Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

RWS BEDRIJFSVERTROUWELIJK
RWS West-Nederland Zuid
[redacted]
Postbus 2232
3500 GE Utrecht

Rijkswaterstaat Grote Projecten en Onderhoud

Griffioenlaan 2
3526 LA Utrecht
Postbus 2232
3500 GE Utrecht
T 088-797 2111
www.rijkswaterstaat.nl

Contactpersonen
ir. [redacted]
senior adviseur stalen bruggen

T 06-[redacted]
[redacted]@rws.nl

Datum
20 maart 2020

Bijlage(n)
1

memo

Restlevensduur Merwedebrug A27 (38G-102)

Inleiding

In verband met de mogelijke vertraging van het project Houten-Hooipolder A27, waarin de Merwedebrug volledig vervangen zal gaan worden, is er gevraagd om de consequenties van deze vervanging op de constructieve veiligheid in beeld te brengen. In deze memo wordt uitgegaan van een vertraging van maximaal 5 jaar, waardoor de brug tot uiterlijk 2031 in gebruik dient te blijven.
De vertraging van het project zorgt voor een toename van de te verwachten vermoeiingsschade. Daarnaast zaten in de herberekening van Movares in 2016 ook een aantal overschrijdingen op sterkte. In deze memo worden de aspecten vermoeiing en sterkte voor de hoofdoverspanningen (boogbrug) opnieuw beschouwd op basis van de nieuwe uitgangspunten.

De memo heeft de volgende opbouw:
- Managementsamenvatting
- Samenvatting resultaten herberekening Movares 2016
- Analyse met betrekking tot vermoeiing
- Analyse met betrekking tot sterkte
- Advies en beheersmaatregelen

Bijlagen:
- A: Inspectieprogramma

Achterliggende berekeningen zijn beschikbaar bij RWS GPO afdeling Bruggen en Viaducten.

Managementsamenvatting

De vervanging van de Merwedebrug is mogelijk vertraagd tot 2031. Dit zorgt voor een toename van de risico's op sterkte en vermoeiing. Beide aspecten zijn beschouwd voor de periode tot vervanging van de brug. Ten grondslag aan deze beschouwing ligt de herberekening van Movares uit 2016 met als uitgangspunt gebruiksniveau i.c.m. 30 jaar levensduur na renovatie (t/m 2053).
Voor de instandhouding tot vervanging is het toegestaan om uit te gaan van afkeurniveau i.c.m. een gereduceerde levensduur. De belastingen kunnen hierdoor worden gereduceerd door lagere veiligheidsfactoren en een lagere trendfactor op de verkeersbelasting.
Naast een reductie van de belasting is ook de capaciteit rekenkundig verhoogd door conservatisme in de capaciteitsberekening van de boogconstructie opnieuw te beschouwen.
Ondanks de geleverde inspanning moet er worden geconcludeerd dat enkel met een aantal beheersmaatregelen het gewenste veiligheidsniveau gehaald kan worden. De noodzakelijke beheersmaatregelen zijn:

1. Permanent inhaalverbod voor vrachtwagens in beide rijrichtingen (24/7)
2. Beperking belasting op het fiets-/voetpad
3. Inspectieprogramma voor de hoofdliggers

De beperking van de belasting op het fiets-/voetpad is relevant bij evenementen zoals de vierdaagse waarbij grote groepen mensen verwacht worden. Het inspectieprogramma is terug te vinden in Bijlage A.
Ondanks de hierboven beschreven maatregelen wordt de capaciteit van de boog met 2% overschreden. We achten deze overschrijding acceptabel voor de periode tot vervanging. Dit is in lijn met de second opinion van de Oostelijke Van Brienenoordbrug.

Samenvatting resultaten Herberekening Movares 2016

Voor het project A27 Houten-Hooipolder is in 2016 door Movares een analyse uitgevoerd op de hoofddraagconstructie van de Merwedebrug. Uitgangspunt van de herberekening van Movares was een sterktetoets op gebruiksniveau en een vermoeiingstoets voor 30 jaar na renovatie (derhalve tot 2053). Gezien het feit dat de brug wordt vervangen kan sterkte beschouwd worden op afkeurniveau i.c.m. een restlevensduur van 15 jaar (normatieve minimum) en vermoeiing tot het moment van vervanging.

In onderstaande tabel zijn de resultaten uit de berekening van Movares samengevat.

Tabel 1: resultaten herberekening (Movares 2016) gebruiksniveau 30j:

Onderdeel	**Sterkte** [u.c.]	**Sterkte verbinding** [u.c.]	**Vermoeiing** [D movares in 2053 teruggeschaald naar 2031 met γ_{Mf} =1,35]
Boog	1,24	1,03	1,57 (las windverband)
Boogportaal	0,87	0,70 (geboorte)	<1
Windverbanden	0,99	0,62	<1
Hangers	0,40	0,48	<1
Hoofdliggers	1,11	1,23 (onderflens)[1] 1,15 (lijf)	1,20 (langslas) ~7,5 (stuikpl.)[1] 4,5 (vestijver op lijf.) 4,5(verstijver kop.) ~3,0 (schot)
Dwarsdragers	1,04	1,35 lijf in veld 1,04 lijf aansluiting hoofdligger	<1
Dekconstructie	0,98	<1,0	Diverse details met hoge schade

[1] De stuikverbinding in de hoofdligger van de onderflens is tijdens de noodreparatie versterkt, hierdoor is dit onderdeel op sterkte komen te vervallen.

De overschrijdingen worden in de volgende hoofdstukken besproken.

Analyse met betrekking tot vermoeiing

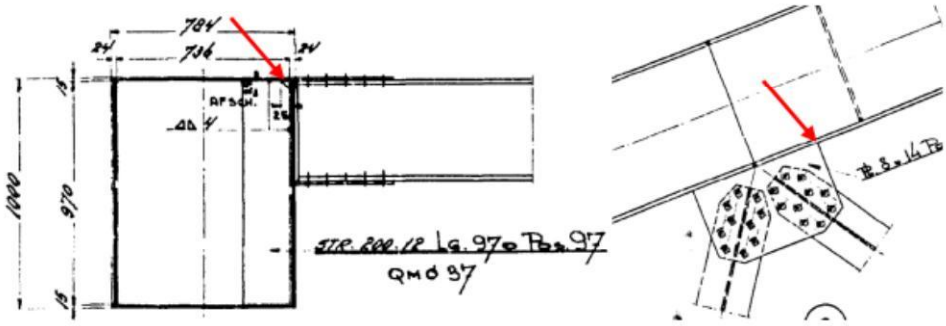
Als eerste worden kort de aandachtspunten uit de vermoeiingsberekening besproken. Op basis van de berekende schade (kans) en de gevolgen bij schade (gevolg) kan het risico per detail ingeschat worden. Op basis van dit risico zijn er een aantal mogelijkheden:

1. Geen maatregelen voor dit detail noodzakelijk
2. Detail dient opgenomen te worden in een inspectieregime
3. Detail moet worden aangepast/versterkt

In categorie 2 vallen details waarvoor wel een relatief hoge schade wordt berekend, maar waarvan wordt verwacht dat scheurvorming niet direct zal leiden tot bezwijken. Dit kan indien er robuustheid aanwezig is in de constructie of omdat wordt verwacht dat een mogelijke scheur zich beperkt zal ontwikkelen. In dit geval is het mogelijk om het detail op te nemen in een inspectieprogramma. Het inspectie-interval zal dan op basis van 'engineering judgement' worden vastgesteld. Alle schades in de hoofddraagconstructie zijn bepaald met een partiële factor voor vermoeiing (γ_{Mf}) van 1,35 voor veilige levensduur.

<u>Boog</u>

Het windverband sluit op de boog aan middels een rechthoekige plaat gelast op het lijf van de boog. Tegenwoordig zou deze plaat worden voorzien van afrondingen i.v.m. de spanningsconcentratie die optreden bij deze rechthoekige geometrie. Deze spanningsconcentratie zorgen voor kans op vermoeiing in combinatie met de daar aanwezige las. De gevonden schade is echter relatief laag (D=1,57) en bij een verlaagde partiële factor (γ_{Mf}=1,15) is de schade slechts 0,3. Doordat de boog hoofdzakelijk belast wordt op druk zal het ontstaan van een eventuele (beperkte) scheur niet tot bezwijken leiden. Vanwege de zeer beperkte kans op scheurvorming wordt het detail ingedeeld onder categorie 1; geen maatregelen noodzakelijk.

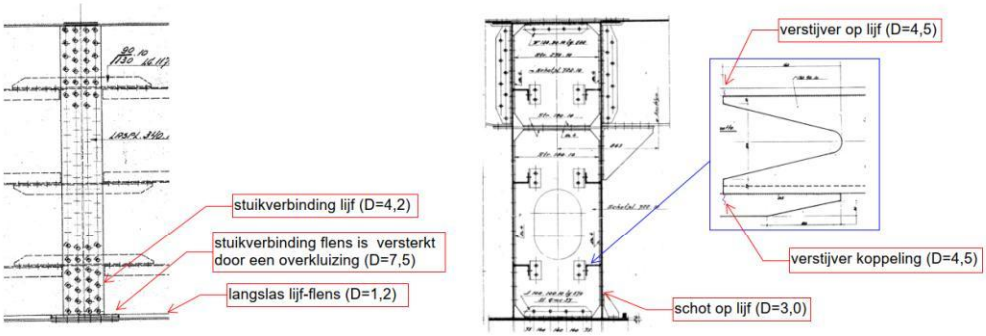


Figuur 1: Vermoeiingsgevoelige detail in boog: Locatie met rode pijl (DC=40 – D=1,57)

<u>Hoofdliggers</u>

In de hoofdligger zijn er diverse vermoeiingsgevoelige details aanwezig die samen met de grote spanningswisselingen in de ligger tot relatief hoge rekenkundige vermoeiingsschades leiden. Ter plaatse van alle sectiedelingen zijn de stuikverbindingen in de onderflenzen (figuur 2 links) voorzien van een overkuizingen. Deze overkluizingen kunnen een deel van de krachten bij scheurvorming in het lijf opvangen en beperken de spanningswisselingen in het lijf, waardoor de kans op vermoeiing in het lijft afneemt. Daarnaast wordt verwacht dat

een eventuele scheur in het lijf zich beperkt zal ontwikkelen omdat deze alleen richting de neutrale lijn kan groeien waar de spanningswisseling lager ligt. Omdat de lengte van een eventuele scheur beperkt moet blijven wordt er geadviseerd dit detail op te nemen in een inspectieprogramma waarbij alle stuikverbindingen visueel worden geïnspecteerd. Bij deze inspectie dient ook direct de langslas tussen lijf en flens visueel geïnspecteerd te worden.
Er blijven nog een aantal details met vermoeiingsschades over die zich bevinden ter plaatse van de dwarsschotten (figuur 2 rechts). De doorkoppeling van de verstijver is op diverse locaties in de brug gescheurd, dit heeft echter geen invloed op de sterkte van de ligger. De beëindiging van de verstijver op het lijf kan scheurinitiatie in het lijf veroorzaken. Daarom dient deze beëindiging visueel geïnspecteerd te worden.
De klinknagelverbindingen waarmee de dwarsschotten in de hoofdliggers zijn vastgezet op de lijven en flenzen zijn niet krachtvoerend. Hierdoor is de spanningsconcentratie veel lager (alleen 'by-pass loading' en geen 'pin-loading') en de detailcategorie hoger. Er worden geen schades verwacht, daarom kan het detail ingedeeld worden in categorie 1; geen maatregelen noodzakelijk.



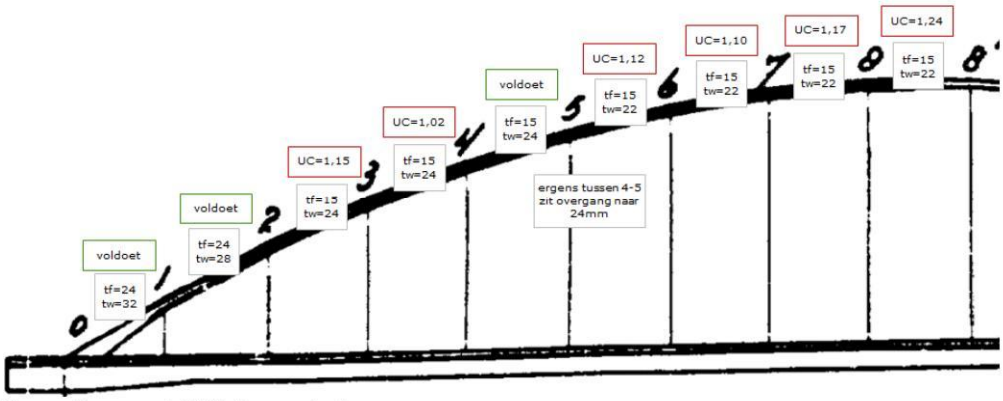
Figuur 2: Vermoeiingsgevoelige details in hoofdligger

<u>Dekconstructie</u>
Voor het dek zijn er diverse vermoeiingsgevoelige details vastgesteld, er zijn ook scheurindicaties gevonden, deze worden beheerst middels het RISK inspectieprogramma.

Analyse met betrekking tot sterkte

In dit hoofdstuk worden de issues m.b.t. sterkte toegelicht. De herberekening is gedaan op basis van gebruiksniveau en een referentieperiode van 30 jaar, terwijl voor deze analyse wordt uitgegaan van afkeurniveau en het normatieve minimum van 15 jaar.

<u>Boog</u>
De boog heeft in de berekening op gebruiksniveau van Movares een grote overschrijding op sterkte (u.c.=1,24). Deze bevindt zich in het midden van de boog, maar over de gehele lengte van de boog zijn overschrijdingen aanwezig (zie Figuur 3).



Figuur 3: u.c. stabiliteit van de boog

Middels een aantal aanvullende berekeningen is aangetoond dat de u.c. kan worden verlaagd tot een acceptabel niveau (u.c.=1,02). Onderdeel van de stappen om daar te komen is het treffen van 2 fysieke maatregelen:

- Uitbreiding van het huidige inhaalverbod voor vrachtverkeer van 06h-19h naar 24/7
- voorkomen van hoge belasting op de fiets-/voetpaden door het verbieden van evenementen waar grote aantallen mensen gebruik maken van het fiets-/voetpad (bv. vierdaagse). Eventueel te beheersen met toegangsregulering zoals bij Waalbrug in Nijmegen tijdens de vierdaagse.

  Note: normatief moet het fiets-/voetpad berekend worden op 500 kg/m^2. Door de grote lengte van de brug mag dit teruggebracht worden tot 300kg/m^2 voor de toetsing van de boog. I.c.m. extreem verkeer dient hier 40% van in rekening gebracht te worden: 40%*300kg/m^2 = 120kg/m^2. Uitgangspunt bij de gewichtsbeperking is een halvering hiervan, dus 60kg/m^2. Bij een fietspad breedte van 3,5m en een gemiddeld gewicht van 80kg/persoon kom je op 2,5 persoon/m^1 fietspad. Bij een booglengte van 170m kom je uit op circa 425 personen.

In tabel 2 staat samengevat wat de bijdrage is van de verschillende aanpassingen in de berekening.

Tabel 2: samenvatting reductie op u.c. boog

Maatregelen	**u.c. of Δu.c.**
Resultaat Movares	1,240
Afkeurniveau	-0,050
Inhaalverbod	-0,035
Verbod voor evenementen op het fiets-/voetpad	-0,030
Geometrisch Niet-Lineaire berekening met voorvervorming[1]	+0,025
Plooitoets o.b.v. combinatie N,My,Mz i.p.v. individuele componenten[2]	-0,145
Totaal	**1,020**

[1] De niet-lineaire berekening geeft iets conservatievere resultaten dan de stabiliteitsberekening volgens de norm.

[2] Minder conservatieve plooitoets dan in de berekening van Movares.

Op basis van afkeurniveau gecombineerd met de eerder beschreven beheersmaatregelen (inhaalverbod en beperkingen op het fiets-/voetpad) kan de u.c. worden verlaagd tot u.c. = 1,02. We achten deze overschrijding acceptabel voor de periode tot vervanging. Dit is in lijn met de second opinion van de Oostelijke Van Brienenoordbrug waarin ook een beperkte overschrijding van de capaciteit is geaccepteerd.

<u>Hoofdliggers</u>

De hoofdliggers hebben bij beschouwing op gebruiksniveau 30 jaar ook een overschrijding op sterkte ($\sigma=1{,}11f_y$) in de onderflens.
Er is ook een vergelijkbare overschrijding op de klinknagelverbinding in het lijf (u.c.=1,15). Dit komt door de erg kleine eindafstand (e_1=39mm) van de klinknagel (d=23). De aangehouden capaciteit in de berekening is reëel en wordt niet bepaald door conservatieve aannames. Op basis van afkeurniveau gecombineerd met de eerder beschreven beheersmaatregelen (inhaalverbod en beperkingen op het fiets-/voetpad) kan de u.c. worden verlaagd tot u.c. = 0,95. De hoofdliggers voldoen met de voorgestelde beheersmaatregelen aan het afkeurniveau.

<u>Dwarsdragers</u>

De dwarsdragers hebben een kleine overschrijding op sterkte ($\sigma=1{,}04f_y$). Er is ook een overschrijding op de klinknagelverbinding in het lijf (u.c.=1,35). Dit zien we vaker bij versprongen klinknagelpatronen, omdat de Eurocode hier geen rekening mee houdt. In dit geval kan de capaciteit worden verhoogd met een factor 1,28. Hierdoor komt de u.c. van de stuikverbinding op 1,05 te liggen.
Op basis van afkeurniveau gecombineerd met de eerder beschreven beheersmaatregelen (inhaalverbod) kan de u.c. worden verlaagd tot u.c. = 0,91. De dwarsdragers voldoen met de voorgestelde beheersmaatregelen aan het afkeurniveau.

Advies en beheersmaatregelen

De herberekening van de Merwedebrug uit 2016 benoemt diverse aandachtspunten in de constructie. Naast de aandachtspunten m.b.t. vermoeiing zijn er ook enkele overschrijdingen op de sterkte benoemd. Waaronder een overschrijding van 24% van de capaciteit van de boog.
Na diverse optimalisaties en op basis van afkeurniveau (wettelijk minimum) kan, i.c.m. twee fysieke beheersmaatregelen, de overschrijding worden teruggebracht tot 2%.

De te nemen fysieke beheersmaatregelen:

1. Permanent inhaalverbod voor vrachtwagens in beide rijrichtingen (24/7)
2. Beperking belasting op het fiets-/voetpad

De beperking van de belasting op het fiets-/voetpad is relevant bij evenementen zoals de vierdaagse waarbij grote groepen mensen verwacht worden. Het aantal mensen op per fiets-/voetpad moet beperkt worden tot 2,5 personen/m[1]. Per boog zijn dit circa 425 personen.

In aanvulling op de fysieke beheersmaatregelen moeten een aantal details in de hoofdliggers t.a.v. vermoeiing preventief in een inspectie-regiem ondergebracht worden (naast het al lopende RISK programma).

Figuur 4: te inspecteren details van de hoofdliggers

Bijlage A: Inspectieprogramma

Rijkswaterstaat Grote Projecten en Onderhoud

Datum
20 maart 2020

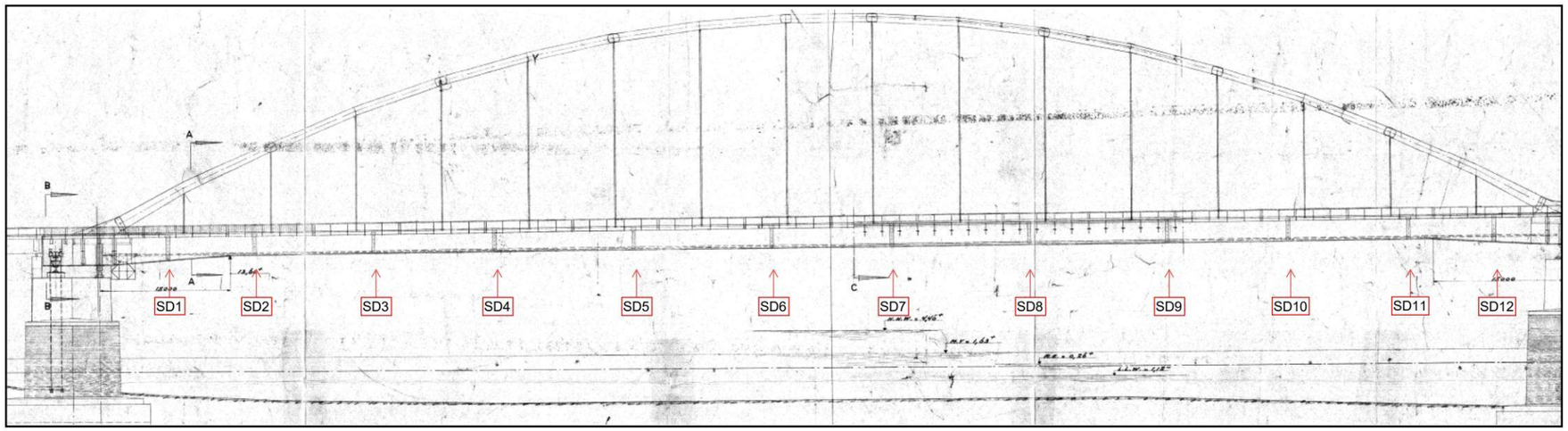
Inspectieprogramma Merwedebrug A27 (38G-102) v1 (20-03-202)

Beschrijving
Inspecties dienen uitgevoerd te worden ter plaatse van alle sectiedelingen.

Er zijn vier verschillende inspecties beschreven:

Inspectie	Beschrijving	Aantal	Frequentie
Inspectie 1	zijplaten hoofdligger bij beëindiging verstijver	1152	1 jaar
Inspectie 2	klinknagelverbinding zjiplaten t.p.v. stuikverbinding	192	1 jaar
Inspectie 3	inspectie langslas	1536m	1 jaar
Inspectie 4	inspectie noodreparatie	96	3 jaar

Per hoofdligger per boog zijn er 16 sectiedelingen aanwezig (zie onderstaande afbeelding). In het totaal betreft het 96 sectiedelingen. De inspectie-resultaten moeten worden vastgelegd in een rapportage waarbij de 4 inspecties volgens een vooraf overeen te komen nummeringssysteem in tabelvorm worden vastgelegd (en jaarijks uitgebreid). Waar nodig moeten resultaten ondersteund worden middels foto's.



Inspectie 1: zijplaten hoofdligger bij beëindiging verstijver

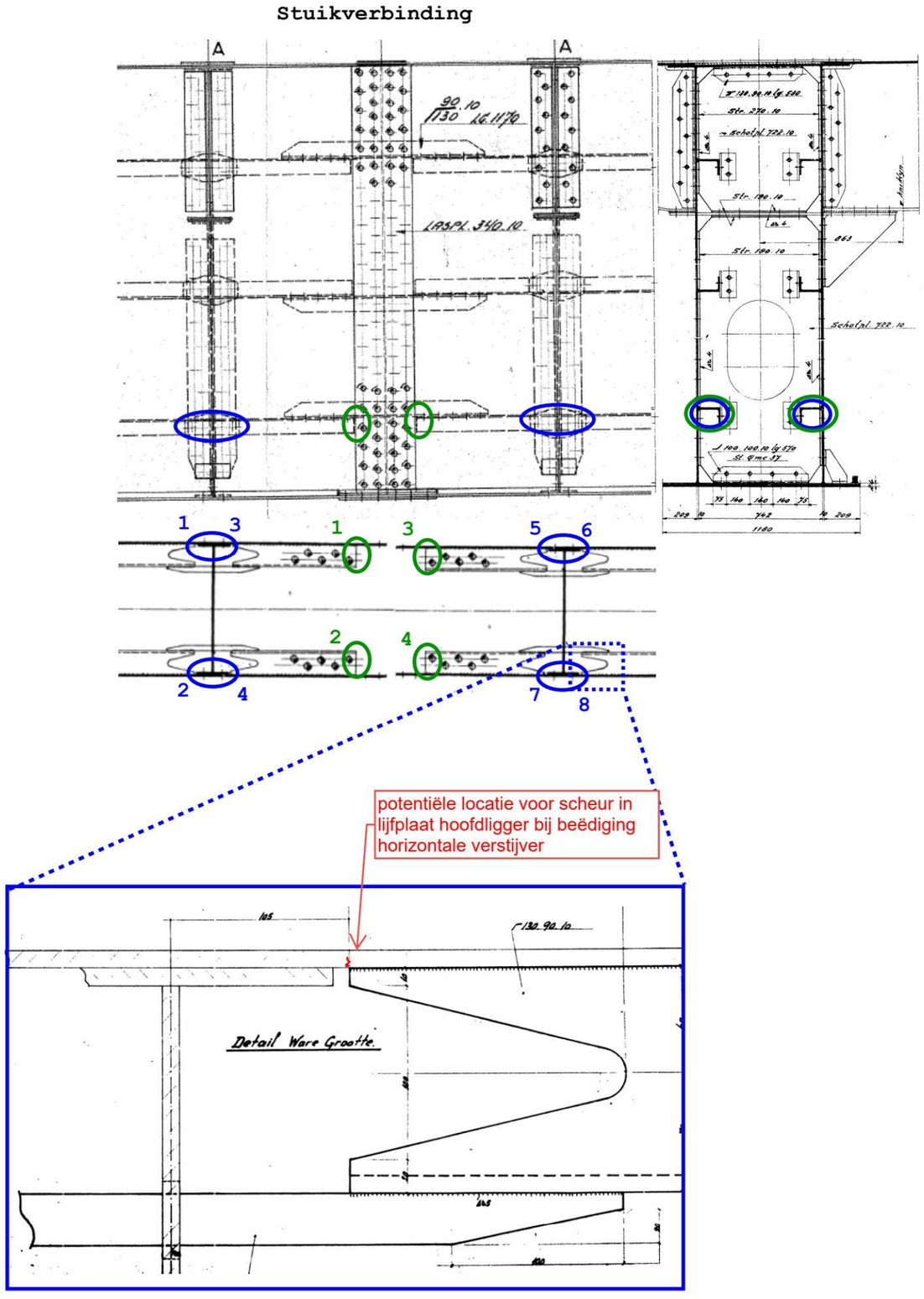
Beschrijving
De verstijvers worden ter plaatse van de sectiedelingen en de schotten voor de dwarsdragers beëindigt. Dit zorgt voor een vermoeiingsgevoelig detail. Een mogelijke scheurlocatie ontstaat t.p.v. de lasteen in de zijplaten van de hoofdligger zoals weergegeven in naastgelegen figuur in rood.
Alleen de beëindiging van de onderste langsverstijvers moeten worden gecontroleerd, omdat hier de grootste spanningswisselingen optreden. Aangezien het totale aantal beëindigingen zeer groot is (>1500) is er een selectie gemaakt.

Wat
Per sectiedeling de volgende potentiële scheurlocaties controleren:
- 4 beëindigingen van de langsverstijvers net naast de stuikverbinding (in groen aangegeven)
- 8 beëindigingen van de langsverstijvers t.p.v. de twee naastgelegen dwarsschotten (in blauw aangegeven)

Per hoofdligger en boog 24 stuikverbindingen, dus totaal 2x2x24=96 stuikverbindingen. Per stuikverbinding moeten 12 locaties worden geïnspecteerd. Totaal aantal te inspecteren locaties is 1152.

Hoe
Visueel onderzoek door een deskundige vanaf de binnenzijde van de koker. Indien er scheurindicaties worden gevonden dient de verf plaatselijk te worden verwijdert om na te gaan of de indicatie ook in het staal aanwezig is. Indicaties dienen direct gemeld te worden.

Frequentie
12 maanden



Inspectie 2: klinknagelverbinding zijplaten t.p.v. stuikverbindingen

Beschrijving
Er is een beperkt risico op scheuren van de zijplaten of koppelplaten t.p.v. de stuikverbinding. De scheur ontstaat onder de klinknagelkop in de lijfplaat of lijfplaat.

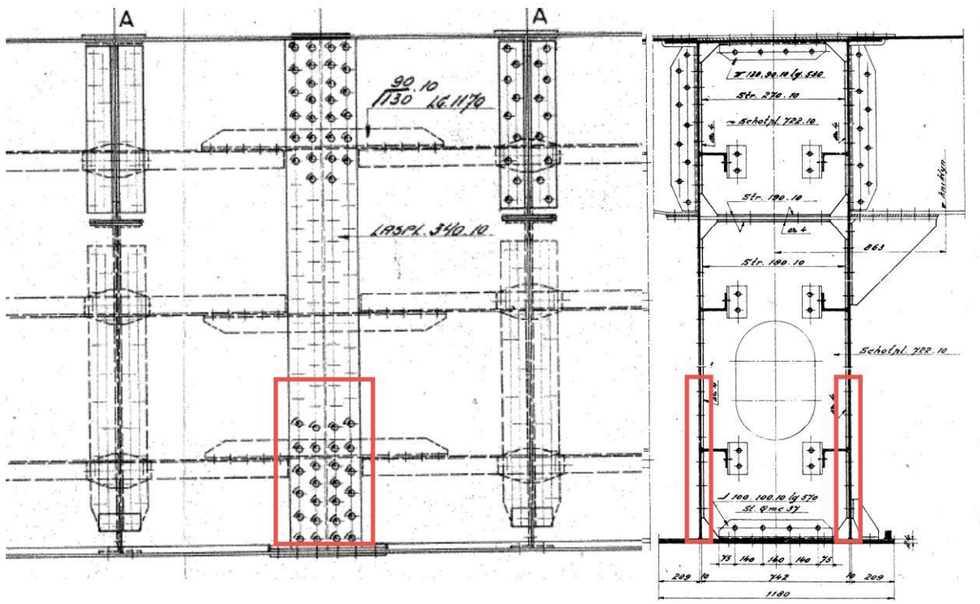
Wat
Iedere stuikverbinding van de zijplaten in de hoofdligger dient gecontroleerd te worden van onderflens tot circa het midden van de twee onderste langsverstijvers. Dit gebied is aangegeven in naastgelegen figuur.

Per hoofdligger en boog 24 sectiedelingen, dus totaal 2x2x24=96 locaties en 192 stuikverbindingen.

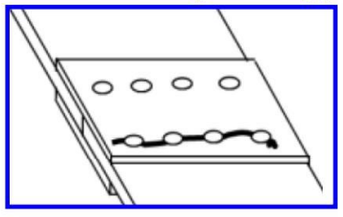
Hoe
Visueel onderzoek door een deskundige vanaf zowel de binnenzijde als de buitenzijde van de koker. Er dienen drie controles uitgevoerd te worden:
1. Controle op scheurindicaties in de zijplaten en koppelplaten van de stuikverbinding van het lijf. Indien er scheurindicaties worden gevonden dient de verf plaatselijk te worden verwijdert om na te gaan of de indicatie ook in het staal aanwezig is.
2. Controle op verschuiving van klinknagels.
3. Vervorming van de stuikplaten.
Indicaties dienen direct gemeld te worden.

Frequentie
12 maanden

Stuikverbinding



Scheurvorming in koppelplaat



Inspectie 3: inspectie langslas

Beschrijving
Er is een zeer beperkt risico op het scheuren van de langslas. Er kan echter een scheur gaan groeien vanuit de las in de lijf of flensplaat.

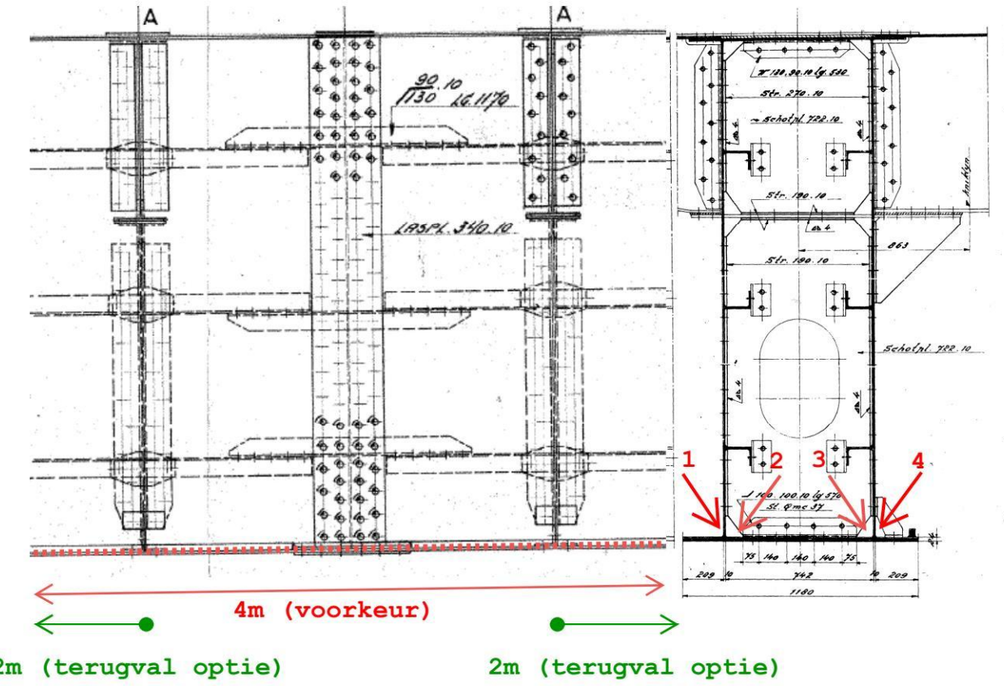
Wat
Ter plaatse van iedere sectiedeling dient aan weerszijde over een lengte van 2m de langslas tussen de onderflens en lijfpaten te worden geïnspecteerd. De te verwachten scheur in het blauwe kader aangegeven.
De langslas is aanwezig aan de binnen- en buitenzijde. Door de aanwezige noodreparatie zijn de lassen deels mogelijk niet zichtbaar. De noodrepatatie is rechtonder weergegeven. In dit geval dient het te inspecteren gebied verplaatst te worden zoals aangegeven in groen (terugval optie).
De totale lengte van de te inspecteren las komt hiermee op 4x4m=16m per stuikverbinding,

Per hoofdligger en boog 24 sectiedelingen, dus totaal 2x2x24=96 locaties --> 1536m te inspecteren laslengte.

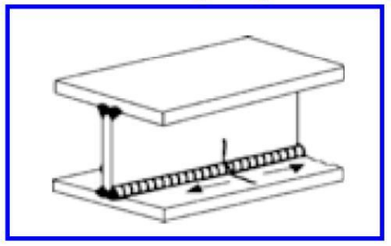
Hoe
Visueel onderzoek door een deskundige vanaf zowel de binnenzijde als de buitenzijde van de koker. Indien er scheurindicaties worden gevonden dient de verf plaatselijk te worden verwijdert om na te gaan of de indicatie ook in het staal aanwezig is. Indicaties dienen direct gemeld te worden.

Frequentie
12 maanden

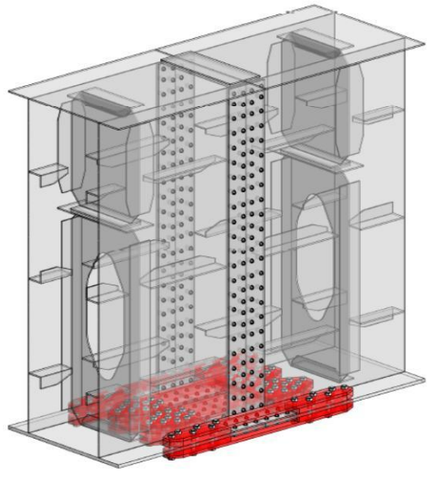
Stuikverbinding

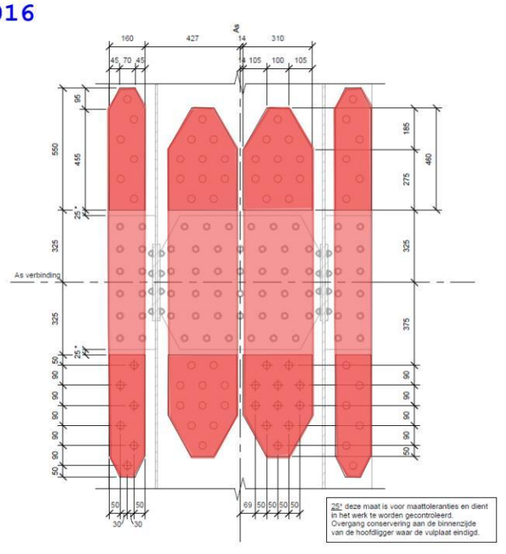


Scheurvorming t.g.v. langslas



Noodreparatie uitgevoerd in 2016





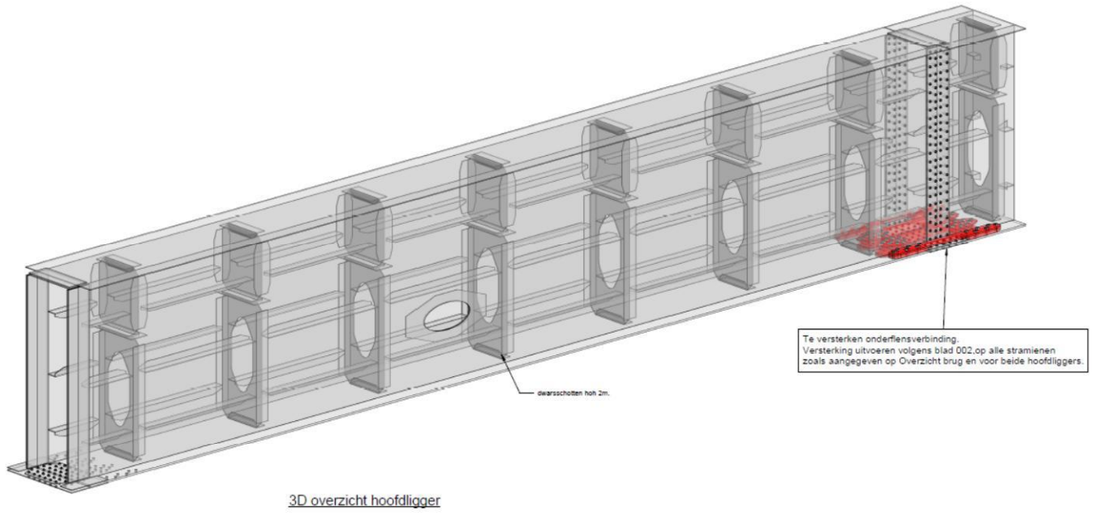
Inspectie 4: inspectie noodreparaties

Beschrijving
In 2016 is er een noodreparatie geplaatst. Er zijn geen specifieke schades verwacht. Gaat om een algemene inspectie.

Wat
Noodreparatie t.p.v. iedere sectiedeling.
Per hoofdligger en boog 24 sectiedelingen, dus totaal 2x2x24=96 noodreparaties.

Hoe
Visueel onderzoek door een deskundige vanaf zowel de binnenzijde als de buitenzijde van de koker.

Frequentie
Iedere 3 jaar (2020; 2023; 2026; 2029)



3D overzicht hoofdligger