

Onderzoeksraad voor Veiligheid

Onderzoek Onderzoeksraad AZ- stadion

Toetsing onderzoek RHDHV gedeeltelijk bezwijken dakconstructie AZ-stadion

R01







Rev. A | 7 augustus 2020

Dit rapport is opgesteld met inachtneming van de specifieke instructies en eisen van de opdrachtgever. Gebruik van (delen van) dit rapport door derden, zoals bijvoorbeeld (maar niet beperkt tot) openbaarmaking, vermenigvuldiging en verspreiding is verboden. Arup aanvaardt geen enkele aansprakelijkheid jegens derden voor de inhoud van het rapport, noch kan een derde aan de inhoud van het rapport enig recht ontleen.

Opdracht nummer 273325-00

Arup bv
Postal address:
PO Box 57145
1040 BA Amsterdam
Visitor address:
Naritaweg 118
1043 CA Amsterdam
The Netherlands
www.arup.com

ARUP

Opdracht titel		Onderzoek Onderzoeksraad AZ-stadion		Opdracht nummer	
				273325-00	
Document titel		Toetsing onderzoek RHDHV gedeeltelijk bezwijken dakconstructie AZ-stadion		Dossier referentie	
Document ref		R01			
Versie	Datum	Dossiernaam	Rapportage Toetsing onderzoek RHDHV.docx		
Concept 75%	3 jul 2020	Omschrijving	Concept voor Onderzoeksraad		
			Vorbereid door	Gecontroleerd door	Goedgekeurd door
		Naam	CN/JP		JP
		Handtekening			
Concept 100%	10 jul 2020	Dossiernaam	100% Concept Rapportage Toetsing onderzoek RHDHV.docx		
		Omschrijving	Concept voor Onderzoeksraad		
			Vorbereid door	Gecontroleerd door	Goedgekeurd door
		Naam	CN/JP	MV	JP
		Handtekening			
Definitief	24 jul 2020	Dossiernaam	Rapportage Toetsing onderzoek RHDHV.docx		
		Omschrijving	Definitieve versie rapportage		
			Vorbereid door	Gecontroleerd door	Goedgekeurd door
		Naam	CN/JP	MV	JP
		Handtekening			
Rev. A	7 aug 2020	Dossiernaam	Rapportage Toetsing onderzoek RHDHV RevA.docx		
		Omschrijving	Aanpassingen na aanvullende opmerkingen Onderzoeksraad		
			Vorbereid door	Gecontroleerd door	Goedgekeurd door
		Naam	CN/JP	MV	JP
		Handtekening			
Uitgifte Document Verificatie met Document					<input checked="" type="checkbox"/>

Inhoud

	Pagina
1	Managementsamenvatting 1
2	Inleiding 4
2.1	Projectomschrijving 4
2.2	Uitgangspunten 4
3	Toetsingskader 6
3.1	Delftse Aanpak 6
3.2	Toetsing op basis van Delftse Aanpak 8
4	Toetsing stap 1: doel en reikwijdte van het onderzoek 11
5	Toetsing stap 2: verzamelen van informatie 12
5.1	Procestoets 12
5.2	Betrouwbaarheidstoets 12
6	Toetsing stap 3: opstellen van hypotheses 13
6.1	Procestoets 13
6.2	Betrouwbaarheidstoets 14
6.3	Inhoudelijke toets 14
6.4	Conclusies 18
7	Toetsing stap 4: toetsen hypotheses 20
7.1	Procestoets 20
7.2	Inhoudelijke toets – Analyse 21
7.3	Inhoudelijke toets 25
7.4	Conclusies 29
8	Conclusies 31
8.1	Over de aanpak van het forensisch onderzoek 31
8.2	Over de conclusies van het rapport 31
8.3	Over de analyses in het rapport 32
9	Aanbevelingen voor alternatieve en nog niet getoetste hypotheses 35
9.1	Laag-cyclische vermoeding 35
9.2	Brosse breuk door defecten in lassen 35
9.3	Degradatie door combinaties van hypotheses 36
10	Referenties 37

Appendices

Appendix A

Arup Team

Appendix B

Terminologie

Appendix C

Toetsingstabellen

Appendix D

Belastingen

Appendix E

Krachtenwerking dakconstructie

Appendix F

Capaciteit kritische staaldetails

1 Managementsamenvatting

Arup heeft in opdracht van de Onderzoeksraad voor Veiligheid een toetsing uitgevoerd van het Rapport “Onderzoek naar de technische oorzaken van het gedeeltelijk bezwijken van de dakconstructie van het AFAS Stadion in Alkmaar” van 2 april 2020. Dat rapport is opgesteld door adviesbureau Royal HaskoningDHV (RHDHV) in opdracht van A.Z. Vastgoed B.V.. Doel van de toetsing is vast te stellen of het forensisch onderzoek – zoals weergegeven in het rapport – zowel procesmatig als inhoudelijk correct en compleet is.

De gebruikte toetsingsmethode is gebaseerd op de “Delftse Aanpak” welke ook ten grondslag lag aan het rapport van RHDHV.

Conclusies over de aanpak van het forensisch onderzoek:

- Het onderzoek kijkt niet naar alle mogelijke oorzaken en beperkt zich tot directe technische oorzaken. Maar een definitie voor “directe technische oorzaken” ontbreekt en dus is het kader van het onderzoek niet duidelijk.
- Het onderzoek is niet voldoende compleet, omdat de processtappen die gedefinieerd staan in de (in het rapport gerefereerde) “Delftse Aanpak” niet overal strikt gevolgd worden en niet onderbouwd is waarom er is afgeweken.
- Het onderzoek voldoet slechts gedeeltelijk aan de betrouwbaarheidscriteria van de “Delftse Aanpak”. Hierdoor kunnen een significant aantal conclusies uit het rapport niet zondermeer als betrouwbaar worden aangemerkt.
- Het rapport is niet voldoende compleet, omdat de volgende vragen niet in voldoende mate worden beantwoord: waarom het dak is ingestort op het specifieke tijdstip, wat het precieze mechanisme van de instorting is en wat de keten van gebeurtenissen is die leidde tot instorting.

Conclusies over de conclusies van het onderzoek van RHDHV:

Schuingedrukt zijn de conclusies zoals aangegeven in het RHDHV-rapport.

- *Hoofdoorzaak van het instorten van een deel van het dak is het bezwijken van de verbinding van de bovenregel van vakwerkligger 40, tijdens een neerwaartse windbelasting tijdens een storm.* Dit wordt in het rapport aannemelijk gemaakt.
- *Hoofdoorzaak van het bezwijken van de verbinding:*
 - *De lassen van de verbinding zijn te dun uitgevoerd:* Het wordt in het rapport aannemelijk gemaakt dat het uitvoeren van de verbindingsmiddelen – de lassen – met afmetingen kleiner dan in het ontwerp voorgeschreven is, een belangrijke bijdrage heeft geleverd aan het bezwijken van de verbinding.
 - *De verbinding in de bovenregel was verzwakt door eerder bezwijken lassen:* Het wordt in het rapport aannemelijk gemaakt dat het aanwezig zijn van een doorlopende scheur in een significant deel van de lassen een belangrijke bijdrage heeft geleverd aan het bezwijken van de verbinding.
 - *Het ontwerp van de verbinding was niet goed:* Het wordt in het rapport niet aannemelijk gemaakt dat het uitgevoerde ontwerp van de verbinding – met inbegrip van de door de staalconstructeur voorgeschreven lassen en

zonder lasdefecten – een significante invloed heeft gehad op het bezwijken van de verbinding. De stelling in het rapport dat het ontwerp niet goed was is strijdig met de resultaten van de detailanalyse waarin wordt berekend dat de capaciteit van de verbinding groter is dan de ontwerpbelasting.

- *De scheur in de bovenregel van vakwerkligger 40 is ontstaan omdat de lassen te dun zijn uitgevoerd:* Wat de precieze oorzaak is van het ontstaan van de doorlopende scheur en andere scheuren in de ingestorte en niet ingestorte delen van de dakconstructie wordt niet uitgelegd in het rapport. Er is geen specifieke hypothese opgesteld die dit beschouwt. Het is mogelijk dat de oorzaak van het ontstaan van de scheuren een combinatie is van te kleine afmetingen van de lassen, hoge spanningsconcentraties, excentrische krachtsinleiding en de aanwezigheid van lasdefecten. Tevens kan het ontwerp van de verbinding een extra bijdrage hebben geleverd aan de grootte van de spanningsconcentraties.
- *Het optreden van de scheur heeft laag-cyclische vermoeiing tot gevolg in de intacte lassen. De laag-cyclische vermoeiing heeft de capaciteit nog verder gereduceerd na het optreden van de scheur:* Het rapport maakt niet aannemelijk dat laag-cyclische vermoeiing is opgetreden. Doordat laag-cyclische vermoeiing niet aangetoond is, is een reductie van de capaciteit hierdoor niet aangetoond. De oorzaak van de capaciteitsreductie tijdens de levensduur, in het rapport degradatie genoemd, wordt in het rapport daarom niet verklaard. Het is mogelijk dat onder invloed van wisselende belasting de scheur in lengte is gegroeid. Echter, scheurgroeiberekeningen om brossere breuk en scheuruitbreiding aannemelijk te maken ontbreken in het rapport.
- *In het ontwerp zijn fouten gemaakt in de bepaling van de windbelasting:* Het rapport bevestigt dat de “foute” bepaling van de windbelasting niet de oorzaak is van de instorting. Deze conclusie is daarom niet relevant in het kader van het doel van het rapport.
- In de conclusies worden effecten zeer precies gekwantificeerd, maar aangezien de analyses waarop de percentages zijn gebaseerd onvoldoende betrouwbaar of nauwkeurig zijn, is het niet gerechtvaardigd om de resultaten als nauwkeurig te veronderstellen.

Aanbevelingen naar aanleiding van de toetsing:

Falen van een constructie of constructief element wordt veroorzaakt doordat de optredende belasting hoger is dan de capaciteit. In het RHDHV-rapport wordt de vraag niet beantwoord waarom specifiek op 10 augustus 2019 de capaciteit lager was dan de optredende kracht. Omdat er in januari 2018 een zwaardere storm was met krachten die ordegrrootte 30%-40% groter waren dan de dag van instorting en de constructie toen niet is ingestort zijn twee aspecten van belang voor nader onderzoek:

- Een afname van de capaciteit van de bovenverbinding van vakwerkligger 40 over tijd. Mogelijk is er eerst sprake geweest van een brossere breuk en heeft de scheur zich vervolgens uitgebreid door spanningsconcentraties, corrosie en laag-cyclische vermoeiingsschade.

- Thermische belasting op de staalconstructie zonder dilataties in combinatie met andere belastingen. Tijdens de uitzonderlijke situatie van een storm bij relatief hoge temperaturen en snelle opwarming kan dit tot significante spanningen in kritische details hebben geleid.

2 Inleiding

2.1 Projectomschrijving

Op 10 augustus 2019 stortte een deel van het dak (circa 40 bij 30 meter) van de tribune van het AZ-stadion te Alkmaar in. De constructie van het dak betreft een uitragende staalconstructie met in de fabriek gelaste vakwerkliggers die op de bouw middels boutverbindingen aan vakwerkkolommen zijn bevestigd.

De eigenaar van het stadion A.Z. Vastgoed B.V. heeft Royal HaskoningDHV (RHDHV) opdracht gegeven om de technische oorzaak van de instorting te achterhalen. Het forensisch onderzoek is vastgelegd in het rapport “Onderzoek naar de technische oorzaken van het gedeeltelijk bezwijken van de dakconstructie van het AFAS Stadion in Alkmaar” van 2 april 2020. In het vervolg te noemen als RHDHV-rapport. [1]



Figuur 1 Ingestorte dakconstructie AZ-stadion. [Bron: Onderzoeksraad - IMG_0356]

2.2 Uitgangspunten

2.2.1 Opdracht en doelstelling

Arup voert in opdracht van de Onderzoeksraad voor Veiligheid (in het vervolg te noemen als Onderzoeksraad) een toetsing uit om te onderzoeken of het onderzoek van RHDHV zowel procesmatig als inhoudelijk correct en compleet is, met de beantwoording van de volgende vragen:

- Zijn er voldoende potentiële invloeden beschouwd bij het opstellen van de scenario's voor het instorten en zijn de scenario's op een juiste wijze op waarschijnlijkheid beoordeeld?
- Zijn de scenario's met de juiste methode en op de juiste wijze onderzocht?
- Volgen de conclusies op een logische wijze uit de resultaten?

2.2.2 Aanpak

Voor het toetsen van het RHDHV-onderzoek is een toetsingskader ontworpen op basis van de Delftse Aanpak. Dit toetsingskader is opgenomen in hoofdstuk 3. Het toetsen is gedaan op basis van het RHDHV-rapport. De nadruk van de toetsing ligt op de hoofdtekst. Voor zover het voor het begrijpen en toetsen van het rapport noodzakelijk was zijn ook (delen van) de Bijlagen A t/m F bekeken en waar nodig getoetst. Voor zover dat nodig was om het rapport te begrijpen en te toetsen zijn ook documenten genoemd in RHDHV-bijlage A en de referenties van het rapport bekeken. Buiten de presentatie van de stand van zaken van het onderzoek door medewerkers van RHDHV op 29 januari 2020 is er geen interactie geweest met het onderzoeksteam van RHDHV.

2.2.3 Terminologie

Om het lezen van het rapport te vereenvoudigen is een overzicht van de terminologie is opgenomen in Appendix B.

2.2.4 Opbouw rapport

Het rapport is als volgt opgebouwd:

- **Hoofdstuk 3** beschrijft het toetsingskader.
- **Hoofdstuk 4** bevat de toetsing van processtap 1 uit de Delftse Aanpak waarbij het doel en de reikwijdte van het onderzoek worden behandeld.
- **Hoofdstuk 5** bevat de toetsing van processtap 2 uit de Delftse Aanpak: verzamelen informatie.
- **Hoofdstuk 6** bevat de toetsing van processtap 3 uit de Delftse Aanpak: opstellen van hypothesen.
- **Hoofdstuk 7** bevat de toetsing van processtap 4 uit de Delftse Aanpak: toetsen van hypothesen.
- **Hoofdstuk 8** bevat de conclusies wat betreft de aanpak van het forensisch onderzoek, de conclusies van het RHDHV-rapport, de analyses en de oorzaken in de levenscyclusfasen.
- **Hoofdstuk 9** bevat de aanbevelingen met alternatieve en nog niet getoetste hypothesen.

3 Toetsingskader

Om het onderzoeksrapport van RHDHV te toetsen is een toetsingskader ontworpen op basis van de Delftse Aanpak [2]. RHDHV verwijst in het eigen rapport naar deze aanpak en hanteert deze gestructureerde aanpak als basis voor het forensisch onderzoek. Gesteld wordt dat in het onderzoek van RHDHV enkel de technische oorzaken beschouwd worden.¹

De volgende paragrafen beschrijven de Delftse Aanpak en hoe deze gebruikt wordt om het rapport te toetsen.

3.1 Delftse Aanpak

In de Delftse Aanpak worden de benodigde processtappen van een forensisch onderzoek gedefinieerd. Daarnaast worden de criteria voor een betrouwbaar en deugdelijk onderzoek gedefinieerd die van toepassing zijn op elke stap en deelstap in het proces van een forensisch onderzoek: de criteria van betrouwbaarheid.

In Appendix B1 wordt de terminologie van de Delftse Aanpak toegelicht en vertaald voor het gebruik in dit rapport.

3.1.1 Proces

De volgende *processtappen* voor forensisch onderzoek zijn gedefinieerd:

- **Stap 1: uitvoeren van een verkenning.**

In deze stap worden de stakeholders bepaald, het doel en de reikwijdte van het onderzoek, de benodigde expertise, de dataverzamelingsstrategie, de kwalificaties van de onderzoekers en mogelijke belangenverstremming.

- **Stap 2: verzamelen van informatie.**

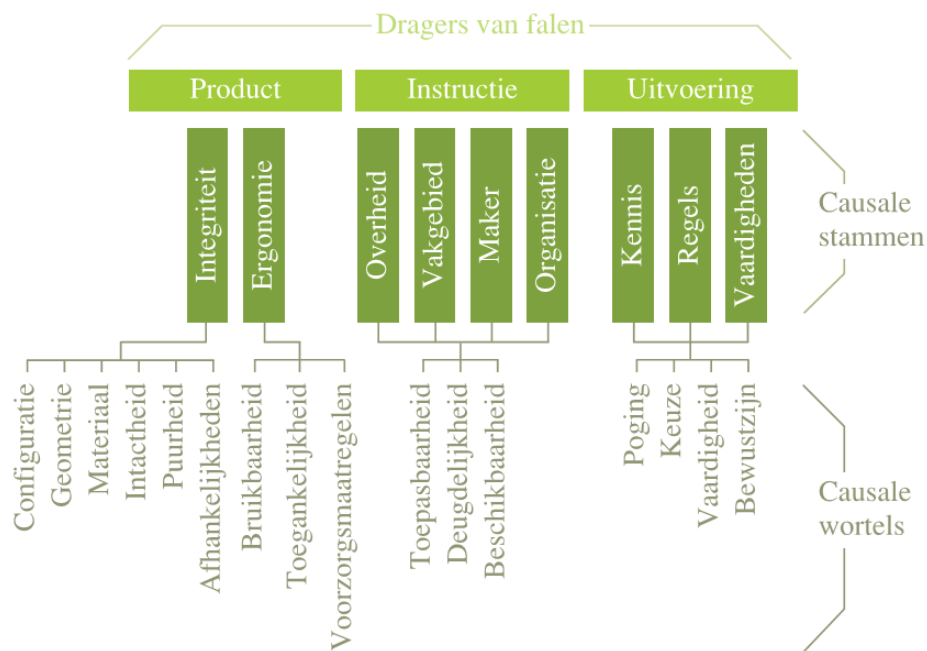
In deze stap wordt informatie verzameld door middel van veldonderzoek en bureaustudie, interviews met relevante personen (zoals getuigen), worden monsters verzameld en worden soortgelijke voorvallen beschouwd.

- **Stap 3: opstellen van hypotheses.**

In deze stap wordt een lijst van mogelijke verklaringen voor de oorzaken van het falen opgesteld. Dit wordt gedaan aan de hand van de volgende vragen: “Wat kunnen de technische en procesoorzaken van het falen zijn geweest?”, “Wat was de keten van gebeurtenissen die heeft geleid tot falen?” en “Wat was het begin van het falen, oftewel de hoofdoorzaak?”. Ook wordt in deze processtap een 4-stappen methode voorgeschreven, waarbij:

1. Alle levenscyclusfasen beschouwd worden.
2. Elke stap binnen elke fase beschouwd wordt.
3. Voor iedere stap het Tree House diagram doorlopen wordt (zie Figuur 2).
4. Heen en weer in de levenscyclus gegaan wordt, zodat alle oorzaken gevonden kunnen worden.

¹ In het RHDHV-rapport in hoofdstuk 3, paragraaf 1 staat: “Op basis van “de Delftse Aanpak voor forensisch 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.”



Figuur 2 Tree House of Failures diagram [2] vertaald naar het Nederlands. Het diagram is ontwikkeld als hiërarchische checklist om alle potentiële oorzaken te kunnen beschouwen.

- **Stap 4: toetsen van hypotheses.**

In deze stap worden de *hypotheses* getoetst op basis van de verzamelde *data* en *feiten*. Met de verzamelde informatie wordt gecontroleerd of een logische verklaring wordt gevonden voor het instorten door *beredeneren* of door het uitvoeren van:

- berekeningen;
- simulaties;
- experimenteel onderzoek of laboratoriumtesten.

Aanvullende *hypotheses*, *data* en/of *middelen* worden gezocht indien er geen bevredigend antwoord volgt uit de mogelijke verklaringen of als de aanwezige data onvoldoende zijn om de hypothese bevredigend te beantwoorden.

- **Stap 5: opstellen rapportage.**
- **Stap 6: opstellen van aanbevelingen.**

3.1.2 Betrouwbaarheid

In de Delftse Aanpak worden de volgende *criteria van betrouwbaarheid* genoemd die van belang zijn voor een betrouwbaar en deugdelijk onderzoek:

- **Objectiviteit:** het onderzoek is niet beïnvloed door gevoelens en meningen of andere vooroordelen bij het beschouwen en weergeven van de feiten.
- **Herhaalbaarheid:** resultaten van experimenten en analyse kunnen volledig gereproduceerd worden op basis van de beschrijvingen in het rapport.
- **Verifieerbaarheid:** alle gepresenteerde informatie, en de manier waarop het is verkregen, is in een transparante manier weergegeven, zodanig dat het gecheckt kan worden en aangetoond kan worden dat het waar is en accuraat of gerechtvaardigd.

- **Compleetheid:** bevattende alles was nodig is of passend. Bijvoorbeeld geen missende informatie die nodig is om de context, de informatie, de aanpak en de beslissingen te begrijpen.
- **Correctheid:** vrij van fouten; in overeenstemming met de feiten en waarheid.

3.2 Toetsing op basis van Delftse Aanpak

3.2.1 Toetsen

De toetsing van het rapport bestaat uit de volgende onderdelen:

- **Procestoets:** het proces wordt getoetst op het doorlopen van de processtappen uit de Delftse Aanpak;
- **Betrouwbaarheidstoets:** de betrouwbaarheid van de processtappen wordt getoetst aan de *criteria van betrouwbaarheid*;
- **Inhoudelijke toets:** de betrouwbaarheid van de proces deelstappen wordt getoetst aan twee van de *criteria van betrouwbaarheid* – compleetheid en correctheid.

3.2.2 Afbakening toetsing

In overleg met de Onderzoeksraad zijn alleen de volgende processtappen getoetst: (1) uitvoeren van een verkenning, (2) het verzamelen van informatie, (3) het opstellen van hypothesen, (4) het toetsen van hypothesen en (5) het opstellen van de rapportage. Van processtap 1 is alleen het doel en de reikwijdte van het onderzoek getoetst. Van processtap 5 worden alleen de conclusies getoetst.

3.2.3 Procestoets

Om het proces te toetsen worden de processtappen die in het RHDHV-rapport worden omschreven vergeleken met het precieze proces, zoals omschreven in de Delftse Aanpak.

3.2.4 Betrouwbaarheidstoets

Om de betrouwbaarheid te toetsen worden de processtappen op de volgende manieren getoetst aan de criteria van betrouwbaarheid.

Om de *objectiviteit* van een processtap te toetsen wordt gereflecteerd op mogelijke vermenging van feiten en meningen. Daarnaast wordt gereflecteerd op of er stappen in het proces zijn ingebouwd om bias tegen te gaan. Ook wordt gereflecteerd op het gebruik van bronnen en of er indien mogelijk meerdere bronnen zijn gehanteerd.

Om de *herhaalbaarheid* van een processtap te toetsen wordt gereflecteerd op de systematische aanpak van de rapportage. Beoordeeld wordt of het aannemelijk is dat andere uitvoerders van het onderzoek of de deelanalyse tot gelijke resultaten komen. Daarnaast wordt gereflecteerd op de volledigheid van de beschrijving en gebruikte methode in relatie tot het kunnen reproduceren van de resultaten.

Om de *verifieerbaarheid* van een processtap te toetsen wordt gereflecteerd op de structuur van het rapport: de indeling, het onderscheid tussen hoofd- en bijzaken en het

gebruik van referenties en verwijzingen. Er wordt gecontroleerd of er bewijs of een goede verklaring is voor alle waarnemingen.

Om de *completeitheid* van het een processtap te toetsen wordt gereflecteerd op de rapportage en of er feiten of bevindingen zijn die de conclusies niet ondersteunen. Gereflecteerd wordt op de nadere wens of noodzaak om meer analyses uit te voeren of nieuwe hypothesen op te stellen bij bepaalde conclusies. Ook of er sprake kan zijn van een nadere wens of noodzaak om meer data te verzamelen. Daarnaast wordt gereflecteerd op de completeitheid van de rapportage door te beschouwen of er data, analyses of conclusies ontbreken.

Om de *correctheid* van het een processtap te toetsen wordt gereflecteerd op de logica van de aannamen, keuzen, redeneringen, validatie van de analyse en interpretatie van de resultaten en conclusies. Beschouwd wordt of de correctheid geborgd is door in de rapportage gebruik te maken van een gevalideerde test methode.

3.2.5 Inhoudelijke toets

De inhoudelijke toets bestaat uit het toetsen van de inhoudelijke betrouwbaarheid van twee van de processtappen uit de Delftse Aanpak, zoals hieronder besproken.

3.2.5.1 Opstellen van hypothesen

Bij het *opstellen van een hypothese* is het uitgangspunt dat er een *toets* ontworpen kan worden met een *toetsingsgrootheid* waarmee de hypothese getoetst kan worden en dat er een *toetsingscriterium* bestaat, waarmee de hypothese kan worden *geverifieerd* of *gefalsificeerd*.

De inhoudelijke toets bestaat uit de twee onderdelen:

- Voor het toetsen van *completeitheid* wordt beoordeeld of:
 - De toets de volledige hypothese dekt.
 - Er hypothesen zijn die ontbreken.
- Voor het toetsen van *correctheid*, worden de uitgangspunten voor een goede hypothese getoetst. Is de hypothese:
 - *Toetsbaar*: er moet een bijpassende toets ontworpen kunnen worden met toetsingsgrootheden.
 - *Weerlegbaar*: de toets moet aantonen of de hypothese juist of onjuist is: er moet een toetsingscriterium zijn om de toets aan te nemen of af te wijzen.
 - *Nauwkeurig genoeg*: de hypothese moet voldoende nauwkeurig zijn, om de hypothese toetsbaar en weerlegbaar te maken.
 - *Relevant*: de hypothese en *toets* moeten direct betrekking hebben op het doel van het onderzoek, het achterhalen van de “directe technische oorzaken” van het instorten van het dak, zonder te kijken naar de “achterliggende oorzaken”. In deze context worden de volgende hypothesen en toetsen gezien als relevant:

- Hypotheses en toetsen die betrekking hebben op de vergelijking tussen krachten/spanningen/rekken en capaciteiten/breuk spanningen/breukrekken gedurende de productiefase en gebruiksfase tot en met het moment van instorten.
- Hypotheses en toetsen die betrekking hebben op factoren die een invloed hebben op veranderingen van krachten/spanningen/rekken en capaciteiten/breuk spanningen/breukrekken als functie van de tijd gedurende de productiefase en gebruiksfase tot en met het moment van instorten en die dus zijn opgetreden na de vastlegging van het ontwerp.

3.2.5.2 Toetsen hypotheses

Het uitvoeren van de toetsing bestaat uit het toepassen van het toetsingscriterium op de data die of verzameld is of welke een uitkomst betreft van uitgevoerde onderzoeken en/of analyse.

De inhoudelijke toets bestaat uit de volgende onderdelen:

- Voor het toetsen van *verifieerbaarheid en herhaalbaarheid*:
 - De verzamelde data of onderzoeksuitkomsten zijn ten behoeve van het toetsingscriterium voldoende gerapporteerd om te controleren. Aannemelijk is dat een andere uitvoerder tot dezelfde uitkomsten was gekomen voor de uitvoering van het toetsingscriterium.
- Voor het toetsen van *completeid*:
 - De verzamelde data of onderzoeksuitkomsten zijn voldoende compleet om het toetsingscriterium betrouwbaar uit te voeren.
- Voor het toetsen van *correctheid*:
 - De verzamelde data of onderzoeksuitkomsten zijn op een correcte wijze verzameld. Er zitten geen fouten in de analyses die een significante invloed hebben op de resultaten.
 - Het toetsingscriterium wordt uitgevoerd op basis van feitelijk en eenduidig bewijs. Dit kan alleen indien de data of onderzoeksuitkomsten betrouwbaar zijn (verifieerbaar, herhaalbaar, compleet, correct).

4 Toetsing stap 1: doel en reikwijdte van het onderzoek

In dit hoofdstuk wordt het doel en de reikwijdte van het onderzoek getoetst conform het toetsingskader. Het doel en de reikwijdte van het onderzoek wordt beschreven in paragraaf 1.1 “Aanleiding en doel onderzoek” van het RHDHV-rapport.

Het doel van het RHDHV-rapport wordt omschreven als “het vaststellen van de directe technische oorzaken van het gedeeltelijk bezwijken van de dakconstructie van het AFAS Stadion”. Ook wordt in paragraaf 1.1 van het RHDHV-rapport expliciet benoemd dat achterliggende oorzaken niet worden onderzocht en dat het onderzoek niet ingaat op schuld of aansprakelijkheid.

Een exacte omschrijving of definitie van “directe technische oorzaken” en “achterliggende oorzaken” ontbreekt, waardoor het kader van het onderzoek niet volledig duidelijk is. Zo worden in het rapport wel ontwerptechnische oorzaken beschouwd waarvan ook gesteld kan worden dat dit geen directe oorzaken betreffen en wellicht dus geïnterpreteerd kunnen worden als achterliggende oorzaken.

Hierdoor is het onderzoek moeilijk herhaalbaar omdat onduidelijk is wat precies het doel was en is het moeilijk verifieerbaar omdat onduidelijk is wanneer het doel is bereikt.

5 Toetsing stap 2: verzamelen van informatie

In dit hoofdstuk wordt het verzamelen van informatie getoetst conform het toetsingskader. Het verzamelen van informatie wordt beschreven in hoofdstuk 2 van het RHDHV-rapport.

5.1 Procestoets

In Appendix C1 zijn puntsgewijs de onderdelen van het proces van het verzamelen van informatie beoordeeld, zoals beschreven in de Delftse Aanpak. Daarbij is per processtap aangegeven of de aanpak volledig, gedeeltelijk of niet conform de Delftse Aanpak is uitgevoerd.

Geconcludeerd wordt dat om informatie te verzamelen gedeeltelijk de Delftse Aanpak is gevolgd. Er is informatie verzameld op basis van onderzoek ter plaatse en via een bureaustudie. Uit de documentenlijst in Bijlage A van het RHDHV-onderzoek blijkt dat dit laatste zeer uitgebreid is gedaan. Daarnaast zijn monsters verzameld voor het materiaalkundig onderzoek. Er zijn geen interviews met relevante personen gerapporteerd en er wordt ook geen melding gemaakt van onderzoek van soortgelijke instortingen.

5.2 Betrouwbaarheidstoets

Processtap 2: het verzamelen van informatie, is beoordeeld op basis van de *criteria van betrouwbaarheid*:

- De verzamelde informatie is *objectief* gepresenteerd.
- Er is een goede bronvermelding en uitgebreide documentenlijst waardoor de informatie in grote mate *verifieerbaar* is. Echter, niet alle informatie is vrij beschikbaar, wat de mogelijkheid tot verificatie bemoeilijkt.
- De verzamelde informatie die in het rapport gepresenteerd wordt lijkt niet volledig *compleet*. Mogelijke toevoegingen zijn:
 - Informatie over de bestaande constructie net voor bezwijken. Bijvoorbeeld in de vorm van foto's vanuit het stadion waarop gecontroleerd kan worden of de dakconstructie ter plaatse van de instorting niet al eerder significant vervormd was.
 - Ontwerpinformatie over de staaldetails, zoals tekeningen of schetsen van de staalconstructeur.
 - Temperatuurgegevens bij de beschouwing van meteorologische data.
- Er is geen reden om te twijfelen aan de *correctheid* van de verzamelde informatie.

6 Toetsing stap 3: opstellen van hypothesen

In dit hoofdstuk wordt het opstellen van hypothesen getoetst conform het toetsingskader. Het opstellen van hypothesen wordt beschreven in hoofdstuk 3 van het RHDHV-rapport.

6.1 Procestoets

In de Delftse Aanpak wordt een proces voorgeschreven om hypothesen op te stellen. Een lijst van mogelijke verklaringen voor de oorzaken van het falen wordt daarin opgesteld aan de hand van een 4-stappen methode, zie paragraaf 3.1.1.

In Appendix C1 van dit rapport is puntsgewijs het proces dat RHDHV doorlopen heeft, beoordeeld aan de hand van de Delftse Aanpak. Daarbij is per processtap gesteld of de aanpak volledig, gedeeltelijk of niet conform de Delftse Aanpak is uitgevoerd.

Uit deze puntsgewijze beoordeling volgt dat de Delftse Aanpak op een aantal vlakken wel is gevolgd, maar ook op een aantal vlakken niet. Niet alle (deel)stappen die beschreven staan om hypothesen op te stellen zijn volledig gevolgd.

6.1.1 Opstellen van de lijst

Bij het opstellen van een lijst van mogelijke verklaringen voor de oorzaken van het falen worden twee belangrijke vragen niet gesteld:

- Wat is de keten van gebeurtenissen die geleid hebben tot falen?
- Wat is de hoofdoorzaak van het falen?

Hierdoor zijn de hypothesen geen integrale hypothesen over hoe het dak heeft kunnen instorten, maar zijn de hypothesen enkel mogelijke oorzaken die bijgedragen hebben aan de instorting. De samenhang tussen oorzaken van het instorten van het dak wordt onvoldoende beschreven. Zo wordt de technische oorzaak van de doorlopende scheur in de las in de verbinding van de bovenregel van vakwerkligger 40 vrijwel onbesproken gelaten. Hoewel in de conclusie de aanwezigheid van de scheur wordt aangegeven als een van de hoofdredenen van het instorten van het dak. Dat is extra opmerkelijk, omdat visuele inspectie meerdere scheuren in de constructie heeft aangetoond. Doordat er geen hypothese is over het ontstaan van de scheur, is een van de hoofdoorzaken van het instorten niet onderzocht.

6.1.2 Volgen 4-stappen methode

De 4-stappen methode uit de Delftse Aanpak om hypothesen op te stellen (zie paragraaf 3.1.1) wordt gedeeltelijk in het rapport gevolgd:

1. Elke fase uit de levenscyclus is beschouwd, waarbij de levensfasen uit de Delftse Aanpak aangepast zijn naar de voor de dakconstructie relevante levensfasen: ontwikkelfase, productiefase en gebruiksfase.
2. Per fase zijn voor de vakwerkliggers deelstappen beschouwd.
3. De Tree House of Failures methode (zie Figuur 2) wordt wel expliciet genoemd en verklaard, maar de toepassing voor het opstellen van hypothesen ontbreekt. Zo wordt niet genoemd of alle zogenaamde Draggers van falen zijn beschouwd: Product, Instructie en Uitvoering. Ook is het onduidelijk of en welke Stammen en Wortels

doorlopen worden. En wat de relaties zijn tussen de hypothesen en de Draggers, Stammen en Wortels. Het is mogelijk dat specifieke Draggers, Stammen en Wortels niet zijn doorlopen omdat het onderzoek zich alleen beperkt tot direct technische oorzaken en geen achterliggende oorzaken beschouwd. Hoe de relatie is tussen de Draggers, Stammen en Wortels en indirecte technische en achterliggende oorzaken is niet omschreven en dus onduidelijk. Kijkende naar de hypothesen is de inschatting dat één van de zeven Stammen is beschouwd: Integriteit. Deze stam valt onder de Drager Product.

4. Er wordt niet gerapporteerd of een iteratief proces is gehanteerd bij de beschouwing van de levenscyclusfasen en deelstappen bij het opstellen van de hypothesen.

6.2 Betrouwbaarheidstoets

Processtap 3: het opstellen van hypothesen, wordt beoordeeld op basis van de *criteria van betrouwbaarheid*:

- De hypothesen zijn niet volledig *objectief* opgesteld. Veelvuldig wordt gebruik gemaakt van “verkeerd” zonder precieze beschrijving van wat goed of verkeerd is.
- Het is aannemelijk dat een andere uitvoerder voor een groot deel soortgelijke hypothesen zou hebben opgesteld. Echter:
 - De structuur van de hypothesen, de hypothesen zelf en de toetsingscriteria zijn niet duidelijk beschreven; en
 - Het is aannemelijk dat een andere uitvoerder meer en andere hypothesen zou hebben opgesteld bij het volledig doorlopen van de Tree House of Failures. Het opstellen van de hypothesen voldoet derhalve niet volledig aan het criterium van *herhaalbaarheid*.
- Het opstellen van de hypothesen voldoet in grote mate aan het criterium van *verifieerbaarheid*, doordat dit goed gestructureerd is met genummerde en in tabelvorm weergegeven hypothesen.
- De lijst van opgestelde hypothesen is niet volledig *compleet*. De compleetheid van de hypothesen wordt in detail bekeken in de inhoudelijke toets in paragraaf 6.3.
- De lijst van opgestelde hypothesen is niet volledig *correct*. De correctheid van de hypothesen wordt in detail bekeken in de inhoudelijke toets in paragraaf 6.3.

6.3 Inhoudelijke toets

In deze paragraaf worden de hypothesen inhoudelijk beoordeeld. Ten eerste worden de 34 door RHDHV opgestelde hypothesen getoetst. Dit wordt hieronder als kwalitatief aangeduid, aangezien de hypothesen in het RHDHV-rapport nog niet qua impact vergeleken worden. Ten tweede worden de 6 door RHDHV als bewezen aangeduide hypothesen specifiek beoordeeld. Dit wordt als kwantitatief omschreven, omdat de hypothesen worden gerangschikt op basis van berekeningen. Ten derde worden aanvullende mogelijke oorzaken (hypothesen) besproken.

Opgemerkt wordt dat hypothese 19 bij de toetsing in twee hypothesen is onderverdeeld. Hypothese 19A op basis van de 34 starthypothesen, gerelateerd aan de toetsing in paragraaf 5.1.3 in het RHDHV-rapport. En hypothese 19B op basis van de verdere

beschouwing in paragraaf 5.3 van het RHDHV-rapport die wezenlijk anders is dan hetgeen in paragraaf 5.1.3 wordt gesteld.

6.3.1 34 starthypotheses - kwalitatieve stap

In paragraaf 3.3, tabel 7, van het RHDHV-rapport worden 34 hypothesen getoond. Deze worden “mogelijke technische oorzaken” genoemd. Deze bewoording is niet specifiek en om verdere toetsing mogelijk te maken wordt aangenomen dat bedoeld wordt dat “oorzaak X heeft een significante bijdrage geleverd aan/rol gespeeld bij de instorting”.

Het rapport bevat per hypothese geen *expliciete toets*, *toetsingsgrootte* en *toetsingscriterium*. Wel is er vaak een *impliciete toets*, *toetsingsgrootte* en *toetsingscriterium* aanwezig.

Om te begrijpen hoe de hypothesen worden opgesteld en getoetst is in Appendix C2 voor elke hypothese een *expliciete toets*, *toetsingsgrootte* en *toetsingscriterium* ontwikkeld, op basis van de *impliciete toetsen*, *toetsingsgroottes* en *toetsingscriteria* aanwezig in paragrafen 5.1 en 5.2 van hoofdstuk 5 van het rapport van RHDHV. Tevens is voor iedere hypothese het volgende aangegeven om volledigheid en correctheid te toetsen:

- Volledigheid:
 - Dekt de toets de hypothese?
- Correctheid:
 - Is de hypothese toetsbaar?
 - Is de hypothese weerlegbaar?
 - En is de hypothese relevant?

Resultaten zijn opgenomen in Tabel 1.

Tabel 1 Resultaten inhoudelijke toets 34 starthypothesen.

	Ja	Nee	Niet volledig	Niet van toepassing
Dekt de toets de hypothese?	12	3	14	5
Is de hypothese toetsbaar?	26	8	-	-
Is de hypothese weerlegbaar?	18	16	-	-
Is de hypothese relevant?	21	13	-	-

De resultaten in Tabel 1 en Appendix C2 laten het volgende zien:

- **Dekt de toets de hypothese?:** Hoewel in een groot aantal gevallen de toets de hypothese volledig of gedeeltelijk dekt is dit ook in een aantal gevallen niet zo. Voor vele hypothesen dekt de toets de hypothese niet volledig, doordat aspecten die in de hypothese zitten opgesloten niet beantwoord kunnen worden door de toets. In een aantal gevallen worden hypothesen in het rapport uitgesloten omdat er onvoldoende informatie beschikbaar is of omdat de hypothese niet te kwantificeren is. In een minderheid dekt de toets de hypothese geheel niet.

- **Is de hypothese toetsbaar?:** In de meeste gevallen is de hypothese toetsbaar. In de gevallen dat de hypothese niet toetsbaar is, is er geen logische toetsingsgrootte en/of toetsingscriterium op te stellen.
- **Is de hypothese weerlegbaar?** In iets meer dan de helft van de gevallen is de hypothese weerlegbaar. In de gevallen dat de toets niet weerlegbaar is, komt dit doordat het toetsingscriterium niet duidelijk te interpreteren is doordat de precieze formulering ontbreekt. Meestal heeft dit te maken met de interpretatie van het woord significant. Als voorbeeld: wanneer is een verschil of een afwijking significant? Als dit niet omschreven wordt is de hypothese niet weerlegbaar.
- **Is de hypothese relevant?:** In de meeste gevallen zijn de hypothese en toets relevant. De meerderheid van de niet relevante hypothesen zijn hypothesen die te maken hebben met de ontwerpfase en worden gezien als “achterliggende oorzaken”, die “geen directe technische oorzaken zijn” van de instorting.

Als de toets de hypothese niet dekt, of de hypothese is niet toetsbaar of niet weerlegbaar, dan kan dit worden opgelost door de hypothesen nauwkeuriger te omschrijven.

6.3.2 6 overgebleven hypothesen – kwantitatieve stap

In paragraaf 5.3, tabel 20, van het RHDHV-rapport worden 6 overgebleven hypothesen getoond. Deze worden bewezen hypothesen genoemd. Hiermee wordt bedoeld dat ze geverifieerd zijn. Doel van paragraaf 5.3 is een rangschikking (middels kwantificering) van de bijdragen van deze oorzaken.

In Appendix C2 is een samenvatting gemaakt voor de zes overgebleven hypothesen met de toetsen voor volledigheid en correctheid, zoals ook gedaan is voor alle 34 hypothesen. Merk op dat in deze samenvatting ook resultaten opgenomen zijn over de toetsing van stap 4: toetsen hypothesen.

De resultaten in Appendix C2 laten het volgende zien:

- Bij vijf van de zes hypothesen dekt de toets de hypothese niet volledig af. Dit is vooral belangrijk bij:
 - Hypothese 17 waarbij in de toetsing de capaciteit van het detail met kleinere lassen (zonder scheur) wordt vergeleken met de bovenregel van de vakwerklijger en niet met het detail met lassen volgens het ontwerp (zonder scheur). De toetsing levert daarom niet het juiste antwoord op.
 - Hypothese 19B waarbij de toetsing wordt gedaan voor de op druk belaste verbinding van de onderregel van vakwerklijger 40 en niet voor de op trek belaste verbinding van de bovenregel van vakwerklijger 40, die als eerste bezwaken is. De toets is niet volledig, want lasdefecten in de op trek belaste verbinding van de bovenregel worden niet beschouwd.
- Vijf van de zes hypothesen zijn toetsbaar.
- Bij vier van de zes hypothesen is de hypothese niet weerlegbaar. Dit komt doordat het toetsingscriterium niet duidelijk te interpreteren is doordat een precieze formulering ontbreekt. Meestal heeft dit te maken met de interpretatie van het woord significant.

- Vier van de zes hypothesen zijn relevant. De twee niet relevante gevallen zijn hypothesen 2 en 7 die de ontwerpfase betreffen. Beide hypothesen en toetsen vergroten het inzicht maar zijn geen directe oorzaken van de instorting: ze hebben niet direct invloed op de belasting of capaciteit als functie van de tijd.

Als de toets de hypothese niet dekt, of de hypothese is niet toetsbaar of niet weerlegbaar kan dit worden opgelost door de hypothese of toets anders of nauwkeuriger te omschrijven.

6.3.3 Aanvullende mogelijke oorzaken

Aanvullend op de 34 hierboven genoemde hypothesen wordt hieronder ingegaan op extra mogelijke *directe technische oorzaken* die in het RHDHV-rapport niet of onvoldoende worden beschouwd.

Ten eerste is het opvallend dat er geen hypothese voor de gebruiksfase is opgesteld die de mogelijke oorzaak van het ontstaan van de doorlopende scheur in de lassen B, C en D van de verbinding van de bovenregel van vakwerkligger 40 beschrijft. De aanwezigheid van de scheur wordt beschreven als een feit, waarvan de oorzaak van het ontstaan niet in relatie staat tot de oorzaak van de instorting. De RHDHV-hypothesen over corrosie en vermoeiingsschade zijn hypothesen die de oorzaken benoemen van de instorting met als uitgangspunt de aanwezigheid van de scheur. Een hypothese over het ontstaan van de scheur zou kunnen zijn: brosse breuk onder gebruiksbelasting. Met de aannemelijkheid van defecten in lassen, hoge spanningsconcentraties en relatief hoge spanningen/rekken doordat lassen niet comfort het ontwerp zijn zou dit een mogelijke hypothese zijn.

Ten tweede wordt de vraag niet beantwoord waarom specifiek op 10 augustus 2019 de capaciteit lager was dan de optredende kracht. Het falen van een constructie of constructief element wordt immers veroorzaakt doordat de optredende belasting hoger is dan de capaciteit. Omdat er in januari 2018 een zwaardere storm was met krachten die ordegrrootte 30%-40% groter waren dan de dag van instorting zijn twee aspecten specifiek van belang voor nader onderzoek:

- Degradatie – een afname van de capaciteit – tijdens de periode van januari 2018 tot en met 10 augustus 2019.
- Een niet nader onderzochte belasting en/of belastingscombinatie net voor of gedurende de instorting.

Om de degradatie precies te achterhalen is het nodig de vier meest relevante hypothesen: geometrie lassen niet conform ontwerp, defecten in lassen, corrosie en laag-cyclische vermoeiingsschade in zijn gezamenlijkheid te bekijken. Naast laag-cyclische vermoeiing is vooral het onderzoeken van brosse breuk als oorzaak van het ontstaan van de scheur en scheuruitbreiding voor de afname van de capaciteit mogelijk van belang.

De wetenschap van te klein uitgevoerde lassen, hoge spanningsconcentratiefactoren door de detaillering van de verbinding en excentrische krachtsinleiding, waardoor plaatselijk buiging optreedt, en de aanwezigheid van defecten in de lassen maakt een hypothese van brosse breuk welke ontstaan is uit een defect op een plaats van een hoge spanningsconcentratie het onderzoeken waard. Dit wordt versterkt doordat aannemelijk is dat de las aan de onderzijde (SGS-onderzoek zijde C) van de verbinding van vakwerkligger 40 significant kleiner is geweest dan aan de bovenzijde (SGS-onderzoek zijde A). Het is mogelijk dat de scheur zich heeft ontwikkeld bij wisselende trekbelasting bij wind als functie van de tijd.

Een niet nader onderzochte belasting is thermische belasting. Omdat het relatief warm was op de dag van de instorting en in de periode daarvoor de temperatuur significant toegenomen is over een periode van 24 uur kan dit in combinatie met wind andere belastingcombinaties opleveren dan tot nu toe zijn onderzocht. Een zomerstorm, zoals op de dag van de instorting, komt weinig voor. Deze belasting is extra relevant aangezien het dak een staalconstructie betreft zonder dilataties. Hierdoor kunnen significante krachten ontstaan door temperatuurverschillen. In Appendix D3 wordt hier verder op ingegaan.

Naast en in combinatie met bovenstaande mogelijke oorzaken wat betreft degradatie en belastingen, kan ook de lokale krachtwerving en geometrie leiden tot extra spanningen in het detail en de bijbehorende verbindingen. Zo sluit er ter plaatse van de verbinding van vakwerkligger as 40 een windverband excentrisch aan en de invloed daarvan is niet beschouwd. In een onbeschadigde situatie kan dit al tot extra spanningen in het detail leiden en nog eens extra na de ontstane scheur aan de onderzijde en zijanten van de verbinding. Ook kunnen er extra spanningen in het detail aanwezig zijn geweest door de rotatiestijfheid van de gelaste verbinding.

De interactie van de staalconstructie met de wind en het mogelijk resoneren komt niet specifiek terug in de hypothesen. Wel wordt dit beschouwd in de analyses in het RHDHV-rapport in paragraaf 4.1. Mogelijk waren er op de dag van de instorting bijzondere windomstandigheden die resonantie van de constructie tot gevolg hadden, wat kan hebben bijgedragen aan het instorten.

6.4 Conclusies

Op basis van bovenstaande resultaten van de procestoets, betrouwbaarheidstoets en inhoudelijke toets wordt geconcludeerd dat de processtap *het opstellen van hypothesen* niet volledig voldoet aan het proces en de betrouwbaarheidscriteria zoals gedefinieerd in de Delftse Aanpak. Het onderzoek is niet volledig herhaalbaar, compleet en correct en dus ook niet volledig betrouwbaar volgens de criteria van Delftse Aanpak. Vooral het niet identificeren van een aantal mogelijke significante oorzaken of het niet combineren van onderkende oorzaken heeft als gevolg gehad dat deze hypothesen niet zijn onderzocht.

Voor hypothese 19 waarin lasdefecten benoemd worden, is een ander toetsingsgrootheid gebruikt in paragraaf 5.1.3 en 5.3 van het RHDHV-rapport. De eerste (19A) beschouwt alle aanwezige lassen en de tweede (19B) beschouwt enkel de lassen van de verbinding van de onderregel van vakwerkligger 40.

Er is geen hypothese voor de gebruiksfase opgesteld die de mogelijke oorzaak van het ontstaan van de doorlopende scheur in de lassen B, C en D van de verbinding van de bovenregel van vakwerkligger 40 beschrijft. De aanwezigheid van de scheur wordt beschreven als een feit, waarvan de oorzaak van het ontstaan niet in relatie staat tot de oorzaak van de instorting.

Van de zes overgebleven RHDHV-hypothesen zijn er vier relevant. Deze hypothesen betreffen hypothesen die de mogelijke oorzaken benoemen van de instorting met als uitgangspunt de aanwezigheid van de scheur. Desbetreffende hypothesen omvatten de volgende onderwerpen:

- Afmetingen lassen niet conform ontwerp
- Defecten in lassen
- Corrosie

- Laag-cyclische vermoeiingschade

Van de eerste drie onderwerpen hierboven genoemd, kan gesteld worden dat het aannemelijk is dat die in combinatie onderdeel zijn geweest van de directe oorzaken van de instorting. Laag-cyclische vermoeiingsschade is niet voldoende aannemelijk gemaakt.

Onderstaande onderwerpen uit paragraaf 6.3.3 kunnen tevens relevant zijn:

- Brosse breuk
- Thermische belasting
- Lokale krachtswerking
- Resonantie

7 Toetsing stap 4: toetsen hypotheses

In dit hoofdstuk wordt het toetsen van hypotheses getoetst conform het toetsingskader. Het toetsen van hypotheses wordt beschreven in hoofdstuk 5 van het RHDHV-rapport.

7.1 Procestoets

De vierde stap in de Delftse Aanpak betreft de toetsing van hypotheses. Met de verzamelde informatie wordt gecontroleerd of een logische verklaring wordt gevonden voor het falen, zie paragraaf 3.1.1.

In Appendix C1 zijn puntsgewijs de onderdelen van het proces van het toetsen van hypotheses beoordeeld, zoals beschreven in de Delftse Aanpak. Daarbij is per processtap aangegeven of de aanpak volledig, gedeeltelijk of niet conform de Delftse Aanpak is uitgevoerd.

Geconcludeerd wordt dat om hypotheses te toetsen gedeeltelijk de Delftse Aanpak is gevolgd. Er wordt niet enkel getest op basis van feiten. Van de genoemde methodes in de Delftse Aanpak wordt gebruik gemaakt van het uitvoeren van *validatie-berekeningen* en van het *beredeneren*. Er wordt geen gebruik gemaakt van *simulaties* en *experimenteel onderzoek* om de hypotheses te valideren.

Uiteindelijk is er geen volledig sluitende conclusie gepresenteerd over het instorten van het dak op 10 augustus 2019 middels bijvoorbeeld het aantonen van een lagere capaciteit van de kritische verbinding van vakwerkligger 40 dan de mogelijk optredende krachten. Conform de Delftse Aanpak had dit aanleiding kunnen zijn om naar aanvullende gegevens te zoeken en nieuwe hypotheses op te stellen.

7.1.1 Betrouwbaarheidstoets

Processtap 4: het toetsen van hypotheses, is beoordeeld op basis van de *criteria van betrouwbaarheid*:

- De hypotheses zijn niet volledig *objectief* getoetst. Subjectieve bewoording wordt gehanteerd, zoals “goed ontworpen was”. Daarnaast wordt soms één enkele bron gebruikt ter bewijsvoering wat de objectiviteit van de toetsing en aannemelijkheid van het verifiëren van een hypothese vermindert.
- Het is zeer aannemelijk dat een andere uitvoerder een aantal hypotheses anders had getoetst. Zo is het verwerpen van meerdere hypotheses onvoldoende onderbouwd, zie ook de inhoudelijke toets in de volgende paragraaf. Het toetsen van de hypotheses voldoet derhalve niet aan het criterium van *herhaalbaarheid*.
- Het toetsen van de hypotheses voldoet niet volledig aan het criterium van *verifieerbaarheid*. De analyses die namelijk gebruikt worden als basis van de toetsing bevatten niet alle informatie die benodigd is om het (deel)onderzoek te kunnen representeren. Ook zijn niet alle stukken uit de zeer uitgebreide documentenlijst van Bijlage A vrij toegankelijk. Het proces van toetsen in hoofdstuk 5 van de hypotheses is wel voldoende goed gestructureerd en naar alle genummerde hypotheses wordt verwezen.
- Het toetsen van de hypotheses voldoet niet volledig aan het criterium van *completeheid*. In het RHDHV-rapport wordt namelijk niet genoemd dat het door het onvoldoende beschikbaar zijn van informatie, logisch was om meer analyses

of onderzoek uit te voeren. De compleetheid van de analyses waarop de toetsing van hypothesen berust wordt in detail bekeken in de inhoudelijke toets.

- De toetsing van de opgestelde hypothesen is niet volledig *correct* doordat deze berust op een aantal analyses die fouten bevatten. De correctheid van de toetsing van de hypothesen en de analyses waarop deze berusten wordt in detail bekeken in de inhoudelijke toets.

7.2 Inhoudelijke toets – Analyse

Hieronder worden de analyses in hoofdstuk 4 van het RHDHV-rapport voorzien van opmerkingen en wordt geconcludeerd of de analyse wel of niet voldoet aan de toetscriteria *correctheid* en *compleetheid*.

7.2.1 Beeldmateriaal

In de analyse van de camerabeelden in paragraaf 4.1 van het RHDHV-rapport wordt aannemelijk gemaakt dat spant 38 en 39 niet als eerste zijn bezweken. Op basis van deze beelden wordt ook gesteld dat er geen grote resonantie (opslingeren) van de constructie heeft plaatsgevonden net voor het instorten. Deze conclusie kan echter niet met volledige zekerheid getrokken worden vanuit deze enkele bron, omdat het door de hoek van de zon en de positie van de camera zeer lastig is een verticale beweging van het dakvlak te zien. Derhalve kan de analyse niet als volledig *compleet* en *correct* worden beoordeeld.

7.2.2 Windbelasting tijdens levensduur - Bijlage B

In de analyse van de windbelastingen gedurende de levensduur van de constructie in paragraaf 4.2 en bijlage B van het RHDHV-rapport is aannemelijk gemaakt dat op vele eerdere momenten voor de instorting een grotere windbelasting heeft plaatsgevonden dan die op de dag van de instorting. Genoemd wordt dat de “werkelijk opgetreden belastingen gedurende de levensduur” zijn bepaald. Dit is echter onjuist, omdat zoals aangegeven wordt in Appendix D1.1 de windsnelheden niet exact zijn en de resulterende windbelasting dus ook niet. De analyse is derhalve niet volledig *correct*. De analyse is ook niet volledig *compleet* aangezien in de conclusie wordt gesteld dat de grootste storm tijdens de levensduur is opgetreden in januari 2007 terwijl er een storm was met soortgelijke windsnelheden op 18 januari 2018.

7.2.3 Windtunnelonderzoek - Bijlage C

Met het windtunnelonderzoek in paragraaf 4.3 en bijlage C van het RHDHV-rapport wordt aannemelijk gemaakt dat de er tijdens een storm grote neerwaartse winddrukken op het dakvlak werken en dat de zuidwestenwind, zoals ook op de dag van de instorting, leidt tot de grootste belastingen. Het is echter aannemelijk dat het windtunnelonderzoek de windbelasting onderschat, doordat:

- Er geen locatie specifieke terreinruwheid is bepaald en een niet conservatieve aanname volgens de norm is gedaan.
- Er gebruik is gemaakt van een lineaire respons analyse.

Daarnaast wordt opgemerkt dat de resultaten van het desbetreffende windtunnelonderzoek niet als exacte waarheid kunnen worden aangenomen, omdat:

- Gebruik is gemaakt van een eigenfrequentie van de dakconstructie die mogelijk te hoog is.
- Het door afwezigheid van een norm voor windtunnelonderzoek aannemelijk is dat de uitkomsten indien geanalyseerd door een andere partij significant zouden afwijken.

Voor meer specifieke opmerkingen zie Appendix D1.2. Uit bovenstaande volgt dat het windtunnelonderzoek niet volledig *correct* en *compleet* is.

7.2.4 Beoordeling bezweken lassen - Bijlage D

Met het materiaalkundig onderzoek in paragraaf 4.4 en bijlage D van het RHDHV-rapport naar de bezweken lassen is voldoende bewezen dat al voor het moment van instorten de kritische verbinding van de bovenregel van de vakwerkligger op as 40 een grote doorlopende scheur bevatte. Deze verbinding was in grote mate gecorrodeerd. Aangehouden is dat in de verbindingen van de ingestorte dakconstructie vele lassen lasdefecten bevatten en te dun waren uitgevoerd en dat er voorafgaand aan het lassen geen delen zijn voorbereid. Dit geldt ook voor de verbindingen in de dakconstructie van het deel dat niet is ingestort. De lasindeling in stompe en hoeklassen in genormeerde onderzoeksmethoden kunnen lastig toegepast worden op de lassen van de verbinding omdat ze niet allemaal duidelijk te classificeren zijn. Er is geen reden om te twijfelen aan de *correctheid* van de zeer uitgebreide analyse. Deze is echter niet volledig *compleet*, aangezien er maar bij één vakwerkligger (as 39) sterkte-proeven zijn uitgevoerd waaruit volgde dat de kopplaat van een lagere staalsoort was. Vanuit technisch oogpunt was het logisch geweest om dit ook voor vakwerkligger 40 te onderzoeken in aanvulling op de hardheidsmetingen.

7.2.5 Niet-destructief onderzoek

Met het niet-destructief onderzoek in paragraaf 4.5 van het RHDHV-rapport wordt onder andere aangetoond dat:

- Uit visueel onderzoek is gebleken dat van geen enkele vakwerkligger alle lassen voldoen aan de acceptatiecriteria van kwaliteitsniveau B van NEN 5817
- Uit magnetisch onderzoek is gebleken dat weinig lassen voldoen aan de acceptatiecriteria van kwaliteitsniveau 2X van NEN 23278.
- Scheuren in de kritische bovenverbinding van de vakwerkliggers zijn geconstateerd bij 6 van de 31 vakwerkliggers.
- Lassen op een aantal plaatsen ontbreken.
- De variatie in de geometrie van lassen groot is.
- Er vaak sprake is van niet acceptabele poriën aan de oppervlakte van de las.
- De minimale waarde van de doorlassing erg klein is (2 mm).

Er is geen reden om te twijfelen aan de *correctheid* van het onderzoek. Mogelijk is het onderzoek niet volledig *compleet* aangezien er bij de stelling dat lassen ontbreken wordt genoemd dat “Deze lassen vielen niet binnen de scope van het onderzoek van SGS.”

7.2.6 Onderzoek normaalkracht in de bovenregels - Bijlage E

Normaalkrachten in de bovenregels van de vakwerkspanten en samenhangende krachten op de kritische verbinding van de vakwerkligger op as 40 zijn in paragraaf 4.6 en bijlage E van het RHDHV-rapport geanalyseerd met behulp van een 3D eindige elementen model. Het 3D-model bevat echter diverse fouten, onnauwkeurigheden en is onvolledig gedocumenteerd. Zie ook Appendix E1:

- De belasting door zonnepanelen is onderschat.
- Het type en de bijbehorende eigenschappen van de stalen dakplaten zijn op basis van een inschatting van RHDHV, op basis van ontwerptabellen, ingevoerd in het 3D-model. Niet op basis van onderzoek op locatie naar de daadwerkelijk toegepaste stalen dakplaten.
- Schijfwerking van de dakplaten lijkt te zijn meegenomen, maar het is niet duidelijk wat de ingevoerde elementeigenschappen precies zijn.
- Er is een oneindig stijve verbinding tussen de dakplaten en dakspant gemodelleerd waardoor het waarschijnlijk is dat belasting wordt herverdeeld over spanten. Ook kan de bovenregel van het vakwerk daardoor samenwerken met de staalplaat. In werkelijkheid is de verbinding tussen dakplaat en vakwerkligger via een gording relatief slap en zal de herverdeling van krachten anders zijn.
- Momentvaste verbindingen zijn gemodelleerd, maar momenten worden niet gerapporteerd.

Het is daardoor aannemelijk dat de krachten op het kritische detail significant worden onderschat. Bovendien is de invloed van temperatuur of temperatuurwisselingen niet onderzocht. Gezien het feit dat de staalconstructies geen dilataties bevat is dit niet vooraf te verwaarlozen. Ook worden belastingen in de windverbanden en dakvlak niet inzichtelijk gemaakt. Hieruit wordt geconcludeerd dat de analyse van de normaalkrachten niet *correct* en *compleet* is. Dit terwijl de resultaten (normaalkrachten) als exacte waarden worden gepresenteerd in de diverse tabellen.

7.2.7 Aangrijpingspunt maximale opwaartse en neerwaartse windbelasting

In paragraaf 4.7 van het RHDHV-rapport is een analyse gemaakt van het aangrijpingspunt van maximale opwaartse en neerwaartse windbelasting. Het doel van de beschouwing is niet volledig duidelijk. Aangenomen wordt dat een verklaring gezocht wordt voor het verschil in normaalkrachten tussen de door RHDHV gevonden normaalkrachten en de door de staalconstructeur gerapporteerde waarden. Er wordt echter geen conclusie over de normaalkrachten gepresenteerd, enkel over zwaartepunten en momenten. Er is geen reden om aan te nemen dat de analyse niet *correct* is. Deze is echter dus niet volledig *compleet*.

7.2.8 Onderzoek capaciteit verbinding bovenregels - Bijlage F

De capaciteit van de kritische verbinding van de bovenregels van de vakwerkliggers wordt bepaald in paragraaf 4.8 en Bijlage F van het RHDHV-rapport met een model dat onvoldoende rekening houdt met de werkelijke situatie:

- De werkelijke materiaaleigenschappen van spant 40 zijn niet onderzocht en ontwerpwaarden zijn gehanteerd.
- Er wordt geen rekening gehouden met het excentrisch aangesloten windverband.
- Lasdefecten en putcorrosie zijn niet beschouwd in de analyse terwijl in combinatie met hoge (trek)spanningen en hoge spanningsconcentratiefactoren deze mogelijk de aanleiding tot brosse breuk waren.

Zie ook een toelichting in Appendix F – Capaciteit kritische staaldetails. De kwantitatieve resultaten kunnen derhalve niet als correct worden aangenomen. Uit het bovenstaande wordt geconcludeerd dat de analyse niet op alle aspecten *correct* en *compleet* is.

7.2.9 Degradatie

In de analyse in paragraaf 4.9 van het RHDHV-rapport van de capaciteitsreductie van de kritische details in de loop der tijd (door RHDHV “degradatie” genoemd) wordt aannemelijk gemaakt in plaats van bewezen dat een scheur is ontstaan tijdens de eerste grote storm.

Vervolgens wordt in het RHDHV-rapport aannemelijk gemaakt dat deze scheur corrosie mogelijk heeft gemaakt. De invloed op daaruit volgende capaciteitsreductie wordt niet voldoende beschouwd.

Vervolgens wordt in het RHDHV-rapport capaciteitsreductie door laag-cyclische vermoeiing als bewezen verklaard. Dit wordt echter niet voldoende aannemelijk gemaakt of bewezen, want:

- Het bestuderen van breukvlakken op zeer kleine schaal (ca. 10 μ m), als visuele methode die wordt voorgesteld in RHDHV-referentie [10] om laag-cyclische vermoeiing vast te stellen, is niet uitgevoerd.
- De RHDHV-grafiek 4-27 toont een grafiek die niet representatief is voor de staalsoort die is toegepast in de dakconstructie en waar dus geen conclusies aan kunnen worden verbonden.

Geconcludeerd wordt dat de analyse van capaciteitsreductie niet volledig *correct* en *compleet* is.

7.2.10 Bezwijkvolgorde

In de analyse van de bezwijkvolgorde in paragraaf 4.10 van het RHDHV-rapport wordt aannemelijk gemaakt dat eerst as 40 is bezweken, vervolgens as 39 en 41 en als laatste as 38. Het bewijs is echter niet sluitend omdat bijvoorbeeld niet is aangetoond dat de lichte stalen dakplaten de schijfwerking die verondersteld wordt ook konden verzorgen. De invloed van de windverbanden tussen as 40 en 41 is niet beschouwd. Ook wordt gesteld dat het dak “intact” was bij oplevering. Er wordt echter niet voldoende bewijs gepresenteerd om bijvoorbeeld het afwezig zijn van scheurvorming bij oplevering aan te tonen. Bovendien wordt in de analyse van de bezwijkvolgorde niet aannemelijk gemaakt waarom er geen groter gedeelte van het dakvlak is ingestort. Uit het voorgaande wordt geconcludeerd dat de analyse van bezwijkvolgorde niet volledig *correct* en *compleet* is.

7.3 Inhoudelijke toets

7.3.1 34 starthypotheses - kwalitatieve stap

De eerdergenoemde lijst van 34 door RHDHV opgestelde hypothesen worden getoetst in hoofdstuk 5 van het RHDHV-rapport. De basis voor de toetsing wordt gevormd door de analyses in hoofdstuk 4 van het RHDHV-rapport.

De 34 getoonde hypothesen in paragraaf 3.3, tabel 7, van het RHDHV-rapport worden stapsgewijs geverifieerd of gefalsificeerd in de paragrafen uit het rapport 5.1 en 5.2.

Voor de inhoudelijke toets van het opstellen van de hypothesen in dit toetsingsrapport is per hypothese een *toets*, *toetsingsgrootte* en *toetsingscriterium* opgesteld, zie paragraaf 3.2.5. Dit wordt nu gebruikt om de toetsing van de hypothesen in het RHDHV-rapport te beoordelen. In Appendix C2 is per hypothese aangegeven of voor het uitvoeren van het toetsingscriterium de:

- data verifieerbaar en herhaalbaar is;
- data compleet is;
- data correct is;
- toetsing correct is.

De resultaten van deze toetsing zijn opgenomen in Tabel 2.

Indien data niet verifieerbaar zijn dan wordt ook gesteld dat het niet verifieerbaar is of de data compleet zijn, de data correct zijn en de toetsing correct is.

Tabel 2 Samenvatting beoordeling van toetsing hypothesen.

	Ja	Nee	Niet verifieerbaar
Zijn de data verifieerbaar en herhaalbaar?	16	18	n.v.t. valt onder 'nee'
Zijn de data compleet?	12	10	12
Zijn de data correct?	13	8	13
Is de toetsing correct?	6	15	13

Bespreking resultaten:

- **Zijn de data verifieerbaar en herhaalbaar?:** In ruim de helft van de toetsingen van hypothesen is de verzamelde informatie of uitkomst van de analyses niet voldoende goed te controleren of is het aannemelijk dat een andere uitvoerder tot andere resultaten komt. Een aantal hypothesen is al niet verifieerbaar doordat de hypothesen buiten het onderzoek van RHDHV vallen doordat “onvoldoende informatie beschikbaar is of omdat een hypothese niet te kwantificeren is”. Doordat de point cloud data niet geanalyseerd wordt in het rapport zijn al 4 hypothesen niet te verifiëren.
- **Zijn de data compleet?:** Voor meer dan de helft van de hypothesen die verifieerbaar zijn is het aannemelijk dat de data ook volledig genoeg zijn om het toetsingscriterium betrouwbaar uit te voeren. Een aantal keer is het toetsingscriterium ruimer gedefinieerd dan wordt beschouwd in de gerapporteerde analyses. Zo worden niet alle belastingen, belastingeffecten en

elementcontroles gerapporteerd. Doordat een aantal analyses niet voldoende verifieerbaar is zijn bijbehorende hypothesen niet te beoordelen op compleetheid van data.

- **Zijn de data correct?:** Het merendeel van de hypothesen die verifieerbaar zijn berusten op correcte analyses en verzamelde informatie. Echter, een significant aantal analyses in het rapport plus bijlagen bevat fouten waardoor de uitvoering van het toetsingscriterium niet voldoende betrouwbaar is. Doordat een aantal analyses niet voldoende verifieerbaar is zijn bijbehorende hypothesen niet te beoordelen op correctheid van data.
- **Is de toetsing correct?:** Voor een minderheid van de toetsingen van hypothesen is beoordeeld dat de hypothese met opgesteld toetsingscriterium voldoende betrouwbaar is. Dit komt doordat bij het merendeel van de hypothesen de achterliggende analyses of niet herhaalbaar, compleet of correct zijn. Doordat een aantal analyses niet voldoende verifieerbaar is zijn bijbehorende toetsingen niet te beoordelen op correctheid.

7.3.2 6 overgebleven hypothesen - kwantitatieve stap

In het RHDHV-rapport wordt na toetsing van de hypothesen in paragraaf 5.1 en 5.2 een nadere beschouwing gemaakt van de 6 als bewezen aangeduide hypothesen in paragraaf 5.3 “Rangschikken van hypothesen”.

In Appendix C2 is een samenvatting gemaakt voor de 6 (waarvan 4 relevant) overgebleven hypothesen met de beoordeling van de betrouwbaarheid van de toetsing (data verifieerbaar en herhaalbaar, data compleet, data correct, toetsing correct).

Voor de kwantitatieve stap is bij hypothese 19 die defecten in lassen beschouwt, de geformuleerde toetsingsgrootheid bij 19B van toepassing: toetsing lasdefecten bij lassen van de verbinding van de onderregel van vakwerkspant 40. Enkel deze worden getoetst in paragraaf 5.3 van het RHDHV-rapport. Opgemerkt wordt dat dit niet relevant is ten aanzien van de instorting, want het gaat om de op druk belaste verbinding.

- **Zijn de data verifieerbaar en herhaalbaar?:**

Hypothese		
2	Belasting hoger dan ontwerpbelasting	Nee, aannemelijk is dat een andere uitvoerder van het windtunnelonderzoek significant andere windbelastingen had gerapporteerd.
7	Verkeerde afmetingen verbindingen staalconstructie	Nee, aannemelijk is dat een andere uitvoerder een ander alternatief detail had ontworpen en tot andere resultaten was gekomen.
17	Geometrie lassen niet conform ontwerp	Nee, aannemelijk is dat een andere uitvoerder van de detailanalyse dit anders had gemodelleerd waardoor de <u>exacte kwantificering</u> anders was geweest. De mesh die gebruikt is in het detailmodel is volgens Bijlage F van het RHDHV-rapport ter besparing van rekentijd niet overal voldoende fijn.
19	Defecten in lassen	Ja
32	Corrosie	Ja
33	Laag-cyclische vermoeiingschade	Nee, aannemelijk is dat een andere uitvoerder van de analyse van vermoeiing een andere beoordeling had gemaakt van het detail met imperfecties. Het is aannemelijk dat deze daardoor tot een andere conclusie was gekomen.

- **Zijn de data compleet?:**

Hypothese

2	Belasting hoger dan ontwerpbelasting	Ja
7	Verkeerde afmetingen verbindingen staalconstructie	Ja
17	Geometrie lassen niet conform ontwerp	Ja
19	Defecten in lassen	Ja
32	Corrosie	Ja
33	Laag-cyclische vermoeiingschade	Nee, er is geen goed onderzoek uitgevoerd.

- **Zijn de data correct?:**

Hypothese

2	Belasting hoger dan ontwerpbelasting	Nee, het 3D-model bevat fouten.
7	Verkeerde afmetingen verbindingen staalconstructie	Nee, een alternatief zelf bedacht ontwerp wordt vergeleken met het uitgevoerde ontwerp.
17	Geometrie lassen niet conform ontwerp	Nee, de mesh die gebruikt is in het detailmodel is volgens Bijlage F van het RHDHV-rapport ter besparing van rekentijd niet overal voldoende fijn.
19	Defecten in lassen	Ja
32	Corrosie	Ja
33	Laag-cyclische vermoeiingschade	Nee, op basis van het detailniveau van de foto's is dit niet te beoordelen.

- **Is de toetsing correct?:**

Hypothese

2	Belasting hoger dan ontwerpbelasting	Nee, de data is niet voldoende betrouwbaar (data niet herhaalbaar en incorrect).
7	Verkeerde afmetingen verbindingen staalconstructie	Nee, de data is niet voldoende betrouwbaar (data niet herhaalbaar en incorrect).
17	Geometrie lassen niet conform ontwerp	Nee, de data is niet voldoende betrouwbaar (data niet herhaalbaar en incorrect).
19	Defecten in lassen	Ja
32	Corrosie	Ja
33	Laag-cyclische vermoeiingschade	Nee, de data is niet voldoende betrouwbaar (data niet herhaalbaar, incompleet en incorrect).

In Tabel 3 wordt de beoordeling van de toetsing van de 6 overgebleven hypotheses samengevat in relatie tot de kwantitatieve inschatting van de bijdrage.

Tabel 3 Samenvattende beoordeling van kwantitatieve inschatting bijdrage aan instorting.

Conclusies RHDHV-rapport Over kwantitatieve bijdrage	Beoordeling
<u>Betreffende hypothese 2:</u> Ontwerpaannames in windbelasting hebben geen invloed op instorting.	Correct: Hoewel de analyse met het 3D-model diverse fouten bevat waardoor de werkelijke krachten significant hoger kunnen zijn. Het is niet aannemelijk dat de werkelijke normaalkrachten significant hoger zijn dan de absolute ontwerpwaarde van de kracht op het detail van de bovenregel van de vakwerkligger.
<u>Betreffende hypothese 7:</u> Door het ontwerp van het detail wordt de capaciteit met 17% gereduceerd hetgeen van significante invloed is op de instorting.	Niet correct: De verbetering van het ontworpen detail door een alternatief detail door RHDHV is niet relevant. Bovendien is de conclusie in het RHDHV-rapport over de invloed van het ontwerp niet in lijn met de uitkomsten van de analyses. Het ontworpen detail kon de ontwerpbelasting opnemen volgens bijlage F van het rapport (capaciteit 2250kN > ontwerp 1667kN) en de ontwerpbelasting was groter dan de belasting bij instorting (1667kN > 881kN).
<u>Betreffende hypothese 17:</u> Door te dunne lassen wordt de capaciteit met 39% gereduceerd hetgeen verantwoordelijk is voor de grootste bijdrage aan de instorting .	Op onderdelen correct: Kwalitatief gezien is het aannemelijk dat de dunne lassen een significant aandeel in de oorzaak van de instorting hebben. Echter, de vergelijking moet gemaakt worden in relatie tot het ontworpen detail en niet in relatie tot de capaciteit van de bovenregel van de vakwerkligger. Volgens het RHDHV-rapport is de reductie door de invloed van te dunne lassen 42% t.o.v. het ontwerp. Het percentage is niet exact vanwege onnauwkeurigheden in model en aannames lasdiktes, maar de orde grootte is wel correct.
<u>Betreffende hypothese 19 B:</u> Bijdrage van defecten in lassen aan de instorting zijn beperkt . Lassen met defecten zijn niet het startpunt van instorten.	Niet correct: Het toetsen van de hypothese is gedaan op basis van bevindingen van de bijdrage van lasdefecten – gasinsluitingen - in de op druk belaste verbinding van de onderregel van vakwerkligger 40 op de instorting. Omdat de instorting is begonnen met het bezwijken van de op trek belaste verbinding van de bovenregel van vakwerkligger 40 is inderdaad de bijdrage hieraan beperkt en zijn ook deze lasdefecten niet het startpunt van de instorting. Om iets te zeggen over de invloed van defecten en een mogelijk startpunt van de instorting moet daarom ook de verbinding in de bovenregel van vakwerkligger 40 worden beschouwd. Bij deze verbinding zijn door corrosie niet alle lassen onderzocht en zijn eventuele lasfouten dus niet beschouwd. Ter plaatse van de verbinding van vakwerkligger 40 is een breuk te zien langs zijde D die op een insluiting wijst.

	<p>Deze kan de capaciteit hebben gereduceerd. Bovendien kunnen lasdefecten een van de mogelijke oorzaken zijn van het ontstaan van de doorlopende scheur in de lassen B, C en D van de verbinding van de bovenregel van vakwerkligger 40. De bijdrage is niet onderzocht en is niet uitgelegd in het rapport. Daarom kan er niet gesteld worden dat de bijdrage beperkt is en/of dat defecten niet het startpunt zijn van de instorting. Te meer omdat het ontstaan van de scheur gezien kan worden als het bezwijken van de las en gedeeltelijk bezwijken van de verbinding die uiteindelijk geresulteerd heeft in de instorting.</p>
<p><u>Betreffende hypothese 32:</u> Een significante afname past niet bij corrosie aangezien de capaciteit sinds een storm in 2018 sterk moet zijn afgenomen.</p>	<p>Op onderdelen correct: Sinds de storm in 2018 kan corrosie inderdaad geen significante bijdrage hebben geleverd. Echter, het kan niet zonder meer verondersteld worden dat corrosie niet aan de instorting heeft bijgedragen omdat het naar schatting al 10 tot 20 jaar aanwezig is. De corrosie kan vermoeiing en brosse breuk scheurvorming significant hebben versneld en daardoor ook een indirecte invloed hebben.</p>
<p><u>Betreffende hypothese 33:</u> Vermoeiing heeft de capaciteit van de verbinding significanter gereduceerd, aangezien de invloed van corrosie niet aannemelijk is maar de sterkte sinds de storm in 2018 sterk moet zijn afgenomen. Er wordt gesproken van een degradatie van 35% sinds de storm van 2018.</p>	<p>Niet correct: Het verschil van 35% in de berekende krachten in de bovenregel van de vakwerkligger kan bestaan uit meerdere componenten. De ene mogelijkheid is, een in de berekeningen niet meegenomen belasting, zoals thermisch belasting, hetgeen door de temperatuurtoename net voor 10 augustus 2019 en het ontbreken van dilatatievoegen in de constructie een mogelijkheid is. De andere mogelijkheid is degradatie, maar dat kan ook uit meerdere componenten bestaan. Een combinatie van vermoeiing en brosse breuk kan een significante invloed hebben gehad op de reductie van de capaciteit van de verbinding. Laag-cyclische vermoeiing wordt niet voldoende aannemelijk gemaakt of bewezen. Het bestuderen van breukvlakken als visuele methode die wordt voorgesteld in referentie [10] van het RHDHV-rapport om laag-cyclische vermoeiing vast te stellen, is niet uitgevoerd. Er is ook geen andere methode genoemd om dit aan te tonen.</p>

7.4 Conclusies

Op basis van bovenstaande resultaten van de procestoets, betrouwbaarheidstoets en inhoudelijke toets wordt geconcludeerd dat de processtap het toetsen van hypothesen niet volledig voldoet aan het proces en de betrouwbaarheidscriteria zoals gedefinieerd in de Delftse Aanpak. Zo worden hypothesen verworpen op basis van onvoldoende informatie of omdat een hypothese niet te kwantificeren is. Dit is geen goede reden om hypothesen niet verder te toetsen.

Er wordt geen volledig sluitende conclusie gepresenteerd over het instorten van het dak op 10 augustus 2019 middels bijvoorbeeld het aantonen van een lagere capaciteit van de kritische verbinding van vakwerkligger 40 dan de mogelijk optredende krachten. Conform de Delftse Aanpak had dit aanleiding kunnen zijn om naar aanvullende gegevens te zoeken en nieuwe hypothesen op te stellen

Krachten en capaciteiten worden gepresenteerd als zeer precies gekwantificeerde waarden, terwijl diverse aannames en onzekerheden als basis voor analyses zijn gebruikt met schijnnaauwkeurigheid als gevolg.

Van onderstaande vier relevante hypothesen worden de conclusies samengevat:

- Geometrie lassen niet conform ontwerp: de invloed op de instorting is voldoende aannemelijk gemaakt, maar de kwantificering is niet exact.
- Defecten in lassen: er wordt op basis van onjuiste gronden gesteld dat deze geen significante invloed kunnen hebben op de instorting.
- Corrosie: er wordt op basis van onjuiste gronden gesteld dat dit geen significante invloed heeft kunnen hebben op de instorting.
- Vermoeiingschade: dit wordt bewezen verklaard zonder sluitend bewijs.

8 Conclusies

8.1 Over de aanpak van het forensisch onderzoek

- Het onderzoek kijkt niet naar alle mogelijke oorzaken en beperkt zich tot directe technische oorzaken. Maar een definitie voor “directe technische oorzaken” ontbrak en dus is het kader van het onderzoek niet duidelijk.
- Het onderzoek is niet voldoende compleet, omdat de processtappen die gedefinieerd staan in de (in het rapport gerefereerde) “Delftse Aanpak” niet overal strikt gevolgd worden en niet onderbouwd is waarom er is afgeweken.
- Het onderzoek voldoet slechts gedeeltelijk aan de betrouwbaarheidscriteria van de “Delftse Aanpak”. Hierdoor kunnen een significant aantal conclusies uit het rapport niet zondermeer als betrouwbaar worden aangemerkt:
 - Een stappenplan om hypothesen op te stellen wordt genoemd op basis van de “Delftse Aanpak”, maar dit wordt niet volledig doorlopen waardoor hypothesen kunnen ontbreken.
 - Er worden geen nulhypothesen geformuleerd waardoor mogelijk hypothesen te snel geverifieerd (bewezen) worden.
 - Het rapport verwerpt hypothesen op basis van onvoldoende informatie of omdat een hypothese niet te kwantificeren is. Dit is geen goede reden om hypothesen niet verder te toetsen.
 - Hypothesen worden geverifieerd op basis van een enkele bron.
 - Hypothesen worden als bewezen aangeduid terwijl ze aannemelijk zijn gemaakt en meningen worden geïnterpreteerd als feiten.
 - Krachten en capaciteiten worden gepresenteerd als zeer precies gekwantificeerde waarden, terwijl diverse aannames en onzekerheden als basis voor analyses zijn gebruikt met als gevolg schijnnaauwkeurigheid.
- Het rapport is niet voldoende compleet, omdat de volgende vragen niet in voldoende mate worden beantwoord: waarom het dak is ingestort op het specifieke tijdstip, wat het precieze mechanisme van de instorting is en wat de keten van gebeurtenissen is die leidde tot instorting.

8.2 Over de conclusies van het rapport

Schuingedrukt zijn de conclusies zoals aangegeven in het RHDHV-rapport.

- *Hoofdoorzaak van het instorten van een deel van het dak is het bezwijken van de verbinding van de bovenregel van vakwerkligger 40, als gevolg van een neerwaartse windbelasting tijdens een storm.* Dit wordt in het rapport aannemelijk gemaakt.
- Hoofdoorzaak van het bezwijken van de verbinding:
 - *De lassen van de verbinding zijn te dun uitgevoerd:* Het wordt in het rapport aannemelijk gemaakt dat het uitvoeren van de verbindingsmiddelen – de lassen – met afmetingen kleiner dan in het ontwerp voorgeschreven is, een belangrijke bijdrage heeft geleverd aan het bezwijken van de verbinding.
 - *De verbinding in de bovenregel was verzwakt door eerder bezwijken lassen:* Het wordt in het rapport aannemelijk gemaakt dat het aanwezig

- zijn van een doorlopende scheur in een significant deel van de lassen een belangrijke bijdrage heeft geleverd aan het bezwijken van de verbinding.
- *Het ontwerp van de verbinding was niet goed:* Het wordt in het rapport niet aannemelijk gemaakt dat het uitgevoerde ontwerp van de verbinding – met inbegrip van de door de staalconstructeur voorgeschreven lassen en zonder lasdefecten – een significante invloed heeft gehad op het bezwijken van de verbinding. De stelling in het rapport dat het ontwerp niet goed was is strijdig met de resultaten van de detailanalyse waarin wordt berekend dat de capaciteit van de verbinding groter is dan de ontwerpbelasting.
 - *De scheur in de bovenregel van vakwerkligger 40 is ontstaan omdat de lassen te dun zijn uitgevoerd:* Wat de precieze oorzaak is van het ontstaan van de doorlopende scheur en andere scheuren in de ingestorte en niet ingestorte delen van de dakconstructie hebben wordt niet uitgelegd in het rapport. Er is geen specifieke hypothese opgesteld die dit beschouwt. Het is mogelijk dat de oorzaak van het ontstaan van de scheuren een combinatie is van te kleine afmetingen van de lassen, hoge spanningsconcentraties door excentrische krachtsinleiding en de aanwezigheid van lasdefecten. Tevens kan het ontwerp van de verbinding een extra bijdrage hebben geleverd aan de grootte van de spanningsconcentraties.
 - *Het optreden van de scheur heeft laag-cyclische vermoeiing tot gevolg in de intacte lassen. De laag-cyclische vermoeiing heeft de capaciteit nog verder gereduceerd na het optreden van de scheur:* Het rapport maakt niet aannemelijk dat laag-cyclische vermoeiing is opgetreden. Doordat laag-cyclische vermoeiing niet aangetoond is, is een reductie van de capaciteit hierdoor niet aangetoond. De oorzaak van de capaciteitsreductie tijdens de levensduur, in het rapport degradatie genoemd, wordt in het rapport daarom niet verklaard. Het is mogelijk dat onder invloed van wisselende belasting de scheur in lengte is gegroeid. Echter, scheurgroeiberekeningen om brossreuk en scheuruitbreiding aannemelijk te maken ontbreken in het rapport.
 - *In het ontwerp zijn fouten gemaakt in de bepaling van de windbelasting:* Het rapport bevestigt dat de “foute” bepaling van de windbelasting niet de oorzaak is van de instorting. Deze conclusie is daarom niet relevant in het kader van het doel van het rapport.

In de conclusies worden effecten zeer precies gekwantificeerd, maar aangezien de analyses waarop de percentages zijn gebaseerd onvoldoende betrouwbaar of nauwkeurig zijn, is het niet gerechtvaardigd om de resultaten als nauwkeurig te veronderstellen.

8.3 Over de analyses in het rapport

Het rapport bevat analyses waarin mogelijke oorzaken van de instorting onderzocht worden en ook soms gepoogd wordt effecten te kwantificeren. De volgende conclusies worden getrokken op basis van de toetsing van de analyses:

- In de analyse van de camerabeelden wordt aannemelijk gemaakt dat spant 38 en 39 niet als eerste zijn bezwaken. Er wordt niet voldoende aannemelijk gemaakt dat er geen resonantie (opslingeren) van de constructie heeft plaatsgevonden net voor het instorten.

- In de analyse van de windbelastingen gedurende de levensduur van de constructie is aannemelijk gemaakt dat op vele eerdere momenten voor de instorting een grotere windbelasting heeft plaatsgevonden dan die op de dag van de instorting.
- Met het windtunnelonderzoek wordt aannemelijk gemaakt dat de er tijdens een storm grote neerwaartse winddrukken op het dakvlak werken en dat de zuidwestenwind, zoals ook op de dag van de instorting, leidt tot de grootste belastingen. Het windtunnelonderzoek is echter geenszins geschikt om gedetailleerde kwantitatieve conclusies te trekken, omdat:
 - Er geen locatie specifieke terreinruwheid is bepaald.
 - Er gebruik is gemaakt van een lineaire respons analyse.
 - Het door afwezigheid van een norm voor windtunnelonderzoek aannemelijk is dat de uitkomsten indien geanalyseerd door een andere partij significant zouden afwijken.
- Met het materiaalkundige onderzoek naar de bezweken lassen is voldoende bewezen dat al voor het moment van instorten de kritische verbinding van de bovenregel van de vakwerkligger op as 40 een grote scheur bevatte. Deze verbinding was in grote mate gecorrodeerd. Aangetoond is dat in de verbindingen van de ingestorte dakconstructie vele lassen lasdefecten bevatten en te dun waren uitgevoerd en dat er voorafgaand aan het lassen geen delen zijn voorbereid. Dit geldt ook voor de verbindingen in de dakconstructie van het deel dat niet is ingestort. De lasindeling in stompe en hoeklassen in genormeerde onderzoeksmethoden kunnen lastig toegepast worden op de lassen van de verbinding omdat ze niet allemaal duidelijk te classificeren zijn.
- De rapportage over niet-destructief onderzoek van de intacte delen van het dak laat zien dat bij visueel onderzoek bij geen enkele vakwerkligger alle lassen voldoen aan de acceptatiecriteria van kwaliteitsniveau B van NEN 5817, en dat bij magnetisch onderzoek weinig lassen voldoen aan de acceptatiecriteria van kwaliteitsniveau 2X van NEN 23278. Hiermee is het veelvuldig voorkomen van lasdefecten vastgesteld en is dus onderzoek naar de invloed van lasdefecten op de instorting en kwantificering hiervan gerechtvaardigd.
- Krachten op de kritische verbinding van de vakwerkligger op as 40 zijn geanalyseerd met een 3D-model dat diverse fouten en onnauwkeurigheden bevat. Het is aannemelijk dat de krachten op het kritische detail significant worden onderschat. Bovendien is de invloed van temperatuurwisselingen niet onderzocht. Gezien het feit dat de staalconstructies geen dilataties bevat is dit niet vooraf te verwaarlozen. Ook worden belastingen in de windverbanden en dakvlak niet inzichtelijk gemaakt.
- De capaciteit van de kritische verbinding van de bovenregels van de vakwerkliggers wordt bepaald met een model dat onvoldoende rekening houdt met de werkelijke situatie:
 - De werkelijke materiaaleigenschappen van spant 40 zijn niet onderzocht en ontwerpwaarden zijn gehanteerd.
 - Er wordt geen rekening gehouden met het excentrisch aansluitende windverband.
 - Lasdefecten en putcorrosie zijn niet beschouwd in de analyse terwijl in combinatie met hoge spanningen, hoge spanningsconcentratiefactoren en trekspanningen deze mogelijk de aanleiding tot brosse breuk waren.

- In de analyse van de capaciteitsreductie van de kritische details in de loop der tijd wordt aannemelijk gemaakt in plaats van bewezen dat een scheur is ontstaan tijdens de eerste grote storm en de corrosie heeft mogelijk gemaakt. Laag-cyclische vermoeiing wordt niet voldoende aannemelijk gemaakt of bewezen. Het bestuderen van breukvlakken als visuele methode die wordt voorgesteld in referentie [10] van het RHDHV-rapport om laag-cyclische vermoeiing vast te stellen, is niet uitgevoerd. Er is ook geen andere methode genoemd om dit aan te tonen.
- In de analyse van de bezwijkvolgorde wordt aannemelijk gemaakt dat eerst as 40 is bezwiken, vervolgens as 39 en 41 en als laatste as 38.

9 Aanbevelingen voor alternatieve en nog niet getoetste hypotheses

Falen van een constructie of constructief element wordt veroorzaakt doordat de optredende belasting hoger is dan de capaciteit. In het rapport wordt de vraag niet beantwoord waarom de optredende kracht specifiek op 10 augustus 2019 groter was dan de capaciteit. Omdat er in januari 2018 een significant grotere storm was met krachten die ordegrrootte 30%-40% groter waren dan de dag van instorting zijn tijdens de toetsing aanvullende hypotheses opgesteld die van belang zijn voor nader onderzoek, zie paragraaf 6.3.3 en 6.4.

Met name de hypotheses gerelateerd aan het onderwerp *degradatie* verdienen extra aandacht. Derhalve wordt dit hier in meer detail beschouwd.

Om degradatie verder te onderzoeken wordt aanbevolen om te beginnen met het in hun gezamenlijkheid bekijken van de vier als relevant beoordeelde hypotheses. Deze vier hypotheses zijn: geometrie lassen niet conform ontwerp, defecten in lassen, corrosie en laag-cyclische vermoeiingschade. Hoewel laag-cyclische vermoeiing gezien de observaties mogelijk is, is deze hypothese nog niet succesvol getoetst. Naast laag-cyclische vermoeiing is vooral het onderzoeken van brosse breuk als oorzaak van het ontstaan van de scheur en scheuruitbreiding voor de afname van de capaciteit van belang.

9.1 Laag-cyclische vermoeiing

In het rapport is het volgende vastgesteld:

- Aannemelijkheid van rekken boven de 0.2% vloerrek in ordegrrootte 1%-4% in las A van de bovenregel voor krachten variërend van 600 -800 kN; dit komt overeen met rek amplituden van 0,5% - 2%.
- 37 Dagen waarbij de windsnelheid hoger was dan de dag van instorting.

Met de aanname dat iedere storm 5 – 10 wisseling heeft voorgebracht zijn dit 185-370 wisselingen. Hoge rek amplituden in deze ordegrrootte en de aanwezigheid van wisselende trekbelasting in deze orde van grootte, maakt een hypothese dat laag-cyclische vermoeiing een significante rol gespeeld kan hebben bij de instorting aannemelijk. Deze hypothese is echter niet getoetst omdat er geen duidelijke toetsingscriteria was opgesteld. Referentie [10] van het RHDHV-rapport geeft een mogelijk toetsingskader aan in de vorm van een visuele interpretatie van breukvlakken. Deze toetsing is niet uitgevoerd, zodat de hypothese niet bevestigd kan worden.

9.2 Brosse breuk door defecten in lassen

In het rapport is het volgende vastgesteld:

- Een significant deel van de lassen niet voldoen aan acceptatiecriteria van kwaliteitsniveau B van NEN-EN-ISO 5817: 2014 voor visueel onderzoek en kwaliteitsniveau 2X van NEN-EN-ISO 23278: 2015 voor magnetisch onderzoek
- Voor de bovenregel van het vakwerken zijn voor 6 van de 31 vakwerken scheurvorming van de lassen waargenomen die niet voldeden aan bovenstaande acceptatiecriteria.
- Voor de bovenregel van vakwerkligger 40, is een doorlopende scheur in de lassen vastgesteld langs de kanten B, C en D; deze scheur is totaal 340 mm van een

totale omtrek van 760 mm; deze scheur kan gezien de aangetroffen corrosie al 10-20 jaar geheel of gedeeltelijk aanwezig zijn.

Met de wetenschap van te klein uitgevoerde lassen, hoge spanningsconcentratiefactoren door de detaillering van de verbinding, excentrische krachtsinleiding en de aanwezigheid van defecten in de lassen is een hypothese van brosse breuk welke ontstaan is uit een defect op een plaats van een hoge spanningsconcentratie aannemelijk. Dit wordt versterkt als ook aangenomen wordt dat de las langs kant C significant kleiner was dan langs kant A (bijvoorbeeld keeldoorsnede langs kant C van 3 mm i.r.t. de keeldoorsnede langs kant A van 4,5 mm). Opgemerkt wordt dat als minimale doorsnede voor de doorsnede langs kant D zelfs 2,0mm is gemeten, zie Appendix F1.1.1

Hoe groot de initiële scheur was is lastig vast te stellen. Het kan zijn dat de scheur zich in een keer als brosse breuk zich in lengterichting heeft ontwikkeld tot de grootte bij instorting. Het is ook mogelijk dat de breuk zich bij wisselende trekbelasting bij wind als functie van de tijd zich in lengterichting heeft ontwikkeld. Uitbreiding als functie van tijd kan dat ook de afname van capaciteit als functie van de tijd verklaren.

9.3 Degradatie door combinaties van hypothesen

Laag-cyclische vermoeiing, brosse breuk, en corrosie kunnen als fenomeen gecombineerd voorkomen. Alhoewel niet alles bekend is over laag-cyclische vermoeiing zijn onderzoekers [3,4,5] van mening dat het te maken heeft met de aanwezigheid van scheuren in het moedermateriaal, de warmte-beïnvloede zone of in het lasmateriaal. De grootte van de aanwezige scheur is dan een maat voor het ontstaan van een instabiele brosse breuk, maar ook voor het aantal belastingwisselingen tot bezwijken bij laag-cyclische vermoeiing. Hoe groter de scheur, hoe groter de kans op brosse breuk, maar ook hoe kleiner het aantal wisselingen tot bezwijken bij laag-cyclische vermoeiing. Zo hebben bij laag-cyclische vermoeiing zowel de grootte van de rek amplituden en de grootte van de aanwezige scheuren een invloed op het aantal wisselingen tot breuk.

10 Referenties

- [1] RHDHV, *Onderzoek naar de technische oorzaken van het gedeeltelijk bezwijken van de dakconstructie van het AFAS Stadion te Alkmaar*, 2020.
- [2] Terwel, Schuurman and Loeve, "Improving reliability in forensic engineering: the Delft approach," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Forensic Engineering*, 2018.
- [3] M. Murakami, "What is fatigue damage? A view point from the observation of low cycle fatigue process," *International Journal of Fatigue* 27, pp. 991-1005, 2005.
- [4] F. M. Murakami, „Low cycle fatigue damage and critical crack length affecting loss of fracture ductility,” *International Journal of Fatigue* 82, pp. 89-97, 2016.
- [5] d. J. F. Pereira, „Ultra low-cycle fatigue behaviour of structural steel,” *Engineering Structures* 60, pp. 214-222, 2014.

Appendix A

Arup Team

A1 Arup Team

De volgende personen zijn betrokken geweest bij de toetsing van het RHDHV-rapport:

- Dr. ir. Joop Paul MBA
- Ir. Mathew Vola
- Ir. Chris Noteboom
- Andrew Allsop, MA(Cantab), CEng
- Neil Perry, CEng
- Mike Banfi, MA(Cantab), CEng

Appendix B

Terminologie

B1 Terminologie Delftse Aanpak

Onderstaande tabel toont de Nederlandse terminologie die is gebruikt voor de Engelse termen gebruikt in de Delftse Aanpak.

Tabel 4 Terminologie Delftse Aanpak.

Engelse Termen: Delft Approach	Nederlandse gehanteerde vertaling: Delftse Aanpak
Steps for forensic investigation <ul style="list-style-type: none"> • Orientation • Data collection • Hypotheses generation • Hypotheses testing • Findings reporting • Recommendations 	Stappen voor forensisch onderzoek <ul style="list-style-type: none"> • Verkenning • Verzamelen van informatie • Opstellen van hypothesen • Toetsen van hypothesen • Opstellen rapportage • Aanbevelingen
Failure carriers <ul style="list-style-type: none"> • Product • Instruction • Execution • Stems and roots 	Dragers van falen <ul style="list-style-type: none"> • Product • Instructie • Uitvoering • Stammen en wortel
Causal stems <ul style="list-style-type: none"> • Integrity • Ergonomics • Government • Field • Maker • Organisation • Knowledge • Rules • Skills 	Causale stammen <ul style="list-style-type: none"> • Integriteit • Ergonomie • Overheid • Vakgebied • Maker • Organisatie • Kennis • Regels • Vaardigheden
Causal roots <ul style="list-style-type: none"> • Configuration • Geometry • Material • Intactness • Purity • Dependencies • Usability • Accessibility • Safeguards • Applicability • Validity • Availability • Attempt • Choice • Ability • Awareness 	Causale wortels <ul style="list-style-type: none"> • Configuratie • Geometrie • Materiaal • Intactheid • Puurheid • Afhankelijkheden • Bruikbaarheid • Toegankelijkheid • Voorzorgsmaatregelen • Toepasbaarheid • Deugdelijkheid • Beschikbaarheid • Poging • Keuze • Vaardigheid • Bewustzijn
Root cause	Hoofdoorzaak
Ring of trustworthiness	Betrouwbaarheidscirkel
Criteria of trustworthiness <ul style="list-style-type: none"> • Objective • Repeatable • Verifiable 	Criteria van betrouwbaarheid <ul style="list-style-type: none"> • Objectiviteit • Herhaalbaarheid • Verifieerbaarheid

<ul style="list-style-type: none">• Complete• Correct	<ul style="list-style-type: none">• Compleetheid• Correctheid
------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------

B2 Terminologie toetsing

Bezwijken

Met het bezwijken van een constructie(onderdeel) wordt bedoeld: een toestand of conditie waarin de constructie of het onderdeel waarneembaar of meetbaar sommige of een van de beoogde functies niet kan vervullen.

Instorten

Met instorting wordt bedoeld: het bezwijken van de constructie, waardoor een totaal verlies aan draagkracht optreedt en onderdelen naar beneden vallen.

Mesh

Met mesh wordt verwezen naar de verdeling van eindige elementen die gebruikt worden in constructieve berekeningen. In bijlage F van het RHDHV-rapport wordt dit omschreven als rekennet.

Appendix C

Toetsingstabellen

C1 Procestoets stappen 2, 3 en 4

Toetsingsmethode: Is het rapport opgesteld conform de genoemde methode in: “Improving reliability in forensic engineering: the Delft approach”?

2.0	Verzamelen van informatie	gedeeltelijk	Er wordt geen informatie verzameld op alle manieren die in de Delftse Aanpak zijn genoemd en hier als 2.1 t/m 2.4 zijn samengevat.
2.1	Verzamelen van data door middel van veldonderzoek en bureaustudie	ja	
2.2	Interviews met getuigen en relevante personen	nee	Niet gerapporteerd.
2.3	Verzamelen van monsters voor uitvoeren van testen	ja	
2.4	Bestuderen van soortgelijke voorvallen, data, rapporten, ontwerp en constructietekeningen en productie instructies (bv specificaties)	gedeeltelijk	Geen soortgelijke voorvallen gerapporteerd, maar wel onderzoek naar diverse (ontwerp)documenten blijkt uit de Documentenlijst.
3.0	Opstellen van hypothesen	gedeeltelijk	Om hypothesen op te stellen is de Delftse Aanpak gedeeltelijk gevolgd. Niet alle (sub)stappen uit de Aanpak die worden aangereikt om hypothesen op te stellen worden gevolgd, zoals conform het Tree House of Failures diagram.
3.1	Opstellen van lijst van mogelijke verklaringen voor de oorzaken van het falen:	gedeeltelijk	Zie onder.
3.1.1	Wat zijn de mogelijke technische en proces oorzaken van het falen?	gedeeltelijk	Er is geen informatie opgenomen over de proces oorzaken. Er zijn wel hypothesen opgesteld van de technische oorzaak van het falen.
3.1.2	Wat is de keten van gebeurtenissen die geleid heeft tot falen?	ja	Hypothesen zijn opgesteld voor de diverse oorzaken. De volledige keten van gebeurtenissen is niet expliciet beschouwd. Zo is voor het kritieke detail niet beschouwd hoe deze precies is ontworpen, gecommuniceerd naar de staalbouwer, gelast en onder welke omstandigheden, uitgevoerd en onderhouden totdat deze gefaald is. De hoofdoorzaak wordt in de conclusie genoemd: “het bezwijken van de verbinding van de bovenregel bij vakwerkligger 40”. Daarnaast wordt als hoofdoorzaak daarvan genoemd: “De lassen van de verbinding zijn te dun uitgevoerd”. Het is uiteindelijk in de conclusie als hoofdoorzaak gepresenteerd.
3.1.3	Wat is de hoofdoorzaak van het falen?	ja	In het opstellen van de hypothesen wordt niet expliciet verwezen naar een verband met of invloed op hoofdoorzaak.
3.2	Gebruik van de 4-stappen methode om mogelijke oorzaken te ontdekken	gedeeltelijk	In Tabel 4 t/m 6 worden de ontwerpfase, productiefase en gebruiksfase beschouwd.
3.2.1	Kijk naar ieder van de levenscyclusfasen	ja	De fasen zijn voldoende beschouwd.
3.2.2	Focus op iedere stap binnen iedere fase	ja	Per fase zijn meerdere stappen beschouwd.
3.2.3	Voor iedere stap ga door het Tree House diagram	gedeeltelijk	Het Tree House of Failures diagram wordt getoond in Figuur 3-1. Er wordt niet gerapporteerd of de stappen die links als 3.2.3.1 t/m 3.2.3.3 zijn samengevat systematisch zijn doorlopen in het opstellen van hypothesen.
3.2.3.1	Bekijk welke oorzakelijke stammen en wortels een invloed hebben op iedere stap	nee	In Tabel 7 worden mogelijke Technische Oorzaken (hypothesen) opgesomd per fase. Er is geen indicatie dat bij hypothesen ook nog een niveau dieper is gezocht naar de oorzaak. Bijvoorbeeld: 10 Verkeerde Oppervlaktebehandeling; via het Tree House of Failures zou de mogelijke oorzaak van een verkeerde oppervlaktebehandeling onderzocht kunnen worden.
3.2.3.2	Bedenk voor iedere wortel iedere mogelijke oorzaak binnen deze fase en stap die heeft bijgedragen aan het falen	gedeeltelijk	Zie boven.
3.2.4	Ga heen en weer in de levenscyclus en stappen zodat alle oorzaken gevonden kunnen worden	gedeeltelijk	Er is geen cyclisch proces in het opstellen van hypothesen gerapporteerd.
4.0	Toetsen van hypothesen		Om hypothesen te toetsen is gedeeltelijk de Delftse Aanpak gevolgd. Er wordt niet enkel getest op basis van feiten. Validatie-berekeningen zijn uitgevoerd en er is gebruik gemaakt van het beredeneren. Echter er zijn geen uitgebreide simulaties getoond of gebruik gemaakt van experimenteel onderzoek om de hypothesen te valideren. Bij iedere hypothese hoort een bijpassende toets op basis van diverse verzamelde informatie. Er wordt niet enkel getoetst op basis van feiten, maar ook op basis van aannamen.
4.1	Toetsen van de hypothesen op basis van de verzamelde data/feiten	gedeeltelijk	Zo wordt vanuit een detailberekening en referentie naar een artikel geconcludeerd dat er sprake moet zijn geweest van laag-cyclische vermoeiing. Echter, dit is niet bewezen op basis van bijvoorbeeld foto's van microstructuur.
4.2	Controleren of de verzamelde informatie een logische verklaring wordt gevonden voor het falen, middels:	gedeeltelijk	Zie onder.
4.2.1	Beredeneren	gedeeltelijk	Er wordt aangetoond dat de constructie slechte lasverbindingen bevatte, welke ook bezweken zijn. Dit is een logische primaire oorzaak. Echter, er is niet bewezen waarom het dak op 10-08-2019 is ingestort. Zo heeft het dak in 2018 een zwaardere storm weerstaan.
4.2.2	Validatie berekeningen	ja	3D berekeningen van de globale constructie en van het detail zijn gerapporteerd.
4.2.3	Simulaties	gedeeltelijk	Simulaties van verschillende instortscenario's zijn niet uitvoerig gepresenteerd (bijvoorbeeld geen film van de volgorde van instorten waarbij één voor één het bezwijken van verbindingen wordt gepresenteerd). Wel is in het 3D-model ook geanalyseerd met één bezweken staaf als soort van simulatie om de herverdeling van de krachten te onderzoeken.
4.2.4	Experimenteel onderzoek	nee	Er zijn geen experimentele testen in bijvoorbeeld een laboratorium uitgevoerd waarbij bijvoorbeeld de gelaste kritische verbinding tot falen is belast.
4.3	Kijken naar aanvullende data/feiten en aanvullende hypothesen als:	gedeeltelijk	Zie onder.
4.3.1	De opgestelde lijst met mogelijke verklaringen geen bevredigend antwoord geeft op het doel van het onderzoek	ja	Het is aannemelijk dat tijdens het onderzoeksproces er andere hypothesen zijn opgesteld bij bepaalde bevindingen. Zo is het aannemelijk dat de hypothese van vermoeiing op een later stadium in het onderzoek is opgesteld. Deze hypothese werd niet in een tussenpresentatie van het onderzoek genoemd.
4.3.2	De aanwezige data/feiten onvoldoende is om de hypothesen te testen en/of verklaringen geen bevredigend antwoord geeft op het doel van het onderzoek	gedeeltelijk	Aangezien er geen sluitende, bewezen verklaring is gegeven omtrent het moment van instorten had gezocht kunnen worden naar aanvullende data/feiten.

C2 Inhoudelijke toets stappen 3 en 4: opstellen van hypothesen en toetsing hypothesen

ARUP
Onderzoeksraad AZ-stadion / Toetsing gedeeltelijk bezwijken dakconstructie AZ-stadion Tabel met samenvatting toetsing 34 RHDHV-hypotheses versie 1.2

Selectie hypothesen		Toetsing stap 3: opstellen van hypothesen				Toetsing stap 4: toetsen van hypothesen									
RHDHV - Hfst 3.3 Hypothesen - Tabel 7 Mogelijke technische oorzaken.						RHDHV rapport, Testen hypothesen, hfst. 5.									
Plaats in Delftse aanpak	Nr.	Technische oorzaak	Toets <i>Expliciet geformuleerd, op basis van de impliciete "Technische oorzaak" / Hypothese. Deze toets in relatie tot kolommen rechts: toetsingsgrootheid en toetscriterium.</i>	Toetsingsgrootheid (bv. Spanning)	Toetscriterium (impliciet of expliciet)	Dekt de toets de hypothese?	Is de hypothese ...			Conclusie	Toetsingsopmerkingen <i>op basis van afgeleide toets en bijbehorend toetscriterium</i>	Bij de toetsing van de hypothesen ...			
							Toetsbaar	Weerlegbaar	Relevant			Zijn de data verifieerbaar en herhaalbaar?	Zijn de data compleet?	Zijn de data fouten in 3D model correct?	Is de toetsing correct?
Ontwerpfasie (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)	1. Vergelijk normaalkracht bovenregel vakwerklijg 40 voor ontwerp en instoring. Bepalen wind belasting bij instoring met windtunnel test door gespecialiseerd bureau RDWI in Bijlage C. Bepalen normaalkracht met 3D model in Bijlage E. 2. Controleer normaalkrachten volgens uit ontwerp windbelasting met die volgens uit belasting volgens norm.	1. Verschil normaalkracht tussen ontwerp en instoring 2. Verschil normaalkracht tussen ontwerp en norm	1. Verschil > significant verschil 2. Verschil > significant verschil	Niet volledig, alleen verandering windbelasting wordt bekeken en geen andere belastingen zoals toevoegen zonnepanelen	Ja	Nee, significant niet gedefinieerd	Niet relevant, want dit betreft de vergelijking van belastingen norm, ontwerp en instoring (das geen directe oorzaak)	Hypothese bewezen (5.1.1)	In 5.1.1 wordt gesteld dat de belastingcombinatie met opwaartse wind volgens de staalconstructeur een 14% hogere normaalkracht geeft dan de berekende normaalkracht door RHDHV bij neerwaartse ontwerpbelasting volgens het windtunnelonderzoek. Data zijn niet precies herhaalbaar aangezien er grote spreiding zit in resultaten van windtunnelonderzoek. Data zijn niet correct doordat er fouten in het 3D model zitten waardoor het waarschijnlijk is dat de normaalkracht tijdens de instoring wordt onderschat. Daarnaast wordt de windbelasting volgens de norm gecontroleerd waartoe volgt dat de windbelasting in het ontwerp niet correct was. Dit dekt echter maar een deel van de hypothese.	Nee, niet herhaalbaar (windtunnel-onderzoek)	Ja	Nee, fouten in 3D model	Nee, data niet betrouwbaar
	7	Verkeerde afmetingen verbindingen staalconstructie (bijv. diktes schets- en kopplaten)	Vergelijk de capaciteit van detail "ontwerp zonder fouten" met de capaciteit van de aangesloten bovenregel. Vergelijking uitgevoerd in Bijlage F	Afname capaciteit verbinding in %	Afname (17%)> significant afname; in vergelijking met ontwerp is afname 13%	Niet volledig, vergelijking t.o.v. capaciteit bovenregel en niet capaciteit uitgevoerde ontwerp	Ja	Nee, significant niet gedefinieerd	Niet relevant, want het betreft een alternatief ontworpen detail in de ontwerpfasie. (das geen directe oorzaak)	Hypothese bewezen (5.1.2)	In 5.1.2 wordt gesteld dat doordat de kopplaat niet stijf genoeg is de capaciteit met 17% wordt gereduceerd. Deze 17% wordt echter bepaald met een fictief model met een dikke koker en dikke lassen, waarvan ook de mesh niet optimaal is. Dit is derhalve niet correct. Ook kan niet gesteld worden dat de verbinding fout was, aangezien de verbinding voldoende capaciteit had (2250kN wordt gesteld in het fictieve model - bijlage Fp.32) voor de door de staalconstructeur opgegeven maximale staafkracht op het detail van 1667kN. Ook was de ontwerpbelasting van de staalconstructeur hoger dan die door RHDHV berekende werkelijke belasting bij instoring (881kN). De analyse voldoet niet volledig aan het criterium van herhaalbaarheid aangezien een andere uitvoerder de invloed van het ontwerp van de verbinding mogelijk anders had geanalyseerd en daardoor gekwantificeerd. Er is nu een alternatief detail ontworpen om te kunnen toetsen. Doordat de mesh van het detailmodel niet fijn genoeg was, is de analyse mogelijk onnauwkeurig.	Nee, niet herhaalbaar	Ja	Nee, fouten in detailmodel	Nee, data niet betrouwbaar
Productiefase	17	Geometrie lassen niet conform ontwerp (bijv. keeldiktes te klein)	Vergelijk de capaciteit van uitgevoerde detail (zonder scheur) met de capaciteit van de aangesloten staven en onderzoek de invloed van de afmetingen van de lassen. Vergelijking uitgevoerd in Bijlage F	Afname capaciteit verbinding in %	Afname (39%)> significant afname; in vergelijking met ontwerp is afname 42%	Niet volledig, vergelijking t.o.v. capaciteit bovenregel en niet capaciteit ontwerp	Ja	Nee, significant niet gedefinieerd	Relevant, de grootte van de lassen is een factor die invloed kan hebben op de capaciteit van de verbinding als functie van de tijd.	Hypothese bewezen (5.1.3)	Met het materiaalonderzoek is voldoende aangetoond dat de lasafmetingen niet conform ontwerp waren. Echter, in 5.1.3 wordt gesteld dat de gemeten lasdoorsnede de capaciteit van de verbinding met ongeveer 39% reduceert. Dit suggereert precisie, maar doordat de lassen zo slecht waren en de mesh van het detailmodel ook niet verfijnd genoeg was, kan hier geen kwantitatieve uitspraak over gedaan worden. Het is aannemelijk dat een andere uitvoerder tot andere resultaten was gekomen, omdat de lassen anders zijn gemodelleerd of een andere methode zou zijn gebruikt voor toetsing.	Nee, niet herhaalbaar.	Ja	Nee, mesh lassen niet voldoende fijn.	Nee, data niet betrouwbaar
	19A	Defecten in de lassen (bijv. gasinsluitingen, scheuren)	Visuele inspectie van lassen van alle bezwijken verbindingen van vakwerklijg 38 t/m 41 door gespecialiseerd onderzoeksbureau SGS in Bijlage D	Toetsing lasdefecten bij aanwezige lassen volgens gedocumenteerde methoden (op basis van RHDHV-rapport paragraaf 5.1.3)	Lasdefecten zijn expliciet benoemd en uitvoerig gedocumenteerd	Niet volledig, bij het SGS onderzoek na de instorting kan door corrosie aan de verbinding van vakwerklijg 40 niet meer achterhaald worden of er lasfouten aanwezig waren	Ja	Ja	Relevant, lasdefecten kunnen invloed hebben op de capaciteit van de verbinding als functie van de tijd.	Hypothese bewezen (5.1.3)	Voldoende aangetoond met materiaalonderzoek. Echter invloed is niet gekwantificeerd terwijl dit bij andere analyses wel het geval is. Daardoor ontstaan onduidelijkheden in het rangschikken van hypothesen.	Ja	Ja	Ja	Nee, lasdefect zijkant bovenverbinding as 40 (zijde D) is niet beschouwd
	19B	Defecten in de lassen (bijv. gasinsluitingen, scheuren)	Visuele inspectie van lassen van alle bezwijken verbindingen van vakwerklijg 38 t/m 41 door gespecialiseerd onderzoeksbureau SGS in Bijlage D	Toetsing lasdefecten bij lassen van de verbinding van de onderregel van vakwerkspant 40 (op basis van RHDHV-rapport paragraaf 5.3)	Lasdefecten zijn expliciet benoemd en uitvoerig gedocumenteerd	Niet volledig, lasdefecten in de op trek belaste verbinding van de bovenregel worden niet beschouwd.	Ja	Ja	Niet relevant, de lasdefecten bevinding zich in een op druk belaste verbinding.	Bijdrage zeer beperkt (5.3)	Lasdefecten ter plaatse van ondervinding had lasdefecten, dit is voldoende aangetoond	Ja	Ja	Ja	Ja
Gebruiksfase	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)	Onderzoek naar de aanwezigheid en mate van corrosie vakwerklijg 40 door gespecialiseerd onderzoeksbureau SGS in Bijlage D	Dikte van de corrosielagen en de afname van wanddikte buisprofiel en kopplaat	Geen toetscriterium	Niet volledig, ontwerpingspunt corrosie ontbreekt - aanname is dat er tijdens het ontwerp niet uit is gegaan van corrosie	Nee	Nee	Relevant, want corrosie is een factor die invloed kan hebben op de capaciteit als functie van de tijd.	Hypothese bewezen (5.1.4.2)	Voldoende aangetoond met materiaalonderzoek dat er significante corrosie aanwezig was. N.B. In het ontwerp werd geen rekening gehouden met corrosie.	Ja	Ja	Ja	Ja
	33	Vermoeingschade aan de staalconstructie (bijv. laag- of hoog-cyclische vermoeing)	Hoog-cyclische vermoeing: Onderzoeken breukvlakken lassen op mogelijke vermoeingschade door gespecialiseerd onderzoeksbureau SGS in Bijlage D en analyse belastingwisselingen, op basis van windsnelheden Bijlage B, Laag-cyclische vermoeing: Onderzoeken optredende plastische rekken lassen in Bijlage F en analyse aantal belastingwisselingen, basis van windsnelheden in Bijlage B, binnen plastisch rekgebied.	Hoog-cyclische vermoeing: breukvlakken lassen laten typisch patroon zien van hoog-cyclische vermoeing; aantal belastingwisselingen; laag-cyclische vermoeing; aantal belastingwisselingen lassen in combinatie met plastische rekken in domein 1%-2,5%	Hoog-cyclische vermoeing: expliciet, breuk breukvlakken lassen verbindingen vakwerklijgers 39 t/m 41 vertonen geen typisch patroon van hoog-cyclische vermoeing; Laag-cyclische vermoeing: aantal belastingcycli is tussen 100 en 1000 met plastische rekken tussen 1% en 2,5%.	Ja	Ja	Relevant, want hoog-cyclische en laag-cyclische vermoeing zijn factoren die invloed kunnen hebben op de capaciteit als functie van de tijd.	Hypothese bewezen (5.1.4.3)	Er wordt geconcludeerd dat hoog-cyclische vermoeing geen rol heeft gespeeld bij de instorting. Dit is echter niet bewezen, aangezien de lokale piekspanningen door lasfouten niet goed in beeld zijn gebracht. Bij veel lagere windsnelheden dan gerapporteerd kunnen al hoge spanningpieken zijn opgetreden waardoor ook hoog-cyclische vermoeing een rol heeft kunnen spelen. Vervolgens wordt in de paragraaf op basis van een analyse in paragraaf 4.9.2 gesteld dat vermoeing een rol kan hebben gesteld, waarna hypothese 33 over vermoeingschade bewezen wordt verklaard. Ten eerste bevat de analyse fouten, zoals gesteld in de toetsing van het detailmodel en ten tweede is bij het aannemelijk maken de hypothese nog niet bewezen. Aangezien overige degradatie wel genoemd wordt in het rapport in paragraaf 5.1.4 en 5.1.4.1, maar niet in een specifieke hypothese tijdens de gebruiksduur wordt hier nog het volgende over opgemerkt: In 5.1.4 wordt gesteld dat er al eerder een 40% groter belastingeffect is opgetreden. Dit is niet correct, aangezien het is bepaald met een 3d model dat fouten heeft, zoals de bepaalde krachten ten gevolge van zonnepanelen. In 5.1.4.1 wordt gesteld dat het waarschijnlijk is dat de scheur in de bovenverbinding van as 40 in januari 2007 is ontstaan. Dit is voldoende onderbouwd. Opgemerkt wordt wel dat aangezien de las volledig gecorrodeerd was een uitspraak hierover discutabel is, aangezien de las ook al had kunnen bezwijken bij een lagere belasting en dus op een ander tijdstip.	Nee, niet herhaalbaar	Nee, geen bewijs breukvlakken en analyse spanningswisselingen	Nee, onnauwkeurig detailmodel	Nee, data niet betrouwbaar	

Toelichting

- Voor inhoudelijke toetsing van opstellen hypothesen:
- Bepaal of de toets de hypothese dekt
 - Reflecteer op onderwerpen:
 - Toetsbaar: er moet een toetscriterium en bijpassende toets ontworpen kunnen worden met toetsingsgrootheden (wanneer is er sprake van een significante rol)
 - Weerlegbaar: de toets moet antwoorden of de hypothese juist of onjuist is
 - Nauwkeurig: de hypothese moet voldoende nauwkeurig zijn, om de hypothese toetsbaar en weerlegbaar te maken
 - Relevant: de hypothese moet direct betrekking hebben op het doel van het onderzoek

- Voor inhoudelijke toetsing van de toetsing van hypothesen:
- Bepaal of:
- Data verifieerbaar en herhaalbaar: De verzamelde data en/of uitkomst(en) onderzoek(en) ten behoeve van het toetsingscriterium zijn voldoende gerapporteerd om te controleren. Aannemelijk is dat een andere uitvoerder tot dezelfde uitkomsten was gekomen voor de uitvoering van het toetsingscriterium.
 - Data compleet: De verzamelde data en/of uitkomst(en) onderzoek(en) zijn voldoende compleet om het toetsingscriterium betrouwbaar uit te voeren.
 - Data correct: De verzamelde data en/of uitkomst(en) onderzoek(en) zijn op een correcte wijze verzameld. Er zitten geen fouten in de analyses die een significante invloed hebben op de resultaten.

<u>Volledige hypothesetabel</u>		Toetsing stap 3: opstellen van hypothesen					Toetsing stap 4: toetsen van hypothesen								
RHDHV - Hfst 3.3 Hypothesen - Tabel 7 Mogelijke technische oorzaken.							RHDHV rapport, Testen hypothesen, Hfst. 5.								
Plaats in Delfse aanpak	Nr.	Technische oorzaak	Toets <i>Expliciet geformuleerd, op basis van de impliciete "Technische oorzaak" / Hypothese.</i> <i>Deze toets in relatie tot kolommen rechts: toetsingsgrootheid en toetscriterium.</i>	Toetsingsgrootheid (bv. Spanning)	Toetscriterium (impliciet of expliciet)	Dekt de toets de hypothese?	Is de hypothese ...			Conclusie	Toetsingsopmerkingen <i>op basis van afgeleide toets en bijbehorend toetscriterium</i>	Bij de toetsing van de hypothesen ...			
							Toetsbaar	Weerigbaar	Relevant			Zijn de data verifieerbaar en herhaalbaar?	Zijn de data compleet?	Zijn de data correct?	Is de toetsing correct?
Uitgangspunten	1	Draagkracht ondergrond onvoldoende	Bepaal zettingen door verticale afwijkingen vakwerkkolom op basis van point cloud meting na instorting met geometrie conform ontwerpdocumenten.	Verticale afwijking [m]	Afwijking > significante afwijking	Niet volledig, alleen zettingen bekeken en geen verschuifzettingen	Ja	Nee, significant niet gedefinieerd	Relevant, want schade/afwijkende vervormingen t.o.v. ontwerp van de fundering/ondergrond is een factor die een invloed kan hebben op zowel de capaciteit als belastingen in de tijd (merk op dat dit geen ontwikkelingsfase hypothese is, maar een productiefase en/of gebruikfase hypothese)	Hypothese verworpen (5.2)	Het is aannemelijk dat met de point cloud data bepaald kan worden dat er geen grote zettingen hebben plaatsgevonden en of de draagkracht van de grond dus voldoende was. De analyse die genoemd wordt in de conclusie waaruit bepaald wordt dat "geen grote verticale afwijkingen in de posities van de vakwerkkolom zijn opgetreden" is echter niet gerapporteerd, dus niet verifieerbaar.	Nee, niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar
	Belasting en belasting-combinaties	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)	1. Vergelijk normaalkracht bovenregel vakwerkiger 40 voor ontwerp en instorting. Bepalen wind belasting bij instorting met windtunnel test door gespecialiseerd bureau RDWI in Bijlage C. Bepalen normaalkracht met 3D model in Bijlage E. 2. Controleer normaalkrachten volgens uit ontwerp windbelasting met die volgende uit belasting volgens norm.	1. Verschil normaalkracht tussen ontwerp en instorting 2. Verschil normaalkracht tussen ontwerp en norm	1. Verschil > significant verschil 2. Verschil > significant verschil	Niet volledig, alleen verandering windbelasting wordt bekeken en geen andere belastingen zoals toevoegen zonnepanelen	Ja	Nee, significant niet gedefinieerd	Niet relevant, want dit betreft de vergelijking van belastingen norm, ontwerp en instorting (das geen directe oorzaak)	Hypothese bewezen (5.1.1)	In 5.1.1 wordt gesteld dat de belastingcombinatie met opwaartse wind volgens de staalconstructeur een 14% hogere normaalkracht geeft dan de berekende normaalkracht door RHDHV bij neerwaartse ontwerpbelasting volgens het windtunnelonderzoek. Data zijn niet precies herhaalbaar aangezien er grote spreiding zit in resultaten van windtunnelonderzoek. Data zijn niet correct doordat er fouten in het 3D model zitten waardoor het waarschijnlijk is dat de normaalkracht tijdens de instorting wordt onderschat. Daarnaast wordt de windbelasting volgens de norm gecontroleerd waartoe volgt dat de windbelasting in het ontwerp niet correct was. Dit dekt echter maar een deel van de hypothese.	Nee, niet herhaalbaar (windtunnel-onderzoek)	Ja	Nee, fouten in 3D model
3		Belastingcombinaties in norm en PVE anders dan aangenomen (bijv. combinatie sneeuw met wind vergeten)	Vergelijk belastingcombinaties in het ontwerp met de norm.	Verschil in belastingcombinaties tussen ontwerp en norm	Ja/Nee	Niet, volledig, niet alle belasting soorten bekeken zoals thermische belasting	Ja	Ja	Niet relevant, want dit betreft een vergelijking van belastingcombinaties ontwerp en norm (das geen directe oorzaak)	Hypothese verworpen (5.2)	Het is aannemelijk dat de belastingcombinaties correct zijn beschouwd voor de belastingen die als uitgangspunt zijn gehanteerd. Echter, gesteld is dat geen neerwaartse wind is beschouwd en ook geen thermische belasting welke beide ook in een belastingcombinatie zouden moeten terugkomen. Daarnaast is geen accidentele belastingcombinatie beschouwd, om bijvoorbeeld de invloed van bezwijken van een kritisch element te beschouwen. De verzamelde informatie is dus niet voldoende compleet.	Ja	Nee, belastingen voor combinaties ontbreken	Ja	Nee, op basis van incomplete data
Belasting-effecten	4	Constructief principe in werkelijkheid anders dan geschematiseerd (bijv. scharnierende of momentvast verbindingen, verstijfingen fundering anders dan aangenomen)	Vergelijk ontwerpuitgangspunten stijfheid verbindingen tussen regels en diagonalen met uitgevoerde staalconstructie.	Invloed van schematisering op belastingeffecten in bezwoken verbinding	Invloed < significante invloed	Niet volledig, alleen schematisering verbinding diagonalen bekeken en geen andere schematiseringen	Ja	Nee, significant niet gedefinieerd	Niet relevant, want dit betreft alternatieve berekeningen van de krachten in de ontwerpfase (das geen directe oorzaak) In dit geval zal tijdens bezwijken de verbindingen tussen regels en diagonalen (met deze verhouding tussen de afmetingen van de regels en diagonalen) zich gedragen als scharnieren	Hypothese verworpen (5.2)	De belastingeffecten door momentvaste verbindingen (bijvoorbeeld piekspanningen in het detail) of bijvoorbeeld een verschil in verstijfing van de lasverbindingen met verschillende afmetingen is niet gerapporteerd. Er is ook geen analyse van de invloed van verstijfingen van de fundatie. De data en toetsing van RHDHV kunnen dus niet verder gecontroleerd worden.	Nee, niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar
	5	Berekende belastingeffecten onjuist (bijv. verkeerde staalspanningen)	Controleer de ontwerpberekening van de belastingeffecten spanningen en krachten) met de in het ontwerp aangehouden belastingen, belastinggevallen, belastingcombinaties en schematisering	Belastingeffecten in ontwerp bevatten fouten	Ja/Nee	Ja	Ja	Ja	Niet relevant, want dit betreft controle van de berekening van de krachten in de ontwerpfase (das geen directe oorzaak)	Hypothese verworpen (5.2)	Er is geen reden om aan te nemen dat de globale staalspanningen niet juist zijn berekend door de staalconstructeur. Een beschouwing van de vergelijking van de krachten bepaald door staalconstructeur Romkes en RHDHV wordt gepresenteerd in Bijlage E - hoofdstuk 5. Er wordt geen volledig overzicht gegeven van de controle van alle belastingeffecten (bijvoorbeeld per belastinggeval) in het ontwerp waardoor dit niet goed verifieerbaar is. Het 3D model waarmee gecontroleerd wordt bevat aannames die niet correct zijn waardoor de toetsing ook niet correct kan zijn.	Ja	Nee, belasting-effecten ontbreken	Nee, fouten in 3D model	Nee, data niet betrouwbaar
Geometrie	6	Verkeerde afmetingen elementen staalconstructie (bijv. diameter buisprofiel te klein)	Vergelijk krachten en capaciteit elementen staalconstructie met in ontwerp aangehouden belastingen	Krachten en schade na instorting	Krachten < capaciteit en geen schade als krachten > capaciteit	Ja	Ja	Ja	Niet relevant, want dit betreft een vergelijking van krachten en capaciteit in de ontwerpfase (das geen directe oorzaak)	Hypothese verworpen (5.2)	Gesteld wordt dat aangeond is dat de ronde buisprofielen niet voldoen bij berekening van de uitgevoerde verbinding, maar dat dit geen invloed heeft gehad op de gefaalde constructie. De beschouwing van de buisprofielen zijn onvoldoende verifieerbaar gerapporteerd in de detailanalyse om te kunnen toetsen. In de detailanalyse zijn ze dikker aangenomen dan werkelijk om te voorkomen ze maatgevend worden. Het lijkt echter over lokale spanningen te gaan ter plaatse van de aansluiting met andere profielen, waardoor het om een detailtoetsing zou gaan. De analyse is niet compleet omdat er geen vergelijkende analyse gepresenteerd wordt van de capaciteit van alle elementen.	Nee, niet verifieerbaar	Nee, element-controles ontbreken	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar
	7	Verkeerde afmetingen verbindingen staalconstructie (bijv. diktes schets- en kopplaten)	Vergelijk de capaciteit van detail "ontwerp zonder fouten" met de capaciteit van de aangesloten bovenregel. Vergelijking uitgevoerd in Bijlage F	Afname capaciteit verbinding in %	Afname (17%)> significant afname; in vergelijking met ontwerp is afname 13%	Niet volledig, vergelijking t.o.v. capaciteit bovenregel en niet capaciteit uitgevoerde ontwerp	Ja	Nee, significant niet gedefinieerd	Niet relevant, want het betreft een alternatief ontwerp detail in de ontwerpfase. (das geen directe oorzaak)	Hypothese bewezen (5.1.2)	In 5.1.2 wordt gesteld dat doordat de kopplaat niet stijf genoeg is de capaciteit met 17% wordt gereduceerd. Deze 17% wordt echter bepaald met een fictief model met een dikke koker en dikke lassen, waarvan ook de mesh niet optimaal is. Dit is derhalve niet correct. Ook kan niet gesteld worden dat de verbinding fout was, aangezien de verbinding voldoende capaciteit had (2250kN wordt gesteld in het fictieve model - bijlage F p.32) voor de door de staalconstructeur opgegeven maximale staafkracht op het detail van 1667kN. Ook was de ontwerpbelasting van de staalconstructeur hoger dan die door RHDHV berekende werkelijke belasting bij instorting (881kN). De analyse voldoet niet volledig aan het criterium van herhaalbaarheid aangezien een andere uitvoerder de invloed van het ontwerp van de verbinding mogelijk anders had geanalyseerd en daardoor gekwantificeerd. Er is nu een alternatief detail ontworpen om te kunnen toetsen. Doordat de mesh van het detailmodel niet fijn genoeg was, is de analyse mogelijk onnauwkeurig.	Nee, niet herhaalbaar	Ja	Nee, fouten in detailmodel	Nee, data niet betrouwbaar
Materiaal	8	Verkeerde afmetingen lassen staalconstructie (bijv. keeldiktes lassen te klein)	Vergelijk de ontwerp kracht met capaciteit ontwerp. Kracht bepaald in Bijlage E, op basis van windbelasting Bijlage C. Capaciteit bepaald in Bijlage F.	Krachten inverbinding [kN]	Kracht ontwerp > capaciteit ontwerp	Ja	Ja	Ja	Niet relevant, want dit betreft een vergelijking van belastingen en capaciteit in de ontwerpfase (das geen directe oorzaak)	Hypothese verworpen (5.2)	Op basis van een detailanalyse met 8mm lasdikte wordt gesteld dat de lasverbinding niet de zwakste schakel was voor de bovenverbinding van de dakspanen. Dit is een logisch gevolg van de gekozen modellering in bijlage F waarbij het lasmateriaal als sterker is verondersteld dan de koker. (overmatching) Conform staallekeningen en detailberekening Romkes (20190812142357.pdf) zou de lasdikte zelfs 1.2 x de minimale plaatdikte moeten zijn (1.2 x 8mm = 9.6mm). Echter, er is geen lastekening gevonden waarop precies is aangegeven hoe deze las gemaakt had moeten worden.	Ja	Ja	Ja	Ja
	9	Verkeerde materiaaleigenschappen staalconstructie (bijv. S235 i.p.v. S355)	Vergelijk berekende en gespecificeerde materiaaleigenschappen in de diverse ontwerpdocumenten	Verschil in berekende en gespecificeerde treksterkte/vloeigrens	Ja/Nee	Niet volledig, onduidelijk welke materiaal eigenschappen zijn bekeken, maar het is aannemelijk dat alleen treksterkte/vloeigrens is bekeken en niet andere materiaal-eigenschappen	Ja	Ja	Niet relevant, want dit betreft een vergelijking in de ontwerpfase (das geen directe oorzaak)	Hypothese verworpen (5.2)	Er is geen reden om aan te nemen dat in de ontwerpfase verkeerde staalkwaliteiten zijn gehanteerd in het ontwerp en de controle. De toetsing van de hypothese is incorrect verwoord "De staalkwaliteit in de ontwerpberekeningen) komt overeen met de in het ontwerp bepaalde geometrie en belastingeffecten."	Ja	Ja	Ja	Ja
Oppervlakte-behandelingen	10	Verkeerde oppervlaktebehandeling staalconstructie	Controleer de controles van oppervlakte behandeling bij opening stadion op basis van archiefgegevens	Afwijkingen van controles bij opening stadion	Geen/Wel	Niet volledig, vergelijking met oppervlaktebehandeling van stadions die al meerdere jaren in gebruik zijn en die geen corrosie tonen, zou een betere toets zijn	Ja	Ja	Niet relevant, want dit betreft een vergelijking in de ontwerpfase (das geen directe oorzaak)	Hypothese verworpen (5.2)	De archiefgegevens tonen aan dat controles van oppervlaktebehandelingen zijn uitgevoerd. Los van de controle van de oppervlaktebehandeling zou echter wel gesteld kunnen worden dat er geen robuuste oppervlaktebehandeling in het ontwerpproces is gekozen. Het is aannemelijk dat bijvoorbeeld bij toepassing van thermisch verzinkte profielen de kritische verbinding van as 40 niet gecorrodeerd was.	Ja	Ja	Ja	Ja
Inkoop en inspectie	11	Verkeerde materiaaleigenschappen staalconstructie (bijv. verkeerd lastoevoegmateriaal gebruikt of ingekocht, verkeerde legeringen in moedermateriaal, staalkwaliteit bevestigingsmiddelen onjuist)	Vergelijk de materiaaleigenschappen die toegepast zijn met de materiaaleigenschappen die vermeld staan op de ontwerpdocumenten. Treksterkte/vloeigrens/breukrek/doorsnede reductie zijn bepaald voor 5 locaties voor de verbindingen van boven- en onderregels van vakwerklegger 39. Tevens zijn voor op diverse plaatsen van boven- en onderregels van vakwerkleggers 39 t/m 41 de Vickers hardheid bepaald van aangesloten staal elementen, warmtebehandelde zone en las. De Vickers hardheid heeft voor staal een relatie met de treksterkte. Deze relatie is echter niet te kwantificeren. Beiden onderzoeken zijn uitgevoerd door een gespecialiseerd bureau SGS in Bijlage C. Als een lagere treksterkte/vloeigrens wordt aangetroffen beoordeeld of het onderdeel het beginpunt was van de instorting.	Voor sterkte: spanningen [N/mm ²]; voor hardheid: afwijking van Vickers hardheid [VK] vergeleken van Vickers hardheid bij S355 (160 VK); beginpunt instorting: als onderdeel een treksterkte < treksterkte S355 heeft, check of dit onderdeel beginpunt is van instorting	Treksterkte < treksterkte S355: Hardheid: afwijking > significante afwijking; Begintpunt instorting: Ja/nee	Niet volledig, materiaaleigenschappen die taaiheid vaststellen ontbreken	Ja	Nee, significant niet gedefinieerd	Relevant, afwijkende materiaaleigenschappen t.o.v. ontwerp is een factor die een invloed kan hebben op de capaciteit als functie van de tijd.	Hypothese verworpen (5.2)	Er wordt gesteld dat uit het materiaalonderzoek blijkt dat alleen de kopplaat van 39-1 een lagere staalkwaliteit dan S355 had en dat dit geen invloed heeft gehad op het instorten. Ten eerste is het niet zo dat alle bezwoken elementen zijn onderzocht: alleen een vijftal kritische elementen op as 39 (SGS Intron, Beoordelen bezwoken lassen AFAS stadion tabel 4). Aangezien één op de vijf een lagere materiaalkwaliteit had dan voorgeschreven was het logisch geweest ook op de andere assen onderzoek uit te voeren. Ten tweede zijn de lassen op de sterkte-technisch mindere kopplaten juist bezwoken wat aanvullende testen van de kopplaten logisch maakt. Er zijn geen sterkte testen gerapporteerd van de lassen en derhalve kan niet met zekerheid gesteld worden dat de materiaalkwaliteit van de lassen voldoende was.	Ja	Nee, niet alle spanten met trektesten onderzocht	Ja	Nee, data niet voldoende compleet.
	12	Verkeerde afmetingen elementen staalconstructie (bijv. profielen niet conform ontwerp)	Vergelijk afmetingen elementen (profielen) tussen ontwerp en uitvoering	Afmetingen [mm]	Afmetingen uitvoering < afmetingen ontwerp	Ja	Ja	Ja	Relevant, afwijkende afmetingen t.o.v. ontwerp is een factor die een invloed kan hebben op de capaciteit als functie van de tijd.	Hypothese verworpen (5.2)	Er wordt in paragraaf 5.2 gerapporteerd dat er één profiel met een grotere wanddikte in de productiefase is uitgevoerd dan in de ontwerpdocumenten aangegeven. Dit zou geen invloed hebben gehad op de instorting, hetgeen aannemelijk is. Echter, in paragraaf 5.2 wordt gesteld dat: "De minimale waarde van de wanddikte soms erg laag is (5,7 mm bij vakwerklegger 29)" en "Lagere waarden voor de wanddikten aan één zijde van het ingestorte deel van het dak gevonden worden (nummers vakwerkleggers < 37)". Er wordt geen bron genoemd, maar aangenomen wordt dat dit het RHDHV rapport Resultaten van het niet destructief onderzoek van de lassen van de bouwdelen B,C en D van het AFAS stadion te Alkmaar betreft. De aangevoerde reden van het verwerpen van de hypothese klopt dus niet. Maar het is niet aannemelijk dat ter plaatse van de gefaalde lasverbinding de wanddikte ook veel te dun was en dat dit heeft bijgedragen aan de instorting.	Ja	Ja	Ja	Nee, te dunne wanddiktes niet genoemd in toets
	13	Verkeerde afmetingen verbindingen staalconstructie (bijv. diktes schets- en kopplaten niet conform ontwerp)	Vergelijk afmetingen verbindingen tussen ontwerp en uitvoering.	Afwijkingen afmetingen [mm]	Ja/Nee	Ja	Ja	Ja	Relevant, afwijkende afmetingen t.o.v. ontwerp is een factor die een invloed kan hebben op de capaciteit als functie van de tijd.	Hypothese verworpen (5.2)	Er wordt gesteld dat er geen afwijkingen zijn vastgesteld met betrekking tot de afmetingen van de verbindingen. Echter, doordat er geen goede detailtekeningen beschikbaar zijn uit de ontwerpfase is dit lastig te beoordelen. Wat wel opmerkelijk is, is dat de afmeting van de kopplaat op staallekening as 39 (A114.pdf) als b x h x d = 170 x 170 x 20 lijkt te zijn aangegeven en dat in het SGS Intron onderzoek Beoordelen bezwoken lassen AFAS stadion p.24 b x h x d = 175 x 175 x 20 wordt gerapporteerd. In het toegepaste detail leidt dit tot 5mm minder ruimte voor de lassen.	Ja	Ja	Ja	Nee, enkel aandacht voor dikte niet voor afmeting.
	14	Belasting hoger/ anders dan aangenomen (bijv. zwaardere boxen of zwaardere lampen ingekocht)	Vergelijk eigen gewicht dakopbouw tussen ontwerp en instorting.	Gewichten [kg]	Gewichten dakopbouw instorting > gewichten dakopbouw ontwerp	Ja	Ja	Ja	Relevant, aanvullende belastingen tijdens assemblage is een factor die een invloed kan hebben op de belastingen als functie van de tijd.	Hypothese verworpen (5.2)	De hypothese wordt verworpen op basis van de stelling dat het werkelijke gewicht lager was dan het ontwerpgewicht. De in het rapport beschouwde belasting van de zonnepanelen is echter te laag en er wordt geen informatie gegeven over overige belastingen zoals speakers. Het is echter niet aannemelijk dat de werkelijke permanente belasting hoger was dan de door de staalconstructeur aangenomen 'maximale dakbelasting'. Onder deze hypothese zou logischerwijs de windbelasting ook vallen. Zie toetsings opmerkingen hypothese 2 hierboven.	Ja	Nee, niet alle belastingen op dak vergeleken	Nee, fouten in bepaling gewicht zonnepanelen	Nee, data niet betrouwbaar

Volledige hypothesetabel		Toetsing stap 3: opstellen van hypothesen				Toetsing stap 4: toetsen van hypothesen										
RIHDHV - Hfst 3.3 Hypotheses - Tabel 7 Mogelijke technische oorzaken.																
Plaats in Delftse aanpak	Nr.	Technische oorzaak	Toets Expliciet geformuleerd, op basis van de impliciete "Technische oorzaak" / Hypothese. Deze toets in relatie tot kolommen rechts: toetsingsgrootheid en toetscriterium.	Toetsingsgrootheid (bv. Spanning)	Toetscriterium (impliciet of expliciet)	Dekt de toets de hypothese?	Is de hypothese ...			RIHDHV rapport, Testen hypothesen, hfst. 5.	Conclusie	Toetsingsopmerkingen op basis van afgeleide toets en bijbehorend toetscriterium	Bij de toetsing van de hypothesen ...			
							Toetsbaar	Weerigbaar	Relevant				Zijn de data verifieerbaar en herhaalbaar?	Zijn de data compleet?	Zijn de data correct?	Is de toetsing correct?
Voorbereiding en assemblage	15	Introduceren belastingen tijdens assemblage waar bij ontwerp geen rekening mee is gehouden (bijv. met grote kracht niet-passende delen assembleren)	Geen toets	Geen toetsingsgrootheid		nvt	Nee	Nee	Relevant, aanvullende belastingen tijdens assemblage is een factor die een invloed kan hebben op de belastingen als functie van de tijd.	Hypothese niet beschouwd i.v.m. onvoldoende informatie (3.3)	Geen toetsing mogelijk.	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	
	16	Optreden schade tijdens assemblage (bijv. verkeerd optillen of ondersteunen onderdelen, met grote kracht niet-passende delen assembleren)	Geen toets	Geen toetsingsgrootheid		nvt	Nee	Nee	Relevant, schade tijdens assemblage is een factor die een invloed kan hebben op de capaciteit als functie van de tijd.	Hypothese niet beschouwd i.v.m. onvoldoende informatie (3.3)	Geen toetsing mogelijk.	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	
Lassen (alles binnen de HAZ)	17	Geometrie lassen niet conform ontwerp (bijv. keeldiktes te klein)	Vergelijk de capaciteit van uitgevoerde detail (zonder scheur) met de capaciteit van de aangesloten staven en onderzoek de invloed van de afmetingen van de lassen. Vergelijking uitgevoerd in Bijlage F	Afname capaciteit verbinding in %	Afname (39%) > significant afname; in vergelijking met ontwerp is afname 42%	Niet volledig, vergelijking t.o.v. capaciteit bovenregel en niet capaciteit ontwerp	Ja	Nee, significant niet gedefinieerd	Relevant, de grootte van de lassen is een factor die een invloed kan hebben op de capaciteit van de verbinding als functie van de tijd.	Hypothese bewezen (5.1.3)	Met het materiaalonderzoek is voldoende aangetoond dat de lasafmetingen niet conform ontwerp waren. Echter, in 5.1.3 wordt gesteld dat de gemeten lasdoorsnede de capaciteit van de verbinding met ongeveer 39% reduceren. Dit suggereert precisie, maar doordat de lassen zo slecht waren en de mesh van het detailmodel ook niet verijnd genoeg was, kan hier geen kwantitatieve uitspraak over gedaan worden. Het is aannemelijk dat een andere uitvoerder tot andere resultaten was gekomen, omdat de lassen anders zijn gemodelleerd of een andere methode zou zijn gebruikt voor toetsing. Het is bovendien niet volledig uit te sluiten dat er lokaal geen las aanwezig was bij verbinding spant 40. De gemiddelde lasdikte die ingeschat is door SGS voor zijde C(onder) en zijde D (zijkant) is als ca. 2mm gerapporteerd met de algemene opmerking dat de meetonauwkeurigheid 0,5mm is. Er is geen las gemeten aan zijde C ter plaatse van de koker.	Nee, niet herhaalbaar.	Ja	Nee, mesh lassen niet voldoende fijn.	Nee, data niet betrouwbaar	
	18	Materiaaleigenschappen lassen niet zoals beoogd (bijv. brosse kristallijne structuur)	Vergelijk van hardheid lasmateriaal met eis voor hardheid van staal met een vloei grens van 360 N/mm2. Doel is om aan te tonen materiaaleigenschappen lassen voldoen aan de normen. Uitvoering hardheid metingen door gespecialiseerd bureau SGS in Bijlage D.	Vickers-hardheid; significante afwijking Vickers-hardheid patroon over moeder materiaal, heat affected zone en las	Vickers hardheid; Vickers-hardheid las > Vickers hardheid staal; significante afwijking Vickers hardheid patroon: ja/nee	Niet volledig; andere relevante materiaaleigenschappen zoals taaiheid worden niet bekeken	Ja	Nee, significant niet gedefinieerd	Relevant, de materiaaleigenschappen van lassen is een factor die een invloed kan hebben op de capaciteit als functie van de tijd.	Hypothese verworpen (5.2)	Het is op basis van de hardheidstesten niet aannemelijk dat de lassen te hard waren.	Ja	Ja	Ja	Ja	
	19A	Defecten in de lassen (bijv. gasinsluitingen, scheuren)	Visuele inspectie van lassen van alle bezwiken verbindingen van vakwerklijger 38 t/m 41 door gespecialiseerd onderzoeksbureau SGS in Bijlage D	Toetsing lasdefecten bij aanwezige lassen volgens gedocumenteerde methoden (op basis van RHDHV-rapport paragraaf 5.1.3)	Lasdefecten zijn expliciet benoemd en uitvoerig gedocumenteerd	Niet volledig, bij het SGS onderzoek na de instorting kan door corrosie aan de verbinding van vakwerklijger 40 niet meer achterhaald worden of er lasfouten aanwezig waren	Ja	Ja	Relevant, lasdefecten kunnen invloed hebben op de capaciteit van de verbinding als functie van de tijd.	Hypothese bewezen (5.1.3)	Voldoende aangetoond met materiaalonderzoek. Echter invloed is niet gekwantificeerd terwijl dit bij andere analyses wel het geval is. Daardoor ontstaan onduidelijkheden in het rangschikken van hypothesen.	Ja	Ja	Ja	Nee, lasdefect zijkant bovenverbinding as 40 (zijde D) is niet beschouwd	
	19B	Defecten in de lassen (bijv. gasinsluitingen, scheuren)	Visuele inspectie van lassen van alle bezwiken verbindingen van vakwerklijger 38 t/m 41 door gespecialiseerd onderzoeksbureau SGS in Bijlage D	Toetsing lasdefecten bij lassen van de verbinding van de onderregel van vakwerkspant 40 (op basis van RHDHV-rapport paragraaf 5.3)	Lasdefecten zijn expliciet benoemd en uitvoerig gedocumenteerd	Niet volledig, lasdefecten in de op trek belaste verbinding van de bovenregel worden niet beschouwd.	Ja	Ja	Niet relevant, de lasdefecten bevinding zich in een op druk belaste verbinding.	Bijdrage zeer beperkt (5.3)	Lasdefecten ter plaatse van ondervinding had lasdefecten, dit is voldoende aangetoond	Ja	Ja	Ja	Ja	
	20	Introduceren grote restspanning tijdens lassen (bijv. voorverhitting moedermateriaal, startpunt lassen)	Geen toets			Ja	Nee	Nee	Relevant, de aanwezigheid van restspanningen is een factor die een invloed kan hebben op de capaciteit als functie van de tijd.	Hypothese niet beschouwd i.v.m. onvoldoende informatie (3.3)	Geen toetsing mogelijk.	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	
	21	Oppervlaktebehandeling onvoldoende dik aangebracht (bijv. verlaag lokaal te dun of plek vergeten)	Visuele inspectie van oppervlakken constructie, schatting dikte en aantal lagen van coating; type coating bepaald door gespecialiseerd onderzoeksbureau SGS in Bijlage D.	Aanwezigheid coating; aantal lagen; aanwezigheid roest	Aanwezigheid van 2 lagen van ongeveer 1mm; geen roestvorming	Ja	Ja	Nee	Relevant, aanwezigheid oppervlaktebehandeling is een factor die een invloed kan hebben op corrosie en daarom op de capaciteit als functie van de tijd.	Hypothese verworpen (5.2)	Er wordt gesteld dat op basis van archiefgegevens van controle van de oppervlaktebehandelingen bij opening van het stadion de hypothese verworpen wordt. Onduidelijk is welke delen precies gecontroleerd zijn. De uitkomsten van het onderzoek van SGS worden niet meegenomen terwijl ter plaatse van de knooppunten corrosie en putcorrosie is vastgesteld.	Ja	Nee, niet de resultaten van SGS meegenomen	Ja	Nee, data niet voldoende compleet.	
22	Materiaaleigenschappen oppervlaktebehandeling onvoldoende (bijv. verf niet corrosiewerend)	XFR en FTIR metingen bepalen de materiaal eigenschappen van de verf. Uitgevoerd door gespecialiseerd bureau SGS in Bijlage D	Geen toetsingsgrootheid		Ja	Nee	Nee	Niet relevant, want materiaaleigenschappen van oppervlaktebehandeling is niet een factor die een directe invloed kan hebben op de capaciteit als functie van de tijd.	Hypothese verworpen (5.2)	Er wordt gesteld dat op basis van archiefgegevens van controle van de oppervlaktebehandelingen bij opening van het stadion de hypothese verworpen wordt. Onduidelijk is welke delen precies gecontroleerd zijn. De uitkomsten van het onderzoek van SGS worden niet meegenomen terwijl ter plaatse van de knooppunten corrosie en putcorrosie is vastgesteld.	Ja	Nee, niet de resultaten van SGS meegenomen	Ja	Nee, data niet voldoende compleet.		
Transport en montage	23	Introduceren belastingen tijdens montage waar bij ontwerp geen rekening mee is gehouden (bijv. met grote kracht niet-passende delen monteren, incorrect gebruik stel mogelijkheden tijdens montage)	Geen toets	Geen toetsingsgrootheid		nvt	Nee	Nee	Relevant, want het introduceren van aanvullende belastingen hebben een invloed op de belastingen als functie van de tijd.	Hypothese niet beschouwd i.v.m. onvoldoende informatie (3.3)	Geen toetsing mogelijk.	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	
	24	Beschadiging constructie tijdens transport of montage fase (bijv. verkeerd lijzen vakwerklijgers, beschadiging oppervlaktebehandeling door stoten, onjuist ondersteunen constructie tijdens monteren of aanpassingen constructie in het werk)	Geen toets	Geen toetsingsgrootheid		nvt	Nee	Nee	Relevant, want beschadiging is een factor die invloed kan hebben op de capaciteit als functie van de tijd.	Hypothese niet beschouwd i.v.m. onvoldoende informatie (3.3)	Geen toetsing mogelijk.	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	
	25	Constructieonderdelen niet gemonteerd	Controle geometrie aan de hand van tekeningen en point cloud	Afwijkingen tussen tekeningen en point cloud	Ja/Nee en point cloud	Niet volledig, zeer lastig te bepalen, onmogelijk te bepalen als het gaat om materiaal-eigenschappen of details gaat	Ja	Ja	Relevant, want het ontbreken van onderdelen is een factor die invloed kan hebben op de capaciteit als functie van de tijd.	Hypothese verworpen (5.2)	Op basis van point cloud gegevens wordt de hypothese verworpen. Deze data worden echter niet overzichtelijk gepresenteerd. Het is bovendien lastig te bepalen of constructieonderdelen niet gemonteerd zijn met point cloud gegevens van na de instorting. Eventuele niet aanwezige bouten van bijvoorbeeld stabiliteits elementen zijn haast onmogelijk om te traceren met deze methode.	Nee, niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	
	26	Onjuiste constructieonderdelen gemonteerd (bijv. onderdelen op verkeerde locatie gemonteerd)	Controle geometrie aan de hand van tekeningen en point cloud	Afwijkingen tussen tekeningen en point cloud	Ja/Nee en point cloud	Nee, zeer lastig te bepalen, onmogelijk te bepalen als het gaat om materiaal-eigenschappen of details gaat	Ja	Ja	Relevant, want montage verkeerde onderdelen is een factor die invloed kan hebben op de capaciteit als functie van de tijd.	Hypothese verworpen (5.2)	Op basis van point cloud gegevens wordt de hypothese verworpen. Deze data worden echter niet overzichtelijk gepresenteerd. Het is bovendien lastig te bepalen of de juiste constructieonderdelen gemonteerd zijn met point cloud gegevens van na de instorting.	Nee, niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	
	27	Constructieonderdelen onjuist gemonteerd (bijv. verkeerde aandraaimoment, verkeerde boutdiameters, vakwerklijger ondersteboven)	Controle geometrie aan de hand van tekeningen en point cloud	Afwijkingen tussen tekeningen en point cloud	Ja/Nee en point cloud	Nee, onmogelijk te bepalen	Ja	Ja	Relevant, want onjuiste montage is een factor die invloed kan hebben op de belasting als functie van de tijd.	Hypothese verworpen (5.2)	Op basis van point cloud gegevens wordt de hypothese verworpen. Deze data worden echter niet overzichtelijk gepresenteerd. Het is bovendien lastig om te bepalen of constructieonderdelen niet gemonteerd zijn met point cloud data van na de instorting. Eventuele verkeerd aanwezige bouten zijn haast onmogelijk om te traceren met deze methode.	Nee, niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	
Productiefase	28	Constructieonderdelen en bouwkundige afwerking niet in juiste volgorde gemonteerd	Geen toets	Geen toetsingsgrootheid		nvt	Nee	Nee	Relevant, want montage in een andere volgorde is een factor die invloed kan hebben op de belasting als functie van de tijd.	Hypothese niet beschouwd i.v.m. onvoldoende informatie (3.3)	Geen toetsing mogelijk.	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	
Productiefase	29	Belasting in werkelijkheid anders dan aangenomen tijdens ontwerp (bijv. overbelasting (extreme belasting hoger dan norm, bijv. windsnelheid norm kleiner dan windsnelheid praktijk))	Vergelijking windsnelheden levensduur en norm. Windsnelheid analyse in Bijlage B	Windsnelheden	Windsnelheid levensduur > windsnelheid norm	Niet volledig, er kunnen nog andere belastingen dan alleen wind zijn die zorgen voor een verschil	Ja	Ja	Niet relevant, want dit is een vergelijk belastingen ontwerp en instorting (dus geen directe oorzaak)	Hypothese verworpen (5.2)	Er wordt gesteld dat de hypothese verworpen wordt aangezien windsnelheden gedurende de levensduur lager zijn dan in de norm. Beiden zijn getest met windtunnelonderzoek en de resulterende belasting op de constructie was significant lager dan in de norm.	Nee, niet herhaalbaar (windtunnelonderzoek)	Ja	Ja	Ja	Ja, data niet groot verschil om onzekerheid windtunnelonderzoek te dekken.
	30	Belastingcombinaties in werkelijkheid anders dan aangenomen	Vergelijking belastingcombinaties instorting met maatgevende belastingcombinaties norm	Er zijn geen belastingcombinaties opgetreden die de maatgevende belastingcombinaties in de norm overschrijden	Ja/Nee	Ja	Ja	Niet relevant, want dit is een vergelijk belastingen ontwerp en instorting (dus geen directe oorzaak)	Hypothese verworpen (5.2)	Akkoord wat betreft de beschouwde belastingen. Echter, niet alle belastingen zijn beschouwd die ook in de combinaties terugkomen, zoals thermische belasting. De beschouwing van windbelasting volgens de NEN6702 is niet nauwkeurig. Aangehouden hellingshoek is 15 graden, terwijl dit 12 graden is. Factor edim is niet beschouwd.	Ja	Nee, niet alle belastingen meegenomen in analyse	Nee, niet volledig volgens NEN6702	Nee, data niet betrouwbaar		
	31	Beschadiging van de constructie door externe oorzaak tijdens de levensduur (bijv. botsing, bewuste beschadigingen)	Verzamelen informatie van beschadiging van constructie door externe oorzaak	Is er informatie gevonden over beschadiging van constructie door externe oorzaak	Ja/Nee	Ja	Ja	Ja	Relevant, want beschadiging is een factor die invloed kan hebben op de capaciteit als functie van de tijd.	Hypothese verworpen (5.2)	Er wordt gesteld dat er geen informatie is gevonden waaruit blijkt dat de constructie door een externe oorzaak is beschadigd. Dit wordt niet verder onderbouwd en kan derhalve niet getoetst worden.	Nee, niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	Niet verifieerbaar	

Volledige hypothesetabel		Toetsing stap 3: opstellen van hypothesen					Toetsing stap 4: toetsen van hypothesen								
RHDHV - Hfst 3.3 Hypotheses - Tabel 7 Mogelijke technische oorzaken.							RHDHV rapport, Testen hypothesen, hfst. 5.								
Plaats in Delftse aanpak	Nr.	Technische oorzaak	Toets <i>Expliciet geformuleerd, op basis van de impliciete "Technische oorzaak" / Hypothese. Deze toets in relatie tot kolommen rechts: toetsingsgrootheid en toetscriterium.</i>	Toetsingsgrootheid (bv. Spanning)	Toetscriterium (impliciet of expliciet)	Dekt de toets de hypothese?	Toetsbaar	Weerlegbaar	Is de hypothese ... Relevant	Conclusie	Toetsingsopmerkingen <i>op basis van afgeleide toets en bijbehorend toetscriterium</i>	Bij de toetsing van de hypothesen ...			
												Zijn de data verificerbaar en herhaalbaar?	Zijn de data compleet?	Zijn de data correct?	Is de toetsing correct?
Gebruiksfase	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)	Onderzoek naar de aanwezigheid en mate van corrosie vakwerkligger 40 door gespecialiseerd onderzoeksbureau SGS in Bijlage D	Dikte van de corrosielagen en de afname van wanddikte buisprofiel en kopplaat	Geen toetscriterium	Niet volledig, ontwerpuitgangspunt corrosie ontbreekt - aanname is dat er tijdens het ontwerp niet uit is gegaan van corrosie	Nee	Nee	Relevant, want corrosie is een factor die invloed kan hebben op de capaciteit als functie van de tijd.	Hypothese bewezen (5.1.4.2)	Voldoende aangetoond met materiaalonderzoek dat er significante corrosie aanwezig was. N.B. In het ontwerp werd geen rekening gehouden met corrosie.	Ja	Ja	Ja	Ja
	33	Vermoeingschade aan de staalconstructie (bijv. laag- of hoog-cyclische vermoeing)	Hoog-cyclische vermoeing: Onderzoeken breukvlakken lassen op mogelijke vermoeingschade door gespecialiseerd onderzoeksbureau SGS in Bijlage D en analyse belastingwisselingen, op basis van windsnelheden Bijlage B; Laag-cyclische vermoeing: Onderzoeken optredende plastische rekken lassen in Bijlage F en analyse aantal belastingwisselingen, basis van windsnelheden in Bijlage B, binnen plastisch rekgebied.	Hoog-cyclische vermoeing: breukvlakken lassen laten typisch patroon zien van hoog-cyclische vermoeing, aantal belastingwisselingen, laag-cyclische vermoeing: aantal belastingwisselingen lassen in combinatie met plastische rekken in domein 1%-2,5%	Hoog-cyclische vermoeing: expliciet, breuk breukvlakken lassen verbindingen vakwerkliggers 39 t/m 41 vertonen geen typisch patroon van hoog-cyclische vermoeing; Laag-cyclische vermoeing: aantal belastingcycli is tussen 100 en 1000 met plastische rekken tussen 1% en 2,5%	Ja	Ja	Ja	Relevant, want hoog-cyclische en laag-cyclische vermoeing zijn factoren die invloed kunnen hebben op de capaciteit als functie van de tijd.	Hypothese bewezen (5.1.4.3)	Er wordt geconcludeerd dat hoog-cyclische vermoeing geen rol heeft gespeeld bij de instorting. Dit is echter niet bewezen, aangezien de lokale piekspanningen door lasfouten niet goed in beeld zijn gebracht. Bij veel lagere windsnelheden dan gerapporteerd kunnen al hoge spanningen zijn opgetreden waardoor ook hoog-cyclische vermoeing een rol heeft kunnen spelen. Vervolgens wordt in de paragraaf op basis van een analyse in paragraaf 4.9.2 gesteld dat vermoeing een rol kan hebben gesteld, waarna hypothese 33 over vermoeingschade bewezen wordt verklaard. Ten eerste bevat de analyse fouten, zoals gesteld in de toetsing van het detailmodel en tweede is bij het aannemen maken de hypothese nog niet bewezen. Aangezien overige degradatie wel genoemd wordt in het rapport in paragraaf 5.1.4 en 5.1.4.1, maar niet in een specifieke hypothese tijdens de gebruiksduur wordt hier nog het volgende over opgemerkt: In 5.1.4 wordt gesteld dat er al eerder een 40% groter belastingeffect is opgetreden. Dit is niet correct, aangezien het is bepaald met een 3d model dat fouten heeft, zoals de bepaalde krachten ten gevolge van zonnepanelen. In 5.1.4.1 wordt gesteld dat het waarschijnlijk is dat de scheur in de bovenverbinding van as 40 in januari 2007 is ontstaan. Dit is voldoende onderbouwd. Opgemerkt wordt wel dat aangezien de las volledig gecorrodeerd was een uitspraak hierover discutabel is, aangezien de las ook al had kunnen bezwijken bij een lagere belasting en dus op een ander tijdstip.	Nee, niet herhaalbaar	Nee, geen bewijs breukvlakken en analyse spanningswisselingen	Nee, onnauwkeurig detailmodel	Nee, data niet betrouwbaar
	34	Constructie/ belastingen aangepast tijdens de levensduur door gebruiker (bijv. elementen vervangen of verwijderd, pv-panelen toegevoegd, nieuwe boxen)	Vergelijk de aanname ontwerp eigen gewicht dak met eigen gewicht dak instorting incl. zonnepanelen	Eigen gewicht instorting	Eigen gewicht instorting inclusief zonnepanelen > aanname ontwerp	Nee	Ja	Ja	Niet relevant, want gaat om vergelijkende belasting ontwerp en instorten (dus geen directe oorzaak)	Hypothese verworpen (5.2)	Er wordt gesteld dat de aanname voor het eigen gewicht van de dakbelasting hoger is dan het uiteindelijke gewicht en dat daardoor de capaciteit niet overschreden is en het dus geen significante bijdrage heeft gehad aan de instorting. Dit is geen logische redenering. Als de zonnepanelen net de druppel waren voor de verzwakte constructie dan was de invloed significant. Bovendien zijn niet alle belastingen die aan het dak hangen door RHDHV in detail beschouwd. Ook zijn de aannamen voor gewicht zonnepanelen onjuist.	Ja	Nee, niet alle belastingen zijn beschouwd.	Nee, belasting zonnepanelen incorrect	Nee, data niet betrouwbaar

Toelichting

Voor inhoudelijke toetsing van opstellen hypothesen:

- Bepaal of de toets de hypothese dekt
- Reflecteer op onderwerpen:
 - Toetsbaar: er moet een toetscriterium en bijpassende toets ontwerpen kunnen worden met toetsingsgrootheden (wanneer is er sprake van een significante rol)
 - Weerlegbaar: de toets moet aantonen of de hypothese juist of onjuist is
 - Nauwkeurig: de hypothese moet voldoende nauwkeurig zijn, om de hypothese toetsbaar en weerlegbaar te maken
 - Relevant: de hypothese moet direct betrekking hebben op het doel van het onderzoek

Voor inhoudelijke toetsing van de toetsing van hypothesen:

- Bepaal of:
- Data verificerbaar en herhaalbaar: De verzamelde data en/of uitkomst(en) onderzoek(en) ten behoeve van het toetsingscriterium zijn voldoende gerapporteerd om te controleren. Aannemelijk is dat een andere uitvoerder tot dezelfde uitkomsten was gekomen voor de uitvoering van het toetsingscriterium.
 - Data compleet: De verzamelde data en/of uitkomst(en) onderzoek(en) zijn voldoende compleet om het toetsingscriterium betrouwbaar uit te voeren.
 - Data correct: De verzamelde data en/of uitkomst(en) onderzoek(en) zijn op een correcte wijze verzameld. Er zitten geen fouten in de analyses die een significante invloed hebben op de resultaten.

Appendix D

Belastingen

D1 Windbelasting en windtunnelonderzoek

In het RHDHV-rapport wordt aannemelijk gemaakt dat bezwijken van de verbinding van de bovenregel van vakwerkligger 40 mede veroorzaakt is door verticale winddrukken. Het rapport bevat een analyse van de windbelasting tijdens de levensduur (Bijlage B). En een rapportage van uitgevoerd windtunnelonderzoek (Bijlage C) waarmee winddrukken worden bepaald die weer gebruikt zijn als windbelasting op een 3D-model van een deel van de staalconstructie.

In onderstaande paragrafen worden beide analyses beschouwd.

D1.1 Windbelasting tijdens levensduur

In Bijlage B van het RHDHV-rapport wordt de windbelasting tijdens de levensduur onderzocht.

Hieronder wordt een opsomming gegeven van opmerkingen en een beschouwing van de rapportage:

- In paragraaf 1.1 wordt aangegeven dat gebruik is gemaakt van de weerstations Berkhout, de Kooy en Schiphol. Weerstation IJmuiden en Wijk aan Zee zijn niet meegenomen vanwege de ligging aan de kust. Ook wordt gesteld dat door een verschil in terreincondities tussen de weerstations en het AFAS Stadion het onmogelijk is om de exacte windsnelheid bij het AFAS Stadion te bepalen. Dit is een belangrijk gegeven aangezien later in het rapport wel wordt gesproken over de werkelijke winddrukken, maar deze zijn gebaseerd op de niet-exact bepaalde windsnelheden.
- In paragraaf 1.1.1 wordt gesteld dat meetstation Schiphol de beste inschatting geeft voor de windsnelheden bij het AFAS Stadion. Volgens het KNMI is station Berkhout het meest representatief voor Alkmaar. [Bron: “02 KNMI 2019-2998 getekende brief AZ-stadion.pdf”]
- In paragraaf 1.1.2 wordt gesteld dat de windsnelheden bij het AFAS Stadion vergelijkbaar zijn met de windsnelheden van de windstations. Er wordt echter niet aangegeven op welke informatie dit gebaseerd is en het is aannemelijk dat er lokale verschillen zijn.
- In paragraaf 1.1.2 wordt gepresenteerd dat er op 10-08-2019 uurgemiddelde windsnelheden gemeten zijn tot 17 m/s met windvlagen tot 26 m/s. Dit komt overeen met de getallen die het KNMI geeft voor station Berkhout. Figuur 4 en Figuur 5 uit de RHDHV-bijlage toont dat voor Schiphol een maximaal uurgemiddelde voor de windsnelheid van 16 m/s en maximale windvlaagsnelheid van 25 m/s is gemeten.
- In paragraaf 1.1.3 wordt in tabel 1 gepresenteerd met de grootse windvlaagsnelheden gemeten ter plaatse van meetstation Schiphol. De naamgeving van de kolommen met windvlaagsnelheid en uurgemiddelde zijn omgedraaid. Getoond wordt dat op in ieder geval 5 dagen significant hogere windbelastingen zijn gemeten; in 2007, 2013, 2015 en 2018.
- In paragraaf 1.1.3 wordt in figuur 6 de frequentie van uurgemiddelde windsnelheden getoond voor meetstation Schiphol. Geconcludeerd wordt dat er

127 keer een groter uurgemiddelde is gemeten dan 17 m/s. Opgemerkt wordt dat op de dag van de instorting het gerapporteerde uurgemiddelde 16 m/s was. Uurgemiddeldes in de grafiek van 17 en 16 m/s komen respectievelijk circa 60 en 110 keer voor. Ook geconcludeerd kan derhalve worden dat er circa 300 keer ($127 + 60 + 110$) een gelijk uurgemiddelde is gemeten als tijdens de instorting.

- In paragraaf 1.1.3 wordt aangegeven dat er op meerdere dagen in de periode 2018 en 2019 windsnelheden zijn geweest vergelijkbaar met de windsnelheid op 10 augustus 2019.



Figuur 3: Ligging van AFAS Stadion waar de sterkste windrichting met een rode pijl is aangegeven en het ingestort deel rood is omcirkeld. [Bron: RHDHV-rapport Bijlage B Figuur 3]

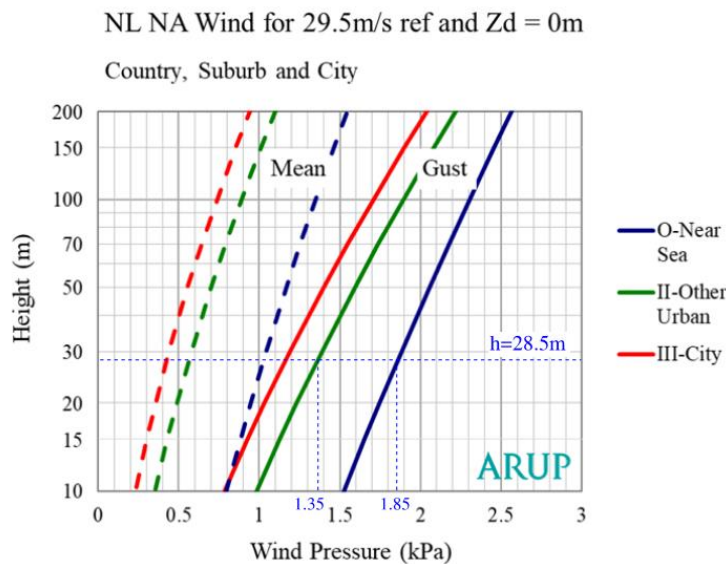
Geconcludeerd wordt dat er op vele dagen gelijke of hogere windsnelheden zijn gemeten ter plaatse van weerstations in de buurt van het AZ-stadion. Er kan geen precieze uitspraak gedaan worden over windsnelheden en gerelateerde windbelastingen doordat niet ter plaatse van het stadion zelf is gemeten.

D1.2 Windtunnelonderzoek

Windtunnelonderzoek is uitgevoerd door RWDI en gedocumenteerd in Bijlage E van het RHDHV-rapport. Hieronder wordt een opsomming van opmerking met betrekking tot dit onderzoek gegeven:

- Een windsnelheid van 18,2 m/s (10-minuten gemiddelde) op 10 meter hoogte in terreincategorie II wordt als basis aangehouden. Dit is echter een theoretische benadering die niet nauwkeurig de juiste terreinruwheid in rekening brengt. Onderstaand figuur toont de relatie tussen de terreinruwheid zoals gedefinieerd in NEN-EN 1991-1-4 Tabel NB.3 en de drie categorieën:
 - 0: zee of kustgebied
 - II: onbebouwd
 - III: bebouwd

Juist in Nederland is er een groot verschil tussen de winddruk volgend uit de keuze voor terreincategorie 0 of II. Uit de grafiek volgt een verschil in winddruk bij een windvlaag van ca. 30 tot 40 %. Het is waarschijnlijk dat de werkelijke terreinruwheid zich tussen de ruwheden bevindt zoals gespecificeerd voor terreincategorie 0 en II en dat de resulterende winddruk daardoor ca. 10 tot 20 % hoger is dan nu volgend uit het windtunnelonderzoek.



Figuur 4 Winddruk op basis van de terreincategorie en hoogte conform NEN-EN 1991-1-4.

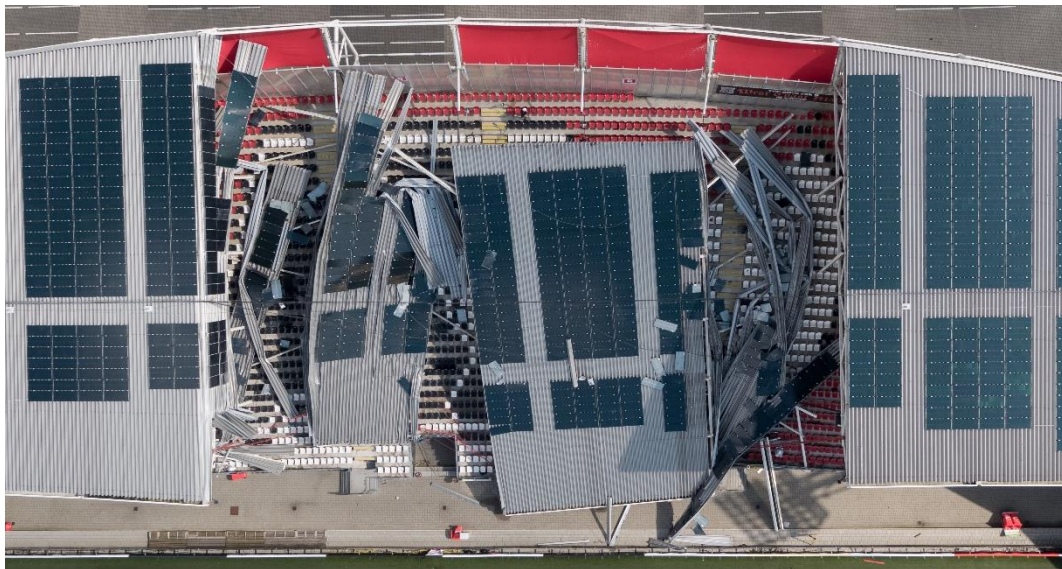
- Windrichtingen worden beschouwd in het windtunnelonderzoek die minder relevant zijn voor de locatie en het onderzoek naar de instorting. Het was logisch geweest om op zuidwestenwind te focussen; de windrichting ten tijde van de instorting. [Bron: "02 KNMI 2019-2998 getekende brief AZ-stadion.pdf"]
- Een lineaire respons analyse is uitgevoerd, waarbij het aannemelijk is dat de piekbelastingen voor de geometrie van de AZ-staalconstructie onderschat worden.
- Er is geen norm voor windtunnelonderzoek en resultaten van windtunnelonderzoek verschillen dan ook significant tussen diverse uitvoerders. Vaak wordt gebruik gemaakt van algemene procedures die niet altijd voldoende specifiek zijn voor een situatie.

- De eigenfrequentie van de dakconstructie is mogelijk te hoog (stijf) ingeschat waardoor resonantie in het windtunnelonderzoek wellicht onjuist onderzocht is. In het RWDI-rapport staat geen exacte waarde, maar: “The results provided herein are based on the natural frequencies and modal displacements for the stadium roof provided by the structural engineer and received by RWDI on December 3rd.” Aangezien het RHDHV 3D-model fouten bevat (zie Appendix E1) waardoor het een te stijf gedrag toont is aannemelijk dat de eigenfrequentie ook te hoog is ingeschat.

D2 Zonnepanelen

D2.1 Belasting door zonnepanelen

Zonnepanelen waren op het dak aanwezig ten tijde van de instorting. In Bijlage B van het RHDHV-rapport wordt genoemd dat deze in 2015 zijn geplaatst en dat dit in een belasting van $0,16 \text{ kN/m}^2$ resulteert op het gebied waar ze geplaatst zijn.



Figuur 5 Zonnepanelen te zien op ingestort dak [Bron: Onderzoeksraad - DJI_0034].

Opgemerkt wordt dat er in bijlage E van het RHDHV-rapport een andere belasting wordt gehanteerd: $0,11 \text{ kN/m}^2$ op basis van de volgende bron:

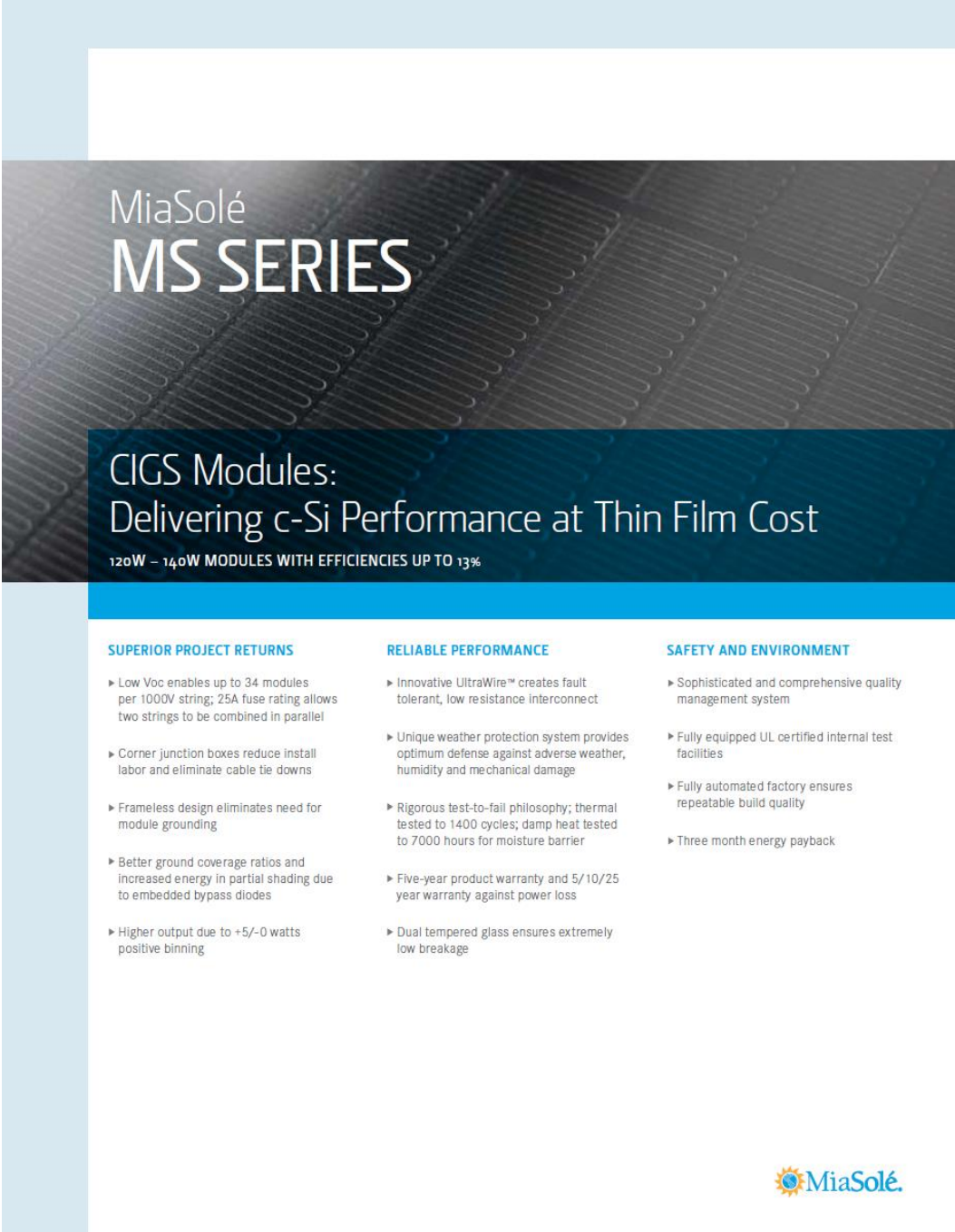
- AZ Afas stadion te Alkmaar - zonnepanelen - Verslag van het overleg van woensdag 18 november 2015, RHDHV Ref. 189.

Het betreffende verslag maakt onderdeel uit van een e-mail [Bron: “20190814131206_Zonnepanelen.pdf”]. Daarin wordt aangegeven dat het gemiddelde gewicht van de zonnepanelen minder dan 11 kg/m^2 betrof als het gemiddelde over een veel groter dakoppervlak berekend wordt dan waar de zonnepanelen liggen.

Het toegepaste systeem is MiaSole MS. Conform de genoemde e-mails is het gewicht van één paneel van $1610 \text{ mm} \times 665 \text{ mm}$ inclusief bekabeling 17 kg . Conform productinformatie in Appendix D2.2 is het gewicht 18 kg . Op basis van deze productinformatie is dan de resulterende oppervlaktebelasting voor één paneel circa 17 kg/m^2 .

Geconcludeerd wordt dat in Bijlage B van het RHDHV-rapport een gelijksoortige belasting is aangegeven ($0,16\text{kN/m}^2 = 16\text{ kg/m}^2$), maar dat in het 3D-model een veel te lage belasting is aangehouden. Zie ook de beschouwing van het 3D-model inclusief de beoordeling van het in rekening gebrachte lastoppervlak in Appendix E1.

D2.2 Brochure zonnepanelen



The image shows the cover of a brochure for MiaSolé MS Series solar panels. The background is a close-up photograph of the solar panel surface, showing the grid lines and the texture of the cells. The text is overlaid on the image in white and light blue colors.

MiaSolé
MS SERIES

**CIGS Modules:
Delivering c-Si Performance at Thin Film Cost**

120W – 140W MODULES WITH EFFICIENCIES UP TO 13%

SUPERIOR PROJECT RETURNS


- ▶ Low Voc enables up to 34 modules per 1000V string; 25A fuse rating allows two strings to be combined in parallel
- ▶ Corner junction boxes reduce install labor and eliminate cable tie downs
- ▶ Frameless design eliminates need for module grounding
- ▶ Better ground coverage ratios and increased energy in partial shading due to embedded bypass diodes
- ▶ Higher output due to +5/-0 watts positive binning

RELIABLE PERFORMANCE

- ▶ Innovative UltraWire™ creates fault tolerant, low resistance interconnect
- ▶ Unique weather protection system provides optimum defense against adverse weather, humidity and mechanical damage
- ▶ Rigorous test-to-fail philosophy; thermal tested to 1400 cycles; damp heat tested to 7000 hours for moisture barrier
- ▶ Five-year product warranty and 5/10/25 year warranty against power loss
- ▶ Dual tempered glass ensures extremely low breakage

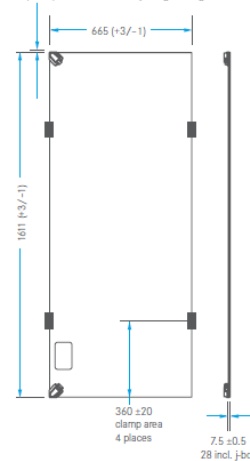
SAFETY AND ENVIRONMENT

- ▶ Sophisticated and comprehensive quality management system
- ▶ Fully equipped UL certified internal test facilities
- ▶ Fully automated factory ensures repeatable build quality
- ▶ Three month energy payback

 MiaSolé.

MiaSolé
MS SERIES

2.4 (+2/0) J-Box extension beyond glass edge



MiaSolé will evaluate alternate clamping solutions upon customer request. All dimensions in millimeters.

ELECTRICAL PERFORMANCE AT STC¹

			MS120GG	MS125GG	MS130GG	MS135GG	MS140GG
Nominal Power	P_{MPP}	[W]	120	125	130	135	140
Power Output Tolerance		[W]	+5/-0	+5/-0	+5/-0	+5/-0	+5/-0
Maximum Power Voltage	V_{MPP}	[V]	19.0	19.5	20.1	20.5	21.0
Maximum Power Current	I_{MPP}	[A]	6.29	6.41	6.48	6.58	6.67
Open Circuit Voltage	V_{OC}	[V]	24.9	25.2	25.4	25.6	25.8
Short Circuit Current	I_{SC}	[A]	7.35	7.35	7.35	7.35	7.35
Maximum Series Fuse Rating		[A]	25				
Maximum System Voltage (IEC/UL)		[V]	1000/600				

¹Standard Test Conditions (STC): 1000 W/m², 25°C cell temperature, AM 1.5 spectrumELECTRICAL PERFORMANCE AT NOCT²

Nominal Power	P_{MPP}	[W]	84.1	87.3	90.6	93.9	97.3
Maximum Voltage	V_{MPP}	[V]	16.6	17.1	17.5	18.0	18.5
Maximum Current	I_{MPP}	[A]	5.05	5.11	5.17	5.21	5.26
Open Circuit Voltage	V_{OC}	[V]	21.9	22.2	22.6	23.0	23.3
Short Circuit Current	I_{SC}	[A]	5.78	5.82	5.86	5.91	5.95

²Nominal Operating Cell Temperature (NOCT): 800 w/m², 20°C ambient temperature, 1 m/s wind speed

THERMAL CHARACTERISTICS

NOCT	[°C]	49
Temperature Coefficient of P_{MPP}	[%/°C]	-0.45
Temperature Coefficient of V_{OC}	[%/°C]	-0.36
Temperature Coefficient of I_{SC}	[%/°C]	-0.003

PHYSICAL AND MECHANICAL SPECIFICATIONS

Length	1611 mm (63.4 in)
Width	665 mm (26.2 in)
Depth	7.5 mm (0.3 in); 28 mm (1.1 in) including junction box
Weight	18 kg (39.7 lbs)
Junction Box / Output Terminal Type	2 corner connection boxes / MC4 type
Cell Type	Copper Indium Gallium Diselenide (CIGS)
Maximum Load	Tested snow load: 5400 N/m ²
Warranty Term	5/10/25 year power output, 5 year workmanship ³
Certifications	IEC 61646, IEC 61730 (Application Class A), UL 1703 (Fire Class A), CEC

³Please see full warranty for details.

2590 Walsh Avenue, Santa Clara, California 95051, USA
1.408.919.5700 sales@miasole.com www.miasole.com



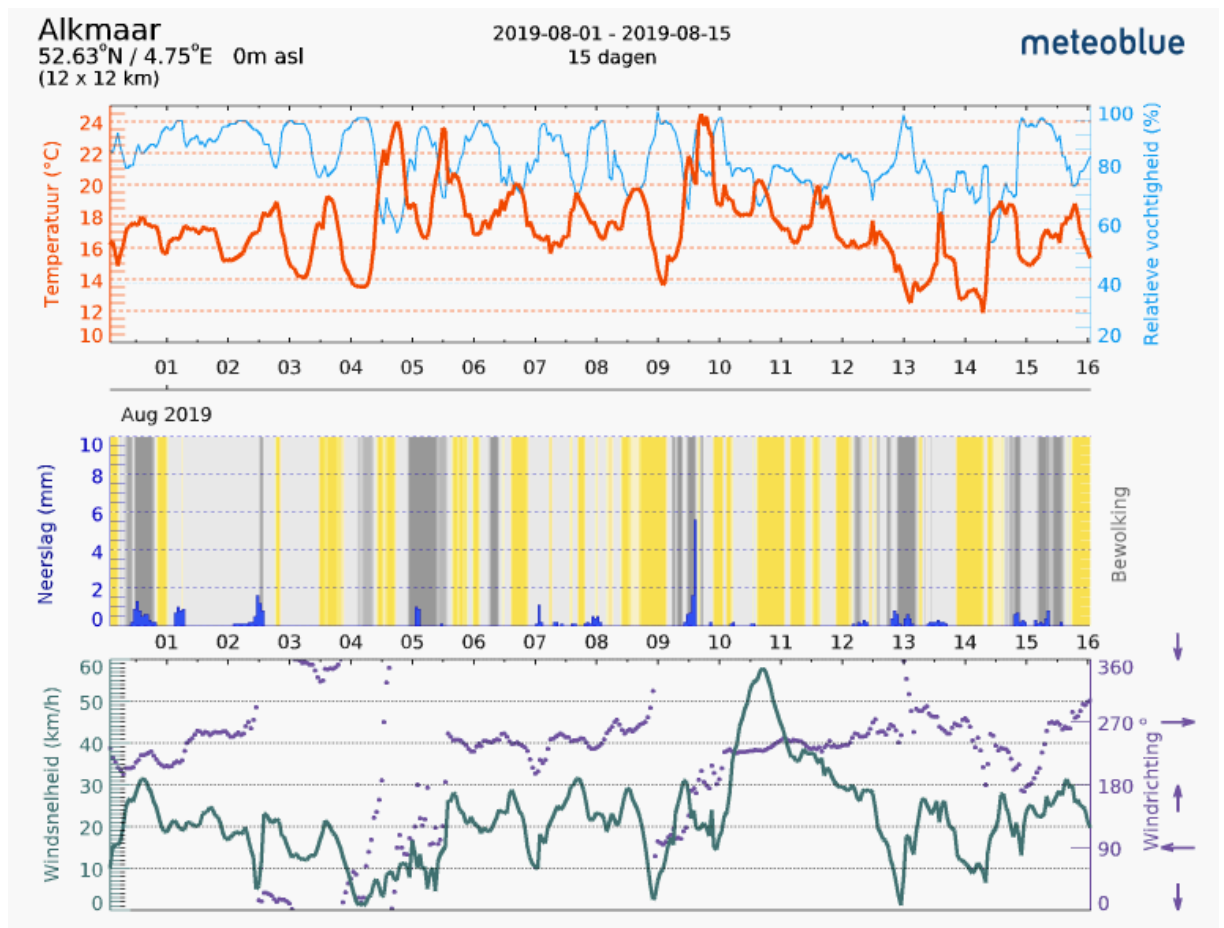
MiaSolé and the MiaSolé logo are registered trademarks.
© October 2011 MiaSolé. All rights reserved. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.
MiaSolé Approved for Public Release. 996-161411-00 Rev B

D3 Thermische belasting

Op de dag van de instorting, 10-08-2019, was er sprake van een relatief hoge temperatuur in combinatie met hoge windsnelheden. Op bewakingscamerabeelden is te zien dat het dak rond 17.15 uur is ingestort.

Volgens het KNMI [Bron: "02 KNMI 2019-2998 getekende brief AZ stadion.pdf"] werd het aan het begin van de middag (vrijwel) onbewolkt en zonnig. De maximumtemperatuur werd bereikt rond 16.00 uur en bedroeg ca. 22 °C.

Weerdata van MeteoBlue zichtbaar in onderstaand figuur toont een snelle temperatuurstoename van ca. 10 °C van 9 naar 10 augustus.



Figuur 6 Temperatuur, vochtigheid, neerslag, bewolking, windsnelheid en windrichting op de dagen rond de instorting [Bron: Meteoblue.com]

Een toename in temperatuur zal mogelijk leiden tot significante krachten in de staalconstructie zonder dilataties. Twee mogelijke situaties kunnen beschouwd worden:

- Temperatuurverschil tussen de dakplaat en de staalconstructie.
- Temperatuurverschil van volledige staalconstructie zonder dilataties.

Onderstaande afbeeldingen tonen zonnepanelen die direct op het dakvlak zijn bevestigd waardoor het extra aannemelijk is dat de dakplaten zeer warm zijn geworden op de zonnige dag.



Figuur 7 Ingestort dak met zonnepanelen die zonder tussenruimte op de stalen dakplaten zijn gemonteerd [Bron: Onderzoeksraad - IMG_0275 en IMG_0280].

Op foto's is te zien dat de dakplaten niet direct op de dakspanten zijn bevestigd, maar overspannen tussen de gordingen. De gording betreft standaard een HE180A profiel en is op de koker bevestigd middels een boutverbinding. Opwarming van de dakplaat zal in de lengterichting tot thermische uitzetting leiden. Doordat het stalen dakspant minder uitzet zal een belasting worden overgedragen van dakplaat via schroeven naar het HE180A profiel en dan via de boutverbinding naar het dakspant. In de richting haaks op het spant zal een opwarming van de dakplaat niet hoeven te leiden tot significante belastingen. Door de geometrie van de dakplaat kan deze als een harmonica in- en uitschuiven.

Appendix E

Krachtenwerking dakconstructie

E1 Beoordeling 3D-model AFAS Stadion as 37 t/m 42 (Bijlage E)

In het RHDHV-rapport wordt een 3D eindige elementen model beschreven en worden resultaten gebruikt ter verificatie van hypothesen. Paragraaf 4.6 “Onderzoek normaalkracht in de bovenregels” van het rapport bevat de samenvatting van de volledige beschouwing in Bijlage E.

Hieronder volgt een opsomming van opmerkingen met betrekking tot de uitgangspunten van het 3D-model:

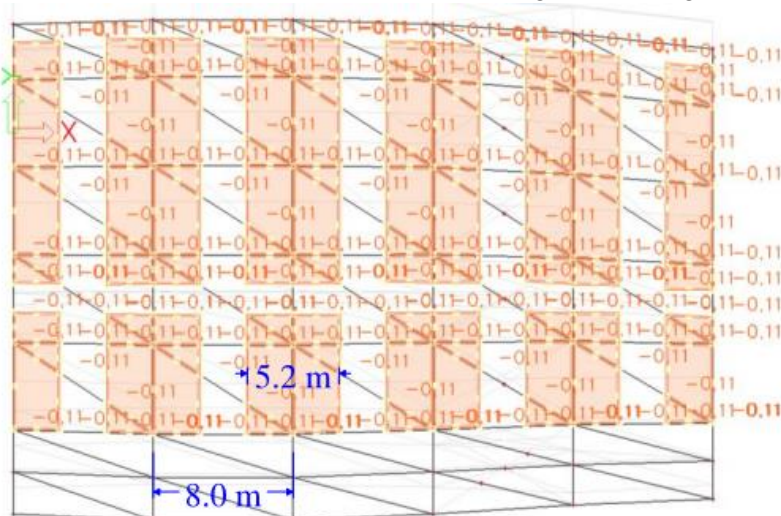
- De staalconstructie is gemodelleerd van as 37 t/m as 42. Door niet het volledige stadion te modelleren of een groter deel van het dakvlak worden 3D effecten niet volledig beschouwd.
- De opleggingen (steunpunten) van het model zijn als volledig stijf aangenomen. Daardoor is het aannemelijk dat de verticale stijfheid van het dak iets wordt overschat. Ook zullen horizontale reacties optreden in de gedefinieerde horizontale steunpunten in het dakvlak waardoor de gemodelleerde constructie te stijf zal reageren.
- Staalverbindingen zijn als volledig momentvast gemodelleerd, terwijl geen beschouwing is gemaakt van de rotatiestijfheid van de verbindingen. Doorgaans worden verbindingen in gelaste buisvormige vakwerken als scharnierend gemodelleerd. De resulterende momenten in de verbindingen worden niet gerapporteerd.
- De gereduceerde stijfheid van de knooppunten met dunne of gecorrodeerde lassen is niet beschouwd.
- Gordingen en dakplaten zijn met rigid links verbonden met de vakwerkliggers. Dit betekent dat er een oneindig stijve verbinding tussen de dakplaten en dakspant gemodelleerd waardoor het waarschijnlijk is dat belasting wordt herverdeeld over spanten. Zo kan windbelasting die in het windtunnelonderzoek bepaald is voor een specifiek spant ook op een naastgelegen spant effect hebben. In werkelijkheid is de verbinding tussen dakplaat en vakwerkligger via een gording relatief slap en zal de herverdeling van krachten anders zijn.
- De laatste 60cm van de uitkraging (uitstekende bovenregel van het vakwerkspant en de daarop bevestigde goot) is niet beschouwd.
- Stalen dakplaten zijn op basis van ontwerptabellen toegepast, niet op basis van onderzoek op locatie. Schijfwerking van de dakplaten lijkt te zijn meegenomen, maar het is niet duidelijk wat de ingevoerde elementeigenschappen precies zijn. Een trapeziumvormige staalplaat is relatief stijf in het vlak in één richting, maar zeer slap in de andere richting (harmonica effect). In Scia Engineer kan onderscheid gemaakt worden tussen:
 - Flexible diaphragm: het element heeft geen stijfheid in het vlak.
 - Rigid diaphragm: het element is oneindig stijf in het vlak.
 - Semi-rigid diaphragm: een benadering door Scia wordt gemaakt van de werkelijke stijfheden in het vlak.

Aangezien de dakplaten worden ingezet om belasting tussen de spanten her te verdelen in het geval dat de bovenverbinding van de vakwerkligger 40 bezwijkt is het aannemelijk dat een volledig of gedeeltelijk stijve modellering is toegepast. Bij een

volledig stijve modellering wordt de stijfheid van het dakvlak overschat waardoor resultaten niet correct zijn.

Hieronder volgt een opsomming van opmerkingen met betrekking tot de belastingen op het 3D-model:

- Het is niet duidelijk of windbelasting exact volgens de zones gedefinieerd in het windtunnelonderzoek is aangebracht. In het windtunnelonderzoek wordt de winddruk per spant bepaald (centrisch op een spant) terwijl voor het 3D-model elementen tussen de vakwerkliggers zijn gedefinieerd. Hierdoor lijkt het alsof de winddruk een half stramien verschoven is of dat er een niet precieze middeling van winddrukken heeft plaatsgevonden.
- Belasting door zonnepanelen is onderschat. Zie ook de beschouwing in Appendix D2.1. In Figuur 13 van het RHDHV-rapport wordt een belastingbreedte van ca. 5,2m aangegeven bij een oppervlaktebelasting van $-0,11 \text{ kN/m}^2$. Dan volgt een lokale lijnlast van $5,2 \text{ m} * 0,11 \text{ kN/m}^2 = 0,57 \text{ kN/m}$. Dit terwijl uit foto's blijkt dat er vier zonnepanelen naast elkaar op één spant lagen. Daaruit volgt een lokale lijnbelasting van $18 \text{ kg} * 4 / 0,665 \text{ m} = 1,08 \text{ kN/m}$. Dit is een 89% hogere belasting.



Figuur 8 RHDHV-rapport Figuur 13: Boven-aanzicht dak met in oranje de zone waar zonnepanelen zijn aangebracht – met daarop de hart-op-hart afstand van de spanten en de afmeting van het lastvlak aangegeven in blauw.

- Windbelasting volgens de NEN 6702 berust op enkele interpretaties van de norm die niet volledig zijn toegelicht. De exacte hellingshoek van het dak wordt niet bepaald en de dimensie factor c_{dim} wordt niet expliciet in rekening gebracht. Daarnaast wordt een eerste eigenfrequentie van 2,06 Hz genoemd waarmee de dynamische amplificatiefactor is bepaald. Deze eerste eigenfrequentie is echter waarschijnlijk te hoog door de eerdergenoemde onnauwkeurigheden in de uitgangspunten.
- Temperatuurbelasting is niet beschouwd terwijl het een stalen dak zonder dilataties of isolatie betreft. Het is waarschijnlijk dat in diverse elementen significante krachten optreden door deze belasting.

Door bovenstaande fouten en onnauwkeurigheden in de uitgangspunten en belastingen van het 3D-model kunnen de resultaten niet als correct worden aangenomen.

Appendix F

Capaciteit kritische staaldetails

F1 Capaciteit kritische staaldetails

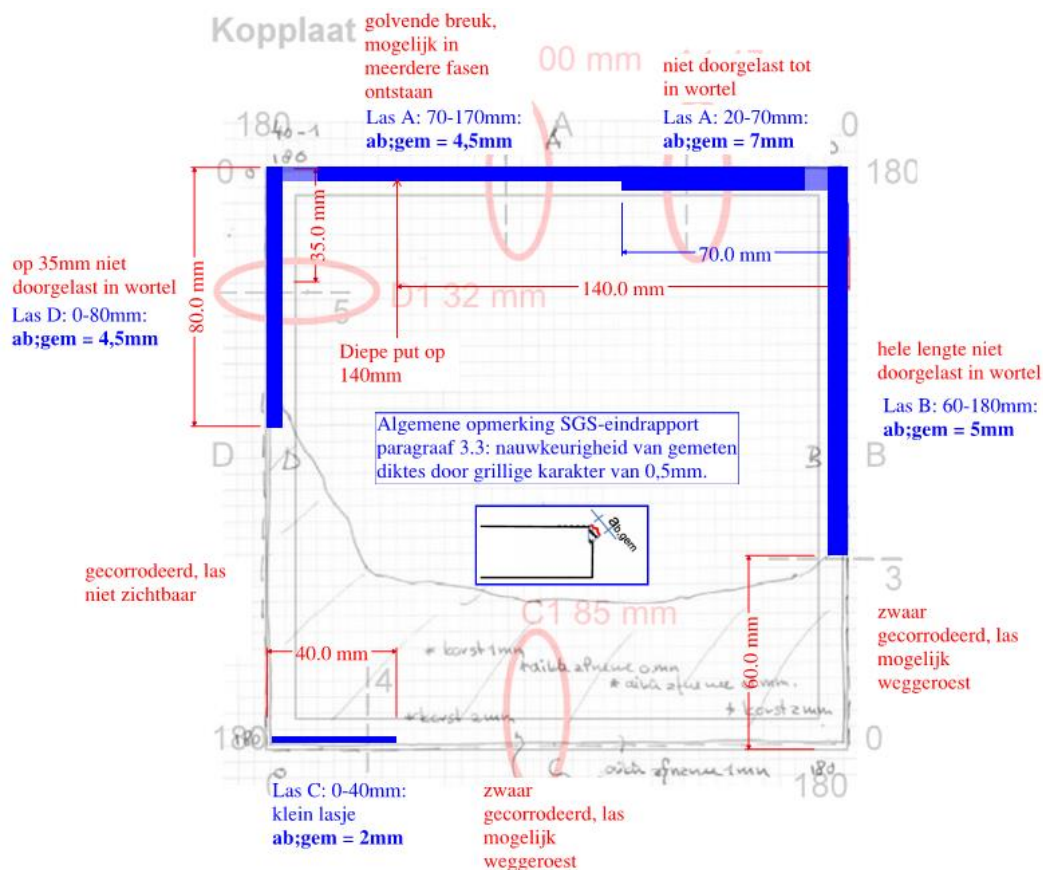
De capaciteit van de verbinding van de bovenregel van de vakwerkligger met de vakwerkkolom die door RHDHV beschouwd wordt als start van de instorting, is beschouwd in RHDHV-rapport bijlage F. In de bijlage worden aannames gedaan op basis van het onderzoek door SGS (Intron) dat in Bijlage D van het RHDHV-rapport is opgenomen.

In onderstaande paragraaf wordt voor de uitgangspunten van het detailmodel relevante informatie uit de bijlagen verzameld en samengevoegd om vervolgens conclusies te trekken over de nauwkeurigheid hiervan.

F1.1 Verzameling en vergelijking informatie

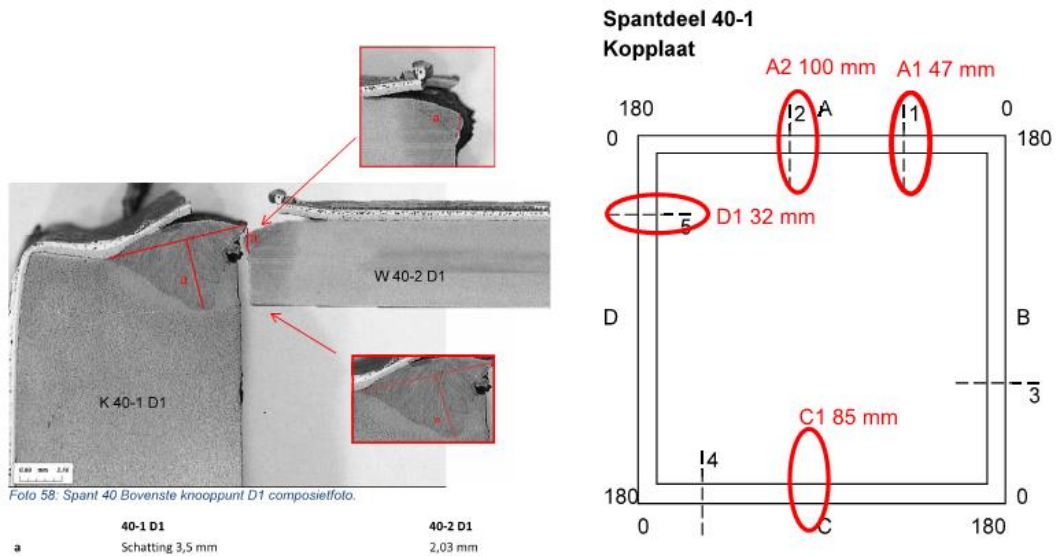
F1.1.1 SGS Beoordeling bezwiken lassen

Onderstaand figuur is een verzameling van informatie uit het SGS-rapport A111090/R20190402. De basis is figuur 8 “Corrosie op spantdeel 40-1 Kopplaat” en de informatie op pagina 30 van het rapport.



Figuur 9 Samengestelde afbeelding kopplaat 40-1 met informatie SGS-onderzoek.

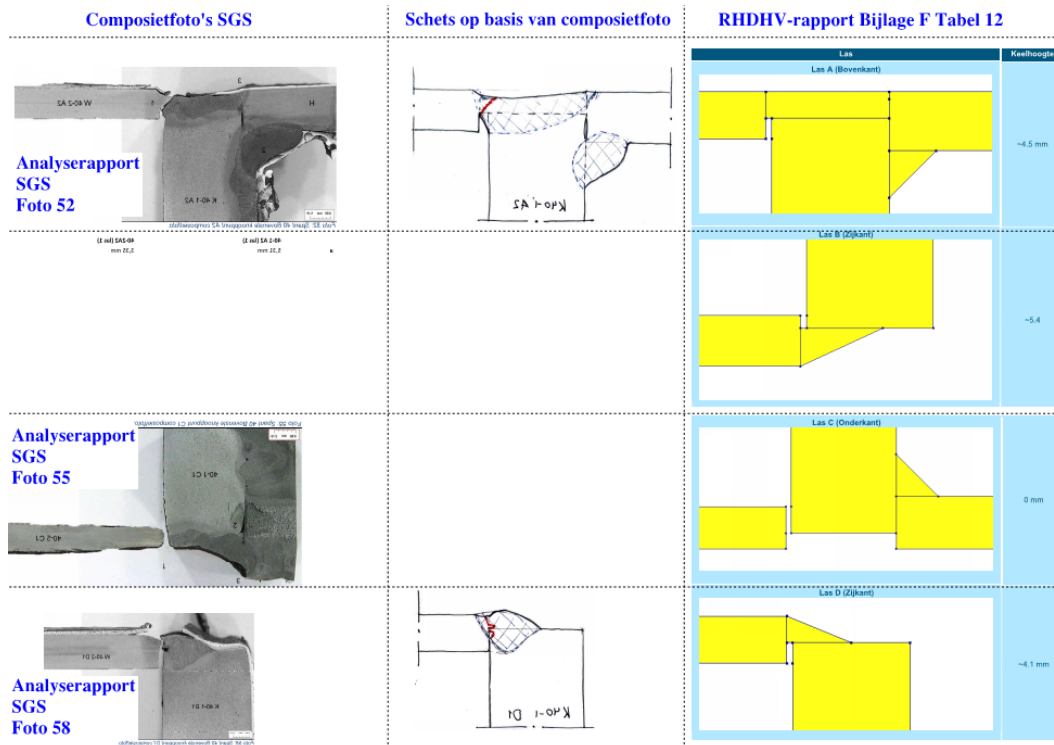
Onderstaand figuur is een verzameling van informatie uit het analyserapport van SGS met betrekking tot de lasen aan de zijkant van de kopplaat en koker (zijde D). Links is foto 58 te zien met de schatting van de lasafmetingen door SGS en waar op de lasafmeting is bepaald (pagina 47 van het analyserapport). De aanleiding tot het nemen van de macro's 40-1-D1 en 40-2-D1 door SGS staat in tabel 1 van het analyserapport: "Op insluiting". Te zien is dat een minimale dikte van 2,0mm is gemeten.



Figuur 10 Samengestelde afbeelding kopplaat 40-1 zijde D met informatie SGS-onderzoek.

F1.1.2 Vergelijking SGS beoordeling en RHDHV modellering

Onderstaand figuur toont zowel de macro's gerapporteerd in Bijlage D uit het RHDHV-rapport (onderdeel van het SGS-analyserapport) en de modellering in Bijlage F van het rapport. In het midden is een schets toegevoegd op basis van de composietfoto's om de vergelijking duidelijker te maken.



Figuur 11 Vergelijking lassen SGS-onderzoek en modellering RHDHV (Bijlage D en F in RHDHV-rapport).

F1.1.3 Onzekerheden detailmodel

In Bijlage F tabel 10 van het RHDHV-rapport staan een aantal onzekerheden van het model opgesomd waarvan enkele hier herhaald worden:

- **Materiaaleigenschappen:** “De exacte materiaaleigenschappen zijn niet overal bekend. INTRON heeft enkele materiaal proeven gedaan waarbij verschillende sterktes gevonden werden. In het model zijn 3 verschillende materiaalmodellen gebruikt.”
- **Geometrie van de lassen:** “De exacte geometrie van de lassen voor bezwijken is lastig te achterhalen. Daarnaast is het complex om dit exact te modelleren. De lassen zijn versimpeld gemodelleerd.”
- **Materiaal en lasdefecten:** “Lokale imperfecties kunnen een beginpunt zijn van bezwijken. Deze zijn niet gemodelleerd.”
- **Fijnheid van het rekennet:** “Om buiging te analyseren in volume elementen zijn op zijn minst 3 elementen over de hoogte nodig. Door de kleine lassen leidt dit tot een erg fijn net, waardoor de rekentijd te lang wordt. Om de rekentijd beperken is het niet overal mogelijk om 3 elementen over de hoogte te modelleren.”

F1.2 Conclusies

Diverse onzekerheden in uitgangspunten van het detailmodel worden genoemd in bijlage F van het RHDHV-rapport. Op basis van bovenstaande informatie uit het SGS-onderzoek en de vergelijking met het detailmodel wordt het volgende geconcludeerd:

- Ontwerpwaarden voor materiaaleigenschappen zijn gehanteerd; niet de echte waarden.
- De geometrie van de gemodelleerde lassen in Bijlage F wijkt significant af van de geometrie zoals getoond in de macro's in Bijlage D.
- De genoemde “Diepe put” aan de bovenzijde is niet gemodelleerd.
- Er is in het detailmodel geen rekening gehouden met de genoemde insluiting ter plaatse van D1.
- De opgegeven meetonnauwkeurigheid van $\pm 0,5\text{mm}$ is niet verwerkt in het detailmodel in bijlage F.
- Het rekennet (ook wel mesh genoemd) is plaatselijk niet fijn(mazig) genoeg. Er is geen gevoeligheidsonderzoek bekend naar de invloed hiervan.

Hieruit volgt dat de resultaten van het detailmodel niet als exact kunnen worden aangenomen en significant kunnen afwijken.

Bovendien wordt het detail geanalyseerd door een opgelegde vervorming aan te brengen op de bovenregel van het vakwerk, waarbij geen rekening wordt gehouden met het excentrische aansluitende windverband.