

RAPPORT

Onderzoek naar de technische oorzaken van het gedeeltelijk bezwijken van de dakconstructie van het AFAS Stadion te Alkmaar

Klant: A.Z. Vastgoed B.V.

Referentie: BG8798IBRP2003271433

Status: S0/P01.02

Datum: 2 april 2020

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

George Hintzenweg 85
3068 AX ROTTERDAM
Industry & Buildings
Trade register number: 56515154

+31 88 348 90 00 **T**
+31 10 209 44 26 **F**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: Onderzoek naar de technische oorzaken van het gedeeltelijk bezwijken van de dakconstructie van het AFAS Stadion te Alkmaar

Ondertitel:

Referentie: BG8798IBRP2003271433

Status: P01.02/S0

Datum: 2 april 2020

Projectnaam: Rapportage instorting dak

Projectnummer: BG8798-102-100

Auteur(s): ir. Axel Koper en ir. Ton van Overbeek

Opgesteld door: ir. Axel Koper en ir. Ton van Overbeek

Gecontroleerd door: ir. Simon Cox en ir. Wouter Meijers

Datum/paraaf: 2 april 2020

Goedgekeurd door: ir. Erik Middelkoop

Datum/paraaf: 2 april 2020

Classificatie

Projectgerelateerd



Disclaimer

Niets uit deze specificaties/drukwerk mag worden vereenvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van HaskoningDHV Nederland B.V.; noch mogen zij zonder een dergelijke toestemming worden gebruikt voor andere doeleinden dan waarvoor zij zijn vervaardigd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor deze specificaties/drukwerk ten opzichte van anderen dan de personen door wie zij in opdracht is gegeven en zoals deze zijn vastgesteld in het kader van deze Opdracht. Het geïntegreerde QHSE-managementsysteem van HaskoningDHV Nederland B.V. is gecertificeerd volgens ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 en ISO 45001:2018.

Versiegeschiedenis

Versie	Datum	Omschrijving	Opgesteld	Gecontroleerd	Goedgekeurd
1	31-03-2020	Definitief	Axel Koper Ton van Overbeek	Simon Cox Wouter Meijers	Erik Middelkoop
2	02-04-2020	Tekstuele wijzigingen	Axel Koper Ton van Overbeek	Simon Cox Wouter Meijers	Erik Middelkoop

1	Inleiding	9
1.1	Aanleiding en doel onderzoek	9
1.2	Aanpak en leeswijzer	9
1.3	Documenten, tekeningen en foto's	10
2	Verzamelde informatie	11
2.1	Overzicht AFAS Stadion	11
2.2	Betrokken partijen bij het ontwerp en bouw	12
2.3	Dakconstructie AFAS Stadion	12
2.3.1	Vakwerkligger	13
2.3.2	Krachtenwerking vakwerkligger	14
2.4	Visuele inspectie	15
2.5	Videobeelden	23
2.6	Meteorologische gegevens	24
2.6.1	Wind	24
2.6.2	Sneeuw	25
3	Hypotheses	26
3.1	Inleiding	26
3.2	Stappen in de levensfasen van de vakwerkligger	27
3.3	Hypotheses	28
4	Analyse	30
4.1	Beeldmateriaal	30
4.1.1	Conclusies camerabeelden	34
4.2	Windbelasting tijdens levensduur	34
4.2.1	Conclusies windbelasting tijdens levensduur	35
4.3	Windtunnelonderzoek	35
4.3.1	Conclusies windtunnelonderzoek	36
4.4	Beoordeling bezweken lassen	37
4.4.1	Macroscopisch onderzoek	39
4.4.2	Schade aan verbinding kopplaat-regel	42
4.4.3	Schade aan de verbinding kopplaat-bovenknooppunt	43
4.4.4	Productie	44
4.4.5	Moedermateriaal	44
4.4.6	Hardheid	45
4.4.7	Coating	45
4.4.8	Conclusies beoordeling bezweken lassen	45
4.5	Niet-destructief onderzoek	46
4.5.1	Conclusies niet-destructief onderzoek	47
4.6	Onderzoek normaalkracht in de bovenregels	48

4.6.1	Normaalkracht in de bovenregel van vakwerkligger 40	49
4.6.2	Normaalkracht in de bovenregel van vakwerkligger 41	50
4.6.3	Conclusies onderzoek normaalkracht in bovenregels	50
4.7	Aangrijpingspunt maximale opwaartse en neerwaartse windbelasting	51
4.8	Onderzoek capaciteit verbinding bovenregels	52
4.8.1	Conclusies detailanalyses	55
4.9	Degradatie	55
4.9.1	Corrosie	55
4.9.2	Vermoeiing	56
4.10	Bezwijkvolgorde	58
5	Testen van hypotheses	63
5.1	Bewezen hypotheses	63
5.1.1	Belastingen	63
5.1.2	Ontwerp verbinding	63
5.1.3	Kwaliteit van de lassen	63
5.1.4	Degradatie van de constructie	64
5.1.4.1	Eerder bezwaken lassen	64
5.1.4.2	Corrosie	64
5.1.4.3	Vermoeiing	64
5.2	Verworpen hypotheses	64
5.3	Rangschikken van hypotheses	66
6	Conclusies	70
7	Referenties	71

Bijlagen

Bijlage A	Documentenlijst
Bijlage B	RHDHV Rapport – Belastinggeschiedenis BG8798IBRP2003251553 RHDHV Belastinggeschiedenis
Bijlage C	RWDI Report – AFAS Stadion 200319 2000636 – RWDI-Wind Induced Structural Responses, incl. bijlagen
Bijlage D	SGS INTRON Rapport – Beoordelen bezwaken lassen AFAS Stadion A111090-R20190402-SGS Intron-Beoordelen bezwaken lassen AFAS Stadion, incl. bijlagen
Bijlage E	RHDHV Rapport – 3D model AFAS Stadion as 37 t/m 42 BG8798IBRP2003241515 RHDHV 3D Model AFAS Stadion as 37 t/m 42, incl. bijlagen
Bijlage F	RHDHV Rapport – Detail analyse BG8798IBRP2003261316 RHDHV Detail analyse

Managementsamenvatting

Er is onderzoek uitgevoerd naar de instorting van een gedeelte van de dakconstructie van het AFAS Stadion. Het doel van het onderzoek is om de technische oorzaken van de instorting vast te stellen. Hierbij is gebruik gemaakt van de “Delftse aanpak” om het onderzoek te structureren en hypothesen op te stellen.

Informatie voor het onderzoek is verzameld op locatie en middels een bureaustudie. Zo is op locatie de bezweken constructie vastgelegd met een 3D laserscanner in een point cloud, zijn er delen uit de constructie gesneden voor nader onderzoek en zijn er foto's gemaakt. Met de bureaustudie zijn foto's, videobeelden, documenten, tekeningen en windgegevens verzameld.

Om de hypothesen te testen zijn er meerdere onderzoeken uitgevoerd, waaronder een analyse van de camerabeelden (CCTV) van de instorting, een analyse van de ontwerpberekening, een beoordeling van de lassen, windtunnelonderzoek, detailanalyses van de verbindingen, een analyse van de historische windsnelheden en de bepaling van de bezwijkvolgorde.

Het gedeeltelijk bezwijken van het dak van het AFAS Stadion is veroorzaakt door het bezwijken van de verbinding van de bovenregel bij vakwerkligger 40. Dit was het gevolg van neerwaartse windbelasting tijdens een storm. De hoofdoorzaak van het bezwijken van deze verbinding is:

- 1) De lassen van de verbinding zijn te dun uitgevoerd.

Doordat de lassen van de verbinding te dun zijn uitgevoerd is de capaciteit naar schatting met 50% gereduceerd. Daarnaast speelden er twee andere oorzaken een rol:

- 2) De verbinding in de bovenregel van vakwerkligger 40 was verzwakt door eerder bezweken lassen.
- 3) Het ontwerp van de verbinding was niet goed.

Overige mogelijke technische oorzaken hebben geen significante rol gespeeld.

De normaalkracht op de dag van instorting is 35% lager dan de maximaal opgetreden normaalkracht gedurende de levensduur. Rond het moment van oplevering, waarschijnlijk in januari 2007, is er al een scheur ontstaan in de verbinding van de bovenregel van vakwerkligger 40. Deze scheur is ontstaan omdat de lassen te dun zijn uitgevoerd. Het optreden van de scheur heeft corrosie en laag-cyclische vermoeiing tot gevolg. De laag-cyclische vermoeiing heeft de capaciteit nog verder gereduceerd na optreden van deze scheur. De corrosie en de scheur moeten zichtbaar kunnen zijn geweest bij een visuele inspectie van deze verbinding. Het ontwerp van de verbinding was niet goed en heeft de capaciteit van de verbinding ongeveer met 20% gereduceerd.

In het ontwerp zijn fouten gemaakt bij het bepalen van de windbelasting. De bij het ontwerp gehanteerde normaalkracht was ongeveer 20% lager dan de normaalkracht volgens NEN 6702. Deze norm laat ook het gebruik van windtunnelonderzoek toe om de windbelasting te bepalen. Dit is bij het ontwerp niet gedaan, maar dit had wel gekund. De bij het ontwerp gehanteerde normaalkracht is 15% hoger dan de normaalkracht die volgens het windtunnelonderzoek toegepast had kunnen worden. Daaruit volgt dat de fouten bij het bepalen van de windbelasting niet de oorzaak zijn van de instorting.



Acroniemen

Acroniem	Acroniem beschrijving
OvV	Onderzoeksraad voor Veiligheid
RHDHV	Royal HaskoningDHV

Verklarende woordenlijst

Term	Termomschrijving
Hypothese	Een mogelijke technische oorzaak die heeft geleid tot bezwijken van de constructie
Stramienlijn	Een hulplijn op een technische tekening.
Tribuneconstructie	De staalconstructie die de tribunedelen ondersteund.
Vakwerkligger	De vakwerkliggers zijn de dragers van het dak. Een vakwerkligger is een ligger die is samengesteld uit staven die aaneengesloten vormvaste driehoeken vormen.
Vakwerkkolom	De vakwerkkolom vormt de koppeling tussen de tribuneconstructie en de vakwerkligger. De vakwerkkolom is een kolom die is samengesteld uit staven die aaneengesloten vormvaste driehoeken vormen.
Gording	Een balk waarop het dakbeschot van een hellend dak geplaatst wordt.
Stabiliteitsverband	Een deel van een constructie die de afdracht verzorgt van horizontale belastingen op een gebouw naar de fundering.
HAZ	De heat affected zone (HAZ), of warmte-beïnvloede zone (WBZ), is een zone in materiaal dat door lassen of een andere bewerking met grote warmte-inbreng niet gesmolten is maar waarvan de kristalstructuur en eigenschappen zijn veranderd.

1 Inleiding

Op zaterdag 10 augustus 2019 is een gedeelte van de dakconstructie van het AFAS Stadion ingestort. Figuur 1-1 geeft het stadion en het ingestorte deel weer. De instorting heeft plaatsgevonden op de Molenaartribune (bouwdeel C) rond de middellijn van het veld. De vakwerkliggers op de stramienlijnen 38 tot en met 41 zijn bezweken, waardoor de dakconstructie tussen de stramienlijnen 37 en 42 is ingestort.



Figuur 1-1 Foto AFAS Stadion met gedeeltelijk ingestorte dakconstructie [1]

1.1 Aanleiding en doel onderzoek

AZ heeft Royal HaskoningDHV (hierna RHDHV) gevraagd om de technische oorzaken van de instorting te onderzoeken. RHDHV voert geen onderzoek uit naar de achterliggende oorzaken. Het onderzoek gaat ook niet in op schuld en aansprakelijkheid. De Onderzoeksraad voor Veiligheid (hierna OvV) onderzoekt het voorval ook.

Dit onderzoek heeft als doel het vaststellen van de directe technische oorzaken van het gedeeltelijk bezwijken van de dakconstructie van het AFAS Stadion.

1.2 Aanpak en leeswijzer

De aanpak van dit onderzoek is gebaseerd op het artikel "Improving reliability in forensic engineering: the Delft approach" [2]. Dit onderzoek bestaat uit de volgende zes stappen:

- 1) Het uitvoeren van een verkenning

In de verkenning wordt bepaald wat het doel en de grenzen van het onderzoek zijn.

- 2) Het verzamelen van informatie

Informatie is verzameld op locatie en middels een bureaustudie. Zo is op locatie de bezweken constructie vastgelegd met een 3D laserscanner in een point cloud, zijn er delen uit de constructie gesneden voor nader onderzoek en zijn er foto's gemaakt. Met de bureaustudie zijn foto's, videobeelden, documenten, tekeningen en windgegevens verzameld. De verzamelde informatie wordt behandeld in Hoofdstuk 2.

3) Het opstellen van de hypotheses

De hypotheses voor de technische oorzaken van de instorting worden opgesteld op basis van de “Delftse aanpak”. Dit is een methode waarmee technische oorzaken worden opgespoord. Dit proces is beschreven in Hoofdstuk 3.

4) Het uitvoeren van analyses

Om de hypotheses te testen zijn er meerdere onderzoeken uitgevoerd, waaronder een analyse van de camerabeelden (CCTV) van de instorting, een analyse van de ontwerpberekening, en beoordeling van de bezweken lussen, windtunnelonderzoek, detailanalyses van de verbindingen, een analyse van de historische windsnelheden en de bepaling van de bezwijkvolgorde. Hoofdstuk 4 beschrijft de resultaten van deze onderzoeken.

5) Het testen van de hypotheses

De hypotheses worden getest en de oorzaken worden gerangschikt in Hoofdstuk 5.

6) Het opstellen van conclusies

Op basis van de bewezen hypotheses en de rangschikking van deze hypotheses worden conclusies getrokken ten aanzien van de technische oorzaken van de instorting. Deze conclusies zijn gegeven in hoofdstuk 6.

1.3 Documenten, tekeningen en foto's

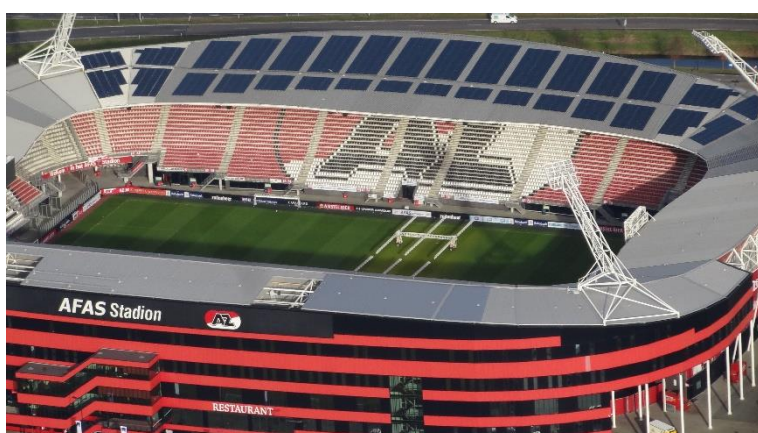
RHDHV heeft documenten, tekeningen en foto's ontvangen van AZ en de Gemeente Alkmaar. Bijlage A geeft een overzicht van de informatie die RHDHV heeft ontvangen. Bronnen worden in dit rapport genummerd vermeld, in de referentielijst is een volgnummer (RHDHV Ref. nummer) opgenomen die correspondeert met het overzicht van bijlage A. Overige bronnen worden zonder volgnummer gerefereerd.

2 Verzamelde informatie

Dit hoofdstuk presenteert de feitelijke informatie die op locatie en bij de bureaustudie is verzameld. Het betreft een overzicht van het stadion, de betrokken partijen, de dakconstructie, een visuele inspectie van de ingestorte delen en een weergave van de camerabeelden.

2.1 Overzicht AFAS Stadion

Het AFAS Stadion is het in 2006 geopende stadion van voetbalclub AZ in Alkmaar. De draagconstructie van het hoofdgebouw (bouwdeel A) en de overige bouwdelen (B, C en D) is gemaakt van staal en beton. De dakconstructie is bij alle bouwdelen gemaakt van staal. Een overzicht van het stadion na oplevering is gegeven in Figuur 2-1 en een toelichting op de verschillende bouwdelen is gegeven in Tabel 1.

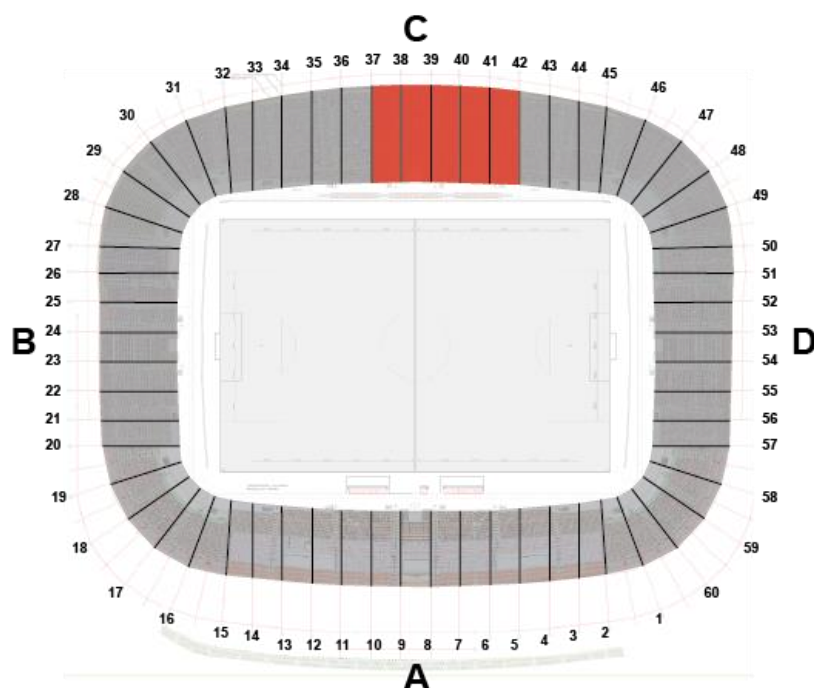


Figuur 2-1 Foto AFAS-Stadion, © Ruben Noom | Dreamstime.com

Tabel 1 Tribunes AFAS Stadion

Bouwdeel	Tribune	Opmerking
A	Victorie	Hoofdingang, lange zijde van het veld, onderaan in Figuur 2-1
B	Alkmaarder Hout	Korte zijde van het veld, links in Figuur 2-1
C	Molenaar	Lange zijde van het veld, op dit dak liggen zonnepanelen, bovenaan in Figuur 2-1
D	Van der Ben	Korte zijde van het veld, rechts in Figuur 2-1

De instorting heeft plaatsgevonden op de Molenaartribune (bouwdeel C). De vakwerkliggers op de stramienen 38 tot en met 41 zijn hierbij naar beneden gekomen. Het bezweken deel van het dak is in rood weergegeven in Figuur 2-2.



Figuur 2-2 Bouwdelen, stramienlijnen en het ingestorte deel van de dakconstructie rood gearceerd

2.2 Betrokken partijen bij het ontwerp en bouw

Tabel 2 geeft een overzicht van partijen die bij het ontwerp en de bouw een rol hebben gespeeld.

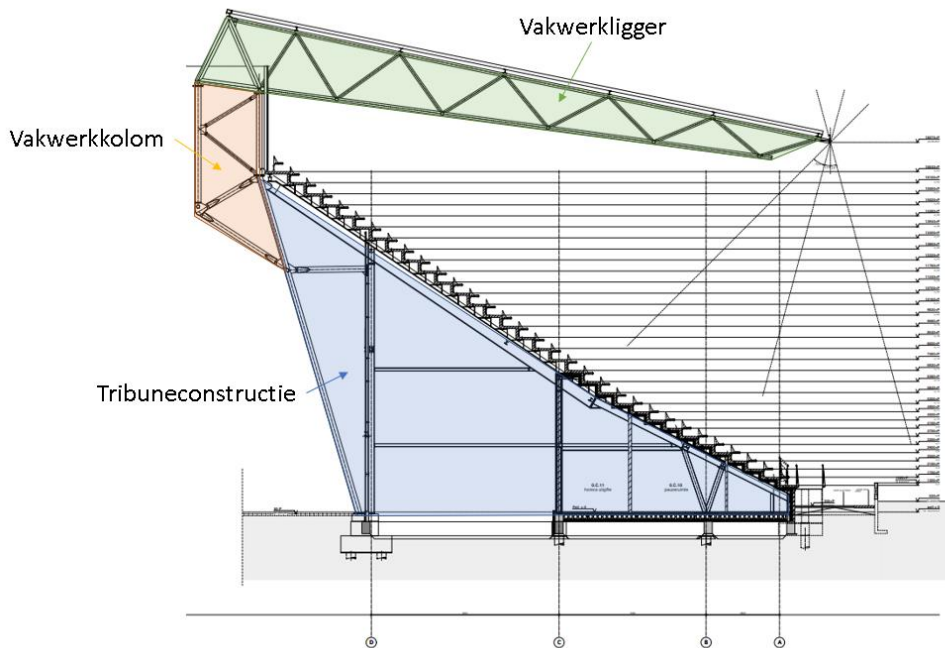
Tabel 2 Partijen betrokken bij het ontwerp en de bouw van het AFAS Stadion

Naam	Rol
ZJA Zwarts & Jansma Architecten	Architect
Bureau Broersma	Constructeur
Bouwbedrijf Midreth B.V	Hoofdaannemer
Ingenieursgroep Romkes BV (hierna staalconstructeur)	Uitwerking staalconstructie
Hardstaal B.V.	Aannemer staalconstructie

2.3 Dakconstructie AFAS Stadion

De dakconstructie van het AFAS Stadion is opgebouwd uit stalen vakwerkspanten. Op elke stramienlijn is een vakwerkspant aanwezig die de krachten op het dak afdraagt naar de onderliggende tribuneconstructie. De hart-op-hart afstand van de stramienlijnen bedraagt 8 meter. De doorsnede van de constructie op stramienlijn 38 is weergegeven in Figuur 2-3. Hierin is te zien dat een vakwerkspant bestaat uit een vakwerkkolom en een vakwerkligger.

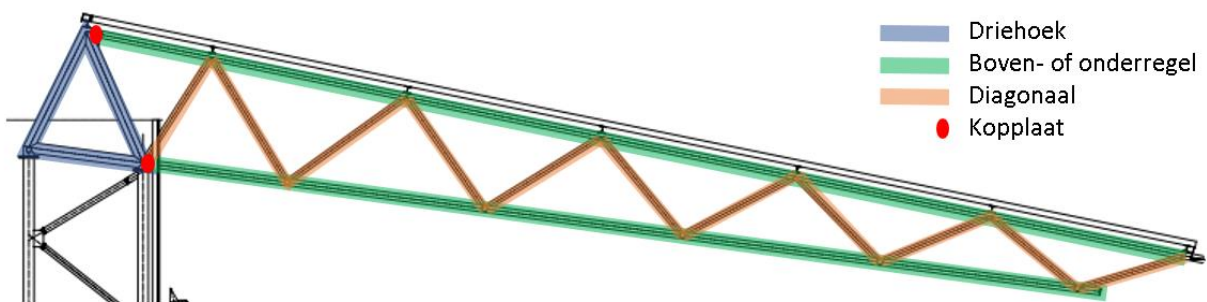
De vakwerkspanten zijn onderling verbonden met gordingen en koppelstaven voor de horizontale stabiliteit van de vakwerkspanten. Voor de globale stabiliteit van de dakconstructie zijn er tussen een aantal vakwerkspanten stabiliteitsverbanden geplaatst. De dakbedekking is gemonteerd op de gordingen en bestaat uit geprofileerde stalen dakplaten. In 2015 zijn er PV-panelen op deze stalen dakplaten aangebracht.



Figuur 2-3 Doorsnede van de constructie van het AFAS Stadion op stramienlijn 38 [3]

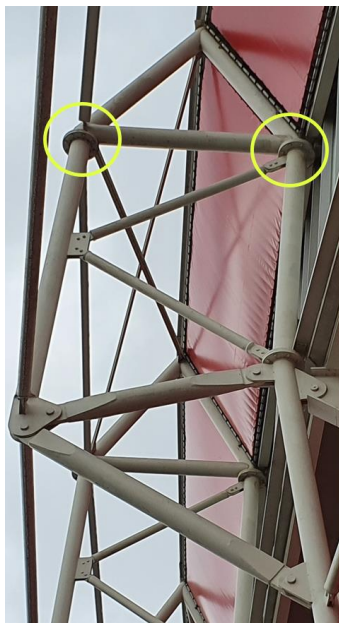
2.3.1 Vakwerkligger

De vakwerkligger bestaat uit een boven- en onderregel met daartussen diagonalen en een driehoek die de krachtsoverdracht verzorgt naar de vakwerkkolom, zie Figuur 2-4. De driehoek bestaat uit ronde buisprofielen net als de diagonalen. De boven- en onderregel bestaan uit vierkante kokerprofielen. De aansluiting tussen de driehoek en de boven- en onderregel is gerealiseerd met een kopplaat, een schetsplaat en één of meerdere verstijver. Alle verbindingen in de vakwerkligger zijn gelast.



Figuur 2-4 Doorsnede vakwerkligger met de verschillende onderdelen gearceerd en benoemd

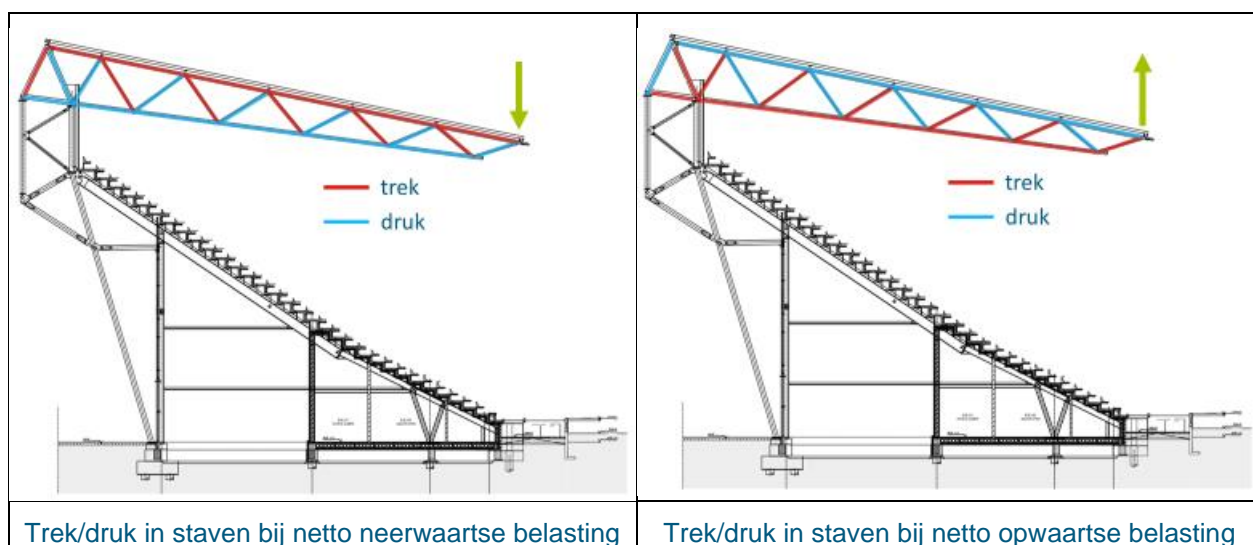
De vakwerkliggers zijn in de fabriek geproduceerd, geleverd en als geheel gemonteerd op de vakwerkkolommen. Hiervoor zijn boutverbindingen gebruikt zoals weergegeven in Figuur 2-5.



Figuur 2-5 Boutverbinding die de vakwerkligger verbindt met de vakwerkkolom. Foto genomen vanaf buitenzijde stadion.

2.3.2 Krachtswerking vakwerkligger

Een belasting op een vakwerkligger leidt tot trek- en drukkrachten in de staven van de vakwerkligger. De belasting op een vakwerkligger bestaat uit permanente belastingen, zoals het eigen gewicht van het dak, en variabele belastingen, zoals wind en sneeuw. Wind kan zorgen voor zowel een neerwaartse belasting (druk) als een opwaartse belasting (zuiging) op de vakwerkligger. Omdat vakwerkliggers licht zijn in verhouding tot het dakoppervlak dat ze ondersteunen kan windzuiging leiden tot een netto opwaartse belasting op de vakwerkligger. Afhankelijk van de belastingrichting worden de staven op trek of op druk belast, zie Figuur 2-6.



Figuur 2-6 Krachtswerking in vakwerkligger bij neerwaartse (links) en opwaartse belasting (rechts)

2.4 Visuele inspectie

In de week na het voorval zijn er door RHDHV verschillende visuele inspecties uitgevoerd. Figuur 2-7 toont een overzicht van de schade na de instorting inclusief de nummers van de stramienlijnen.



Figuur 2-7 Schade na de instorting inclusief de nummers van stramienlijnen

Wat opvalt aan de schade na de instorting is dat de dakconstructie tussen de vakwerkliggers 39 en 41 vrijwel intact is. Dit wordt bevestigd door Figuur 2-8, welke vanaf de bovenzijde van de tribune is genomen. Vakwerkligger 38 daarentegen is wel zwaar vervormd, zo is de uit-het-vlak vervorming van de ligger duidelijk zichtbaar in Figuur 2-9. Daarnaast is in Figuur 2-7 te zien dat een aantal gordingen aan de niet-bezweken liggers 37 en 42 hangen, deze zijn wel los gekomen van liggers 38 en 41.

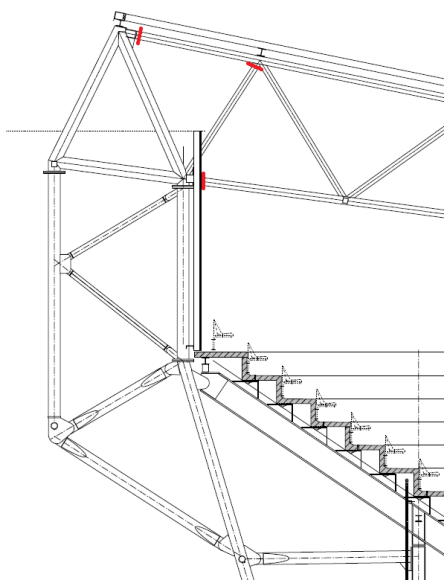


Figuur 2-8 Vakwerkliggers 39 t/m 41 gezien vanaf de bovenzijde van de tribune



Figuur 2-9 Vervorming uit het vlak van vakwerkligger 38

Bij alle vier de ingestorte vakwerkliggers zijn op dezelfde posities breukvlakken aangetroffen. Breukvlakken zijn aangetroffen bij de aansluiting van de boven- en onderregels op de kopplaten en bij de aansluiting van bepaalde diagonalen op de bovenregels. De breukvlakken zijn in rood aangegeven in Figuur 2-10. Figuur 2-11 toont een foto met de aansluiting van de boven- en onderregel op de kopplaten bij de niet-ingestorte vakwerkligger 36. Figuur 2-12 t/m Figuur 2-15 tonen de breukvlakken die zijn vastgesteld bij de visuele inspectie.



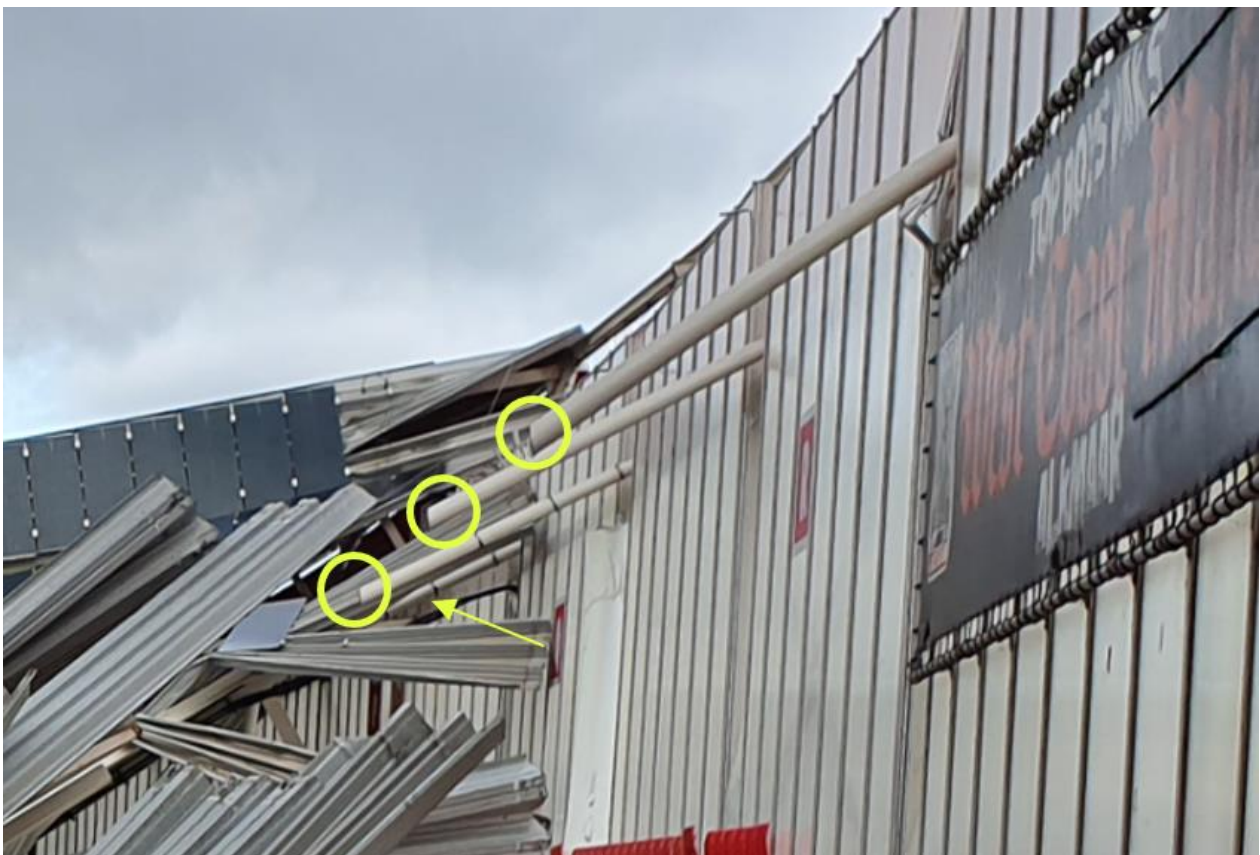
Figuur 2-10 Positie van breukvlakken in de vakwerkliggers



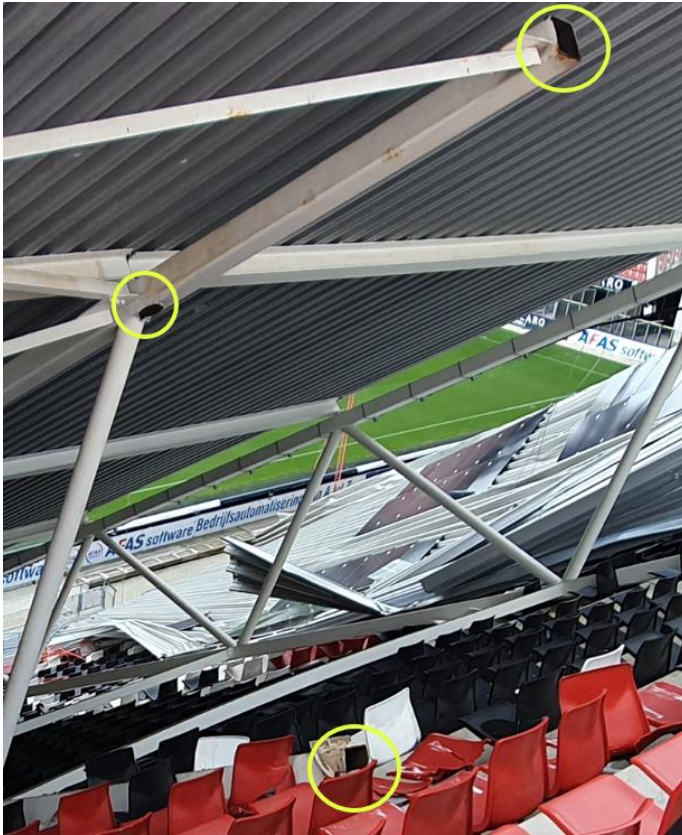
Figuur 2-11 Detailfoto van aansluiting van boven- en onderregel op kopplaten bij vakwerkligger 36



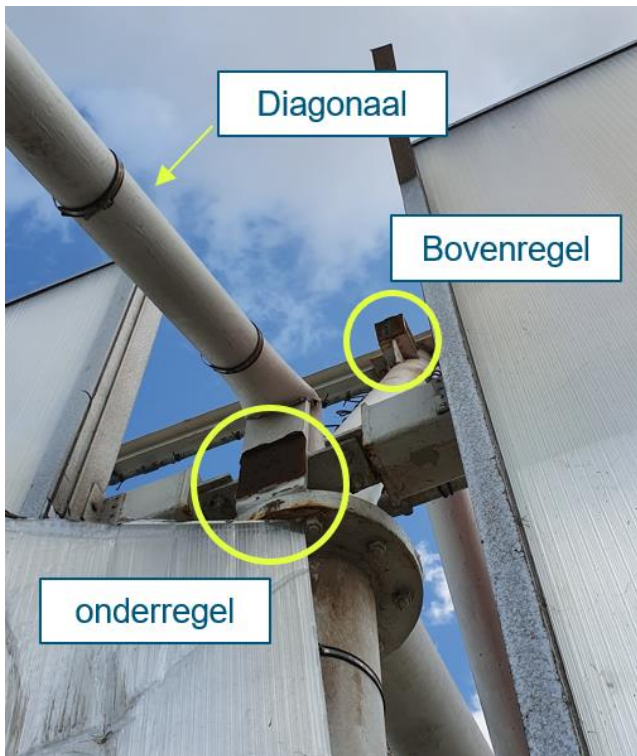
Figuur 2-12 Breukvlakken in de vakwerkliggers bij aansluiting van de bovenregels op de kopplaten



Figuur 2-13 Breukvlakken bij de aansluiting van diagonalen op de bovenregels (de diagonalen zijn bij de instorting naar beneden gebogen)



Figuur 2-14 Breukvlakken bij de aansluiting van de boven- en onderregel op de kopplaten, en bij de aansluiting van een diagonaal op de bovenregel (vakwerkligger 40)



Figuur 2-15 Breukvlakken bij de aansluiting van de boven- en onderregel op de kopplaten bij vakwerkligger 39

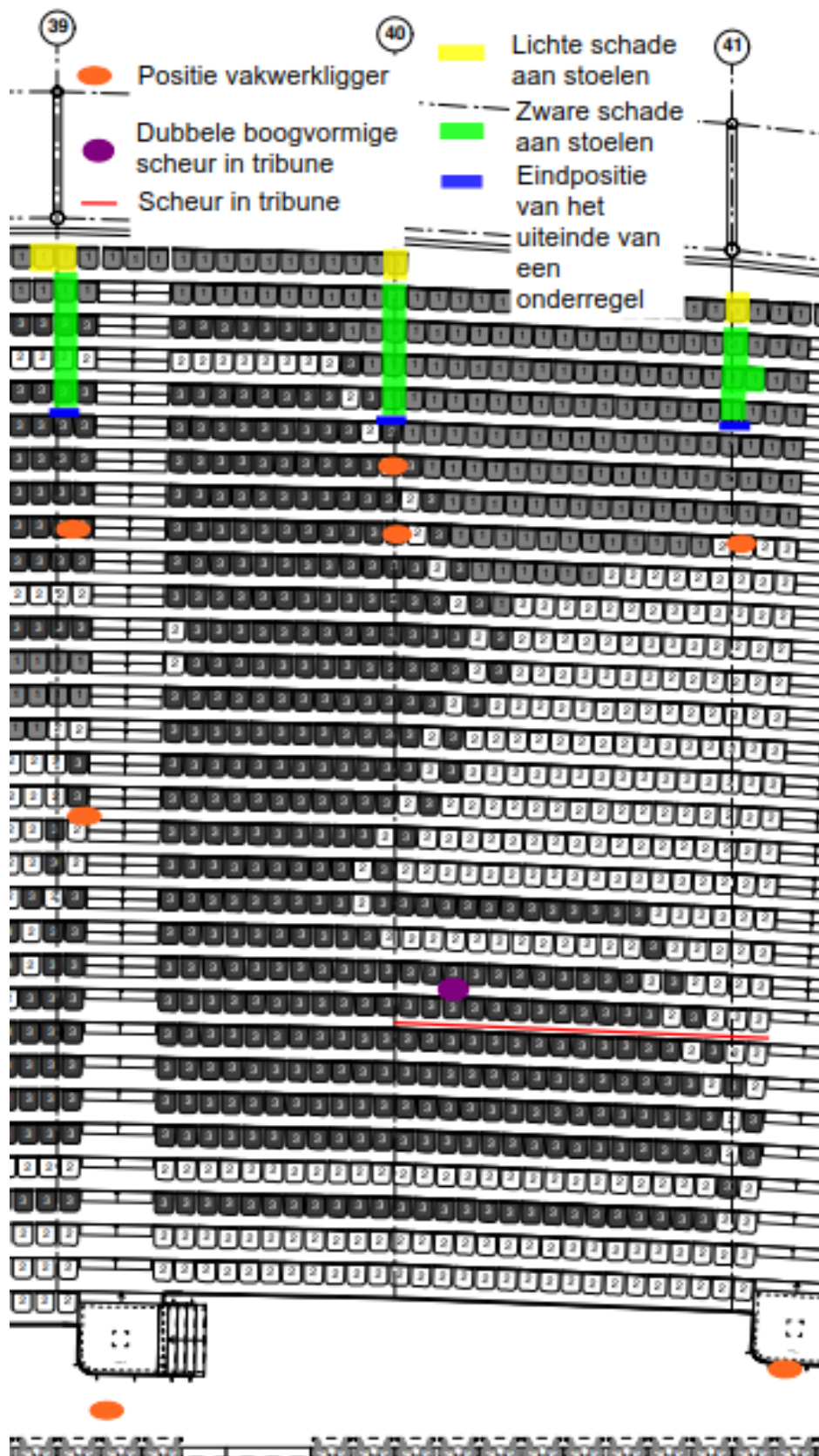
Bij de visuele inspecties is op de bezweken delen corrosie aangetroffen. De binnenzijden van de kokers zijn niet beschermd tegen corrosie, zie Figuur 2-16. De kokers hebben enkele dagen in de buitenlucht gelegen vóór het maken van de foto's getoond in Figuur 2-16. Hierdoor is aan de binnenzijde van de kokers een uniforme laag corrosie ontstaan.



Figuur 2-16 Links: corrosie aan de binnenzijde van de onderregel van vakwerkligger 39, rechts: corrosie bij de kopplaat van de onderregel van vakwerkligger 41.

Figuur 2-17 toont een overzicht van de schade aan de tribune en de posities van de vakwerkliggers 39 t/m 41 na de instorting. Onder beschadigingen vallen licht of zwaar beschadigde stoelen en scheuren in het beton van de tribune. Dit figuur is opgesteld op basis van de point cloud [4] en de uitgevoerde visuele inspecties. De scheuren in de tribune zijn enkel waargenomen bij de visuele inspectie op 18 februari 2020. Op dat moment was de meeste schade aan de tribune al hersteld.

Opvallend aan Figuur 2-17 is dat de uiteindelijke posities van de vakwerkliggers (oranje ovalen) niet op de stramienlijnen liggen (zwarte stippellijnen). Dit laat zien dat de vakwerkliggers 39 t/m 41 zijn geroteerd tijdens het naar beneden glijden over de tribune.

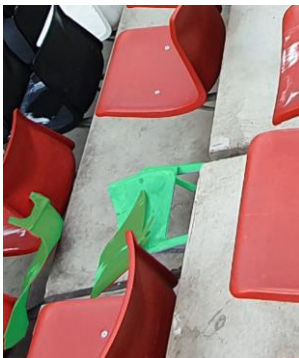


Figuur 2-17 Overzicht van de schade aan de tribune en de posities waar de vakwerkkliggers 39 t/m 41 zich op de tribune bevonden na de instorting.

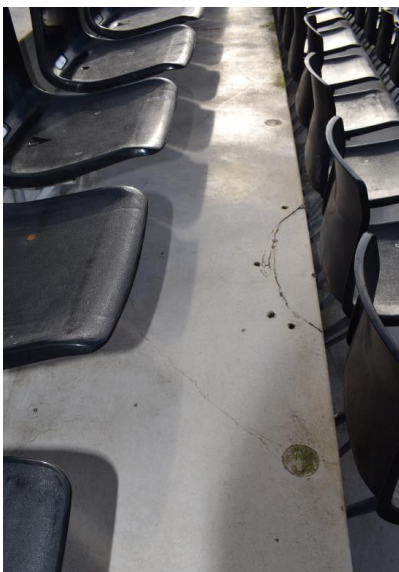
Foto's van de schades zijn gegeven in Figuur 2-18 tot en met Figuur 2-20. Met lichte schade aan stoelen in Figuur 2-18, zware schade aan stoelen in Figuur 2-19 en scheuren in het beton van de tribune in Figuur 2-20.



Figuur 2-18 Lichte schade aan stoelen



Figuur 2-19 Zware schade aan stoelen



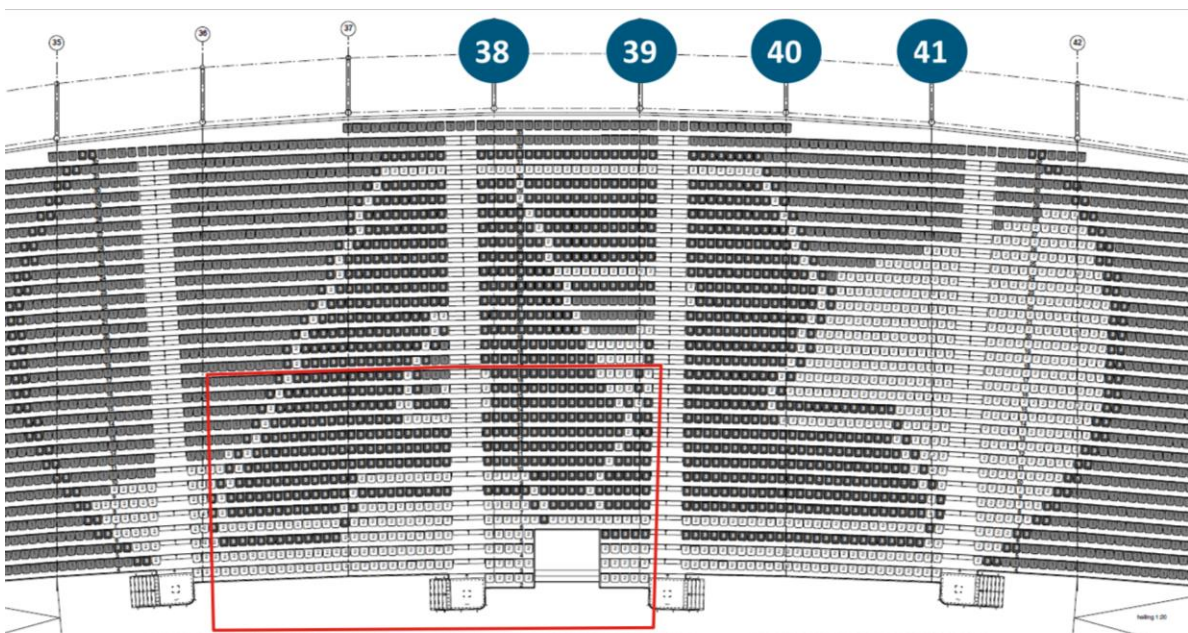
Figuur 2-20 Dubbele boogvormige scheur in de tribune

2.5 Videobeelden

Tijdens de instorting zijn er camerabeelden (CCTV) opgenomen. RHDHV heeft deze beelden ontvangen van AZ. Op deze beelden is een gedeelte van de tribune te zien op het moment dat de instorting plaatsvindt. Figuur 2-21 toont een beeld van de tribune een aantal seconden voor de instorting. Hoe het deel van de tribune dat hier in beeld is zich verhoudt tot de stramienlijnen van het ingestorte deel van de dakconstructie is weergegeven in Figuur 2-22. Hoofdstuk 4 omvat een uitgebreide analyse van de videobeelden.



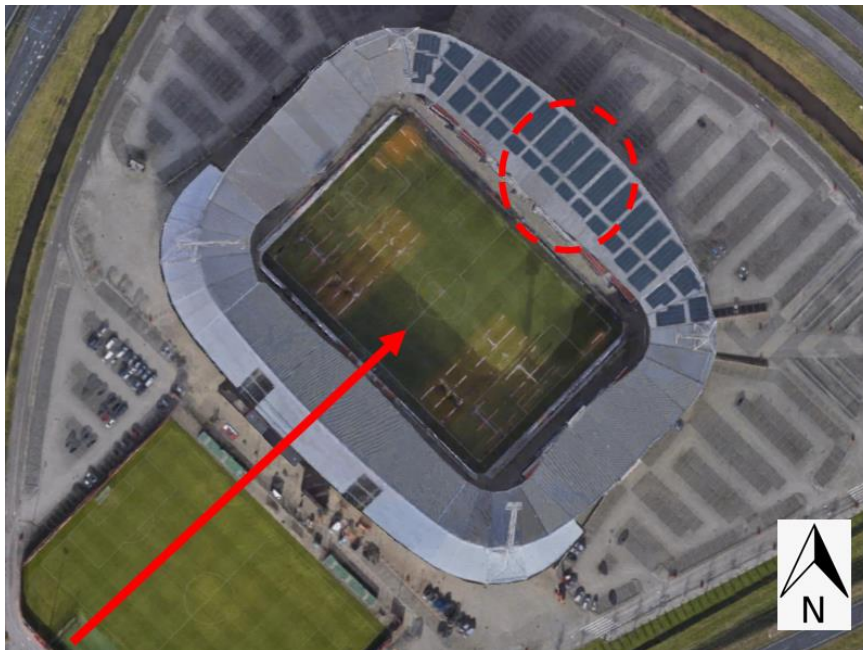
Figuur 2-21 Camerabeeld van een deel van de tribune waar de instorting plaatsvindt



Figuur 2-22 Stoelenplan van de tribune met de stramienlijnen waar de instorting plaatsvindt en het deel van de tribune dat in beeld is

2.6 Meteorologische gegevens

De windsnelheden en de windrichting op de dag van het voorval zijn bepaald op basis van meteorologische gegevens van het KNMI [5]. Tijdens het voorval was er sprake van een sterke zuidwestenwind. Figuur 2-23 toont de windinrichting en het ingestorte deel van de dakconstructie. Bijlage B geeft een complete analyse van de meteorologische gegevens gedurende de levensduur van het AFAS Stadion.



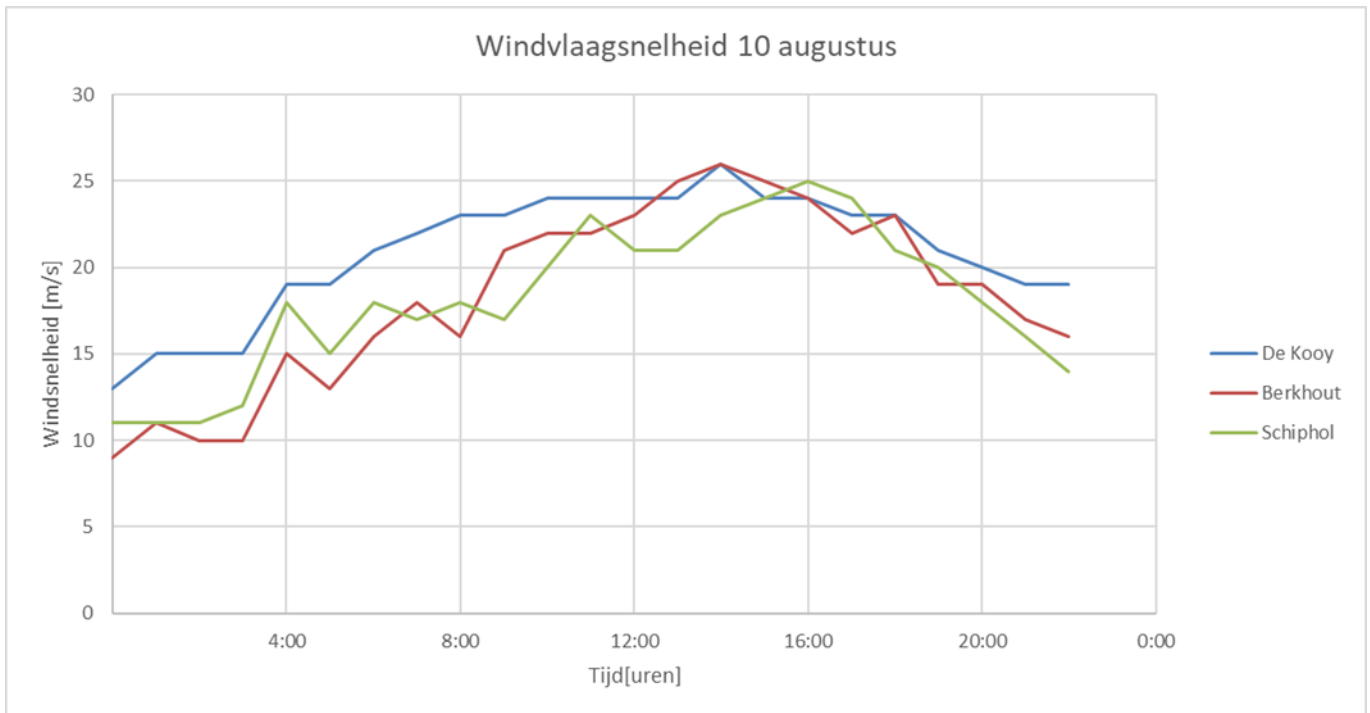
Figuur 2-23 Windrichting tijdens het voorval en ingestorte deel dakconstructie AFAS Stadion. Bron: www.maps.google.nl

2.6.1 Wind

De windsnelheden op 10 augustus 2019 zijn bepaald aan de hand van drie nabijgelegen meetstations. In de uren voor de instorting zijn de grootste windvlaagsnelheden gemeten, tot 26 m/s, zie Figuur 2-24. De windvlaagsnelheid is de maximale windsnelheid gemiddeld over 3 seconde. De grootst gemeten uurgemiddelde windsnelheid was 17 m/s, dit komt overeen met windkracht 8. Het is niet de eerste keer in de levensduur van het stadion dat zulke windsnelheden zijn gemeten. Tabel 3 geeft de vijf dagen met de grootste gemeten windvlaagsnelheden.

Tabel 3 Vijf dagen met de grootste windvlaagsnelheden in de periode 2006 – 2019. Meetstation Schiphol.

Datum	Windvlaagsnelheid [m/s]	Uurgemiddelde windsnelheid [m/s]	Gemiddelde windhoek
18-1-2007	36	23	Westzuidwest
18-1-2018	34	23	Westzuidwest
29-3-2015	32	17	Westzuidwest
28-10-2013	31	22	Zuidwest
5-12-2013	31	17	West



Figuur 2-24 Windvlaagsnelheid op 10 augustus 2019 bij meetstations Schiphol, de Kooy en Berkhout.

2.6.2 Sneeuw

Op de dag van de instorting lag er geen sneeuw op het dak. Het grootste gemeten sneeuwdek gedurende de levensduur van het AFAS Stadion is 16 centimeter.

3 Hypotheses

In dit hoofdstuk wordt “de Delftse aanpak” beschreven en toegepast om hypothesen op te stellen waarmee de technische oorzaken van de instorting worden onderzocht. Op basis van de gevonden breukvlakken zoals weergegeven in Figuur 2-10 wordt er naar de vakwerkliggers gekeken.

3.1 Inleiding

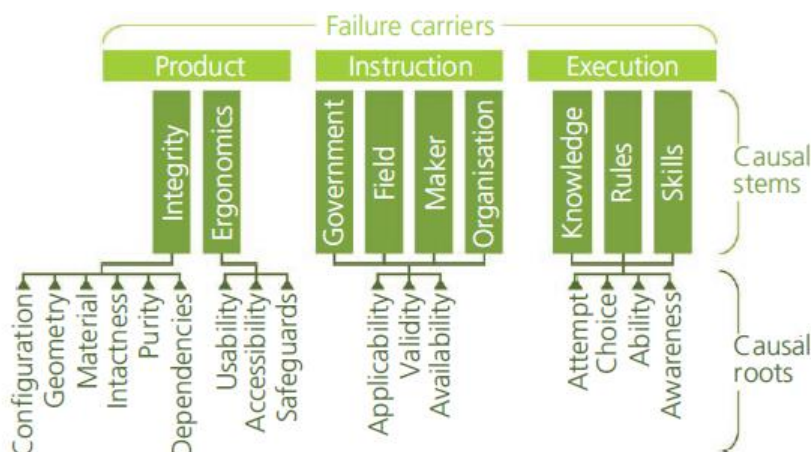
Op basis van “de Delftse aanpak” voor forensic engineering [2] is gekeken naar de mogelijke technische en achterliggende oorzaken van de instorting, waarvan enkel de technische oorzaken binnen de scope van dit onderzoek vallen. Deze aanpak geeft handvatten voor een grondige analyse van de mogelijke oorzaken van de instorting. De Delftse aanpak postuleert oorzaken aan de hand van de verschillende levensfasen van een product:

- Ontwikkeling: specificatie en ontwerp
- Productie: produceren, assembleren en bouwen
- Gebruik: gebruik inclusief onderhoud en herstel
- Recyclen: demontage, sloop, afvoer en hergebruik

Voor elke levensfase wordt eerst vastgesteld welke stappen in deze fase worden doorlopen. Vervolgens wordt voor elke stap in elke levensfase de “Tree house of failures” toegepast om mogelijk oorzaken vast te stellen. Figuur 3-1 toont dit “Tree House of failures”. Mogelijke oorzaken zijn onderverdeeld aan de hand van drie “failure carriers”:

- Product Fouten gerelateerd aan het product zelf. Bijvoorbeeld: verkeerd materiaal, verkeerde assemblage, ongebruiksvriendelijk ontwerp.
- Instructie Fouten gerelateerd aan de instructie die bij een product hoort. Denk aan normen, tekeningen, onderhoudsinstructies en gebruiksaanwijzingen.
- Uitvoering Fouten gerelateerd aan de uitvoering van een taak. Denk aan het verkeerd hijsen, het niet goed opmeten van elementen en rekenfouten in berekeningen.

Elke “carrier” heeft een aantal “stems” en “roots”. Hiermee worden oorzaken specifieker uitgesplitst binnen elke “failure carrier”. Zie het artikel [2] voor een verdere toelichting.



Figuur 3-1 "Tree house of failures" [2]

3.2 Stappen in de levensfasen van de vakwerkligger

Om alle mogelijk oorzaken van de instorting vast te stellen wordt de “Tree house of failures” toegepast op elke stap in alle levensfasen van de vakwerkligger. Normaliter kent een constructie de volgende levensfasen:

- De ontwikkelfase
- De productiefase
- De gebruiksfase
- De recyclefase

Omdat het AFAS stadion zich bij bezwijken nog in de gebruiksfase bevond wordt de recycle fase buiten beschouwing gelaten.

De ontwikkelfase van de vakwerkligger bestaat globaal uit twee stappen, het definitieve ontwerp (DO) en het uitvoeringsontwerp (UO). Binnen deze globale stappen zijn verschillende sub-stappen van belang, zie Tabel 4. Het voorlopig ontwerp (VO) wordt niet beschouwd omdat de niet gekozen varianten niet van belang zijn voor dit onderzoek.

Tabel 4 Stappen in de ontwikkelingsfase van een constructie

Stappen	Definitief Ontwerp (DO)	Uitvoeringsontwerp (UO)
Sub-stappen	Tekeningen van variant	Detailtekeningen
	Maatgevende belasting op variant	Alle belastingen
	Belastingeffecten bij variant	Alle belastingeffecten
	Definitieve dimensionering variant	Volledige uitwerking van alle details van constructie (berekeningen en tekeningen)

De productiefase van de vakwerkligger bestaat globaal uit zes stappen welke zijn gebaseerd op de NEN-EN 1090-2:2018. Deze norm betreft het vervaardigen van staal- en aluminiumconstructies. De stap van het aanbrengen van mechanische bevestigingsmiddelen in de fabriek is niet beschouwd. Deze stap is namelijk niet relevant voor het voorval omdat enkel de vakwerkligger wordt beschouwd en deze bevat alleen gelaste verbindingen. Montage tijdens de uitvoering van de vakwerkligger op de vakwerkkolom met bouten wordt wel beschouwd. De globale en sub-stappen in de productiefase van de vakwerkligger zijn gegeven in Tabel 5.

Tabel 5 Stappen in de productiefase van de vakwerkligger

Stappen:	Inkopen bestandsdelen	Vorbereiding en assemblage	Lassen	Aanbrengen van mechanische bevestigingsmiddelen	Oppervlakte-behandeling	Montage
Sub-stappen:	Stalen profielen	Hantering en opslag	Lasplan		Uitvoering oppervlakte-behandeling	Opstellen montageplan
	Las-toevoegmaterialen	Snijden	Lasproces			Monteren van constructie
	Mechanische bevestigingsmiddelen	Vormen (o.a. buigen)	Kwalificatie van procedures en personeel			

Stappen:	Inkopen bestandsdelen	Vorbereiding en assemblage	Lassen	Aanbrengen van mechanische bevestigingsmiddelen	Oppervlaktebehandeling	Montage
	Opleggingen	Gaten maken	Vorbereiding en het maken van lassen			
		Samenvoeging				
	Inspecteren bestandsdelen	Controleren van dimensies	Lassen inspecteren		Inspectie van oppervlaktebehandeling	Inspectie van gemonteerde constructie

De gebruiksfase van de vakwerkligger kent zes globale stappen, zoals weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Stappen in de gebruiksfase van de vakwerkligger

Stappen:	Reguliere inspectie	Incidentele inspectie	Regulier onderhoud	Incidenteel onderhoud	Wijzigingen aan de constructie / belasting (bijv. het toevoegen van zonnepanelen)	Botsingen (e.g. met kranen of voertuigen)

3.3 Hypothesen

Tabel 7 geeft een overzicht van de mogelijke technische oorzaken (de hypothesen) per levensfase per stap. De doorgestreepte hypothesen vallen buiten de scope van dit onderzoek omdat er onvoldoende informatie beschikbaar is of omdat een hypothese niet te kwantificeren is (hypothese 20).

Tabel 7 Mogelijk technische oorzaken

Plaats in Delftse aanpak	Nr.	Technische oorzaak		
Ontwerpfase (DO & UO)	1	Draagkracht ondergrond onvoldoende		
	2	Belasting hoger/ anders dan aangenomen (bijv. windbelasting in norm niet conservatief voor stadions of aangenomen windbelasting niet conform norm, geen rekening gehouden met belastingen tijdens monteren)		
			3	Belastingcombinaties in norm en PVE anders dan aangenomen (bijv. combinatie sneeuw met wind vergeten)
	4	Constructief principe in werkelijkheid anders dan geschematiseerd (bijv. scharnierende of momentvaste verbindingen, veerstijfheden fundering anders dan aangenomen)		
			5	Berekende belastingeffecten onjuist (bijv. verkeerde staalspanningen)
	6	Verkeerde afmetingen elementen staalconstructie (bijv. diameter buisprofiel te klein)		
			7	Verkeerde afmetingen verbindingen staalconstructie (bijv. diktes schets- en kopplaten)
			8	Verkeerde afmetingen lassen staalconstructie (bijv. keeldiktes lassen te klein)
	9	Verkeerde materiaaleigenschappen staalconstructie (bijv. S235 i.p.v. S355)		
	10	Verkeerde oppervlaktebehandeling staalconstructie		
Productiefase	11	Verkeerde materiaaleigenschappen staalconstructie (bijv. verkeerd lastoevoegmateriaal gebruikt of ingekocht, verkeerde legeringen in moedermateriaal, staalkwaliteit bevestigingsmiddelen onjuist)		
			12	Verkeerde afmetingen elementen staalconstructie (bijv. profielen niet conform ontwerp)
			13	Verkeerde afmetingen verbindingen staalconstructie (bijv. diktes schets- en kopplaten niet conform ontwerp)

Plaats in Delftse aanpak	Nr.	Technische oorzaak	
Vorbereiding assemblage	14	Belasting hoger/ anders dan aangenomen (bijv. zwaardere boxen of zwaardere lampen ingekocht)	
	15	Introduceren belastingen tijdens assemblage waar bij ontwerp geen rekening mee is gehouden (bijv. met grote kracht niet-passende delen assembleren)	
	16	Optreden schade tijdens assemblage (bijv. verkeerd optillen of ondersteunen onderdelen, met grote kracht niet-passende delen assembleren)	
	Lassen (alles binnen de HAZ)	17	Geometrie lassen niet conform ontwerp (bijv. keeldiktes te klein)
		18	Materiaaleigenschappen lassen niet zoals beoogd (bijv. brosse kristallijne structuur)
		19	Defecten in de lassen (bijv. gasinsluitingen, scheuren)
Oppervlaktebehandelingen	20	Introduceren grote restspanning tijdens lassen (bijv. voorverhitting moedermateriaal, startpunt lassen)	
	21	Oppervlaktebehandeling onvoldoende dik aangebracht (bijv. verlaag lokaal te dun of plek vergeten)	
Transport en montage	22	Materiaaleigenschappen oppervlaktebehandeling onvoldoende (bijv. verf niet corrosiewerend)	
	23	Introduceren belastingen tijdens montage waar bij ontwerp geen rekening mee is gehouden (bijv. met grote kracht niet-passende delen monteren, incorrect gebruik stelmogelijkheden tijdens montage)	
	24	Beschadiging constructie tijdens transport of montage fase (bijv. verkeerd hijsen vakwerkliggers, beschadiging oppervlaktebehandeling door stoten, onjuist ondersteunen constructie tijdens monteren of aanpassingen constructie in het werk)	
	25	Constructieonderdelen niet gemonteerd	
	26	Onjuiste constructieonderdelen gemonteerd (bijv. onderdelen op verkeerde locatie gemonteerd)	
	27	Constructieonderdelen onjuist gemonteerd (bijv. verkeerde aandraaimoment, verkeerde boutdiameters, vakwerklijger ondersteboven)	
Gebruiksfase	28	Constructieonderdelen en bouwkundige afwerking niet in juiste volgorde gemonteerd	
	29	Belasting in werkelijkheid anders dan aangenomen tijdens ontwerp (bijv. overbelasting (extreme belasting hoger dan norm, bijv. windsnelheid norm kleiner dan windsnelheid praktijk))	
	30	Belastingcombinaties in werkelijkheid anders dan aangenomen	
	31	Beschadiging van de constructie door externe oorzaak tijdens de levensduur (bijv. botsing, bewuste beschadigingen)	
	32	Meer corrosie aan de staalconstructie dan waar in het ontwerp vanuit is gegaan (bijv. ten gevolge van schade oppervlaktebehandeling, scheuren of openingen in constructie, veroudering verlaag)	
	33	Vermoeiingsschade aan de staalconstructie (bijv. laag- of hoog-cyclische vermoeiing)	
	34	Constructie/ belastingen aangepast tijdens de levensduur door gebruiker (bijv. elementen vervangen of verwijderd, pv-panelen toegevoegd, nieuwe boxen)	

4 Analyse

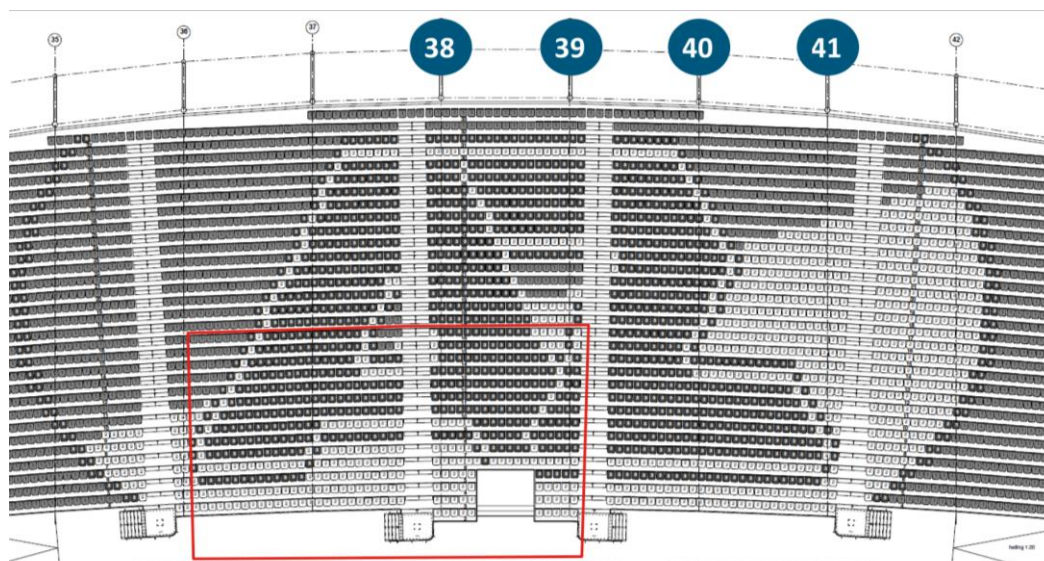
Dit hoofdstuk bevat een samenvatting van de verschillende onderzoeken en bijbehorende deelconclusies. De volgende onderzoeken worden opeenvolgend behandeld: camerabeelden (CCTV), werkelijke belastingen, beoordeling van de bezweken lussen, 3D analyse van de complete constructie, 3D detailanalyses en de volgorde van instorting.

4.1 Beeldmateriaal

De camerabeelden zijn geanalyseerd om mogelijke effecten die tot de instorting leiden en de volgorde van de instorting te achterhalen. Figuur 4-1 toont het camerabeeld van een deel van de tribune waar de instorting plaatsvindt en Figuur 4-2 toont het deel van de tribune dat in beeld is.

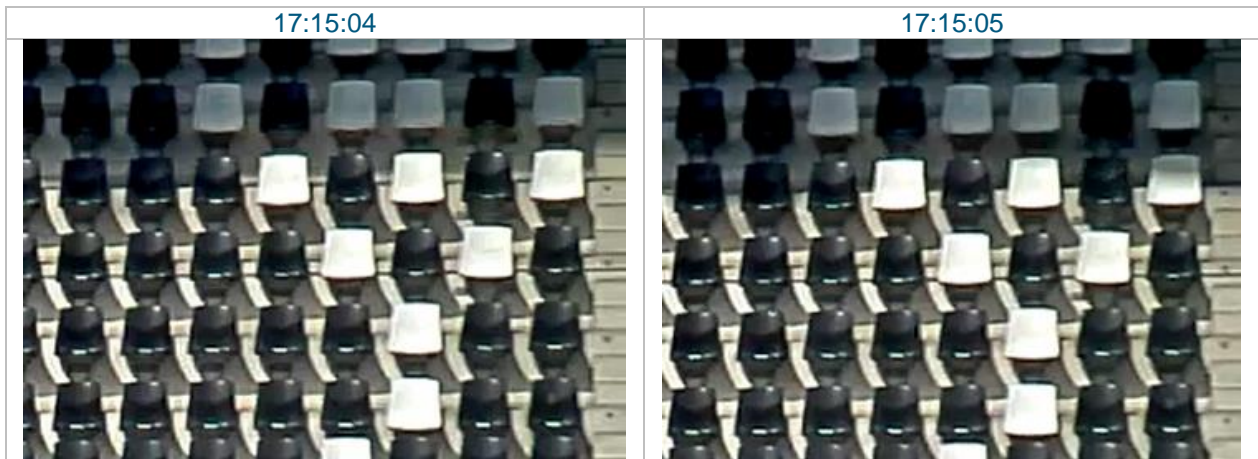


Figuur 4-1 Camerabeeld van een deel van de tribune waar de instorting plaatsvindt



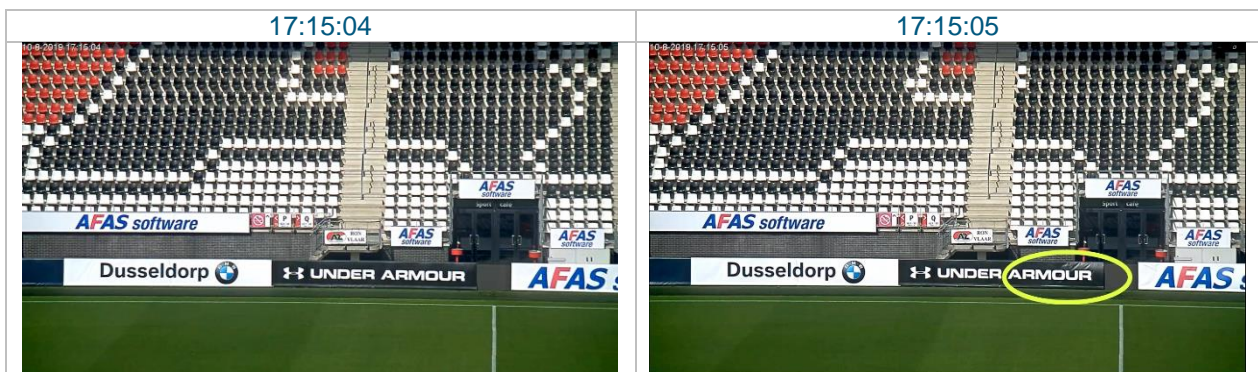
Figuur 4-2 Stoelenplan van de tribune met de stramienlijnen waar de instorting plaatsvindt en het deel van de tribune dat in beeld is

De instorting is voor het eerst waar te nemen doordat de grens van de schaduw die het dak op de tribune veroorzaakt verschuift. Figuur 4-3 toont de rechterbovenhoek van het camerabeeld met een tussenpoos van 1 seconde. Vanaf het tijdstip van het linkerbeeld begint de grens van de schaduw op de tribune te bewegen. In de periode hiervoor beweegt de grens van de schaduw niet. Hieruit wordt geconcludeerd dat er geen aanwijzingen zijn voor opslinging of dynamische effecten in de dakconstructie voorafgaand aan de instorting.



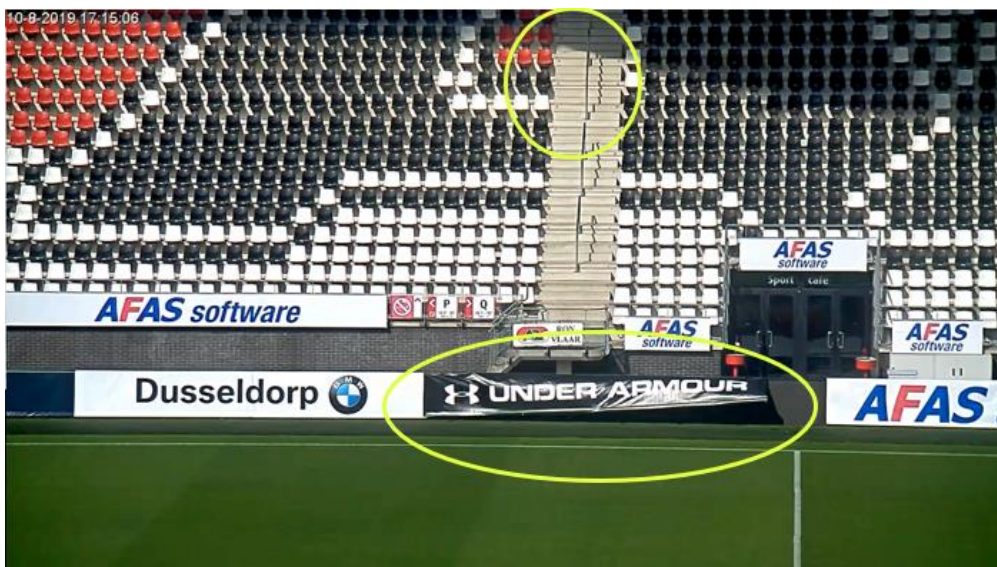
Figuur 4-3 Beweging grens schaduw

Figuur 4-4 toont dat gelijktijdig met het bewegen van de grens van de schaduw ook het spandoek "Under Armour" omhoog waait.



Figuur 4-4 Under Armour spandoek waait omhoog bij start instorting

Figuur 4-5 laat zien dat de schaduw van het dakvlak nu schuin over de tribune zichtbaar is met een knik links van het vakwerkspant 38. Het spandoek beweegt verder omhoog. Bij de visuele inspectie is vastgesteld dat er in de onderzijde van het spandoek een buis ter verzwaring is opgenomen.



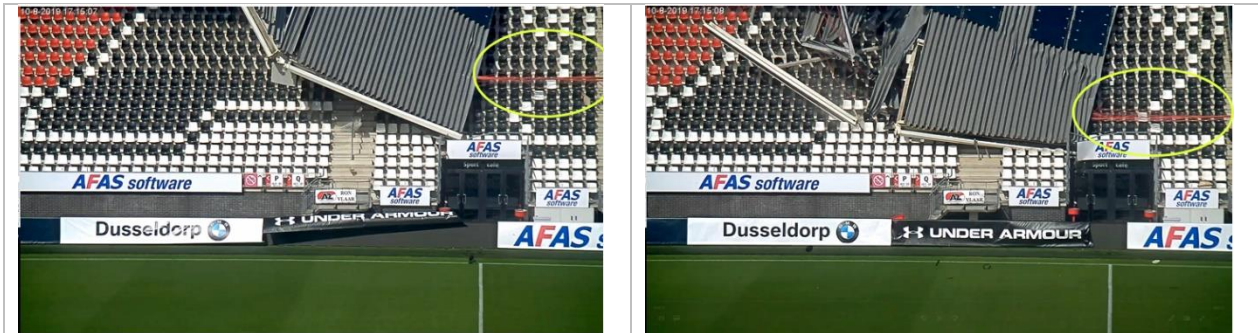
Figuur 4-5 Verplaatsing schaduwgrens met een knik links van vakwerkligger 38 en verder bewegen spandoek (Tijd: 17:15:06)

In Figuur 4-6 komt voor het eerst de instortende dakconstructie in beeld. Hierbij valt op dat de kabels, die gemonteerd zijn aan het uiteinde van het dak tussen vakwerkliggers 38 en 39, naar rechtsonder strakgespannen staan. Verder is in Figuur 4-6 te zien dat de schaduw wegvalt aan de rechterkant van het beeld. Dit betekent dat er een opening in het dak ontstaat.



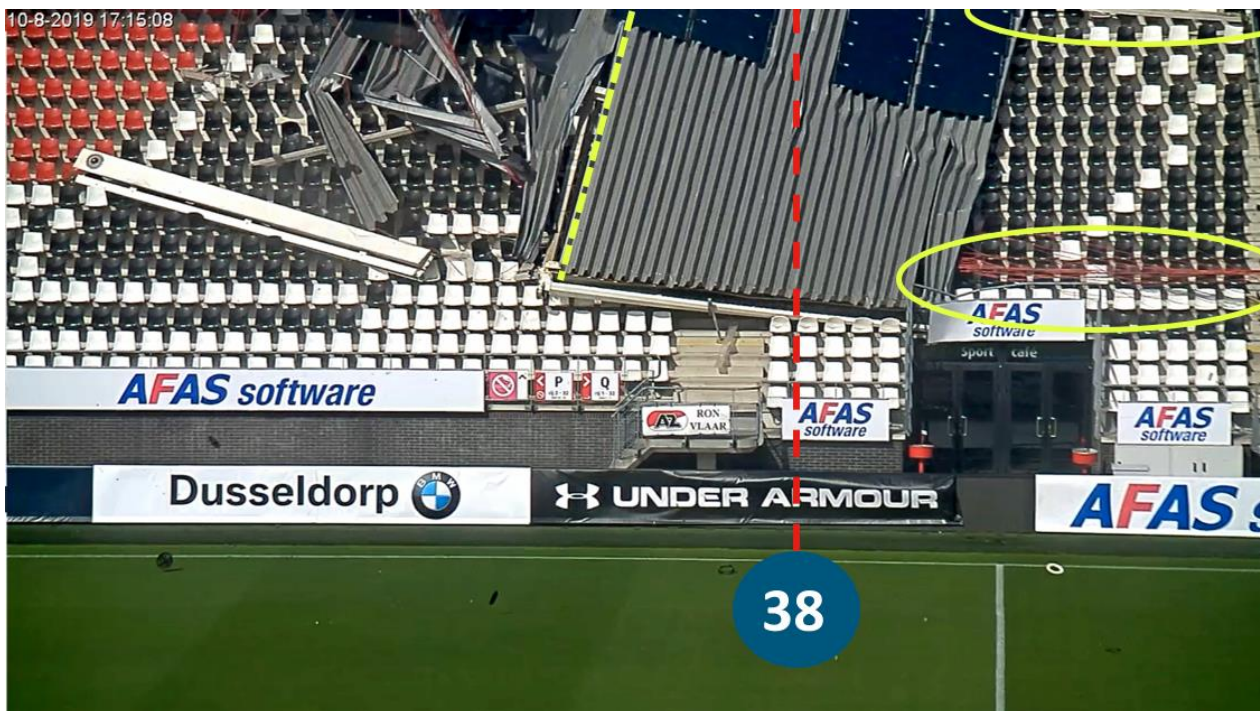
Figuur 4-6 Kabels tussen vakwerkliggers 38 en 39 staan strakgespannen richting rechtsonder (Tijd: 17:15:06)

In Figuur 4-7 is te zien dat de kabels gespannen blijven en dat de richting van de kabels verandert naar horizontaal. Uit de visuele inspectie is gebleken dat vakwerkligger 39 zich niet onder het dakvlak bevindt dat nu in beeld is en dat de gordingen en koppelstaven van dit dakvlak grotendeels bij de aansluiting met vakwerkligger 39 zijn afgebroken. Het feit dat de kabels eerst naar rechtsonder strakgespannen staan geeft aan dat vakwerkligger 39 eerder beneden is dan vakwerkligger 38. Hieruit wordt geconcludeerd dat vakwerkligger 38 niet het startpunt van de instorting kan zijn.

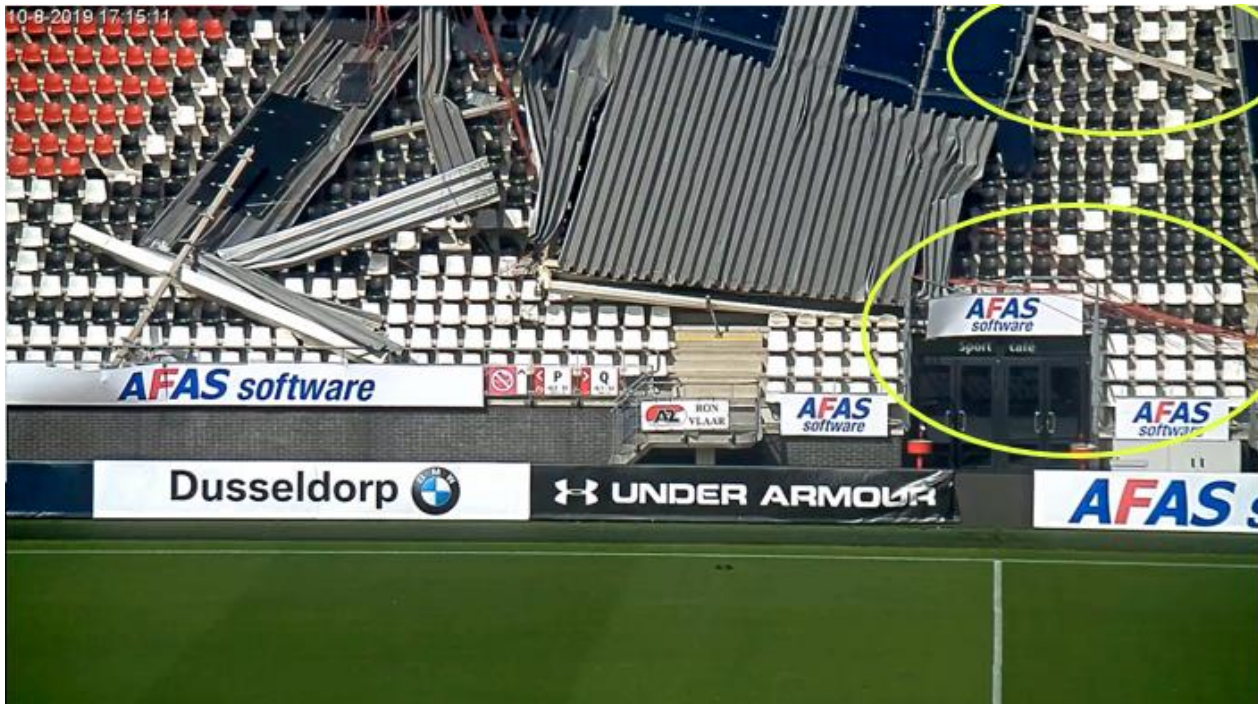


Figuur 4-7 Kabels blijven strakgespannen maar richting verandert naar horizontaal (Tijd links: 17:15:07, Tijd rechts: 17:15:08)

Figuur 4-8 laat zien dat vakwerkligger 38 links van stramienlijn 38 tot stilstand komt. De stramienlijn is weergegeven met een rode stippellijn, en de positie van vakwerkligger 38 met een gele stippellijn. Figuur 4-8 en Figuur 4-9 laten zien dat vakwerkligger 39 buiten beeld verder schuift ten opzichte van het getoonde dakvlak. Dit is te zien aan een koppelstaaf die in beeld komt en aan de kabels die verschuiven.



Figuur 4-8 positie van vakwerkligger 38 ten opzichte van stramien lijn, kabels en koppelstaaf liggen min of meer horizontaal op de tribune (Tijd: 17:15:08)



Figuur 4-9 Kabels en koppelstaaf liggen schuin op de tribune en dakvlak van vakwerkligger 39 verschijnt in beeld (Tijd: 17:15:11)

4.1.1 Conclusies camerabeelden

Op basis van de camerabeelden zijn de volgende conclusies opgesteld:

- Vakwerkligger 38 is niet het startpunt van de instorting. Vakwerkligger 39 is al eerder bezweken. Dit blijkt uit het feit dat de kabels eerst naar rechtsonder strakgespannen staan.
- Er is geen aanwijzing voor opslingering of dynamische effecten in de dakconstructie voorafgaand aan de instorting. Dit blijkt uit het feit dat de grens van de schaduw op de tribune niet beweegt voor de instorting.

4.2 Windbelasting tijdens levensduur

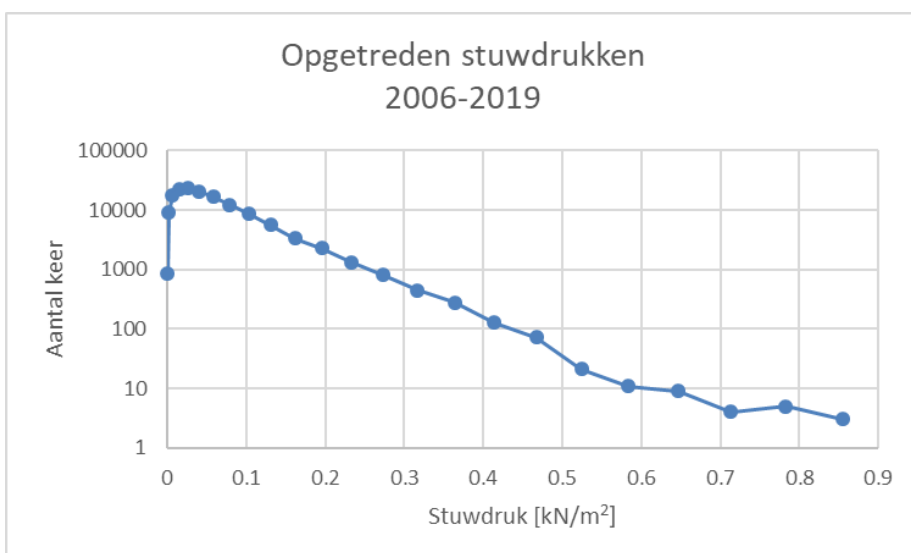
Op basis van de meteorologische gegevens van het KNMI zijn de werkelijk opgetreden belastingen gedurende de levensduur bepaald. Zie voor een compleet overzicht van de meteorologische gegevens gedurende de levensduur Bijlage B.

Tabel 8 geeft onder meer de extreme stuwdrukken op basis van de windsnelheden zoals gemeten door het KNMI. De stuwdruk is conform NEN 6702 [6] en NEN-EN-1991-1-4 [7] bepaald. De dakconstructie is ontworpen volgens NEN 6702. Het windtunnelonderzoek is uitgevoerd volgens NEN-EN-1991-1-4. Ter vergelijking zijn ook de extreme stuwdrukken die horen bij de ontwerp windsnelheid opgenomen. Op de dag van de instorting was de windbelasting significant lager dan de ontwerp windbelasting.

Tabel 8 Extreme stuwdrukken voor verschillende windsnelheden

Windbelasting	Uurgemiddelde Windsnelheid [m/s]	Extreme stuwdruk volgens NEN 6702 (pw) [kN/m ²]	Extreme stuwdruk volgens NEN-EN-1991-1-4 (pw) [kN/m ²]
Dag van instorting	16	0.41	0.52
Hoogste windsnelheid in levensduur	23	0.86	0.98
Ontwerpwaarden	27.5	1.22	1.36

Figuur 4-10 laat zien dat gedurende de levensduur van het AFAS Stadion veelvuldiger een grotere extreme stuwdruk is opgetreden dan op de dag van de instorting. Elk punt in deze figuur heeft betrekking op een uurgemiddelde windsnelheidsinterval van 1 m/s. In totaal zijn er 24 intervallen (van 0-1 m/s tot 23-24 m/s).



Figuur 4-10 Extreme stuwdrukken op basis van uurgemiddelde windsnelheden in de periode 2006 – 2019 volgens NEN 6702

4.2.1 Conclusies windbelasting tijdens levensduur

Op basis van de meteorologische gegevens van het KNMI is de volgende conclusie opgesteld:

- Gedurende de levensduur van het AFAS Stadion is veelvuldiger een grotere extreme stuwdruk opgetreden dan op de dag van instorting.
- De grootste storm tijdens de levensduur is opgetreden in januari 2007.

4.3 Windtunnelonderzoek

RWDI heeft windtunnelonderzoek uitgevoerd om de windbelasting op het dak van het stadion nauwkeurig te bepalen. Het windtunnelonderzoek is uitgevoerd volgens artikel 1.5 van NEN-EN-1991-1-4. De volledige rapportage van het windtunnelonderzoek is te vinden in Bijlage C.

Het windtunnelonderzoek is uitgevoerd op een schaalmodel van 1:200 waarin buiten het stadion ook alle objecten binnen een straal van 300 meter zijn meegenomen, zie Figuur 4-11. In het onderzoek is rekening

gehouden met dynamische effecten op basis van de eigenfrequenties van het stadion en met turbulentie-effecten inclusief windvlagen. Het onderzoek is uitgevoerd met de volgende variaties:

- 36 windrichtingen. Alle windrichtingen zijn geanalyseerd met een stapgrootte van tien graden.
- Twee windsnelheden. De ontwerpwindnelheid van 29,5 m/s en de windsnelheid op de dag van instorting van 18,2 m/s. Deze snelheden zijn tien minuten gemiddelden.
- Met en zonder doeken net onder het dak. Figuur 2-7 toont de constructie met en zonder doeken net onder het dak. Tussen stramienlijnen 38 en 39 ontbreekt een doek.

Voor elk vlak tussen twee vakwerkliggers is de maatgevende windrichting gerapporteerd. Elk vlak bestaat uit meerdere velden en voor elk veld is de extreme stuwdruk gerapporteerd.



Figuur 4-11 Schaalmodel AFAS-stadion zonder doeken

4.3.1 Conclusies windtunnelonderzoek

De volgende conclusies kunnen worden opgesteld op basis van het windtunnelonderzoek:

- De neerwaartse winddruk is vergelijkbaar in grootte met de opwaartse winddruk.
- Zuidwestenwind (210 – 270 graden) geeft de grootste opwaartse en neerwaartse winddruk.
- Dynamische effecten waren beperkt
- Zonder doeken is de winddruk meestal hoger. Een uitzondering is de opwaartse winddruk tussen de vakwerkliggers 40-42. In dat geval is de opwaartse winddruk hoger met doeken.

- Windbelastingen voor andere windsnelheden, zoals de maximaal opgetreden windsnelheid in de levensduur van het stadion, kunnen bepaald worden door de gevonden waardes te verschalen met $q_b = \frac{1}{2} \rho v^2$.

4.4 Beoordeling bezweken lassen

SGS INTRON B.V. (hierna INTRON) heeft de beschadigde lassen in de onder- en bovenregel van vakwerkliggers 38, 39, 40 en 41 destructief onderzocht. Deze paragraaf geeft de belangrijkste resultaten van dit onderzoek. De lassen zijn visueel, macroscopisch en microscopisch onderzocht. Daarnaast zijn enkele eigenschappen van de lassen, het moedermateriaal en de coating bepaald. Bijlagen D geeft het rapport van INTRON.

De delen van de constructie rondom de bezweken lassen in de onder- en bovenregel zijn genummerd, uit de constructie gezaagd en naar het laboratorium vervoerd. De nummering bestaat uit het nummer van de vakwerkligger (bijv. 40) gevolgd door een onderdeelnummer (bijv. 1/2). Tabel 9 beschrijft de onderdeelnummers.

Tabel 9 Onderdeelnummers

Nr.	Beschrijving
1	Bovenknooppunt
2	Bovenregel
3	Onderknooppunt
4	Onderregel

Voor de onderzochte lassen is eenzelfde nummeringsysteem gehanteerd. De nummering bestaat uit het nummer van de vakwerkligger (bijv. 40) gevolgd door twee onderdeelnummers (bijv. 1/2) en een code voor de zijde (bijv. A). Tabel 10 geeft de codering voor de zijdes van de onderzochte lassen. Als voorbeeld, las 40-1/2-A betreft de las tussen de bovenzijde van de bovenregel en de kopplaat van vakwerkligger 40.

Tabel 10 Codering onderzochte lassen ten opzichte van de boven- en onderregel

Code	Positie
A	Bovenzijde regel
B	Rechterzijde regel (gezien vanaf het veld)
C	Onderzijde regel
D	Linkerzijde regel (gezien vanaf het veld)

Figuur 4-12 toont de constructieonderdelen van de boven- en onderknoop van vakwerkligger 40 inclusief nummering. Om een beeld te geven van hoe deze verbindingen er voor bezwijken uitzagen is Figuur 4-13 opgenomen. Dit figuur toont dezelfde verbindingen maar dan van de niet bezweken vakwerkligger 42. De coating van vakwerkligger 42 is voor niet-destructief onderzoek gedeeltelijk verwijderd. Dit verklaart de corrosie.

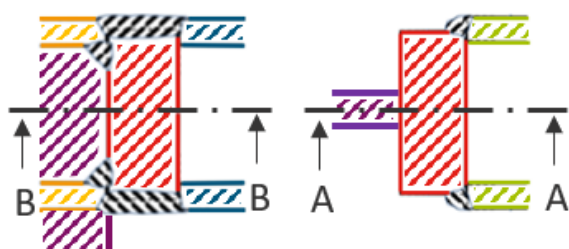


Figuur 4-12 Constructieonderdelen van vakwerkligger 40



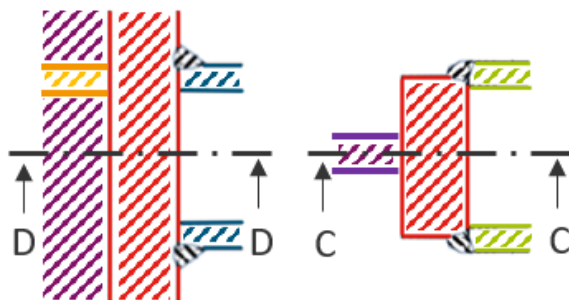
Figuur 4-13 Vakwerkligger 42, links: 42-1 en 42-2, rechts: 42-3 en 42-4. De coating is voor niet-destructief onderzoek gedeeltelijk verwijderd. Dit verklaart de corrosie.

Figuur 4-14 en Figuur 4-15 tonen schetsen van de lassen van de verbinding bovenknooppunt-bovenregel en onderknooppunt-onderregel zoals deze waarschijnlijk gepoogd zijn te maken door de lasser.



Rood: Kopplaat
Blauw: Zijdes A en C van regel
Groen: Zijdes B en D van regel
Oranje: Boven- en onderflens knooppunt
Paars: Lijf knooppunt

Figuur 4-14 Schets verbinding onderdelen 1 en 2, links: verticale doorsnede A, rechts: horizontale doorsnede B.



Rood: Kopplaat
Blauw: Zijdes A en C van regel
Groen: Zijdes B en D van regel
Oranje: Verstijver
Paars: Schetsplaat

Figuur 4-15 Schets verbinding onderdelen 3 en 4, links: verticale doorsnede C, rechts: horizontale doorsnede D

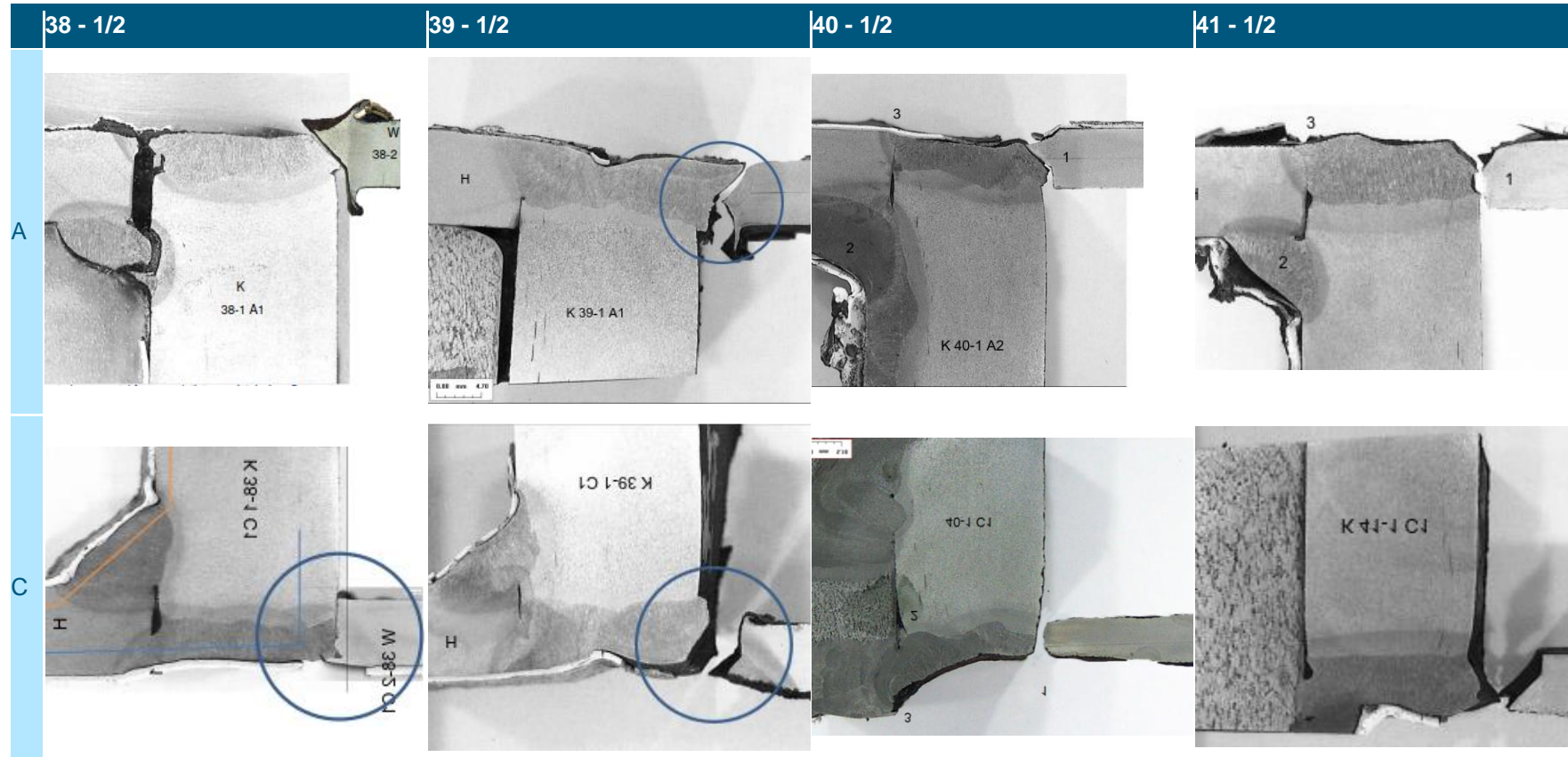
Lassen 38 t/m 41 - 3 /4 - A en C zijn door INTRON als hoeklassen beschouwd. De overige lassen tussen de kopplaten en de regels zijn door INTRON als stompe lassen beschouwd, hoewel ze dit niet echt zijn.

4.4.1 Macroscopisch onderzoek

Op 28 posities zijn macro's van de regel en het knooppunt gemaakt. Macro's zijn gepolijste en geëtste dwarsdoorsnedes van de las waarin de laseigenschappen en lasafmetingen duidelijk herkenbaar zijn. Zie Bijlage D voor meer informatie over de macro's.

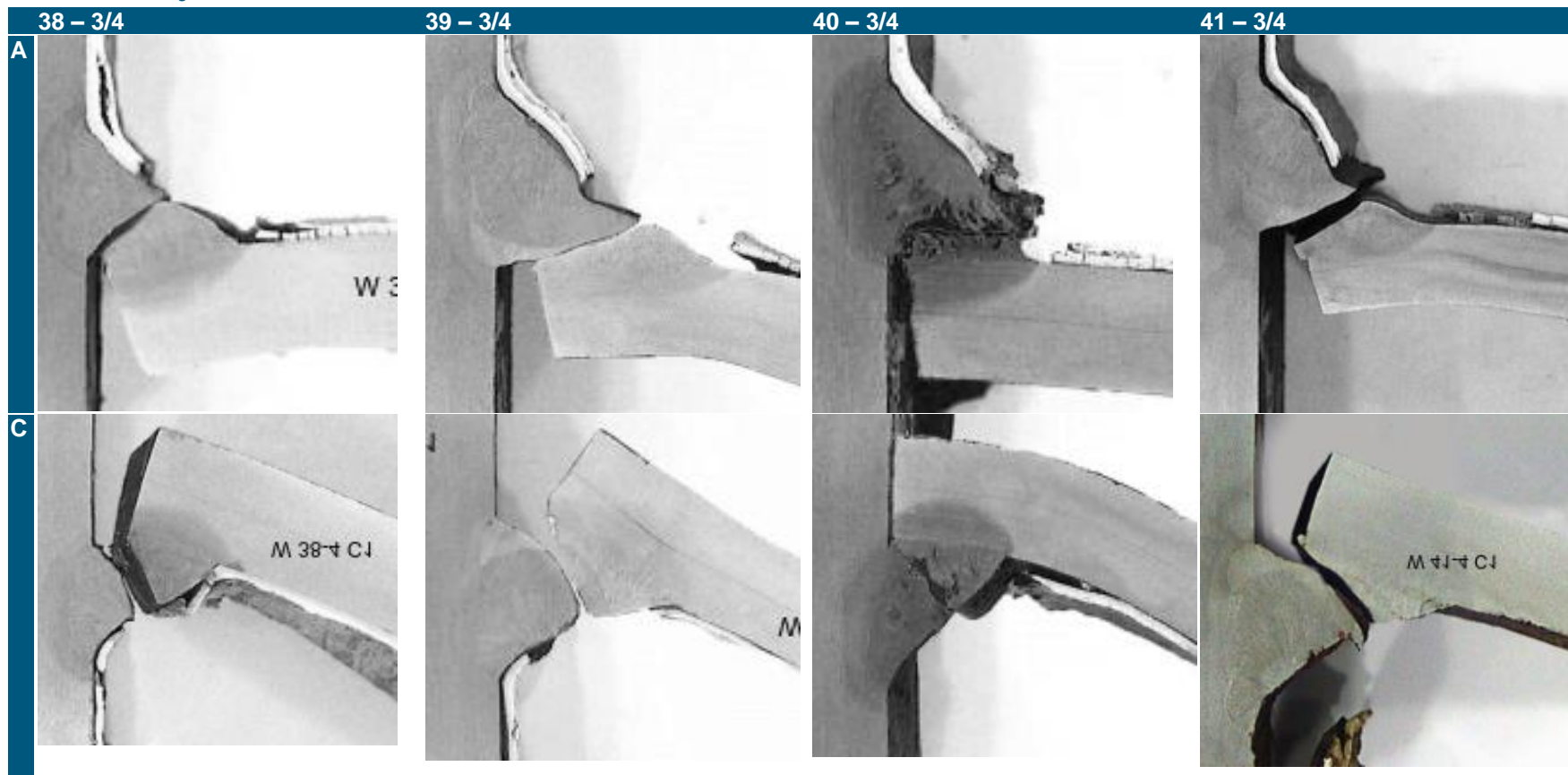
Tabel 11 toont fotomontages van macro's van lassen 38 t/m 41 – 1/2 – A en C. Elke foto is samengesteld uit een foto van een regel en een foto van een knooppunt. De werkelijke positie van een regel ten opzichte van een knooppunt kan anders zijn dan in de montage is aangegeven. De montages laten zien dat de bovenregels zijn losgescheurd van de kopplaten. Bij vakwerkligger 38 is op de positie van de macro ook de kopplaat aan de bovenzijde van het bovenknooppunt losgescheurd. De montage van las 40-1/2-C laat zien dat er op deze positie geen las meer aanwezig was en dat de kopplaat en de regel door corrosie zijn aangetast.

Tabel 11 Fotomontages van macro's van lassen 38 t/m 41 – 1/2 – A en C



Tabel 12 toont fotomontages van macro's van lussen 38 t/m 41 – 3/4 – A en C. De regels zijn verbogen aan de bovenzijden en gestuikt aan de onderzijden. De bovenzijde van 40-4 is nauwelijks verbogen. Lussen 40 - 3/4 - A en C bevatten gasporiën.

Tabel 12 Fotomontages van macro's van lussen 38 t/m 41 – 3/4 – A en C

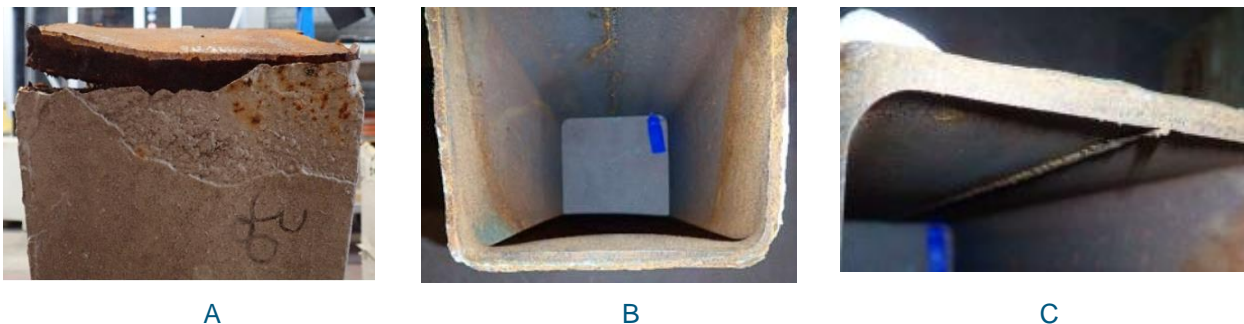


De keelhoogte (a) van de beschouwde hoeklassen in het macroscopisch onderzoek is gemiddeld 7,5 mm (min. 5,63 mm en max. 10,06 mm). De kleinste lasdoorsnede (a) van de overige lassen in het macroscopisch onderzoek is gemiddeld 3,7 mm (min. 1,68 en max 7,44. mm). De gegeven waarden betreffen de geometrie van de lassen ter plekke van de macro's.

4.4.2 Schade aan verbinding kopplaat-regel

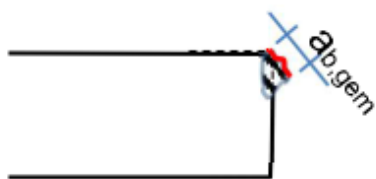
De belangrijkste resultaten uit het onderzoek van INTRON ten aanzien van de schade aan de verbinding kopplaat-regel zijn:

- 1) De bovenregel is volledig van de kopplaat losgescheurd. De kopplaat is vervormd en is op één of meerdere hoeken ook van het bovenknooppunt losgescheurd, zie Figuur 4-16 A.
- 2) De onderregel is volledig van de kopplaat losgescheurd. De koker is gestuikt aan de onderzijde, zie Figuur 4-16B. Aan de bovenzijde is de koker verbogen, zie Figuur 4-16C. De bovenzijde van 40-4 is nauwelijks verbogen.



Figuur 4-16 Foto's van A) verbinding kopplaat bovenknooppunt, B) onderzijde koker onderregel en C) bovenzijde koker onderregel

- 3) De geconstateerde breuken in de las zijn in alle gevallen lengtescheuren in de las. Tabel 13 geeft een inschatting van de gemiddelde scheurbreedte per las op basis van het visuele onderzoek, zie Figuur 4-17.



Figuur 4-17 Definitie van de gemiddelde scheurbreedte per las ($a_{b,gem}$)

Tabel 13 Gemiddelde scheurbreedte per las ($a_{b,gem}$) in mm (range) op basis van het visuele onderzoek

Verbinding	38-1/2	39-1/2	40-1/2	41-1/2	38-3/4	39-3/4	40-3/4	41-3/4
Zijde								
A	3-4	4-5	4,5-7	5	8	9	5	9
B	7	6,5	0-5	3,5	3-5	3-4	4	4-6
C	3	6	0-2	2-4	6,5	9	7	6,5
D	7-11	2	0-4,5	4-5	4-7	7	4,5	6

- 4) De verbindingen zijn bezweken door een geweldsbreuk in de las, door onvoldoende hechting tussen las en moedermateriaal of door een geweldsbreuk in het moedermateriaal. Alleen bij verbinding 40-1/2 zou corrosie bij de breuk een rol kunnen spelen. Er zijn geen signalen dat vermoeiing een rol speelt bij het ontstaan van de breuken. Bij een visuele inspectie is het specifieke patroon van vermoeiing nergens waargenomen. Bij lassen 40 - 1/2 - B t/m D is het breukvlak gecorrodeerd. Hierdoor kan het eventueel aanwezige vermoeiingspatroon niet meer waargenomen worden.
- 5) Bij slechts één verbinding (40 - 1/2 - C en delen van B en D) zijn duidelijke corrosiesporen met een laminair uiterlijk gezien op de regel, de kopplaat en op de breukvlakken van de lassen. Deze corrosie wijst erop dat de breuk op deze positie al voor het moment van bezwijken aanwezig was. De dikte van de corrosielagen wijst erop dat deze corrosie gedurende 10-20 jaar is ontstaan. Het is goed mogelijk dat de breuk al vanaf de bouw aanwezig is en de corrosie vanaf dat moment is ontstaan. In koker 40-2 zijden B, C en D zijn pokachtige roestsporen zichtbaar, deze zijn zacht en eenvoudig kapot te drukken.
- 6) In veel gevallen zijn in een las 2 of 3 zones met verschillende breukbeelden herkenbaar. Het ontbreken van corrosie-intensiteitsverschillen pleit voor gebeurtenissen binnen een korte tijd.
- 7) Er zijn ook enkele breuken gevonden met golvende en sterk onregelmatige breukvlakken. Bij dit type breuken is slechts eenmaal (las 41-3-D) corrosie-intensiteitsverschil zichtbaar. Dit zou kunnen wijzen op verschillende leeftijden van de breukdelen, maar dit is niet waarschijnlijk omdat het in alle gevallen vliegroest betreft. Doordat de vakwerkliggers meerdere weken in de buitenlucht hebben gelegen is over het gehele staaloppervlak een uniforme laag corrosie aanwezig. Het is mogelijk dat dit type breukvlakken bij lassen 40 – 1/2 - C en delen van B en D, door corrosie niet meer zichtbaar zijn.
- 8) Bij de andere lassen worden nauwelijks corrosie-intensiteitsverschillen gezien. Uitzonderingen hierop zijn enkele locaties bij lasbreuken.
- 9) Bij verbinding 40-3/4 vindt aan 2 zijden breuk door aanwezige gasporiën plaats.
- 10) De breuk in basismateriaal 38-2 D is mogelijk ontstaan door lamellar tearing.

4.4.3 Schade aan de verbinding kopplaat-bovenknooppunt

De belangrijkste resultaten uit het onderzoek van INTRON ten aanzien van de schade aan de verbinding kopplaat-bovenknooppunt:

- 1) Tabel 14 geeft een overzicht van de grootte van de scheurvorming in de lassen tussen de kopplaten en de bovenknooppunten op basis van een visuele beoordeling van deze lassen. De grote scheuren betreffen geweldsbreuken. Op basis van de corrosie intensiteit wordt geconcludeerd dat deze scheuren bij de instorting zijn ontstaan. De kleine scheuren betreffen lasfouten.

Tabel 14 Overzicht van scheurvorming in lassen tussen de kopplaten en de bovenknooppunten

Bovenknooppunt \ Hoek	38-1	39-1	40-1	41-1
A-B	Groot	Klein	Groot	Klein
B-C	-	Groot	-	Groot
C-D	-	-	-	Klein
D-A	-	-	-	-

- 2) Bij de scheuren in hoeken 38-1 A-B en 41-1 B-C zijn er signalen die wijzen op bezwijken in meerdere stappen. Er zijn echter geen verschillen in corrosie-intensiteit zichtbaar. Dit zou erop kunnen wijzen dat deze scheuren in meerdere vlagen in één storm zijn ontstaan.

4.4.4 Productie

De belangrijkste resultaten uit het onderzoek van INTRON ten aanzien van de productie:

- 1) De kopplaten verschillen in afmetingen maar zijn in alle gevallen kleiner dan de buitenafmetingen van de regels (koker 180 x 180 mm). De kopplaten zijn niet altijd centrisch op de regels gelast. De regel steekt ongeveer 4 mm voor de kopplaat uit, dit varieert echter sterk, tussen de 2 en 8 mm.
- 2) De kopplaten en kokerwanden zijn niet voorbereid. Er is niet vastgesteld of er een warmtebehandeling is toegepast. Door onvoldoende voorverwarmen ontstaat een warmte behandelde zone met te harde eigenschappen. De hardheid was niet te hoog.
- 3) Alle kopplaten waren volledig (rondom) aan de onder- respectievelijk bovenregel gelast. In de kop van macro 40-2-C1 is een warmte beïnvloede zone zichtbaar. Dit wijst erop dat er een las aanwezig is geweest die door corrosie is verdwenen. Voor het lassen is waarschijnlijk gebruik gemaakt van gas metal arc welding (GMAW).
- 4) Bij een stompe las wordt normaliter de volledige dikte van de aansluitende delen doorgelast, voor meer informatie zie Bijlage D. Bij de als stomp beschouwde lassen valt op dat de wand van de koker vrijwel nergens is doorgelast. Slechts bij 3 lassen (39-2 zijde A, 40-2 zijde A en 41-4 zijde D) is de volledige lengte doorgelast. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de excentrische plaatsing van de kopplaat; aan de tegenoverliggende zijde is slechts een zeer klein lasje aanwezig. Bij 4 lassen is een deel van de lengte volledig doorgelast.
- 5) Bij een hoeklas moet de las tot in de wortel doorgelast zijn, voor meer informatie zie Bijlage D. Bij de als stomp beschouwde lassen is dat veelal ook niet het geval.
- 6) In knooppunt 40-3/4 komen veel gasporiën voor.
- 7) In regels 38-2, 39-2 en 41-2 zijn op één of meerdere zijden lasspetters zichtbaar. Deze zijn waarschijnlijk veroorzaakt door de aanwezigheid van een gap (niet aansluiten van de 2 te lassen oppervlakken). Bij deze regels zijn in de lassen gaps aangetroffen.

4.4.5 Moedermateriaal

De belangrijkste resultaten uit het onderzoek van INTRON ten aanzien van het moedermateriaal:

- 1) De vakwerkliggers zijn niet verzinkt.
- 2) Uit de beoordeling van de treksterkte van de onderdelen van vakwerkligger 39 volgt dat het aannemelijk is dat staalsoort S355 bij deze vakwerkligger is toegepast, behalve voor kopplaat 39-1. Voor deze kopplaat is waarschijnlijk een lagere kwaliteit toegepast.
- 3) Het lijkt erop dat er staalplaten van verschillende herkomst zijn gebruikt voor de kopplaten van de boven- en onderregels.
 - a. De kopplaten van de bovenknooppunten bevatten insluitingen evenwijdig aan het plaatoppervlak. Deze insluitingen komen uit het walsproces. De kopplaten van de onderknooppunten bevatten geen insluitingen.
 - b. De kopplaten van het bovenknooppunt zijn minder hard dan die van het onderknooppunt.
 - c. Bij de kopplaten van de bovenregels zijn geen ferriet-perliet banden zichtbaar, bij de kopplaten van de onderregels wel. Dit kan de afwijkende rekgrens en treksterkte verklaren.

4.4.6 Hardheid

De belangrijkste resultaten uit het onderzoek van INTRON ten aanzien van de hardheid:

- 1) De hardheden van het basismateriaal, de warmte-beïnvloede zone en de las voldoen ruim aan de eis voor staal met een vloeigrens lager dan 360 N/mm².
- 2) Normaliter wordt er steeds een lichte toename gemeten als achtereenvolgens de hardheid van het basismateriaal, de warmte-beïnvloede zone en de las wordt bepaald. Dit standaardbeeld wordt bij enkele lassen niet gevonden. De afwijkingen zijn echter zo klein dat dit niet op problemen wijst.

4.4.7 Coating

De belangrijkste resultaten uit het onderzoek van INTRON ten aanzien van de coating en corrosie:

- 1) De coating bestaat uit 2 of soms 3 lagen met een totale dikte die meestal groter is dan 1 mm (min. 0,5 mm).
- 2) De staat van de coating is plaatselijk slecht. Onder de coating is plaatselijk corrosie zichtbaar. De coating is plaatselijk verdwenen of vertoont scheuren. Op sommige plekken is de coating al langere tijd afwezig en is er sprake van putcorrosie. Op diverse locaties is de verdwenen coating overschilderd. Dit was ook het geval bij de verbinding 40-1/2 zijde C, zie Figuur 4-18. Veelal komt opnieuw corrosieproduct door de coating.



Figuur 4-18 overschilderde corrosie bij verbinding 40-1/2 zijde C waar opnieuw corrosieproduct doorheen komt.

4.4.8 Conclusies beoordeling bezweken lassen

De belangrijkste conclusies uit de beoordeling van de bezweken lassen:

- Al voor het moment van bezwijken was er een breuk aanwezig in lassen 40 – 1/2 – C en delen van B en D. Deze breuk is uiterlijk enkele jaren na oplevering opgetreden. Overige breuken zijn tijdens de instorting ontstaan.
- Er zijn lasdefecten aangetroffen in de vorm van gasporiën.
- Het specifieke patroon van vermoeiing is bij een visuele inspectie nergens waargenomen.
- In de lassen van vakwerkligger 40 zijn sporen van putcorrosie gevonden.

4.5 Niet-destructief onderzoek

SGS Nederland B.V. (hierna SGS) heeft verschillende niet-destructieve onderzoeken (NDO) uitgevoerd voor het beoordelen van de veiligheid van het intacte deel van het AFAS Stadion. Deze paragraaf geeft een samenvatting van de resultaten van het niet-destructieve onderzoek aan de dakconstructie van de bouwdelen B, C en D (vakwerkliggers 21 t/m 56). SGS heeft drie niet-destructieve onderzoeken uitgevoerd bij de lassen die de regels met kopplaten verbinden:

- 1) Visueel onderzoek van lassen
- 2) Magnetisch onderzoek van lassen
- 3) Wanddikte-onderzoek en het bepalen van de diepte van de doorlassing

Uit het visuele onderzoek volgt dat:

- 1) Bij geen enkele vakwerkligger alle lassen voldoen aan de acceptatiecriteria van kwaliteitsniveau B van NEN-EN-ISO 5817:2014.
- 2) Bij slechts 6 van de 31 onderzochte vakwerkliggers voldoen de lassen bij verbinding 1/2 óf verbinding 3/4 aan de acceptatiecriteria.
- 3) Bij verbinding 1/2 hebben 28 van de 31 vakwerkliggers tekortkomingen die bij de productie zijn ontstaan, ervan uitgaande dat scheuren niet bij de productie zijn ontstaan. Bij verbinding 3/4 hebben 27 van de 31 vakwerkliggers tekortkomingen die bij de productie zijn ontstaan.
- 4) Bij verbinding 1/2 bevatten 6 van de 31 vakwerkliggers scheuren, zie bijvoorbeeld Figuur 4-19. Bij verbinding 3/4 bevatten 2 van de 31 vakwerkliggers scheuren.



Figuur 4-19 Scheur in las 43 – 1/2 – C

- 5) Las 46-1/2-D gedeeltelijk ontbreekt, zie Figuur 4-20. Bij vakwerkliggers 47 en 50 ontbreken lassen tussen de kopplaten en de knooppunten, zie Figuur 4-20. Deze lassen vielen niet binnen de scope van het onderzoek van SGS. Het ontbreken van de lassen is wel geconstateerd bij het visuele onderzoek.



Figuur 4-20 Van links naar rechts: Het ontbreken van lassen bij respectievelijk vakwerkliggers 46, 47 en 50.

- 6) De variatie in de geometrie van de lassen groot is.
- 7) De dimensies van de hoeklassen kleiner zijn dan aangegeven op tekening [8].
- 8) Er vaak sprake is van niet acceptabele poriën aan de oppervlakte van de las.

Uit het magnetisch onderzoek volgt dat:

- 1) Weinig lassen voldoen aan de acceptatiecriteria van kwaliteitsniveau 2X van NEN-EN-ISO 23278:2015.
- 2) De lassen in de verbinding 1/2 minder vaak voldoen dan de lassen in de verbinding 3/4.
- 3) De lassen aan de zijdes A en C vaker voldoen dan de lassen aan de zijdes B en D.

Uit het wanddikte onderzoek en het bepalen van de diepte van de doorlassing volgt dat:

- 1) De gemiddelde waarde van de wanddikte net minder dan 8 mm is (de wanddikte op tekening is 8 mm)
- 2) De minimale waarde van de wanddikte soms erg laag is (5,7 mm bij vakwerkligger 29)
- 3) Lagere waarden voor de wanddikten aan één zijde van het ingestorte deel van het dak gevonden worden (nummers vakwerkliggers < 37).
- 4) Het verschil tussen de minimale en maximale waarde van de doorlassing erg groot is.
- 5) De minimale waarde van de doorlassing erg klein is (2 mm).
- 6) De maximale waarden voor de doorlassing niet direct naast het ingestorte deel gevonden worden.

4.5.1 Conclusies niet-destructief onderzoek

De belangrijkste conclusies uit het niet-destructief onderzoek zijn:

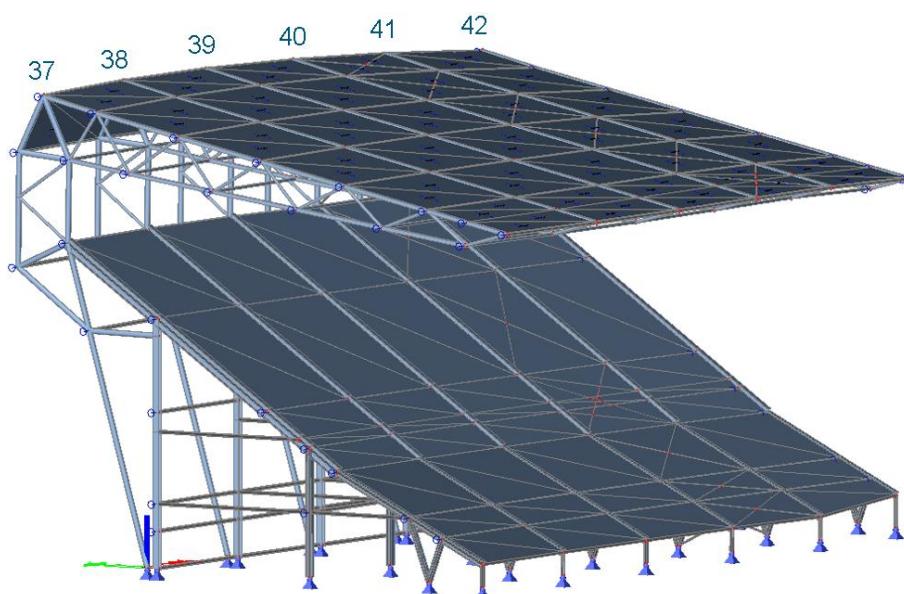
- De lassen bevatten veel lasfouten

- Een aantal lassen zijn gescheurd
- Enkele lassen ontbreken
- De minimale waarde van de doorlassing is erg klein (2 mm)
- De minimale waarde van de wanddikte soms erg laag is (5,7 mm)

4.6 Onderzoek normaalkracht in de bovenregels

In Bijlage E is een drie dimensionaal eindige elementen model gemaakt van het deel van het AFAS Stadion waarvan de dakconstructie is ingestort. Het model bestaat uit de constructie vanaf stramienlijn 37 tot en met 42, zie Figuur 4-21. Met dit model:

- Is de normaalkracht in de bovenregel van vakwerkligger 40 bij verschillende belastingcombinaties bepaald.
- Is bepaald hoe de krachten in de dakconstructie herverdelen wanneer verbinding 40 – 1/2 bezwijkt.



Figuur 4-21 Eindige elementen model van de constructie van het AFAS Stadion tussen stramienlijn 37 en 42

4.6.1 Normaalkracht in de bovenregel van vakwerkligger 40

In het model zijn de volgende belastingcombinaties toegepast:

- 1) Belastingcombinaties zoals gedefinieerd in de ontwerpberekening van de staalconstructeur voor as 38 [9].
- 2) Belastingcombinaties volgens NEN 6702.
- 3) Belastingcombinaties horend bij het windtunnelonderzoek (ontwerp windsnelheid).
- 4) Belastingcombinaties horend bij de maximaal opgetreden belastingen gedurende de levensduur (waaronder de maximale windsnelheid en sneeuwhoogte volgens KNMI-meetdata).
- 5) Belastingcombinaties horend bij het windtunnelonderzoek (windsnelheid op het moment van instorten)

Tabel 15 geeft de normaalkrachten in de bovenregel van vakwerkligger 40 voor de verschillende belastingcombinaties.

Tabel 15 Normaalkrachten in de bovenregel van vakwerkligger 40 (positieve waarde = trek, negatieve waarde = druk)

	Bij max. neerwaartse belasting (kN)	Bij max. opwaartse belasting (kN)
1) Ontwerpbelasting volgens staalconstructeur	1.135	-1.667
2) Ontwerpbelasting volgens NEN 6702	2.080	-461
3) Ontwerpbelasting conform windtunnelonderzoek (ontwerp windsnelheid)	1.463	-818
4) Maximaal opgetreden belastingen gedurende de levensduur	811	-238
5) Belasting conform windtunnelonderzoek (windsnelheid op moment van instorten)	580	26

Op basis van de waarden in Tabel 15 zijn de volgende conclusies opgesteld:

- De door de staalconstructeur bepaalde ontwerpbelastingen (1) geven in verhouding tot de ontwerpbelastingen volgens NEN 6702 (2) een:
 - 45% lagere trekkracht $1.135 / 2.080 = 0,55$
 - 262% hogere drukkracht $-1.667 / -461 = 3,62$
 - 20% lagere absolute kracht $|-1.667 / 2.080| = 0,80$
- De door de staalconstructeur bepaalde ontwerpbelastingen (1) geven in verhouding tot de opgetreden belasting gedurende de levensduur (4) een:
 - 40% hogere trekkracht $1.135 / 811 = 1,40$
 - 600% hogere drukkracht $-1.667 / -238 = 7,00$
 - 106% hogere absolute kracht $|-1.667 / 811| = 2,06$
- De ontwerpbelasting volgens NEN 6702 (2) geeft in verhouding tot de ontwerpbelasting conform de windtunnelstudie (3) een:
 - 42% hogere trekkracht $2.080 / 1.463 = 1.42$
 - 44% lagere drukkracht $-461 / -818 = 0.56$

4.6.2 Normaalkracht in de bovenregel van vakwerkligger 41

Tabel 16 geeft de normaalkracht in de bovenregel van vakwerkligger 41 vóór en na bezwijken van verbinding 40 – 1/ 2. Om bezwijken te beschrijven is de bovenregel van vakwerkligger 40 ontkoppeld van het bovenknooppunt. Er is een klein verschil tussen de normaalkracht vóór bezwijken in vakwerkliggers 40 en 41. Dit komt door geometrische verschillen. Uit Tabel 16 blijkt dat ook na het bezwijken van verbinding 40 – 1/2 de normaalkracht in de bovenregel van vakwerkligger 41 lager is dan de ontwerpbelasting volgens de staalconstructeur.

Tabel 16: Normaalkracht in de bovenregel van vakwerkligger 41 voor en na het bezwijken van verbinding 40 – 1/2

	Normaalkracht in bovenregel vakwerkligger 41	
	Bij max. neerwaartse belasting (kN)	Bij max. opwaartse belasting (kN)
Ontwerpbelasting volgens staalconstructeur (as 38)	1.135	-1.667
Belasting vóór bezwijken	582	10
Belasting na bezwijken	787	17

4.6.3 Conclusies onderzoek normaalkracht in bovenregels

De belangrijkste conclusies uit het onderzoek naar de normaalkracht in de bovenregels zijn:

- De absolute maximale normaalkracht zoals bepaald door de staalconstructeur is 20% lager dan de waarde bepaald volgens NEN 6702.
- De normaalkrachten zoals bepaald door de staalconstructeur zijn tenminste 40% hoger dan de maximale opgetreden normaalkracht tijdens de levensduur.
- De ontwerpwaarde voor de normaaldrukkracht bepaald volgens NEN 6702 is 44% lager dan de waarde bepaald volgens het windtunnelonderzoek.

- De normaalkracht in bovenregel 41 is ook na bezwijken van verbinding 40 – 1/2 lager dan de normaalkracht bepaald door de staalconstructeur.

4.7 Aangrijpingspunt maximale opwaartse en neerwaartse windbelasting

De verschillen in normaalkracht in de bovenregel van vakwerkligger 40, zie paragraaf 4.6, komen doordat de grootte en het aangrijpingspunt van de toegepaste belastingen verschillen.

Tabel 17 toont de grootte van de resultante windbelasting en de afstand van het aangrijpingspunt van de belasting tot de oplegging met de vakwerkkolom. Omdat de staalconstructeur niet heeft gerekend met neerwaartse windbelasting is bij neerwaartse windbelasting de sneeuwbelasting vermeld.

Tabel 17 toont ook het buigend moment ter plaatse van de oplegging. Dit is het product van de resultante windbelasting en de afstand van het aangrijpingspunt tot de oplegging.

Daarnaast toont Tabel 17 drie factoren die relevant zijn voor de bepaling van de resultante windbelasting. De lengte (L) van vakwerkligger 40 bedraagt 28,5 m.

Uit Tabel 17 kan het volgende worden geconcludeerd:

- Het zwaartepunt voor opwaartse wind ligt volgens de windtunneltest op $0,53 * L$, terwijl dit volgens NEN 6702 ligt op $0,25 * L$.
- Het zwaartepunt voor neerwaartse wind ligt volgens de windtunneltest op $0,60 * L$, terwijl dit volgens NEN 6702 ligt op $0,75 * L$.
- De staalconstructeur is voor opwaartse en neerwaartse (wind)belasting uitgegaan van $0,5 * L$.

Tabel 17: Overzicht resultante windbelasting en de afstand van het aangrijpingspunt van de belasting tot de oplegging.

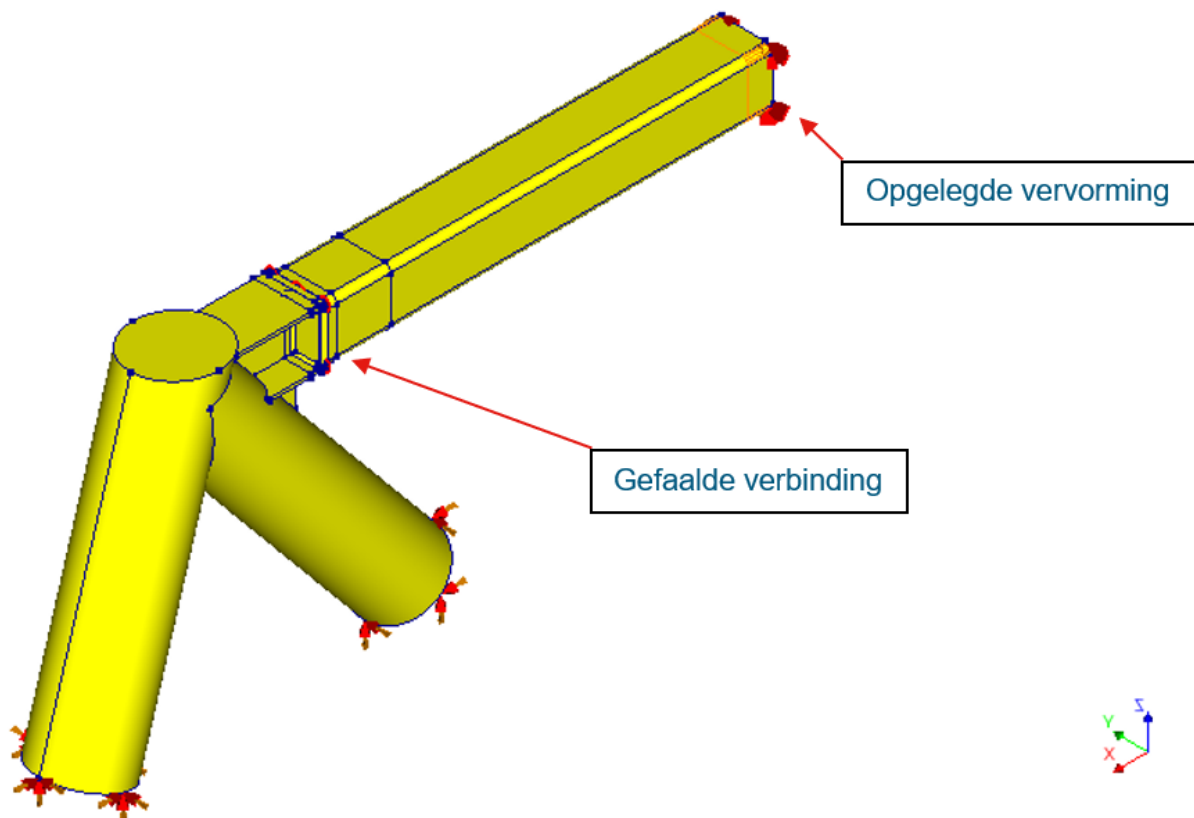
			Neerwaartse wind			Opwaartse wind		
			Aanpak staalconstr. (sneeuw)	NEN 6702	Windtunnel Eurocode	Aanpak staalconstr.	NEN 6702	Windtunnel Eurocode
Resultante windbelasting per vakwerkligger	F_{res}	[kN]	89	210	179	- 357	- 392	- 213
Aangrijpingspunt windbelasting t.o.v. oplegging	L	[-]	0,50	0,75	0,60	0,50	0,25	0,53
Moment t.p.v. oplegging	M	[kNm]	1.242	4.484	3.083	- 5.087	- 2.794	- 3.230
Extreme stuwdruk	p_w	[kN/m ²]	1,23	1,22	1,36	1,23	1,22	1,36
Dimensie factor	C_{dim}	[-]	1,00	1,00	1,00	0,86	1,00	1,00
Windvormfactor	C_t	[-]	0,32	0,70	0,58	- 1,50	- 1,30	- 0,68

4.8 Onderzoek capaciteit verbinding bovenregels

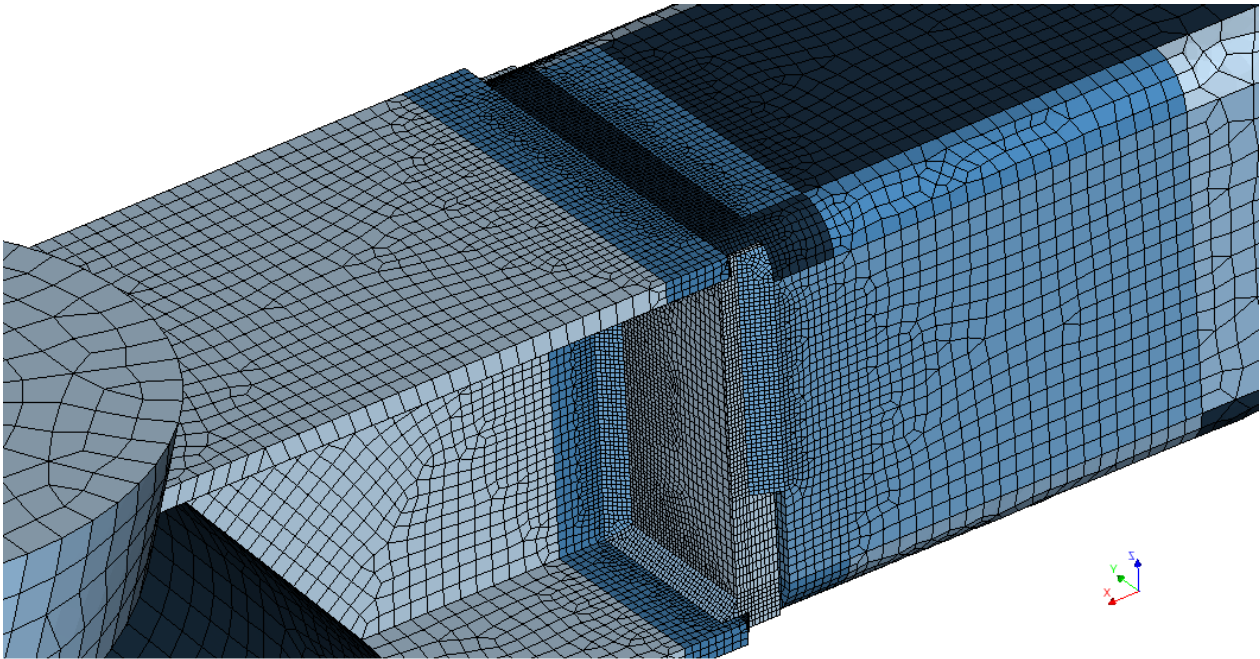
In Bijlage F zijn numerieke analyses uitgevoerd voor de boven- en onderverbinding van de ingestorte vakwerkliggers. In dit hoofdstuk wordt een samenvatting van de analyse gegeven. In het eindig elementen softwarepakket DIANA zijn gedetailleerde niet-lineaire modellen gemaakt van de bezweken verbindingen. Met deze numerieke analyses zijn de volgende aspecten bestudeerd:

- Faalmechanisme van de verbinding
- Maximale capaciteit van de verbinding
- Zwakste schakel in de verbinding

De bezweken boven- en onderverbinding zijn in 3D gemodelleerd met kwadratische volume elementen en de buisprofielen zijn gemodelleerd met schaal elementen. Op het uiteinde van het kokerprofiel wordt stapsgewijs een vervorming opgelegd totdat de verbinding bezwijkt. In Figuur 4-22 is het model van de bovenverbinding op stramien 40 weergegeven en in Figuur 4-22 is de mesh nabij de verbinding weergegeven.

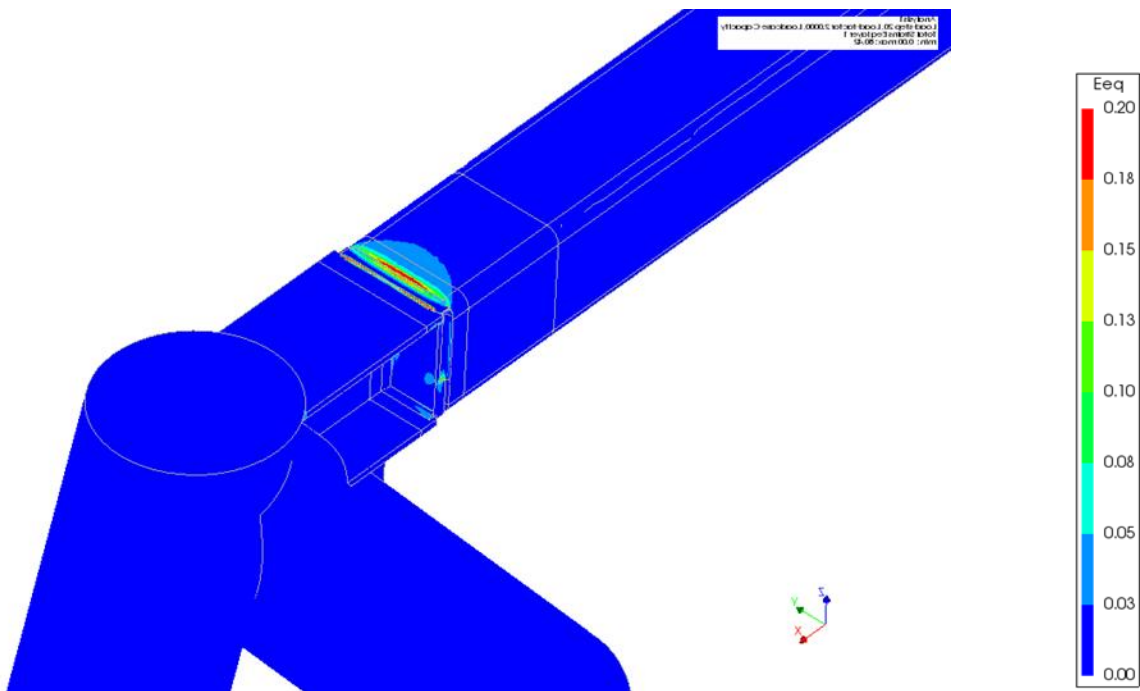


Figuur 4-22 3D model boven verbinding, stramien 40.



Figuur 4-23 Mesh van verbinding nabij kopplaat, bovenverbinding vakwerkligger 40

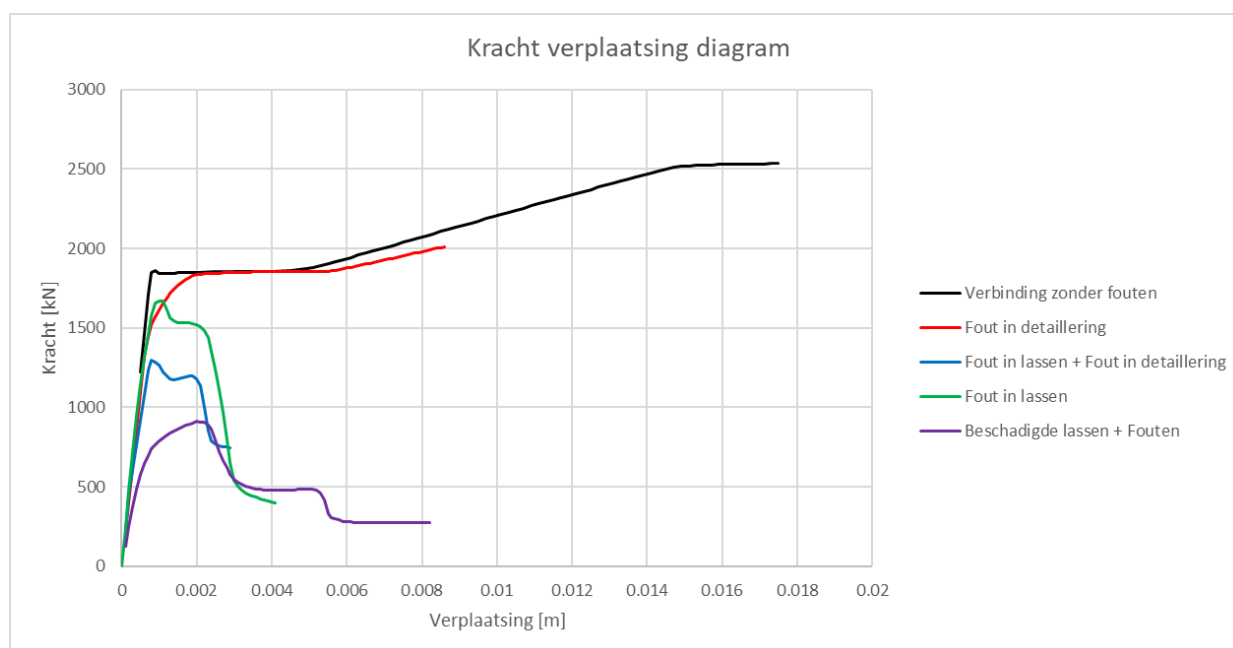
De capaciteit van de bovenverbinding van vakwerkligger 40 net voor de instorting bedraagt 900 kN. Door schade aan de lassen aan de onderkant en de zijkant moet alle kracht door de las aan de bovenkant. Dit resulteert in hoge spanningconcentraties in de las waardoor de las gaat vloeien, zie Figuur 4-24. Wanneer de las gaat vloeien heeft de verbinding geen herverdelingscapaciteit meer.



Figuur 4-24 Rekken in de boven verbinding op stramien 40 bij een kracht van ongeveer 900 kN.

Figuur 4-25 geeft de kracht-verplaatsing diagrammen voor de bovenverbinding van vakwerkligger 40 in de volgende situatie:

- verbinding zonder fouten (maximaal haalbare capaciteit = capaciteit koker)
- fout in de detaillering
- fout in de lassen (hierbij is aangenomen dat de las aan de onderkant 3 mm dik was)
- fouten in de lassen en detaillering
- beschadigde lassen en fouten in lassen en detaillering



Figuur 4-25 Vergelijking kracht-verplaatsing diagrammen voor modellen met verschillende defecten

Uit Figuur 4-25 kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Doordat het detail slecht is ontworpen wordt de capaciteit met ongeveer 17% gereduceerd. (verschil tussen zwarte en rode lijn in grafiek)
- De slecht uitgevoerde lassen reduceren de capaciteit met ongeveer 39%. (verschil tussen zwarte en groene lijn in grafiek)
- De slechte uitvoering van de lassen en de detaillering samen reduceert de capaciteit met ongeveer 52%. (verschil tussen zwarte en blauwe lijn in grafiek)
- Schade aan de constructie tijdens de levensduur heeft de capaciteit met 31% gereduceerd. (verschil tussen blauwe en paarse lijn in grafiek)
- Bovenstaande defecten samen resulteren in een reductie van de capaciteit van 67%. (verschil tussen zwarte en paarse lijn in grafiek)

Uit de analyse volgt dat de aanname van een lasdikte van 3 mm aan de onderkant van de verbinding te gunstig was; de lasdikte was waarschijnlijk maar 1-2 mm. De werkelijke reductie van de slecht uitgevoerde lassen ligt daarom tussen de 39% en 67%, en wordt geschat op ongeveer 50%.

In Tabel 18 is de capaciteit van de bovenverbinding van vakwerkligger 40 uitgezet tegen de capaciteiten van de bovenverbindingen van naastgelegen vakwerkliggers. Daarnaast is de capaciteit van de onderverbinding van ligger 40 bepaald, deze bedraagt 1800 kN. Op basis hiervan kan worden geconcludeerd dat de bovenverbinding van as 40 de zwakste schakel was.

Tabel 18 Capaciteiten bovenverbindingen vakwerkliggers

Vakwerkligger	Status	Trekcapaciteit Verwachtingswaarde
39	Onbeschadigd	1450 kN
40	Onbeschadigd	1300 kN
40	Beschadigd	900 kN
41	Onbeschadigd	1450 kN

4.8.1 Conclusies detailanalyses

Op basis van de detailanalyses kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De aansluiting van de bovenregel van vakwerkligger 40 is zwakker dan die van de aangrenzende vakwerkliggers.
- Verschillende defecten hebben de capaciteit van de bovenverbinding gereduceerd. De slecht uitgevoerde lassen hebben de capaciteit van de bovenverbinding met 50% gereduceerd, wat veruit de grootste bijdrage heeft gehad.
- De lassen in de onderverbinding van stramien 40 zijn niet de zwakste schakel wanneer de verbinding op druk wordt belast. Deze verbinding is dan ook niet op druk bezwaken.

4.9 Degradatie

Degradatie van de verbinding, ofwel afname van de capaciteit van de verbinding, kan optreden door corrosie en/of vermoeiing.

4.9.1 Corrosie

Bij de beoordeling van de bezwaken lassen is corrosie van de staalconstructie vastgesteld. Bij de verbinding van de bovenregel van vakwerkligger 40 zijn duidelijke corrosiesporen aangetroffen. De corrosie bij vakwerkligger 40 bevindt zich op de kopplaat, de regel en de breukvlakken van de lassen. Dit wijst erop dat deze breuk al voor het moment van bezwijken op 10 augustus 2019 aanwezig was. De dikte van de corrosielagen en de afname van de wanddikte wijst erop dat de breuk al rond het moment van oplevering of kort daarna is opgetreden. Gezien de belastinggeschiedenis is de storm van januari 2007 het meest aannemelijke moment. De ernstige corrosie is waargenomen op het deel van de verbinding waar een scheur is opgetreden. Hier werd dus geen kracht meer overgedragen.

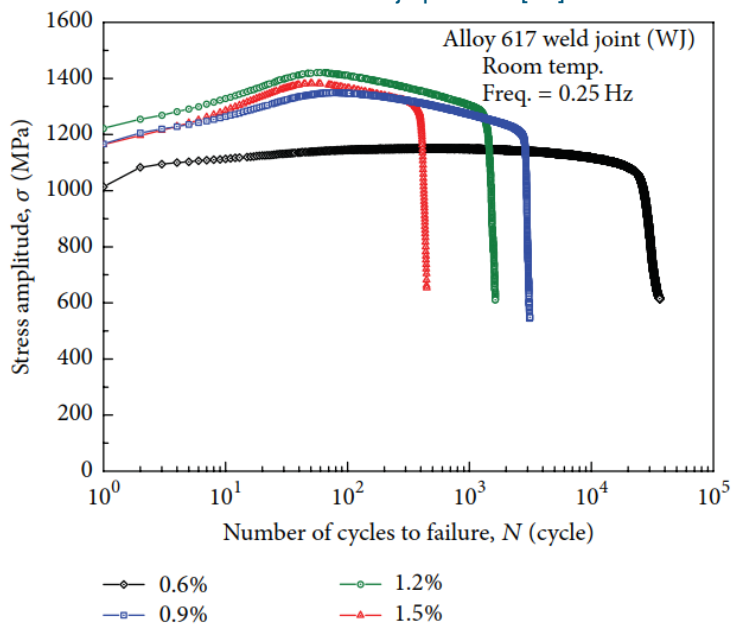
Daarnaast zijn er in het onderzoek van INTRON sporen van putcorrosie gevonden. Deze putcorrosie is al langere tijd aanwezig, volgens INTRON ruim voor bezwijken. Een diepe put is gevonden in de kritieke las van de bovenverbinding van vakwerkligger 40, zie Figuur 4-26. Deze putcorrosie in de las aan de bovenzijde kan de capaciteit van de verbinding nog verder hebben gereduceerd.



Figuur 4-26 Putcorrosie koplaat bovenverbinding vakwerkligger 40, las A. Foto van INTRON.

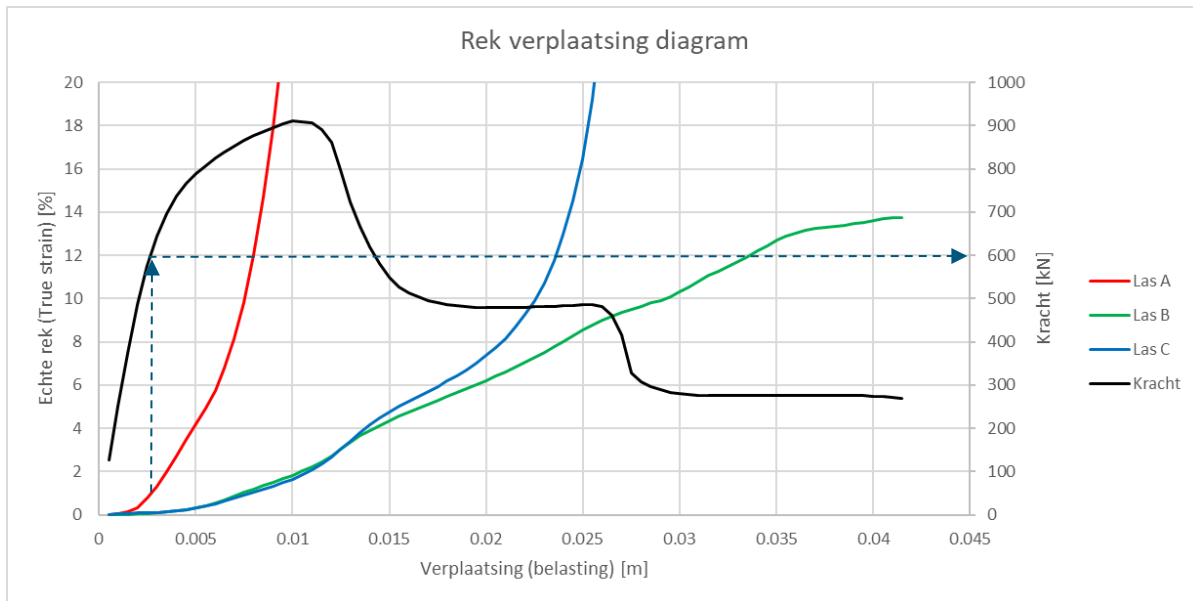
4.9.2 Vermoeiing

Bij de beoordeling van de bezweken lassen (paragraaf 4.4) zijn geen sporen gevonden van vermoeiing aangetroffen. Uit de literatuur blijkt dat er een verschil zit in het breukgedrag van (extreem) laag cyclische en hoog cyclische vermoeiing, tevens zit er een verschil tussen vermoeiing in staal en lasmateriaal [10] [11]. Bij extreem lage cycli lijkt het breukvlak sterk op een normale geweldsbreuk. Dit type bezwijkpatroon kan optreden bij rekken in het lasmateriaal tussen de 1% en 2.5% [10]. Na de eerste aantal cycli met hoge rekken treedt verharding op in het materiaal. Dit wordt gevolgd door verzachting, na 100 tot 1000 cycli neemt de sterkte van het lasmateriaal sterk af tot uiteindelijk bezwijken optreedt. Figuur 4-27 geeft een voorbeeld uit de literatuur voor een dit bezwijk patroon [11].



Figuur 4-27 Experimentele resultaten van vermoeiing in lasmateriaal. [11]

In Bijlage F is de uiterste capaciteit van de verbindingen bepaald en is vastgesteld dat er grote rekken in de lassen optreden voordat de verbinding bezwijkt. Figuur 4-28 vergelijkt de rekken in de lassen met de optredende kracht in de bovenverbinding van vakwerkligger 40. Tijdens de stormachtige wind op 10 augustus 2019 was de extreme belasting op deze verbinding 580 kN, wat rekken geeft van ongeveer 1% in las A.



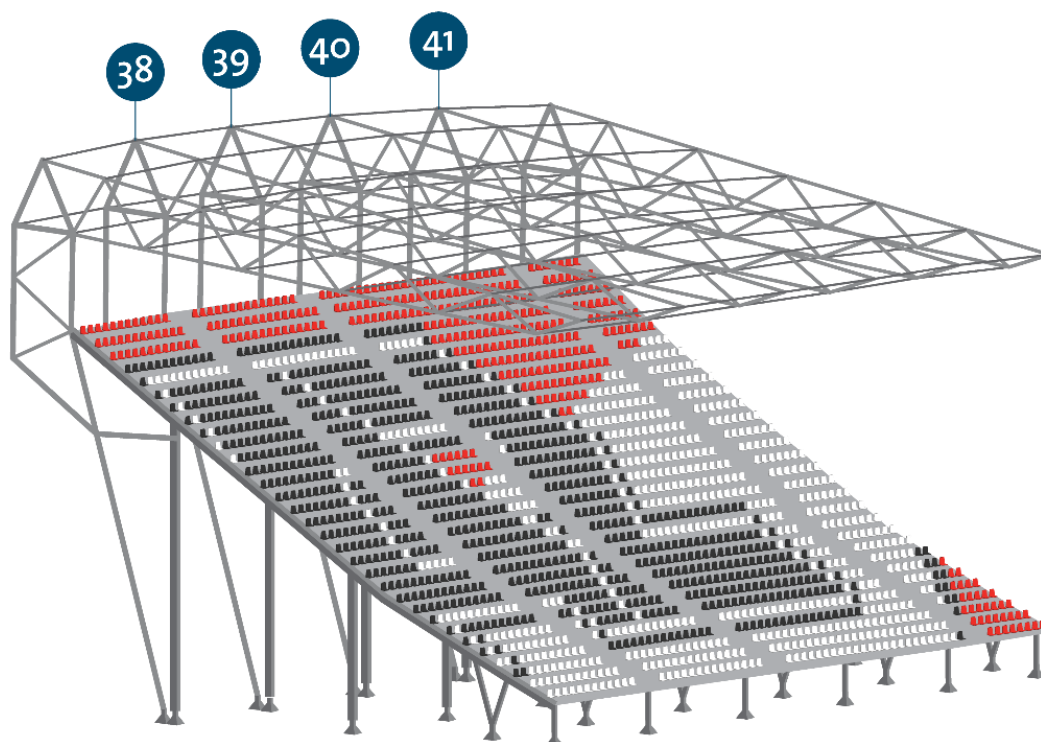
Figuur 4-28 Rekken van lassen in boven verbinding stramien 40.

In Bijlage B is bepaald dat er 37 dagen zijn geweest met een hogere windsnelheid dan op 10 augustus 2019. Op één dag wordt de verbinding meerdere malen cyclisch belast met een kracht die vergelijkbaar is met de extreme kracht op die dag. De extreme kracht op de verbinding lag op deze dagen tussen de 600 en 800 kN. In de beschadigde toestand zou deze belasting grote rekken (1-2.5%) geven in de lassen.

De combinatie van grote rekken en een laag aantal cycli is typisch voor extreem laag cyclische vermoeiing. Hierdoor is de capaciteit van de verbinding sterk afgenomen van 900 kN naar 580 kN.

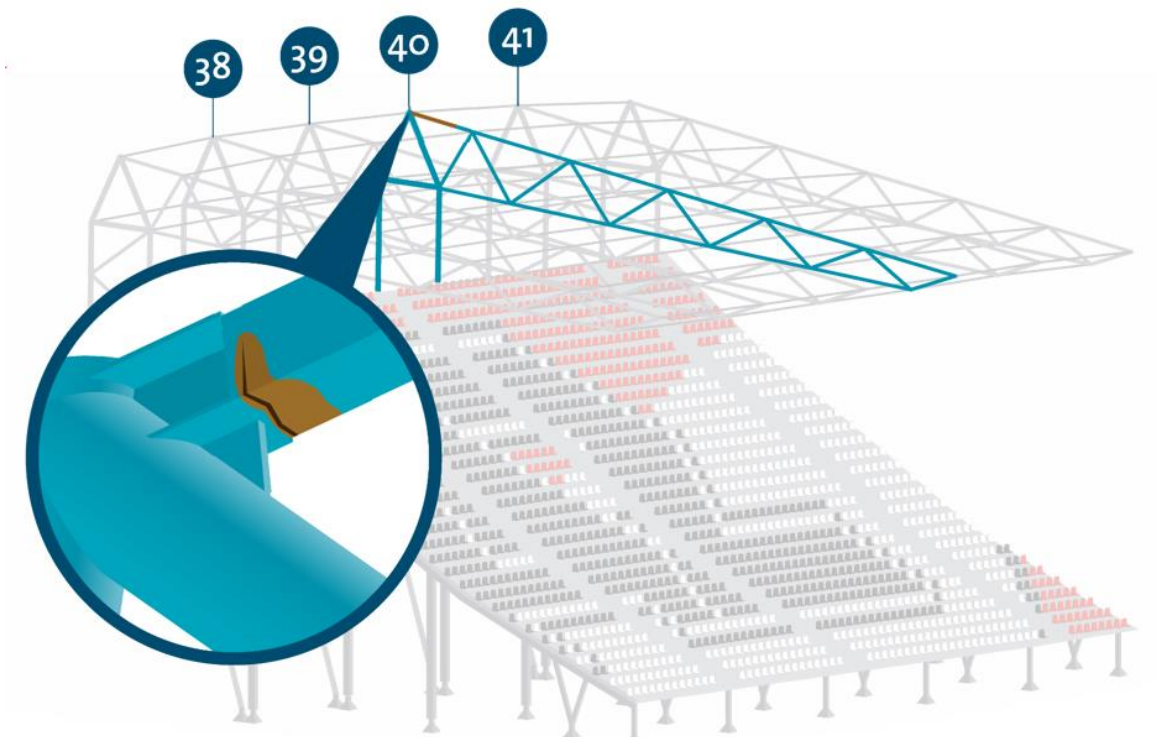
4.10 Bezwijkvolgorde

Uit de verschillende analyses komt de bovenverbinding van vakwerkligger 40 als beginpunt naar voren. Hieruit volgt tevens het globale bezwijkmechanisme van de dakconstructie. Het globale bezwijken van de constructie wordt hier stap-voor-stap toegelicht. Bij oplevering is de constructie van het ingestorte deel intact. Een weergave van de intacte constructie tussen stramienlijn 37 en 42 is weergegeven in Figuur 4-29.



Figuur 4-29 Intacte constructie tussen stramienlijn 37 en 42

Gedurende de levensduur is de onderzijde van de bovenverbinding van vakwerkligger 40 gescheurd, een impressie is weergegeven in Figuur 4-30. Dit is waarschijnlijk bij een eerdere zware storm gebeurd. Bij het niet-destructief onderzoek is een scheur vastgesteld bij de bovenverbinding van vakwerkligger 43, zie Figuur 4-31. Deze scheur is vrij recent en lijkt op de initiële scheur in de bovenverbinding van vakwerkligger 40. De scheur aan de zijwanden van 40 kwam hoger dan bij 43. Dit volgt uit de corrosie aan de binnenzijde van de koker bij vakwerkligger 40. Hiervoor moet ook de scheur aan de onderzijde wijder zijn geweest. Daarnaast is er meer materiaal gecorrodeerd dan bij vakwerkligger 43 waardoor de scheur aan de onderzijde nog wijder is geworden.

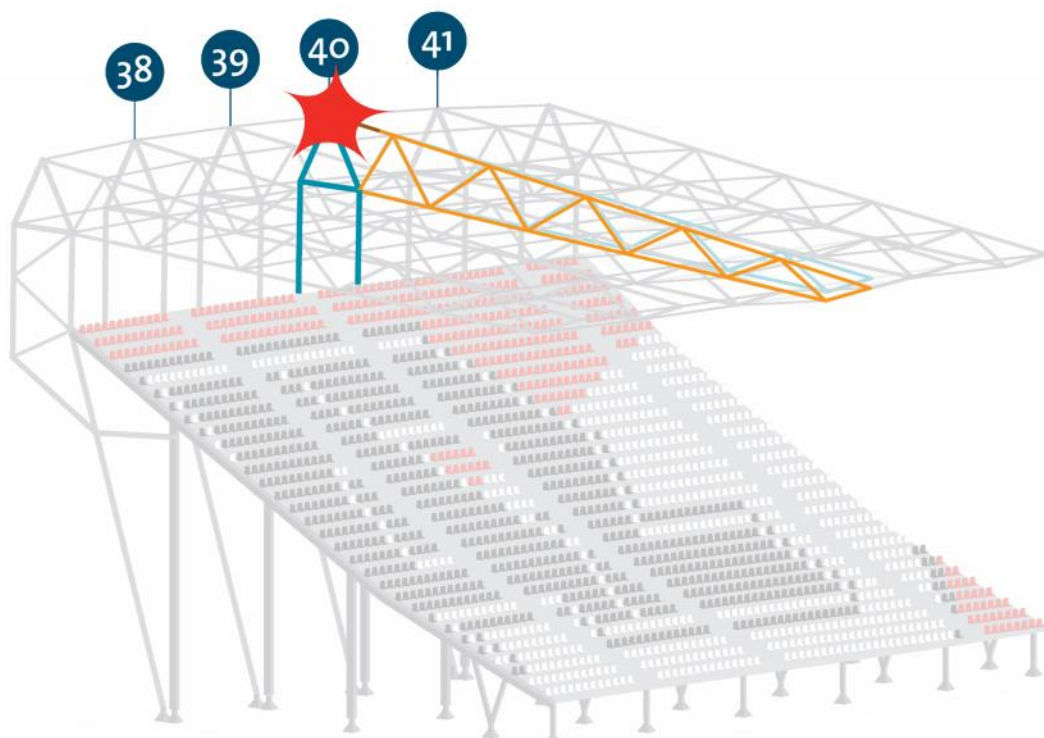


Figuur 4-30 Impressie van de scheur in de bovenverbinding van vakwerkligger 40

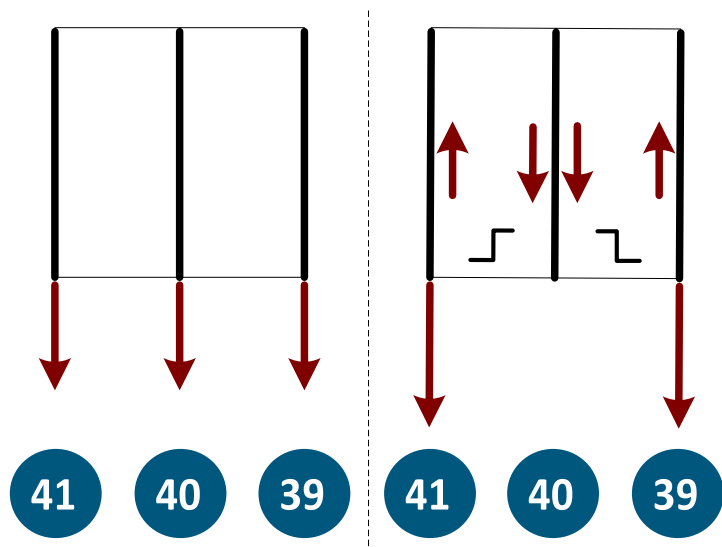


Figuur 4-31 Scheur in de onderzijde van de bovenverbinding van vakwerkligger 43 die vermoedelijk vergelijkbaar is met de aanwezige scheur in vakwerkligger 40 voor de instorting.

Op de dag van instorting bezwijkt de bovenregel van vakwerkligger 40 als eerste door een grote neerwaartse windbelasting. Hierdoor wil de vakwerkligger gaan draaien rondom de verbinding van de onderregel. Dit is weergegeven in Figuur 4-32. Bij kleine rotaties van de vakwerkligger verplaatst de bovenregel vooral horizontaal, parallel met het dakvlak. Hierdoor worden de dakplaten in-het-vlak belast. Deze schijfwerking van het dakvlak zorgt ervoor dat de kracht van vakwerkligger 40 herverdeeld wordt naar de naastliggende vakwerkliggers. Deze krachtswerking is weergegeven in Figuur 4-33.

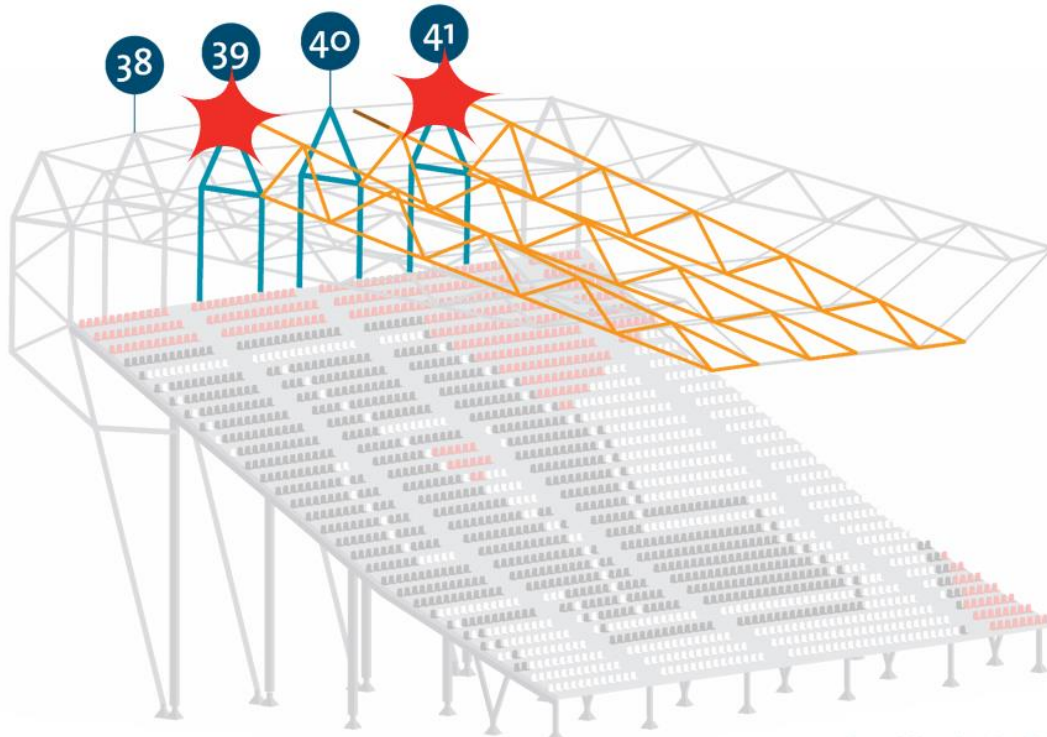


Figuur 4-32 Bezijken van de bovenregel door neerwaartse windbelasting



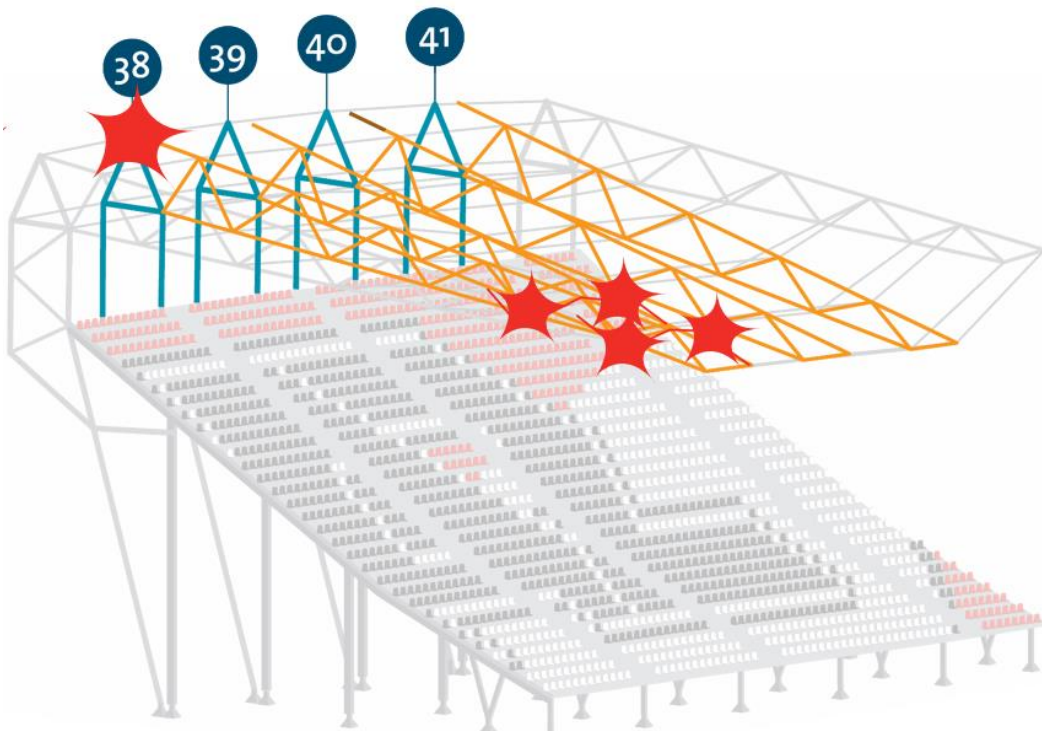
Figuur 4-33 bovenaanzicht met herverdeling van krachten naar de naastgelegen vakwerkliggers via het dakvlak

Door de schijfwerking in het dak en de herverdeling bezijken vervolgens de verbindingen van de bovenregel van vakwerkliggers 41 en 39. Dit deel van het dak begint nu als geheel te roteren om de verbindingen van de onderregels. Deze situatie met grote vervormingen is weergegeven in Figuur 4-34.



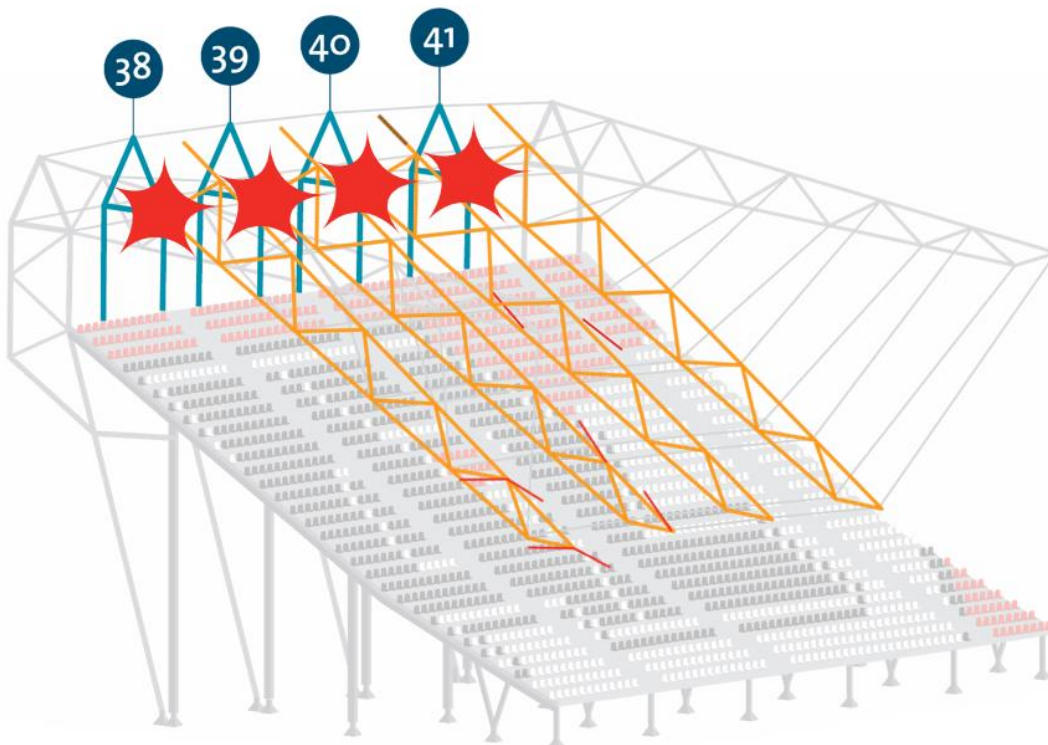
Figuur 4-34 Grote vervorming van het dak na bezwijken van bovenverbindingen van vakwerkliggers 39, 40 en 41.

Door de grote vervormingen van het dak wordt er een tweede draagweg gevormd door de gordingen tussen de vakwerkliggers. De krachten in de bezweken vakwerkliggers worden nu via de gordingen naar de vakwerkliggers 38 en 42 afgedragen. Hierdoor wordt vakwerkligger 38 overbelast en bezwijkt, net als de verbindingen van de gordingen tussen vakwerkligger 37 – 38 en 38 – 39. Dit is weergegeven in Figuur 4-35.



Figuur 4-35 Constructie nadat vakwerkligger 38 door herverdeling via de gordingen is bezweken

Uiteindelijk bezwijken de verbindingen van de onderregel van de vier vakwerkliggers doordat deze hun rotatiecapaciteit bereiken. Hiermee is er geen verbinding meer tussen de bezweken vakwerkliggers en de rest van de dakconstructie en valt het dak in vrije val het laatste stuk op de tribune. Nadat de vakwerkliggers landen op de tribune schuiven deze naar beneden doordat de tribune steil afloopt. Daarmee wordt de eindsituatie van de instorting bereikt.



Figuur 4-36 Constructie nadat de onderverbindingen van vakwerkligger 38 t/m 41 zijn bezweken

5 Testen van hypothesen

In dit hoofdstuk wordt op basis van de voorgaande analyses een conclusie getrokken voor alle opgestelde hypothesen uit Tabel 7 “Mogelijke technische oorzaken”. Voor de conclusies bij alle hypothesen geldt dat alleen afwijkingen benoemd zijn in de tekst. Indien het dus niet benoemd wordt zijn er in het onderzoek geen afwijkingen vastgesteld.

5.1 Bewezen hypothesen

De bewezen hypothesen zijn onder te verdelen in een aantal thema's. Hieronder worden de hypothesen per thema gegroepeerd en besproken. Binnen de thema's is zoveel mogelijk de volgorde aangehouden conform de volgorde van Tabel 7.

5.1.1 Belastingen

In het oorspronkelijke ontwerp is geen neerwaartse windbelasting meegenomen, terwijl dit volgens de norm wel had gemoeten. Er is alleen een sneeuwbelasting meegenomen als neerwaartse variabele belasting op het dak in de hoofdberekening. In het ontwerp is een hogere opwaartse windbelasting meegenomen dan volgens de norm noodzakelijk. Hierdoor is een te lage trekkracht en een te hoge drukkracht in de verbinding bepaald.

Uit het windtunnelonderzoek komt naar voren dat er wel een grote neerwaartse windbelasting kan optreden. De neerwaartse windbelasting uit het windtunnelonderzoek leidt tot grotere belastingeffecten dan de in de ontwerpberekening aangehouden sneeuwbelasting. Het belastingeffect van de ontwerpberekening voor opwaartse wind is in absolute zin 14% hoger dan het belastingeffect volgend uit de neerwaartse wind van het windtunnelonderzoek. Hiermee is **hypothese 2** omtrent belastingen tijdens ontwerp bewezen.

5.1.2 Ontwerp verbinding

Uit de analyse van de verbinding blijkt dat niet de volle capaciteit van de koker kan worden benut. Dit komt door een slechte krachtsoverdracht in de verbinding die zorgt voor grote lokale spanningen. Dit is nog onafhankelijk van het gedrag van de lassen in de verbinding. De kopplaat is niet stijf genoeg om de krachten over te dragen aan het samengestelde profiel. Door deze effecten wordt de capaciteit van de verbinding met 17% gereduceerd. Hiermee is **hypothese 7** omtrent de afmetingen van de verbindingen tijdens ontwerp bewezen.

5.1.3 Kwaliteit van de lassen

Bij de beoordeling van de bezweken lassen komt naar voren dat de kwaliteit van de lassen ondermaats is. Er zit een groot verschil in de keeldoorsnedes van de lassen tussen de verbindingen onderling. Uit de berekening van de capaciteit van de verbinding bij vakwerkligger 40 blijkt dat de gemeten lasdoorsnedes de capaciteit van de verbinding met ongeveer 39% reduceren. Zie hiervoor het verschil tussen de zwarte en groene lijn in Figuur 4-25. De slechte laskwaliteit heeft een vergelijkbare invloed bij alle bezweken vakwerkliggers. Hiermee is **hypothese 17** omtrent geometrie van de lassen tijdens productie bewezen.

Bij de beoordeling van de bezweken lassen zijn lasdefecten vastgesteld. Dit gaat om onder andere gasinsluitingen, onvolledig doorlassen en slechte hechting tussen de las en het moedermateriaal. Bij de beoordeling van de bezweken lassen is bij de lassen met gasinsluitingen een duidelijk ander breukbeeld te zien. De invloed hiervan is niet gekwantificeerd in berekeningen maar kan wel hebben bijgedragen aan de instorting door een verdere reductie van de lascapaciteit. Hiermee is **hypothese 19** bewezen.

5.1.4 Degradatie van de constructie

Uit de analyse van de opgetreden belastingen gedurende de levensduur blijkt dat er al eerder een 40% groter belastingeffect is opgetreden in de verbinding van de bovenregel voor het moment van instorten. Hieruit wordt geconcludeerd dat een degradatie mechanisme een rol moet hebben gespeeld.

5.1.4.1 Eerder bezwaken lassen

Bij de beoordeling van de bezwaken lassen is gebleken dat de las aan de onderzijde van de bovenverbinding van vakwerkligger 40 al voor de instorting op 10 augustus 2019 is bezwaken. De hoeveelheid corrosie en de afname van de wanddikte van de koker wijzen erop dat de breuk maximaal enkele jaren na oplevering is opgetreden. Tabel 3 geeft de zwaarste stormen gedurende de levensduur. De storm van januari 2007 is daarmee het meest waarschijnlijke moment waarop deze las is bezwaken.

5.1.4.2 Corrosie

Bij de beoordeling van de bezwaken lassen is corrosie van de staalconstructie vastgesteld. Bij de verbinding van de bovenregel van vakwerkligger 40 zijn duidelijke corrosiesporen aangetroffen. De corrosie bij de andere vakwerkliggers was oppervlakkig en niet ernstig genoeg om significant aan de instorting te hebben bijgedragen.

De corrosie bij vakwerkligger 40 bevindt zich op de kopplaat, de regel en de breukvlakken van de lassen. Dit wijst erop dat deze breuk al voor het moment van bezwijken op 10 augustus 2019 aanwezig was. De dikte van de corrosielagen en de afname van de wanddikte wijst erop dat de breuk al rond het moment van oplevering is opgetreden. Hieruit wordt geconcludeerd dat de corrosie bij vakwerkligger 40 het gevolg is van de eerder opgetreden scheur. Na optreden van de scheur kan water de verbinding binnendringen. Dit kan de corrosie bij de scheur hebben versneld.

Hieruit wordt geconcludeerd dat **hypothese 32** omtrent corrosie aan de staalconstructie is bewezen.

Hierbij wordt opgemerkt dat de corrosie bij vakwerkligger 40 een gevolg is van eerder gedeeltelijk bezwijken van de constructie. De putcorrosie in de las aan de bovenzijde van de verbinding kan hebben bijgedragen aan de degradatie.

5.1.4.3 Vermoeiing

Uit het onderzoek van INTRON komt naar voren dat de verbindingen zijn bezwaken door een geweldsbreuk in de las, onvoldoende hechting tussen las en moedermateriaal of een geweldsbreuk in het moedermateriaal. Er zijn bij de beoordeling van de bezwaken lassen geen aanwijzingen gevonden voor vermoeiing in de breukvlakken. Er is daarnaast uit de historische windsnelheden geen groot genoeg aantal cycli gevonden om dit te ondersteunen. Hieruit wordt geconcludeerd dat hoog-cyclische vermoeiing geen rol heeft gespeeld bij de instorting.

Laag cyclische vermoeiing heeft een breukbeeld dat zeer vergelijkbaar is met een geweldsbreuk. Uit onderzoek is gebleken dat er 37 dagen zijn geweest met een hogere windbelasting dan op de dag van instorting. Uit de analyse in paragraaf 4.9.2 blijkt dat door de spanningsconcentraties zeer laag-cyclische vermoeiing een rol kan hebben gespeeld. Op basis hiervan is **hypothese 33** voor laag-cyclische vermoeiing bewezen.

Ook hierbij wordt opgemerkt dat de corrosie bij vakwerkligger 40 een gevolg is van eerder gedeeltelijk bezwijken van de constructie.

5.2 Verworpen hypotheses

Hieronder worden kort de verworpen hypotheses behandeld. Deze zijn niet thematisch gegroepeerd maar worden zoveel als mogelijk op volgorde van Tabel 7 “Mogelijke technische oorzaken” behandeld.

Uit de point cloud [4] is gebleken dat er geen grote verticale afwijkingen in de posities van de vakwerkkolom zijn opgetreden. Hiermee is **hypothese 1** omtrent zettingen door draagkracht ondergrond verworpen.

De belastingcombinaties die in de ontwerpberekening zijn toegepast komen overeen met de in de van toepassing zijnde norm voorgeschreven belastingcombinaties. Hiermee wordt **hypothese 3** omtrent aanhouden belastingcombinaties verworpen.

In de ontwerpberekening zijn de diagonalen van de vakwerkliggers scharnierend verbonden met de boven- en onderregels. Deze verbinding is gelast. Een momentvaste verbinding is hierdoor realistischer. De gekozen schematisering heeft geen grote invloed op de belastingeffecten in de verbindingen die zijn bezweken. Deze schematisering heeft niet bijgedragen aan de instorting. Hiermee is **hypothese 4** omtrent de gekozen schematisering in de berekening verworpen.

In de analyse van de ontwerpberekening zijn geen fouten gevonden in het bepalen van de belastingeffecten met de in de ontwerpberekening aangehouden belastingen, belastinggevallen, belastingcombinaties en schematisering. Hiermee is **hypothese 5** omtrent berekening belastingeffecten verworpen.

Uit berekeningen van de uitgevoerde verbinding blijkt dat de ronde buisprofielen die aansluiten op het samengesteld profiel van de verbinding de ontwerpbelasting niet aankunnen. In de praktijk blijkt de capaciteit van deze buizen niet maatgevend te zijn. Er is geen schade waargenomen aan de buizen. Daarom wordt **hypothese 6** omtrent de afmetingen van elementen tijdens ontwerp verworpen.

In het ontwerp van de verbinding van de bovenregel is aangenomen dat de koker van de bovenregel de zwakste schakel is. De in het ontwerp aangenomen lasdikte is 8 mm. Dit is gelijk aan de wanddikte van de koker. Uit berekeningen van de verbinding blijkt dat, wanneer het detail goed ontworpen was en een lasdikte van 8 mm was aangehouden, de verbinding de belastingeffecten uit de ontwerpberekening aankon. Hiermee is **hypothese 8** omtrent de afmetingen van de lassen in het ontwerp verworpen.

De vereiste staalkwaliteit is in de ontwerpberekening beschreven. Deze staalkwaliteit komt overeen met de in het ontwerp bepaalde geometrie en belastingeffecten. Daarmee is **hypothese 9** omtrent de aangehouden materiaaleigenschappen in het ontwerp verworpen.

Uit de archiefgegevens van de oppervlaktebehandeling zijn controles naar voren gekomen van de oppervlaktebehandeling bij opening van het stadion. Hier zijn geen afwijkingen vastgesteld, hiermee worden **hypotheses 10, 21 en 22** omtrent de oppervlaktebehandeling van de staalconstructie verworpen.

Uit de beoordeling van de bezweken lassen blijkt dat alleen bij kopplaat 39-1 waarschijnlijk een lagere kwaliteit dan S355 is toegepast. Deze verbinding betreft niet het beginpunt van de instorting, dat is vakwerkligger 40. Daarmee is **hypothese 11** omtrent materiaaleigenschappen bij inkoop verworpen.

Voor één van de diagonalen in de vakwerkligger is in de productiefase een profiel gekozen met een grotere wanddikte. Dit heeft niet bijgedragen aan de instorting. Daarmee is **hypothese 12** omtrent afmetingen van elementen tijdens inkoop verworpen.

Uit de analyse van de ontwerpberekening en de gebouwde staalconstructie zijn geen afwijkingen vastgesteld met betrekking tot de afmetingen van de verbindingen. Hiermee is **hypothese 13** omtrent afmetingen van de verbindingen tijdens productie verworpen.

Uit de analyse van de ontwerpberekening blijkt dat er een aanname is gedaan voor het eigengewicht van de dakopbouw die hoger is dan het uiteindelijke gewicht van de dakopbouw inclusief zonnepanelen. Daarmee is **hypothese 14** omtrent het gewicht van bouwkundige afwerking verworpen.

Bij de beoordeling van de bezweken lassen is de hardheid van het lasmateriaal onderzocht. Deze voldeden aan het verwachte patroon, er waren enkele lassen met een afwijking van dit standaardpatroon maar dit was niet significant. Hiermee is **hypothese 18** omtrent materiaaleigenschappen van de lassen verworpen. De geometrie van de constructie is gecontroleerd aan de hand van de tekeningen en de point cloud [4]. Hier zijn geen afwijkingen gevonden. De **hypotheses 25, 26 en 27** omtrent de montage van de constructie zijn daarmee verworpen.

De windsnelheden gedurende de levensduur zijn lager dan de windsnelheid gegeven in de norm. Hiermee is **hypothese 29** omtrent overbelasting verworpen.

Uit de meteorologische gegevens blijkt dat er geen belastingcombinaties zijn opgetreden die de maatgevende belastingcombinaties gegeven in de norm overschrijden. Daarmee is **hypothese 30** omtrent belastingcombinaties gedurende de levensduur verworpen.

Er is geen informatie gevonden waaruit blijkt dat de constructie door een externe oorzaak zoals een botsing is beschadigd. Daarmee is **hypothese 31** omtrent beschadigingen tijdens de levensduur verworpen.

Gedurende de levensduur zijn er zonnepanelen toegevoegd op het dak. In de uitgangspunten is een aanname gedaan voor het eigengewicht van de dakbedekking die hoger is dan het uiteindelijke gewicht van de dakbedekking inclusief zonnepanelen. Hierdoor is de capaciteit niet overschreden. Dit heeft dus geen significante bijdrage gehad aan de instorting, deze belasting viel binnen de marges van de ontwerpberkening. Hiermee is **hypothese 34** omtrent aanpassingen tijdens de levensduur verworpen.

5.3 Rangschikken van hypothesen

Tabel 19 geeft een overzicht van het testen van de hypothesen. De combinatie van alle bewezen hypothesen samen heeft uiteindelijk tot de instorting geleid. De hypothesen hebben niet allemaal een gelijke bijdrage, de invloed van elke hypothese wordt hier gekwantificeerd. Een overzicht van enkel de bewezen hypothesen is gegeven in Tabel 20.

Tabel 19 overzicht van testen van hypothesen

Plaats in Delftse aanpak	Nr.	Technische oorzaak	Bewezen	Verworpen
Ontwerpfase (DO & UO)	1	Draagkracht ondergrond onvoldoende		X
	2	Belasting hoger/ anders dan aangenomen (bijv. windbelasting in norm niet conservatief voor stadions of aangenomen windbelasting niet conform norm, geen rekening gehouden met belastingen tijdens monteren)	X	
	3	Belastingcombinaties in norm en PVE anders dan aangenomen (bijv. combinatie sneeuw met wind vergeten)		X
	4	Constructief principe in werkelijkheid anders dan geschematiseerd (bijv. scharnierende of momentvaste verbindingen, veerstijfheden fundering anders dan aangenomen)		X
	5	Berekende belastingeffecten onjuist (bijv. verkeerde staalspanningen)		X
	6	Verkeerde afmetingen elementen staalconstructie (bijv. diameter buisprofiel te klein)		X
	7	Verkeerde afmetingen verbindingen staalconstructie (bijv. diktes schets- en kopplaten)	X	
	8	Verkeerde afmetingen lassen staalconstructie (bijv. keeldiktes lassen te klein)		X
	9	Verkeerde materiaaleigenschappen staalconstructie (bijv. S235 i.p.v. S355)		X
	10	Verkeerde oppervlaktebehandeling staalconstructie		X

Plaats in Delftse aanpak	Nr.	Technische oorzaak	Bewezen	Verworpen
Productiefase	11	Verkeerde materiaaleigenschappen staalconstructie (bijv. verkeerd lastoevoegmateriaal gebruikt of ingekocht, verkeerde legeringen in moedermateriaal, staalkwaliteit bevestigingsmiddelen onjuist)		X
	12	Verkeerde afmetingen elementen staalconstructie (bijv. profielen niet conform ontwerp)		X
	13	Verkeerde afmetingen verbindingen staalconstructie (bijv. diktes schets- en kopplaten niet conform ontwerp)		X
	14	Belasting hoger/ anders dan aangenomen (bijv. zwaardere boxen of zwaardere lampen ingekocht)		X
	15	Introduceren belastingen tijdens assemblage waar bij ontwerp geen rekening mee is gehouden (bijv. met grote kracht niet-passende delen assembleren)	-	-
	16	Optreden schade tijdens assemblage (bijv. verkeerd optillen of ondersteunen onderdelen, met grote kracht niet-passende delen assembleren)	-	-
	17	Geometrie lassen niet conform ontwerp (bijv. keeldiktes te klein)	X	
	18	Materiaaleigenschappen lassen niet zoals beoogd (bijv. brosse kristallijne structuur)		X
	19	Defecten in de lassen (bijv. gasinsluitingen, scheuren)	X	
	20	Introduceren grote restspanning tijdens lassen (bijv. voorverhitting moedermateriaal, startpunt lassen)	-	-
	21	Oppervlaktebehandeling onvoldoende dik aangebracht (bijv. verlaag lokaal te dun of plek vergeten)		X
	22	Materiaaleigenschappen oppervlaktebehandeling onvoldoende (bijv. verf niet corrosie werend, wrijvingscoëfficiënt gestraald oppervlak te laag)		X
	23	Introduceren belastingen tijdens montage waar bij ontwerp geen rekening mee is gehouden (bijv. met grote kracht niet-passende delen monteren, incorrect gebruik stelmogelijkheden tijdens montage)	-	-
	24	Beschadiging constructie tijdens transport of montage fase (bijv. verkeerd hijsen vakwerkliggers, beschadiging oppervlaktebehandeling door stoten, onjuist ondersteunen constructie tijdens monteren of aanpassingen constructie in het werk)	-	-
	25	Constructieonderdelen niet gemonteerd		X
	26	Onjuiste constructieonderdelen gemonteerd (bijv. onderdelen op verkeerde locatie gemonteerd)		X
	27	Constructieonderdelen onjuist gemonteerd (bijv. verkeerde aandraaimoment, verkeerde boutdiameters, vakwerkliggers ondersteboven)		X
	28	Constructieonderdelen en bouwkundige afwerking niet in juiste volgorde gemonteerd	-	-
Gebruiksfase	29	Belasting in werkelijkheid anders dan aangenomen tijdens ontwerp (bijv. overbelasting (extreme belasting hoger dan norm, bijv. windsnelheid norm kleiner dan windsnelheid praktijk))		X
	30	Belastingcombinaties in werkelijkheid anders dan aangenomen		X
	31	Beschadiging van de constructie door externe oorzaak tijdens de levensduur (bijv. botsing, bewuste beschadigingen)		X
	32	Meer corrosie aan de staalconstructie dan waar in het ontwerp vanuit is gegaan (bijv. ten gevolge van schade oppervlaktebehandeling, scheuren of openingen in constructie, veroudering verlaag)	X	
	33	Vermoeiingsschade aan de staalconstructie (bijv. laag- of hoog-cyclische vermoeiing)	X	
	34	Constructie/ belastingen aangepast tijdens de levensduur door gebruiker (bijv. elementen vervangen of verwijderd, pv-panelen toegevoegd, nieuwe boxen)		X

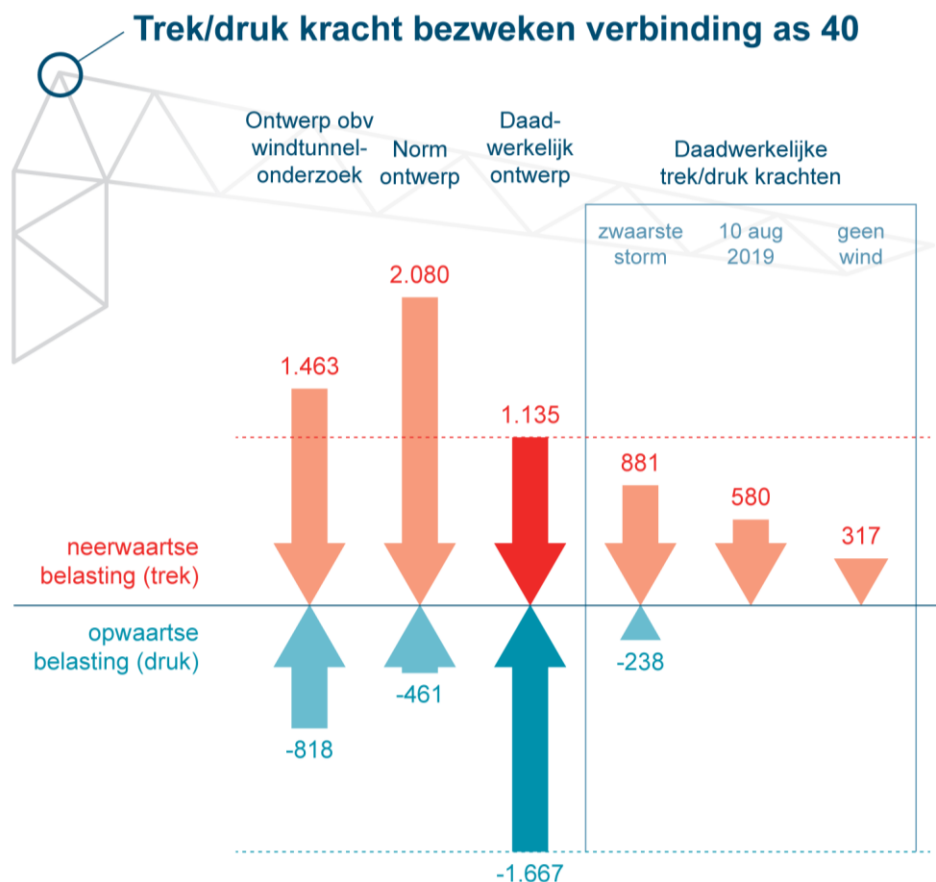
Tabel 20 Bewezen hypothesen waarvan de invloed gerangschikt zal worden

Plaats in Delftse aanpak	Nr.	Technische oorzaak
Ontwerpen (DO &UO)	2	Belasting hoger/ anders dan aangenomen (bijv. windbelasting in norm niet conservatief voor stadions of aangenomen windbelasting niet conform norm, geen rekening gehouden met belastingen tijdens monteren)
	7	Verkeerde afmetingen verbindingen staalconstructie (bijv. diktes schets- en kopplaten)
Producersen	17	Geometrie lassen niet conform ontwerp (bijv. keeldiktes te klein)
	19	Defecten in de lassen (bijv. gasinsluitingen, scheuren)
Gebruiken	32	Meer corrosie aan de staalconstructie dan waar in het ontwerp vanuit is gegaan (bijv. ten gevolge van schade oppervlakbehandeling, scheuren of openingen in constructie, veroudering verflaag)
	33	Vermoeiingsschade aan de staalconstructie (bijv. laag- of hoog-cyclische vermoeiing)

Ten eerste wordt gekeken naar de hypothese 19 omtrent de defecten in de lassen. De exacte invloed van deze hypothese is moeilijk te kwantificeren. De invloed van deze hypothese wordt hier kwalitatief beschouwd. De verbinding van de onderregel van vakwerkligger 40 had ernstigste defecten, te weten gasinsluitingen. Dit is duidelijk zichtbaar in Tabel 12. Het breukbeeld van deze lassen is anders dan bij de overige lassen. Deze lassen vormen niet het startpunt van de instorting, daarom is de bijdrage van deze gasinsluitingen aan de instorting als geheel zeer beperkt te noemen.

Tabel 15 geeft een overzicht van de berekende normaalkrachten in de bovenregel van vakwerkligger 40. Op basis hiervan kan de invloed van hypothese 2 omtrent de belastingen gekwantificeerd worden. Voor het ontwerp van de lassen is het niet van belang of het gaat om een trekkracht of een drukkracht. Er wordt dus alleen naar de grootste kracht gekeken. In het ontwerp zijn fouten gemaakt bij het bepalen van de windbelasting. Hierdoor is de normaalkracht in het ontwerp lager dan volgens de norm ($1.667 / 2.080 = 80\%$).

De norm laat ook het gebruik van windtunnelonderzoek toe om de windbelasting te bepalen. Dit is bij het ontwerp niet gedaan, maar dit had wel gekund. Het belastingeffect behorend bij het door RWDI uitgevoerde windtunnelonderzoek is opgenomen in Figuur 5-1. De in het ontwerp aangehouden normaalkracht is 14% hoger ($1.667 / 1.463$) dan de normaalkracht volgens het windtunnelonderzoek. Hypothese 2 is dus niet van invloed op de instorting omdat er een hogere waarde is gebruikt dan de waarde waarmee gerekend had kunnen worden.



Figuur 5-1 Normaalkrachten in de bovenregel van vakwerkligger 40 voor verschillende gevallen

Aan de rechterzijde van Figuur 5-1 zijn de daadwerkelijk opgetreden belastingen gedurende de levensduur weergegeven. De normaalkracht op de dag van instorting is 65% van de maximaal opgetreden normaalkracht gedurende de levensduur. Er was dus een significante invloed van degradatie gedurende de levensduur.

De constructie is verzwakt door een eerdere scheur. Dit is de belangrijkste degradatie gedurende de levensduur. Verdere degradatie kan veroorzaakt zijn door corrosie en vermoeiing (hypothesen 32 en 33). Tabel 3 geeft de zwaarste stormen tijdens de levensduur. In 2018 is er nog een zware storm geweest. De capaciteit is sindsdien nog significant afgenomen. Dit past niet bij het geleidelijke proces van corrosie. Hieruit wordt geconcludeerd dat hypothese 33 omtrent vermoeiing de grootste bijdrage aan de degradatie heeft gehad na optreden van de scheur. De putcorrosie in de las aan de bovenzijde van de verbinding van vakwerkligger 40 kan hier ook nog beperkt aan hebben bijgedragen.

Hypothese 7 omtrent het ontwerp van de verbinding en hypothese 17 omtrent de geometrie van de uitgevoerde lassen, zijn vergeleken op basis van de capaciteiten die zijn bepaald door middel van berekeningen. De resultaten hiervan zijn gegeven in Figuur 4-25. Hieruit blijkt dat hypothese 7 de capaciteit van de verbinding met 17% heeft gereduceerd, en hypothese 17 de capaciteit met 39% heeft gereduceerd. Hieruit blijkt dat hypothese 17 de belangrijkste bijdrage heeft geleverd aan de instorting.

6 Conclusies

Het gedeeltelijk bezwijken van het dak van het AFAS Stadion is veroorzaakt door het bezwijken van de verbinding van de bovenregel bij vakwerkligger 40. Dit was het gevolg van neerwaartse windbelasting tijdens een storm. De hoofdoorzaak van het bezwijken van deze verbinding is:

- 1) De lassen van deze verbinding zijn te dun uitgevoerd.

De verbinding van de bovenregel van vakwerkligger 40 is in de lassen bezweken. Deze lassen waren te dun uitgevoerd waardoor de capaciteit naar schatting met 50% is gereduceerd. Dit is de belangrijkste oorzaak van de instorting. Daarnaast zijn er nog twee andere oorzaken die een rol gespeeld hebben:

- 2) De verbinding in de bovenregel van vakwerkligger 40 was verzwakt door eerder bezweken lassen.
- 3) Het ontwerp van de verbinding was niet goed.

Overige mogelijke technische oorzaken hebben geen significante rol gespeeld.

Er is al rond het moment van oplevering een scheur ontstaan in de bovenverbinding van vakwerkligger 40, waarschijnlijk bij de storm in januari 2007. Deze scheur is ontstaan omdat de lassen te dun zijn uitgevoerd. De normaalkracht op de dag van instorting is 35% lager dan de maximaal opgetreden normaalkracht gedurende de levensduur.

Het gevolg van deze eerdere scheur was het optreden van corrosie nabij de scheur en laag-cyclische vermoeiing in de intacte lassen. De laag-cyclische vermoeiing heeft na optreden van de scheur de capaciteit nog verder gereduceerd, de corrosie niet. De scheur en de corrosie moeten zichtbaar kunnen zijn geweest bij een visuele inspectie van deze verbinding.

Het ontwerp van de verbinding was niet goed en heeft de capaciteit van de verbinding ongeveer met 20% gereduceerd. Het ontwerp leidde tot een slechte krachtsoverdracht met grote lokale spanningen als gevolg, hierdoor werd de verbinding de zwakste schakel met een bros bezwijkgedrag.

In het ontwerp zijn fouten gemaakt bij het bepalen van de windbelasting. De bij het ontwerp gehanteerde normaalkracht was ongeveer 20% lager dan de normaalkracht volgens NEN 6702. Deze norm laat ook het gebruik van windtunnelonderzoek toe om de windbelasting te bepalen. Dit is bij het ontwerp niet gedaan, maar dit had wel gekund. De bij het ontwerp gehanteerde normaalkracht is 15% hoger dan de normaalkracht die volgens het windtunnelonderzoek toegepast had kunnen worden. Daaruit volgt dat de fouten bij het bepalen van de windbelasting niet de oorzaak zijn van de instorting.

7 Referenties

- [1] „AD.nl,” [Online]. Available: <https://www.ad.nl/binnenland/installateur-dak-az-stadion-niet-berekend-op-zonnepanelen~aafa5193/>. [Geopend 29 10 2019].
- [2] K. Terwel, M. Schuurman en A. Loeve, „Improving reliability in forensic engineering: the Delft approach.,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Forensic Engineering*, vol. 171, nr. 3, pp. 99-106, 2018.
- [3] ZJA, Broersma, Doorsnede op as 38, Nieuw Stadion AZ Alkmaar, Tekening 249.3 UV 2.38, RHDHV Ref. 76: ZJA en Broersma, 2006.
- [4] Royal HaskoningDHV, „Point Cloud AZ Stadion,” Royal HaskoningDHV, Alkmaar, 2019.
- [5] M. v. I. e. Waterstaat, „Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut,” KNMI, [Online]. Available: <https://www.knmi.nl/nederland-nu/>. [Geopend 10 januari 2020].
- [6] *NEN 6702 Technische grondslagen voor bouwconstructies - TBG 1990 - Belastingen en vervormingen*, Delft: NEN, 2001.
- [7] NEN, *Eurocode 1: Belastingen op constructies- Deel 1-4: Algemene belastingen - Windbelasting*, Delft, 2011.
- [8] Ingenieursgroep Romkes BV, Tekening A105, Romkes BV, 2005.
- [9] Ingenieursgroep Romkes BV, Romkes_Hoofdberekening_p1-A18, RHDHV Ref. 158: Ingenieursgroep Romkes BV, 2005.
- [10] Younghune Kim and Woonbong Hwang, „High-Cycle, Low-Cycle, Extremely Low-Cycle Fatigue and Monotonic Fracture Behaviors of Low-Carbon Steel and Its Welded Joint,” *Materials (Basel)*, vol. 12(24) dec 019, 2019.
- [11] Seon Jin Kim, Rando Tungga Dewa, Woo Gon Kim, Min Hwan Kim, „Cyclic stress response and fracture behaviors of alloy 167 base metal and weld joints under LCF loading,” *Advances in materials science and engineering*, vol. 2015, p. Article ID 207497, 2015.