

Stieltjesweg 1
2628 CK Delft
Postbus 155
2600 AD Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 20 00

TNO-rapport nr.**TNO 2022 R10129 SEC-rapport nr. 22.01.001****Inventarisatie van de mogelijkheden voor het
behoud van vuurtoren Lange Jaap**

Datum 21 januari 2022

Auteur(s) [redacted] (TNO)
[redacted] (Spelt Engineering & Contracting BV)

Exemplaarnummer
Oplage
Aantal pagina's 51 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen
Opdrachtgever Rijkswaterstaat
Projectnaam Lange Jaap - deel 2
Projectnummer TNO 060.51931, SEC 21.11.015

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

© 2022 TNO en SEC

Managementsamenvatting

In de monumentale vuurtoren Lange Jaap te Huisduinen zijn in de afgelopen decennia scheuren in de vloeren en boutbreuken geconstateerd. Recenter zijn ook scheuren in de dragende buitenwand gevonden. In oktober 2021 ontstond een beeld van progressieve toename van het aantal en de omvang van de scheuren in de laatste jaren. Daarom is vanaf oktober 2021 een toegangs- en gebiedsverbod ingesteld voor de vuurtoren. Uit een eerdere inventarisatie volgde dat de opties voor behoud van de vuurtoren over langere periode beperkt zijn. Om deze reden heeft de minister van Infrastructuur en Waterstaat opdracht gegeven aan Spelt Engineering & Contracting BV (SEC) en TNO voor onderzoek naar:

- De condities waaronder het gebieds- en toegangsverbod (al dan niet tijdelijk) opgeheven kunnen worden.
- De opties voor het behoud van de monumentale vuurtoren op lange termijn.

Dit onderzoek moet een basis vormen voor nadere besluitvorming. Om de vragen te kunnen beantwoorden is het ook nodig om een beeld te verkrijgen van de constructie en van de schades. Voor dit onderzoek zijn rapporten en foto's van inspecties bestudeerd en deskundigen en betrokkenen geraadpleegd. Vanwege het toegangsverbod was het niet mogelijk om de Lange Jaap te bezoeken. Om toch een indruk te krijgen van de constructie is een bezoek gebracht aan de vuurtoren te Scheveningen, die een vergelijkbare constructie heeft. Het onderzoek besloeg circa een maand.

Voor de schades komen wij tot de volgende hoofdoorzaken:

- Meest waarschijnlijke oorzaken voor de scheuren in de gietijzeren vloeren zijn belasting door groepen bezoekers en belasting door wind en/of temperatuurverschillen. Het breukgevoelige gietijzer scheurt daardoor. Het ontwerp van de vloeren was niet optimaal. Delen van de vloeren zijn niet veilig betreedbaar. Hoewel de vloeren ook fungeren als het verband tussen de buitenwand en de holle koker in de vuurtoren, geeft de staat van de vloeren als opgenomen tijdens de laatste inspectie (zomer 2021) geen gevaar voor bezwijken van de hele toren. Het verband moet wel worden hersteld.
- De door ons als meest waarschijnlijk aangemerkte oorzaken voor de scheuren in de gietijzeren buitenwand zijn corrosie van de bouten en corrosie van het ijzercement in de voeg tussen de gietijzeren panelen. Het breukgevoelige gietijzer scheurt daardoor. Ook de boutbreuken zijn te verklaren door corrosie van het ijzercement en van de bouten zelf. De lange scheuren in de buitenwand, voor het eerst ontdekt in september 2021, zijn in eerder onderzoek aangemerkt als bedreigend voor de veiligheid van de hele constructie wanneer deze verder uitbreiden.

Een aantal scheuren zou al vanaf de bouw in 1877 aanwezig kunnen zijn.

In het huidige onderzoek is aan het licht gekomen dat een aantal van de lange scheuren in de buitenwand waarschijnlijk al meer dan twee decennia oud is. Dit geldt vrijwel zeker voor de langst gevonden scheur. Dit blijkt uit detailfoto's van de schades, waar na inzoomen duidelijk wordt dat de conservering over de scheur is aangebracht. De laatste conserveringsbeurt vond plaats in 1999. Er zijn echter ook scheuren en boutbreuken ontstaan na deze conserveringsbeurt. Omdat het corroderen doorgaat kunnen nog steeds nieuwe scheuren ontstaan en (bestaande

scheuren) uitbreiden tot gevaarlijke grootte. Het scheurproces is niet goed te voorspellen. Onder andere door de conservering worden bij een visuele inspectie niet alle scheuren gevonden. Het is daardoor vrijwel zeker dat het werkelijke aantal scheuren groter is dan het aantal gevonden scheuren.

Met de kennis van oktober 2021 was het instellen van een *gebiedsverbod* onzes inziens een juiste keuze, omdat het risico op letsel door bezwijken van de toren aanzienlijk is. De ontdekking dat een aantal scheuren in de buitenwand, waaronder de langste, al meer dan twee decennia oud is, verandert echter de inschatting van de kans op bezwijken:

- Er is sprake van een zekere mate van 'bewezen sterkte': de toren heeft sinds 1999 meerdere stormen doorstaan.
- De uitbreiding van de scheuren in de buitenwand gaat langzamer dan in oktober 2021 gedacht. De kans van het aaneen scheuren van bestaande scheuren op korte termijn is daarmee gering.

Tegelijkertijd is het scheurproces niet goed voorspelbaar. Dit maakt dat het gebiedsverbod onzes inziens kan worden opgeschort of opgeheven als wordt voldaan aan twee voorwaarden:

- Wij adviseren periodieke inspecties uit te voeren binnenin de vuurtoren, waarvan ten minste de eerste wordt uitgevoerd met een camera geïnstalleerd op een drone. De drone-inspectie betekent dat er geen personen in de vuurtoren hoeven te zijn. Een eerder uitgevoerde proef van een drone-inspectie in de vuurtoren van Scheveningen toont aan dat dit mogelijk is. De eerste voorwaarde is dat deze inspecties geen of nauwelijks groei van de scheuren in het lijf van de buitenwand laten zien.
- De tweede voorwaarde is dat de windsnelheid lager is dan die waarbij een trekkracht in de schacht optreedt. Die windsnelheid kan rekenkundig worden bepaald. Voor de weg die aan de noordwestzijde langs de vuurtoren loopt, geldt deze voorwaarde enkel voor wind uit oostelijke richtingen, met als veilige grens een richting tussen 30 en 210 graden.

Bij geconstateerde groei van de scheuren of bij hogere windsnelheden kan het gebiedsverbod niet worden opgeheven. Benadrukt wordt dat de bovengenoemde voorwaarden voor opheffing van het gebieds- en toegangsverbod gebaseerd zijn op een risico-inschatting. Harde uitspraken of berekeningen over scheuruitbreiding in de toekomst zijn niet mogelijk. RWS kan er in zijn rol als beheerder voor kiezen om aanvullende voorwaarden te stellen. Het *toegangsverbod* tot de toren kan vervolgens worden opgeheven nadat de looproute veilig is gemaakt.

Voor een renovatie is minimaal het volgende benodigd:

- De oorzaken van de schades moeten worden weggenomen, om scheurvorming en -uitbreiding in de toekomst te voorkomen. Dit betekent dat de bouten moeten worden vervangen en dat het ijzercement tussen de voegen volledig moet worden verwijderd en vervangen. De naden tussen de panelen moeten aan de buitenzijde waterdicht worden gemaakt. De (raam)openingen moeten waterdicht worden gemaakt.
- De looproute in de toren, bestaande uit vloerpanelen en trappen, moet veilig beloopbaar worden gemaakt. Op locaties met grote scheur in de vloerpanelen moet het verband tussen de schacht en de kuip worden hersteld.
- Het werken van bestaande, grote scheuren in de lijven van de schacht moet worden tegengegaan.
- De toren moet opnieuw worden geconserveerd.

De beschikbaar gestelde documenten en de ideeën die betrokkenen en ondernemers bij RWS hebben ingediend geven nog geen uitsluitsel over de vraag of een renovatie praktisch uitvoerbaar en economisch verantwoord is. Hiervoor moet, deels op locatie, een aanvullend technisch onderzoek worden uitgevoerd. Door dit onderzoek wordt een deel van de risico's van renovatie inzichtelijk gemaakt, alhoewel er ook na deze studie significante risico's blijven bestaan. Dit onderzoek dient als basis voor een kosten-batenanalyse waarin kosten, risico's en cultuurhistorische waarde van behoud worden afgewogen tegen nieuwbouw. Deze studiefase duurt naar schatting minimaal een jaar.

Als uit de studiefase volgt dat kan worden voldaan aan de technische en economische randvoorwaarden voor behoud en dat de risico's beheersbaar lijken, dan is een aantal renovatievarianten denkbaar, zoals:

- Renovatie op locatie, die tot doel heeft de oorzaken van de schade weg te nemen en de huidige toestand van de toren te 'bevriezen'. Inspecties zijn ook na renovatie noodzakelijk.
- Renovatie waarbij de toren wordt gedemonteerd en opnieuw opgebouwd en die tot doel heeft om de toren terug te brengen in de oorspronkelijke of zelfs verbeterde staat.

Beide varianten zijn gericht op een levensduur na renovatie van vele decennia. Ook kan voor nieuwbouw worden gekozen, waarvoor aanzienlijk lagere risico's en een beter beheersbaar proces worden verwacht dan voor renovatie. In het geval van een replica ligt het meest voor de hand een toren van nodulair gietijzeren panelen of een gelaste toren van (lean duplex) staal.

Inhoudsopgave

	Managementsamenvatting	2
1	Inleiding	6
1.1	Beschrijving van de toren	6
1.2	Vraagstelling	6
1.3	Aanpak	7
1.4	Leeswijzer	7
2	Inventarisatie schade	8
2.1	Schade-observaties	8
2.2	Mogelijke oorzaken van de schades	8
2.3	Leeftijd van de scheuren in de schacht en de kuip	9
2.4	Ontbrekende informatie en onzekerheden	10
2.5	Conclusies schade-inventarisatie	11
3	Gebieds- en toegangsverbod	12
3.1	Gebiedsverbod	12
3.2	Toegangsverbod	13
3.3	Samenvatting gebieds- en toegangsbeperking	13
4	Renovatie	15
4.1	Minimaal benodigde herstel	15
4.2	Studiefase	15
4.3	Renovatie- en nieuwbouwmogelijkheden	16
4.4	Samenvatting renovatiemogelijkheden	20
5	Conclusies en aanbevelingen	22
5.1	Conclusies over de schadeoorzaken	22
5.2	Conclusies en advies over het gebieds- en toegangsverbod	23
5.3	Conclusies over de renovatiemogelijkheden	23
5.4	Aanbevelingen	24
6	Ter beschikking gestelde documenten	25
	Bijlage(n)	
	A Tekeningen en benaming onderdelen	
	B Overzicht interviews	
	C Tijdlijn	
	D Inventarisatie schades en schadeoorzaken	
	E Ingediende ideeën	
	F Analyse plooi- en knikstabiliteit	
	G Constructie voor afscherming en ontmanteling	
	H Toegepaste gietijzerlegering	
	I Stroomschema	

1 Inleiding

1.1 Beschrijving van de toren

De Lange Jaap is een ca. 63 meter hoge gietijzeren vuurtoren te Huisduinen, gemeente Den Helder. De vuurtoren is gebouwd in 1876 en 1877 en is momenteel in beheer van Rijkswaterstaat (RWS). De toren is een rijksmonument, waarover de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (RCE) onder andere het volgende heeft aangegeven [1]: “Lange Jaap [is] de hoogste nog brandende vuurtoren van Nederland en de hoogste gietijzeren toren van Europa. ... De vuurtoren is van hoge cultuurhistorische waarde, als onderdeel en symbool van de maritieme sector die zo bepalend is voor Den Helder. ... Vooral de bouwwijze waarbij gietijzer de hoofdrol speelt en bouwsegmenten en -ornamenten met zorg zijn vormgegeven zijn architectuur- en bouwhistorisch interessant uit oogpunt van de geschiedenis der technische ontwikkeling en kunst.”

1.2 Vraagstelling

Tijdens visuele inspecties zijn in de afgelopen decennia boutbreuken en meerdere typen scheuren gedetecteerd, vooral in de vloerpanelen en in de schacht. Uit de documenten van de verschillende inspecties ontstond in oktober 2021 [2] een beeld van progressieve toename van het aantal en de omvang van de indicaties in de laatste jaren. Daarom is vanaf oktober 2021 een algeheel toegangs- en gebiedsverbod ingesteld. Uit een eerste inventarisatie volgde dat de opties voor behoud van de vuurtoren over langere periode beperkt zijn [2]. Om deze reden heeft de minister van Infrastructuur en Waterstaat opdracht gegeven aan Spelt Engineering & Contracting BV (SEC) en TNO voor aanvullend onderzoek naar de vragen of de vuurtoren op de korte termijn gestut en voor de lange termijn behouden kan worden. Deze opdracht is verleend via RWS. In overleg met RWS zijn de volgende vragen geformuleerd:

1. Huidige situatie

- a. Is de vuurtoren in de huidige conditie veilig te betreden of onder voorwaarden / in specifieke condities veilig te betreden? Veiligheid betreft hier de veiligheid van personen ten aanzien van het risico op letsel door het bezwijken van (delen van) de vuurtoren.
- b. Is een afzetting rondom de toren noodzakelijk en zo ja, kunnen maatregelen worden genomen waarmee de omvang van de afzetting beperkt kan worden, waar noodzakelijk onder specifieke condities?

2. Mogelijkheden behoud op langere termijn

- a. Welke mogelijkheden tot behoud van de gehele vuurtoren, of delen daarvan, worden als reëel en kansrijk beschouwd? Hierbij worden zowel bij RWS ingediende ideeën (zie bijlage E) als nieuwe ideeën overwogen. Deze ideeën zullen in alle gevallen in een later stadium nader onderzocht en uitgewerkt moeten worden.
- b. Kan op basis van expert judgement een volgorde van haalbaarheid en technische levensduur worden gegeven van de onder 2a. benoemde mogelijkheden tot behouden van de toren?

Het gaat daarbij om het creëren van een basis voor (nader onderzoek ten behoeve van) de besluitvorming. Voor dit onderzoek is ongeveer een maand tijd gegund.

1.3 Aanpak

Om de vragen te kunnen beantwoorden is het nodig ons een beeld te vormen van de omvang, de oorzaak en de mogelijke gevolgen van de optredende schade. Daarnaast is een inventarisatie en beoordeling van opties voor behoud van de toren van belang. In het onderzoek hebben we gebruik gemaakt van drie informatiebronnen.

1. Dossieronderzoek, toegespitst op:

- De schades.
- De oorzaken van de schades.
- De bij RWS ingediende ideeën voor behoud of demontage.

Voor dit dossier-onderzoek is gebruik gemaakt van door RWS ter beschikking gestelde documenten, opgenomen in hoofdstuk 6. In dit rapport is met cijfers verwezen naar deze documenten (bijvoorbeeld [1]).

2. Interviews met experts en betrokkenen. Bijlage B geeft hiervan een overzicht. In dit rapport is verwezen naar deze interviews met hoofdletters (bijvoorbeeld [A]). In aanvulling hierop zijn verschillende collega's van TNO en SEC geraadpleegd voor dit onderzoek.

3. Bezoek vuurtoren Scheveningen

Omdat een gebieds- en toegangsverbod geldt voor de Lange Jaap kon de toren niet bezocht worden. Er is een bezoek gebracht aan de vuurtoren te Scheveningen, die met een vergelijkbare constructie is ontworpen en in hetzelfde decennium is gebouwd. Het doel van dit bezoek was om inzicht te krijgen in:

- De constructie van de toren.
- De (on)mogelijkheden van visuele inspecties.
- De (on)mogelijkheden van renovaties.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 van dit rapport geeft een inventarisatie van de gerapporteerde schades. Hoofdstuk 3 gaat in op de voorwaarden waaronder de gebieds- en toegangsbeperking kunnen worden opgeschort of opgeheven. Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van de mogelijkheden om de toren te behouden voor de lange termijn.

Bijlage A geeft een overzicht van de toren. De belangrijkste elementen zijn:

- Schacht. Buitenwand van de toren.
- Kuip. Holle middenkolom.
- Vloer. Beloopbare delen in de toren die tevens het verband tussen de schacht en de kuip vormen.

Deze onderdelen zijn opgebouwd uit panelen van gietijzer. De panelen bestaan uit een lijf (het vlak) en flenzen (de uitstekende randen).

2 Inventarisatie schade

2.1 Schade-observaties

Bijlage C geeft een tijdlijn van de belangrijkste onderhoudsacties, inspecties en overige van belang zijnde acties.

Sinds de jaren '80 van de vorige eeuw wordt scheurvorming in de vloerpanelen gerapporteerd [3]. Sindsdien hebben diverse inspecties, constructieve beoordelingen en onderhoudsacties plaatsgevonden om ten minste de looproute in de toren veilig te maken voor toegang.

Van recenter datum zijn berichten en rapporten van scheurvorming in de schachtpanelen. In 2020 is dit als eerste gerapporteerd [3]. In de zomer van 2021 heeft een uitgebreide visuele inspectie plaatsgevonden naar gebreken in de constructie van de Lange Jaap [4]. In de schacht zijn circa 1000 indicaties gerapporteerd, waarvan 17 waarbij scheuren ook in het lijf van de panelen optraden. In de overige gevallen bleven de indicaties beperkt tot de flens van de panelen. Het totaal aantal panelen in de schacht bedraagt 1088. Daarnaast zijn 82 gebreken geconstateerd aan de bouten die de panelen verbinden. Merendeels zijn dit gebroken bouten in de schacht. Het totaal aantal bouten in de toren bedraagt circa 21500 [5].

Voor de kuippanelen is nauwelijks scheurvorming gerapporteerd.

Uit de verschillende inspecties ontstond in oktober 2021 een beeld van progressieve toename van het aantal en de omvang van de scheurvormige indicaties in de laatste jaren in met name de schacht [2][A]. In september 2021 zijn voor het eerst lange wandscheuren ontdekt die in [2] (bij verdere groei) als bedreigend beoordeeld zijn voor de constructieve veiligheid in combinatie met andere gebreken. Dit is aanleiding geweest voor het instellen van een gebieds- en toegangsverbod.

2.2 Mogelijke oorzaken van de schades

Voor de inventarisatie van de oorzaken van de schades is gebruik gemaakt van de inspectierapporten en de eerdere analyses daarvan (hoofdstuk 6), van interviews [A, E, H, J, K], en van eigen analyses van de foto's van de inspecties en van observaties in de vuurtoren te Scheveningen. Bijlage D beschrijft deze inventarisatie in detail. Hier is slechts een beknopte samenvatting gegeven:

- Scheuren in de flens van de schachtpanelen: de door ons als meest waarschijnlijk aangemerkte oorzaak is corrosie van de boutsteel en corrosie van het ijzercement in de voeg tussen de flenzen. Boutsteel en voeg zwellen op en veroorzaken lokale trekspanningen. Het toegepaste gietijzer is hiertegen niet bestand en scheurt. De toren is door de vele voegen en boutverbindingen gevoelig voor spleetcorrosie. Een aantal scheuren kan al in de bouwfase zijn ontstaan, bijvoorbeeld door aandraaien van de bouten. De scheuren in enkel de flens vormen geen gevaar voor de veiligheid, maar dat verandert mogelijk als deze doorgroeien in het lijf. Het mechanisme van scheurvorming door corrosie van de boutsteel is niet genoemd in de documenten van hoofdstuk 6.
- Scheuren in het lijf van de schachtpanelen: aanvullend op de corrosie genoemd bij de flens geldt dat een aantal scheuren in de lijven geïnitieerd zijn aan de

rand van de plaatjes die rond 2002 aan een aantal boutkoppen zijn gelast om vloeren te ondersteunen. Wij achten het mogelijk dat het lasproces of (trek)spanningsconcentraties vanuit de ondersteuning van de vloeren, waar het toegepaste gietijzer niet tegen bestand is, op enkele van deze locaties hebben bijgedragen aan scheurvorming. De lijven van de schachtpanelen vormen een essentieel onderdeel van de draagconstructie.

- Boutbreuken: meest waarschijnlijke oorzaak is het corroderen van het ijzer-cement en van de boutkop of de moer aan het contactvlak. Door opzwellen wordt de kop of moer van de steel getrokken. De bouten zijn daarbij al verzwakt door corrosie van de boutsteel.
- Vloeren, scheuren dwars door de panelen: meest waarschijnlijke oorzaak voor de meeste schade is belasting door personen op de trappen en de vloeren. In het verleden (tot eind jaren '90) zijn er groepen bezoekers toegelaten tot de toren, [6]. In de vloerconstructies leidt dit tot hoge piekspanningen, waartegen deze vloeren niet bestand zijn. Van één scheur in een vloerpaneel is in [4] gerapporteerd dat deze in de loop van 2021 is gegroeid. Delen van de vloeren zijn niet veilig betreedbaar.
- Vloeren met scheuren langs de omtrek: meest waarschijnlijke oorzaken zijn windbelasting en temperatuurbelasting. Doordat de vloeren opgesloten zijn tussen de schacht en de kuip, treedt opgedrongen buiging van de vloerdelen op. Ook kunnen maatafwijkingen (vanaf de bouw) en het doorstempelen van vloeren (na het detecteren van de schades) een bijdrage geleverd hebben. Omdat grijs perlitisch gietijzer niet plastisch kan vervormen, leiden opgelegde vervormingen al snel tot breuk. Het ontwerp van de vloeren was niet optimaal. Hoewel de vloeren fungeren als het verband tussen de schacht en de kuip, geeft de staat van de vloeren als opgenomen tijdens de inspectie in de zomer van 2021 geen veiligheidsgevaar voor de constructie als geheel.

2.3 Leeftijd van de scheuren in de schacht en de kuip

In [2] zijn vooral de lange scheuren in de lijven aangegeven als risicovol voor de draagkracht van de toren. De conclusie uit dit vooronderzoek luidde dat sprake is van zeer snelle toename in aantal en omvang van de scheurvorming.

Nebest heeft de foto's van de 2021-inspectie [4] beschikbaar gesteld voor nader onderzoek. De foto's van de scheuren in de lijven van de schachtpanelen zijn in het voorliggende onderzoek in detail bestudeerd en geëvalueerd. Op een significant aantal van deze foto's lijkt de conservering aan de binnenzijde van de schacht over de scheur te zijn aangebracht, zie bijlage D. Voor de gedetecteerde scheur met de grootste lengte is dit nagenoeg zeker, zie Figuur 2.1. De meest recente vernieuwing van de conservering aan de binnenzijde dateert uit 1999. Dit betekent dat deze scheuren al ruim twee decennia oud zijn. Bijkomend meent [H] dat hij de langste scheur al eerder tijdens een werkbezoek heeft gezien. Het is niet uitgesloten dat (een aantal van) deze scheuren al sinds of kort na de bouwperiode aanwezig zijn (is). Ook voor een aantal scheuren in de flenzen en een aantal boutbreuken is sprake van conservering over de scheuren en breukvlakken.

De kans op detectie van scheuren, onder de heersende omstandigheden tijdens de uitvoering van de visuele inspectie is niet erg hoog, zeker wanneer deze inspectie niet door gespecialiseerde inspecteurs wordt uitgevoerd. Het is aannemelijk dat eerdere inspecties niet van het detailniveau waren als de inspectie in [4]. Het is dus

goed mogelijk dat deze scheuren niet zijn gevonden tijdens visuele inspecties in de voorgaande jaren, ook als deze wel aanwezig waren. Ook kan vorstschade – het uitzetten van bevroren water in eerder gevormde scheuren – een rol hebben gespeeld in het verschil in detectie in de loop van de tijd.



Figuur 2.1 Foto's van de grootste scheur (lengte circa 860 mm). Boven: overzichtsfoto nr. 9117 opgenomen in [4]. Onder: ingezoomd op detailfoto's nrs. 9118 en 9119 verstrekt door Nebest.

Er zijn ook scheuren aanwezig waarvan de detailfoto's wijzen op scheuren die zijn ontstaan nadat de conservering is aangebracht – dus ergens in de afgelopen twee decennia. Dit geldt vooral voor de scheuren in de flens tussen het boutgat en de rand, met corrosie van de boutsteel door ons als meest waarschijnlijk aangemerkte oorzaak. Deze scheuren kunnen in de toekomst doorgroeien in de lijven en nieuwe scheuren kunnen ontstaan, omdat het corrosieproces niet is gestopt. Daarnaast zijn er foto's van relatief recent gebroken bouten (met glinsterend breukoppervlak).

2.4 Ontbrekende informatie en onzekerheden

Er is tot nu toe geen metaalkundig onderzoek uitgevoerd naar de constructieve rest-eigenschappen van het toegepaste gietijzer. In [5] is een chemische analyse uitgevoerd (op monsters waarvan de locatie van uitname, het type paneel en de dikte-locatie onbekend zijn). Daaruit kan worden afgeleid dat het gaat om eutectisch grijs gietijzer, zie bijlage H voor een beschrijving. De sterkte en de breukgevoelig-

heid kunnen niet worden afgeleid uit de chemische analyse. De vloeren zijn volgens schetsen in [7] aanzienlijk dunner dan de schacht en de kuip. Het is waarschijnlijk dat de breukgevoeligheid van de vloeren, vanwege snellere afkoeling, nog lager is dan die van de schacht en de kuip.

Zoals eerder vermeld is de kans op detectie bij visuele inspecties niet heel hoog. Door conservering kunnen bestaande oppervlaktescheuren worden gecamoufleerd en daardoor aan het oog onttrokken. De kans op detectie neemt toe als scheuren groter zijn en openstaan, waardoor een scherpe aftekening in de verflaag ontstaat. Ook kunnen flenzen die door corrosie van het ijzercement op buiging worden belast, aan de niet inspecteerbare voegzijde zijn gescheurd maar niet zijn doorgescheurd tot de toegankelijke zijde. De werkelijke omvang van de schade is dus niet bekend en het is vrijwel zeker dat er meer scheuren aanwezig zijn dan tot nu toe gedetecteerd.

Door de doorgaande corrosie en de breukgevoeligheid van het materiaal kunnen scheuren vrij plotseling ontstaan en groeien. Dit maakt dat de schadeontwikkeling grillig en niet goed te voorspellen is.

2.5 Conclusies schade-inventarisatie

De door ons als meest waarschijnlijk aangemerkte oorzaken voor de schades in de schacht, naast schades die mogelijk tijdens of direct na de bouw zijn ontstaan, zijn corrosie van de bouten en corrosie van het ijzercement in de voegen. In het huidige onderzoek is aan het licht gekomen dat de langst gedetecteerde scheur in het lijf van de schachtpanelen al meer dan 2 decennia oud is en voor zover zichtbaar niet is uitgebreid. Voor een aantal andere scheuren in het lijf van de schachtpanelen lijkt dit ook te gelden. Dit is voortschrijdend inzicht ten opzichte van oktober 2021, toen de indruk bestond dat deze scheuren in zeer korte tijd waren ontstaan. Vooral deze grote lijfscheuren werden gezien als bedreigend voor de constructieve veiligheid en vormden de belangrijkste reden voor het instellen van het toegangs- en gebiedsverbod. Ook in de flens van de schachtpanelen zijn er indicaties dat scheuren al meer dan 2 decennia oud zijn, maar vooral in de flens zijn er ook veel scheuren die van recenter datum zijn. Een aantal boutbreuken is ouder dan 2 decennia, anderen zijn recenter. Het schadeproces gaat door en is niet goed voorspelbaar.

De meest waarschijnlijke oorzaken van de schades in de vloeren zijn belastingen door personen en door wind en/of temperatuur. Delen van deze vloeren zijn niet veilig betreedbaar. Hoewel de vloeren ook fungeren als het verband tussen de schacht en de kuip, geeft de staat van de vloeren als opgenomen tijdens de inspectie in de zomer van 2021 geen veiligheidsgevaar voor de constructie als geheel. Het verband moet wel worden hersteld.

3 Gebieds- en toegangsverbod

3.1 Gebiedsverbod

Sinds oktober 2021 geldt een gebiedsverbod rond de vuurtoren. De onderbouwing daarvan is gegeven in [2]. Daarbij stond centraal:

- De zeer snelle verslechtering van de situatie, met name betrekking hebbend op de toename van het aantal grote lijfscheuren in een korte tijd. Het werkelijk aantal scheuren is waarschijnlijk groter dan het aantal gedetecteerde scheuren.
- De brosheid van het materiaal.
- Het risico op instabiliteit van de schacht door plooi of knik bij doorgaande scheuren in de wand, die elkaar kunnen opzoeken.

Met de kennis van oktober 2021 was het instellen van een gebiedsverbod onzes inziens een juiste keuze, omdat het risico op letsel door bezwijken van de toren aanzienlijk is.

Op basis van de kennis en inzichten verkregen in dit verificatieonderzoek is het waarschijnlijk dat een significant aantal van de langere, kritisch bevonden scheuren in het lijf al decennia aanwezig is. Dit geldt ook voor de gevonden scheur met de grootste lengte. Dit inzicht verandert de inschatting van de kans op bezwijken:

- Er is sprake van een zekere mate van 'bewezen sterkte' voor de panelen met deze lange scheuren: de toren heeft sinds 1999 meerdere stormen doorstaan. De maximale uurgemiddelde windsnelheid op 10 m boven maaiveld gemeten door het KNMI-station bij De Kooy bedraagt 24 m/s (in 2002 en in 2013).
- De uitbreiding van de scheuren in de wand gaat langzamer dan in oktober gedacht. De kans van het aaneen scheuren van bestaande kritische scheuren op korte termijn is daarmee gering.

PT Structural heeft rekenkundige analyses uitgevoerd om de weerstand tegen plooi- of knikstabiliteit in kaart te brengen. De resultaten daarvan zijn samengevat in bijlage F. Uit deze bijlage blijkt dat de kans op acuut instorten van de toren door instabiliteit verwaarloosbaar is, zelfs bij een scheur over een hoogte van een hele verdieping (viermaal zo lang als de langst gedetecteerde scheur in [4]).

Doorgaande corrosie van de bouten betekent dat daarvoor geen gebruik kan worden gemaakt van 'bewezen sterkte'. Bij hoge windbelasting is een trekbelasting op de bouten mogelijk. Een veilige ondergrens voor de windbelasting waarbij nog geen problemen ontstaan is de windbelasting waarbij nog geen trekkracht in de schacht optreedt. De windsnelheid behorend bij die belasting kan rekenkundig worden bepaald. Ten noordwesten van de toren loopt een weg. Om een gevaar voor weggebruikers op te leveren moet die wind uit het oosten tot zuidoosten komen.

Zoals reeds genoemd is het schadeproces niet gestopt en niet goed te voorspellen. Vanwege het toegangsverbod bestaat de behoefte aan verificatie van eventuele scheuruitbreiding door een repeteerbare, onbemande inspectie binnenin de toren. Als proef is in het voortraject een visuele inspectie uitgevoerd in de vuurtoren te Scheveningen met een op afstand bedienbare camera bevestigd op een drone [J]. Deze inspectie is geslaagd; de drone kon de toren op afstand bestuurd inwendig

'beklimmen' en er konden detailfoto's worden gemaakt. Het advies is om de lange lijfscheuren in de schacht van de Lange Jaap op dezelfde wijze periodiek te inspecteren. Daarmee kan worden nagegaan of er wel of geen uitbreiding heeft plaatsgevonden van de kritisch aangemerkte scheuren en daarnaast kunnen aanvullende detailopnames van de conservering bij de scheuren worden gemaakt. Onzes inziens kan het *gebiedsverbod* worden opgeheven als wordt voldaan aan twee voorwaarden:

- De inspecties laten geen of nauwelijks groei van de scheuren in het lijf zien.
- De windsnelheid is lager dan die waarbij trek in de schacht optreedt.

Bij het laatste kan onderscheid worden gemaakt tussen de weg langs de vuurtoren (voorwaarde geldt voor wind uit oostelijke richtingen, met als veilige grens een richting tussen 30 en 210 graden) en het terrein (voorwaarde geldt bij iedere windrichting). Bij geconstateerde groei van de scheuren of bij hogere windsnelheden kan het gebiedsverbod niet worden opgeheven.

Benadrukt wordt dat de bovengenoemde voorwaarden voor opheffing van het gebiedsverbod gebaseerd zijn op een risico-inschatting. Harde uitspraken of berekeningen over scheuruitbreiding in de toekomst zijn niet mogelijk. Vanuit haar verantwoordelijkheid als beheerder kan RWS ervoor kiezen om, na een drone inspectie en voorafgaand aan deze opheffing, aanvullend onderzoek uit te voeren, bijvoorbeeld met bemande inspecties (visueel of met aanvullend niet-destructief onderzoek) of met een scheurgroeidetectiesysteem voor de belangrijkste scheuren. Dit kan tevens als basis dienen voor een risico-gestuurde inspectiecyclus waarmee verdere degradatie van de vuurtoren kan worden bewaakt.

3.2 Toegangsverbod

Uit de foto's in [4], [8] en [9] en het interview met [A] en [J] blijkt dat tenminste een deel van de vloeren in slechte staat is, onder andere rondom de trappen van een aantal verdiepingen. Vooropgesteld dat de schade aan de vloeren niet toeneemt, zal de constructie als geheel hierdoor niet bezwijken, maar het verband moet wel worden hersteld (hoofdstuk 4). Wel is er een niet verwaarloosbare kans op bezwijken van een deel van de vloerconstructie, zeker als deze wordt betreden. Dit betekent dat wij adviseren het *toegangsverbod* voor de toren te handhaven totdat de looproute veilig toegankelijk is. Startpunt daarvoor is een constructieve schouw op locatie. Waar de veiligheid niet gegarandeerd is, moet een (tijdelijke) ondersteuning worden aangebracht. Bij deze schouw en bij het (tijdelijk) ondersteunen moet worden meegenomen dat het materiaal geen vervormingscapaciteit heeft en dus ook geen waarschuwing geeft voor bezwijken (zoals grote vervormingen).

3.3 Samenvatting gebieds- en toegangsbeperking

Het inzicht dat een significant aantal van de langere, kritisch bevonden scheuren in het lijf waarschijnlijk al decennia aanwezig is, verandert de inschatting van de kans op bezwijken. Anderzijds is het schadeproces niet gestopt en niet goed te voorspellen. Daarom kan het gebiedsverbod onzes inziens worden opgeheven als wordt voldaan aan twee voorwaarden: periodieke inspecties in de toren, de eerste keer uitgevoerd met een drone, laten geen of nauwelijks groei van de scheuren in het lijf van de schachtpanelen zien én de windsnelheid is lager dan die waarbij trek in de schacht wordt berekend. Voor de weg die ten noordwesten van de vuurtoren loopt geldt de laatstgenoemde voorwaarde enkel voor wind uit oostelijke richtingen.

Bij groei van de scheuren of bij hogere windsnelheden kan het gebiedsverbod niet worden opgeheven. RWS kan ervoor kiezen om aanvullende voorwaarden te stellen. Het toegangsverbod kan vervolgens worden opgeheven nadat de looproute veilig gemaakt is.

4 Renovatie

Dit hoofdstuk beschrijft de noodzaak van een studiefase voor de beslissing over renovatie van de toren, geeft een overzicht van de onderdelen waarvoor herstel of vervanging noodzakelijk is en beschrijft een aantal renovatiemogelijkheden.

Voor dit hoofdstuk is uitgegaan van de veronderstelling dat de lange lijfscheuren in de schachtpanelen al lange tijd aanwezig zijn en er hooguit beperkte scheurgroei optreedt voor die scheuren. Dit moet nog blijken uit onbemande inspecties, zie hoofdstuk 3. In het geval het resultaat van die inspectie anders uitwijst, ontstaat een nieuwe situatie en moet dit hoofdstuk worden herbezien.

4.1 Minimaal benodigde herstel

Voor een renovatie is minimaal het volgende benodigd:

- De oorzaken van de schades moeten worden weggenomen, om scheurvorming en -uitbreiding in de toekomst te voorkomen. Dit betekent dat de bouten moeten worden vervangen en dat het ijzercement tussen de voegen volledig moet worden verwijderd en vervangen. De naden tussen de panelen moeten aan de buitenzijde waterdicht en overschilderbaar worden gemaakt. De (raam)openingen moeten waterdicht worden gemaakt.
- De looproute in de toren, bestaande uit vloerpanelen en trappen, moet veilig beloopbaar worden gemaakt. Op locaties met grote scheuren in de vloerpanelen moet het verband tussen de schacht en de kuip worden hersteld.
- Het werken van bestaande, lange scheuren in de lijven van de schacht moet worden tegengegaan.
- De toren moet opnieuw worden geconserveerd.

De renovatie gaat gepaard met risico's. Een deel van deze risico's kan inzichtelijk worden gemaakt voordat overgegaan wordt of besloten wordt tot renovatie. Daarvoor kan een studiefase ingesteld worden, als beschreven in de volgende paragraaf.

4.2 Studiefase

De beschikbaar gestelde documenten en de renovatie-ideeën die bij RWS zijn binnengekomen (bijlage E), geven nog geen uitsluitsel over de vraag of een renovatie praktisch uitvoerbaar en economisch verantwoord is. Naar ons inzicht moet hiervoor minimaal het volgende technische onderzoek worden uitgevoerd:

- Er moeten proeven worden uitgevoerd om mechanische eigenschappen van het gietijzer te bepalen, zie bijlage H. Daarmee kan het risico beter worden ingeschat van het ontstaan en groeien van scheuren bij incidentele trek- of stootbelasting tijdens de renovatie en in de toekomst.
- De conservering aan de buitenzijde van de schacht bevat chroom-6 [10]. Ook voor de binnenzijde moet worden nagegaan of er chroom-6 aanwezig is.
- Enkele panelen moeten worden vrijgemaakt van conservering, om vervolgens de scheuren gedetailleerd in kaart te brengen met niet-destructief onderzoek, zodat een beter beeld ontstaat van de werkelijke omvang van de schade.
- Een berekening met een rekenmodel van de toren met daarin de inschatting van de aanwezige schades (en afhankelijk van de renovatiemethode ook de maatafwijkingen zoals de scheefstand van de toren) is nodig om te bepalen of,

en zo ja vanaf welke omvang, scheuren in de schacht gerepareerd moeten worden.

- Afhankelijk van de geconstateerde schade en de renovatiemethode moet een methode voor herstel van scheuren in de schachtpanelen worden vastgesteld.
- Onderzoek op locatie is nodig om na te gaan hoe de ijzercementvoegen, de bouten en de vloerpanelen verwijderd kunnen worden zonder schade aan de panelen te veroorzaken. In 1999 bleek uitname van de bouten niet overal te lukken [3] (reden onbekend), in 2021 is het wel gelukt, ook bij vastgeroeste bouten, door deze uit te boren [11]. Ook bij vloerpanelen bleek uitname in het verleden lastig [L]. Verplaatsing van het bovenste deel van de toren te IJmuiden naar Vlieland in 1909 [8] geeft aan dat het verwijderen van de ijzercementvoeg mogelijk is, maar de destijds toegepaste methode is onbekend.
- De methode om de naden tussen de panelen aan de buitenzijde van de toren waterdicht te maken moet worden vastgesteld.

Voor dit onderzoek adviseren we een bouw- en expertteam samen te stellen. Door dit onderzoek wordt een deel van de risico's van renovatie inzichtelijk gemaakt, alhoewel er ook na deze studie significante risico's blijven bestaan ten gevolge van de vele onbekende factoren en de uniciteit van deze renovatie.

Na dit technische onderzoek kan een kosten-batenanalyse worden uitgevoerd, waarbij kosten, risico's en cultuurhistorische waarde van behoud bij renovatie worden afgewogen tegen nieuwbouw (zie de volgende paragraaf). Deze studies zijn ook relevant voor de andere vuurtorens die op vergelijkbare wijze en met hetzelfde materiaal zijn gebouwd.

Deze studiefase duurt naar schatting minimaal een jaar. Om het degradatieproces in deze periode zoveel als praktisch haalbaar is te vertragen, kunnen maatregelen worden genomen zoals het waterdicht maken van de naden aan de buitenkant van de schacht en het plaatsen van een drooginstallatie in de toren. Een alternatief is het plaatsen en inpakken met krimpfolie van een (bestaande) hulpconstructie of een losstaande, geballaste steigerconstructie die de toren afschermt tegen wind, water en directe zonnestraling. Grondverbetering is daarvoor nodig. Een voorbeeld van een hulpconstructie is gegeven in bijlage G (met dank aan [F]). Na het plaatsen van een dergelijke hulpconstructie kan de voorwaarde aan de windsnelheid voor het omgevingsverbod, zie hoofdstuk 3, worden verruimd of afgeschaft. Een stroomschema van de acties en beslissingen voorgesteld in dit rapport is opgenomen in bijlage I.

4.3 Renovatie- en nieuwbouwmogelijkheden

4.3.1 Algemeen

Deze paragraaf geeft een beknopte beschrijving van renovatiemogelijkheden (en nieuwbouw), als antwoord op de vraag naar kansrijke en reëel geachte renovatiemogelijkheden; vraag 2a uit paragraaf 1.2. Omdat een renovatie naar onze inschatting ingrijpend, langdurig en kostbaar zal zijn, achten wij het niet optimaal om een renovatie gericht op een beperkte, resterende levensduur uit te voeren. De hier beschreven mogelijkheden zijn daarom gericht op een levensduur van vele decennia na renovatie (of nieuwbouw). Zonder het minimale herstel als beschreven in paragraaf 4.1 uit te voeren, is de resterende levensduur immers niet goed voorspelbaar. Dit betekent dat er uiteindelijk voor is gekozen om geen volgorde van de levensduur als gesteld in vraag 2b uit paragraaf 1.2 te geven.

Deze paragraaf wordt pas relevant wanneer uit de studiefase blijkt dat kan worden voldaan aan de daar genoemde technische randvoorwaarden. In de beschrijving in deze paragraaf komen enige aspecten voor die niet zijn benoemd in het technische onderzoek in de studiefase. De betreffende aspecten achten wij praktisch uitvoerbaar en begrootbaar en zodoende kan dit worden meegenomen in de kosten-batenanalyse. De betreffende aspecten dienen wel nader uitgezocht en gedetailleerd te worden voorafgaand aan een renovatie.

Vooruitlopend op de studiefase is er in deze paragraaf vanuit gegaan dat het grote aantal scheuren tussen het boutgat en de rand van de flens niet hersteld hoeft te worden om aan de constructieve eisen te voldoen. De voorlopige analyses in [12] geven immers aan dat de spanningen en krachten ten gevolge van de belasting uiterst gering zijn (nadat het probleem van de zwelroest door bout- en voegvervanging is opgelost).

Achtereenvolgens zijn in de rest van deze paragraaf beschreven:

- Een reparatie op locatie die tot doel heeft de oorzaken van de schade weg te nemen en de huidige toestand van de toren te 'bevriezen'. Inspecties zijn ook na de uitgevoerde renovatie noodzakelijk.
- Een renovatie waarbij de toren gedemonteerd en opnieuw opgebouwd wordt en die tot doel heeft om de toren terug te brengen in de oorspronkelijke staat en daarbij verbeteringen aan te brengen.
- Nieuwbouw.

Tussenvormen zijn mogelijk.

Bij het opstellen van de herstelmogelijkheden is gebruik gemaakt van eigen inzicht en van ideeën van betrokkenen en ondernemers die bij Rijkswaterstaat zijn ingediend. Bijlage E geeft daarvan een overzicht. Geen van de ideeën uit bijlage E bleek individueel toereikend om de schadeoorzaak weg te nemen en de toren te herstellen. Wel kon gebruik worden gemaakt van een aantal van de ingediende ideeën.

Bij versterking en vervanging van delen uit grijs gietijzeren is in deze paragraaf een voorkeur gegeven voor nodulair gietijzeren delen. Nodulair gietijzer is veel minder breukgevoelig en heeft een veel betere vervormingscapaciteit dan grijs gietijzer. Staal (of een ander materiaal) is een alternatief als in de verbindingen ruimte gecreëerd wordt om een verschil in uitzetting door temperatuurvariaties te kunnen opvangen.

Renovatie van de Lange Jaap is precisiewerk, waarbij kennis over en ervaring met het materiaal en voorzichtigheid in de uitvoering geboden is. Trek- en stootbelasting moet zoveel als mogelijk worden voorkomen. We raden aan om bedrijven met ruime ervaring in renovatie van constructies uit gietijzer te selecteren. Nagegaan moet worden hoe dit in te passen is in de aanbestedingsregels. Daarnaast raden we aan om permanent toezicht door een ervaren toezichthouder te laten plaatsvinden tijdens de uitvoering.

4.3.2 *Renovatie op locatie*

Deze renovatie beschrijft een aantal mogelijkheden die invulling geven aan het minimaal benodigde herstel als beschreven in paragraaf 4.1. In een aantal gevallen zijn randvoorwaarden gegeven bij deze mogelijkheden.

Vloeren veilig maken

Tijdens de renovatie is het noodzakelijk dat niet alleen het looppad maar ook de rest van de vloeren veilig betreedbaar zijn. Daarvoor kan gebruik worden gemaakt van een tijdelijke hulpconstructie die afsteunt op de flenzen van de schacht en de kuip. Als ervoor wordt gekozen om vloerpanelen met scheuren langs de omtrek niet te vervangen (zie subparagraaf 4.3.3) moet een alternatief verband worden aangebracht om de samenwerking tussen de kuip en de schacht te herstellen.

IJzercementvoegen en bouten vervangen

Om de draagkracht tijdens de hersteloperatie niet te verliezen moeten de voegen en de bouten in delen worden vervangen. Daarbij worden eerst de delen aan weerszijde van de kruising tussen de horizontale en de verticale voegen uitgenomen en vervangen – daar is de grootste zwelroest waargenomen [A], [J] – en daarna worden de tussengelegen stukken weggenomen en vervangen. Voor toegang tot de voegen tussen ring 4 en ring 1 moeten ook de vloerpanelen per verdieping, in segmenten, worden uitgenomen en na vervanging van de voeg opnieuw worden gemonteerd. Vervang de voegen door krimparme mortel. Vervang de bouten door gecoate of anderszins tegen corrosie beschermde bouten die ook in maritieme omgevingen worden toegepast en die een laag potentiaalverschil met gietijzer hebben. Bouten mogen slechts handvast worden aangedraaid.

Vullen van scheuren in de lijven

Maak de scheuren in de lijven die door-en-door zijn (dus door de volledige lijfdikte lopen) waterdicht om indringen van water en daarmee vorstschade te voorkomen. Voor niet al te lange scheuren volstaat het vullen met hars of epoxy. Voor lange scheuren die bovendien door-en-door zijn moet, in aanvulling daarop, worden voorkomen dat de scheur kan werken en daardoor beschadiging aan de conservering kan veroorzaken. Een mogelijkheid voor dat laatste is het plaatsen van een nieuw gietijzeren paneel over de bestaande scheur aan de binnenzijde, min of meer overeenkomstig Figuur D 10 in bijlage D, met bevestiging aan het gescheurde paneel via niet-voorgespannen injectiebouten. Bij een dergelijke oplossing kan een beperkte trekkracht overgebracht worden (rekening houdend met de lage sterkte onder trek van de gietijzerlegering en de spanningsconcentraties bij de boutgaten). De scheur is dan niet meer inspecteerbaar vanaf de binnenzijde. Alternatieven zijn gegeven in bijlage E.2, met een beknopte samenvatting van de voor- en nadelen.

Waterdicht maken aan de buitenzijde

Dicht de naden tussen de panelen aan de buitenzijde van de toren, zodat water en zout niet meer kunnen toetreden. De daarvoor beste methode is nog niet bekend, zie paragraaf 4.2. Eén van de alternatieven is een elastische, industriële kit, aan te brengen in een kleine, ronde groef van 3 à 4 mm diepte in de panelen ter plaatse van de naden. Nadeel van het aanbrengen van een dergelijke groef is dat het contactoppervlak tussen de panelen vermindert en de contactpunten kunnen wijzigen. Inspecteer de naden periodiek. Dicht ook andere (raam)openingen.

Conservering vernieuwen

Conserveer de toren aan binnen- en buitenzijde. Bij conditionering van het klimaat aan de binnenzijde verdient het aanbeveling om de voegen aan de binnenzijde vrij te laten van conservering, zodat vocht kan uitwasemen.

4.3.3 *Renovatie met demontage*

Voordelen van demontage ten opzichte van een renovatie op locatie zijn dat dit:

- Een optimalere omgeving voor grondige renovatie oplevert, met meer mogelijkheden voor aanvullend onderzoek (zoals bemonstering van materiaal en een groter scala aan niet destructief onderzoek naar schade).
- Meer renovatiemethodes mogelijk maakt (zoals het vervangen van panelen in de schacht).
- De mogelijkheid biedt om de toren terug te bouwen met minder gebreken en maatafwijkingen in wanden en vloeren dan de huidige staat.

Nadeel van demontage is dat de demontage zelf, het transport en de montage een risico voor additionele schade aan de panelen opleveren. De te hijsen en de overige panelen moeten tijdens de hijsoperatie worden geborgd. De hulpconstructie genoemd in paragraaf 4.2 en bijlage G kan ook worden gebruikt voor hijswerkzaamheden.

Omdat de renovatie grondiger is, zal het aantal onverwachte zaken dat men tegenkomt ook groter zijn. Minimaal moeten de aspecten genoemd in subparagraaf 4.3.2 worden uitgevoerd en in aanvulling daarop kunnen de hier beschreven mogelijkheden worden uitgevoerd.

Vloeren vervangen

Indien een relatief beperkt aantal vloerpanelen is gescheurd, kunnen deze worden vervangen door nodulair gietijzeren panelen. Voor de trapbomen kan een alternatieve afsteuning worden gemaakt, zodat schade aan de vloeren in de toekomst wordt voorkomen. Indien scheurvorming in een groter aantal vloerpanelen heeft plaatsgevonden is het aan te bevelen om de constructie tegelijkertijd te verbeteren, dat wil zeggen om een verbinding tussen de schacht en de kuip te creëren die drukkrachten kan overbrengen maar tegelijkertijd de flexibiliteit heeft om opgedrongen buiging door temperatuur- en windbelasting te kunnen weerstaan, waarbij de flenzen van de panelen van de schacht en de kuip niet door buiging worden belast. Gedacht kan worden aan een ontwerp van een flexibele-rotatieverbinding tussen de schacht en (nieuwe, nodulair) gietijzeren vloerdelen. Een derde variant bestaat uit het ontwerpen van een geheel nieuw vloersysteem dat voldoet aan de eisen voor publiek toegankelijke ruimten volgens het bouwbesluit. In dat geval moet worden nagegaan of de (flenzen van de) schacht en de kuip deze belasting kunnen dragen.

Gebroken flenzen van de schachtpanelen herstellen

De krachten op de flenzen van de schachtpanelen blijven waarschijnlijk gering. Dit betekent dat afgebroken delen met beperkte lengte in de flens waarschijnlijk geen beperkende invloed hebben op de constructieve werking en de krachtsafdracht vanuit de vloeren. Bij flenzen die over grote lengte afgebroken zijn kan een nieuwe ring (segmentdeel) over de twee bestaande flenzen, die nu met bouten verbonden zijn, worden aangebracht. Deze ring kan met bouten worden verbonden aan de

schacht. Bij deze methode zijn de bestaande flenzen en voegen niet meer inspecteerbaar.

Schachtpanelen met scheuren in het lijf herstellen of vervangen

Als uit nader onderzoek blijkt dat de gescheurde panelen trekspanningen moeten overbrengen en dat geen van de oplossingen genoemd in paragraaf 4.3.2 en bijlage E mogelijk is, dan kunnen de gescheurde panelen na demontage worden vervangen door nieuwe panelen.

Panelen rondom ramen en deur

Secundaire trekspanningen zijn met name rond de ramen te verwachten. Een alternatief – hier niet verder uitgewerkt – voor het vervangen van panelen kan bestaan uit het plaatsen van een frame bestaande uit nodulair gietijzer rondom die ramen en de deur waaromheen panelen met een lijfscheur aanwezig zijn. Dit frame kan met bouten worden verbonden aan de bestaande constructie.

Voegen vervangen en verbeteren

Tussen de lijven van de panelen kan een samendrukbaar, duurzaam materiaal worden aangebracht om de contactpunten enigszins te egaliseren. Als alternatief voor krimparme mortel kan een pakking worden aangebracht in de voegen. Daarbij moet nog worden nagegaan hoe de spleten bij de kruising tussen de horizontale en de verticale voegen afgedicht kunnen worden.

4.3.4 *Nieuwbouw*

Vanuit het oogpunt van kosten en beheersbaarheid kan ook voor vervanging worden gekozen. Bij vervanging van de toren kan worden voldaan aan alle hedendaagse ontwerp- en constructie eisen die gelden voor nieuwbouw. Voor nieuwbouw worden aanzienlijk lagere risico's en een beter beheersbaar proces verwacht dan voor renovatie.

Als wordt gekozen voor een replica ligt het meest voor de hand een toren opgebouwd uit nodulair gietijzeren panelen of een gelaste toren van (lean duplex) staal. Het bestaande lighthouse kan daarbij worden hergebruikt. In geval van nodulair gietijzer kunnen de panelen met de huidige stand der techniek veel groter worden gemaakt dan in 1876 mogelijk was. Dit heeft onder andere als voordeel dat het aantal naden vermindert. Daarnaast kan de verbinding tussen de elementen worden verbeterd door het uitvlakken van de contactvlakken, zodat geen (op te vullen) voegen nodig zijn. De massa van een nieuwe toren uit nodulair gietijzer is lager, en uit staal aanzienlijk lager, dan de massa van de huidige toren.

Een alternatief bestaat uit een nieuwe draagconstructie waar de bestaande schachtpanelen als gevelbekleding omheen worden gezet. Zie hiervoor bijlage E.3.

4.4 **Samenvatting renovatiemogelijkheden**

Voor een renovatie is naar ons inzicht minimaal het volgende benodigd:

- De oorzaken van de schade moeten worden weggenomen, om scheurvorming en -uitbreiding in de toekomst te voorkomen. Dit betekent dat de bouten moeten worden vervangen en dat het ijzercement tussen de voegen volledig moet worden verwijderd en vervangen. De naden tussen de panelen moeten aan de

buitenzijde waterdicht en overschilderbaar worden gemaakt. De (raam)openingen moeten waterdicht worden gemaakt.

- De looproute in de toren, bestaande uit vloerpanelen en trappen, moet veilig beloopbaar worden gemaakt. Op locaties met grote scheur in de vloerpanelen moet het verband tussen de schacht en de kuip worden hersteld.
- Het werken van bestaande, lange scheuren in de lijven van de schacht moet worden tegengegaan.
- De toren moet opnieuw worden geconserveerd.

De beschikbaar gestelde documenten en de renovatie-ideeën die betrokkenen en ondernemers bij RWS hebben ingediend, geven geen uitsluitel over de vraag of een renovatie praktisch uitvoerbaar en economisch verantwoord is. Hiervoor moet, deels op locatie, een aanvullend technisch onderzoek worden uitgevoerd. Door dit onderzoek wordt een deel van de risico's van renovatie inzichtelijk gemaakt, alhoewel er ook na deze studie significante risico's blijven bestaan. Dit onderzoek dient als basis voor een kosten-batenanalyse waarin kosten, risico's en cultuurhistorische waarde van behoud worden afgewogen tegen nieuwbouw. Deze studiefase duurt naar schatting minimaal een jaar.

Om antwoord te geven op de vraag naar kansrijke en reële mogelijkheden tot behoud van de vuurtoren, is een aantal renovatievarianten beschreven, opgesteld op basis van eigen inzicht en de bij RWS ingediende ideeën. Als uit de studiefase volgt dat kan worden voldaan aan de technische en economische randvoorwaarden voor behoud en dat de risico's beheersbaar lijken, dan is een aantal varianten denkbaar, zoals:

- Renovatie op locatie, die tot doel heeft de oorzaken van de schade weg te nemen en de huidige toestand van de toren te 'bevrozen'. Inspecties zijn ook na renovatie noodzakelijk.
- Renovatie waarbij de toren wordt gedemonteerd en opnieuw opgebouwd en die tot doel heeft om de toren terug te brengen in de oorspronkelijke of zelfs verbeterde staat.

Beide varianten zijn gericht op een levensduur na renovatie van vele decennia, aangezien een renovatie naar onze inschatting kostbaar zal zijn en een renovatie gericht op een beperkte, resterende levensduur dan niet optimaal wordt geacht. Daarom is hier geen antwoord gegeven op de vraag naar volgorde in levensduur. Als alternatief voor renovatie kan voor nieuwbouw worden gekozen. Voor nieuwbouw worden aanzienlijk lagere risico's en een beter beheersbaar proces verwacht dan voor renovatie. In het geval van een replica ligt het meest voor de hand een toren van nodulair gietijzeren panelen, of een gelaste toren van (lean duplex) staal.

5 Conclusies en aanbevelingen

TNO en SEC zijn gevraagd een onderzoek te doen naar de volgende vragen over de Lange Jaap:

1. Huidige situatie

- a. Als de vuurtoren in de huidige conditie veilig te betreden of onder voorwaarden / in specifieke condities veilig te betreden? Veiligheid betreft hier de veiligheid van personen ten aanzien van het risico op letsel door het bezwijken van (delen van) de vuurtoren.
- b. Is een afzetting rondom de toren noodzakelijk en zo ja, kunnen maatregelen worden genomen waarmee de omvang van de afzetting beperkt kan worden, waar noodzakelijk onder specifieke condities?

2. Mogelijkheden behoud op langere termijn

- a. Welke mogelijkheden tot behoud van de gehele vuurtoren, of delen daarvan, worden als reëel en kansrijk beschouwd? Hierbij worden zowel bij RWS ingediende ideeën (zie bijlage E) als nieuwe ideeën overwogen. Deze ideeën zullen in alle gevallen in een later stadium nader onderzocht en uitgewerkt moeten worden.
- b. Kan op basis van expert judgement een volgorde van haalbaarheid en technische levensduur worden gegeven van de onder 2a. benoemde mogelijkheden tot behouden van de toren?

Om deze vragen te beantwoorden is een dossieronderzoek uitgevoerd naar de oorzaken van de schades. Tijdens het onderzoek, waar circa een maand de tijd voor is gegund, was het ten gevolge van het gebieds- en toegangsverbod niet mogelijk om een bezoek te brengen aan de Lange Jaap. Het onderzoek heeft geleid tot de volgende inzichten, conclusies en aanbevelingen.

5.1 Conclusies over de schadeoorzaken

De scheurvormige schades bevinden zich nagenoeg allemaal in de schacht en in de vloeren. De door ons als meest waarschijnlijk aangemerkte oorzaken van de scheurvorming in de schacht, naast schades die mogelijk in tijdens of direct na de bouw zijn ontstaan, zijn corrosie van de bouten tussen de flenzen en corrosie van het ijzercement in de voegen. Dit leidt tot vorming van ijzeroxide, waardoor zwelling van de steel van de bout in het boutgat en van het ijzercement in de voeg optreedt. Hierdoor ontstaan lokale trekspanningen in het grijs perlitisch gietijzer, dat hiertegen niet bestand is. Corrosie van de steel van de bout is in eerdere onderzoeken niet aangedragen als mogelijk mechanisme voor de scheurvorming. De langste scheur die is gedetecteerd in het lijf van de schachtpanelen is al meer dan 2 decennia oud, blijkens de conservering die over de scheur zit. Voor zover zichtbaar breidt deze scheur zich niet uit. Voor een significant aantal andere scheuren in het lijf van de schachtpanelen lijkt dit ook te gelden. Ook in de flens van de schachtpanelen is een deel van de scheuren al meer dan 2 decennia oud, maar vooral in de flens zijn er ook veel scheuren die van recentere datum zijn. De recentere scheuren die bovendien kunnen doorgroeien in het lijf, zijn vooral scheuren die door ons worden toegeschreven aan corrosie van de boutsteel. Een aantal boutbreuken is ouder dan 2 decennia, andere boutbreuken zijn van recentere datum. Het schadeproces gaat

door en is niet goed voorspelbaar. Nieuwe scheuren kunnen ontstaan en scheuren rond de boutgaten kunnen doorgroeien in het lijf. Deze lijven vormen een essentieel onderdeel van de draagconstructie. Zonder maatregelen is de levensduur onvoorspelbaar.

Oorzaken van de schades in de vloeren zijn belasting door groepen bezoekers en belasting door wind en/of temperatuurverschillen. Delen van deze vloeren zijn in de huidige staat niet veilig betreedbaar. Hoewel de vloeren ook fungeren als het verband tussen de schacht en de kuip, geeft de staat van de vloeren als opgenomen tijdens de laatste inspectie (zomer 2021) geen gevaar voor bezwijken van de hele constructie. Het verband moet wel worden hersteld.

5.2 Conclusies en advies over het gebieds- en toegangsverbod

Het inzicht dat een significant aantal van de langere, kritisch bevonden scheuren in het lijf waarschijnlijk al decennia aanwezig is, verandert de inschatting van de kans op bezwijken ten opzichte van de analyses in oktober 2021, omdat er sprake is van een zekere mate van bewezen sterkte en omdat de scheuruitbreiding langzamer gaat dan gedacht in oktober 2021. Anderzijds is het schadeproces niet gestopt en dit proces is ook niet goed te voorspellen. Daarom kan het gebiedsverbod (vraag 1b) onzes inziens worden opgeschort of opgeheven als wordt voldaan aan twee voorwaarden:

- Wij adviseren periodieke inspecties uit te voeren binnenin de vuurtoren, waarvan ten minste de eerste wordt uitgevoerd met een camera geïnstalleerd op een drone. De drone-inspectie betekent dat er geen personen in de vuurtoren hoeven te zijn. Een eerder uitgevoerde proef van een drone-inspectie in de vuurtoren van Scheveningen toont aan dat dit mogelijk is. De eerste voorwaarde is dat deze inspecties geen of nauwelijks groei van de scheuren in het lijf van de buitenwand laten zien.
- De tweede voorwaarde is dat de windsnelheid lager is dan die waarbij een trekkracht in de schacht optreedt. Die windsnelheid kan rekenkundig worden bepaald. Voor de weg die aan de noordwestzijde langs de vuurtoren loopt, geldt deze voorwaarde enkel voor wind uit oostelijke richtingen, met als veilige grens een richting tussen 30 en 210 graden.

Bij groei van de scheuren of bij hogere windsnelheden kan het gebiedsverbod niet worden opgeheven. Het toegangsverbod (vraag 1a) kan vervolgens worden opgeheven nadat de looproute veilig is gemaakt. Voor de toegang tot het terrein en de toren kan RWS er vanuit zijn verantwoordelijkheid als beheerder voor kiezen om aanvullende voorwaarden te stellen.

5.3 Conclusies over de renovatiemogelijkheden

Voor een renovatie is minimaal het volgende benodigd:

- Wegnemen van de oorzaken van de schades. Dit betekent dat de bouten moeten worden uitgewisseld en dat de voegen volledig moeten worden verwijderd en vervangen. De naden tussen de panelen moeten aan de buitenzijde waterdicht worden gemaakt. Ook andere (raam)openingen moeten waterdicht worden gemaakt.
- De looproute in de toren bestaande uit vloerpanelen en trappen moet veilig beloopbaar worden gemaakt. Op locaties met grote scheur in de vloerpanelen moet het verband tussen de schacht en de kuip worden hersteld.

- Het werken van bestaande, grote scheuren moet worden tegengegaan.
- De toren moet opnieuw worden geconserveerd.

De beschikbaar gestelde documenten en de renovatie-ideeën die betrokkenen en ondernemers bij RWS hebben ingediend, geven geen uitsluitsel over de vraag of een renovatie praktisch uitvoerbaar en economisch verantwoord is (vraag 2a). Hiervoor moet, deels op locatie, een aanvullend technisch onderzoek worden uitgevoerd. Door dit onderzoek wordt een deel van de risico's van renovatie inzichtelijk gemaakt, alhoewel er ook na deze studie significante risico's blijven bestaan. Dit onderzoek dient als basis voor een kosten-batenanalyse waarin kosten, risico's en cultuurhistorische waarde van behoud worden afgewogen tegen nieuwbouw. Deze studiefase duurt naar schatting minimaal een jaar.

Om antwoord te geven op de vraag naar kansrijke en reële mogelijkheden tot behoud van de vuurtoren (vraag 2a), is een aantal renovatievarianten beschreven, opgesteld op basis van eigen inzicht en de bij RWS ingediende ideeën. Deze varianten zijn gericht op een levensduur na renovatie van vele decennia, aangezien een renovatie naar onze inschatting kostbaar zal zijn en een renovatie gericht op een beperkte, resterende levensduur dan niet optimaal wordt geacht. Daarom is hier geen antwoord gegeven op de vraag naar volgorde in levensduur (vraag 2b).

5.4 Aanbevelingen

Reeds genoemd is het instellen van een studiefase voordat wordt besloten over renovatie of nieuwbouw. Voor dit onderzoek adviseren we een bouw-en-expertteam samen te stellen.

Renovatie van de Lange Jaap is precisiewerk, waarbij kennis over het materiaal en voorzichtigheid in de uitvoering geboden is. We raden aan om bedrijven met ruime ervaring in renovatie van constructies uit gietijzer te selecteren. Nagegaan moet worden hoe dit in te passen is in de aanbestedingsregels. Daarnaast raden we aan om permanent toezicht door een ervaren toezichthouder te laten plaatsvinden tijdens de hele uitvoering.

Nederland heeft meer vuurtorens die in dezelfde periode, met hetzelfde materiaal en op dezelfde wijze zijn gebouwd: de vuurtorens te Scheveningen, Westkapelle laag, Breskens en Vlieland. We adviseren om deze torens te inspecteren op een vergelijkbare wijze als heeft plaatsgevonden bij de Lange Jaap in de zomer van 2021. Als daaruit blijkt dat ook deze torens gerenoveerd moeten worden, kunnen de renovaties gebundeld worden aangepakt.

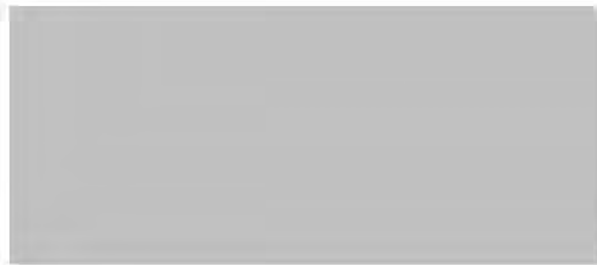
In Indonesië staan vuurtorens die met vergelijkbare constructie en materiaal zijn ontworpen en rond dezelfde periode zijn gebouwd. Naar wij begrepen hebben heeft RWS contact gezocht met de autoriteiten aldaar, maar nog geen reactie ontvangen. Ook Groot Brittannië heeft een aantal gietijzeren vuurtorens staan. We adviseren om contact op te nemen met de betreffende autoriteiten om ervaringen uit te wisselen.

6 Ter beschikking gestelde documenten

- [1] Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, „RCE kaders omgang rijksmonumentale vuurtoren de Lange Jaap,” RCE, 2021.
- [2] Ingenieursbureau gemeente Rotterdam, „Vuurtoren Lange Jaap,” Ingenieursbureau gemeente Rotterdam, 07-10-2021.
- [3] Ingenieursbureau gemeente Rotterdam, „Vuurtoren Lange Jaap Kijkduin, Den Helder - Onderzoeksrapport scheurvorming vloeren - LJ_R01_4.0,” Ingenieursbureau gemeente Rotterdam, 27-01-2020.
- [4] Nebest, „Inspectie Lange Jaap Huisduinen,” Nebest, 2021.
- [5] IECRT, „Vuurtoren Lange Jaap, Rapportnummer 10404,” IECRT, 2010.
- [6] TNO, „Inspectiebezoek kustlichttoren Huisduinen, 98MI/10510/WAM/VIS,” TNO, 13-05-1988.
- [7] H. v. Suchtelen, „De bouwwijze van de gietijzeren vuurtoren "Kijkduin" bij Den Helder,” Rijksloodswezen, maart 1978.
- [8] Arcadis, „Constructieve veiligheid transportroutes in vuurtoren Lange Jaap te Huisduinen, Gem. Den Helder,” Arcadis, 6 maart 2015.
- [9] Ingenieursbureau Gemeente Rotterdam, „Schouw Vuurtoren Scheveningen,” Ingenieursbureau Gemeente Rotterdam, 13-10-2021.
- [10] RPS, „Inventarisatie zware metalen. Omschrijving bouwwerk/ object Vuurtoren Kijkduin "Lange Jaap. Projectomvang Buitenschil. RPS/NL202004669 Versie 1,” RPS, 31-07-2020.
- [11] Takke Breukelen, „Rapportage demonteren boutverbinding,” Takke Breukelen, 11-06-2021.
- [12] PT Structural, „RWS Scheurvorming Vuurtoren Lange Jaap Kijkduin, Den Helder 2020012-01,” PT Structural, 05-02-2021.
- [13] Infra Inspectie, „Phased Array rapport van boutverbindingen aan Vuurtoren Lange Jaap te Den Helder, Februari en Maart 2021 - 2021_024_RWS_Rep1_Rev0,” Infra Inspectie, 17-03-2021.
- [14] Arcadis, „Beoordeling constructieve veiligheid transportroute in Vuurtoren Lange Jaap te Huisduinen 079073787 A,” Arcadis, 29 augustus 2016.
- [15] Arcadis, „Beoordeling constructieve veiligheid transportroute in Vuurtoren Lange Jaap te Huisduinen,” Arcadis, 12 juli 2017.
- [16] SGS Intron, „Ijzercement in de Lange Jaap - Karakterisering van de samenstelling - eindrapport - A116060/R20200107a,” SGS Intron, 28-05-2020.
- [17] TNO, „Inspectiebezoek kustlichttoren Huisduinen, 98MI/10510/WAM/VIS,” TNO, 13-05-1998.
- [18] (Onbekend), „Gietijzeren vloer gekramd,” (Onbekend), 28-02-2001.

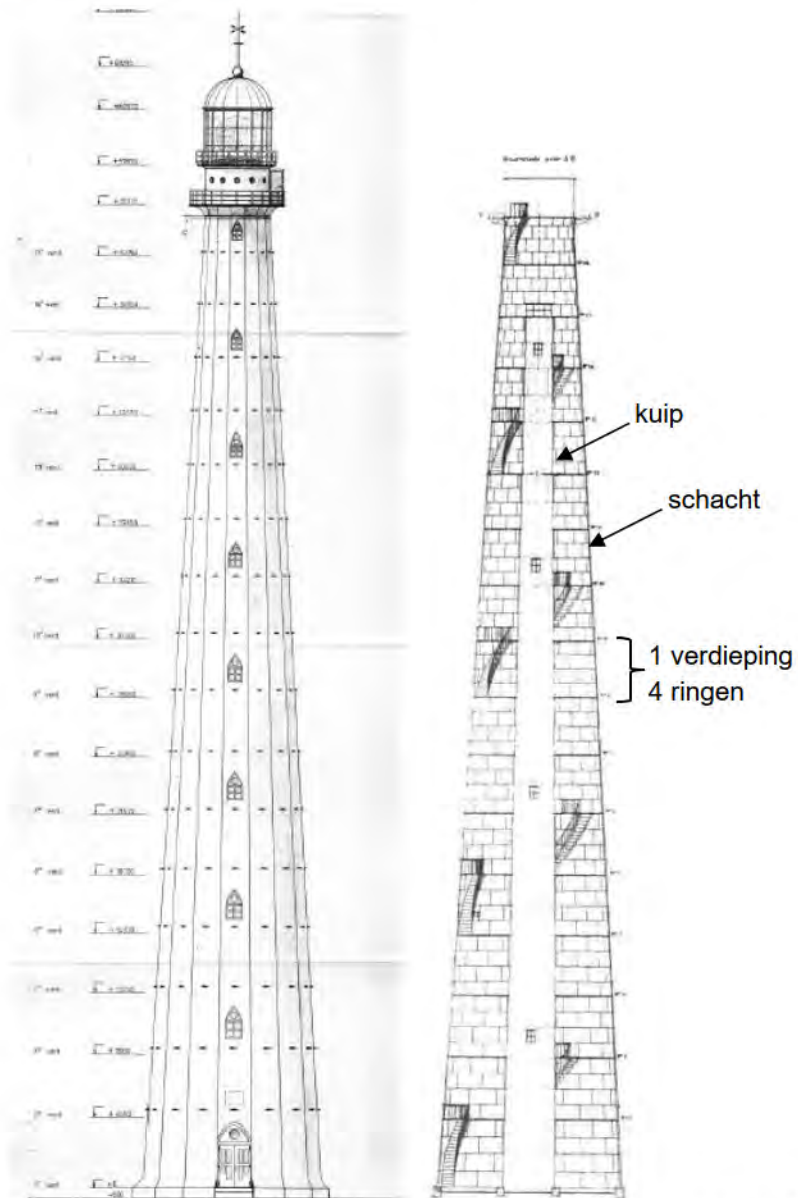
7 Ondertekening

Delft, januari 2022

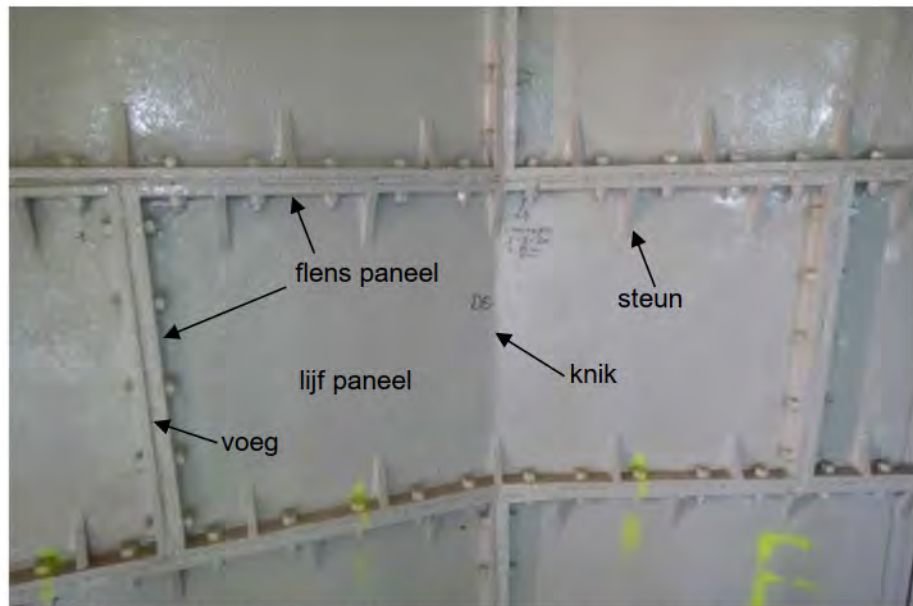


A Tekeningen en benaming onderdelen

Figuren A 1 en A 2 geven de naamgeving van de onderdelen van de toren, gehanteerd in dit rapport.



Figuur A 1 Aanzicht (links) en doorsnede (rechts) van vuurtoren Lange Jaap (bron: [7]).



Figuur A 2 Paneel (foto uit [4]) met benaming van onderdelen.

B Overzicht interviews

Tabel B 1 geeft een overzicht van de personen die wij geïnterviewd hebben.

Tabel B 1 Interviews met betrokkenen en experts.

Ref.	Organisatie	Contact	Onderwerp
[A]	Gemeente Rotterdam		Eerdere onderzoeken en achtergrond besluitvorming
[B]	RCE		Opdrachtschrijving en kader monumentenbehoud
[C]	Infra Inspectie		Toelichting op [13] en mogelijkheid inspectie paneel
[D]	TU Delft		Versterking met FRP ^{a)}
[E]	TU Delft		Corrosie als oorzaak van de schade en remedies
[F]	Mammoet		Installatie voor veiligstellen en ontmantelen
[G]	Doddema Locking		Reparatie van gietstaal door krammen
[H]	PT Structural		Toelichting op [12]
[I]	TU Delft particulier		Versterking met CFRP ^{a)}
[J]	Nebest		Toelichting op [4] en additionele info over inspectie
[K]	Empa (Zwitserland)		Versterking met FRP ^{a)}
[L]	RWS		Schadeoorzaak en -toename
[M]	Movares		Ervaringen met renovaties van gietijzeren constructies
[N]	DCC		Dichten van naden en conserveren van buitenzijde

^{a)} FRP = Fibre-reinforced polymer (vezelversterkte kunststof). CFRP = Carbon fibre-reinforced polymer.

C Tijdenlijn

De tijdenlijn als weergegeven in Tabel C 1 is gebaseerd op de informatie in [3] en [2] alsmede op de tijdenlijn op de website van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

Tabel C 1 Tijdenlijn.

Jaar	Activiteit
1991	Bestek voor herstel van 51 vloerplaten gemaakt. Nooit uitgevoerd.
1992	Vervanging lichthuis door een RVS lichthuis met radarinstallatie
1993	Stralen van de buitenzijde van de schacht en aanbrengen van een polyurethaan conservering ^{a)} .
1998	Inspectie vloeren [6].
1999	Afsluiten van de toren voor bezoekers.
1999	Stralen van de binnenzijde van de toren en aanbrengen van een polyurethaan conservering ^{a)} .
1999-2002	Aanbrengen plaatjes om vloeren op te vangen, deels door aanlassen aan de boutkoppen ^{b)} . Reparatie van (enkele?) vloerscheuren met krammen.
2010	Uitgebreide inspectie en schadeonderzoek [5].
?	Op basis van [5] is een constructiebureau gevraagd enkele vloerdelen los te halen, om ervaring op te doen ter voorbereiding van herstelmaatregelen.
2015-2017	Beoordeling van de constructieve veiligheid van de vloerpanelen nabij de trappen [8] en enkele herstelacties [14], [15].
2019	Beschouwend onderzoek Ingenieursbureau gemeente Rotterdam (IGR). Scheuren in de vloeren bedreigen de constructieve veiligheid niet. Scheurtjes in de wanden geconstateerd, die op termijn instandhouding problematisch kunnen maken.
2020	Rekenkundig onderzoek [12].
2020 of 2021	Besluit tot waterdicht maken van lekke voegen en vervolgens waterdicht maken van de volledige toren. Dit is niet uitgevoerd.
2021	(februari en maart) Inspectie van de bouten met phased array [13].
2021	(april) Demonteren en vervanging van een aantal bouten [11].
2021	(augustus en september) Visuele inspectie van de hele toren [4].
2021	(oktober) Instellen gebiedsverbod op basis van de resultaten van de visuele inspectie in augustus en september 2021.

^{a)} De conservering aan de buitenzijde blijkt, ondanks het stralen, chroom-6 te bevatten [10]. RWS sluit niet uit dat ook de binnenzijde chroom-6 bevat [J].

^{b)} Het oorspronkelijke plan bestond uit het vervangen van de vloeren door polyurethaan vloer met een strekmetaal. Hiervoor is echter geen toestemming verkregen van de gemeente. Het verwijderen van bestaande bouten bleek niet overal mogelijk. Door het afwijzen van het oorspronkelijke plan en de moeilijkheid van het verwijderen van een aantal bouten heeft deze actie een lange doorlooptijd gehad.

D Inventarisatie schades en schadeoorzaken

D.1 Overzicht

In de zomer van 2021 heeft Nebest een uitgebreide visuele inspectie uitgevoerd van de Lange Jaap [4]. Tabel D 1 geeft een overzicht van de gevonden schade-indicaties.

Tabel D 1 Indicaties volgend uit [4].

Type gebrek	Aantal
Bout afgebroken	75 (5%)
Corrosie(sporen)	127 (9%)
Flens ontbreekt gedeeltelijk	2 (0%)
Lekkagesporen	35 (2%)
Moer gescheurd	1 (0%)
Moer ontbreekt / moer los	6 (0%)
Ontbrekende conservering	1 (0%)
Scheur alleen in de flens	276 (19%)
Scheur alleen in het lijf	72 (5%)
Scheur in vloer	8 (1%)
Scheur van boutgat naar boutgat	40 (3%)
Scheur van boutgat naar de rand van de flens	805 (54%)
Scheur van de flens naar het lijf	17 (1%)
Staalplaat beschadigd / hap weg	2 (0%)
Staalplaat gecorrodeerd	1 (0%)
Vocht en lekkagesporen	10 (1%)
Voeg ontbreekt (gedeeltelijk)	1 (0%)

Voor de scheuren in de vloerpanelen geldt dat het overzicht niet volledig is. Wegens het grote aantal scheuren is tijdens de inspectie besloten om scheuren in de vloerpanelen niet meer te rapporteren [J]. In [4] is aangegeven dat een scheur in de vloer aanzienlijk groter was geworden tussen opname voor de offerte en uitvoering van de inspectie. De tussenliggende periode bedroeg enkele maanden.

Hieronder hebben wij een nadere inventarisatie gegeven van de scheurvorming in de flens van de panelen, het lijf van de panelen, de bouten, en de vloerpanelen. Bij het maken van deze inventaris hebben wij mede gebruik gemaakt van de schadeoorzaken genoemd in [5], [6], [3] en [2].

D.2 Scheuren in de flens van de schachtpanelen

De meeste scheuren in de flens kunnen in twee categorieën ingedeeld worden:

- Scheuren in de flens die onder een hoek lopen, in een aantal gevallen resulterend in uitbreken van stukken flens, Figuur D 1 links. Deze scheuren treden meestal op nabij de kruising van een horizontale en een verticale voeg.

Veel van deze scheuren lopen achterlangs de bouten en zitten tussen twee steunen in. Door ons als meest waarschijnlijke oorzaken zijn aangemerkt:

- 1) Lokale corrosie van het ijzercement in de voeg. De ongelijkmatige uitzetting die dit teweeg brengt in met name de horizontale voeg drukt het paneel omhoog, wat verhinderd wordt door de aanwezige steunen en/of bouten. Dit resulteert in een trekspanning. Door de lage vervormingscapaciteit en breukgevoeligheid van de betreffende gietijzerlegering (bijlage H), zorgt dit voor scheuren in het gietijzer.
 - 2) Een vergelijkbaar mechanisme treedt op door roestvorming van het contactvlak tussen de moer of de boutkop en het gietstaal.
 - 3) Mogelijk is een aantal scheuren in de bouwfase ontstaan, bijvoorbeeld door aandraaien van de bouten.
- Scheuren vanuit een boutgat naar de rand van de flens, die relatief recht door de flens lopen, Figuur D 1 rechts. Het gros van de scheuren in de flens valt in deze categorie. De door ons als meest waarschijnlijk aangemerkte oorzaak voor de meeste van deze scheuren is zware corrosie van de boutsteel. Roest is volumineuzer dan het oorspronkelijke metaal. De zwelling vult het boutgat lokaal en door de uitzetting ontstaat lokale trek in het gietijzer rond het boutgat. Door de lage vervormingscapaciteit en de breukgevoeligheid scheurt de flens. Deze scheur treedt meestal op richting de rand van de flens, aangezien dit de weg van de minste weerstand is (dat wil zeggen de grootste spanningsintensiteitsfactor geeft). Enkele foto's wijzen op (een combinatie met) het bovengenoemde mechanisme van zwelling van het ijzercement.



Figuur D 1 Voorbeelden van scheuren in de flens (foto's 7248 en 8436 uit [4]).

Opgemerkt wordt dat het mechanisme van zwelling van de boutsteel niet is opgenomen in [2] en de auteur [A] kan zich niet vinden in deze oorzaak. Dit verschil van inzicht heeft geen consequenties voor het vervolg (gebieds- en toegangsbeperking en eventuele renovatie).

IJzercement heeft een samenstelling en werking die niet te vergelijken is met die van modern cement. De werking van ijzercement berust op het corroderen van het ijzervijsel door het vocht in het mengsel bij het aanbrengen. Daardoor zwelt het mengsel in het begin van de levensduur en wordt een dichte voeg verkregen [16]. Wanneer vocht toetreedt op een later tijdstip, kan het overgebleven ijzervijsel verder corroderen. Het materiaal kan daardoor verder zwellen of zijn samenhang verliezen. De toren is in 1993 opnieuw geconserveerd aan de buitenzijde. De nieuwe afdichting is mogelijk van mindere kwaliteit als voorheen en bevindt zich momenteel in slechte staat, waardoor water tussen de voegen kan treden. Dat kan

de schade hebben doen ontstaan of versnellen, door corrosie van zowel de bouten als het ijzercement. Daarnaast had de toren oorspronkelijk openingen bovenin die zorgden voor luchtcirculatie, terwijl de toren nu is afgesloten [B], mogelijk met extra condensvorming tot gevolg. Ook zijn ramen lek of lek geweest [A]. De toren is vanuit het ontwerp gevoelig voor spleetcorrosie.

Door zwelling van het ijzercement worden de panelen mogelijk van elkaar gedrukt. Als dat gebeurt, kan dit resulteren in twee nadelige effecten:

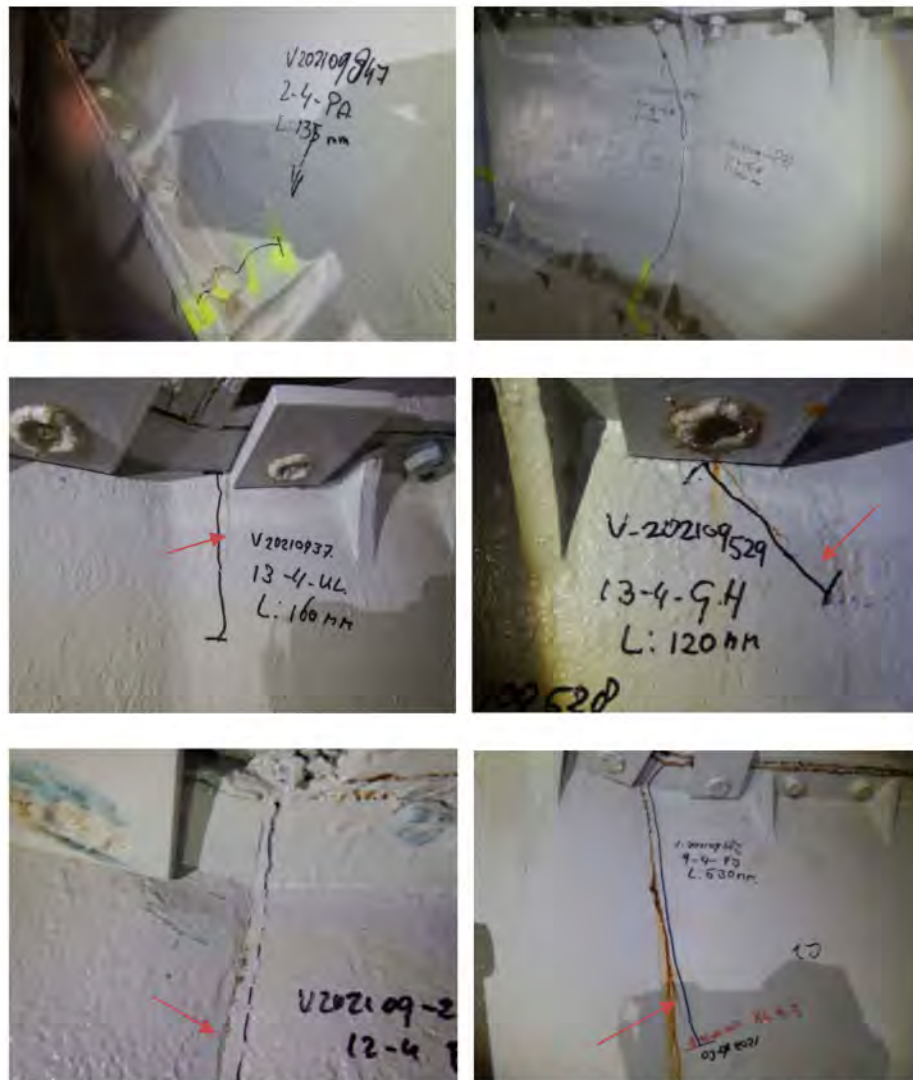
- De naad wordt verder opgedrukt, waardoor de conservering op de buitenzijde gaat lekken. Daardoor kan zouthoudend water intreden. Dit kan zorgen voor een progressieve toename van de schade in de tijd.
- De verticale krachtsoverdracht van paneel naar paneel verschuift mogelijk van het lijf naar de flens. Het is mogelijk dat hierdoor aanvullende schade optreedt, in de flens.

D.3 Scheuren in het lijf van de schachtpanelen

De meeste van de 17 scheuren in het lijf van de panelen kunnen in twee categorieën ingedeeld worden:

- Scheuren vanuit een boutgat in de flens die doorgroeien in het lijf, zie Figuur D 2 boven. De door ons als meest waarschijnlijk aangemerkte oorzaak is het corroderen van de boutsteel. Door zwelling ontstaat eerst een scheur in de flens, richting het vrije einde daarvan. Bij doorgaande zwelling ontstaat een scheur vanuit het boutgat aan de achterzijde in de flens en deze scheurt door in het lijf.
- Een aantal van deze scheuren bevindt zich in de buurt van de later toegevoegde ondersteuningsplaatjes voor de vloeren, zie Figuur D 2 midden. Deze plaatjes zijn rond 2002 aan een aantal boutkoppen gelast en zij dienen voor het borgen van de vloerpanelen. De warmte-inbreng tijdens het lasproces en de krachtsoverdracht via deze plaatjes, die zorgen voor spanningsconcentraties in het paneel, zijn mogelijk (aanvullende) oorzaken voor een aantal schades geweest. Het breukgevoelige materiaal is daartegen niet bestand en scheurt. Bij deze mogelijkheid, die niet is opgenomen in de documenten van hoofdstuk 6, moet de betreffende scheur na 2002 ontstaan zijn.
- Scheur door de flens en het lijf in de knik van het paneel, zie Figuur D 2 onder. Het is mogelijk dat deze scheur ontstaat door zwelling van de verticale voeg in de panelen onder en / of boven het paneel met knik. Deze voeg bevindt zich direct boven of onder de knik. Een andere mogelijkheid is dat (een deel van) deze scheuren al vanaf de bouw aanwezig is.

Twaalf van de zeventien scheuren in het lijf bevinden zich in de panelen met knik. In al deze gevallen bevindt de scheuren zich in de buurt van de knik, ook in de eerste twee categorieën. Het is mogelijk dat de sterkte van het materiaal, door verontreinigingen of grove grafietlamellen, lager is in de buurt van de knik. Dit hangt mede af van de wijze waarop de panelen met knik gegoten zijn. Daarover bestaat geen informatie.



Figuur D 2 Voorbeelden van scheuren in het lijf (foto's 9150, 9117, 8467, 8450, 4190 en 8796 uit [4]).

D.4 Scheuren in de steunen van de schachtpanelen

Deze schadevorm is op 18 locaties waargenomen, waarvan een aanzienlijk deel is gesitueerd nabij de ramen. Figuur D 3 geeft een voorbeeld. Deze scheuren zijn hier niet nader geanalyseerd omdat het ons onvoldoende duidelijk is hoe de constructie rondom de ramen is vormgegeven en deze scheuren waarschijnlijk geen invloed hebben op de constructieve veiligheid van de hele constructie.



Figuur D 3 Voorbeeld van een scheur in een steun (foto 3867 uit [4]).

D.5 Boutbreuken

In totaal zijn 81 gebroken bouten gedetecteerd. Voor 37 bouten geldt dat deze al meer dan een decennium geleden zijn gebroken, blijktens uit de conservering op de breukvlakken. Het merendeel van de gedetecteerde boutbreuken bevindt zich in de horizontale aansluitnaden tussen de panelen (68 stuks). De overige 13 stuks bevinden zich in een verticale aansluitnaad. Er zijn 2 panelen met daarin 3 gedetecteerde boutbreuken en 21 panelen met daarin 2 gedetecteerde boutbreuken. Voor de overige locaties betreft het steeds 1 gedetecteerde boutbreuk per paneel.

De meest waarschijnlijke oorzaken zijn:

- Corrosie van de ijzercementvoeg, waardoor deze opzwellt en er een trekspanning in de bouten ontstaat.
- Corrosie van de moer of de kop bij het contactvlak met de flens, waardoor er een trekspanning in de bouten ontstaat.

Figuur D 4 geeft de twee oorzaken aan. De bouten zijn daarbij al verzwakt door corrosie van de boutsteel.



Figuur D 4 Twee oorzaken voor boutbreuk (foto's 4240 en 8465 uit [4]).

D.6 Scheuren in de vloerpanelen

De scheuren vallen in een van de volgende twee categorieën:

- Scheuren dwars door de vloerpanelen, Figuur D 5. De meest waarschijnlijke oorzaak voor de meeste van deze scheuren is spanningsconcentratie door de afsteuning van de trapbomen (via bouten in het vrije veld van de vloeren en bij de trapgaten). Bij belasting door personen ontstaan hier hoge piekspanningen. De licht (lees: zwak) uitgevoerde vloeren en de breukgevoeligheid van het materiaal hebben daar gezorgd voor scheuren; met moderne constructiematerialen treedt in een dergelijk geval lokaal enige plasticiteit op, wat geen nadelig effect heeft op de draagkracht. Het toegepaste materiaal heeft deze mogelijkheid niet. Figuur D 6 toont aan dat niet alle scheuren vanuit trapgaten zijn ontstaan, maar spanningsconcentraties lijken in alle gevallen doorslaggevend. Voor belasting door personen geldt dat de toren voor 1999 enige tijd is opgesteld voor het publiek [17]. Dit kan verklaren waarom er niet eerder scheurvorming is opgetreden. Alternatief kunnen windbelasting of temperatuurverschillen tussen schacht en trap zorgen voor een opgedrongen vervorming, waartegen de vloeren niet bestand zijn.
- Tangentiele scheuren (langs de binnen- en buitenomtrek van de vloerpanelen, respectievelijk langs de kuip en de schacht), Figuur D 7, foto links toont een dergelijke scheur en foto rechts geeft een scheur die eerder gerepareerd is. De meest waarschijnlijke oorzaak is buiging van de opgespannen vloerpanelen in combinatie met spanningsconcentraties bij de boutgaten van bij de bevestiging aan de flens. Deze buiging ontstaat door temperatuurverschillen tussen de schacht en de kuip en/of door belasting van de toren door wind. Voor belasting door wind geldt dat de schacht en de kuip niet een vormvaste doorsnede vormen, maar twee gekoppelde buizen zijn, zie Figuur D 8 links. Deze opgedrongen vervormingen van de vloerpanelen nemen toe en de overspanning van de vloeren neemt af over de hoogte. Ook voor temperatuurverschillen geldt dat de opgedrongen vervormingen toenemen met de hoogte. Dit kan verklaren dat de schade initieel niet bij de onderste verdiepingen werd geconstateerd [17]. De significante maatafwijkingen in de vloersystemen [5] die tijdens of direct na de bouwperiode zijn opgetreden, kunnen bijgedragen hebben aan de opgedrongen vervormingen. Op enkele locaties kunnen deze schades ontstaan zijn als secundaire schade door de belasting door personen bij trappen. Voor de drie mechanismes geldt dat de toren flexibeler wordt bij het bezwijken van vloerpanelen en vloeren, waardoor de vloeren en vloerpanelen in de buurt een grotere belasting te verdragen krijgen en ook kunnen bezwijken.



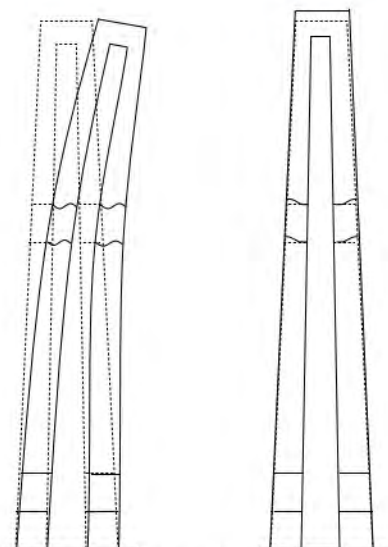
Figuur D 5 Voorbeelden van scheuren dwars door de vloerpanelen (foto's uit [8]).



Figuur D 6 Voorbeeld van een scheur dwars door een vloerpaneel die niet is ontstaan vanuit een trapgat (foto uit [17]).



Figuur D 7 Voorbeelden van scheuren in de vloer (foto links uit [3], rechts uit [8]).









Figuur D 8 Principe van vervorming van de toren onder windbelasting (links) of temperatuurverschil tussen schacht en kuip (rechts). (Vervormingen sterk vergroot weergegeven en vier vloeren ter illustratie weergegeven). Door éézijdige verwarming van de schacht treedt het gecombineerde effect op.

De vloerconstructie is niet optimaal ontworpen. De panelen zijn enige tijd of nog steeds doorgestempeld [15]. Deze doorstempeling kan de schade verergerd hebben door een verschil in (thermische) uitzetting. Door de breukgevoeligheid van het materiaal resulteert de opgedrongen vervorming die dan optreedt in scheurvorming.

Op de foto's is te zien dat veel scheuren in de vloerpanelen ver openstaan. Radiale scheuren in de vloeren kunnen openstaan door temperatuuruitzetting van de schacht bij straling door de zon, of door uitzetting van de voegen. Bij deze verklaringen zouden de scheuren verder moeten openstaan bij de schacht dan bij de kuip. Daarvan lijkt geen sprake. Voor het openstaan blijft over als mogelijke verklaring over de maatafwijkingen. Voor de tangentele scheuren is het mogelijk dat de toren ten gevolge van windbelasting bij losliggende vloeren "ovaliseert" (ellipsvormig wordt), zie [12]. De bouten in ruime gaten worden één kant op gedrukt onder windbelasting en deze bouten nemen het gebroken deel van het vloerpaneel mee naar buiten nadat de windbelasting afneemt.

D.7 Overzicht van de scheuren in de schacht

Figuur D 9 geeft een overzicht van de boutbreuken en de scheuren in de lijven van de schachtpanelen. De scheuren in de flens zijn niet weergegeven vanwege de grote aantallen en de onoverzichtelijkheid die dat teweegbrengt in de figuur. In Figuur D 9 zijn de raam- en deuropeningen en de locaties van het trapgat in grijs weergegeven. Voor de scheuren en breuken geldt de volgende legenda:

	Scheur in het lijf; nabij het midden		Afgebroken bout; breukvlak gecorrodeerd		Flens gescheurd; achter bout langs
	Scheur in het lijf; nabij de zijkant		Afgebroken bout; breukvlak gecoat		Bout vervangen door Takke

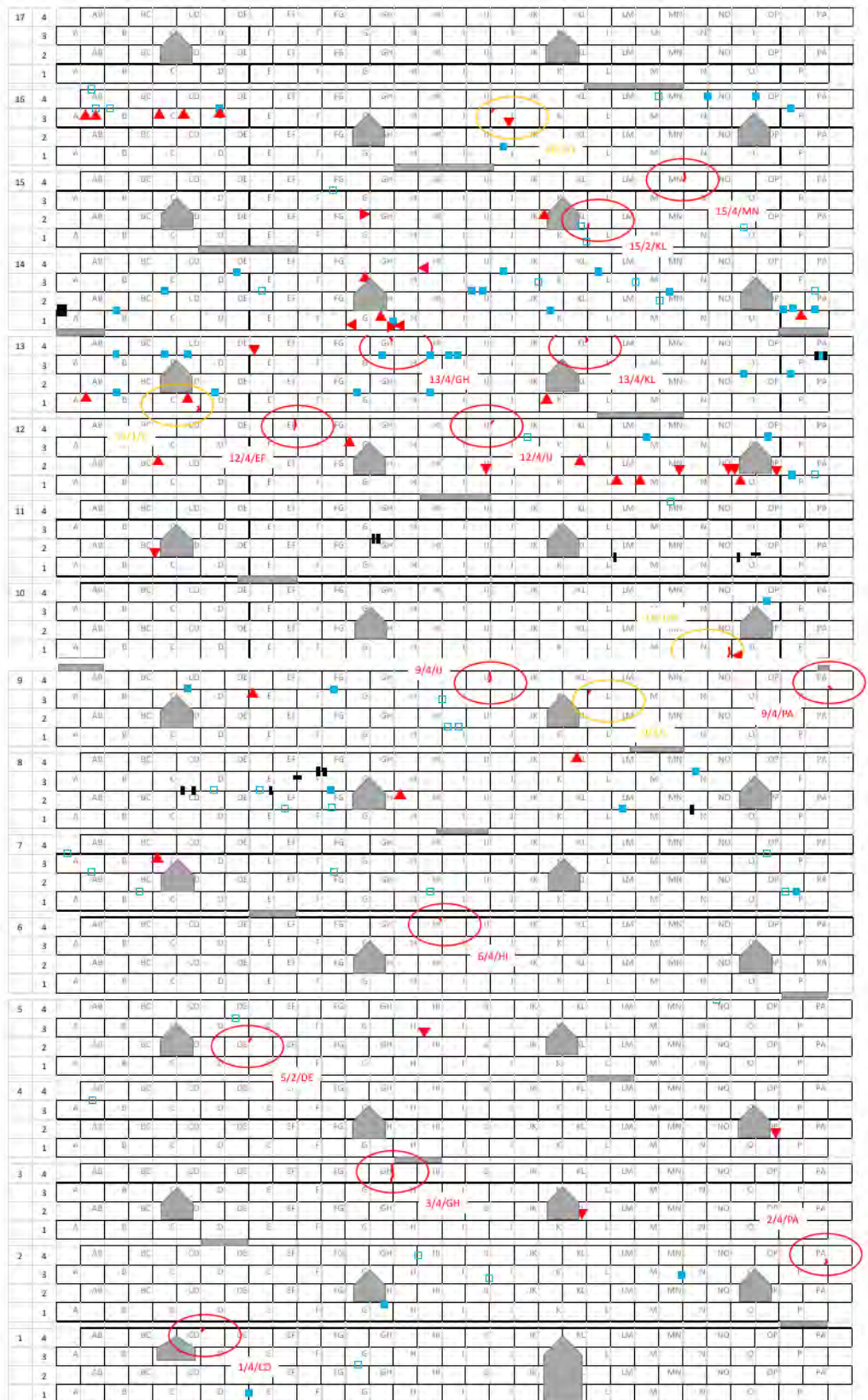
De scheuren in de lijven van de schachtpanelen zijn omcirkeld. De benaming van deze scheuren is identiek aan die in [4]. Tabel D 2 geeft een overzicht van de scheuren in de lijven.

Tabel D 2 Overzicht van gedetecteerde scheuren in het lijf.

Nivo	Ring	Element	Omschrijving	Lengte [mm]
Panelen met knik				
15	4	MN	Verticale scheur vanaf bovenflens, nabij knik	400
15	2	KL	Linker onderhoek bij aansluiting raam, verticaal vanaf onderflens	180
13	4	GH	Korte diagonale scheur vanaf bovenflens, nabij knik	120
13	4	KL	Verticale scheur vanaf bovenflens, nabij knik	160
12	4	EF	Verticale scheur vanaf bovenflens, nabij knik	510
12	4	IJ	Verticale scheur vanaf bovenflens, nabij knik	200
9	4	IJ	Verticale scheur vanaf bovenflens, nabij knik	530
9	4	PA	Diagonale scheur vanaf onderflens, nabij knik	75
6	4	HI	Korte diagonale scheur vanaf bovenflens, nabij knik	110
5	2	DE	Korte diagonale scheur vanaf bovenflens, nabij knik	65
3	4	GH	Verticale scheur over hele hoogte, nabij knik	860
2	4	PA	Korte diagonale scheur vanaf onderflens, nabij knik	135
1	4	CD	Korte diagonale scheur vanaf bovenflens, nabij knik	140
Panelen zonder knik				
16	3	J	Korte scheur in linker bovenhoek	40
13	1	C	Vanaf hoek onder, verticaal langs flens	530
10	1	N	Vanaf hoek onder, verticaal langs flens	540
9	3	L	Korte scheur in linker bovenhoek	70

De scheuren in de lijven, die in het vooronderzoek als potentieel gevaarlijk zijn aangemerkt [2], blijken niet geclusterd; voor deze scheuren is er geen acuut risico op het naar elkaar groeien. Anderzijds is het vrijwel zeker dat niet alle scheuren gedetecteerd zijn tijdens de visuele inspectie. Scheur 13/1/C bevindt zich in de buurt van een raamopening. Deze opening geldt als verzwakking van de gevel. Indien de scheuren doorgroeien tot de opening ontstaat in een verzwakking over 3 ringen.

De gebroken bouten lijken wel geclusterd, rond verdiepingen 7 en 8 (met name overgeschilderde, dus oude, breuken) en verdiepingen 12, 13 en 14. We hebben geen oorzaak voor deze clustering gevonden.



Figuur D 9 Overzicht van de scheuren en boutbreuken in de schacht, behoudens de scheuren in de flens.

D.8 Leeftijd van de scheuren

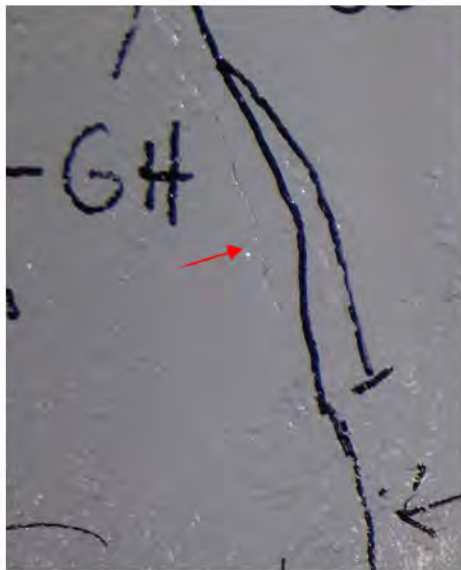
Van scheuren in de constructie is al lange tijd sprake. In [17], de dato 1998, is reeds een eerder uitgevoerde reparatie in de vloerpanelen en eerdere boutbreuken gerapporteerd. In 1991 is al een bestek geschreven voor het vervangen van een aantal vloerpanelen. Dit plan is nooit uitgevoerd. Daarnaast is op een foto uit het archief een paneel zichtbaar waarover een plaat gebout is, Figuur D 10. Het is aannemelijk dat dit een versterking voor een verticale lijfscheur is. Het is onbekend wanneer deze versterking is aangebracht.



Figuur D 10 Foto van een eerder (ongedateerd) aangebrachte plaat die tegen het lijf is gebout.

Nebest heeft de foto's van de inspectie [4] aan ons verstrekt. We hebben de foto's van de scheuren in de lijven in detail bekeken. Een aantal foto's geven sterke aanwijzingen dat de conservering aan de binnenzijde van de schacht over de bestaande scheur is aangebracht, Figuur D 11 voor enkele voorbeelden. Dit geldt onder andere voor de grootste scheur met code 3/4/GH. Bijkomend meent [H] dat hij deze scheur eerder heeft gezien.

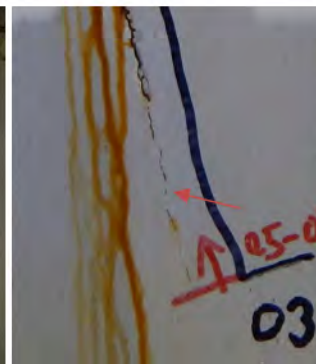
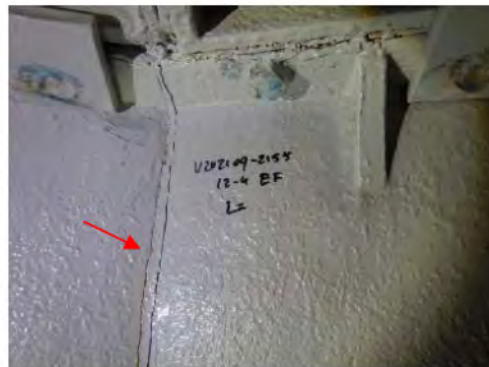
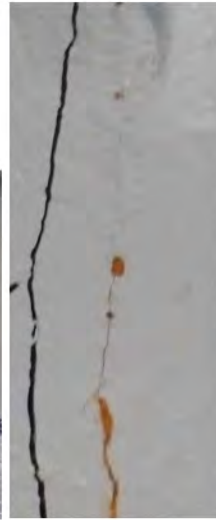




Figuur D 11 Foto's van scheuren met sterke aanwijzing van conservering over de scheur (bovenste foto uit [3], overige foto's 9117, 9118 en 9119 uit [4]).

Daarnaast zijn er veel foto's van scheuren in de lijven waarbij we het waarschijnlijk achten dat de conservering over de scheuren is aangebracht, Figuur D 12, maar de foto's geven geen uitsluiting. Voor de bovenste foto van deze figuur geldt dat de scheur in dit geval niet kan zijn ontstaan door het aanlassen van de plaatjes voor de vloerondersteuning. Voor zover bekend dateert de meest recente vernieuwing van de conservering uit 1999. Dit betekent dat deze scheuren al meer dan twee decennia oud zijn. Niet uitgesloten is dat (een aantal van) deze scheuren al vanaf de bouw aanwezig zijn (is).

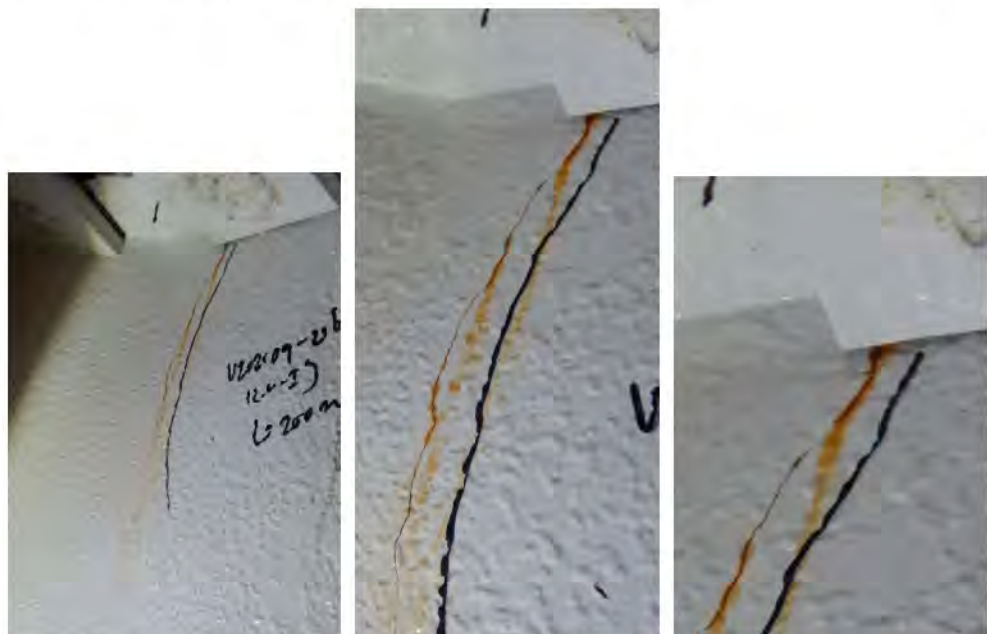






Figuur D 12 Foto's van scheuren met waarschijnlijk conservering over de scheur (foto's 8467 (2x) 7131 (2x) 4191, 4190, 8796 (2x), 7081 (2x) uit [4]).

Voor een aantal scheuren in de lijven is het niet te zeggen of de conservering wel of niet over de scheuren is aangebracht. Op de foto's van één scheur lijkt sprake te zijn van scheurvorming die is ontstaan of fors doorgroeid na het aanbrengen van de conservering, zie Figuur D 13.



Figuur D 13 Foto's van een scheur is ontstaan of gegroeid na het aanbrengen van de conservering (foto's 4206 en 4207 uit [4]).

Het is dus waarschijnlijk dat een significant aantal van de scheuren in de lijven van de schachtpanelen al geruime tijd aanwezig is. Dat geldt vrijwel zeker voor de langste gedetecteerde scheur. We merken op dat de kans op detectie van een visuele inspectie niet heel hoog is, zeker wanneer deze inspectie niet door gespecialiseerde inspecteurs wordt uitgevoerd, zoals wel in de laatste inspectie [4]

heeft plaatsgevonden. Het is dus goed mogelijk dat de betreffende scheuren niet zijn gevonden in voorgaande jaren.

Ook in de flenzen komen scheuren voor waarover de conservering is aangebracht. Dit is op veel foto's van uitgebroken stukken flens zichtbaar, zie Figuur D 14 links. Dit zijn schades met de eerder genoemde oorzaken (paragraaf D.2): corrosie van het contactvlak bij de boutkop of -moer, uitzetten van de ijzercementvoeg, of opgetreden tijdens de bouwperiode.

Er zijn echter ook veel scheuren in de flens waarbij de scheur zich scherp aftekent in de conservering. Voor deze scheuren is het waarschijnlijk dat ze zijn ontstaan na het aanbrengen van de conservering (dus ergens in de afgelopen twee decennia). Dit zijn voornamelijk scheuren tussen het boutgat en de flenstip, zie Figuur D 14 rechts, waarvoor de door ons als meest aannemelijk aangemerkte oorzaak is het corroderen van de boutsteel. Wanneer de omstandigheden voor corrosie niet weggenomen worden, zal met name dit schadeproces doorgaan. Dit zijn scheuren die bij doorgaande corrosie ook aan de achterzijde kunnen scheuren in de flens en vervolgens in het lijf. Daarnaast zijn er relatief recent gebroken bouten (met glinsterend breukoppervlak) zichtbaar op de foto's.



Figuur D 14 Foto's van de scheuren met schade aan de conservering (links, foto 6855 uit [4]) en zonder schade aan de conservering (rechts, foto 4149 uit [4]).

In augustus 2021 [4] zijn 22 boutbreuken gerapporteerd die wel een indicatie hebben meegekregen maar niet als gebroken waren gerapporteerd in een phased array onderzoek in februari en maart 2021 [13] (na de vorstperiode). Daarnaast zijn 11 boutbreuken in [4] gerapporteerd die geen indicatie hadden meegekregen in [13]. Uit navraag bij de auteur van [13], ref. [C], blijkt dat gebroken bouten niet altijd in een afzonderlijke categorie gerapporteerd zijn. Ook geldt dat niet alle bouten bereikbaar waren voor een betrouwbaar phased array onderzoek en dat het met de toegepaste onderzoek techniek bijzonder lastig is om grofkorrelig materiaal te onderzoeken. Ref. [C] vindt het aannemelijk dat (het gros van) de gerapporteerde bouten in [4] al in februari en maart gebroken waren.

E Ingediende ideeën

E.1 Overzicht van de ideeën

Op verzoek van RWS is het overzicht van de ingediende ideeën en onze reactie daarop opgenomen in een afzonderlijk memo (met referentie M100343295).

E.2 Reactie op de ideeën om panelen te herstellen

Een groot aantal van de ingediende ideeën gaat in op de mogelijkheid van herstel van gescheurde panelen. Als blijkt dat de methode als aangegeven in Figuur D 10 niet optimaal is, bijvoorbeeld omdat de over te brengen trekkrachten te groot zijn, kan nagegaan worden of de genoemde ideeën goede alternatieven bieden. Een eerste reactie is hieronder gegeven:

- Herstellen met krammen over de scheur en deze scheur opvullen met hars. Met deze methode kan er geen water meer intreden dat voor corrosie of scheuruitbreiding door bevriezing kan zorgen. Deze methode kan toegepast worden wanneer uit berekening blijkt dat de spanningen in de panelen laag blijven. De methode is eerder toegepast voor scheuren in de vloerpanelen van de Lange Jaap [18].
- Verlijmen van vezel versterkte kunststof (VVK). Deze oplossing is door velen aangedragen. Belangrijker voordeel is dat uit veel onderzoeken in de wetenschappelijke literatuur en praktijktoepassingen blijkt dat een VVK-oplossing met carbonvezels (CFRP) zeer effectief is in het overbruggen van scheuren en het voorkomen van verdere scheurgroei in metaal. Bij toepassing van carbonvezels is de elasticiteitsmodulus in de orde van 150 tot 250 GPa, wat hoger is dan de elasticiteitsmodulus van gietijzer. Door de dikte van de CFRP aan te passen kan een deel van de spanning door het CFRP overgedragen worden. Vezels met hogere elasticiteitsmodulus, zoals aramide, zijn niet aan te raden wegens de geringe breukrek van deze VVK panelen. Bij een door-en-doorscheur in het gietijzer kan CFRP het beste aan zowel de binnenzijde (met fabrics, vanwege de steunen) als aan de buitenzijde van de schacht aangebracht worden. Het VVK paneel en de lijmnaden aan de buitenzijde moeten afgeschermd worden van water en zonnestraling door een geschikte conservering te kiezen. De lijmlaag kan contact tussen de vezels en het staal, en daarmee galvanische corrosie, voorkomen. Een nadeel van iedere VVK oplossing is het verschil van uitzetten tussen gietijzer en VVK bij een temperatuurverschil. Zelfs bij eenzelfde uitzettingscoëfficiënt van gietijzer en CFRP (de experts die wij hierover hebben benaderd verschillen van mening over de vraag of dit mogelijk is) treden verschillen op door een verschil in aanstralen en in de thermische geleidingscoëfficiënt van beide materialen. Dit betekent dat er nieuwe schade in de gietijzeren panelen kunnen ontstaan door thermische belasting. Een ander nadeel van een CFRP oplossing aan beide zijden is dat de gietijzeren panelen dan niet meer inspecteerbaar zijn. Tenslotte is er gerede kans op verontreinigingen aan het oppervlak van de gietijzeren panelen die een ongunstige invloed uitoefenen op de hechting met de lijm. Dit betekent dat, ook bij een goede lijmverbinding, sprake kan zijn van onthechting bij belasting. Voor deze

- methode is daarom onderzoek nodig naar de treksterkte en de mate van verontreiniging aan het oppervlak van de panelen.
- Verlijmen van gietijzeren panelen. Gietijzer geniet de voorkeur boven staal vanwege het verschil in uitzettingscoëfficiënt tussen staal en gietijzer. Om maatafwijkingen te overbruggen zal de lijmlaag relatief dik moeten zijn, waardoor de effectieve stijfheid reduceert. Dezelfde beperking bij verontreinigingen aan het oppervlak van de gietijzeren panelen geldt als beschreven bij VVK. Voor deze methode is daarom onderzoek nodig naar de treksterkte en de mate van verontreiniging aan het oppervlak van de panelen.
 - Herstellen van de scheuren door (koud-)lassen met een nikkelelektrode wordt afgeraden omdat grijs perlitisch gietijzer slecht bestand is tegen de gevolgen van de temperatuurbelasting door het lassen, risico op extra krimpspanningen in langs- en dwarsrichting en mogelijk uitbreiding van cementiet in de warmte-beïnvloede zone naast de las. Dit geldt zelfs bij voorverwarmen en langzame afkoeling. Daarnaast verhoogt het hoge fosfor gehalte het risico op de warmtscheuren in het lasmetaal. Door voorverwarmen wordt weliswaar een langzamere afkoeling bereikt, maar neemt tegelijk de verblijftijd in de austenietfase toe waardoor hardingsverschijnselen in de warmte-beïnvloede zone kunnen optreden na afkoelen.

E.3 Reactie op ideeën voor een nieuwe draagconstructie in de toren

Een alternatief tussen renovatie van de bestaande toren en nieuwbouw bestaat uit het bouwen van een nieuwe draagconstructie, bijvoorbeeld gemaakt uit staal, waaraan de bestaande panelen van de schacht aangebracht worden als gevelbekleding. De dragende werking van de toren rust dan op de nieuwe draagconstructie en de bestaande schachtpanelen hoeven enkel hun eigen gewicht te dragen en de windbelasting op het paneel zelf te weerstaan. Als uit nader onderzoek blijkt dat de panelen zonder of met geringe schade losgehaald kunnen worden kan dit een mogelijkheid zijn. Daarbij moet nog een oplossing worden gevonden voor het verschil in thermische uitzetting tussen de oude panelen en de nieuwe draagconstructie. Staal heeft immers een andere uitzettingscoëfficiënt dan gietijzer en de temperatuur van de direct aangestraalde gevelelementen is anders dan die van de achterliggende constructie. Hiermee kan rekening gehouden worden in de naden tussen de panelen, maar de architectuur van de toren wijzigt hierdoor.

F Analyse plooi- en knikstabiliteit

Voor de analyse van de plooi- of knikinstabiliteit van de schacht heeft PT Structural een eigenwaardeanalyse uitgevoerd met de eindige-elementenmethode. Daarbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- De schacht en de kuip zijn met doorgaande schalen gemodelleerd. De flenzen zijn gemodelleerd met balkelementen. In de schacht is een scheur aangebracht. De steunen zijn niet gemodelleerd.
- De raam- en deuropeningen zijn niet gemodelleerd.
- De vloeren zijn scharnierend verbonden aan de schacht en de kuip.
- De permanente belasting (eigen gewicht) en karakteristieke windbelasting (basiswindsnelheid, met een overschrijdingskans van eens per 50 jaar, gelijk aan 29,5 m/s) zijn aangebracht, zonder partiële factoren. Over- en onderdruk zijn niet toegepast.

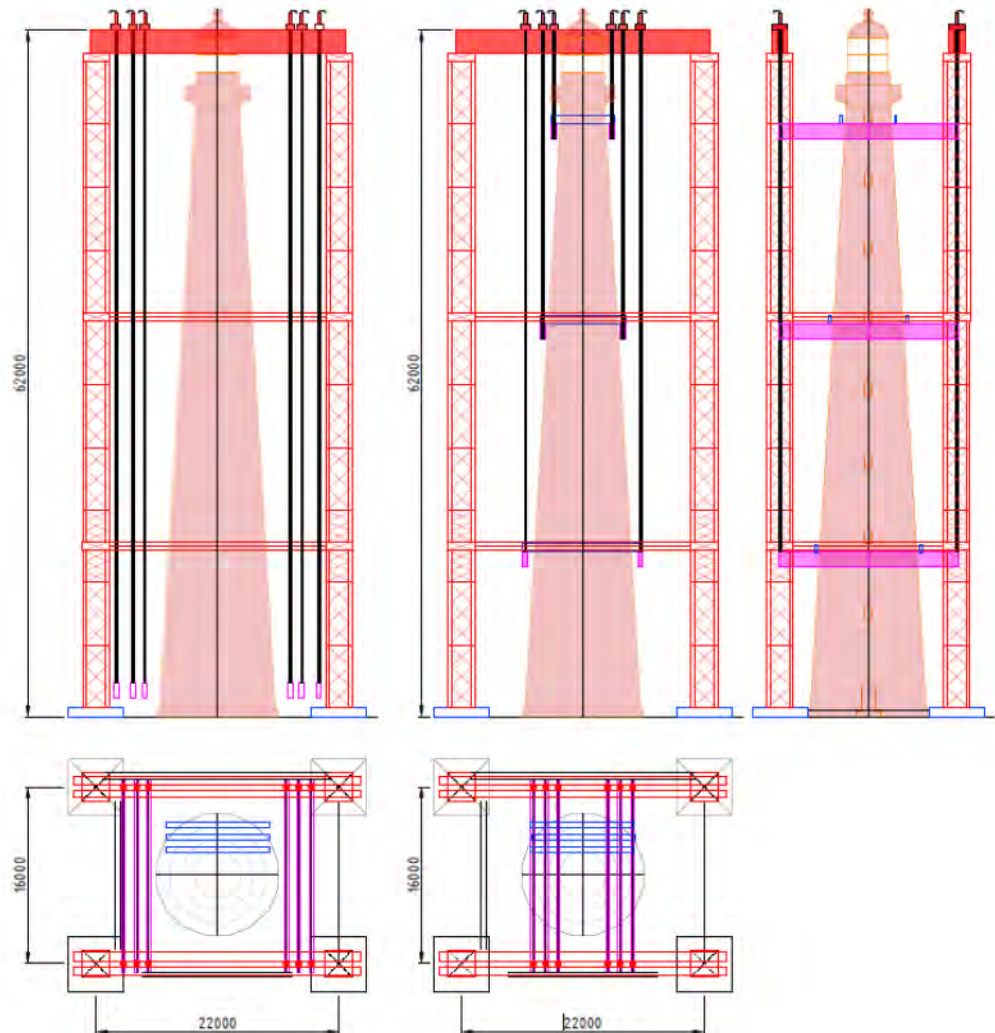
Uit deze analyse volgde een vergrotingsfactor van de belasting voor elastische (Eulerse) instabiliteit van:

- $\alpha_{cr} > 19$ bij een scheur over een hoogte van één ring (één paneel), op de positie van de langst gedetecteerde scheur (met code 3/4/GH).
- $\alpha_{cr} = 8,5$ bij een doorgaande scheur over een hoogte van één verdieping (vier panelen). Deze analyse is uitgevoerd voor de situatie waarbij een bestaande scheur instabiel verder scheurt.

Op ons verzoek heeft PT Structural het model aangepast waarbij ook de deuren en ramen alsmede de steunen gemodelleerd zijn. De eerste resultaten van dat model wijzen richting significant hogere α_{cr} -waarden dan hierboven aangegeven (waarschijnlijk ten gevolge van de steunen).

Bij deze vergrotingsfactoren en voor de betreffende constructie is de invloed van de vervormingen op de krachtwerking verwaarloosbaar. De spanningen in de schacht en de kuip volgend uit [12] zijn ook erg gering. Deze resultaten betekenen dat er ruime marges aanwezig zijn, waarmee onzekerheden in de modelbeschrijving van de geometrie en het materiaal afgedekt kunnen worden. Dit betekent dat de kans op instorten van de toren door instabiliteit ten gevolge van aanwezige scheuren verwaarloosbaar is.

G Constructie voor afscherming en ontmanteling



H Toegepaste gietijzerlegering

In 1877 lag de materiaalkeuze van gietijzer voor de hand, mede omdat grijs gietijzer een goede gietbaarheid bezit (met name de eutectische legeringen) en daarnaast een grote vormvastheid door de geringe krimp ten gevolge van het uitzetten van de grafietlamellen bij afkoeling.

Op basis van chemisch laboratoriumonderzoek uit 2010 [5] is bekend dat het toegepaste gietijzer een globale samenstelling heeft van 3% koolstof, 0,8% mangaan, 2,5% silicium, 1,5% fosfor en een resterend ijzergehalte van 92%. Op basis van de koolstoffactor kan worden vastgesteld dat het bij dit silicium en fosfor gehalte een eutectische legering betreft, die gekenmerkt wordt door: dun vloeibaar, uitstekende gietbaarheid, laag stolpunt, ontbreken van stollingstraject. Helaas is er veel minder bekend over de hoeveelheid onzuiverheden en insluitingen.

In tegenstelling tot de indelingen van staalsoorten naar legeringselementen, kunnen gietijzersoorten niet herleid worden op basis van een chemische analyse. Naast de belangrijkste legeringselementen silicium en fosfor heeft de afkoelsnelheid een grote invloed op de vorming van grafiet en het ontleden van de cementiet. De sterkte-eigenschappen van gietijzer worden sterk bepaald door de microstructuur, insluitingen en hoeveelheid uitgescheiden grafiet c.q. cementiet na het stollen en afkoelen van het gietstuk. Zo kunnen verschillende soorten gietijzer nagenoeg dezelfde chemische analyse bezitten, maar sterk verschillen in eigenschappen.

Op basis van het Weichelt diagram is het waarschijnlijk dat de schacht (25-35mm) en de kuip (20-25mm) van grijs perlitisch gietijzer zijn gemaakt. Vanwege de dunnere wanddikte kunnen de vloerdelen (16mm) mogelijk deels gemeleerd zijn gestold. Om beter inzicht te verkrijgen in de resteigenschappen van de verschillende gegoten elementen dient tenminste aanvullend metallografisch en hardheidsonderzoek worden uitgevoerd. Met name de omvang van veroorzaakte schade aan grafietlamellen, de gemiddelde afmeting van de grafietlamellen en eventuele uitscheiding van cementiet zijn daarbij van belang. Daarnaast verdient het de aanbeveling om basale mechanische eigenschappen te bepalen door destructief onderzoek. Daarvoor kan gebruik worden gemaakt van gebroken delen van de flenzen van de schachtpanelen.

De vloeren zijn volgens schetsen in [7] aanzienlijk dunner dan de schacht en de kuip. Het is waarschijnlijk dat de breukgevoeligheid van de vloeren hoger is dan die van de schacht en de kuip.

I Stroomschema

In deze bijlage is een stroomschema opgenomen voor acties en beslissingen als voorgesteld in dit rapport.

