

TNO-rapport**TNO-060-DTM-2012-00424****Onderzoek naar de oorzaak van het ongeval
in de Grolsch Veste - Deelrapport D: Analyse
van de oorzaak van de instorting**

Van Mourik Broekmanweg 6
2628 XE Delft
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T +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. Borsje Ir. H.G. Burggraaf
Aantal pagina's	38 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
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 TN

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Algemene informatie	5
3	Verloop van de instorting van de overkapping	7
3.1	Inleiding	7
3.2	Start van de instorting van de hoofddraagconstructie	7
3.3	Volgorde van de instorting	9
4	Constructieve aspecten van de spanten 10 en 11	12
4.1	Algemeen	12
4.2	Constructief gedrag spanten	12
4.3	Constructieve opbouw buitenste deel van de spantdelen	14
4.4	Constructief gedrag buitenste deel van de spanten	19
5	Bezwijken van de spanten 10 en 11	21
5.1	Algemeen	21
5.2	Wijze van bezwijken van de spanten	21
5.3	Bezweken onderdelen van de spanten	23
6	Oorzaak van de instorting	27
6.1	Algemeen	27
6.2	Analyse van mogelijke oorzaken	27
6.3	Constructieve beschouwing van de oorzaak van de instorting	28
6.4	Bijkomende aspecten	30
6.5	Initiatie van de instorting	32
7	Reconstructie van de instorting	36
8	Conclusies	37
9	Ondertekening	38

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 D, met een analyse van de oorzaak van de instorting. In dit rapport geeft hoofdstuk 2 enige algemene informatie over de coderingen die zijn gebruikt voor de plaatsbepaling. Hoofdstuk 3 gaat in op het verloop van de instorting van de overkapping, zoals dat is gereconstrueerd uit de beschikbare informatie over de constructie. Ten behoeve van het inzicht in de uiteindelijke oorzaak van de instorting is het van belang om kennis te hebben in het constructief gedrag van de spanten en daarom gaat hoofdstuk 4 in op dat constructieve gedrag. Hoofdstuk 5 geeft vervolgens een analyse van de wijze van het bezwijken van de spanten 10 en 11, de twee spanten die als eerste zijn bezweken. Hoofdstuk 6 geeft de analyse van de uiteindelijke oorzaak van de instorting, waarna hoofdstuk 7 een reconstructie geeft van het verloop van de instorting. Ten slotte geeft hoofdstuk 8 de conclusies en hoofdstuk 9 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).
- De ondertekeningen van de foto's worden gevolgd door een bronverwijzing. De gebruikte bronverwijzingen zijn:

- o (TNO) = een door TNO, tijdens de projectbezoeken, gemaakte foto.
- o [xx] = een door de Arbeidsinspectie beschikbaar gestelde foto.
- Ten behoeve van de plaatsbepaling in het project is gebruik gemaakt van de nummering van de spanten zoals aangegeven op de oorspronkelijke constructietekeningen en van een codering van de knooppunten van de spanten. De figuren met deze coderingen zijn opgenomen in hoofdstuk 2 van het onderhavige deelrapport.

Deelrapport B geeft de resultaten van het veldonderzoek. Een deel van die resultaten is relevant gebleken voor de analyse van de oorzaak van de instorting en is derhalve in de onderhavige rapportage verwerkt. De resultaten uit deelrapport B die niet relevant zijn gebleken voor de analyse van de oorzaak van de instorting zijn in de onderhavige rapportage niet verwerkt.

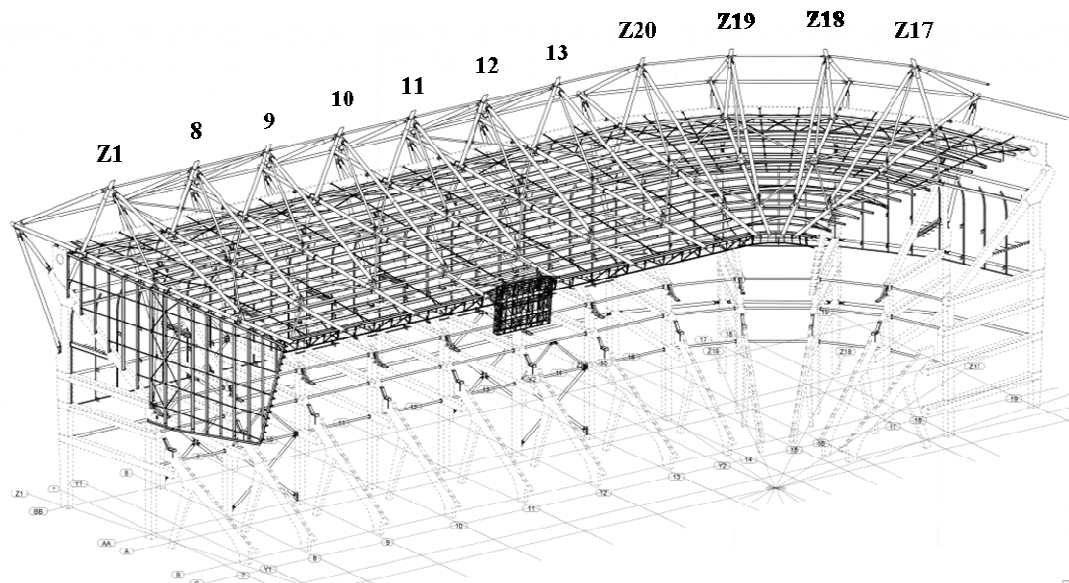
2 Algemene informatie

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):

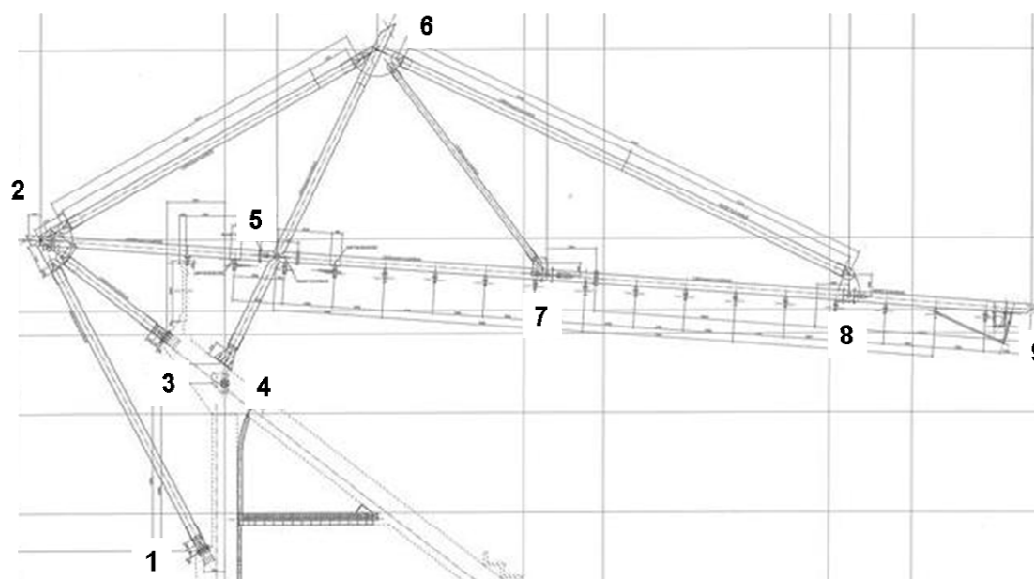
- De vier spanten in de hoek die aansluit aan de L-uitbreiding zijn, vanaf de L-uitbreiding, gecodeerd met Z17 tot en met Z20.
- De zes daarop volgende spanten, die loodrecht op de lengterichting van de tribune zijn gesitueerd, zijn achtereenvolgens gecodeerd van 13 tot en met 8.
- Het eindspant is gecodeerd 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) [T.10]



Figuur 2.2: Codering knooppunten van de spanten [T.01]

3 Verloop van de instorting van de overkapping

3.1 Inleiding

Het onderhavige hoofdstuk geeft een analyse van de start van de instorting en het daarop volgende verloop van de instorting. Hiervoor is in hoofdzaak gebruik gemaakt van de beelden van de beveiligingscamera FCTwenteBouw_2011-7-7_Cam33 [F.008] (deelrapport B; hoofdstuk 3). De beelden van deze beveiligingscamera geven informatie over het omlaag komen van zes van de zeven bezweken spanten, de spanten Z1 en 8 tot en met 12.

De hoofddraagconstructie van de overkapping wordt gevormd door de spanten en de tussenliggende koppelstaven en stabiliteitsverbanden. De overkapping is ingestort als gevolg van het bezwijken van de hoofddraagconstructie. De analyse van het verloop van de instorting is gericht op de spanten van de hoofddraagconstructie, omdat de belasting op de constructie, via de spanten, wordt afgedragen naar de eronder gesitueerde betonnen tribune.

3.2 Start van de instorting van de hoofddraagconstructie

De hoofddraagconstructie van de U-uitbreiding bestond uit in totaal elf spanten. Van deze spanten zijn er vier, de spanten Z17 tot en met Z20, overeind gebleven en niet bezweken. De overige zeven spanten, de spanten Z1 en 8 tot en met 13, zijn tijdens de instorting wel bezweken. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de instorting bij (één van) die spanten is gestart.

De beelden van de beveiligingscamera FCTwenteBouw_2011-7-7_Cam33 [F.008] (deelrapport B; hoofdstuk 3 en rapport NFI [A.06]) geven informatie over het omlaag komen van zes van de zeven bezweken spanten, de spanten Z1 en 8 tot en met 12. Ten aanzien van deze beelden geldt het volgende:

- De beelden tonen het uiteinde van de genoemde zes spanten aan de binnenzijde van het stadion en/of onderdelen die zich ten tijde van de instorting aan de uiteinden van de spanten bevonden.
- Het uiteinde van de spanten wordt aan de binnenzijde van het stadion in verticale richting niet gesteund. Vanwege de relatief grote lengte van het deel van de onderregel vanaf het gesteunde knooppunt 5 tot aan het in verticale richting ongesteunde uiteinde, resulteert een beweging op een willekeurige plaats van het spant, ook in een verticale beweging van het ongesteunde uiteinde van het spant.
- Indien in het camerabeeld zichtbare delen bewegen in een richting loodrecht op het beeld van de camera, zijn dergelijke bewegingen niet zichtbaar op het camerabeeld.
- Op de camerabeelden is zichtbaar dat de vidi-wall en de onderzijde van de hangbrug aan spant 11 als eerste gaan bewegen (deelrapport B; hoofdstuk 3 en rapport NFI [A.06]). Omdat de vidi-wall rechtstreeks is bevestigd aan de spanten 10 en 11 en de hangbrug aan de gordingen onder spant 11, betekent dit dat spant 10 en/of spant 11 als eerste gaat bewegen, van de zes spanten waarover de camerabeelden informatie geven. Uit de camerabeelden is niet te achterhalen of spant 10 of spant 11 als eerste gaat bewegen of dat ze beide gelijktijdig gaan bewegen.

- Voor spant 12 geldt dat op de camerabeelden zichtbaar is dat spant 12 niet als eerste gaat bewegen. Dit betekent ofwel dat spant 12 later is gaan bewegen dan de spanten 10 en 11 ofwel dat spant 12 eerder is gaan bewegen, met een verplaatsingsrichting van het uiteinde van het spant loodrecht op het camera-beeld.
- Voor de spanten Z1, 8 en 9 geldt dat op de camerabeelden zichtbaar is dat deze later in beweging komen dan de spanten 10 en 11.

Zoals in paragraaf 3.1 toegelicht, is de overkapping ingestort vanwege het bezwijken van de hoofddraagconstructie. Teneinde na te gaan welk spant als eerste onderdeel van de hoofddraagconstructie is bezweken, wordt onderstaand per spant een analyse gegeven van de beschikbare informatie over het verloop van de instorting:

- Voor de spanten Z1, 8 en 9 geldt dat de camerabeelden aangeven dat deze na de spanten 10 en 11 beginnen met bewegen. Dat betekent dat deze spanten niet als eerste onderdeel van de hoofddraagconstructie zijn bezweken.
- De spanten 10 en/of 11 starten op de camerabeelden als eerste met bewegen. Het als eerste bewegen van deze spanten duidt erop dat de hoofddraagconstructie ter plaatse van deze spanten als eerste kan zijn bezweken. Uit de camerabeelden is echter niet te achterhalen of spant 10 of spant 11 als eerste is bezweken of dat ze beide gelijktijdig zijn bezweken.
- Voor spant 12 geldt dat als dit spant als eerste onderdeel van de hoofddraagconstructie zou bezwijken, dat het uiteinde van dat spant als eerste verticaal omlaag zou moeten bewegen. Spant 12 was namelijk via koppelstaven, in zijdelingse richting, verbonden met de spanten 11 en 13 en die koppelstaven waren na de instorting nog steeds verbonden met de betreffende spanten. Omdat een verticale beweging van het uiteinde van spant 12 niet loodrecht op het camerabeeld is gesitueerd, zou een dergelijke beweging zichtbaar geweest moeten zijn op de camerabeelden. Omdat uit de camerabeelden blijkt dat die verticale beweging niet als eerste is opgetreden, is spant 12 niet als eerste onderdeel van de hoofddraagconstructie is bezweken.
- De camerabeelden geven geen informatie over spant 13. Indien spant 13 als eerste zou bezwijken, dan zouden vervolgens eerst spant 12 en pas daarna spant 11 bezwijken. Het uiteinde van spant 12 zou in dat geval ofwel eerst horizontaal in de richting van richting spant 13 verplaatsen, ofwel schuin omlaag richting spant 13. Omdat beide bewegingsvormen van het uiteinde van spant 12 niet als eerste op de camerabeelden zijn waargenomen en omdat dergelijke bewegingsvormen ook niet loodrecht op het camerabeeld zijn gesitueerd, kan dit bezwijkmechanisme niet als eerste hebben plaatsgevonden. Dit betekent dat spant 13 niet als eerste onderdeel van de hoofddraagconstructie is bezweken.
- Bij de hiervoor weergegeven analyses is ervan uitgegaan dat de instorting op één locatie is gestart en dat vanuit die locatie de overige delen van de hoofddraagconstructie zijn bezweken. Hoewel het uiterst onwaarschijnlijk is, is het echter niet volledig uit te sluiten dat spant 13 op hetzelfde moment is bezweken als de spanten 10 en/of 11.

Samenvattend wordt uit het voorgaande geconcludeerd dat de instorting van de hoofddraagconstructie vrijwel zeker is gestart met het bezwijken van spant 10 en/of spant 11. Dit zijn de twee spanten die, direct voorafgaand aan de instorting, het zwaarst belast waren.

Op basis van de beschikbare informatie is niet te achterhalen of spant 10 of spant 11 als eerste is bezweken of dat ze beide gelijktijdig zijn bezweken. Het is uiterst onwaarschijnlijk, maar niet uit te sluiten, dat de instorting is gestart met het gelijktijdig bezwijken van spant 13 en de spanten 10 en/of 11. Omdat dit uiterst onwaarschijnlijk is en omdat het als eerste bezwijken van alleen de spanten 10 en 11 voldoende is voor het bezwijken van het gehele deel van de overkapping van spant Z1 tot en met spant 13, is het als eerste bezwijken van spant 13 in dit rapport niet verder behandeld.

3.3 Volgorde van de instorting

Ten aanzien van de volgorde van het bezwijken van de zeven spanten Z1 en 8 tot en met 13 is uit de beelden van de beveiligingscamera FCTwenteBouw_2011-7-7_Cam33 [F.008] en uit de in de vorige paragraaf weergegeven analyse het volgende te achterhalen:

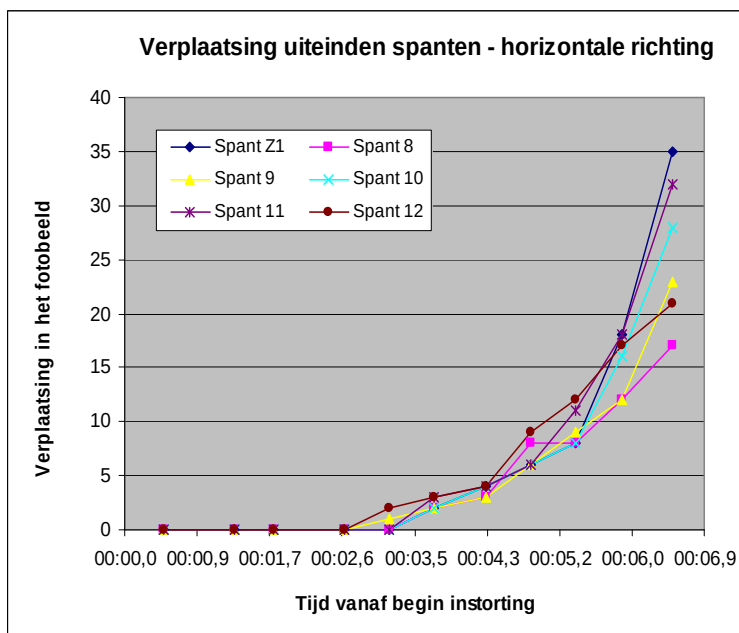
- Spant 10 en/of spant 11 zijn als eerste bezweken.
- Na spant 10 en 11 is spant 12 bezweken.
- Na spant 12 zijn achtereenvolgens de spanten 9, 8 en Z1 bezweken.

Daar spant 13 buiten het camerabeeld valt, geven de camerabeelden geen directe informatie over spant 13. Zoals aangegeven in paragraaf 3.2, kan uit de camera-beelden wel worden afgeleid dat spant 13 vrijwel zeker niet als eerste is bezweken en dus is bezweken na het bezwijken van de spanten 10 en 11. Zeer waarschijnlijk is spant 13 na spant 12 bezweken.

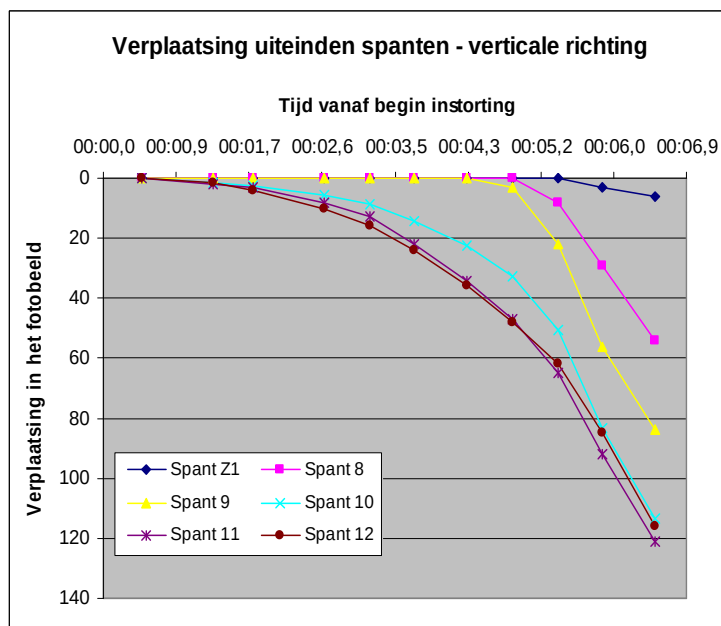
Indien de hiervoor weergegeven volgorde wordt gecombineerd met de informatie over de verplaatsing van de uiteinden van de spanten (figuur 3.1 en 3.2) kunnen daaruit, in chronologische volgorde, de onderstaande fasen van de instorting gereconstrueerd worden (figuur 3.3). De gebruikte nummering van de verschillende fasen is ook weergegeven in figuur 3.3, links in de figuur.

1. De uiteinden van de spanten 10 en/of 11 beginnen verticaal omlaag te bewegen.
2. Het uiteinde van spant 12 begint verticaal omlaag mee te bewegen met de spanten 10 en 11.
3. Hoewel niet op de camerabeelden waar te nemen, beweegt het uiteinde van spant 13 zeer waarschijnlijk verticaal omlaag mee met de spanten 10 tot en met 12.
4. Naast het verder omlaag bewegen (verticaal) van de uiteinden van de spanten 10 tot en met 13, bewegen de uiteinden van alle spanten nu tevens in horizontale richting, in de richting van spant Z20. Dit kan worden verklaard doordat de koppelstaven en de gordingen, die de spanten onderling verbinden, in eerste instantie aan spant Z20 vast blijven zitten. Hierdoor worden de spanten in zijdelingse richting weggetrokken.
5. Het uiteinde van de spanten Z1, 8 en 9 begint verticaal omlaag mee te bewegen met de spanten 10 tot en met 13. Tevens verplaatsen de uiteinden van alle spanten (Z1 en 8 t/m 13) verder in horizontale richting.

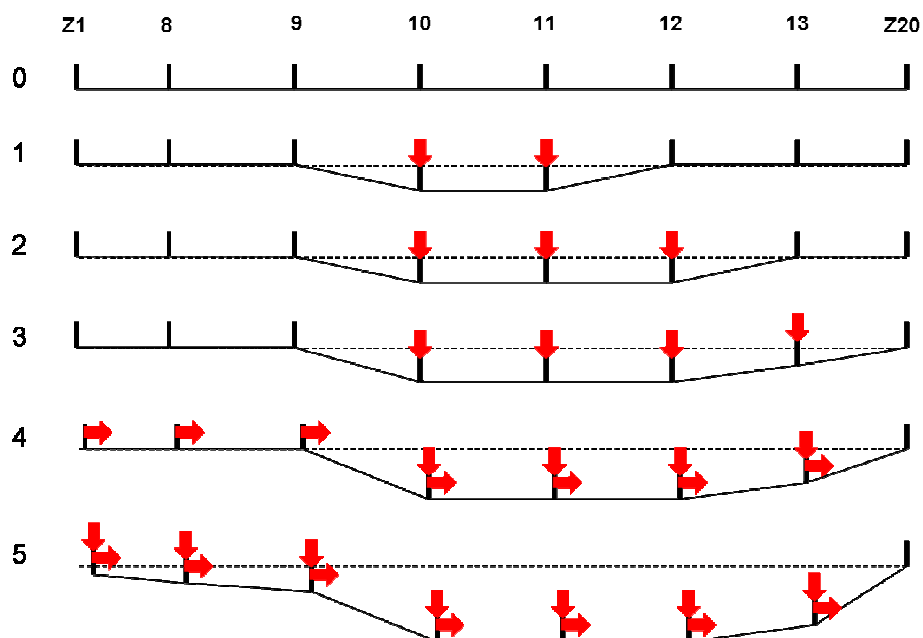
De hiervoor weergegeven fasering van de instorting komt overeen met de situering van de spanten na de instorting, zoals weergegeven op foto 3.4. Op die foto is zichtbaar dat de uiteinden van de bezweken spanten in horizontale richting verplaatst zijn, in de richting van spant Z20.



Figuur 3.1: Verplaatsing van de uiteinden van de spanten Z1 – 12 in de tijd, in horizontale richting in het fotobeeld (deelrapport B, hoofdstuk 3)



Figuur 3.2: Verplaatsing van de uiteinden van de spanten Z1 – 12 in de tijd, in verticale richting in het fotobeeld (deelrapport B, hoofdstuk 3)



Figuur 3.3: Schematische weergave van het verloop van het omlaag komen van de uiteinden van de spanten; de nummers van de verschillende fasen (links in de figuur) komen overeen met de nummers in de tekst van paragraaf 3.2

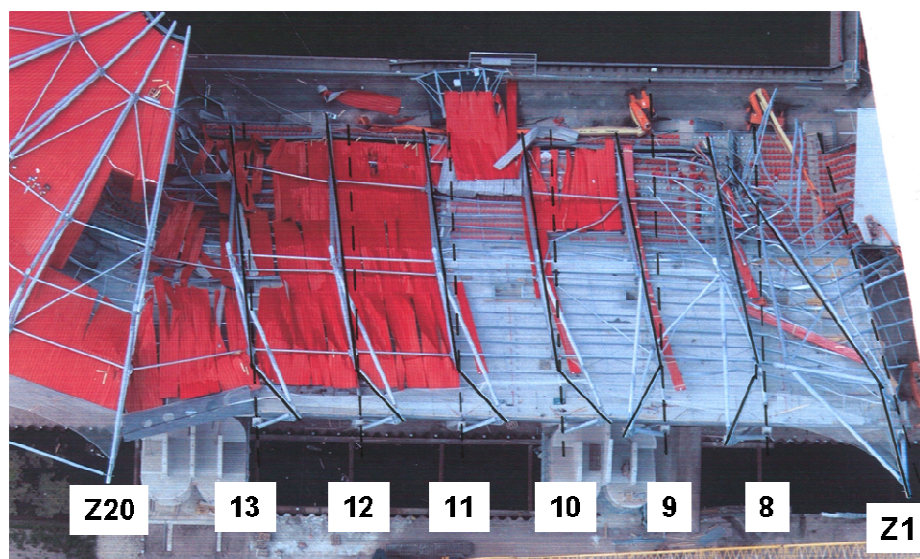


Foto 3.4: Overzicht van de bezwoken spanten; de stippellijnen zijn de oorspronkelijke posities van de spanten; de getrokken lijnen de situering van de onderregel van de spanten na de instorting [F.106] (deelrapport B; foto 6.4)

4 Constructieve aspecten van de spanten 10 en 11

4.1 Algemeen

In het voorgaande hoofdstuk is geconcludeerd dat de instorting is gestart met het bezwijken van spant 10 en/of spant 11. Ten behoeve van het vaststellen van de oorzaak van het bezwijken van deze spanten is het noodzakelijk om inzicht te hebben in het constructieve gedrag van de spanten. Dat gedrag wordt in dit hoofdstuk nader toegelicht, opgesplitst in het constructief gedrag van de gehele spanten en het constructief gedrag van het buitenste deel van de spanten.

Op verschillende plaatsen wordt verwezen naar de spantdelen die op knooppunt 2 aansluiten. Dit zijn de volgende spantdelen:

- het spantdeel 2-6
- het spantdeel 2-5
- het spantdeel 2-3
- het spantdeel 1-2.

Deze spantdelen gezamenlijk worden in het vervolg van dit rapport aangeduid met "het buitenste deel van de spanten".

4.2 Constructief gedrag spanten

Uit de beschikbaar gestelde foto's [A.02] volgt dat de montage van de spanten tijdens de bouwfase als volgt heeft plaatsgevonden (figuur 2.2 en foto 4.1 en 4.2):

- Ter plaatse van knooppunt 1 is de verankeringschoen op de tribune gemonteerd. Daarbij is een stelruimte vrij gehouden tussen de voetplaat en het beton.
- Ter plaatse van knooppunt 3 is de verankeringschoen op de tribune gemonteerd. Daarbij is de ruimte tussen de voetplaat en het beton opgevuld met stalen stelblokjes.
- Ter plaatse van knooppunt 4 is de verankeringschoen rechtstreeks op het beton van de tribune gemonteerd.
- De spanten zijn op de grond samengesteld, exclusief spantdeel 1-2, waarna de samengestelde spanten met behulp van een kraan op de tribune zijn gemonteerd, op de verankeringschoenen van de knooppunten 3 en 4 (foto 4.1).
- Spantdeel 1-2 is gemonteerd, terwijl het samengestelde spant nog in de kraan hing (foto 4.2). Daarbij is dit spantdeel afgesteld met de moeren op de ankers van de verankeringschoen ter plaatse van knooppunt 1.

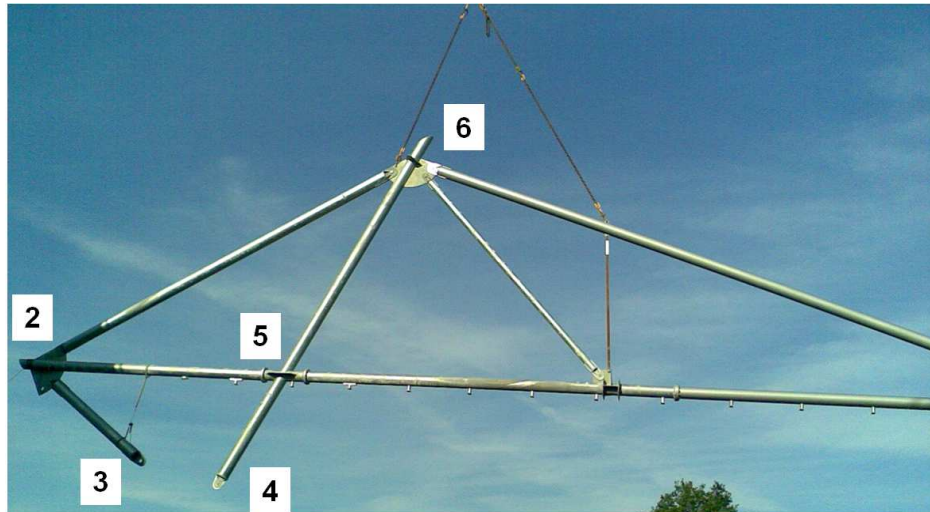


Foto 4.1: Samengesteld spant tijdens de montagefase [F.091]



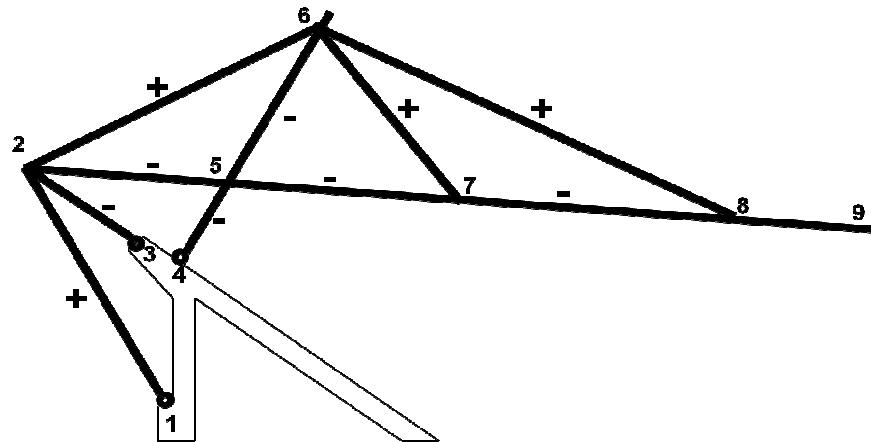
Foto 4.2: Montage spantdeel 1-2, met het samengestelde spant in de kraan [F.051]

Indien de montage van de spanten op een juiste wijze heeft plaatsgevonden, is er sprake van de volgende krachtswerking in de onderdelen van de spanten (figuur 4.3):

- In de onderregel (van knoop 2 tot knoop 8), in het verticale deel van het spant (van knoop 4 tot knoop 6) en in spantdeel 2-3 is sprake van een drukkracht. In figuur 4.3 is dit aangegeven met de code “-”.
- In de spantdeel 1-2, 2-6, 6-7 en 6-8 is sprake van een trekkracht. In figuur 4.3 is dit aangegeven met de code “+”.

Ten aanzien van de krachtswerking in de verschillende spantdelen geldt dat die mede afhankelijk is van het afstellen van spantdeel 1-2 tijdens de montagefase, omdat knooppunt 5 geen scharnier maar een momentvaste knoop is. Indien tijdens de montagefase spantdeel 1-2 bij knooppunt 1 onjuist wordt afgesteld, kan dit spantdeel zich (gedeeltelijk) onttrekken aan de krachtswerking.

Als het spantdeel 1-2 bijvoorbeeld in het geheel niet wordt vastgezet, neemt dat spantdeel geen kracht op en komt in spantdeel 2-3 een trekkracht in plaats van een drukkracht. Het gevolg daarvan is onder meer een extra buigend moment in spantdeel 4-5.



Figuur 4.3: Schematische weergave van de constructieve werking van een spant (+ = spantdeel met trekkracht; - = spantdeel met drukkracht)

In de richting loodrecht op het vlak van de spanten zijn ter plaatse van de knooppunten 2, 5, 6, 7 en 8 koppelstaven voorzien. Deze koppelstaven voorkomen de verplaatsingen van de spanten loodrecht op het vlak van de spanten.

4.3 Constructieve opbouw buitenste deel van de spantdelen

Onderstaand wordt, per onderdeel van het buitenste deel van de spanten, ingegaan op de constructieve aspecten daarvan.

4.3.1 Spantdeel 1-2

Het spantdeel 1-2 is een buisprofiel dat ter plaatse van knooppunt 1 is verbonden met de betonconstructie. In dit spantdeel was direct voorafgaand aan de instorting, uitgaande van een juiste montage, een trekkracht aanwezig.

Ter plaatse van knooppunt 1 is dit spantdeel middels een stalen verankeringschoen verbonden aan de betonconstructie (foto 4.4).

In het vlak van het spant werkt deze verbinding scharnierend; het spantdeel kan roteren om de 'pen' die zowel door het 'gat' in de verankeringschoen als door het 'gat' in de plaat aan het uiteinde van het spantdeel is gestoken (pen-gatverbinding). In de richting loodrecht op het spant kan de verbinding ook als scharnierend worden beschouwd daar:

- de plaat aan het uiteinde van het spantdeel een zeer geringe stijfheid heeft in deze richting,
- in de pen-gatverbinding enige ruimte tussen de plaat aan het einde van het spantdeel en de verankeringschoen aanwezig is (stelruimte).

De verankeringschoen ter plaatse van knooppunt 1 van de spanten 10 en 11 was ten tijde van de instorting niet afgemonteerd. De ruimte tussen de verankeringschoen en het beton was niet opgevuld met mortel (ondersabeld).

Dit heeft echter geen invloed gehad op het constructief gedrag van dit spantdeel ten tijde van de instorting, daar het spantdeel 1-2 onder trek stond en doordat het knooppunt 1 in twee richtingen scharnierend is.

Ter plaatse van knooppunt 2 is de plaat aan het uiteinde van dit spantdeel verbonden aan de schetsplaat van knooppunt 2 (foto 4.5). Ook deze verbinding kan in twee richting als scharnierend worden beschouwd. In het vlak van het spant kan het spantdeel scharnieren, door rotatie om de pen van de pen-gatverbinding. In de richting loodrecht op het spant heeft de plaat aan het uiteinde van het spantdeel een zeer geringe stijfheid.



Foto 4.4: Knooppunt 1

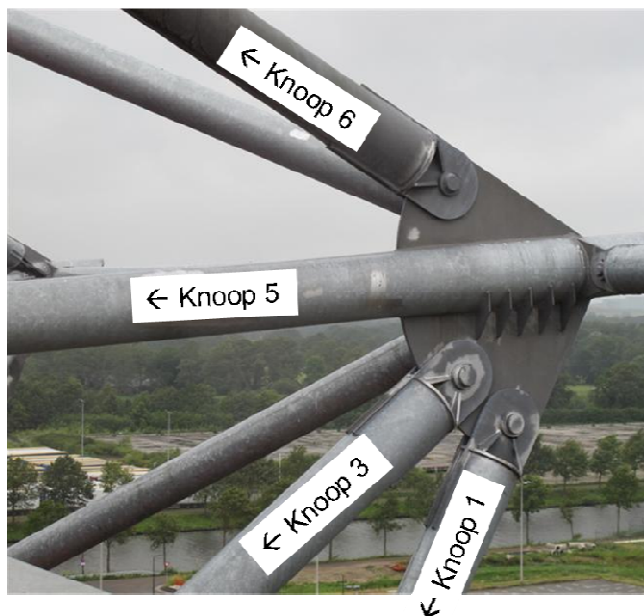


Foto 4.5: Knooppunt 2

4.3.2 Spantdeel 2-3

Het spantdeel 2-3 is een buisprofiel dat ter plaatse van knooppunt 3 is verbonden met de betonconstructie. In dit spantdeel was direct voorafgaand aan de instorting, uitgaande van een juiste montage, een drukkracht aanwezig.

De aansluitingen aan beide uiteinden van dit spantdeel zijn vergelijkbaar met de aansluitingen van beide uiteinden van het spantdeel 1-2. Beide aansluitingen kunnen dan ook in twee richtingen scharnieren beschouwd worden (zie paragraaf 4.3.1).

Ook de verankeringschoen ter plaatse van knooppunt 3 van de spanten 10 en 11 was ten tijde van de instorting niet volledig afgemonteerd (foto 4.6). De ruimte tussen de verankeringschoen en het beton was niet opgevuld met mortel (ondersa-beld). Wel waren metalen stelblokjes geplaatst.

Dit heeft echter geen invloed gehad op het constructief gedrag van het spantdeel ten tijde van de instorting, daar deze metalen stelblokjes de drukkracht uit het spantdeel over kunnen brengen op de betonconstructie.



Foto 4.6: Knooppunt 3

4.3.3 Spantdeel 2-5

Het spantdeel 2-5 is een buisprofiel en vormt het achterste deel van de onderregel van het spant. In dit spantdeel was direct voorafgaand aan de instorting een drukkracht aanwezig.

Ter plaatse van knooppunt 2 vormt dit spantdeel één geheel met de schetsplaat van knooppunt 2 (foto 4.5).

Ter plaatse van knooppunt 5 vormt dit spantdeel één geheel met de aansluitende delen 4-5, 5-6 en 5-7 van het spant (foto 4.7).

Op circa 2 m afstand vanaf het hart van knooppunt 5, in de richting van knooppunt 2, is de buitenste gording van de dakconstructie aan de onderzijde van dit spantdeel gemonteerd.

Op circa 4 m afstand vanaf knooppunt 5 is aan de onderzijde van dit spantdeel een ankerplaat aangebracht (foto 4.8). Via deze ankerplaat is een verankering van het betonnen wandelement aan de onderregel van het spant voorzien. Aan deze verbinding ontleent het spant geen steun. Ten tijde van de instorting waren bij de spanten 10 en 11 de ankers van deze verbinding niet gemonteerd.



Foto 4.7: Knooppunt 5



Foto 4.8: Ankerplaat aan spant 11 ten behoeve van bevestiging aan betonnen wandelement (TNO)

4.3.4 Spantdeel 2-6

Het spantdeel 2-6 is een buisprofiel. In dit spantdeel was direct voorafgaand aan de instorting een trekkracht aanwezig.

De aansluitingen aan beide uiteinden van dit spantdeel zijn gelijk aan de aansluiting van spantdeel 1-2 ter plaatse van knooppunt 2 (foto 4.5 en foto 4.9). De aansluitingen van dit spantdeel kunnen dan ook in twee richtingen scharnierend beschouwd worden (zie paragraaf 4.3.1).

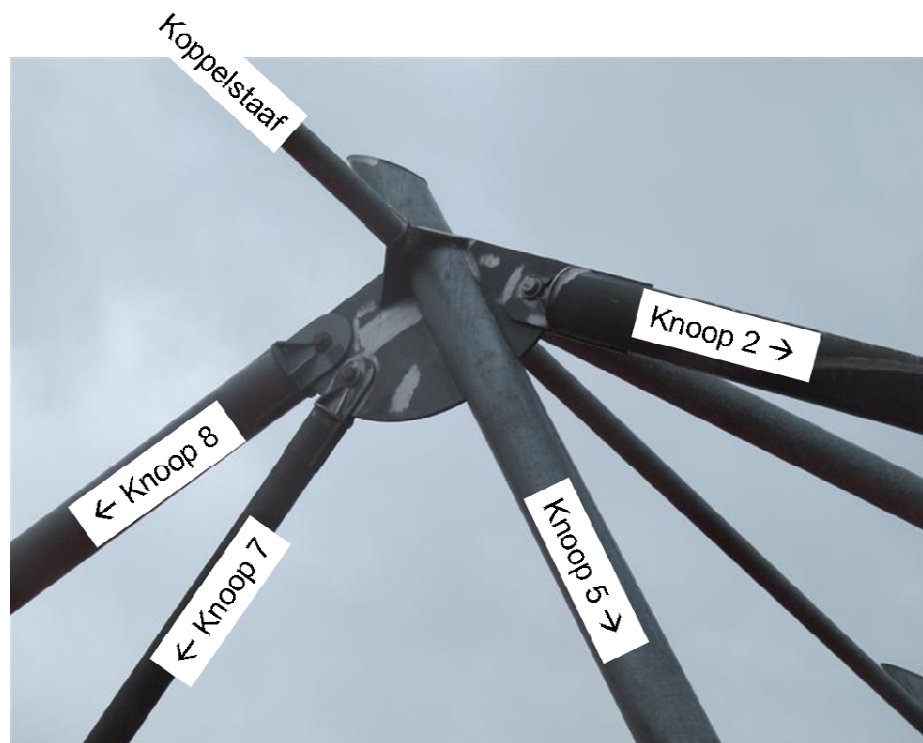


Foto 4.9: Knooppunt 6

4.3.5 Koppelstaven tussen de knooppunten 2 van de verschillende spanten

In de richting loodrecht op het vlak van de spanten zijn koppelstaven voorzien. Dit zijn buisprofielen die de knooppunten 2 van de verschillende spanten onderling verbinden. De verbinding van deze koppelstaven met de spanten kan in twee richtingen scharnierend worden beschouwd:

- in de richting loodrecht op het dakvlak roteert de koppelstaaf om de scharnierende pen-gatverbinding,
- in de richting van het dakvlak heeft de plaat aan het uiteinde van de koppelstaaf een zeer geringe stijfheid.

De koppelstaven verhinderen de verplaatsing van knooppunt 2 in de richting loodrecht op het vlak van de spanten. Ten tijde van de instorting waren deze koppelstaven in het gedeelte tussen de spanten Z17 en Z20 wel aanwezig (foto 4.10), maar in het gedeelte tussen de spanten Z1 en Z20 niet, dus ook niet bij de spanten 10 en 11.



Foto 4.10: Koppelstaven tussen knooppunt 2 van de spanten Z17 – Z20 (TNO)

4.4 Constructief gedrag buitenste deel van de spanten

Uit de in de vorige paragrafen weergegeven constructieve aspecten van het buitenste deel van de spanten volgt dat, bij een juiste montage van spantdeel 1-2, in de spantdelen 2-3 en 2-5 sprake is van een drukkracht, terwijl in de spantdelen 1-2 en 2-6 een trekkracht aanwezig is.

Teneinde te voorkomen dat de spantdelen 2-3 en 2-5 ter plaatse van knooppunt 2 kunnen verplaatsen, in de richting loodrecht op het vlak van de spanten, zijn in het ontwerp van de hoofd draagconstructie koppelstaven tussen de knooppunten 2 van de spanten voorzien. Ten tijde van de instorting waren de koppelstaven tussen de spanten Z20 en Z1 echter niet gemonteerd (foto 4.10). Hierdoor werden de knooppunten 2 van de spanten Z1 tot en met 13 niet gesteund in de richting loodrecht op het vlak van het spant.

Voor de situatie zonder de koppelstaven ter plaatse van knooppunt 2 geldt dat het verplaatsen van de knooppunten 2, in de richting loodrecht op het vlak van de spanten, wordt verhinderd door spantdeel 2-5. De mate waarin dit verplaatsen wordt verhinderd door spantdeel 2-5 wordt bepaald door de buigstijfheid van de onderregel van het spant en door de mate waarin de onderregel, loodrecht op het vlak van de spanten, wordt gesteund.

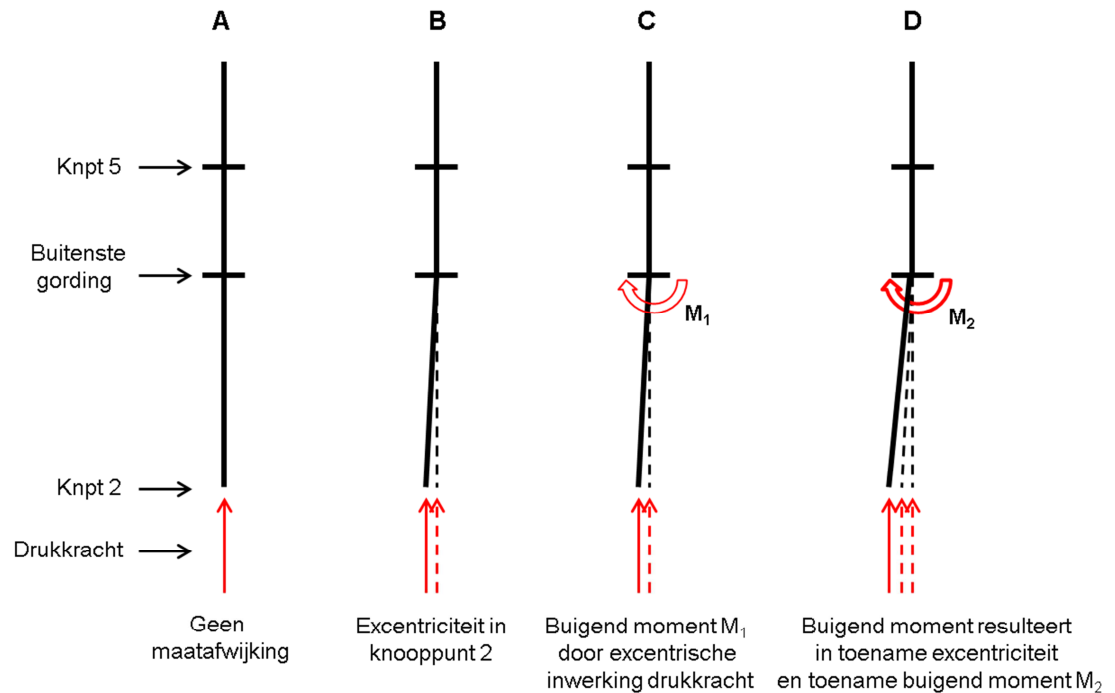
De steun aan de onderregel, loodrecht op het vlak van de spanten, komt voort uit het feit dat de onderregel middels gordingen en middels de wel gemonteerde koppelstaven ter plaatse van de knooppunten 5, 7 en 8, gesteund wordt in de richting loodrecht op het vlak van de spanten. Het niet-gesteunde deel van spantdeel 2-5 is het deel vanaf de buitenste gording tot en met knooppunt 2 (zie foto 4.7).

Zonder maatafwijkingen zijn alle onderdelen van een spant exact in één verticaal vlak gepositioneerd en werken de belastingen in dat zelfde vlak (situatie A in figuur 4.11).

In de praktijk zal die situatie echter nooit optreden, omdat er altijd sprake is van maatafwijkingen ten opzichte van het vlak van het spant. Dergelijke maatafwijkingen worden excentriciteiten genoemd.

Een excentriciteit in knooppunt 2 van spantdeel 2-5 (situatie B in figuur 4.11) resulteert in een excentrische inleiding van de drukkracht in spantdeel 2-5, waardoor er een buigend moment uit het vlak van het spant ontstaat (situatie C in figuur 4.11).

Als gevolg van dit buigend moment neemt de uitbuiging van knooppunt 2 toe, waardoor de excentriciteit van knooppunt 2 verder toeneemt en vervolgens ook het buigend moment (situatie D in figuur 4.11). Dit effect wordt het tweede-orde-effect genoemd en kan resulteren in het bezwijken van spantdeel 2-5, waarbij het deel vanaf de buitenste gording wegbuigt.



Figuur 4.11: Schematisch bovenaanzicht van spantdeel 2-5 en de erop werkende drukkracht

5 Bezwijken van de spanten 10 en 11

5.1 Algemeen

In hoofdstuk 3 is geconcludeerd dat spant 10 en/of spant 11 als eerste is bezweken. Op basis van de beschikbare informatie is niet te achterhalen of spant 10 of spant 11 als eerste is bezweken of dat ze beide gelijktijdig zijn bezweken. In het onderhavige hoofdstuk wordt geanalyseerd op welke wijze die twee spanten zijn bezweken.

5.2 Wijze van bezwijken van de spanten

Uit het veldonderzoek is gebleken dat de relatieve positionering van de spanten 10 en 11 na de instorting, ten opzichte van de oorspronkelijke positionering, voor beide spanten vrijwel gelijk is (figuur 3.3). Verder is uit het veldonderzoek gebleken dat het schadebeeld aan de beide spanten ook vrijwel gelijk is (deelrapport B; hoofdstuk 6). Hieruit wordt geconcludeerd dat de beide spanten op eenzelfde wijze zijn bezweken. Er zal daarom in het vervolg van dit hoofdstuk geen specifiek onderscheid gemaakt worden tussen deze twee spanten.

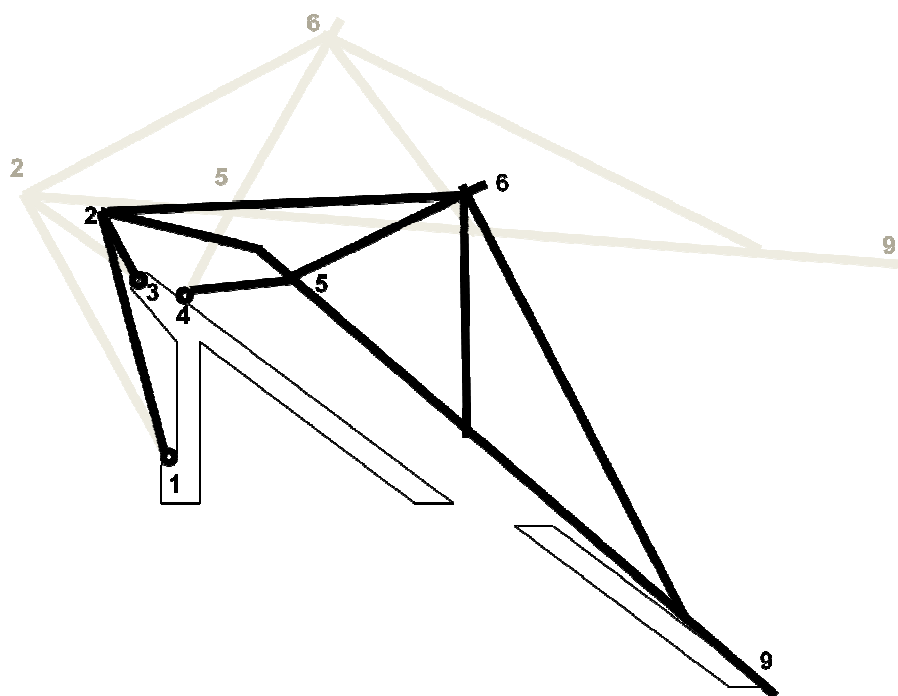
Ten behoeve van het achterhalen van de wijze waarop de spanten 10 en 11 zijn bezweken, dient de volgende informatie uit het veldonderzoek ter ondersteuning (figuur 5.1 en 5.2):

- De spanten staan na de instorting nog vrijwel rechtop; de knooppunten 6 bevinden zich nog nagenoeg recht boven de onderregel van de spanten.
- De onderregel van de spanten is met het uiteinde (knooppunt 9) in horizontale richting weggedraaid in de richting van spant Z20.
- De onderregel van de spanten ligt met het uiteinde (knooppunt 9) op de tribune.
- De verbindingen tussen de spanten en de betonconstructie, ter plaatse van de knooppunten 1, 3 en 4, zijn niet bezweken.
- De spantdelen 4-5 zijn ten opzichte van de situatie voor de instorting gedraaid om knooppunt 4, waarbij knooppunt 5 in de richting van de binnenzijde van de overkapping is verplaatst. De spantdelen 4-5 zijn geplooid, juist onder knooppunt 5, aan de zijde van spantdeel 2-5.
- Het buitenste deel van de spanten, de spantdelen die aansluiten op knooppunt 2, zijn weggebogen in de richting van spant 9. Hiervan zijn alleen de spantdelen 2-5 beschadigd. Deze spantdelen zijn op circa 2 m afstand van het hart van knooppunt 5 geplooid, ter plaatse van de verbinding met de buitenste gording. Van de overige spantdelen zijn alleen de platen aan de uiteinden, ter plaatse van de aansluiting op de betonconstructie, verbogen.

Uit het voorgaande wordt geconcludeerd dat de spanten 10 en 11 niet zijn omgevallen in de richting loodrecht op het vlak van de spanten. De spanten zijn bezweken doordat de spanten omlaag zijn gedraaid, in combinatie met het uit het vlak van de spanten wegbuigen van het buitenste deel van de spanten, richting spant 9.



Figuur 5.1: Positionering van de spanten 10 en 11 na de instorting

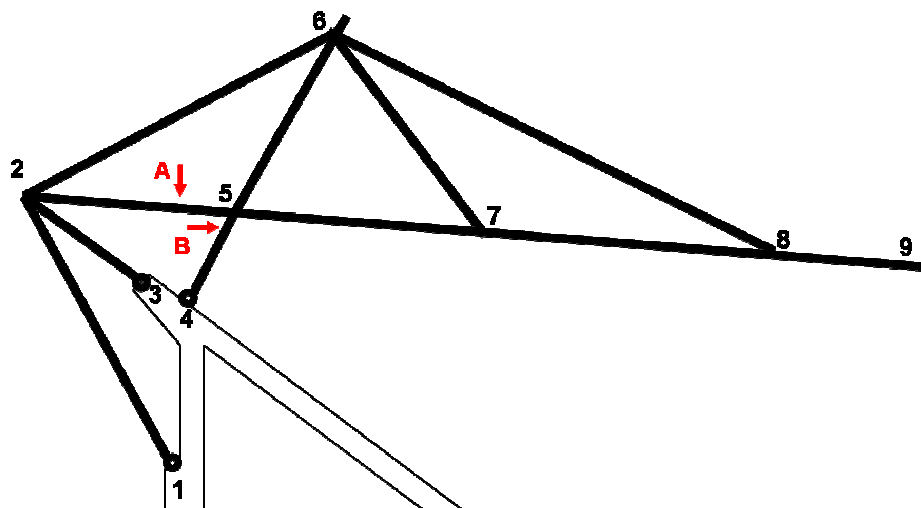


Figuur 5.2: Schematische weergave van positionering spanten 10 en 11 na de instorting

5.3 Bezweken onderdelen van de spanten

Uit het veldonderzoek aan de spanten 10 en 11 is naar voren gekomen dat er op de volgende locaties, in elk van de twee spanten, sprake is van bezweken onderdelen (figuur 5.3 en foto 5.4 - 5.6):

- A. Het spantdeel 2-5 is weggebogen, ter plaatse van de aansluiting met de buitenste gording (locatie A in figuur 5.3). Dit spantdeel is ter plaatse van deze aansluiting geplooid. De richting waarin dit spantdeel is weggebogen is uit het vlak van het spant, in de richting van spant 9. De overige op knooppunt 2 aansluitende spantdelen zijn niet verbogen. Alleen de verbindingsplaten aan de uiteinden van deze spantdelen, ter plaatse van de knooppunten 1, 3 en 6, zijn verbogen.
- B. Het spantdeel 4-5 is geplooid, juist onder knooppunt 5 (locatie B in figuur 5.3). Hierbij is de hoek tussen het spantdeel 2-5 en het spantdeel 4-5 kleiner geworden.



Figuur 5.3: Schematische weergave van spant 10 en 11 met de locaties van de bezweken onderdelen

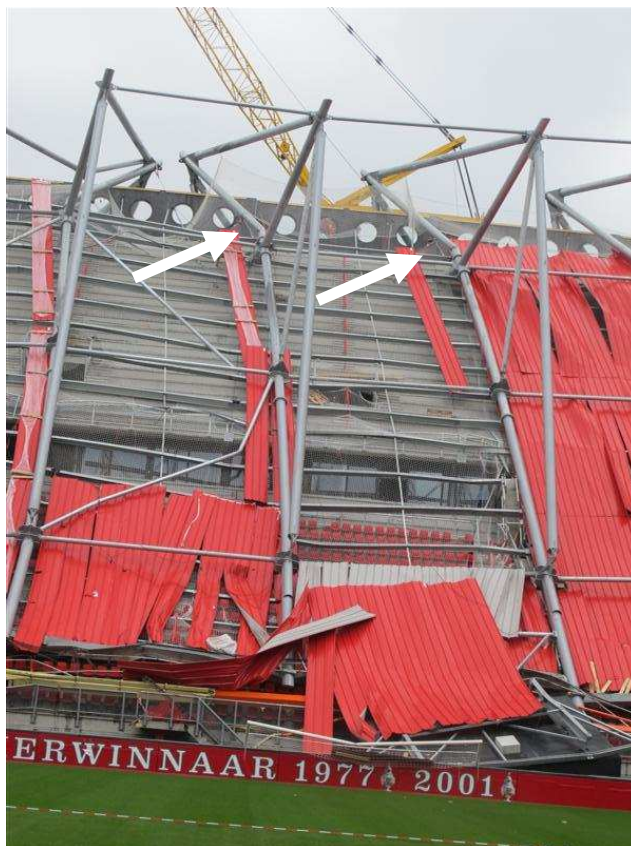


Foto 5.4: Locatie A, waar het spantdeel 2-5 is weggebogen (linker pijl is spant 10; rechter pijl spant 11; TNO)

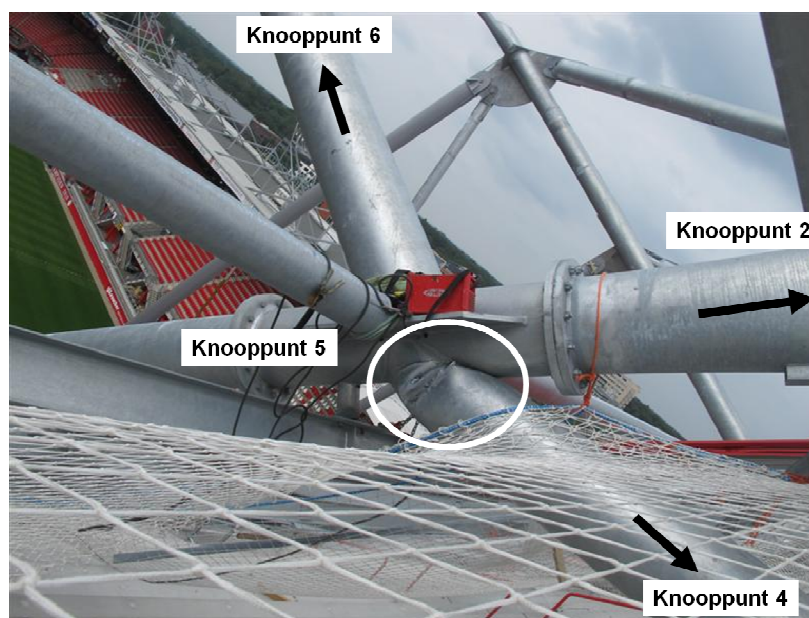


Foto 5.5: Locatie B, waar het verticale spantdeel 4-5 is geplooid (spant 10; TNO)



Foto 5.6: Verbindingsplaat aan uiteinde spantdeel 2-3, ter plaatse van knooppunt 3, is verbogen

Onderstaand volgt een analyse van de volgorde waarin deze twee spantdelen zijn geplooid.

Scenario X: Spantdeel 2-5 is als eerste geplooid (locatie A)

Ervan uitgaande dat de schade op locatie A als eerste ontstaat, verplaatst eerst knooppunt 2 uit het vlak van het spant. Knooppunt 2 verplaatst hierdoor zowel uit het vlak van het spant als in de richting van de binnenzijde van de overkapping. Daardoor kan het gehele spant om knooppunt 4 naar voren draaien. Als gevolg van het naar voren draaien van het spant zullen de spantdelen 2-5 en 4-5 naar elkaar toegedrukt worden, waardoor het spantdeel 4-5 in de hoek bij knooppunt 5 plooit, aan de zijde van spantdeel 2-5 (locatie B). In dit scenario ontstaat de schade op locatie A als eerste; de schade op locatie B is dan gevolgschade.

Het hiervoor beschreven scenario geldt zowel voor de situatie waarbij spantdeel 1-2 op een juiste wijze is gemonteerd als voor de situatie waarbij spantdeel 1-2 niet op een juiste wijze is gemonteerd (zie hoofdstuk 4).

Scenario Y: Spantdeel 4-5 is als eerste geplooid (locatie B)

Ervan uitgaande dat de schade op locatie B als eerste ontstaat, buigen de spantdelen 2-5 en 4-5 als eerste naar elkaar toe. Ten aanzien van het naar elkaar toe buigen van deze twee spantdelen zijn twee situaties te onderscheiden (zie hoofdstuk 4):

1. Spantdeel 1-2 is op een juiste wijze gemonteerd, waardoor dit spantdeel constructief functioneert zoals beoogd.
2. Spantdeel 1-2 is niet op een juiste wijze gemonteerd, waardoor dit spantdeel zich geheel of gedeeltelijk onttrekt aan de krachtswerking in het spant.

Ad 1: Spantdeel 1-2 is op een juiste wijze gemonteerd

Als spantdeel 1-2 op een juiste wijze is gemonteerd, is het naar elkaar toe buigen van de spantdelen 2-5 en 4-5 pas mogelijk als:

- a knooppunt 2 naar voren verplaatst. Dit is alleen mogelijk als knooppunt 2 eerst uit het vlak van het spant verplaatst, daar het spantdeel 2-5 een vaste lengte heeft. Dit is echter scenario X, waarbij de schade op locatie B ontstaat na de schade op locatie A.
- b het spantdeel 4-5 uitknikt als gevolg van de drukkracht in spantdeel 4-5. Ten aanzien hiervan geldt dat de drukkracht in spantdeel 4-5 gelijk is aan de drukkracht in het spantdeel 5-6. Omdat spantdeel 5-6 een grotere lengte heeft dan spantdeel 4-5, zal spantdeel 5-6 in dat geval eerder uitknikken dan spantdeel 4-5. Spantdeel 5-6 is echter niet bezwaken.

Dit betekent dat als spantdeel 1-2 op een juiste wijze gemonteerd zou zijn, dat de schade op locatie B dan niet als eerste kan zijn ontstaan.

Ad 2: Spantdeel 1-2 is niet op een juiste wijze gemonteerd

Als spantdeel 1-2 niet op een juiste wijze is gemonteerd, onttrekt dit spantdeel zich geheel of gedeeltelijk aan de krachtswerking in het spant. Daardoor neemt de drukkracht in spantdeel 2-3 af en ontstaat in spantdeel 4-5 een extra buigend moment, dat het grootst is nabij knooppunt 5. De combinatie van de reeds aanwezige drukkracht in spantdeel 4-5 en het extra buigend moment zou kunnen resulteren in het plooiën van spantdeel 4-5, direct onder knooppunt 5, de schade op locatie B. Als gevolg van de vervormingen die daardoor ontstaan, komt spantdeel 1-2 alsnog volledig onder spanning, en ontstaat er een nieuwe situatie, die vergelijkbaar is met de hiervoor onder ad 1 beschreven situatie. Dit betekent dat het plooiën van spantdeel 4-5, de schade op locatie B, niet zal resulteren in het volledig bezwijken van het spant, tenzij het buitenste deel van het spant alsnog uit het vlak van de spanten wegbuigt, conform scenario X.

Samenvattend wordt uit het voorgaande geconcludeerd dat de spanten 10 en 11 zijn bezwaken doordat het buitenste deel van de spanten uit het vlak van de spanten is weggebogen in de richting van spant 9.

6 Oorzaak van de instorting

6.1 Algemeen

In de voorgaande hoofdstukken is geconcludeerd dat de instorting is gestart met het bezwijken van spant 10 en/of spant 11. Van die spanten is het buitenste deel weggebogen in de richting van spant 9. In dit hoofdstuk wordt een analyse gegeven van de oorzaak van het wegbuigen van het buitenste deel van die twee spanten, hetgeen tevens een analyse is van de oorzaak van de instorting.

6.2 Analyse van mogelijke oorzaken

Het wegbuigen van het buitenste deel van de spanten 10 en/of 11 kan veroorzaakt zijn door twee oorzaken:

1. Een externe belasting tegen het buitenste deel van de spanten, in de richting loodrecht op het vlak van de spanten.
2. Instabiliteit van het buitenste deel van de spanten.

Ad 1: Externe belasting loodrecht op het vlak van de spanten

Een externe belasting tegen het buitenste deel van de spanten, loodrecht op het vlak van de spanten, resulteert in het opzij drukken van dat deel van de spanten. Omdat, ten tijde van de instorting, de koppelstaven aan knooppunt 2 van de spanten 10 en 11 niet aanwezig waren, is het opzij drukken van het buitenste deel van de spanten niet verhinderd door die koppelstaven.

Uit de beschikbaar gestelde foto's van de periode voorafgaand aan de instorting [A.02] volgt dat er werkzaamheden uitgevoerd werden met kranen. Het aanstoten van een spant door een kraan zou derhalve kunnen resulteren in een externe belasting loodrecht op het vlak van de spanten. Voor het overige hebben er geen werkzaamheden plaatsgevonden die geresulteerd zouden kunnen hebben in een externe belasting tegen het buitenste deel van de spanten 10 en/of 11.

Uit onderzoek van de Arbeidsinspectie is gebleken dat de beide kranen op de bouwplaats geen causaal verband hadden met de oorzaak van het instorten van de hoofddraagconstructie [PV.12]. Dit betekent dat een externe belasting, loodrecht op het vlak van de spanten, geen oorzaak is van het wegbuigen van het buitenste deel van de spanten 10 en 11.

Ad 2: Instabiliteit van het buitenste deel van de spanten

De krachtswerking in de spanten, direct voorafgaand aan de instorting, resulteert in een drukkracht in de spantdelen 2-5. Indien sprake is van scenario X, zoals omschreven in het vorige hoofdstuk, is in de spantdelen 2-3, direct voorafgaand aan de instorting, ook een drukkracht aanwezig. Voor scenario Y geldt dat er aanvankelijk sprake kan zijn van een kleinere drukkracht of zelf een trekkracht in de spantdelen 2-3. Na het plooien van spantdeel 4-5 resulteren de daarmee gepaard gaande vervormingen echter alsnog in een (grotere) drukkracht in de spantdelen 2-3, direct voorafgaand aan het volledig bezwijken van de spanten.

Initiële maatafwijkingen in de geometrie van knooppunt 2 en in de spantdelen 2-3 en 2-5, zoals deze zeker aanwezig zijn, resulteren erin dat de drukkracht in deze twee spantdelen niet centrisc is. Deze niet-centrische drukkracht resulteert in een verplaatsing van knooppunt 2, loodrecht op het vlak van de spanten.

Knooppunt 2 werd direct voorafgaand aan de instorting alleen door spantdeel 2-5 gesteund tegen een verplaatsing uit het vlak. Dit betekent dat de verplaatsing van knooppunt 2 resulteert in een moment in spantdeel 2-5, naast de reeds daarin aanwezige drukkracht. Dit moment resulteert vervolgens in een extra verplaatsing van knooppunt 2, waardoor de excentriciteit van de drukkracht verder toeneemt en daarmee ook het moment (het zogenaamde tweede-orde-effect). Indien de excentriciteit te groot wordt, bezwijkt spantdeel 2-5 als gevolg van de combinatie van de drukkracht, met het door de excentriciteit ontstane moment. De daarbij behorende bezwijkvorm is het plooiën van spantdeel 2-5 ter plaatse van de aansluiting van het spantdeel aan de buitenste gording, omdat spantdeel 2-5 ter plaatse van de buitenste gording, in de richting loodrecht op het vlak van de spanten, gesteund wordt. Deze bezwijkvorm komt overeen met hetgeen in de praktijk is waargenomen bij de spanten 10 en 11.

Samenvattend volgt uit het voorgaande dat het uit het vlak van de spanten wegbuigen van het buitenste deel van de spanten 10 en/of 11 is veroorzaakt door instabiliteit van het buitenste deel van de spanten.

6.3 Constructieve beschouwing van de oorzaak van de instorting

6.3.1 Inleiding

Teneinde na te gaan of de instabiliteit van het buitenste deel van de spanten rekenkundig verklaard kan worden, is een constructieve beoordeling uitgevoerd van de spanten (deelrapport C). Bij deze beoordeling is de hoofddraagconstructie van de overkapping constructief doorgerekend, voor de situatie zoals deze daadwerkelijk was opgebouwd ten tijde van de instorting, met de op dat moment daadwerkelijk aanwezige belastingen. Daarbij is ervan uitgegaan dat de spantdelen 1-2 op een juiste wijze zijn gemonteerd.

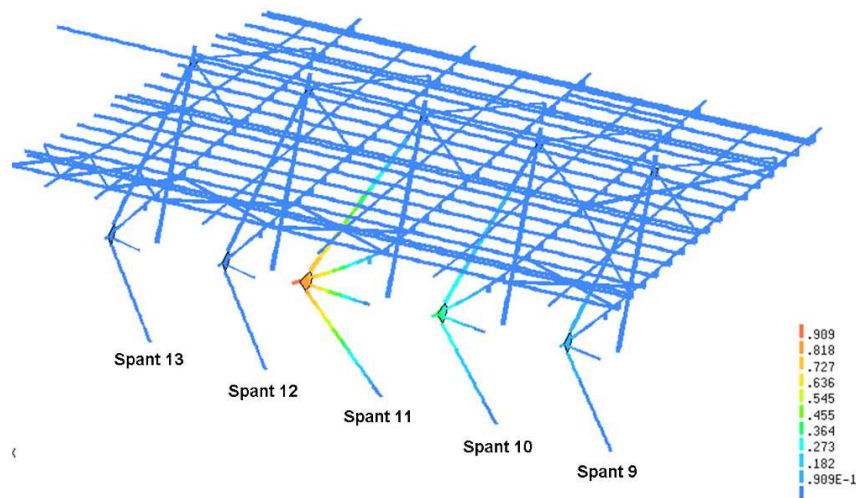
Het deel van de hoofddraagconstructie dat is doorgerekend is het deel vanaf spant 9 tot aan spant Z20.

De voor de constructieve beoordeling toegepaste berekeningsmethodiek is de Euler stabiliteitsanalyse. Bij deze analyse is het begrip Eulerse knikfactor ("n-waarde") belangrijk. Deze waarde geeft informatie ten aanzien van de gevoeligheid van de constructie voor instabiliteit. 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.

6.3.2 Bezwijkvorm

Uit de constructieve beoordeling volgt een bezwijkvorm die is weergegeven in figuur 6.1. In deze figuur is het doorgerekende deel van de hoofddraagconstructie schematisch weergegeven. De blauwe kleur in deze figuur duidt op de onderdelen van de hoofddraagconstructie die niet vervormen bij de start van het bezwijken.

De andere kleuren duiden op de vervormingen die bij de start van het bezwijken ontstaan. Deze vervormingen zijn weergegeven op een relatieve schaal.



Figuur 6.1: Berekende bezwijkvorm van de hoofddraagconstructie ("gerealiseerde situatie")

Bij de vervormingen ten gevolge van de berekende instabiliteit, zoals weergegeven in figuur 6.1, buigt het buitenste deel van de spanten 10 en 11 uit, in de richting loodrecht op het vlak van de spanten, 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.

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.

De berekende bezwijkvorm van de hoofddraagconstructie, waarbij het buitenste deel van de spanten 10 en 11 wegbuigt in de richting loodrecht op het vlak van de spanten, komt overeen met hetgeen in de praktijk daadwerkelijk is aangetroffen.

6.3.3 Eulerse knikfactor

De berekende Eulerse knikfactor van de hoofddraagconstructie is $n=1,67$, hetgeen betekent 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 nog gevoeliger voor instabiliteit geweest dan is berekend. Het voorgaande betekent dat deze constructieve beoordeling aansluit bij hetgeen in de praktijk daadwerkelijk heeft plaatsgevonden, namelijk instabiliteit van het buitenste deel van de spanten.

Teneinde na te gaan wat de invloed is van de ten tijde van de instorting niet gemoniteerde onderdelen van de hoofddraagconstructie, is ook een constructieve beoordeling uitgevoerd waarin de ten tijde van de instorting ontbrekende koppelstaven aan de buitenzijde van de overkapping, tussen de knooppunten 2, wel gemonteerd zouden zijn ("situatie inclusief koppelstaven").

Daarbij zijn de andere aspecten ten aanzien van de opbouw van de hoofddraagconstructie en de aanwezige belastingen niet gewijzigd.

Uit die constructieve beoordeling volgt een n -waarde van de hoofddraagconstructie van $n=12,0$. Een dergelijk hoge waarde geeft aan dat de constructie in deze situatie niet gevoelig is voor instabiliteit. Dit betekent dat er geen sprake geweest zou zijn van instabiliteit van het buitenste deel van de spanten als de koppelstaven tussen de knooppunten 2 aanwezig waren geweest.

6.4 Bijkomende aspecten

6.4.1 Gemonteerde onderdelen

Bij de berekening en analyse in de vorige twee paragrafen is uitgegaan van een situatie waarbij alle ten tijde van de instorting gemonteerde onderdelen van de hoofddraagconstructie waren gerealiseerd zoals beoogd. In de praktijk kan er echter sprake zijn geweest van een situatie waarbij de stabiliteit van de achterzijde van de spanten 10 en/of 11 ongunstiger was dan berekend en geanalyseerd. De volgende aspecten van de ten tijde van de instorting gemonteerde onderdelen hebben een effect op de daadwerkelijk aanwezige stabiliteit van de spanten 10 en/of 11:

1. De geometrie van de doorsnede van de spantdelen 2-5.
2. De maatvoering van de individuele onderdelen van de hoofddraagconstructie.
3. De maatvoering van de verankeringspunten van de spanten 10 en 11 aan de betonnen tribuneconstructie.

Ad 1: De geometrie van de doorsnede van de spantdelen 2-5

Een kleinere diameter en/of wanddikte van de spantdelen 2-5 heeft een negatieve invloed op de grootte van de belasting die door dit spantdeel kan worden opgenomen (de drukkracht in combinatie met het moment). Daarmee heeft dit een negatieve invloed op de stabiliteit van de spanten.

Spantdeel 2-5 van de spanten 10 en 11 is volgens tekening [T.03] een buisprofiel met een diameter van 457 mm en een wanddikte van 7,9 mm. Door de Arbeidsinspectie zijn de maten van de daadwerkelijk toegepaste spantdelen 2-5 van de spanten 10 en 11 gecontroleerd [PV.10]. Bij dat onderzoek zijn de volgende maten gemeten:

- Spantdeel 2-5 van spant 10: wanddikte 8,0 mm en diameter 463,3 mm.
- Spantdeel 2-5 van spant 11: wanddikte 8,1 mm en diameter 463,3 mm.

Deze meetwaarden hebben betrekking op de buisprofielen inclusief de erop aangebrachte zinklaag.

Op basis van deze metingen wordt geconcludeerd dat de diameter en de wanddikte van de spantdelen 2-5 van de spanten 10 en 11 niet minder zijn dan die van de op de tekeningen weergegeven buisprofielen. Er is dus geen sprake geweest van een, in ongunstige zin, afwijkende geometrie van de doorsnede van de spantdelen 2-5 van de spanten 10 en 11.

Ad 2: Maatvoering van de individuele onderdelen van de hoofddraagconstructie

De maatvoering van de individuele onderdelen van de hoofddraagconstructie, inclusief die van de onderlinge verbindingen, heeft invloed op de excentriciteiten in de constructie.

Een toename van die excentriciteiten resulteert in een verhoging van het moment in spantdeel 2-5 en heeft daardoor een negatief effect op de stabiliteit van de spanten.

Ad 3: De maatvoering van de verankeringspunten van de spanten

De maatvoering van de verankeringspunten van de spanten aan de betonnen tribuneconstructie, de knooppunten 1, 3 en 4, heeft eveneens invloed op de grootte van de excentriciteiten in de constructie en dus op de stabiliteit van de spanten.

6.4.2 Aspecten vanuit het veldonderzoek

Tijdens het veldonderzoek zijn enkele specifieke aspecten waargenomen, die een negatieve invloed gehad kunnen hebben op de stabiliteit van de achterzijde van de spanten 10 en/of 11, direct voorafgaand aan de instorting. Deze specifieke aspecten zijn:

4. Tussen de knooppunten 6 van de spanten 9 en 10 was een afwijkende koppelstaaf gemonteerd.
5. Aan knooppunt 5 van spant 10 hing een spankabel.
6. Ontbreken van de stabiliteitsverbanden tussen de spanten 8 en 9.

Ad 4: Afwijkende koppelstaaf

Door de Arbeidsinspectie is aangegeven dat tussen de knooppunten 6 van de spanten 9 en 10 een koppelstaaf was gemonteerd met de code L2185 in plaats van L2186 (deelrapport B; paragraaf 4.1). Uit een door de Arbeidsinspectie uitgevoerde controle van de X-steel vrachtlift [PV.02] is gebleken dat de koppelstaaf L2185 120,2 mm korter was dan de koppelstaaf L2186 die volgens tekening [T.07] gemonteerd had moeten zijn. De door de Arbeidsinspectie in het werk gemeten lengte van twee koppelstaven met de code L2185 is 10,11 m en van twee koppelstaven met de code L2186 10,22 m en 10,225 m [PV.03(a)]. Dit is een lengteverschil van 0,11 respectievelijk 0,115 m.

Montage van een koppelstaaf aan spant 10, met een kortere lengte dan aangegeven in het ontwerp, kan resulteren in een afwijkende positionering van een deel van de knooppunten van spant 10. Indien dit het geval is, resulteert dit in niet voorziene excentriciteiten in de knooppunten van spant 10. Dat heeft een negatieve invloed op de stabiliteit van dit spant.

Ad 5: Spankabel aan knooppunt 5 van spant 10

Tijdens het veldonderzoek is er tussen knooppunt 5 van spant 10 en knooppunt 2 van spant 9 een spankabel aangetroffen (deelrapport B; paragraaf 8.2). Indien deze spankabel onder spanning heeft gestaan, kan dat geresulteerd hebben in een verplaatsing van de beide knooppunten waaraan deze was bevestigd. Indien dit het geval is, resulteert dit in een niet voorziene excentriciteit van knooppunt 5 van spant 10. Dat heeft een negatieve invloed op de stabiliteit van spant 10.

Ad 6: Ontbreken van de stabiliteitsverbanden tussen de spanten 8 en 9

Door de Arbeidsinspectie is aangegeven dat er ten tijde van de instorting, tussen de spanten 8 en 9, slechts één onderdeel van de verticaal georiënteerde stabiliteitsverbanden gemonteerd was (deelrapport B; paragraaf 4.1). Daardoor kon de algehele stabiliteit van de spanten Z1, 8 en 9 niet ontleend worden aan deze stabiliteitsverbanden. De stabiliteit van deze drie spanten werd ontleend aan de stabiliteit van de spanten Z20 tot en met Z17 en de L-uitbreiding.

Als gevolg hiervan kunnen excentriciteiten in de spanten Z1, 8 en 9 geresulteerd hebben in een horizontale belasting op de spanten 10, 11, 12 en 13, loodrecht op het vlak van die spanten. In de spanten 10 en 11 kan deze horizontale belasting geresulteerd hebben in een verplaatsing van één of meerdere knooppunten en daarmee in een verhoging van de excentriciteiten in die spanten. Dat heeft een negatieve invloed op de stabiliteit van deze spanten.

6.5 Initiatie van de instorting

6.5.1 Algemeen

Zoals aangegeven in paragraaf 6.2 onder “ad 1”, is er in de periode direct voorafgaand aan de instorting geen sprake geweest van een externe belasting op het buitenste deel van de spanten 10 en/of 11. Dit betekent dat de instorting niet is geïnitieerd door een dergelijke belasting. De initiatie van de instorting ligt derhalve bij de werkzaamheden die, voorafgaand aan de instorting, op of aan de overkapping hebben plaatsgevonden.

Deze paragraaf geeft een analyse van de werkzaamheden op of aan de overkapping, in relatie tot de initiatie van de instorting. Dit betreft de werkzaamheden die het laatste half uur voor de instorting hebben plaatsgevonden, omdat die periode maatgevend is voor de daadwerkelijke initiatie van de instorting.

6.5.2 Werkzaamheden direct voorafgaand aan de instorting

Door de Arbeidsinspectie is aangegeven dat er in het laatste half uur voor de instorting sprake is geweest van de volgende werkzaamheden op of aan de overkapping van de U-uitbreiding [PV.01 en PV.05]:

1. Montage van de dakplaten.
2. Transport van een persoon met hoogwerker.
3. Losmaken van vangnet onder spant 11.
4. Werkzaamheden met de hangbruggen.
5. Montage van de eindwand aan spant Z1.

Ad 1: Montage van de dakplaten

Ten aanzien van de dakplaten geldt dat de dakplaten, de dag voor de instorting, reeds als pakketten dakplaten op de overkapping aanwezig waren, naast de spanten. Op de ochtend voor de instorting zijn de dakplaten op het binnenste deel van het vak tussen de spanten 9 en 10 uitgelegd en gemonteerd. Uit een foto van de avond voor de instorting blijkt namelijk dat die dakplaten toen nog niet uitgelegd waren (foto 6.1), terwijl dat ten tijde van de instorting wel het geval was.

Ten tijde van de instorting waren drie personen aan het werk op dit deel van de overkapping.



Foto 6.1: Situatie van de dakplaten op de overkapping op de avond voor de instorting [F.064]

Ad 2: Transport van een persoon met hoogwerker

Circa 4 minuten voor de instorting is een arbeider, ter plaatse van spant 10, op de overkapping gestapt, vanuit een hoogwerker. De hoogwerker stond vervolgens tot aan de instorting op dezelfde plaats, met de werkbak nabij de overkapping. De werkbak steunde daarbij echter niet op de overkapping, omdat uit de beelden van de bewakingscamera blijkt dat de werkbak van de hoogwerker, bij het omlaag komen van de overkapping, in eerste instantie stil bleef hangen (deelrapport B; hoofdstuk 3).

Ad 3: Losmaken van vangnet onder spant 11

Circa 2 minuten voor de instorting is naast de linker hangbrug, de hangbrug ter plaatse van spant 11, een onder het dak hangend vangnet losgehaald. Dit net viel samen met een aantal lijnen/touwen naar beneden en bleef verticaal hangen aan het stadiondak. Onbekend is op welke wijze de bevestiging van dit vangnet krachten heeft uitgeoefend op de spanten.

Ad 4: Werkzaamheden met de hangbruggen

In het laatste half uur voor de instorting zijn werkzaamheden uitgevoerd vanuit de twee hangbruggen onder het binnenste deel van de overkapping, in het gedeelte tussen de spanten 11 en 12. In beide hangbruggen waren twee personen aan het werk.

Ten tijde van de instorting was de ene hangbrug gesitueerd nabij spant 11 en de andere nabij spant 12. De hangbrug nabij spant 11 is circa 4 minuten voor de instorting naar die positie verplaatst, vanuit het vak tussen de spanten 11 en 12. De hangbrug nabij spant 12 is circa 8 minuten voor de instorting naar die positie verplaatst, vanuit het vak tussen de spanten 11 en 12.

Ad 5: Montage eindwand aan spant Z1

Ten aanzien van de montage van de eindwand aan spant Z1 geldt dat er op de ochtend voor de instorting diverse stijlen en regels van het eindspant zijn gemon-teerd (foto 6.2 en 6.3). Ten tijde van de instorting was een montageploeg met een hoogwerker aanwezig aan de binnenzijde van spant Z1 (deelrapport B, hoofdstuk 3).



Foto 6.2: Eindwand aan spant Z1 op de dag voor de instorting, omstreeks 16.00 uur [F.076]



Foto 6.3: Eindwand aan spant Z1 op de ochtend voor de instorting, omstreeks 11.10 uur [F.077]

6.5.3 Invloed van de werkzaamheden

De instorting is veroorzaakt door instabiliteit van het buitenste deel van de spanten 10 en/of 11. Spantdeel 2-5 was ten tijde van de instorting niet meer in staat om de daarin aanwezige drukkracht, in combinatie met het buigend moment, op te nemen.

Dit betekent dat de daadwerkelijke initiatie van de instorting is toe te schrijven aan één van de volgende oorzaken, direct voorafgaand aan de instorting:

1. Een toename van de drukkracht in spantdeel 2-5 van spant 10 en/of 11, in combinatie met een daardoor ontstane toename van het buigend moment.
2. Een toename van de excentriciteit in de spanten, met als gevolg een toename van het buigend moment in spantdeel 2-5 van spant 10 en/of 11.

Van de werkzaamheden die hebben plaatsgevonden in het laatste half uur voor de instorting kunnen de volgende werkzaamheden geresulteerd hebben in een toename van de drukkracht en het buigend moment in spantdeel 2-5 van spant 10 en/of 11 en/of in een toename van de excentriciteit in de spanten:

- Een persoon die circa 4 minuten voor de instorting, vanuit een hoogwerker, op de overkapping stapt.
- Het verplaatsen van een hangbrug naar spant 11, circa 4 minuten voor de instorting, en het uitvoeren van werkzaamheden in die hangbrug.
- Het losmaken van een vangnet onder spant 11.
- Montage van de eindwand aan spant Z1.

Samenvattend volgt uit het voorgaande dat er geen sprake is van individuele werkzaamheden waarvan eenduidig vastgesteld kan worden dat die de instorting hebben geïnitieerd. Waarschijnlijk heeft een combinatie van de reguliere werkzaamheden aan de overkapping de instorting geïnitieerd.

7 Reconstructie van de instorting

Op basis van de in het onderhavige rapport weergegeven analyses wordt de instorting als volgt gereconstrueerd:

1. Ten tijde van de instorting is een aantal koppelstaven van het deel van de hoofddraagconstructie tussen de spanten Z1 en Z20 niet gemonteerd. Als gevolg van het ontbreken van de koppelstaven tussen de knooppunten 2 van de spanten Z1 tot en met Z20 is het achterste deel van de spanten Z1 tot en met 13 gevoelig voor instabiliteit.
2. Ten tijde van de instorting is de permanente belasting uit de beoogde eind-situatie grotendeels al aanwezig. Alle dakplaten zijn op de overkapping aanwezig, deels in pakketten en deels uitgelegd, en de gootconstructie, inclusief frame voor reclameborden, is ook aanwezig. Verder is de vidi-wall opgehangen aan het uiteinde van de spanten 10 en 11.
3. Op het moment van de instorting zijn de spanten 10 en 11 het zwaarst belast en is die belasting dusdanig hoog, dat spantdeel 2-5 van spant 10 en/of 11 niet meer in staat is om de daarin aanwezige drukkracht, in combinatie met het buigend moment, op te nemen. Dit komt doordat de koppelstaven aan de knooppunten 2 van die spanten niet aanwezig zijn, waardoor de buitenste delen van die spanten onvoldoende gesteund zijn en wegbuigen in de richting loodrecht op het vlak van de spanten.
4. De instorting wordt waarschijnlijk geïnitieerd door een combinatie van de reguliere werkzaamheden die direct voorafgaand aan de instorting plaatsvinden op of aan de overkapping. Er is geen sprake van individuele werkzaamheden waarvan eenduidig vastgesteld kan worden dat die de instorting hebben geïnitieerd.
5. Na het wegbuigen van het buitenste deel van de spanten 10 en 11 zijn deze spanten niet meer in staat om de daarop werkende belastingen op te nemen en draaien ze weg om knooppunt 4, met de binnenzijde vrijwel rechtstandig omlaag.
6. Het bezwijken van de spanten 10 en 11 resulteert vervolgens in het bezwijken van de overige spanten Z1 tot en met 13, waarbij het niet is uitgesloten dat spant 13 gelijktijdig is bezweken met de spant 10 en/of 11. Dit wordt veroorzaakt doordat, na het wegvallen van de draagkracht van de spanten 10 en 11, de belasting op die spanten overgedragen wordt naar de eraan gesitueerde spanten. Omdat die spanten op een vrijwel gelijke wijze zijn opgebouwd als de spanten 10 en 11 en omdat ook bij die spanten de koppelstaven aan de knooppunten 2 ontbreken, bezwijken die spanten eveneens door het wegbuigen van het buitenste deel. Uiteindelijk komt het gedeelte van de overkapping van spant Z1 tot en met spant 13 in zijn geheel omlaag.

8 Conclusies

In gezamenlijke opdracht van de Arbeidsinspectie (namens het Openbaar Ministerie) en de Onderzoeksraad voor Veiligheid heeft TNO een onderzoek uitgevoerd naar de oorzaak van de instorting van een deel van de overkapping van het stadion De Grolsch Veste. Uit dit onderzoek wordt het volgende geconcludeerd:

1. De instorting is veroorzaakt doordat de hoofddraagconstructie van de overkapping is bezweken onder de daarop werkende belastingen.
2. De hoofdoorzaak van het bezwijken van de hoofddraagconstructie is dat ten tijde van de instorting de koppelstaven tussen de knooppunten 2 van de bezweken spanten niet gemonteerd waren, terwijl de permanente belasting uit de beoogde eindsituatie op dat deel van de overkapping al grotendeels aanwezig was.
3. Als gevolg van het ontbreken van de koppelstaven tussen de knooppunten 2 van de bezweken spanten was het buitenste deel van die spanten onvoldoende gesteund. Hierdoor zijn spant 10 en/of 11, de twee zwaarst belaste spanten, vrijwel zeker als eerste bezweken. Daarbij is het buitenste deel van die spanten weggebogen uit het vlak van de spanten en zijn de spanten naar beneden gedraaid.
4. Na het bezwijken van de spanten 10 en 11 zijn de overige spanten niet in staat om de belasting over te nemen en bezwijken die eveneens. Uiteindelijk komt het gedeelte van de overkapping van spant Z1 tot en met spant 13 in zijn geheel omlaag.
5. De instorting is waarschijnlijk geïnitieerd door een combinatie van de reguliere werkzaamheden die direct voorafgaand aan de instorting plaatsvonden op of aan de overkapping. Er is geen sprake van individuele werkzaamheden waarvan eenduidig vastgesteld kan worden dat die de instorting hebben geïnitieerd.

9 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:

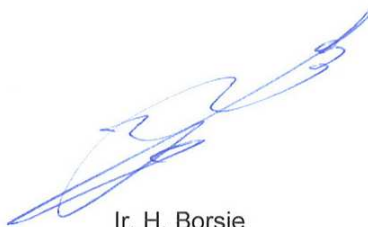


Ir. F.B.J. Gijsbers

Ondertekening:



Ir. L.M. Abspoel



Ir. H. Borsje



Ir. H.G. Burggraaf