van de spanten (tabel 1), de koppelstaven en de stabiliteitsverbanden tussen de spanten betreffen stalen buisprofielen. De afmetingen van de buisprofielen zijn ontleend aan de tekeningen [T.01] tot en met [T.09].

Uit het veldonderzoek (deelrapport B, paragraaf 4.1) is gebleken dat tussen de knooppunten 6 van de spanten 9 en 10 een koppelstaf was gemonteerd, waarvan de code afweek van de code die is weergegeven op tekening [T.07], namelijk code L2185 in plaats van L2186. In de berekeningen is de op de tekeningen aangegeven koppelstaaf met code L2186 gemodelleerd.

Uit het veldonderzoek (deelrapport B, paragraaf 4.1) is gebleken dat tussen de knooppunten 5, 7 en 8 van de spanten 8 tot en met 13 een koppelstaf was gemonteerd, waarvan de code afweek van de code die is weergegeven op tekening [T.07], namelijk deels code L2086 en deels ongecodeerd, in plaats van L2171. In de berekeningen zijn de op de tekeningen aangegeven koppelstaven met code L2171 gemodelleerd.

In de modellen zijn de statische waarden van deze buisprofielen opgegeven. De statische waarden betreffen de doorsnede A , de buigtraagheidsmomenten I_y en I_z , en het torsietraagheidsmoment I_t . De numerieke waarden zijn weergegeven in tabel 2 en zijn primair ontleend aan [N.04]. Daar waar geen numerieke waarden in [N.04] zijn vermeld, zijn de waarden met behulp van de lineaire elasticiteitstheorie bepaald.

Tabel 1: Buisprofielen zoals toegepast in de spanten

Spantdeel	Toegepaste buisprofielen			
	Spant 9	Spant 10 en 11	Spant 12	Spant 13
1 - 2	Ø457×20,0	Ø457×20,0	Ø457×20,0	Ø457×20,0
2 - 3	Ø457×7,9	Ø457×7,9	Ø457×7,9	Ø457×10,0
2-5 en 4 - 6	Ø457×7,9	Ø457×7,9	Ø457×7,9	Ø457×7,9
5 - 7	Ø457×10,0	Ø457×14,2	Ø457×10,0	Ø457×12,5
7 - 8	Ø457×10,0	Ø457×14,2	Ø457×10,0	Ø457×12,5
8 - 9	Ø457×10,0	Ø457×14,2V	Ø457×10,0	Ø457×12,5
2 - 6	Ø457×16,0	Ø457×16,0	Ø457×16,0	Ø457×16,0
6 - 7	Ø273×10,0	Ø273×10,0	Ø273×10,0	Ø273×10,0
6 - 8	Ø457×10,0	Ø457×10,0	Ø457×10,0	Ø457×12,5

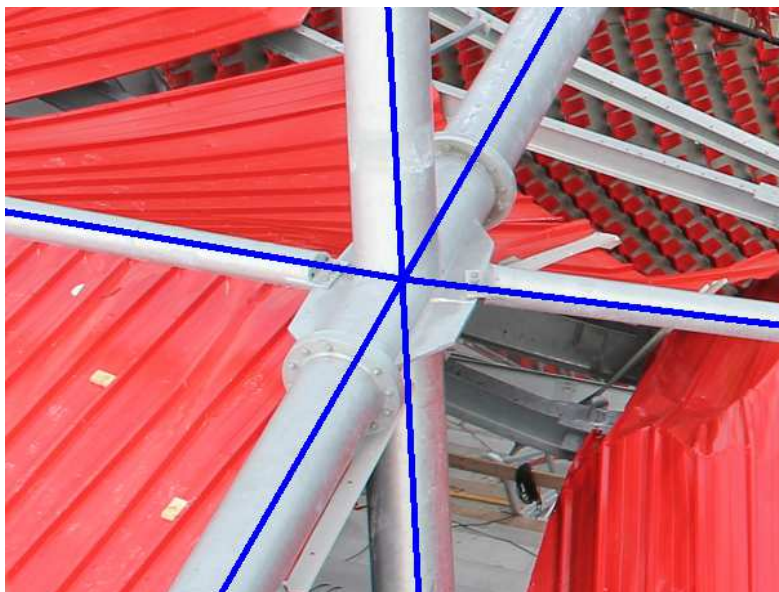
Tabel 2: Statische waarden voor de toegepaste buisprofielen

Type buisprofiel	A	$I_y \times 10^4$	$I_z \times 10^4$	$I_t \times 10^4$
	[mm ²]	[mm ⁴]	[mm ⁴]	[mm ⁴]
Ø120×5 *	1806	299	299	598
Ø193,7×4,0	2384	1073	1073	2146
Ø219,1×8,0	5306	2960	2960	5919
Ø273×10,0	8262	7154	7154	14308
Ø323,9×5,0	5009	6369	6369	12739
Ø323,9×8,0	7939	9910	9910	19820
Ø457×7,9	11146	28109	28109	56219
Ø457×10,0	14043	35091	35091	70183
Ø457×12,5	17455	43145	43145	86290
Ø457×14,2	19754	48464	48464	96928
Ø457×14,2V **	29931	94839	68595	96928
Ø457×16,0	22167	53959	53959	107919
Ø457×20,0	27458	65681	65681	131363

*) Dit type buisprofiel is gebruikt om de gordingen aan de spanten te bevestigen.

**) Dit type buisprofiel betreft een verzwaring van buisprofiel Ø457×14,2 en is toegepast in spant 10 en 11 ter plaatse van knooppunt 8. De buigtraagheidsmomenten zijn bepaald met behulp van het computerprogramma AutoCAD. Het torsietraagheidsmoment is gelijk genomen aan het torsietraagheidsmoment van buisprofiel Ø457×14,2.

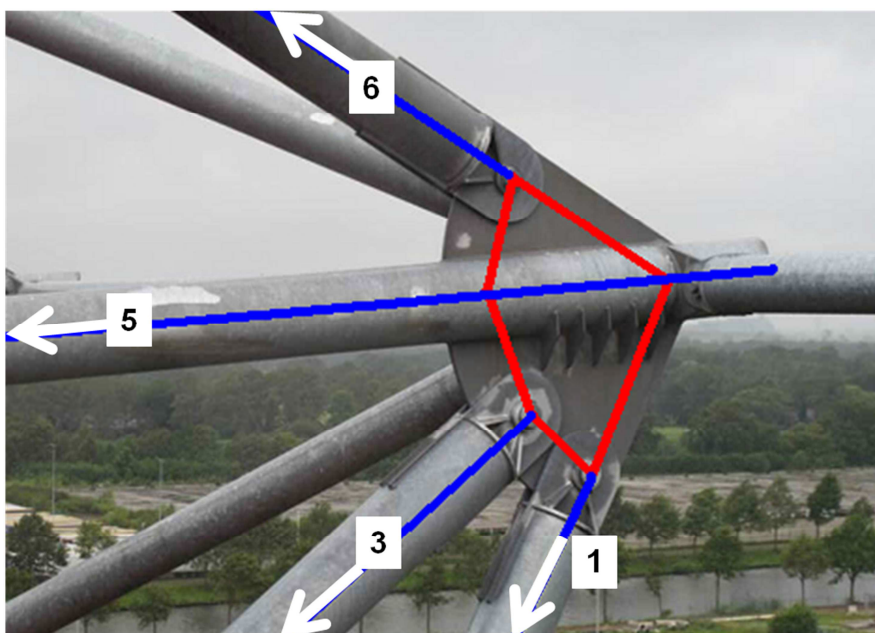
In de modellen zijn de staven gemodelleerd als lijnelementen in de systeemlijnen. Conform hoofdstuk 10 van NEN 6770 [N.06] is de overkapping zo geschematiseerd dat de systeemlijnen samenvallen met de opeenvolgende zwaartepunten van de doorsneden (figuur 3).



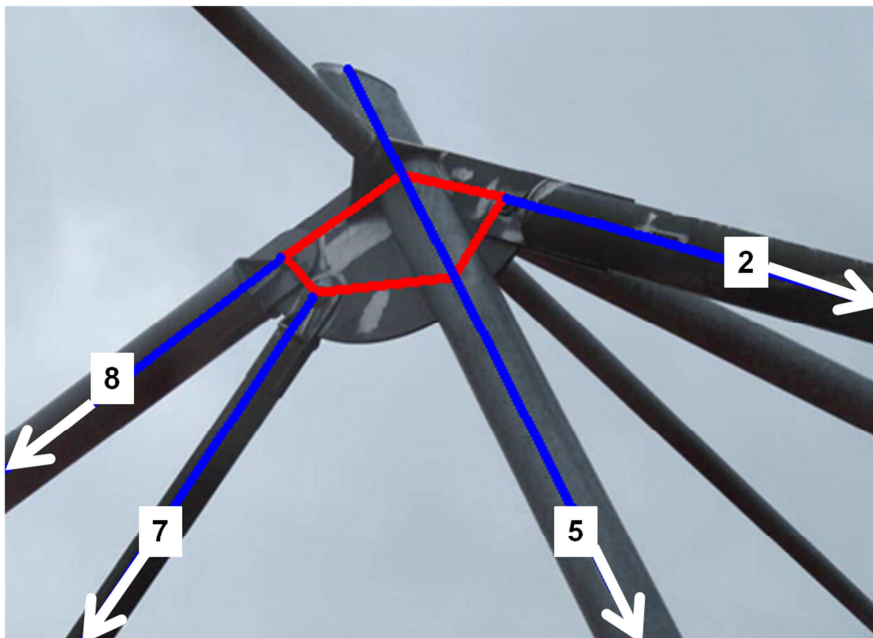
Figuur 3: Lijnelementen in de systeemlijnen

Ter plaatse van de knooppunten 2, 6, 7 en 8 treedt in werkelijkheid een excentriciteit op, welke volgens NEN 6770 [N.06] in rekening moet worden gebracht in een stabiliteitsberekening. Figuur 4 tot en met figuur 7 toont de wijze waarop de excentriciteiten ter plaatse van deze knooppunten zijn gemodelleerd.

Ter plaatse van knooppunt 2 is de schetsplaat gemodelleerd met lineaire, driehoekige schaalementen van het type T15SH, met drie knopen en vijf vrijheidsgraden per knoop (drie translaties in de hoofdrichtingen en twee rotaties in de hoofdrichtingen, niet zijnde loodrecht op de plaat). De plaat is in figuur 4 schematisch weergegeven met een rode lijn. Voor de dikte van de plaat is 20 mm aangehouden. De staaf vanuit knooppunt 5 loopt door de plaat en is hiermee momentvast verbonden. De overige staven zijn aan de rand van de plaat scharnierend verbonden. Dezelfde wijze van modelleren is toegepast voor knooppunt 6 (figuur 5).



Figuur 4: Modellerings excentriciteit ter plaatse van knooppunt 2

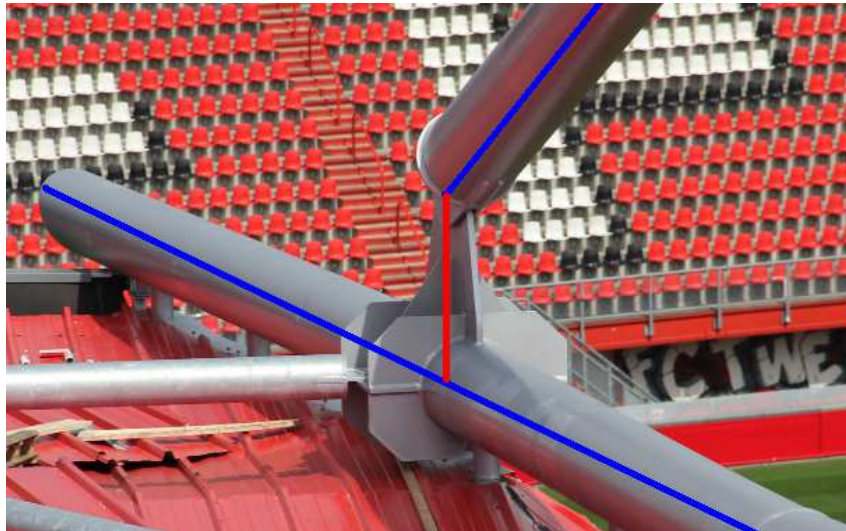


Figuur 5: Modelling excentriciteit ter plaatse van knooppunt 6

Ter plaatse van de knooppunten 7 en 8 is de excentriciteit tussen de onderregel en de diagonalen overbrugd met balkelementen van het eerder genoemde type L12BE. Deze balkelementen zijn in figuur 6 en figuur 7 schematisch in rood weergegeven. Aan deze balkelementen zijn dezelfde statische waarden toegekend als aan de diagonalen.



Figuur 6: Modelling excentriciteit ter plaatse van knooppunt 7



Figuur 7: Modelling excentriciteit ter plaatse van knooppunt 8

A.2.3 Gordingen, kokerprofielen en stabiliteitsverbanden tussen gordingen

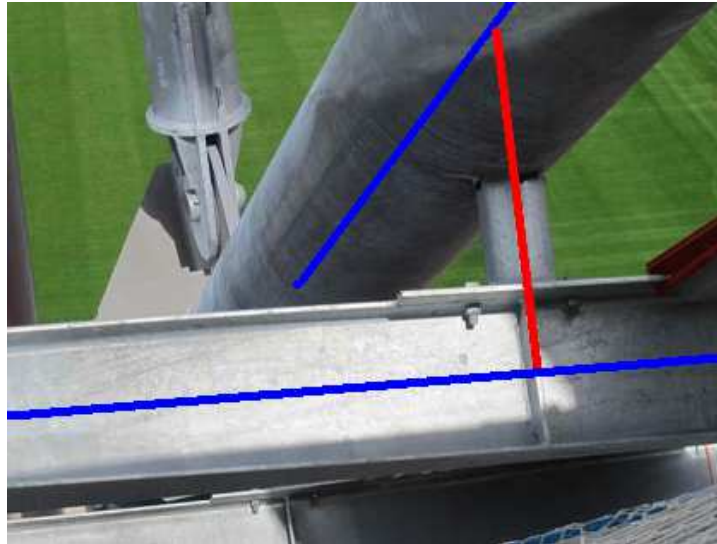
De gordingen onder de spanten betreffen stalen IPE-liggers. Deze gordingen zijn halverwege tussen de spanten gekoppeld door middel van stalen kokerprofielen 70×5 mm. Daarnaast zijn in de stroken tussen de buitenste drie gordingen stabiliteitsverbanden tussen de gordingen geplaatst. Deze stabiliteitsverbanden betreffen gelijkzijdige hoekstalen 70×7 mm. De afmetingen van de gordingen, kokerprofielen en stabiliteitsverbanden zijn ontleend aan de tekeningen [T.01] tot en met [T.09]. De bijbehorende statische waarden zijn weergegeven in tabel 3 en zijn ontleend aan [N.04].

Tabel 3: Statische waarden voor overige toegepaste profielen

Type buisprofiel	A [mm ²]	$I_y \times 10^4$ [mm ⁴]	$I_z \times 10^4$ [mm ⁴]	$I_t \times 10^4$ [mm ⁴]
IPE 270	4595	5790	420	16
IPE 300	5381	8356	604	20
IPE 330	6261	11767	788	28
IPE 360	7273	16266	1044	37
IPE 400	8446	23128	1318	51
Koker 70×70×5,0	1279	90	90	139
Hoek 70×70×7	940	42	42	--
Goot + frame *	5280	150855	50868	--

*) De goot en het frame voor de reclameborden zijn in de modellen als één staaf ingevoerd met equivalente statische waarden. De buigtraagheidsmomenten zijn bepaald met behulp van het computerprogramma AutoCAD op basis van de aanwezige randstaven. Het traagheidsproduct en het torsietraagheidsmoment zijn laag, maar niet gelijk aan nul, gekozen.

De gordingen zijn met behulp van een stalen buisprofiel $\varnothing 120 \times 5,0$ en een kopplaat met een dikte van 15 mm bevestigd aan de onderkant van ieder spant. In de modellen is de excentriciteit overbrugd met balkelementen L12BE waaraan de statische waarden van een buisprofiel $\varnothing 120 \times 5,0$ zijn toegekend. Deze balkelementen zijn in figuur 8 schematisch in rood weergegeven.



Figuur 8: Modellerings excentriciteit ter plaatse van aansluiting gording op spant

De kokerprofielen en de stabiliteitsverbanden zijn in het model zonder excentriciteiten aan de gordingen verbonden.

A.3 Verbindingen

In dit deel is beschreven hoe de verbindingen tussen de staven gemodelleerd zijn. In de modellen worden verschillende typen verbindingen onderscheiden, met voor ieder type andere eigenschappen van de verbinding.

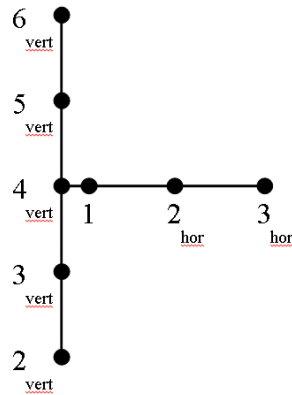
A.3.1 Algemeen

In het algemeen hebben de verbindingen in de overkapping de volgende eigenschappen:

- Verplaatsingen van de aan te sluiten staven ten opzichte van elkaar zijn verhinderd. Met andere woorden: de translaties ter plaatse van de verbinding van twee staven zijn gekoppeld.
- In de verbinding zijn bepaalde stijfheden tegen rotaties om de verschillende assen aanwezig. De grootte van deze stijfheden is afhankelijk van de geometrie van de verbinding en is zodoende verschillend voor de verschillende typen verbindingen.

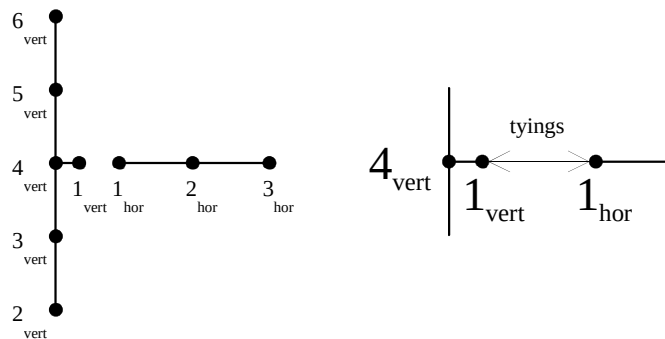
In het onderhavige onderzoek is in de grootte van de rotatiestijfheid onderscheid gemaakt tussen een rotatiestijfheid gelijk aan nul (scharnierend) en een oneindig grote rotatiestijfheid (momentvast).

Om een momentvaste verbinding te modelleren kan in het computerprogramma DIANA gebruik worden gemaakt van een directe aansluiting tussen de staven. Bij een dergelijke aansluiting, zoals weergegeven in figuur 9, is er een gezamenlijke knoop aanwezig, waardoor zowel translaties als rotaties van de staven in de verbinding gelijk zijn.

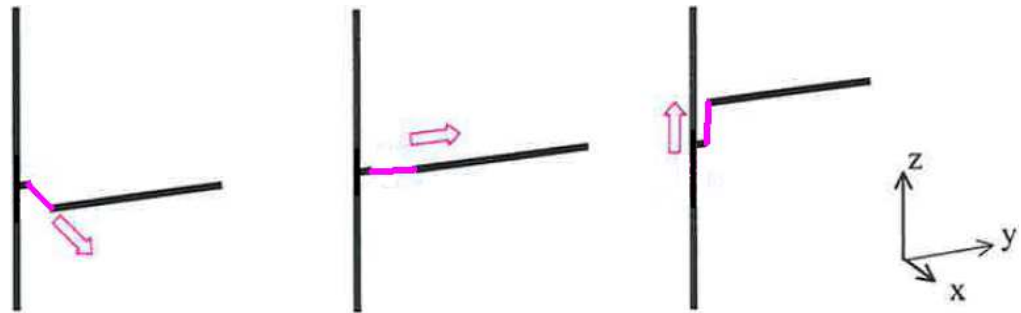


Figuur 9: Directe aansluiting tussen de staven (de nummers geven de knopen aan, extensie hor betreft de horizontale staaf, extensie vert betreft de verticale staaf)

Om een verbinding te modelleren waarbij in één of meerdere richtingen een vrije rotatie mogelijk is, kan geen gebruik worden gemaakt van een directe aansluiting tussen de staven. Om een dergelijk type verbinding op de juiste wijze te kunnen modelleren, moeten de staven worden losgekoppeld (figuur 10). De verbinding komt tot stand door het aanbrengen van aansluitvoorwaarden (tyings). In iedere verbinding zijn drie tyings aanwezig om de translaties van de staven in de verbinding in de drie hoofdrichtingen gelijk te stellen (figuur 11). De afstand tussen de knopen, en dus de lengte van de veren, is in de modellen gelijk aan nul meter. Dat wil zeggen dat in het model punt 1_{vert} en 1_{hor} over elkaar, maar niet samen vallen. In de figuren is ter verduidelijking een grotere afstand aangehouden.



Figuur 10: Losgekoppelde aansluiting tussen de staven (de nummers geven de knopen aan, extensie hor betreft de horizontale staaf, extensie vert betreft de verticale staaf)



Figuur 11: Tyings voor de translaties in de drie hoofdrichtingen

Naast translaties kunnen ook rotaties per richting worden gekoppeld door middel van tyings. De richtingen waarin de rotaties worden gekoppeld zijn afhankelijk van het type verbinding. In het navolgende onderdeel is dit per verbinding toegelicht.

A.3.2 Verbindingen in de spanten

In ieder spant komen vijf verbindingen voor. Deze verbindingen bevinden zich in de knooppunten 2, 5, 6, 7 en 8.

Knooppunt 2 is weergegeven in figuur 4. De onderregel van het spant is geïntegreerd met de plaat. De aansluiting tussen de onderregel en de plaat is derhalve gemodelleerd als een momentvaste verbinding. De overige spantdelen die uitkomen op de plaat zijn in het vlak van de plaat scharnierend aangesloten. Ten gevolge van de relatief dunne aansluitplaten zijn deze verbindingen ook loodrecht op de plaat gemodelleerd als een scharnier. Een scharnier dat zowel in als uit het vlak vrij kan roteren staat ook bekend als een bolscharnier.

Knooppunt 5 betreft een lasverbinding tussen de onderregel en het verticale spantdeel. Deze verbinding is gemodelleerd als momentvast.

Knooppunt 6 is weergegeven in figuur 5. Het verticale spantdeel is geïntegreerd met de plaat. De aansluiting tussen het verticale spantdeel en de plaat is derhalve gemodelleerd als een momentvaste verbinding. De verbindingen tussen de plaat en de overige spantdelen zijn gemodelleerd als bolscharnier.

De knooppunten 7 en 8 zijn weergegeven in figuur 6 en figuur 7. Ook deze verbindingen zijn gemodelleerd als bolscharnier.

A.3.2 Verbindingen tussen de spanten

Tussen de spanten bevinden zich koppelstaven, stabiliteitsverbanden en de gootconstructie (inclusief frame voor reclameborden).

De aansluiting van de koppelstaven ter plaatse van knooppunt 2 zijn gemodelleerd als bolscharnier. Voor de overige koppelstaven en de gootconstructie (inclusief frame voor reclameborden) is alleen de vrije rotatie in het dakvlak verhinderd. De stabiliteitsverbanden zijn momentvast verbonden met de spanten.

A.3.2 Verbindingen onder de spanten

Onder de spanten bevinden zich gordingen, kokerprofielen en stabiliteitsverbanden. Alle onderlinge verbindingen tussen deze onderdelen en de verbinding van een gording aan een spant, zijn gemodelleerd als momentvast.

A.4 Opleggingen

De opleggingen van de spanten bevinden zich in de knooppunten 1, 3 en 4 en zijn gemodelleerd als bolscharnieren.

Aan de rand van het model, ter plaatste van de aansluiting aan het niet mee gemodelleerde spant Z20, is het model gefixeerd als zijnde verbonden met de rest van het stadion.

Deze randvoorwaarden houden in dat ter plaatste van spant Z20 de koppelstaven, de stabiliteitsverbanden en de gootconstructie (inclusief frame voor reclameborden) zodanig scharnierend zijn opgelegd, dat alleen een vrije rotatie in het dakvlak is verhinderd. Als uitzondering hierop is de koppelstaaf ter plaatse van knooppunt 2 aan het einde van het model volledig scharnierend opgelegd, omdat deze ook daadwerkelijk scharnierend is verbonden met het spant.

Alle gordingen zijn aan het einde van het model ingeklemd.

A.5 Belasting

De ingevoerde belasting bestaat uit een permanente belasting (eigen gewicht van de overkapping en rustende belasting) en een veranderlijke belasting (gewicht van de hangbruggen en de personen).

A.5.1 Permanente belasting

De permanente belasting bestaat uit het eigen gewicht van de constructie en de rustende belasting, waarbij de rustende belasting bestaat uit het gewicht van de dakplaten, de gootconstructie (inclusief frame voor reclameborden), de vidi-wall en de elektrische installaties en bekabeling.

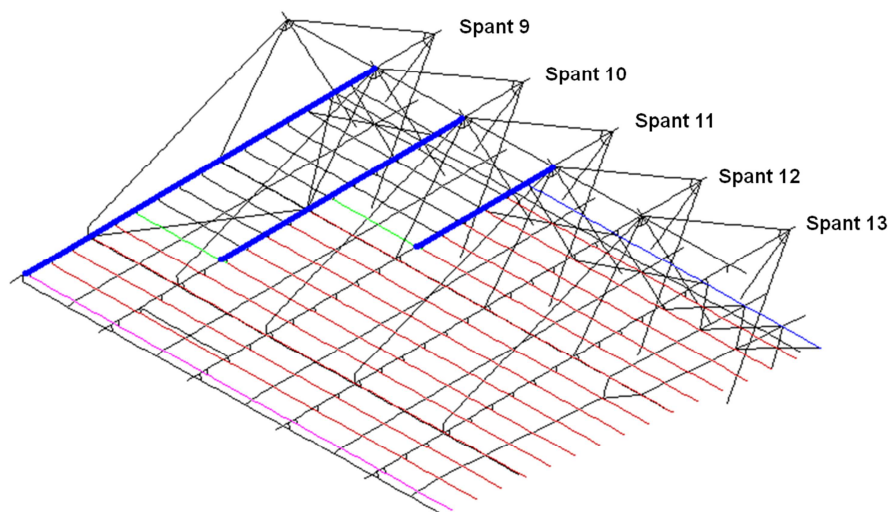
A.5.1.1 Eigen gewicht staven

Voor de belasting door het eigen gewicht van de staven zijn in de modellen voor alle staven de oppervlakte van de doorsnede en een volumieke massa $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ ($78,5 \text{ kN/m}^3$) opgegeven. Dit is gelijk aan het volumieke gewicht van staal zoals vermeld in NEN 6702 [N.07].

A.5.1.2 Rustende belasting

De rustende belasting wordt gevormd door het gewicht van de dakplaten, de gootconstructie (inclusief frame voor reclameborden), de vidi-wall en de elektrische installaties en bekabeling.

Voor de dakplaten is uitgegaan van een belasting van 8 kg/m^2 ($0,08 \text{ kN/m}^2$). Dit is het gewicht van de dakplaten [PV.11], inclusief overlap en bevestigingsmiddelen. Deze gelijkmatig verdeelde oppervlaktebelasting is aangebracht in het rode gebied in figuur 12.



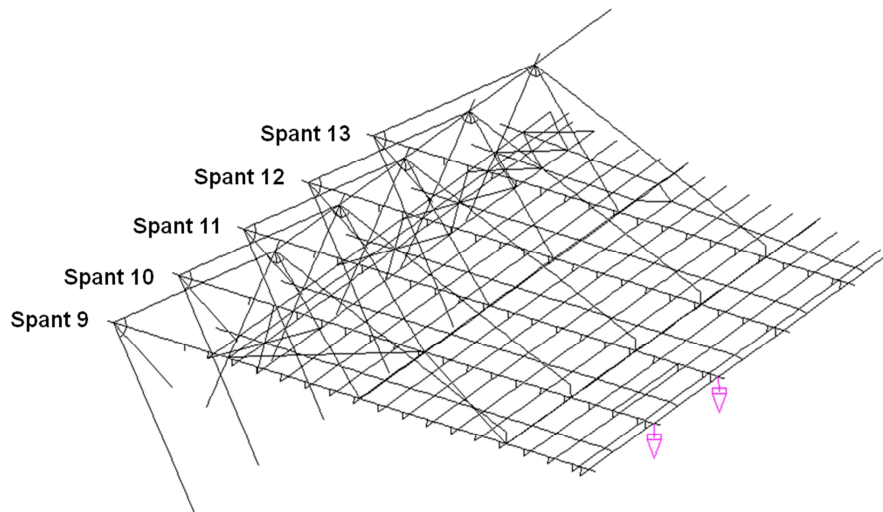
Figuur 12: Locatie van de belasting ten gevolge van dakplaten

De dikke blauwe lijnen in figuur 12 tonen de locaties waar de dakplaten opgesteld lagen ten tijde van de instorting. Deze geconcentreerde belasting is aangebracht op de gordingen direct onder de betreffende spantdelen. De grootte van de belasting door die pakketten is 0,8 kN/m [PV.11].

De belasting door de gootconstructie, inclusief frame voor de reclameborden, is bepaald op basis van de gewichten van de individuele onderdelen. Daaruit volgt dat de belasting van de gootconstructie 7,6 kN per 10,8 meter bedraagt.

De totale belasting van de vidi-wall, inclusief het frame waarop het is gemonteerd en inclusief de erachter gesitueerde ophangconstructie, bedraagt 91,0 kN (deelrapport B, hoofdstuk 5). Figuur 13 toont de wijze waarop en de locatie waar deze belasting is aangebracht.

De belasting door de elektrische installaties en bekabeling is niet in rekening gebracht omdat die belasting relatief gering is in relatie tot de overige belastingen.



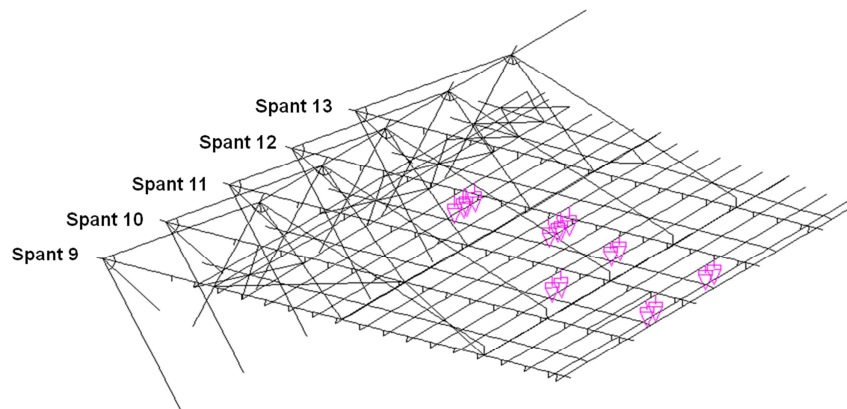
Figuur 13: Locatie van de belasting ten gevolge van vidi-wall

Omdat het model voorbij spant 9 stopt, is de helft van de belasting tussen spant 8 en spant 9 als extra belasting op spant 9 geplaatst. Deze belasting betreft het eigen gewicht en het gewicht van de gootconstructie.

A.5.2 Veranderlijke belasting

De veranderlijke belasting wordt gevormd door het gewicht van hangbruggen en de personen. In het model is alleen het gewicht van de hangbruggen meegenomen omdat de locatie van de personen niet exact bekend was. Van die hangbruggen is het gewicht in rekening gebracht zoals dat door de Arbeidsinspectie in het werk is bepaald. De aanvullend beschikbaar gestelde informatie van de leverancier (deelrapport B; hoofdstuk 5) was ten tijde van het maken van de berekeningen nog niet beschikbaar en is derhalve niet in de berekeningen verwerkt.

De grootte van deze belasting was 5,6 en 5,2 kN voor de twee hangbruggen onder het binnenste deel van de overkapping en 12,1 kN voor de twee hangbruggen onder het buitenste deel van de overkapping (deelrapport B, hoofdstuk 5). Figuur 14 toont de wijze waarop en de locatie waar deze belasting is aangebracht.



Figuur 14: Locatie van de belasting ten gevolge van de hangbruggen