

# RAPPORT

## **Versterkingsmaatregelen IJsselbrug A12**

Aanbruggen

Klant: Rijkswaterstaat

Referentie: T&P-BF7387-R007-F2.0

Status: 2.0/Definitief

Datum: 10 maart 2020

# Projectgerelateerd



HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Postbus 151  
6500 AD Nijmegen  
Transport & Planning  
Trade register number: 56515154

+31 88 348 70 00 **T**  
+31 24 323 93 46 **F**  
info@rhdhv.com **E**  
royalhaskoningdhv.com **W**

**Titel document:** Versterkingsmaatregelen IJsselbrug A12

Ondertitel:

Referentie: T&P-BF7387-R007-F2.0

Status: 2.0/Definitief

Datum: 10 maart 2020

Projectnaam: Herberekening en versterkingsontwerp IJsselbrug A12

Projectnummer: BF7387

Auteur(s): A. Akyel, E. Klamer

Opgesteld door: A. Akyel, E. Klamer

Gecontroleerd door: R. Soetekouw

Datum/paraaf: 10-3-2020

Goedgekeurd door: K. Vis

Datum/paraaf: 10-3-2020

Classificatie
Projectgerelateerd



## Disclaimer

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

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Leeswijzer</b>	<b>1</b>
1.1	Referenties	2
<b>2</b>	<b>Toetsing op vermoeiing na verbetering van verbindingen</b>	<b>3</b>
2.1	Type 1: Las uiteinde opdikplaat onderflens van hoofdlijger	3
2.2	Type 2: Geklonken verbindingen in sectiedelingen van de aanbrug	6
2.3	Type 3 Verticale plooiverstijvers binnenzijde – las met onderflens van de hoofdlijger	8
2.4	Type 4: Geklonken verbinding dwarsverband met de hoofdliggers	11
2.5	Type 5: Gelaste verbinding in de sectiedelingen van de aanbrug	12
2.5.1	V-las onderflens	12
2.5.2	X-las lijf	13
2.6	Type 6: Flanklas tussen opdikplaat en de onderflens	14
2.7	Type 13: Flanklas tussen het lijf en onderflens van hoofdlijger	15
2.8	Type 17: Verticale plooiverstijvers – las met lijf van de hoofdlijger	16
<b>3</b>	<b>Versterkingen</b>	<b>17</b>
3.1	Versterking hoofdlijger	17
3.2	Overige versterkingen	18
3.3	Aanpassing modellering	19
3.4	Aanpassing belastingen	20
<b>4</b>	<b>Toetsing op vermoeiing na versterking</b>	<b>21</b>
4.1	Type 1: Las uiteinde opdikplaat onderflens van hoofdlijger	21
4.2	Type 2: Geklonken verbindingen in sectiedelingen van de aanbrug	23
4.3	Type 3: Verticale plooiverstijvers binnenzijde - las met onderflens van de hoofdliggers	25
4.4	Type 4: Geklonken verbinding dwarsverband met de hoofdliggers	27
4.5	Type 5: Gelaste verbindingen in de sectiedelingen van de aanbrug	28
4.5.1	V-las onderflens	28
4.5.2	X-las lijf	31
4.6	Type 6: Flanklas tussen opdikplaat en de onderflens	32
4.7	Type 7, 10, 11 en 12 – Verbinding dwarsdrager - hoofdlijger	32
4.8	Type 13: Flanklas tussen het lijf en onderflens van hoofdlijger	33
4.9	Type 14: Verbinding dwarsverstijver – langsverstijver – schot einddwarsdrager	34
4.10	Type 15: Verbinding dwarsverstijver – langsverstijver – schot tussensteunpunt	40
4.11	Type 16: Verbinding dwarsverstijver – schot overige dwarsdragers	43
4.12	Type 17: Verticale plooiverstijvers – las met lijf van de hoofdlijger	44
4.13	Type 20: Lasverbinding ter plaatse van de uitsparing in het lijf van het T-stuk	46

4.14	Type 21: Lasverbinding schotten op onderflens van het T stuk	49
4.15	Type 22: Langslas tussen het lijf en de onderflens van het T stuk	51
4.16	Type 23: Verbinding lijf en flens T stuk – X-lassen	52
4.17	Type 24: Verbinding einde lijf T-stuk met bestaande onderflens	53
4.18	Type 25: Schuifspanning lassen einde lijf T-stuk	55
<b>5</b>	<b>Sterkte en stabiliteit</b>	<b>57</b>
5.1	Hoofdligger	57
5.1.1	Berekeningsaanpak	57
5.1.2	Resultaten	58
5.1.3	Plooi van het lijf	64
5.1.4	Stabiliteit	65
5.1.5	Langsverstijvers	66
5.2	Dwarsdragers	67
5.2.1	Spanningen einddwarsdrager	68
5.2.2	Toetsing einddwarsdrager	69
5.2.3	Spanningen dwarsdragers	70
5.2.4	Toetsing dwarsdragers	71
5.3	K-verbanden	72
5.3.1	Toetsing van de onderrand van de K-verbanden	72
5.3.2	Toetsing van de verticalen van de K-verbanden	74
5.3.3	Toetsing diagonalen van K-verbanden	80
5.4	Betondek	81
5.4.1	Toetsing staalbetonliggers	81
5.4.2	Toetsing betondek	83
5.4.3	Toetsing aanname ongescheurd dek	85
5.5	Inspectiepaden	88
5.6	Opleggingen en vijzelpunten	89
5.6.1	Opleggingen	89
5.6.2	Vijzelpunten	94
<b>6</b>	<b>Toetsing verbindingen</b>	<b>98</b>
6.1	Verbinding: Type 1	98
6.2	Verbinding: Type 2	99
6.3	Verbinding: Type 4	100
6.4	Verbinding: Type 7 en 10, 11 en 12	102
6.4.1	Einddwarsdragers: Type 7	102
6.4.2	Overige dwarsdragers: Type 10, 11 en 12	103
6.5	Verbinding: Type 9	105
6.5.1	Verbinding van diagonalen met dwarsdragers: Type 9-1	105
6.6	Verbinding: Type 25 – Lasverbinding einde T-stuk	106
6.6.1	Lasverbinding lijf – flens bestaande hoofdligger	106

6.6.2	Lasverbinding lijf T-stuk – onderflens bestaande hoofdlijker	107
6.6.3	Lasverbinding lijf T-stuk – onderflens T-stuk	108
6.6.4	Spanningen in T-stuk	108
6.6.5	Samenvatting resultaten	109
6.7	Verbinding: Type 26 – Overkluizing V-naden onderflens	110
<b>7</b>	<b>Conclusies</b>	<b>112</b>

## Bijlagen

**Bijlage A Invoer geometrie SCIA Engineer**

**Bijlage B Invoerbelastingen SCIA Engineer**

**Bijlage C Toetsing op sterke en stabiliteit**

- Bijlage C1 Toetsing hoofdlijker
- Bijlage C2 Toetsing dwarsdragers
- Bijlage C3 Toetsing K-verbanden
- Bijlage C4 Toetsing betondek

**Bijlage D Toetsing verbindingen**

- Bijlage D1 Detail type 4 – Verbinding onderrand K-verband - hoofdlijker
- Bijlage D2 Detail type 7, 10, 11 en 12 – Verbinding dwarsdragers/consoles - hoofdlijker
- Bijlage D3 Detail type 9 – Verbindingen diagonalen
- Bijlage D4 Detail type 25 – Verbinding einde T-stuk
- Bijlage D5 Detail type 26 – Overkluizing V-naden

**Bijlage E Toetsing op vermoeiing – na burr grinding**

- Bijlage E1 Detail type 1 – Las uiteinde van de opdikplaat
- Bijlage E2 Detail type 2 – Geklonken verbinding in sectie delen van de brug
- Bijlage E3 Detail type 3 – Verticale verstijvers binnenzijde-las met de onderflens
- Bijlage E4 Detail type 4 – Geklonken verbinding dwarsverband met hoofdliggers
- Bijlage E5 Detail type 5 – Gelaste verbinding in sectie delen van de brug
- Bijlage E6 Detail type 6 – Flanklas tussen opdikplaat en onderflens

**Bijlage F Toetsing op vermoeiing – na versterking**

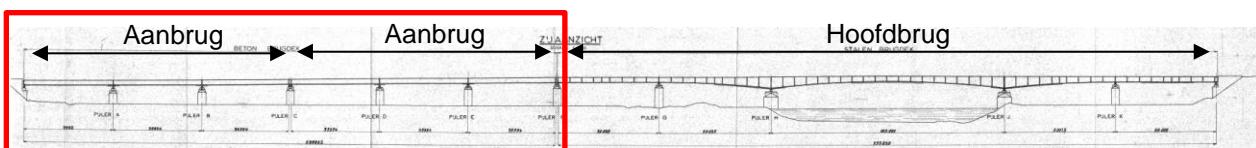
- Bijlage F1 Detail type 1 – Las uiteinde van de opdikplaat
- Bijlage F2 Detail type 2 – Geklonken verbinding in sectie delen van de brug
- Bijlage F3 Detail type 3 – Verticale verstijvers binnenzijde-las met de onderflens
- Bijlage F4 Detail type 4 – Geklonken verbinding dwarsverband met hoofdliggers
- Bijlage F5 Detail type 5 – Gelaste verbinding in sectie delen van de brug
- Bijlage F6 Detail type 6 – Flanklas tussen opdikplaat en onderflens
- Bijlage F7 Detail type 13 – Flanklas tussen het lijf en onderflens hoofdligger
- Bijlage F8 Detail type 14 – Verbinding dwarsverstijver – langsverstijver – schot einddw. dr.
- Bijlage F9 Detail type 15 – Verbinding dwarsverstijver – langsverstijver – schot tussendw. dr
- Bijlage F10 Detail type 17 – Verticale plooiverstijver – Las met lijf van de hoofdligger
- Bijlage F11 Detail type 20 – Lasverbinding ter plaatse van uitsparing lijf T-stuk
- Bijlage F12 Detail type 21 – Lasverbinding schotten op onderflens hoofdligger
- Bijlage F13 Detail type 22 – Langslas lijf T-stuk met flenzen
- Bijlage F14 Detail type 24 – Lasverbinding einde lijf T-stuk
- Bijlage F15 Detail type 25 – Lasverbinding einde lijf T-stuk (Schuifspanning)

Versie	Aanpassing	Datum
D0.1	Eerste conceptversie, interne toetsing	20-3-2019
D0.2	Tweede conceptversie, ter toetsing Rijkswaterstaat	12-4-2019
D0.3	Opmerkingen Rijkswaterstaat verwerkt, interne toetsing	17-5-2019
F1.0	Eerste definitieve versie	28-5-2019
F1.1	Burr grinding bij de laspoortjes verwijderd (paragraaf 4.13) Vermoeiingsberekening t.p.v. onderbroken hoeklas langsrichting t.p.v. overkluiting toegevoegd (paragraaf 4.5.1) Vermoeiingsberekening t.p.v. x-naad lijf en verbinding lijf hoofdligger - dwarsverstijvers aangepast (paragraaf 4.5.2 en 4.10) Doorlassen einde T-stuk aangepast naar 1000 mm	24-7-2019
F2.0	- Versterkingen dwarsdragers toegevoegd (paragraaf 4.9 t/m 4.11, hoofdstuk 7) - Referenties TNO en IIW toegevoegd (paragraaf 1.1)	10-3-2020

## 1 Leeswijzer

In deze rapportage worden de versterkingsmaatregelen voor de aanbrug(gen) van de IJsselbrug A12 beschreven, inclusief de constructieve ontwerpbercakeningen daarvan. Deze rapportage dient in samenhang met de volgende rapportages gelezen te worden

- Uitgangspuntenrapport herberekening IJsselbrug A12 [T&P-BF7387-R001],
- Verificatieberekeningen IJsselbrug A12 Aanbruggen [T&P-BF7387-R005]
- Technische eisen versterkingsmaatregelen Aanbruggen IJsselbrug A12 [T&P-BF7387-R011]



Figuur 1 Zijaanzicht van de IJsselbrug [A.46205A]

Uit de verificatieberekening [T&P-BF7387-R005] volgt dat alleen de dwarsverstijvers en de vijzelpunten van de portalen bij de eindopleggingen niet voldoen op sterkte. De rest van de constructie voldoet in principe op sterkte in de huidige situatie. Op vermoeiing voldoen zowel de verschillende details in de hoofdlijker als de details in de dwarsdrageraansluitingen niet. Er is daarom voor de berekeningen gekozen om eerst de versterkingen op vermoeiing te berekenen, en pas daarna in te gaan op de sterkte van de constructie. De inhoud van deze rapportage is dus in een andere volgorde ten opzichte van de verificatieberekeningen.

Om de verschillende vermoeiingsdetails in de hoofdlijker te verbeteren wordt in eerste instantie gekeken of er met "eenvoudige" maatregelen (burr grinding, uitboren klinknagels) de huidige vermoeiingschade kan worden weggenomen en de detailklasse kan worden verhoogd, zodat de schade eind 2050 onder de D = 1,0 komt. De resultaten van deze analyse worden behandeld in hoofdstuk 2.

Uit deze analyse blijkt dat dit niet voldoende is om zonder additionele versterking de vermoeiingslevensduur van 30 jaar te halen. In hoofdstuk 3 wordt daarom de versterking beschreven om de spanningen te verlagen en wordt ingegaan op de aanpassingen die nodig zijn aan de modellering.

In hoofdstuk 4 zullen vervolgens de resultaten van de vermoeiingsanalyse beschreven worden voor de versterkte situatie. In hoofdstuk 5 zal vervolgens gecontroleerd worden of de sterkte- en stabiliteitstoetsingen van de hoofddraagconstructie nog steeds voldoen met de versterkingen. Hierbij zal ook de versterking van de verticalen worden behandeld. In hoofdstuk 6 worden de verbindingen behandeld, waarna in hoofdstuk 7 de resultaten worden samengevat.

## 1.1 Referenties

Naast de referenties in de uitgangspuntenrapportage zijn de volgende rapporten gebruikt voor het versterkingsontwerp:

- [1] TNO Rapport TNO-2017-R11499. Diverse vermoeiingsadviezen voor de brug bij Rheden, 2017
- [2] TNO Notitie 100315818/ALL. Vermoeiingsclassificatie van hoeklassen in kruis en T-verbindingen. 2018
- [3] TNO Rapport TNO-2018-R11423. Vermoeiing IJsselbrug Rheden – niet krachtsopnemende klinkverbindingen, 2018
- [4] TNO Rapport TNO-2018-R10290B. Beschrijving preventieve spoedreparaties voor de brug bij Rheden, 2018
- [5] TNO Rapport TNO-2019-R11393. Rekmetingen IJsselbrug, 2019
- [6] TNO Rapport TNO-2019-R11394. Diverse adviezen vermoeiingslevensduur dwarsdrageraansluitingen IJsselbrug, 2020
- [7] TNO Rapport TNO-2019-R10527. Risicoanalyse lasimperfecties in de IJsselbrug A12, 2019
- [8] TNO Rapport TNO-2020-R10226. Rekmetingen IJsselbrug – Aanvullende metingen december 2019, 2020
- [9] IIW document IIW-2259-15 ex XIII-2460-13/XV-1440-13. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, 2016
- [10] IIW-Doc. XIII-2380r3-11/XV-1383r3-11. IIW Guideline for the Assessment of Weld Root Fatigue, 2012

## 2 Toetsing op vermoeiing na verbetering van verbindingen

Uit de verificatieberekeningen bleek dat de meeste verbindingen in de aanbruggen niet aan de vermoeiingseis van  $D \leq 1,0$  bij  $\gamma_{Mf} = 1,35$  aan het einde van 2050 voldoen. Uitgangspunt in deze berekening is dat de onderdelen die niet aan deze eis versterkt moeten worden. In dit hoofdstuk is gekeken in hoeverre het haalbaar is om met relatief eenvoudige verbeteringstechnieken (burr grinding, uitboren klinknagelgaten) het mogelijk is om de aanwezige vermoeiingsschade te verwijderen en de detailcategorie te verhogen, om zo alsnog aan de vermoeiingseis te voldoen. Voor de berekeningen in dit hoofdstuk is dus nog uitgegaan van de huidige onversterkte situatie.

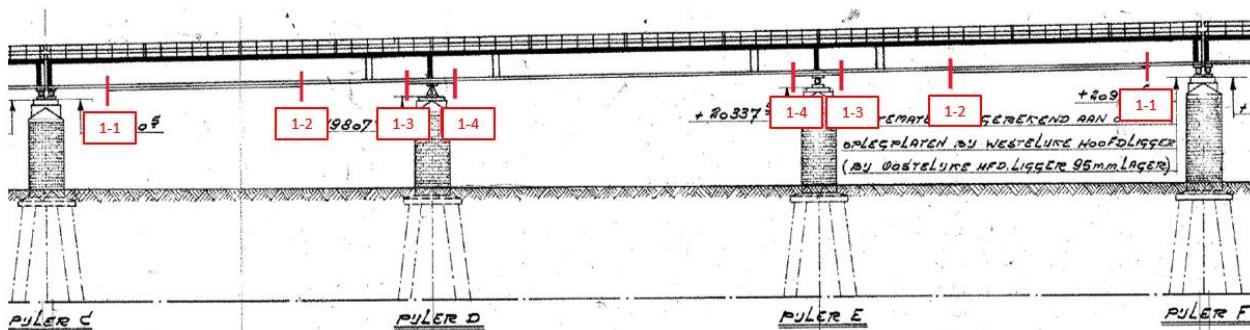
De berekeningen in deze rapportage zijn voor alle hoofdliggers berekend, ook als een deel van de liggers niet versterkt hoeven te worden. Er wordt daarom van de volgende kleurcodering gebruik gemaakt voor de resultaten na een bepaalde voorgestelde versterking.

1,0	Moet versterkt worden, voldoet na voorgestelde versterking
1,2	Moet versterkt worden, maar voldoet niet na voorgestelde versterking
0,0	Hoeft niet versterkt te worden, voldoet als de voorgestelde versterking toch uitgevoerd wordt
1,2	Hoeft niet versterkt te worden, voldoet niet als de voorgestelde versterking toch uitgevoerd wordt

Tabel 1 Kleurencodering resultaten na versterking

### 2.1 Type 1: Las uiteinde opdikplaat onderflens van hoofdligger

De hoeklassen op de uiteinden van de opdikplaten in de aanbruggen voldoen niet op vermoeiing. Figuur 2 geeft een overzicht van de locaties waar deze verbinding zich bevindt.



Figuur 2 Locatie van de verbinding type 1.

De onderstaande tabel geeft de resultaten van de schadeberekeningen, indien er niets aan de verbindingen zou worden gedaan. De toelichting op deze berekening is gegeven in de rapportage van de verificatieberekening [T&P-BF7387-R005]

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
Jaar	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1-1 / 1-8	3,3	10,5	1,7	2,2	3,3	6,9	0,2	0,5
1-2 / 1-7	8,9	28,3	5,8	7,8	8,8	18,5	0,9	1,9
1-3 / 1-6	1,1	4,0	0,6	0,8	1,1	2,5	0,1	0,2
1-4 / 1-5	1,3	4,5	0,7	0,9	1,3	2,9	0,1	0,2

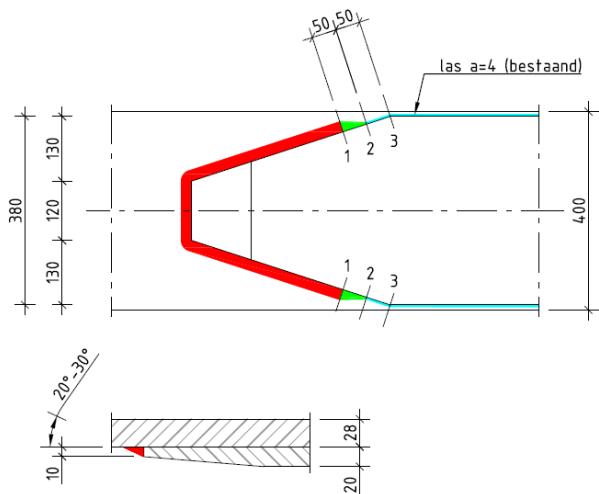
Tabel 2 Schadegetallen van verbinding type 1 voor eind 2018 en eind 2050.

Omdat er diverse las- en hechtingsfouten zijn gevonden, wordt aanbevolen om alle verbindingen te herstellen, ook degene die rekenkundig wel zouden voldoen eind 2050.

Opgemerkt wordt dat in de bovenstaande tabel geen rekening is gehouden met de preventieve versterkingen die in 2018 zijn en in 2019 worden uitgevoerd. Dit betreft de volgende locaties

- HRB west 1-2 en 1-7 (beide aanbruggen) (2018)
- PRB west 1-2 en 1-7 (beide aanbruggen) (2018)
- HRB oost 1-7 (2<sup>e</sup> aanbrug) (2019)
- PRB west 1-1 (1<sup>e</sup> aanbrug) (2019)
- PRB west 1-8 (1<sup>e</sup> aanbrug) (2019)
- PRB west 1-8 (2<sup>e</sup> aanbrug) (2019)

In eerste instantie is gekeken of de verschillende verbindingen met de door TNO ontworpen preventieve versterking van verbinding 1-2 in de HRB west en PRB west, zie rapport TNO-2018-R10290B [4], definitief hersteld kunnen worden. Bij deze herstelmaatregel wordt de las op het einde van de opdikplaat verwijderd (inclusief wortel van de las) en vervangen door een nieuwe las, welke wordt uitgebouwd onder een hoek van 20° tot 30°, zie Figuur 3. Op 100 mm vanaf de hoek dient de nieuwe las geleidelijk over te gaan in de bestaande hoeklas. Met het wegslijpen van de oude las en het burr grinden van de onderflens ter plaatse van de oorspronkelijke teen van de las dient de eventuele aanwezige vermoeiingsschade verwijderd te worden. Na het opnieuw lassen dient de nieuwe lasteen met een freestol (burr grinding) bewerkt te worden om de vermoeiingssterkte van de las te verbeteren. Volgens IIW-rapport "Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components" [9] neemt de vermoeiingsterkte van de lasverbinding 30% toe na het burr grinden van de lasteen. De detailcategorie van de verbeterde, nieuwe las kan daarom aangehouden worden op  $\Delta\sigma_c = 58*1,3=75,4$ . (N.B. de detail categorie van deze verbinding (zonder burr grinden) is door TNO met hulp van een hot-spot stress benadering bepaald als DC = 58 (TNO-2017-R11499 [1]).



Versterking lassen einde opdikplaat

Figuur 3 Versterking van delassen op de uiteinden van de opdikplaten.

De schadegetallen zijn voor de verbindingen opnieuw uitgerekend, er van uitgaande dat de huidige schade op nul kan worden gesteld en uitgaande van de verbeterde detailcategorie van 75,4. De resultaten zijn voor de verschillende hoofdliggers voor  $\gamma_{MF} = 1,35$  weergegeven in Tabel 3.

$\gamma_{MF} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
<b>1-1</b>	3,0	0,2	1,5	0,1
<b>1-2</b>	10,2	0,9	5,1	0,4
<b>1-3</b>	1,0	0,1	0,5	0,0
<b>1-4</b>	1,4	0,1	0,7	0,0

Tabel 3 Schadegetallen van de verbinding type 1 burr grinding van de las voor eind 2050.

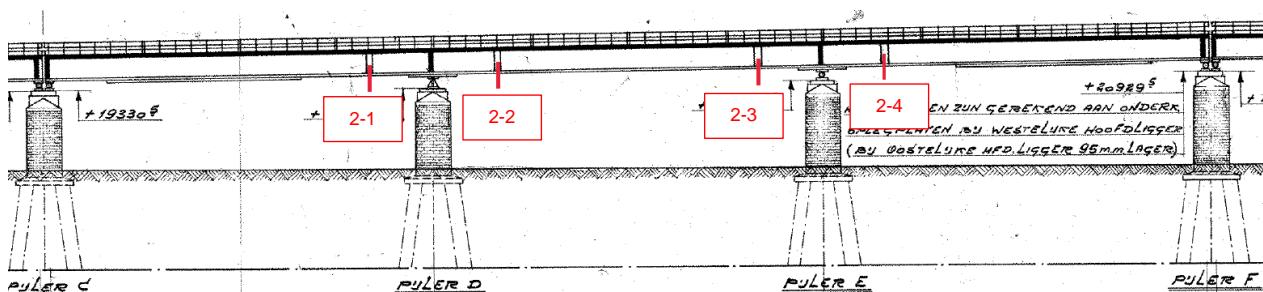
De verbindingen in hoofdrijbaan west en een deel van de verbindingen in parallelrijbaan west blijken ondanks deze verbetering niet te voldoen aan de schade-eis  $D \leq 1,0$  bij  $\gamma_{MF} = 1,35$ .

Geconcludeerd wordt dat er naast het verbeteren van de las ook additionele maatregelen noodzakelijk zijn om de verbinding te laten voldoen. In paragraaf 4.1 zal daarom ingegaan worden op het ontwerp van de versterking om de spanningen in de verbindingen omlaag te brengen.

Opgemerkt wordt dat met name voor verbinding 1-2 van de HRB west en PRB west rekening gehouden dient te worden dat de versterking reeds is uitgevoerd. Per jaar komt er in de HRB west ca.  $D = 0,3$  aan schade bij, zolang er nog niet versterkt is. Voor de PRB west is dit de helft ( $D = 0,15$  per jaar).

## 2.2 Type 2: Geklonken verbindingen in sectiedelingen van de aanbrug

Uit de vermoeiingsberekeningen van de bestaande situatie blijkt dat de geklonken verbindingen in de onderflens (en een deel van het lijf) van de hoofdligger niet voldoet aan de schade-eis  $D \leq 1,0$  bij  $\gamma_{Mf} = 1,35$  aan het einde van 2050.



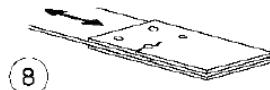
Figuur 4 De locaties van de geklonken verbindingen in de hoofdligger van type 2.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
Jaar	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
2-1	0,3	1,4	0,1	0,2	0,3	0,8	0,0	0,0
2-2	0,5	1,8	0,2	0,3	0,5	1,1	0,0	0,1
2-3	0,5	1,7	0,3	0,4	0,4	1,1	0,0	0,1
2-4	0,4	1,6	0,2	0,2	0,4	1,0	0,0	0,0

Tabel 4 Schadegetallen van verbinding type 2 (onderflens) voor eind 2018 en eind 2050.

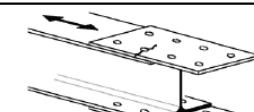
Voor de versterking van de verbindingen die niet voldoen kan worden overwogen om de klinknagels te vervangen door voorspaninjectiebouten, door ze een voor een uit te boren, de gaten iets op te boren (1 a 2 mm), zodat de vermoeiingsschade weggenomen wordt (controleren middels NDT) en er een voorspaninjectiebout voor in de plaats te zetten.

In NEN-EN 1993-1-9 wordt aangegeven dat verbindingen met voorgespannen injectiebouten met detailcategorie 112 mogen worden berekend, op basis van de spanningen in de bruto doorsnede, zie Figuur 5.

112		8) Symmetrische verbinding met tweezijdige stuikplaten met voorgespannen hogesterktebouten.	8) $\Delta\sigma$ berekend op basis van de bruto-dwarsdoorsnede.
		8) Symmetrische verbinding met tweezijdige stuikplaten met voorgespannen injectiebouten.	8)... bruto-dwarsdoorsnede.

Figuur 5 Detailcategorie voor de verbindingen met voorgespannen injectiebouten, volgens EN 1993-1-9.

Normaliter kan een voorspaninjectiebout-verbinding zowel stuik (via de hars) als wrijving (door de voorspanning) overbrengen. Voor de verbinding in de IJsselbrug geldt echter dat het aannemelijk is dat er menig toegepast tussen de platen, waardoor er niet uitgegaan kan worden van wrijvingsweerstand. In overleg met TNO is daarom bepaald dat voor een dergelijke verbinding uitgegaan kan worden van de detailcategorie van pasbouten, met detailcategorie 90. Hierbij dient te worden uitgegaan van de spanningen in de netto doorsnede.

90	  	9) Verbinding met tweezijdige stuikplaten met pasbouten.	9)... netto-dwarsdoorsnede.
		9) Verbinding met tweezijdige stuikplaten met niet-voorgespannen injectiebouten.	9)... netto-dwarsdoorsnede.
		10) Verbinding met enkelzijdige stuikplaten met voorgespannen hogesterktebouten.	10)... bruto-dwarsdoorsnede.
		10) Verbinding met enkelzijdige stuikplaten met voorgespannen injectiebouten.	10) ... bruto-dwarsdoorsnede.
		11) Constructief element met gaten, onderworpen aan buiging en normaalkrachten.	11) ... netto-dwarsdoorsnede.

Figuur 6 Detailcategorie voor de verbindingen met pasbouten, volgens EN 1993-1-9.

De schadegetallen zijn voor de verbindingen opnieuw uitgerekend, er van uitgaande dat de huidige schade op nul kan worden gesteld door het uitboren van het gat en uitgaande van een detailcategorie 90. De toetsresultaten zijn voor de verschillende hoofdliggers voor  $\gamma_{Mf} = 1,35$  weergegeven in Tabel 5. De cellen met een witte achtergrond hoeven in principe niet versterkt te worden, maar zijn voor de volledigheid wel berekend.

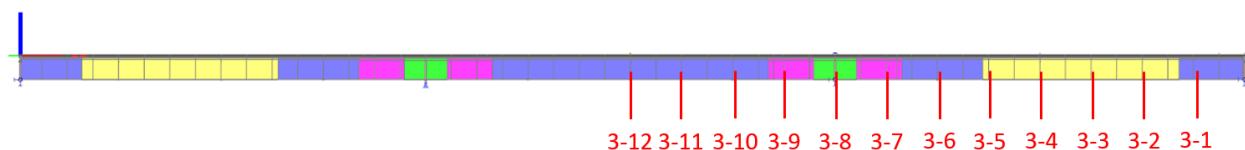
$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
2-1	1,0	0,0	0,5	0,0
2-2	1,2	0,1	0,6	0,0
2-3	1,2	0,1	0,6	0,0
2-4	1,1	0,1	0,6	0,0

Tabel 5 Schadegetallen van de verbinding type 2 na vervangen klinknagels voor eind 2050.

De verbindingen in de westelijke hoofdligger van de hoefdrijbaan blijken net niet te voldoen aan de schade-eis  $D \leq 1,0$  bij  $\gamma_{Mf} = 1,35$ . Omdat de huidige schade op dit moment maximaal  $D = 0,5$  is, en er voor type 1 toch al een versterking noodzakelijk is om een spanningsreductie in de onderflens te realiseren, is het logischer om de versterking met het T-stuk ook hier toe te passen en ervoor te zorgen dat de reeds aanwezige schade plus de schade tussen nu en eind 2050 niet groter wordt als  $D = 1,0$ . Het is dan niet nodig om de klinknagels te vervangen. Dit zal verder worden uitgewerkt in paragraaf 4.2.

## 2.3 Type 3 Verticale plooiverstijvers binnenzijde – las met onderflens van de hoofdlijger

Het lijf van de hoofdliggers is met een half DIN 32 profiel in de dwarsrichting van het lijf verstijfd (dwarsverstijver). De flens van de verstijver is aan de onderzijde afgeschuind en samen met een deel van het lijf van de verstijver aan de onderflens gelast. Deze lasverbinding is getoetst op basis van de spanningswisseling in de onderflens van de hoofdlijger. Uit de berekening blijkt dat de meeste verbindingen niet voldoen aan de schade-eis  $D \leq 1,0$  bij  $\gamma_{Mf} = 1,35$ , met uitzondering van de oostelijke ligger van de parallelrijbaan.



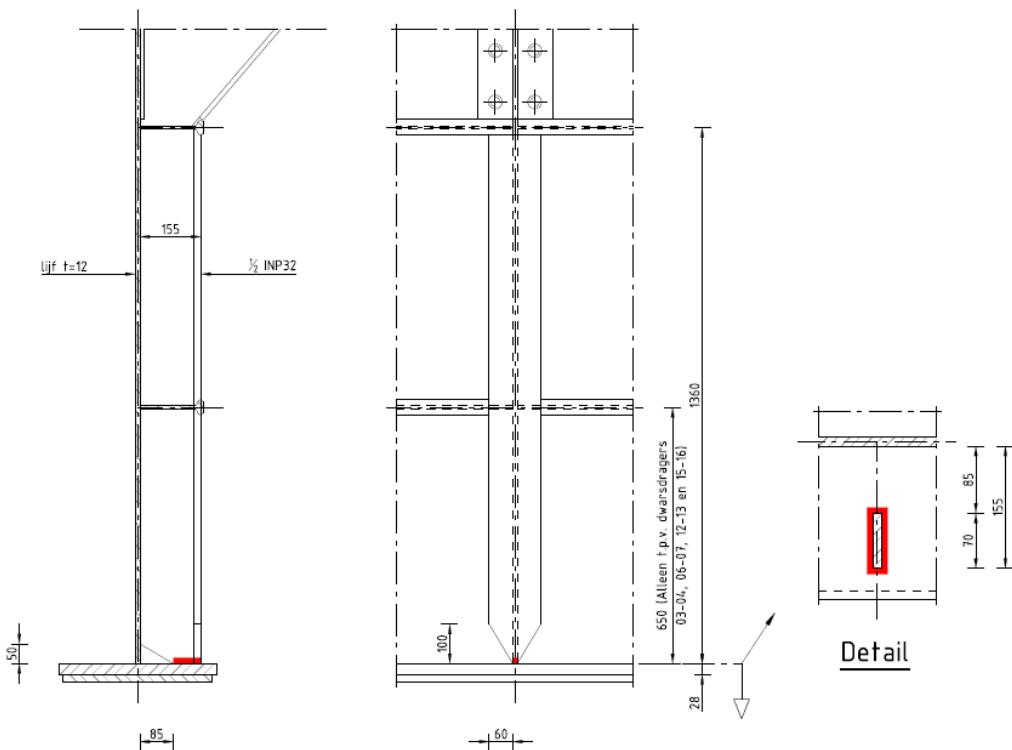
Figuur 7 De locaties van de verbindingen type 3.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
Jaar	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
3-1	0,5	1,7	0,3	0,4	0,4	1,1	0,0	0,0
3-2	0,9	3,3	0,5	0,6	0,9	2,1	0,0	0,1
3-3	1,9	6,5	1,0	1,2	1,8	4,1	0,1	0,2
3-4	1,9	6,4	1,0	1,3	1,8	4,1	0,1	0,2
3-5	1,4	4,7	0,7	0,9	1,4	3,0	0,1	0,2
3-6	1,9	6,4	1,0	1,3	1,9	4,2	0,1	0,3
3-7	0,2	0,6	0,1	0,1	0,2	0,4	0,0	0,0
3-8	0,1	0,5	0,0	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0
3-9	0,2	0,8	0,1	0,2	0,2	0,5	0,0	0,0
3-10	1,5	5,1	1,0	1,3	1,5	3,3	0,1	0,2
3-11	2,6	8,7	1,6	2,1	2,6	5,6	0,2	0,4
3-12	2,5	8,6	1,5	1,9	2,5	5,5	0,2	0,4

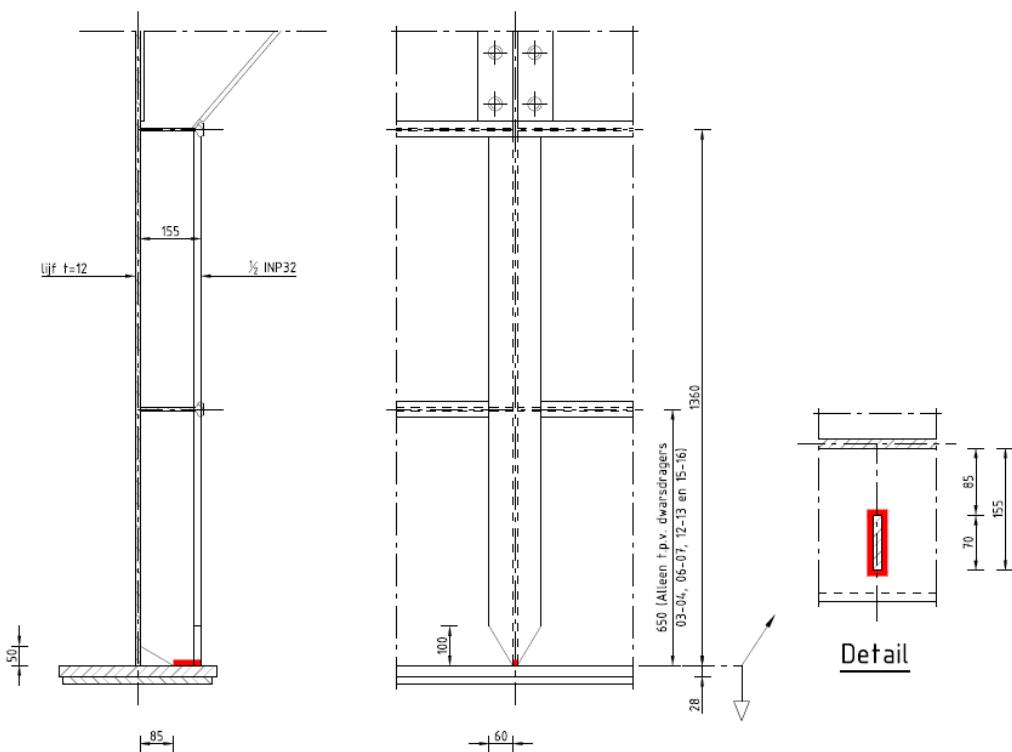
Tabel 6 Schadegetallen van verbinding type 3 voor eind 2018 en eind 2050.

Om de detailcategorie van de las te verbeteren en de schade weg te nemen, wordt als versterkingsmaatregel in eerste instantie burr grinding van de lasverbinding beschouwd. De kritieke locatie voor de initiatie van vermoeiingsscheuren is in de lasteen van de hoeklas. Door middel van burr grinding dient de lasteen geslepen te worden om de huidige vermoeiingschade te verwijderen en een

vloeiente overgang te creëren tussen de las en de onderflens (rood weergegeven in



Figuur 8). Volgens IIW-rapport "Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components" [9] zorgt dit proces voor 30% verbetering van de detailcategorie. Na burr grinding kan daarom gerekend worden met een detailcategorie van  $\Delta\sigma_c = 80 * 1,3 = 104$  en kan er uitgegaan worden van een schade van D = 0,0 net na het burr grinden.



Figuur 8 Locatie van de te burr grinden las met de onderflens van de hoofdlijger (rood weergegeven)

De berekening van de verbeterde situatie is om de 5 meter uitgevoerd voor twee verschillende veiligheidsfactoren  $\gamma_{Mf} = 1,35$  en  $1,15$ . Er is rekening gehouden met een dynamische vergrotingsfactor bij de voegovergangen van  $\Delta\varphi_{fat} = 1,15$ , daar waar van toepassing. De toetsresultaten zijn voor de verschillende hoofdlijgers voor  $\gamma_{Mf} = 1,35$  weergegeven in Tabel 7. De cellen met witte achtergrond hoeven in principe niet geburr-grind te worden, omdat deze voldoen. Voor de volledigheid zijn de resultaten wel weergegeven. Met name in de hoofdrijbaan west en in mindere mate in de parallelrijbaan west blijkt dat er nog niet voldaan kan worden aan de schade-eis  $D \leq 1,0$  bij  $\gamma_{Mf} = 1,35$ .

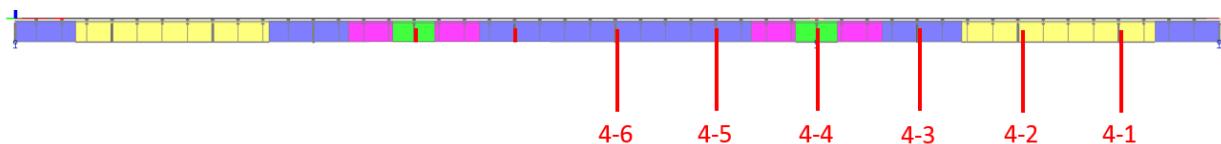
$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
3-1	0,3	0,0	0,2	0,0
3-2	0,8	0,0	0,4	0,0
3-3	1,8	0,1	0,9	0,0
3-4	1,7	0,1	0,9	0,0
3-5	1,2	0,1	0,6	0,0
3-6	1,7	0,1	0,9	0,1
3-7	0,1	0,0	0,1	0,0
3-8	0,1	0,0	0,0	0,0
3-9	0,2	0,0	0,1	0,0
3-10	1,3	0,1	0,6	0,0
3-11	2,4	0,2	1,2	0,1
3-12	2,3	0,2	1,2	0,1

Tabel 7 Schadegetallen van de verbinding Type 3 na burr grinding op de lasteen voor eind 2050.

Om toch aan de schade-eis  $D \leq 1,0$  te voldoen, zal het ook voor dit type verbinding noodzakelijk zijn om de spanning te verlagen in de onderflens. Alternatief zou het verwijderen van de las kunnen zijn en deze te vervangen voor een boutverbinding. Gezien het aantal versterkingen dat nodig is en het feit dat er toch al spanningsverlaging noodzakelijk is voor de verbindingen van type 1 en type 2 is het logischer om de spanning te verlagen. Deze versterking zal verder worden uitgewerkt in paragraaf 4.3.

## 2.4 Type 4: Geklonken verbinding dwarsverband met de hoofdliggers

Uit de vermoeiingsberekeningen van de geklonken verbinding van de dwarsverbanden met de onderflens van de hoofdligger is gebleken dat een beperkt aantal verbindingen niet voldoet.



Figuur 9 De locaties van de geklonken verbindingen in de hoofdligger van type 4.

$\gamma_{MF} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
Jaar	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
4-1	0,1	0,4	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
4-2	0,3	1,3	0,1	0,1	0,2	0,8	0,0	0,0
4-3	0,3	1,2	0,1	0,1	0,3	0,7	0,0	0,0
4-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4-5	0,2	0,8	0,1	0,1	0,2	0,5	0,0	0,0
4-6	0,5	2,1	0,2	0,3	0,4	1,2	0,0	0,0

Tabel 8 Schadegetallen van verbinding type 4 voor eind 2018 en eind 2050.

Ter verbetering van de detailcategorie kan overwogen worden om de klinknagels te verwijderen, de schade weg te halen door de gaten te ruimen en voorspaninjectiebouten terug te plaatsen. Omdat er waarschijnlijk menig toegepast tussen de contactvlakken kan niet gegarandeerd worden dat er een goed wrijvingsvlak ontstaat tussen de platen. De detailcategorie is daarom aangehouden op DC = 90, ofschoon er geen sprake is van een krachtgedragen verbinding. Opgemerkt wordt dat dit lager is dan de oorspronkelijk aangehouden categorie voor de klinknagel-verbinding ( $\Delta\sigma_c = 101$ ). De berekeningsresultaten zijn in Tabel 11 weergegeven. De cellen met witte achtergrond hoeven in principe niet versterkt te worden, maar zijn voor de volledigheid toch berekend.

$\gamma_{MF} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
4-1	1,5	0,1	0,7	0,0
4-2	3,0	0,2	1,5	0,1
4-3	3,0	0,2	1,5	0,1
4-4	0,1	0,0	0,1	0,0
4-5	2,3	0,2	1,2	0,1
4-6	4,0	0,3	2,0	0,1

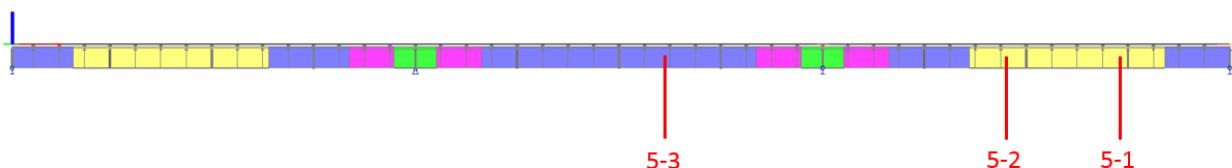
Tabel 9 Schadegetallen van de verbinding type 4 na vervangen klinknagels voor voorspaninjectiebouten voor eind 2050.

De toetsingsresultaten geef aan dat het vervangen van de klinknagels door voorspaninjectiebouten niet zinvol is, als er uitgegaan moet worden van  $\Delta\sigma_c = 90$ . Omdat er toch al spanningsreductie moet worden toegepast, is het logischer om de klinknagels te laten zitten en de spanning zodanig te reduceren dat de schade eind 2050 onder de D = 1,0 blijft. Dit wordt verder uitgewerkt in paragraaf 4.4.

## 2.5 Type 5: Gelaste verbinding in de sectiedelingen van de aanbrug

### 2.5.1 V-las onderflens

In de onderflens zijn op een aantal locaties de platen onderling verbonden door middel van een V-las. Uit de vermoeiingsanalyse van de bestaande situatie kwamen de volgende resultaten.

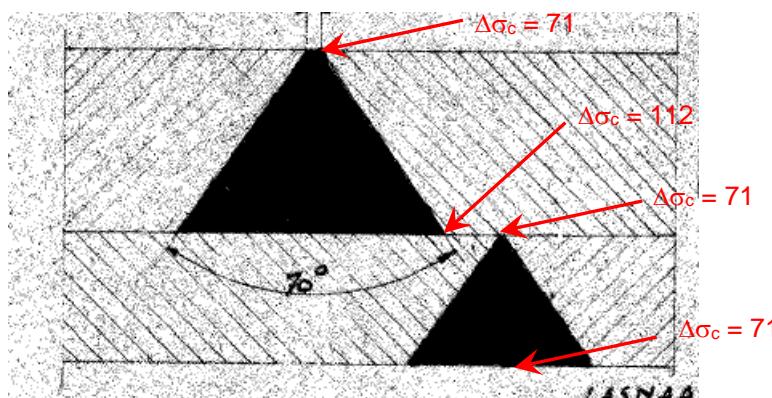


Figuur 10 De locaties van de las verbinding in de hoofdlijker van type 5.

$\gamma_{MF} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
Jaar	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
5-1	1,7	5,9	1,0	1,2	1,7	3,8	0,1	0,2
5-2	2,7	9,1	1,5	1,9	2,7	5,9	0,2	0,4
5-3	4,1	13,3	2,5	3,4	4,0	8,6	0,3	0,7

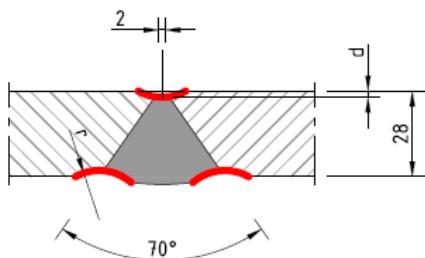
Tabel 10 Schadegetallen van verbinding type 5 (onderflens) voor eind 2018 en eind 2050.

Als mogelijke verbeteringstechniek kan burr grinding worden toegepast. Omdat echter in het eerste en derde veld een opdikplaat is toegepast, is het niet mogelijk om beide zijden van de las te burr grinden. Voor de vlakgeslepen zijde kan voor de lasteen nog een hogere detailcategorie ( $\Delta\sigma_c = 112$ ) als de nu aangehouden  $\Delta\sigma_c = 71$  aangehouden worden, omdat deze in het verleden is vlakgeslepen, maar voor de opdikplaat met de laswortel aan de bovenzijde kan dit niet. Hiervoor moet dus worden uitgegaan van  $\Delta\sigma_c = 71$  (detail 14 conform tabel 8.3 van NEN-EN 1993-1-9). Voor de details 5-1 en 5-2 heeft het burr grinden dus geen zin en dient de verbinding overkluis te worden. Dit wordt verder uitgewerkt in paragraaf 4.5.



Figuur 11 V-las in de onderflens en opdikplaat van de hoofdlijker en de detailcategorie voor de wortel en de teen van de lassen.

Voor verbinding 5-3 kan wel aan de boven- en onderzijde geburr-grind worden. Hierdoor kan de schade weer naar D = 0,0 gebracht worden.



Figuur 12 Burr grinding van de las type 5-3

Aangenomen wordt dat door het burr grinden de detailcategorie met 30% verhoogd kan worden [9]. Na burr grinding kan daarom gerekend worden met een detailcategorie van  $\Delta\sigma_c = 71 \cdot 1,3 = 92,3$ . Voor het deel onder het lijf, dat niet bereikbaar is, kan volgens TNO worden verondersteld dat vermoeiing niet maatgevend zal zijn, omdat het groeien van een eventueel defect verhinderd zal worden door de langslas tussen lijf en flens. Deze zal namelijk verhinderen dat de scheur kan openen. De resultaten van de vermoeiingsberekening van deze verbinding wordt voor  $\gamma_{Mf} = 1,35$  weergegeven in Tabel 11.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
5-3	3,8	0,3	1,9	0,1

Tabel 11 Schadegetallen van de verbinding Type 5-3 in veld 2 na burr grinding voor eind 2050.

De resultaten tonen aan dat ondanks de lasverbetering de vermoeiingsterkte eind 2050 niet voldoet voor de westelijke hoofdliggers zonder versterking. Ook hier zal het dus noodzakelijk zijn om de spanningen te reduceren. Omdat de schade op dit moment al op of boven de 1,0 zit, dient dit gecombineerd te worden met burr grinding van de las (met uitzondering van de parallelbaan oost). De versterking die noodzakelijk is om de spanning te reduceren zal in paragraaf 4.5 worden getoetst.

## 2.5.2 X-las lijf

De x-las in het lijf voldoet aan de onderzijde van het lijf in de huidige situatie ook niet.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	Jaar	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018
5-1	0,6	2,1	0,3	0,4	0,5	1,3	0,0	0,1
5-2	1,0	3,4	0,5	0,6	1,0	2,2	0,0	0,1
5-3	1,6	5,4	1,0	1,3	1,6	3,5	0,1	0,2

Tabel 12 Schadegetallen van verbinding type 5 (onderzijde lijf) voor eind 2018 en eind 2050.

Ook hier kan burr grinding worden toegepast. Omdat de verbinding toch versterkt moet worden en de spanning daardoor gereduceerd zal worden, zal in paragraaf 4.5 eerst gekeken worden welk deel van het lijf in de versterkte situatie nog burr grinding nodig heeft. Gezien de huidige schade is het waarschijnlijk dat dit voor verbinding 5-1 en voor de PRB oost niet nodig is.

## 2.6 Type 6: Flanklas tussen opdikplaat en de onderflens

Voor de flanklas tussen de opdikplaat en de onderflens wordt alleen in de westelijke hoofdliggers een overschrijding van de vermoeiingsschade gevonden in de eerste overspanning.



Figuur 13 Getoetste locaties van de verbinding type 6.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
Jaar	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
6-1	0,3	1,2	0,2	0,2	0,3	0,7	0,0	0,0
6-2	0,8	2,8	0,3	0,4	0,7	1,7	0,0	0,1
6-3	0,8	2,7	0,4	0,5	0,7	1,7	0,0	0,1
6-4	0,5	1,9	0,2	0,3	0,5	1,2	0,0	0,1
6-5	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0

Tabel 13 Schadegetallen van verbinding type 6 voor eind 2018 en eind 2050.

Met het burr grinden van de flanklas zal niet zozeer de detailcategorie verhoogd kunnen worden, maar wel kan de huidige schade weggehaald worden. Dit komt omdat burr grinding bedoeld is voor het verbeteren van de lasteen, waarbij de spanning loodrecht op de lasteen optreedt en niet, zoals in dit geval, evenwijdig aan de las. Gezien de afmetingen van de huidige las ( $a = 4 \text{ mm}$ ) dient na burr grinding wel de las weer uitgebouwd te worden. De verbinding is daarom beschouwd met als uitgangspunt detailcategorie  $\Delta\sigma_c = 100$ , waarbij de schade in 2018 op nul begint. De las ter plaatse van de witte cellen in onderstaande tabel hoeven in principe niet verbeterd te worden, maar zijn voor de volledigheid wel berekend.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
6-1	0,9	0,0	0,5	0,0
6-2	2,0	0,1	1,0	0,0
6-3	2,0	0,1	1,0	0,1
6-4	1,4	0,1	0,7	0,0
6-5	0,1	0,0	0,0	0,0

Tabel 14 Schadegetallen van de verbinding Type 6 na burr grinding voor eind 2050.

Met name voor de HRB west is alleen burr grinding toepassen dus onvoldoende. Ook hier zal de spanning verlaagd moeten worden door het vergroten van de onderflens. Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 4.6.

## 2.7 Type 13: Flanklas tussen het lijf en onderflens van hoofdligger

Voor verbinding type 13 zijn de volgende schadegetallen gevonden in de herberekening. Hierbij is om de 5 m getoetst, waarbij de locaties overeen komen met type 3.

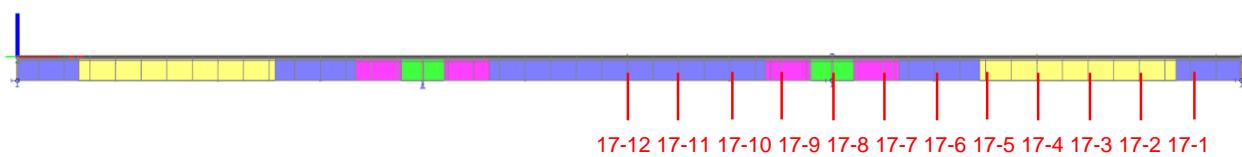
$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
Jaar	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
13-1	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0
13-2	0,3	1,2	0,2	0,2	0,3	0,8	0,0	0,0
13-3	0,8	2,8	0,3	0,4	0,7	1,7	0,0	0,1
13-4	0,8	2,7	0,4	0,5	0,7	1,7	0,0	0,1
13-5	0,5	1,9	0,2	0,3	0,5	1,2	0,0	0,1
13-6	0,8	2,7	0,4	0,5	0,8	1,7	0,0	0,1
13-7	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
13-8	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
13-9	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
13-10	0,6	2,1	0,4	0,5	0,5	1,3	0,0	0,1
13-11	1,1	3,8	0,7	0,9	1,1	2,4	0,1	0,2
13-12	1,1	3,7	0,6	0,8	1,0	2,4	0,1	0,1

Tabel 15 Schadegetallen van verbinding type 13 voor eind 2018 en eind 2050.

Voor deze verbinding geldt hetzelfde als voor type 6, dat alleen de schade door burr grinding weggenomen kan worden. De detailcategorie zal in principe niet verbeteren. Omdat voor de eerdere details toch al een spanningsverlaging noodzakelijk is, is deze verbinding niet verder meer berekend zonder versterking. Voor de berekening van de versterkte situatie wordt verwezen naar paragraaf 4.8.

## 2.8 Type 17: Verticale plooiverstijvers – las met lijf van de hoofdlijker

Het lijf van de hoofdliggers is bij elke dwarsdrager met een half INP 32 profiel in de dwarsrichting van het lijf verstijfd (plooiverstijver). Bij de steunpunten zijn twee  $\frac{1}{2}$  INP 32 profielen gebruikt aan weerszijden van het lijf. Het lijf van de plooiverstijver is aan het lijf gelast met een hoeklas  $a = 4$  mm. De toetsingen van deze verbinding zijn om de 5 m uitgevoerd. Uit de berekening van de huidige situatie is gebleken dat de meeste verbindingen niet voldoen aan de schade-eis  $D \leq 1,0$  bij  $\gamma_{Mf} = 1,35$ , met uitzondering van de oostelijke ligger van de parallelrijbaan.



Figuur 14 De locaties van de verbindingen type 17.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
Jaar	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
17-1	0,4	1,4	0,3	0,3	0,4	0,9	0,0	0,0
17-2	0,7	2,7	0,4	0,5	0,7	1,7	0,0	0,1
17-3	1,5	5,4	0,8	1,0	1,5	3,4	0,1	0,2
17-4	1,5	5,3	0,8	1,0	1,5	3,4	0,1	0,2
17-5	1,1	3,8	0,5	0,7	1,1	2,5	0,0	0,1
17-6	1,7	5,6	0,8	1,1	1,7	3,6	0,1	0,2
17-7	0,1	0,5	0,0	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0
17-8	0,1	0,4	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
17-9	0,2	0,6	0,1	0,1	0,1	0,4	0,0	0,0
17-10	1,3	4,4	0,8	1,1	1,3	2,8	0,1	0,2
17-11	2,2	7,5	1,4	1,8	2,2	4,8	0,2	0,4
17-12	2,2	7,4	1,2	1,6	2,2	4,8	0,1	0,3

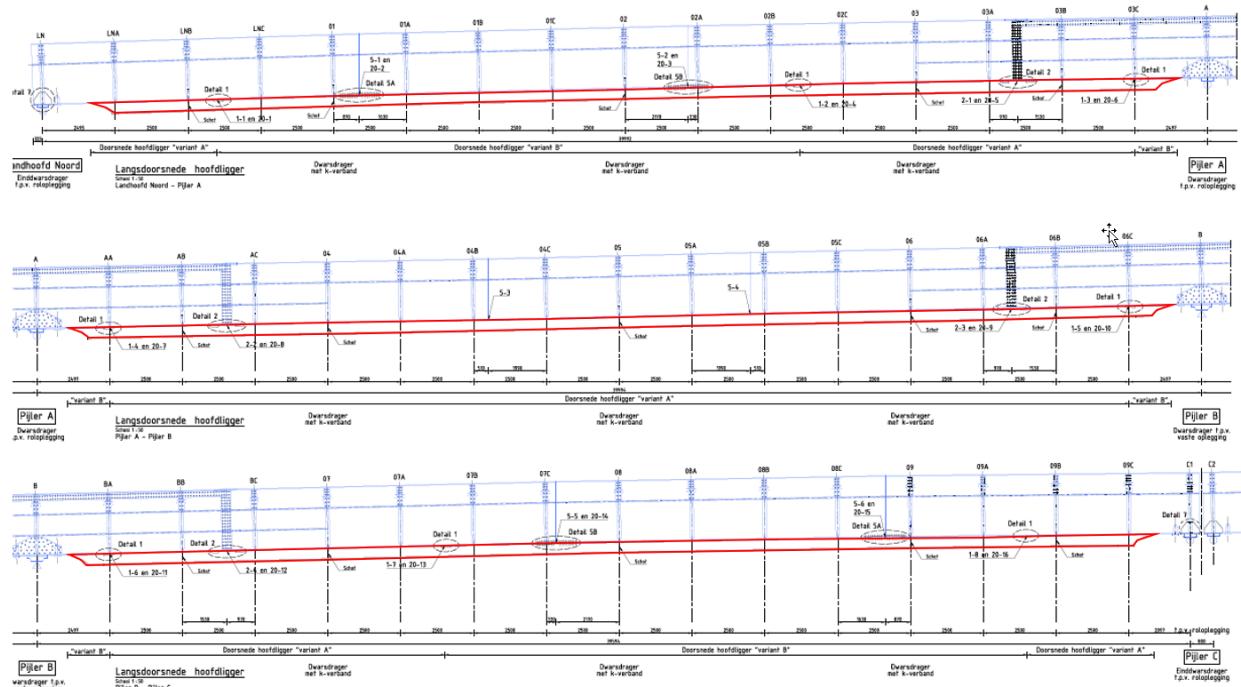
Tabel 16 Schadegetallen van verbinding type 17 voor eind 2018 en eind 2050.

Om de detailcategorie van de las te verbeteren en de schade weg te nemen, kan ook hier als versterkingsmaatregel burr grinding van de lasverbinding overwogen worden. Uit de berekeningen van type 3 is echter al gebleken dat dit niet voldoende zal zijn en dat er spanningsverlaging nodig zal zijn. In paragraaf 4.12 zal daarom gekeken worden of dit wel mogelijk is na de spanningsverlaging in de hoofdlijker.

### 3 Versterkingen

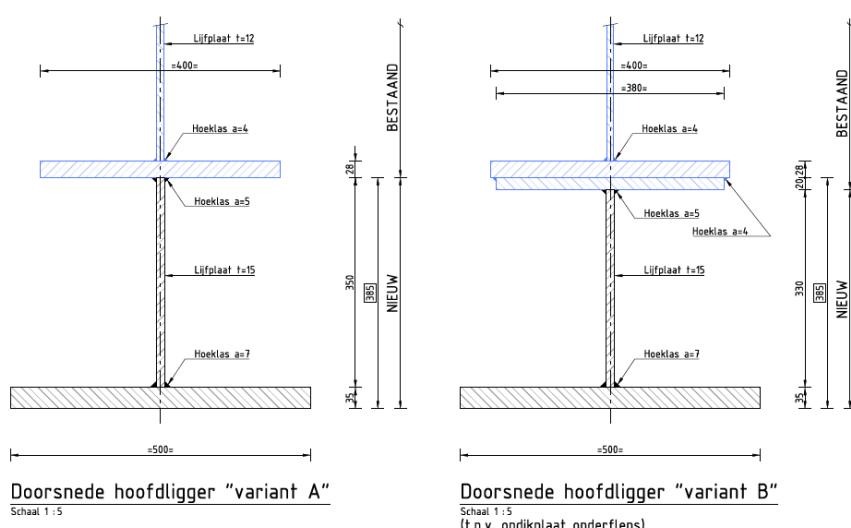
#### 3.1 Versterking hoofdlijn

Uit de berekeningen in de vorige paragraaf is gebleken dat het noodzakelijk is de spanningen te verlagen. Hiervoor wordt onder de hoofdlijn een T-stuk aangebracht over nagenoeg de gehele lengte van de velden. Alleen ter plaatse van de opleggingen is dit niet nodig.



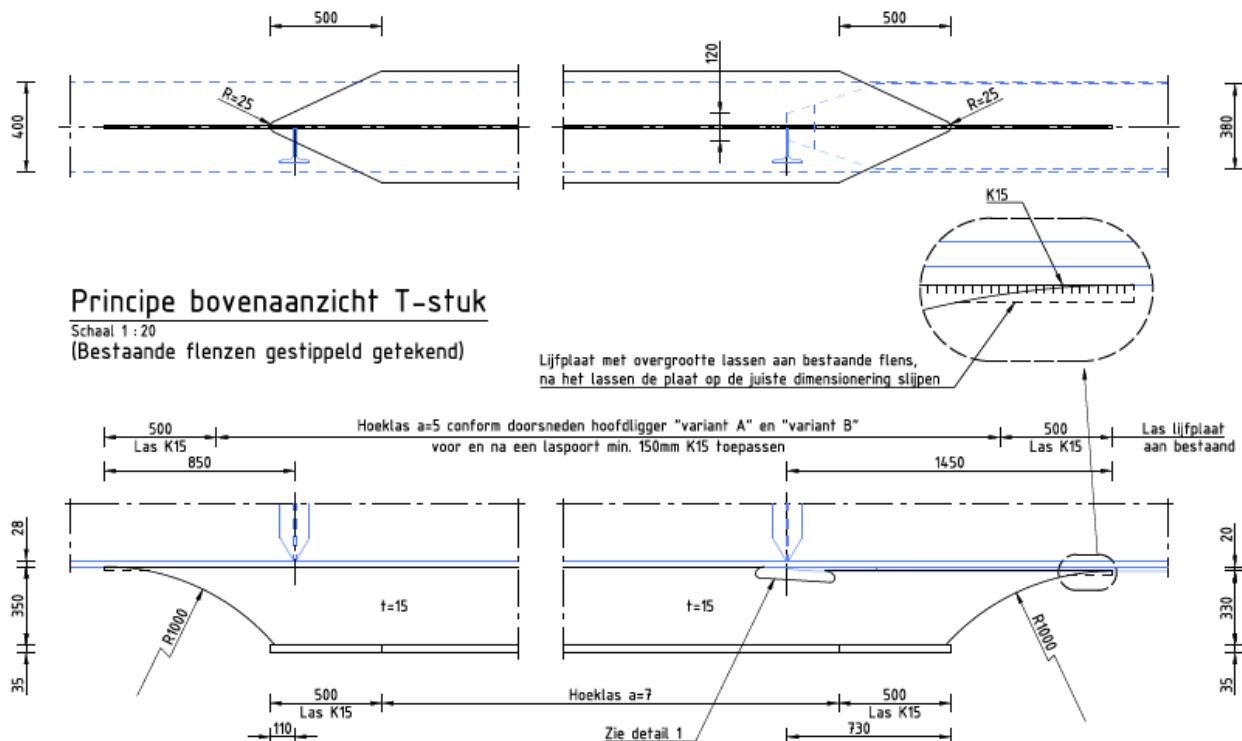
Figuur 15 Zijaanzicht brug met versterking van de onderflens rood weergegeven.

Het T-stuk is samengesteld uit een lijf van 15x350 mm en een flens van 500x35 mm, welke onder de bestaande onderflens zijn gelast.



Figuur 16 Principedoorsnede over de onderflens met versterking (verstijvingsschotten en dwarsverstijvers niet getekend).

Aan het einde van het T-stuk is de flens taps toeopend gemaakt en is een afronding in het lijf van het T-stuk gemaakt richting de bestaande onderflens, om een geleidelijke spanningsoverdracht te verkrijgen van het T-stuk naar de bestaande onderflens.



Figuur 17 Principedoorsnede beëindiging T-stuk

Om te voorkomen dat de brug asymmetrisch wordt, wordt de versterking op zowel de westelijke als de oostelijke hoofdlijger toegepast.

## 3.2 Overige versterkingen

Naast bovengenoemde versterking van de hoofdligger voor vermoeiing zijn lokaal een aantal aanvullende versterkingen noodzakelijk, naast het verbeteren van diverse lassen. Dit betreffen de volgende versterkingen:

- Overkluiting v-naden onderflens (vermoeiing) (paragraaf 4.5 en 6.7)
  - Onderzijde verticaal portaal eindsteunpunten (sterkte) (paragraaf 5.3.2)
  - Vijzelpunten eindsteunpunten (sterkte) (paragraaf 5.6.2)
  - Verbinding onderrand vaste opleggingen (verbinding) (paragraaf 6.3)

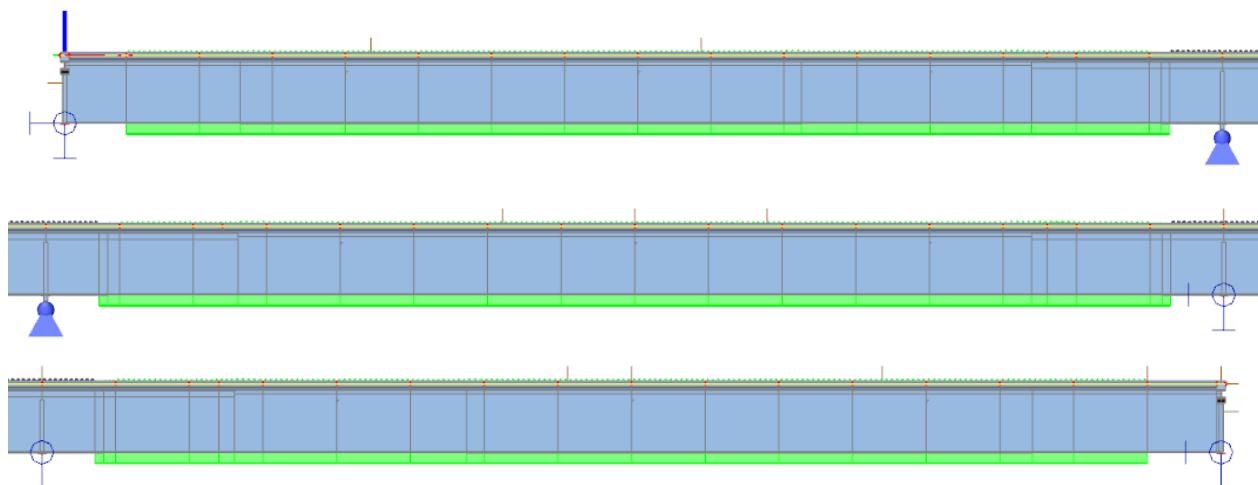
Deze versterkingen zijn uitgewerkt in de genoemde paragrafen. Omdat dit lokale versterkingen zijn, hebben deze geen gevolgen voor de modellering.

### 3.3 Aanpassing modellering

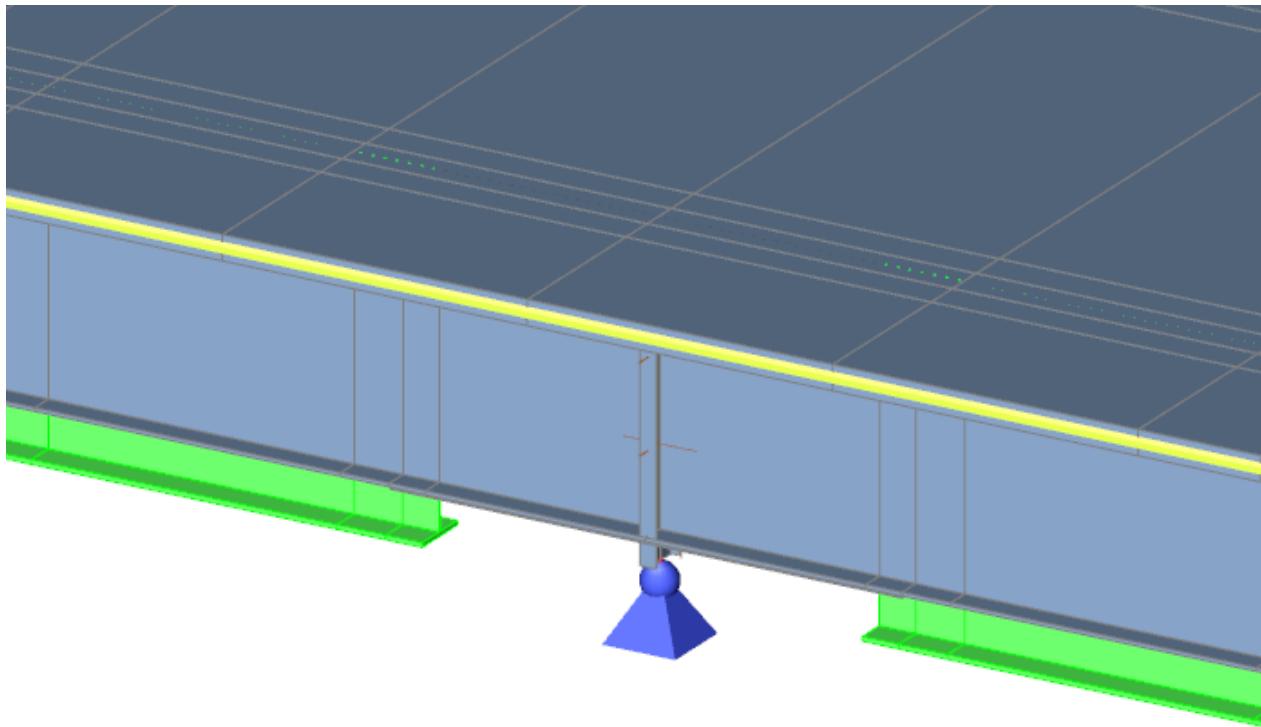
Voor de modellering is het T-stuk onder de hoofdlijger toegevoegd aan het eindige elementen model dat ook is gebruikt voor de verificatieberekeningen van de huidige situatie. Hiervoor is gebruik gemaakt van een extra bouwfase waarin het T-stuk wordt toegevoegd aan de doorsnede. Hierbij is in de eerste 10 bouwfases het T-stuk nog niet aanwezig, vanaf fase 11 wordt deze toegevoegd aan de doorsnede. Hierdoor wordt de permanente belasting alleen door het oude profiel gedragen, maar wordt het bijkomende gewicht van het T-stuk en de veranderlijke belastingen wel door de versterkte profielen gedragen.

Fase	Model	Wijziging constructie	Belastinggeval
Fase 1	Globale model	Toevoegen staalconstructie met t.p.v. tussensteunpunt hoofdlijger alleen onderflens en lijf	Eigen gewicht staal
Fase 2	Globale model	-	Stortgewicht voorgespannen betondek
Fase 3	Model betondek	Apart model met voorgespannen betondek (e.g. = 0) + bovenflens hoofdlijger (T)	Voorspanning
Fase 4	Globale model	Toevoegen bovenflens hoofdlijger t.p.v. tussensteunpunt + voorgespannen betondek	Vijzelen
Fase 5	Globale model	-	Stortgewicht gewapend betondek
Fase 6	Globale model	Toevoegen gewapend betondek (e.g. = 0)	Aflaten
Fase 7	Globale model	-	Asfaltverharding
Fase 8	Globale model	-	Overige permanente belastingen
Fase 9	Globale model	-	Krimp en kruip
Fase 10	Globale model	-	Voorspanverlies
Fase 11	Globale model	Toevoegen T-stuk	Eigen gewicht T-stuk
Fase 12	Globale model	-	Veranderlijke belastingen

Tabel 17 Overzicht gemodelleerde bouwfasen



Figuur 18 T-stuk onder de hoofdlijger in bouwfase 11



Figuur 19 Detail ter plaatse van tussensteunpunt met in groen het T-stuk onder de onderflens

Voor de beëindiging van het T-stuk is een lokaal plaatmodel opgesteld, zie paragraaf 6.6.

### 3.4 Aanpassing belastingen

In hoofdlijnen zijn dezelfde belastingen gebruikt als voor de verificatieberekeningen. Wel zijn er een aantal kleine wijzigingen doorgevoerd. Zo is er een belastinggeval toegevoegd met het eigen gewicht van het T-stuk. Het eigen gewicht wordt door SCIA automatisch bepaald.

Daarnaast is de windbelasting aangepast, omdat de liggers iets hoger zijn geworden en daardoor meer wind vangen. Hiervoor is de puntlast aan de onderzijde van de K-verbanden verhoogd met  $0,385 \text{ m} * 10 \text{ m} * q_{\text{wind}}$  voor de k-verbanden en de helft voor de eindsteunpunten.

De overige belastingen zijn gelijk gebleven.

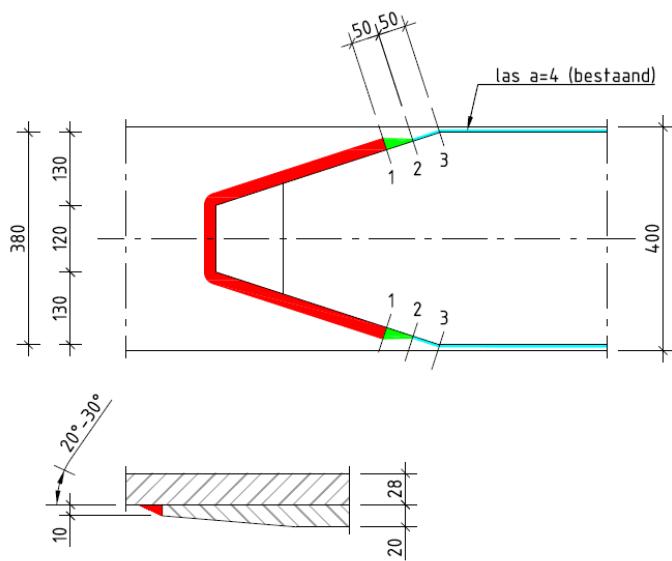
## 4 Toetsing op vermoeiing na versterking

In dit hoofdstuk zal per type worden aangetoond dat de (maatgevende) verbinding voldoet aan de vermoeiingseis  $D \leq 1,0$  bij  $\gamma_{Mf} = 1,35$ . Hiervoor zijn in de SCIA berekening de doorsnede van de hoofdlijker en de dwarsverstijvers bij de portalen aangepast en zijn de invloedslijnen van de verbindingen opnieuw bepaald, op basis van de nieuwe stijfheidsverhoudingen. Met deze nieuwe invloedslijnen zijn de vermoeiingsberekening van de verbindingen opnieuw uitgevoerd. Naast de bestaande verbindingen zijn ook de nieuwe verbindingen getoetst. Deze beginnen bij type 20.

Aanvullend wordt verwezen naar de rapportage "TNO-2019-R10527 Risicoanalyse lasimperfecties in de IJsselbrug A12" [7]. Hierin is aangetoond dat er, met uitzondering van enkele v-lassen in de onderflens (type 5), geen lasimperfecties zijn aangetroffen met een restlevensduur van minder dan 30 jaar. Daarnaast is middels een probabilistische analyse bepaald dat op basis van de aangetroffen defecten ook het risico van niet-geïnspecteerde locaties acceptabel is.

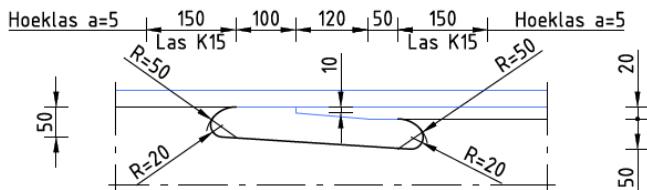
### 4.1 Type 1: Las uiteinde opdikplaat onderflens van hoofdlijker

Gezien het feit dat de huidige schades op dit moment voor de meeste verbindingen van type 1 boven de 1,0 zitten en er tijdens inspecties ook hechtingsfouten in de las zijn geconstateerd, wordt als definitieve herstelmaatregel voorgesteld om naast het versterken van de onderflens met het T-profiel ook alle lassen ter plaatse van de uiteinden van de opdikplaten te vervangen en uit te bouwen conform de methode zoals is toegepast als preventieve versterking voor de verbinding van type 1-2 HRB west en PRB west, zie rapport [R10290B]. Dit omvat het wegslijpen van de las, inclusief het wegslijpen van de huidige schade, en het opnieuw lassen en uitbouwen van de las onder een hoek van  $20^\circ$  tot  $30^\circ$ , rood weergegeven in onderstaand figuur. Vervolgens dient voor de teen van de nieuwe las burr grinding te worden toegepast, om de vermoeiingssterkte te verhogen. Voor de volledige beschrijving van de uit te voeren stappen wordt verwezen naar rapport T&P-BF7387-R011.



Figuur 20 Versterking van de lassen op de uiteinden van de opdikplaten

Uit praktisch oogpunt (inspectie, uitvoering) en vermoeiingstechnisch oogpunt zal lokaal, ter plaatse van het einde van de opdikplaat, een uitsparing in het lijf van het T-stuk moeten worden gerealiseerd, zodat er geen (extra) spanningspieken ter plaatse van de lasuiteinden van de opdikplaat ontstaan. Er wordt uitgegaan van een opening van 50 mm. In de bepaling van de spanningen is hier rekening mee gehouden, door dit deel van het lijf niet mee te nemen in de doorsnede-eigenschappen. Vermoeiing van het detail van de las aan het einde van de opening zal worden behandeld bij type 20.



Figuur 21 Zijaanzicht uitsparing ter plaatse van einde opdikplaat

Voor het vermoeiingsdetail van de las aan het einde van de opdikplaat is de vermoeiingsanalyse opnieuw uitgevoerd. Uitgangspunt is dat er na het burr grinden geen schade meer is en dat er dus van  $D = 0$  mag worden uitgegaan. De schadeontwikkeling tussen nu en (eind) 2050 is vervolgens uitgerekend met een (verbeterde) detailcategorie van  $\Delta\sigma_c = 58*1,3 = 75,4$ . De toetsingsresultaten zijn weergegeven in Tabel 18.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
	2050	2050	2050	2050
<b>1-1/1-8</b>	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>1-2/1-7</b>	0,3	0,0	0,1	0,0
<b>1-3/1-6</b>	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>1-4/1-5</b>	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 18 Schadegetallen van verbinding type 1 van de onderflens voor eind 2050 (na versterking, na burr grinding).

Opgemerkt wordt dat in 2018 en 2019 er op enkele locaties preventieve versterkingen uitgevoerd zijn/worden. Dit betreft de volgende locaties:

- HRB west 1-2 en 1-7 (beide aanbruggen) (2018)
- PRB west 1-2 en 1-7 (beide aanbruggen) (2018)
- HRB oost 1-7 (2<sup>e</sup> aanbrug) (2019)
- PRB west 1-1 (1<sup>e</sup> aanbrug) (2019)
- PRB west 1-8 (1<sup>e</sup> aanbrug) (2019)
- PRB west 1-8 (2<sup>e</sup> aanbrug) (2019)

Omdat de bestaande lassen niet volledig zijn verwijderd tijdens de preventieve versterking dienen ook dezelassen weggeslepen te worden en opnieuw gelast te worden.

## 4.2 Type 2: Geklonken verbindingen in sectiedelingen van de aanbrug

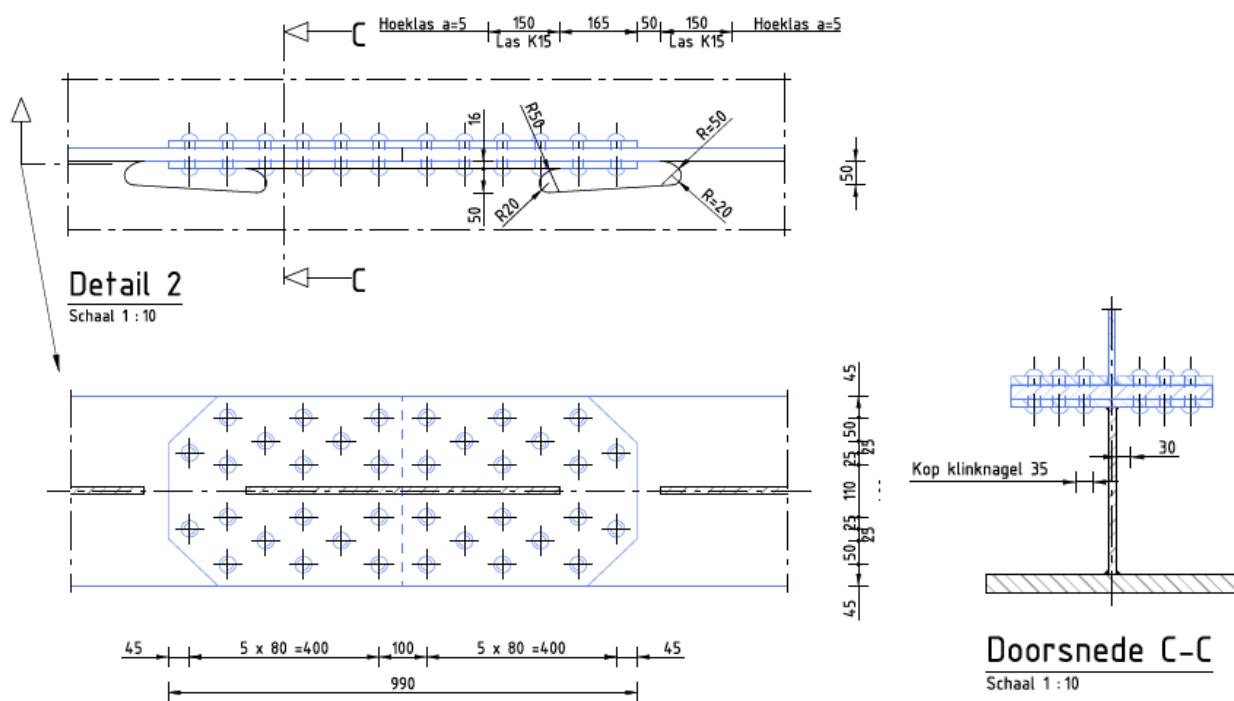
Voor de geklonken verbinding ter plaatse van de sectiedelingen wordt gekeken of het met de eerder genoemde versterking van de onderflens mogelijk is om zonder vervanging van de huidige klinknagels de schade eind 2050 onder de  $D = 1,0$  te houden. De huidige schade (eind 2018) is weergegeven in Tabel 19.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2018	2018	2018	2018
<b>2-1</b>	0,3	0,1	0,3	0,0
<b>2-2</b>	0,5	0,2	0,5	0,0
<b>2-3</b>	0,5	0,3	0,4	0,0
<b>2-4</b>	0,4	0,2	0,4	0,0

Tabel 19 Schadegetallen van de verbinding type 2 tot eind 2018 (voor versterking).

Voor de maatgevende HRB west geldt dus dat er voor verbinding 2-2 en 2-3 maximaal  $D = 0,5$  aan schade bij mag komen.

Voor de versterkte situatie is de schade tussen nu en eind 2050 opnieuw uitgerekend met het aangepaste SCIA model. Uitgangspunt is dat er ook bij de sectiedelingen een uitsparing in het lijf van de versterking noodzakelijk is, omdat het lassen aan de overlappingsplaat door de aanwezige klinknagels lastig zal zijn. Hiervoor is uitgegaan van een hoogte van 50 mm.



Figuur 22 Zijaanzicht aansluiting T-stuk op koppelplaten t.p.v. sectiedeling in de onderflens

De vermoeiingsberekening van de versterkte situatie is uitgevoerd met detailcategorie  $\Delta\sigma_c = 80$ , met helling  $m_1 = 5$ , gelijk aan de huidige situatie, waarbij is uitgegaan van de netto doorsnede, inclusief uitsparing in het lijf van de versterking.

De bijkomende schade is weergegeven in Tabel 20.

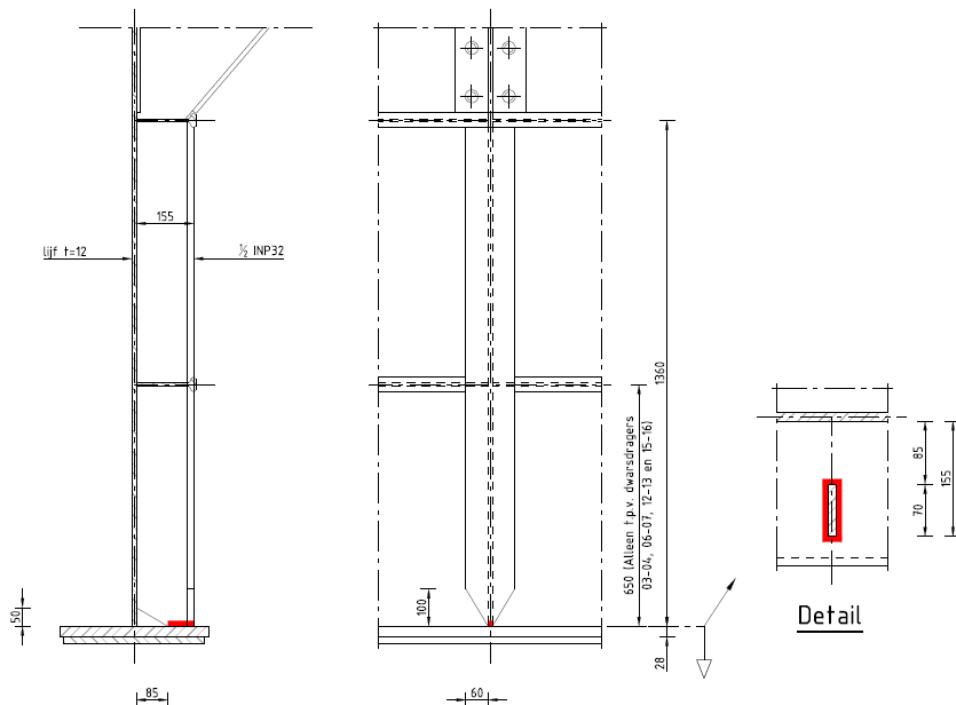
$\gamma_{MF} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2018-2050	2018-2050	2018-2050	2018-2050
<b>2-1</b>	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>2-2</b>	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>2-3</b>	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>2-4</b>	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 20 Schadetallen van de verbinding Type 2 eind 2018 (voor versterking) tot eind 2050 (na versterking).

Te zien is dat er geen additionele schade optreedt. De totale schade eind 2050 zal dus gelijk zijn als weergegeven in tabel in Tabel 19. Het is dus niet nodig om de klinknagels in de verbinding te vervangen om de huidige schade weg te nemen.

### 4.3 Type 3: Verticale plooiverstijvers binnenzijde - las met onderflens van de hoofdliggers

Voor een groot aantal verbindingen van de verticale plooiverstijvers aan de binnenzijde van de hoofdligger met de onderflens van de hoofdligger geldt dat deze op dit moment al niet voldoen aan de schade-eis  $D < 1,0$ . De schade zal dus eerst weggenomen moeten worden door het toepassen van burr grinding op de lasteen (rood weergegeven).



Figuur 23 Las type 3 (rood weergegeven)

Gezien de keeldoorsnede van de las ( $a = 4 \text{ mm}$ ) zal, na hetwegslijpen van de schade, de las weer opnieuw gelegd moeten worden. Uitgangspunt is dat eerst de las weer opnieuw gelegd dient te zijn, alvorens de volgende dwarsverstijver wordt weggeslepen (tussen twee K-verbanden). Overwogen kan worden om vervolgens opnieuw te burr grinden om de detailcategorie te verhogen. De schade aan het einde van 2050, rekening houdend met de versterkte doorsnede en het wegnemen van de huidige schade, kan dan bepaald worden op basis van detailcategorie  $\Delta\sigma_c = 80 \times 1,3 = 104$ , zie Tabel 21. Hierbij is uitgegaan van het maatgevende detail 3-11.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
3-11	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 21 Schadegetallen van verbinding 3-11 voor eind 2050 (na versterking, met burr grinding) DC = 104.

Zoals te zien is, treed er geen nieuwe schade op in de verbinding na het versterken de doorsnede. Ook is het mogelijk om de uitgebouwde las niet opnieuw te burr grinden. Er dient dan gerekend te worden met de oorspronkelijke detailcategorie  $\Delta\sigma_c = 80$ , waarbij wel de schade op  $D = 0,0$  begint en gerekend mag worden met de gereduceerde spanningswisseling door het toevoegen van het T-stuk. Tabel 22 geeft de schadegetallen voor deze situatie.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
3-1	0,0	0,0	0,0	0,0
3-2	0,0	0,0	0,0	0,0
3-3	0,4	0,0	0,2	0,0
3-4	0,2	0,0	0,1	0,0
3-5	0,1	0,0	0,1	0,0
3-6	0,0	0,0	0,0	0,0
3-7	0,0	0,0	0,0	0,0
3-8	0,2	0,0	0,1	0,0
3-9	0,0	0,0	0,0	0,0
3-10	0,0	0,0	0,0	0,0
3-11	0,1	0,0	0,1	0,0
3-12	0,1	0,0	0,1	0,0

Tabel 22 Schadegetallen van de verbinding 3-11 voor eind 2050 (na versterking), DC = 80.

Gezien de beperkte toename wordt er voor gekozen om geen burr grinding toe te passen na het uitbouwen van de las. Voor de volledige beschrijving van de uit te voeren stappen wordt verwezen naar rapport T&P-BF7387-R011.

Onderstaande tabel geeft de schade eind 2018 en eind 2050 weer. De cellen met een witte achtergrond zijn de details die in principe niet aangepakt hoeven te worden, omdat de schade eind 2050 onder de 1,0 blijft. De cellen met een rode achtergrond in 2018 komen overeen met de details waar burr grinding moet worden toegepast. De details met eind 2018 een schade D  $\geq 0,9$  hebben (oranje weergegeven) dienen ook meegenomen te worden, omdat het nog enkele jaren zal duren voordat de versterkingen zullen worden gerealiseerd.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
3-1	0,5	0,5	0,3	0,3	0,4	0,4	0,0	0,0
3-2	0,9	0,0 <sup>[1]</sup>	0,5	0,5	0,9	0,0 <sup>[1]</sup>	0,0	0,0
3-3	1,9	0,4 <sup>[1]</sup>	1,0	0,0 <sup>[1]</sup>	1,8	0,2 <sup>[1]</sup>	0,1	0,1
3-4	1,9	0,2 <sup>[1]</sup>	1,0	0,0 <sup>[1]</sup>	1,8	0,1 <sup>[1]</sup>	0,1	0,1
3-5	1,4	0,1 <sup>[1]</sup>	0,7	0,7	1,4	0,1 <sup>[1]</sup>	0,1	0,1
3-6	1,9	0,0 <sup>[1]</sup>	1,0	0,0 <sup>[1]</sup>	1,9	0,0 <sup>[1]</sup>	0,1	0,1
3-7	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,0	0,0
3-8	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
3-9	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,0	0,0
3-10	1,5	0,0 <sup>[1]</sup>	1,0	0,0 <sup>[1]</sup>	1,5	0,0 <sup>[1]</sup>	0,1	0,1
3-11	2,6	0,1 <sup>[1]</sup>	1,6	0,0 <sup>[1]</sup>	2,6	0,1 <sup>[1]</sup>	0,2	0,2
3-12	2,5	0,1 <sup>[1]</sup>	1,5	0,0 <sup>[1]</sup>	2,5	0,1 <sup>[1]</sup>	0,2	0,2

[1] Schade in 2050 na toepassing burr grinding tijdens de renovatie

Tabel 23 Schadegetallen van verbinding type 3 voor eind 2018 (voor versterking) en eind 2050 (na versterking)

#### 4.4 Type 4: Geklonken verbinding dwarsverband met de hoofdliggers

Zoals beschreven in paragraaf 2.4 zal eerst worden gekeken in hoeverre het mogelijk is om zonder het vervangen van de klinknagels en de verbinding tussen de onderflens en de onderrand van het dwarsverband, maar met de versterkte onderflens, het mogelijk is om de schade eind 2050 onder de  $D = 1,0$  te houden. Zowel de schade tot nu toe en de toekomstige schade is berekend met detailcategorie  $\Delta\sigma_c = 101$ , heling  $m_1 = 4,45$  en  $m_2 = 6,45$ . Voor de toekomstige schade wordt uitgegaan van de versterkte situatie. De schadegetallen worden in Tabel 24 voor eind 2018 en 2050 weergegeven, waarbij voor de eerste periode van de onversterkte situatie is uitgegaan en voor de tweede periode van de versterkte situatie.

$\gamma_{MF} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
Jaar	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
4-1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0
4-2	0,3	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,0	0,0
4-3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,3	0,3	0,0	0,0
4-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4-5	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,0	0,0
4-6	0,5	0,5	0,2	0,2	0,4	0,4	0,0	0,0
4-7	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,0	0,0
4-8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 24 Schadegetallen van verbinding type 4 voor eind 2018 (voor versterking) en eind 2050 (na versterking).

Door de versterking komt er dus geen schade meer bij. Het is dus niet nodig de klinknagels te vervangen.

## 4.5 Type 5: Gelaste verbindingen in de sectiedelingen van de aanbrug

### 4.5.1 V-las onderflens

#### Veld 1 en veld 3

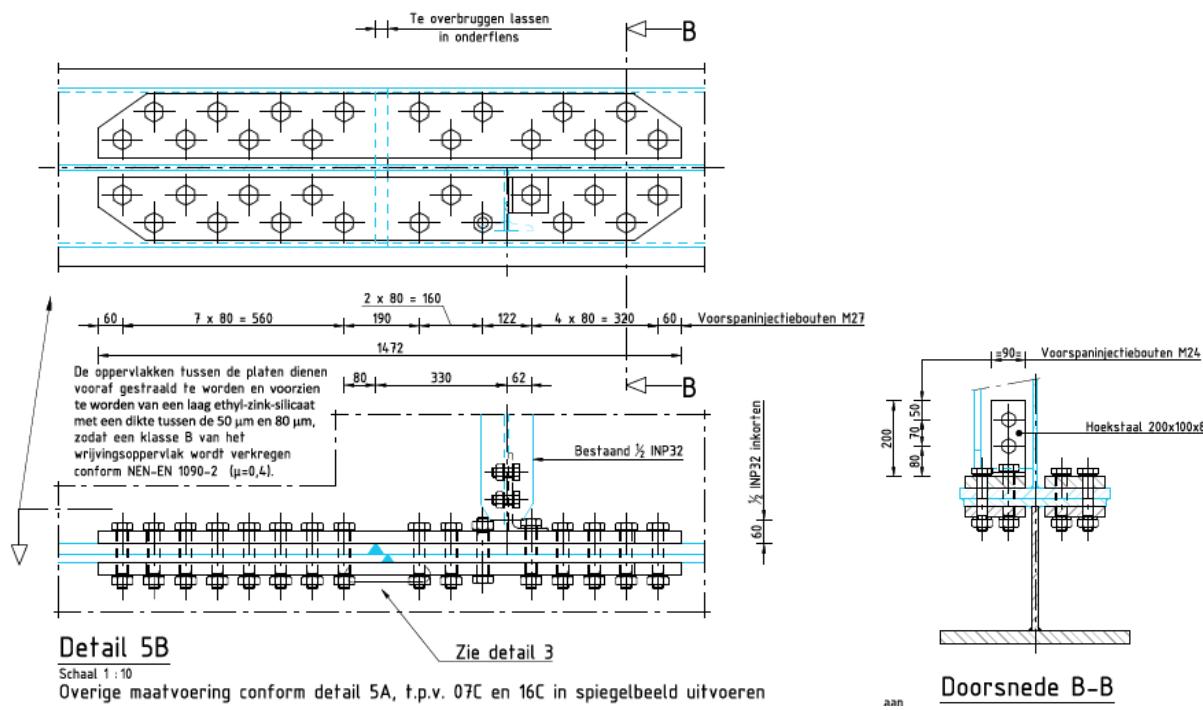
##### Bestaande las

Zoals beschreven in paragraaf 2.5 is het voor verbinding 5-1 en 5-2 niet mogelijk om de detailcategorie van de verbinding te verbeteren, omdat de wortel van de las in de opdikplaat niet bereikbaar is. Een mogelijke benadering zou kunnen zijn om de onderste flensplaat als verloren te beschouwen en voor de bovenste flensplaat burr grinding toe te passen aan de bovenzijde. De onderzijde van de bovenste flensplaat kan dan beschouwd worden met detailcategorie 112 (vlakgeslepen zijde V-naad), waarbij vanaf 2018 een gereduceerde spanning door het T-stuk kan worden aangehouden. De bovenzijde kan dan worden beschouwd met detailcategorie 71x1,3 = 92,3. Hiermee kan in theorie wel de benodigde restlevensduur van 30 jaar worden behaald.

Door TNO is echter onderzoek uitgevoerd naar de invloed van lasimperfecties op de vermoeiingslevensduur. Hieruit volgde dat voor detail 5-2 er op sommige locaties toch een overkluizing noodzakelijk is. In overleg met Rijkswaterstaat is besloten om voor detail 5-1 en 5-2 voor de HRB west, HRB oost en PRB west toch een overkluizing toe te passen, om eventuele onzekerheden met betrekking tot de lasimperfecties toch weg te nemen.

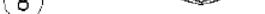
##### Versterking

Voor deze verbindingen is daarom een overkluizing ontworpen die de functie van de oorspronkelijke lassen over zal gaan nemen, indien deze bezwijken. Voor de overkluizing worden zowel boven als onder de huidige onderflens twee strippen toegepast, welke verbonden worden door middel van voorspaninjectiebouten. Eventuele dwarsverstijvers die in de weg zitten dienen ingekort te worden en door middel van een hoekstaal met een van de voorspaninjectiebouten verbonden te worden.



Figuur 24 Overkluizing V-naad bestaande onderflens

Het oppervlak van de bestaande flenzen en de koppelplaten dient gestraald te worden en voorzien te worden van ethyl-zink-silicaat, zodat een minimale wrijvingsfactor van  $\mu = 0,4$  gehaald wordt. Voor de vermoeiingsberekeningen wordt uitgegaan van detailcategorie 112, conform detail 8 van Tabel 8.1 van NEN-EN 1993-1-9.

112		8) Symmetrische verbinding met tweezijdige stuikplaten met voorgespannen hogesterktebouten. 8) Symmetrische verbinding met tweezijdige stuikplaten met voorgespannen injectiebouten.	8) $\Delta\sigma$ berekend op basis van de bruto-dwarsdoorsnede. 8)... bruto-dwarsdoorsnede.
-----	---	---	---

Figuur 25 Detailcategorie voorgespannen injectieboutverbinding

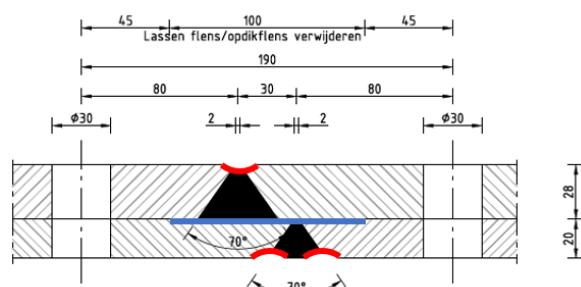
Voor de voorgespannen injectieboutverbinding wordt uitgegaan van de bruto doorsnede van de onderflens, exclusief de opdikplaten. Uit de schadeberekening volgen de volgende schadegetallen.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
5-1	0,0	0,0	0,0	0,0
5-2	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 25 Schadegetallen ter plaatse van de voorgespannen injectieboutverbinding eind 2050 (na versterking), eerste en derde veld, DC=112.

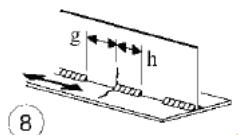
## Burr grinding bestaande lassen

Opgemerkt wordt dat de buitenzijden van de V-naden ook geburgrind dienen te worden om ervoor te zorgen dat alleen de wortel van de onderste V-naad kritisch blijft en hierdoor alleen de opdikplaat in de toekomst in kan scheuren. Om te voorkomen dat een eventuele scheur in de onderste opdikplaat door kan groeien, dient de flanklas tussen de twee flensplaten van de oorspronkelijke hoofdlijger te worden verwijderd over ca. 100 mm lengte (blauw weergegeven in onderstaand figuur). Voor de volledige beschrijving van de uit te voeren stappen wordt verwezen naar rapport T&P-BF7387-R011.



Figuur 26 Locatie van de te verwijderen las tussen onderflens en opdikplaat (blauw weergegeven) en te burr grinden lassen (rood weergegeven)

Door het weghalen van de langslas ontstaat er een nieuwe locatie met een lagere detailcategorie. De detailcategorie van de onderbroken langslas kan worden aangehouden als detailcategorie 80, conform detail 8 van Tabel 8.2 van NEN-EN 1993-1-9. Deze is dus maatgevend boven de detailcategorie van de voorgespannen injectieboutverbinding.

80	 <p><math>g/h \leq 2,5</math></p>	8) Onderbroken hoeklassen in de lengterichting.	8) $\Delta\sigma$ gebaseerd op de normaalspanning in de flens.
----	--	---	--

Figuur 27 Detailcategorie bij onderbroken hoeklassen in de lengterichting

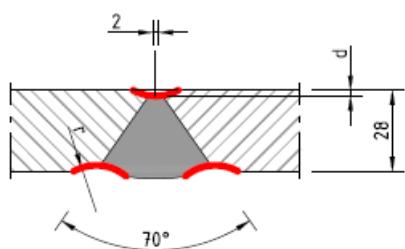
De schadegetallen zijn weergegeven in Tabel 26. In de doorsnede-eigenschappen is rekening gehouden dat de onderste opdikplaat constructief niet meer meewerkt en dat er een uitsparing in het lijf van het T-stuk aanwezig is. Wel zijn er aan de boven- en onderzijde van de bestaande onderflens 4 strips van de overkluiting aanwezig (160x30 mm), die de kracht over kunnen brengen. De verbinding in de PRB oost voldoet in principe ook zonder versterking en hoeft dus niet overkluist te worden.

$\gamma_{MF} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
5-1	0,0	0,0	0,0	0,0
5-2	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 26 Schadegetallen ter plaatse van de voorgespannen injectieboutverbinding eind 2050 (na versterking), eerste en derde veld, DC=80.

## Veld 2

In het tweede veld is geen opdikplaat in de onderflens van de hoofdliggers toegepast en kan dus, naast de versterking met het T-profiel, burr grinding toegepast worden in plaats van het overkluizen van de las. De schade kan hiermee weer naar D = 0,0 worden gebracht (te controleren door middel van NDT).



Figuur 28 Burr grinding van de las type 5-3

De verbinding is daarom getoetst op detailcategorie van  $\Delta\sigma_c = 71*1,3 = 92,3$ . Voor de spanning in de onderflens is rekening gehouden met een toeslag van 28 mm / (28 mm – 2 mm) = 1,08 in verband met de afname van de dikte. Tabel 27 geeft de toetsresultaten weer.

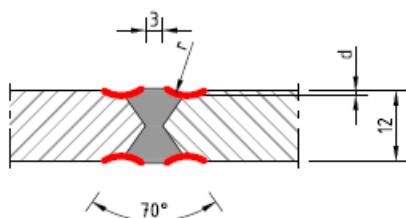
$\gamma_{MF} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
5-3	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 27 Schadegetallen in de V las in de onderflens voor eind 2050 (na versterking, na burr grinding), tweede veld, DC=92,3.

De las in de PRB oost hoeft in principe niet aangepakt te worden, deze heeft ook zonder burr grinding een schade  $D \leq 1,0$ .

#### 4.5.2 X-las lijf

De lijfplaten van de hoofdliggers zijn met een X-las aan elkaar verbonden op dezelfde locaties als de v-lassen in de onderflens. Om de huidige vermoeiingschade in de verbindingen weg te nemen, moet burr grinding toegepast. Burr grinding dient aan beide kanten van de X-las te worden toegepast om de schade bij de teen van de las te verwijderen, zie Figuur 29, waarna dit gecontroleerd dient te worden door middel van NDT. Aangenomen wordt dat 2 mm per zijde geburr grind wordt om de schade weg te nemen, daarna wordt de las weer dichtgelast, waarna in een tweede freesgang 1 mm geburr grind wordt, met een tolerantie van +/- 0,5 mm. De dikte van het lijf zal hierdoor (lokaal) reduceren tot maximaal 9 mm. Voor de volledige beschrijving van de uit te voeren stappen wordt verwezen naar rapport T&P-BF7387-R011.



Figuur 29 Burr grinding van de X-las in het lijf.

Allereerst is gekeken op welke hoogte de schade zonder burr grinding zou voldoen, rekening houdend met de versterking met het T-stuk voor de periode na 2018. Om enige reserve te houden voor de schadeontwikkeling in de tijd tussen nu en de daadwerkelijke uitvoering is gekeken op welke hoogte de schade  $D \leq 0,8$  is zonder burr grinding.

$\gamma_{MF} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
Jaar	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
5-1 (0 mm)	0,6	0,7	0,3	0,3	0,5	0,6	0,0	0,1
5-2 (200 mm)	0,6	0,6	0,3	0,3	0,6	0,6	0,0	0,1
5-3 (300 mm)	0,8	0,8	0,5	0,5	0,8	0,8	0,0	0,1

Tabel 28 Schadegetallen in het lijf voor aangegeven hoogte van verbinding Type 5 voor eind 2018 (voor versterking) en eind 2050 (na versterking, zonder burr grinding).

De las in het lijf ter plaatse van verbinding 5-1 hoeft dus niet ge-burr grind te worden. De verbindingen 5-2 in de westelijke liggers van de HRB en PRB moeten over 200 mm worden ge-burr grind en de verbindingen 5-3 in de HRB west en oost en PRB west over 300 mm.

Voor de situatie na burr grinding mag worden uitgegaan van een detailcategorie  $DC = 90 * 1,30 = 117 \leq 112 \Rightarrow 112$ . Ook mag de schade weer op  $D = 0,0$  worden aangehouden, omdat de huidige schade wordt verwijderd. Wel neemt de lijfdikte af tot maximaal 9 mm, wat zal resulteren in een spanningstoename van  $12 \text{ mm} / 9 \text{ mm} = 1,33$ , maar daarentegen neemt de spanningswisseling juist weer af door het toevoegen van het T-stuk. Op basis van deze uitgangspunten is de schade opnieuw bepaald voor de locaties waar geburr grind moet worden.

$\gamma_{MF} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
5-2	0,0	0,0	0,0	0,0
5-3	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 29 Schadegetallen van verbinding type 5 (onderzijde lijf) voor eind 2018 (voor versterking) en eind 2050 (na versterking, met burr griding).

## 4.6 Type 6: Flanklas tussen opdikplaat en de onderflens

De opdikplaten in de onderflens zijn met een flanklas aan de onderflens gelast. Voor deze verbinding is gekeken in hoeverre de verbinding voldoet, waarbij voor de periode vanaf nu tot eind 2050 is uitgegaan van de spanningswisselingen in de versterkte situatie. Hierbij wordt uitgegaan van detailcategorie 100. De resultaten van de schadeberekening zijn weergegeven in Tabel 30.

$\gamma_{MF} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	Jaar	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018
6-1	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,0	0,0
6-2	0,8	0,8	0,3	0,3	0,7	0,7	0,0	0,0
6-3	0,8	0,8	0,4	0,4	0,7	0,7	0,0	0,0
6-4	0,5	0,5	0,2	0,2	0,5	0,5	0,0	0,0
6-5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 30 Schadegetallen in verbinding Type 6 voor eind 2018 (zonder versterking) en eind 2050 (met versterking), DC=100.

Uit de berekening blijkt dat er geen additionele schade meer optreedt, waarmee de schade dus gelijk aan de huidige schade blijft.

## 4.7 Type 7, 10, 11 en 12 – Verbinding dwarsdrager - hoofdlijger

Vermoeiing van de verbinding tussen de dwarsdrager en het lijf van de hoofdlijger/dwarsverstijver is vooralsnog niet getoetst. Hiervoor wordt momenteel aanvullend onderzoek (rekmetingen) uitgevoerd. De resultaten van deze metingen en de toetsing van vermoeiing zullen in een volgende versie van deze rapportage worden toegevoegd.

## 4.8 Type 13: Flanklas tussen het lijf en onderflens van hoofdligger

Voor de flanklas tussen lijf en de onderflens is de schade tot 2018 zonder versterking en tussen 2018 en 2050 met versterking bepaald en weergegeven in Tabel 31. Te zien is dat er alleen voor de westelijke hoofdliggers bij verbinding 13-3 een toename van de schade in de laatste periode is van  $\Delta D = 0,1$ .

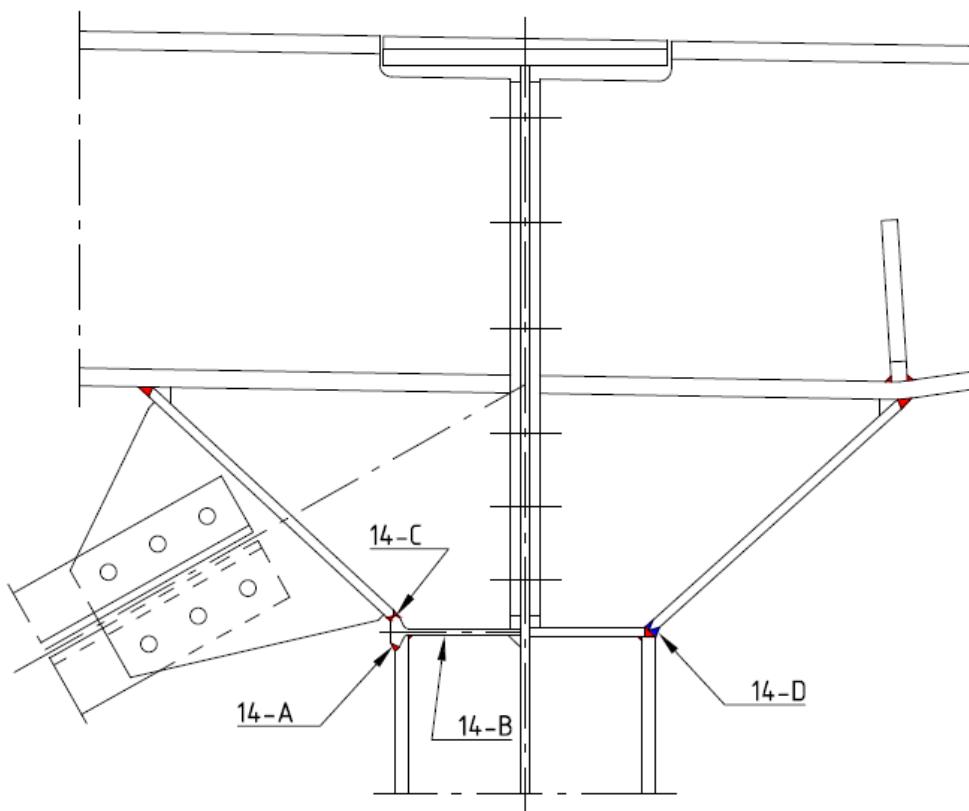
$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
Jaar	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
13-1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
13-2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,0	0,0
13-3	0,8	0,9	0,3	0,3	0,7	0,8	0,0	0,0
13-4	0,8	0,8	0,4	0,4	0,7	0,7	0,0	0,0
13-5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,5	0,5	0,0	0,0
13-6	0,8	0,8	0,4	0,4	0,8	0,8	0,0	0,0
13-7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13-8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13-9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13-10	0,6	0,6	0,4	0,4	0,5	0,5	0,0	0,0
13-11	1,1	1,1	0,7	0,7	1,1	1,1	0,1	0,1
13-12	1,1	1,1	0,6	0,6	1,0	1,0	0,1	0,1

Tabel 31 Schadegetallen in verbinding Type 13 voor eind 2018 en eind 2050, DC=100.

Uit de resultaten wordt duidelijk dat na het aanbrengen van het extra profiel onder de brug er nauwelijks vermoeiingsschade in dit detail bijkomt. Dit, in combinatie met de zeer beperkte overschrijding van de vermoeiingslevensduur en bijkomende complexiteit van het vervangen van deze las, maakt dat voor dit detail fysieke versterkingsmaatregelen disproportioneel zouden zijn. Er wordt daarom aanbevolen de lassen ter plaatse van 13-3, 13-11 en 13-12 van de westelijke liggers met NDT op scheurvorming te inspecteren. Voor de volledige beschrijving van het uit te voeren onderzoek wordt verwezen naar rapport T&P-BF7387-R011.

## 4.9 Type 14: Verbinding dwarsverstijver – langsverstijver – schot einddwarsdrager

Uit de vermoeiingsberekening van de lasverbinding tussen de dwarsverstijver, het schot en de langsverstijver ter plaatse van het portaal van de eindopleggingen is gebleken dat de lassen in de flens aan de binnenzijde van het portaal en in het lijf niet voldoen. De lasverbinding in de flens aan de buitenzijde voldoet net niet in de verificatieberekening, maar hier zit nog enig conservatisme in. Hier wordt bij de behandeling van detail 14D op ingegaan.



### Type 14: Einddwarsdrager

Figuur 30 Verbinding tussen dwarsverstijver, langsverstijver en het schot onder de dwarsdrager bij het eindsteunpunt

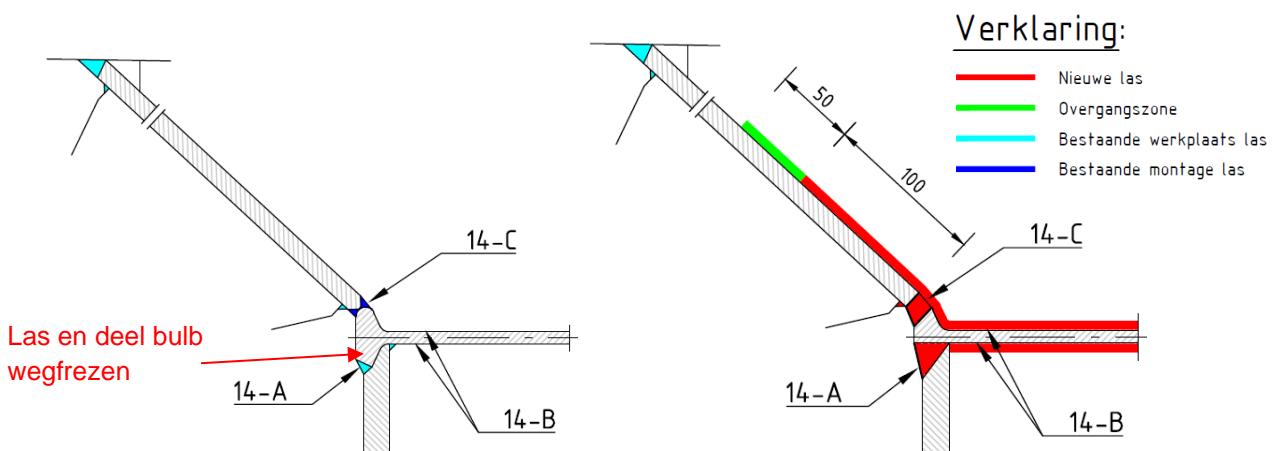
De versterking bestaat uit het vervangen van de lassen voor een ander type las, die geen laswortel meer heeft. De volgende nummering wordt aangehouden.

- Detail 14A: Lasverbinding tussen de flens van de dwarsverstijver (binnenzijde brug) met de flens van de langsverstijver (bulb)
- Detail 14B: Lasverbinding tussen het lijf van de dwarsverstijver met het lijf van de langsverstijver en lasverbinding tussen het schot en het lijf van de langsverstijver
- Detail 14C: x-las tussen flens schot en flens van de langsverstijver (bulb)
- Detail 14D: Lasverbinding tussen de flens van de dwarsverstijver (buitenzijde brug brug) met de flens van het schot

Per detail wordt in de volgende paragrafen toegelicht of en hoe het detail aangepast wordt en worden de resultaten van de vermoeiingsberekening gegeven.

### Detail 14-A: Lasverbinding flens dwarsverstijver – flens langsverstijver

De las tussen de flens van de dwarsverstijver met de flens van de langsverstijver (bulb) voldoet in de herberekening niet op de toetsing van de wortel. Ook uit de metingen is gebleken dat de spanningen te hoog zijn om te voldoen aan de schade-eis. Uit de resultaten blijkt dat de schade dusdanig hoog is, dat het noodzakelijk is een oplossing te verzinnen met een las waarbij er geen sprake meer is van een wortel. Er is gekozen om een deel van de bulb weg te freeze en te vervangen voor een volledige doorlassing, zie detail 14-A.



Figuur 31 Huidige situatie (links) en aangepaste las (rechts) ter plaatse van detail 14-A

Het detail kan beschouwd worden als een V-las, met een detailcategorie 71 conform detail 13 in tabel 8.3 van NEN-EN 1993-1-9. De las is echter excentrisch, waardoor er eigenlijk een extra spanningsconcentratiefactor meegenomen moet worden.

In de metingen is de hotspotspanning ter plaatse van de oorspronkelijke lasteen gemeten, aan de buitenzijde van de flens. In deze meting is de spanningsconcentratie dus al meegenomen. De nieuwe las (V-las) is qua geometrie iets anders als de oorspronkelijke las (niet volledige V-las  $a = 6 \text{ mm}$  plus een dichtingslas  $a = 3 \text{ mm}$ ). De nieuwe las zal, gezien de geometrie, een minder hoge spanningsconcentratiefactor hebben ten op zichte van de oorspronkelijke las. Er kan daarom voor de vermoeiingsberekening conservatief nog steeds gerekend worden met de gereduceerde invloedslijnen op basis van de verhouding tussen de gemeten spanningen en de berekende spanningen. Verder wordt aangenomen wordt dat de spannings(wisseling) in deze aansluiting niet noemenswaardig zal veranderen door de versterking van de hoofdlijper.

De detailcategorie die gebruikt mag worden voor een hotspotanalyse is over het algemeen hoger als de detailcategorie voor nominale spanningen. Er is echter in Bijlage B van NEN-EN 1993-1-9 geen detailcategorie gegeven voor de voorgestelde las. Naar alle waarschijnlijkheid zal de detailcategorie ca. 90 tot 100 zijn. Zo heeft een kruislas een detailcategorie van 100 in een hotspot-analyse. Voor de berekening is echter besloten om conservatief uit te gaan van detailcategorie 71, zoals gegeven voor nominale spanningen. Dit is dus conservatief.

De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald voor eind 2050. Uitgangspunt is dat de schade verwijderd wordt met het vervangen van de las, zodat de schade na vervangen las weer op nul begint. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

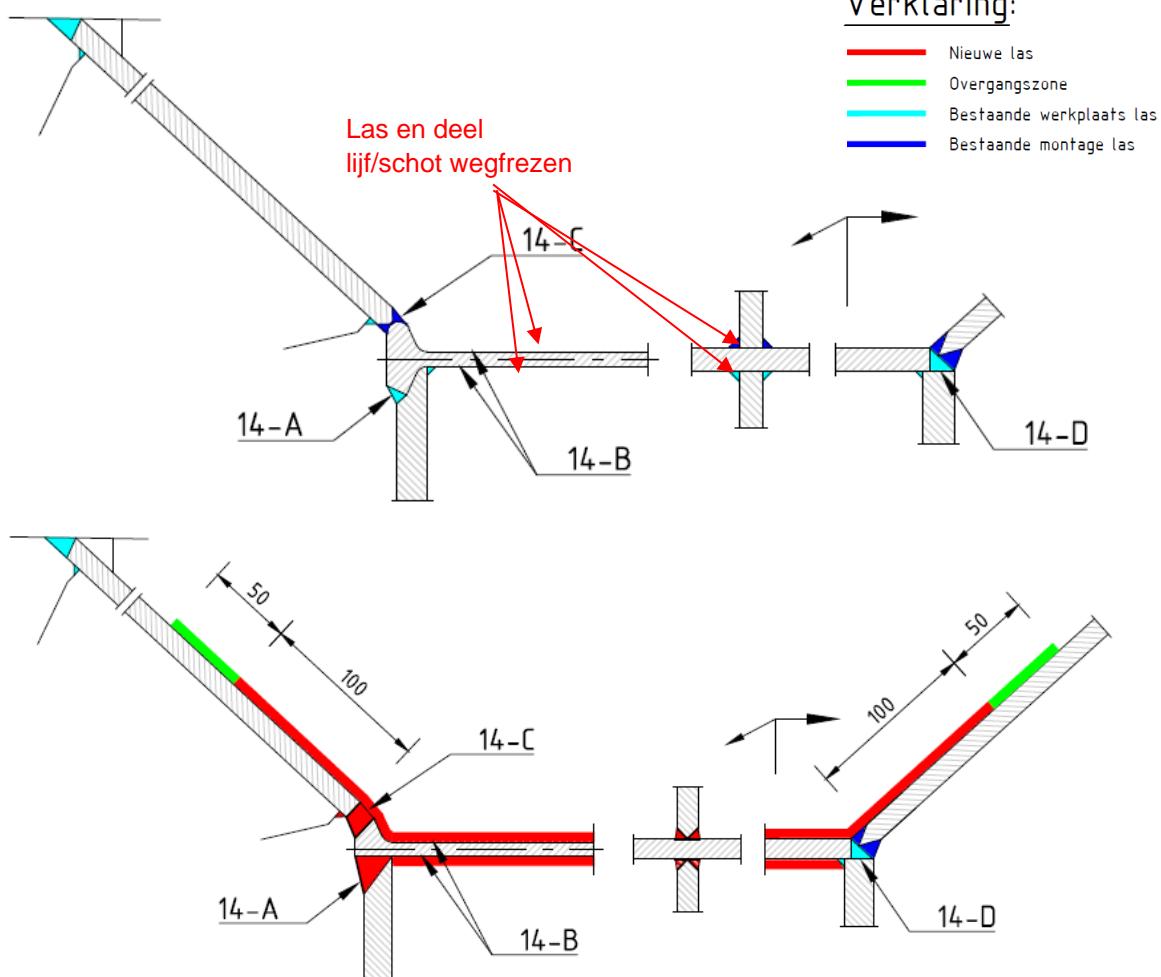
$\gamma_{Mf}$	<b>HRB west</b>	<b>HRB oost</b>	<b>PRB west</b>	<b>PRB oost</b>
	<b>2050</b>	<b>2050</b>	<b>2050</b>	<b>2050</b>
<b>1,35</b>	0,1	0,0	0,1	0,0
<b>1,15</b>	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>1</b>	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 32 Schadegetallen voor eind 2050 voor  $\frac{1}{2}$  V-las in de flens (Type 14-A)

De spanningen t.g.v. permanente belastingen waren ca. 47 N/mm<sup>2</sup> in de flens voor versterking. Tijdens het vervangen van de las zal deze spanning worden herverdeeld naar de rest van de doorsnede. Bij het vervangen van de lassen in het lijf zal een deel van deze (permanente) spanningen weer terug gaan naar de flens. Voor de vermoeiingsanalyse maakt de hoogte van de permanente spanning verder niet uit (niet relevant voor de toetsing van de teen van de las). Voor de UGT geldt dat er sprake is van een klasse 1 profiel, waardoor eventuele overschreidingen van de vloei spanning in één van de onderdelen zal resulteren in herverdeling van de spanning. De uiteindelijke capaciteit zal hetzelfde blijven. Een aanvullende UGT toetsing is daarom niet nodig.

**Detail 14-B: Lasverbinding lijf dwarsverstijver – lijf langsverstijver en schot – lijf langsverstijver**

De hoeklassen tussen het schot en het lijf van de langsverstijver (inclusief een deel aan de binnenzijde van de flens) en de las tussen het lijf van de dwarsverstijver en het lijf van de langverstijver worden vervangen door K-lassen.



Figuur 32 Huidige situatie (boven) en versterkte situatie (onder)ter plaatse van type 14-B

Het vervangen van elke las dient per zijde uitgevoerd te worden, dus eerst de ene zijde van de plaat/lijf, en pas daarna de andere zijde van de plaat/lijf. Daarbij dient de bestaande hoeklas ( $a = 5$ ) en de plaat weggefreesd te worden tot halverwege de plaat, zodanig dat deze is voorbereid voor een k-las. Hierna dient de plaat weer gelast te worden. Ten alle tijden dient er aan minimaal één zijde een las aanwezig te zijn. Na het lassen dient op de teen aan de zijde van het schot/lijf dwarsverstijver burr grinding toegepast te worden en dient een overgang gemaakt te worden naar de bestaande lassen over 50 mm.

Voor de vermoeiingsberekening is geen reductie uit de metingen meegenomen, omdat er niet is gemeten aan de lasverbinding in het lijf. Voor de toetsing is uitgegaan van detailcategorie  $\Delta\sigma_c = 80 \text{ N/mm}^2$ , op basis van detail 1 in tabel 8.5 van NEN-EN 1993-1-8 (K-las zonder spleet).

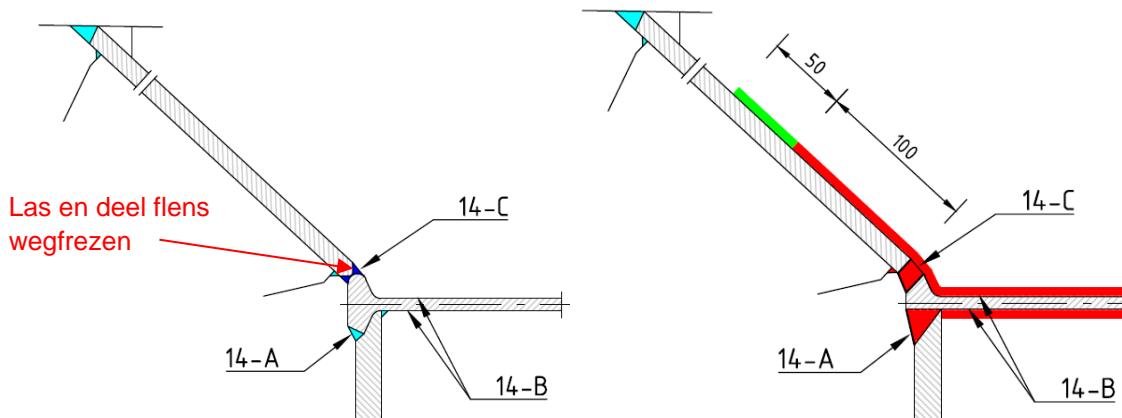
De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald voor eind 2050. Uitgangspunt is dat de schade verwijderd wordt met het vervangen van de las, zodat de schade na vervangen las weer op nul begint. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

$\gamma_{Mf}$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
	2050	2050	2050	2050
1,35	0,6	0,1	0,3	0,0
1,15	0,3	0,0	0,1	0,0
1	0,1	0,0	0,0	0,0

Tabel 33 Schadegetallen voor eind 2050 voor K-las zonder spleet (Type 14-B)

#### Detail 14-C: Lasverbinding flens schot – flens langsverstijver

Voor de X-las in de flens geldt volgens tekening dat deze niet volledig is doorgelast. Hierdoor is er dus ook aan de bovenzijde sprake van een wortel van de las. Deze zal net als de las aan de onderzijde van de bulb niet voldoen en dus vervangen moeten worden voor een volledige doorlassing. Hiervoor dient de las weggefreesd te worden en vervangen moeten worden voor een stompe las. Ter plaatse van het midden van de flens zal dit vanaf de buitenzijde moeten gebeuren, waarbij de nieuwe las tegen het lijf/schot gelast wordt. Buiten het lijf kan gekozen worden om eventueel een tegenlas te leggen.

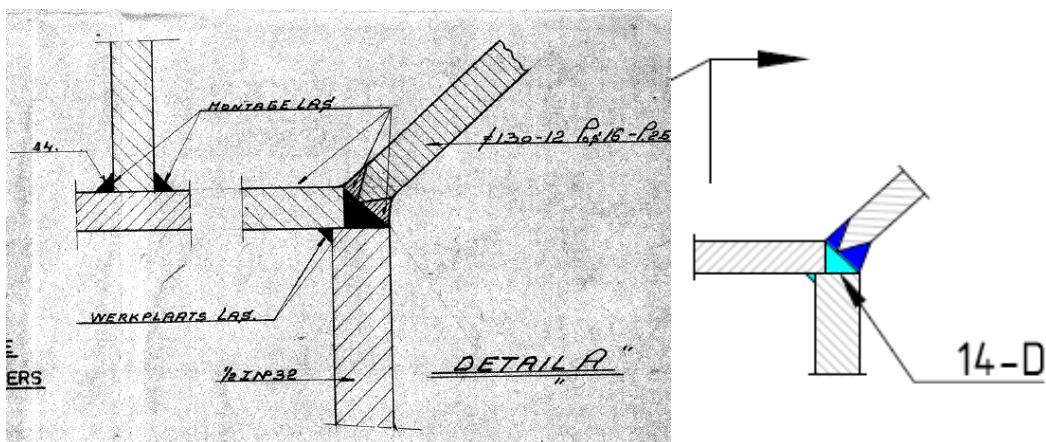


Figuur 33 Huidige situatie (links) en aangepaste las (rechts) ter plaatse van detail 14-C

Er is geen berekening uitgevoerd voor deze las, aangezien volgens de metingen de spanningen in de flens aan de bovenzijde van de bulb lager zijn als aan de onderzijde van de bulb.

### Detail 14-D: Lasverbinding flens schot buitenzijde – flens dwarsverstijver

De verbinding in de flens aan de buitenzijde voldeed in de verificatieberekening niet in de toetsing op vermoeiing van de teen van de las bij  $\gamma_{Mf} = 1,35$ .



Figuur 34 Lasverbinding flens dwarsverstijver buitenzijde

Hierbij was voor de toetsing van de teen van de las rekening gehouden met de verhouding tussen de gemeten hotspotspanningen en de berekende nominale spanningen en is getoetst op basis van detailcategorie 90 (o.b.v. detail 7 van Bijlage B van NEN-EN 1993-1-1). Hieruit volgde de volgende schadegetallen.

	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
$\gamma_{Mf}$	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,4	1,2	0,3	0,6	0,3	0,7	0,1	0,3
1,15	0,1	0,5	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1
1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0

Tabel 34 Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor teen van de las (type 14-D) o.b.v. metingen detail DDE-L (hotspot)

Voor de toetsing van de wortel van de las was rekening gehouden met de verhouding tussen de gemeten nominale spanningen en de berekende nominale spanningen en is getoetst op basis van detailcategorie 71, zoals is bepaald in overleg met TNO. Hieruit volgde de volgende schadegetallen.

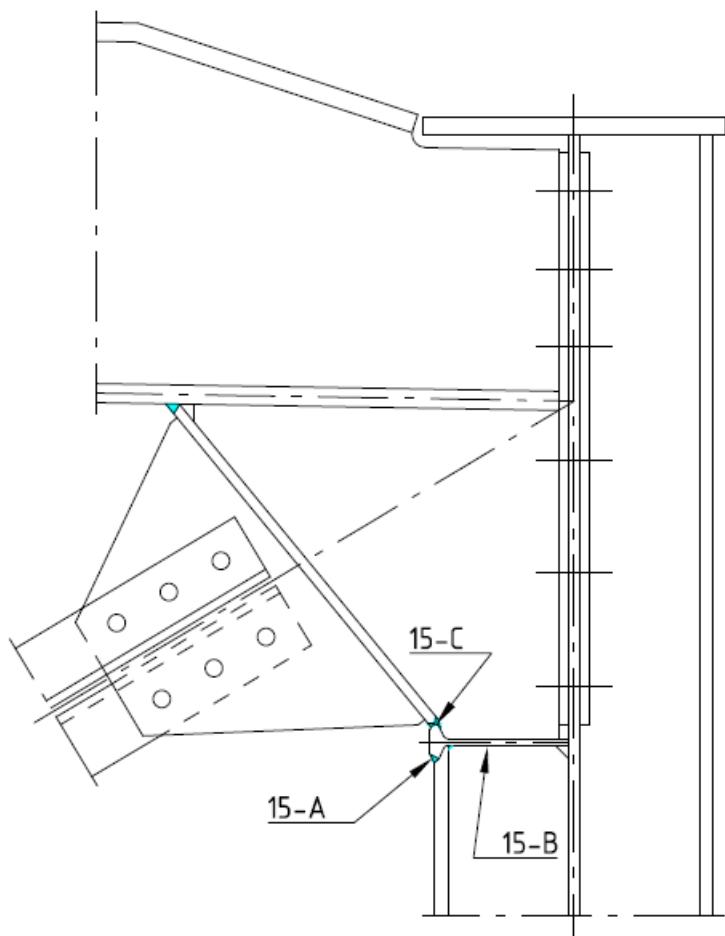
	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
$\gamma_{Mf}$	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,1	0,4	0,1	0,2	0,1	0,2	0,0	0,1
1,15	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 35 Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor wortel van de las (type 14-E) o.b.v. metingen detail DDE-L (nominaal)

Hierbij werd echter opgemerkt dat er nog geen rekening was gehouden met het lagere verkeersspectrum, zoals vastgesteld door TNO in rapport TNO-2019-R11393 [5], TNO-2019-R11394 [6] en TNO-2020-R10226 [8]. Wanneer dit in rekening zou worden gebracht, kan worden aangenomen dat de teen van de las wel voldoet op vermoeiing. Er hoeft dus aan de buitenzijde geen aanpassen aan de las doorgevoerd te worden.

## 4.10 Type 15: Verbinding dwarsverstijver – langsverstijver – schot tussensteunpunt

Ter plaatse van de tussensteunpunten is aan de binnenzijde van de hoofdligger een vergelijkbare aansluiting aanwezig tussen het schot onder de dwarsdrager, de langsverstijver en de dwarsverstijver als bij de eindopleggingen. Ook hier voldoet de aansluiting niet op vermoeiing in de herberekening. Gekozen is om hier de versterking op dezelfde wijze als bij de einddwarsdrager uit te voeren.



### Type 15: Dwarsdrager boven pijlers A, B, D en E

Figuur 35 Verbinding tussen dwarsverstijver, langsverstijver en het schot onder de dwarsdrager bij het tussensteunpunt

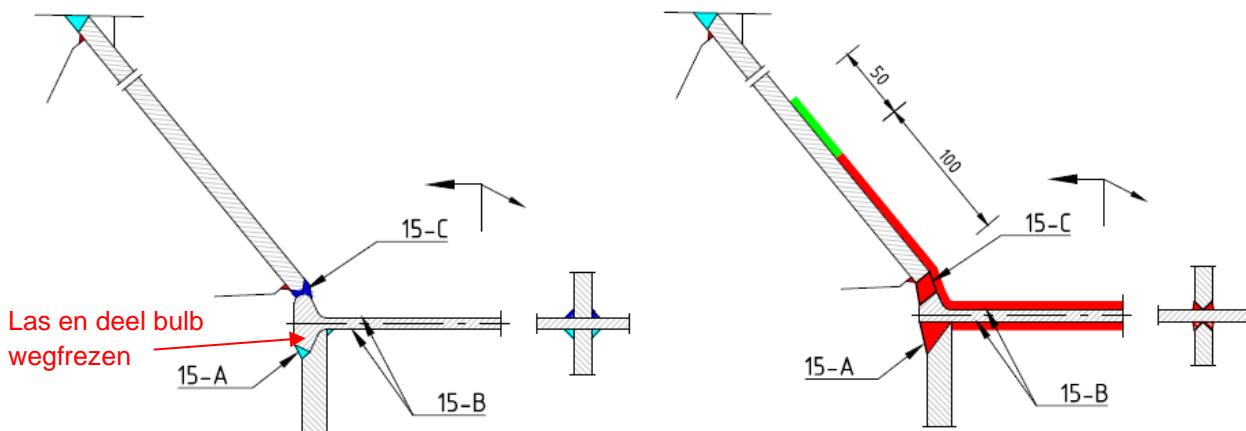
De versterking bestaat uit het vervangen van de lassen voor een ander type las, die geen laswortel meer heeft. De volgende nummering wordt aangehouden.

- Detail 15A: Lasverbinding tussen de flens van de dwarsverstijver (binnenzijde brug) met de flens van de langsverstijver (bulb)
- Detail 15B: Lasverbinding tussen het lijf van de dwarsverstijver met het lijf van de langsverstijver en lasverbinding tussen het schot en het lijf van de langsverstijver
- Detail 15C: x-las tussen flens schot en flens van de langsverstijver (bulb)

Per detail wordt in de volgende paragrafen toegelicht of en hoe het detail aangepast wordt en worden de resultaten van de vermoeiingsberekening gegeven.

**Detail 15-A: Lasverbinding flens dwarsverstijver – flens langsverstijver**

De versterking wordt op dezelfde wijze als voor type 14-A uitgevoerd, waarbij een volledige doorlassing wordt gerealiseerd met V-las, zie paragraaf 4.10.



Figuur 36 Huidige situatie (links) en aangepaste las (rechts) ter plaatse van detail 15-A

Net als bij type 14-A wordt een detailcategorie 71 conform detail 13 in tabel 8.3 van NEN-EN 1993-1-9 gehouden. Voor de spanningswisselingen wordt rekening gehouden met de gemeten hotspotspanningen, zoals beschreven in TNO rapport TNO-2019-R11393 [5], waarbij is bepaald dat de spanningen 74% van de berekende spanningen zijn. Aangenomen wordt dat de spannings(wisseling) in deze aansluiting niet noemenswaardig zal veranderen door de versterking van de hoofdlijger.

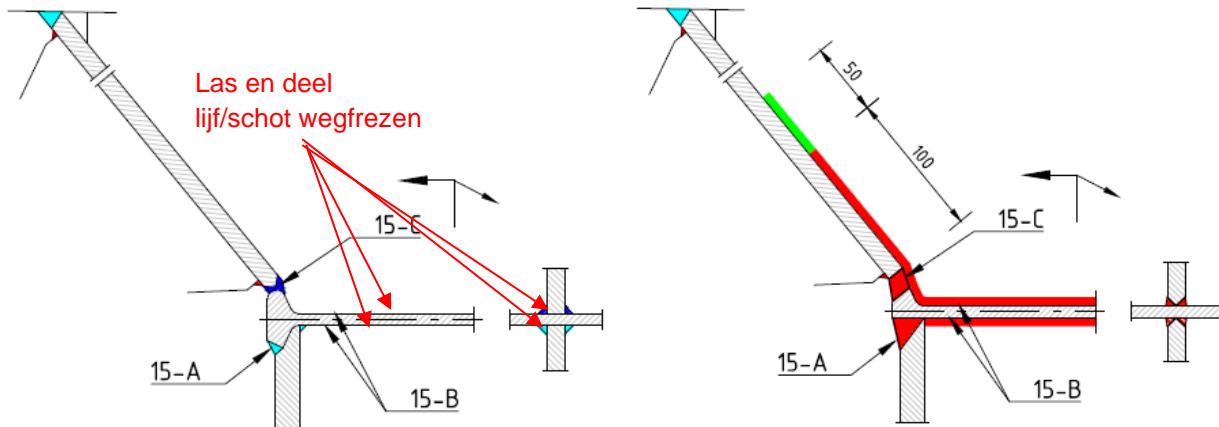
De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald voor eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

$\gamma_{Mf}$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
	2050	2050	2050	2050
1,35	0,6	0,0	0,3	0,0
1,15	0,2	0,0	0,1	0,0
1	0,1	0,0	0,1	0,0

Tabel 36 Schadegetallen voor eind 2050 voor  $\frac{1}{2}$  V-las in de flens (Type 15-A)

**Detail 15-B: Lasverbinding lijf dwarsverstijver – lijf langsverstijver en schot – lijf langsverstijver**

De hoeklassen tussen het schot en het lijf van de langsverstijver (inclusief een deel aan de binnenzijde van de flens) en de las tussen het lijf van de dwarsverstijver en het lijf van de langverstijver worden vervangen door K-lassen.



Figuur 37 Huidige situatie (links) en versterkte situatie (rechts) ter plaatse van type 15B

De wijze van vervanging is beschreven bij type 14-B, zie paragraaf 4.10.

Het vervangen van elke las dient per zijde uitgevoerd te worden, dus eerst de ene zijde van de plaat/lijf, en pas daarna de andere zijde van de plaat/lijf. Daarbij dient de bestaande hoeklas ( $a = 4$ ) en de plaat weggefreesd te worden tot halverwege de plaat, zodanig dat deze is voorbereid voor een k-las. Hierna dient de plaat weer gelast te worden. Ten alle tijden dient er aan minimaal één zijde een las aanwezig te zijn.

Na het lassen dient op de teen aan de zijde van het schot/lijf dwarsverstijver burr grinding toegepast te worden.

Voor de vermoeiingsberekening is de reductie uit de metingen niet meegenomen, omdat de meetresultaten een afwijkend beeld gaven. Uit de vermoeiingsberekening volgt dat de las niet voldoet zonder verbetering van de las. Daarom dient op de teen van de las aan de zijde van het schot en het lijf van de dwarsverstijver burr grinding te worden toegepast om de vermoeiingssterkte te verhogen. Conform IIW [9] mag worden uitgegaan van 30% verhoging van de detailcategorie. Op basis van een k-las ( $\Delta\sigma_c = 80$ ) en 30% verhoging van de detailcategorie, is de verbinding berekend op  $\Delta\sigma_c = 104 \text{ N/mm}^2$ .

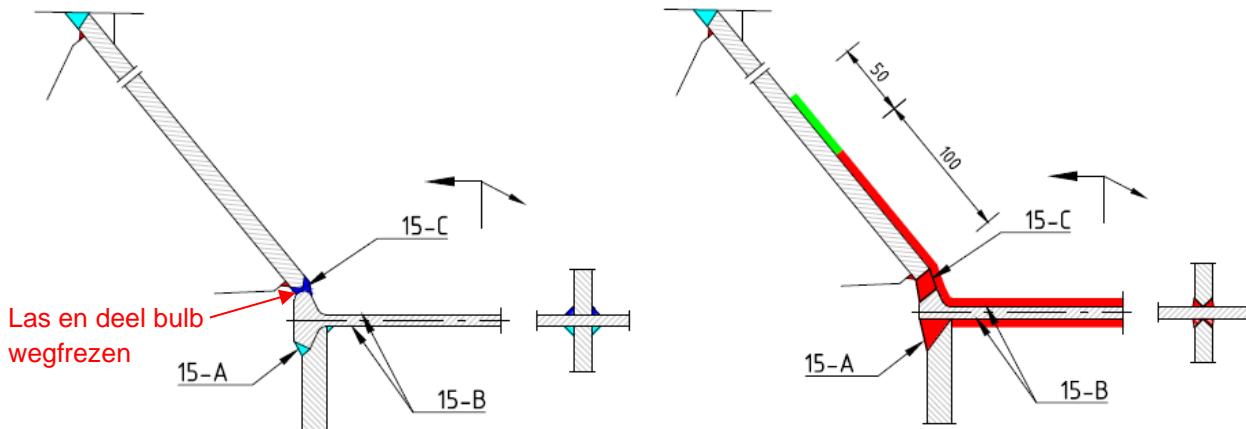
De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald voor eind 2050. Uitgangspunt is dat de schade verwijderd wordt met het vervangen van de las, zodat de schade na vervangen las weer op nul begint. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

$\gamma_{Mf}$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
	2050	2050	2050	2050
1,35	0,4	0,0	0,2	0,0
1,15	0,2	0,0	0,1	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 37 Schadegetallen voor eind 2050 voor K-las lijf (Type 15-B)

### Detail 15-C: Lasverbinding flens schot – flens langsverstijver

Voor de X-las in de flens geldt volgens tekening dat deze niet volledig is doorgelast. Hierdoor is er dus ook aan de bovenzijde sprake van een wortel van de las. Deze zal net als de las aan de onderzijde van de bulb niet voldoen en dus vervangen moeten worden voor een volledige doorlassing (stompe las). Hiervoor wordt uitgegaan van dezelfde versterking als type 14-C, zie paragraaf 4.10.



Figuur 38 Te verwijderen deel (rood weergegeven) en dicht te lassen deel bovenzijde bulb

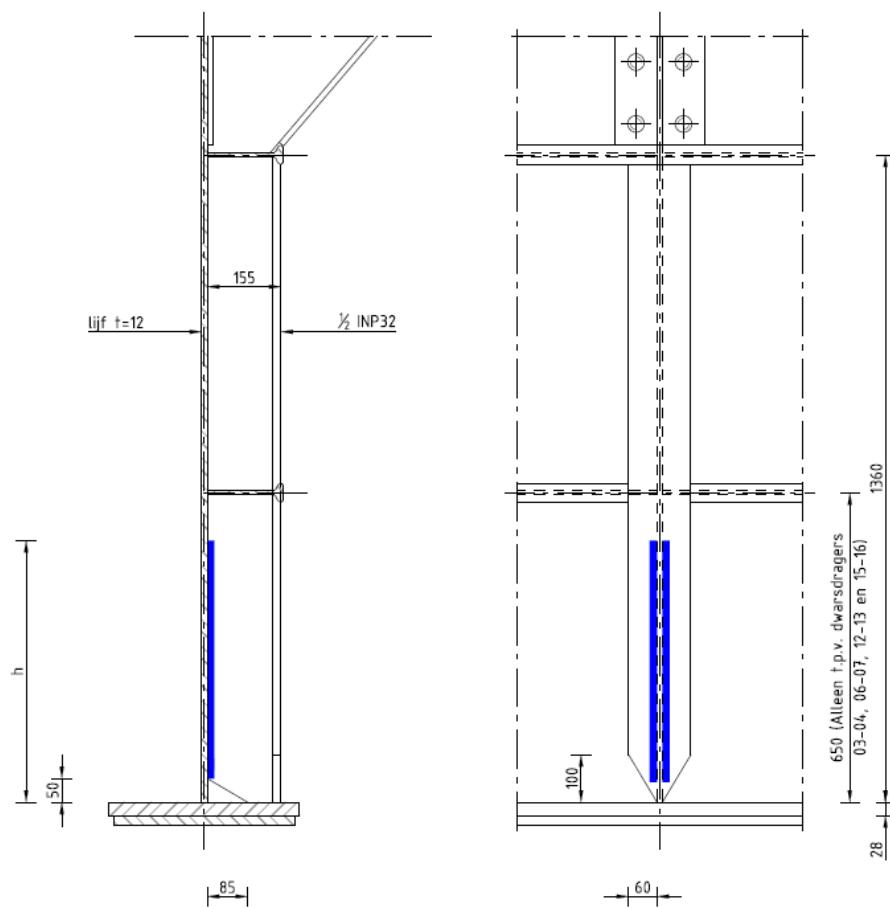
Er is geen berekening uitgevoerd voor deze las, aangezien volgens de metingen de spanningen in de flens aan de bovenzijde van de bulb lager zijn als aan de onderzijde van de bulb.

### 4.11 Type 16: Verbinding dwarsverstijver – schot overige dwarsdragers

Uit de herberekening volgde dat de (nominale) spanningswisselingen ter plaatse van de overige dwarsdragers zeer beperkt zijn. Dit zal in de versterkte situatie niet noemenswaardig veranderen. Er zal dan ook geen schade op treden bij deze aansluitingen.

## 4.12 Type 17: Verticale plooiverstijvers – las met lijf van de hoofdlijger

Voor een groot aantal verbindingen tussen het lijf van de verticale plooiverstijvers en het lijf van de hoofdlijger geldt dat deze op dit moment al niet voldoen aan de schade-eis  $D < 1,0$ . De schade zal dus eerst weggenomen moeten worden door het toepassen van burr grinding op de laststeen (blauw weergegeven). Voor de beschrijving van de volledige procedure wordt verwezen naar rapport T&P-BF7387-R011.



Figuur 39 Te versterken verbinding tussen lijf dwarsverstijvers en lijf van de hoofdlijger (blauw weergegeven).

Voor de situatie na burr grinding is in eerste instantie gerekend met de oorspronkelijke detailcategorie  $\Delta\sigma_c = 80$ , waarbij wel de schade op  $D = 0,0$  begint en gerekend mag worden met de gereduceerde spanningswisseling door het toevoegen van het T-stuk. Uit de berekeningen van type 3 volgde dat er voor de HRB west er maximaal 0,1 aan schade bij komt.

Onderstaande tabel geeft de schade eind 2018 weer. De cellen met een witte achtergrond zijn de details die in principe niet aangepakt hoeven te worden, omdat de huidige schade  $D \leq 0,8$  is en er dus maximaal 0,1 bij komt, waarmee de schade onder de  $D = 1,0$  blijft. De overigelassen (cellen met rode achtergrond) dienen wel aangepakt te worden.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2018	2018	2018	2018
17-1	0,4	0,3	0,4	0,0
17-2	0,7	0,4	0,7	0,0
17-3	1,5	0,8	1,5	0,1
17-4	1,5	0,8	1,5	0,1
17-5	1,1	0,5	1,1	0,0
17-6	1,7	0,8	1,7	0,1
17-7	0,1	0,0	0,1	0,0
17-8	0,1	0,0	0,1	0,0
17-9	0,2	0,1	0,1	0,0
17-10	1,3	0,8	1,3	0,1
17-11	2,2	1,4	2,2	0,2
17-12	2,2	1,2	2,2	0,1

Tabel 38 Schadegetallen van verbinding type 17 voor eind 2018

Om te bepalen tot welke hoogte burr grinding toegepast moet worden is gekeken op welke hoogte de huidige schade onder de  $D = 0,8$  komt. De hoogte is gemeten vanaf onderzijde van de bestaande onderflens.

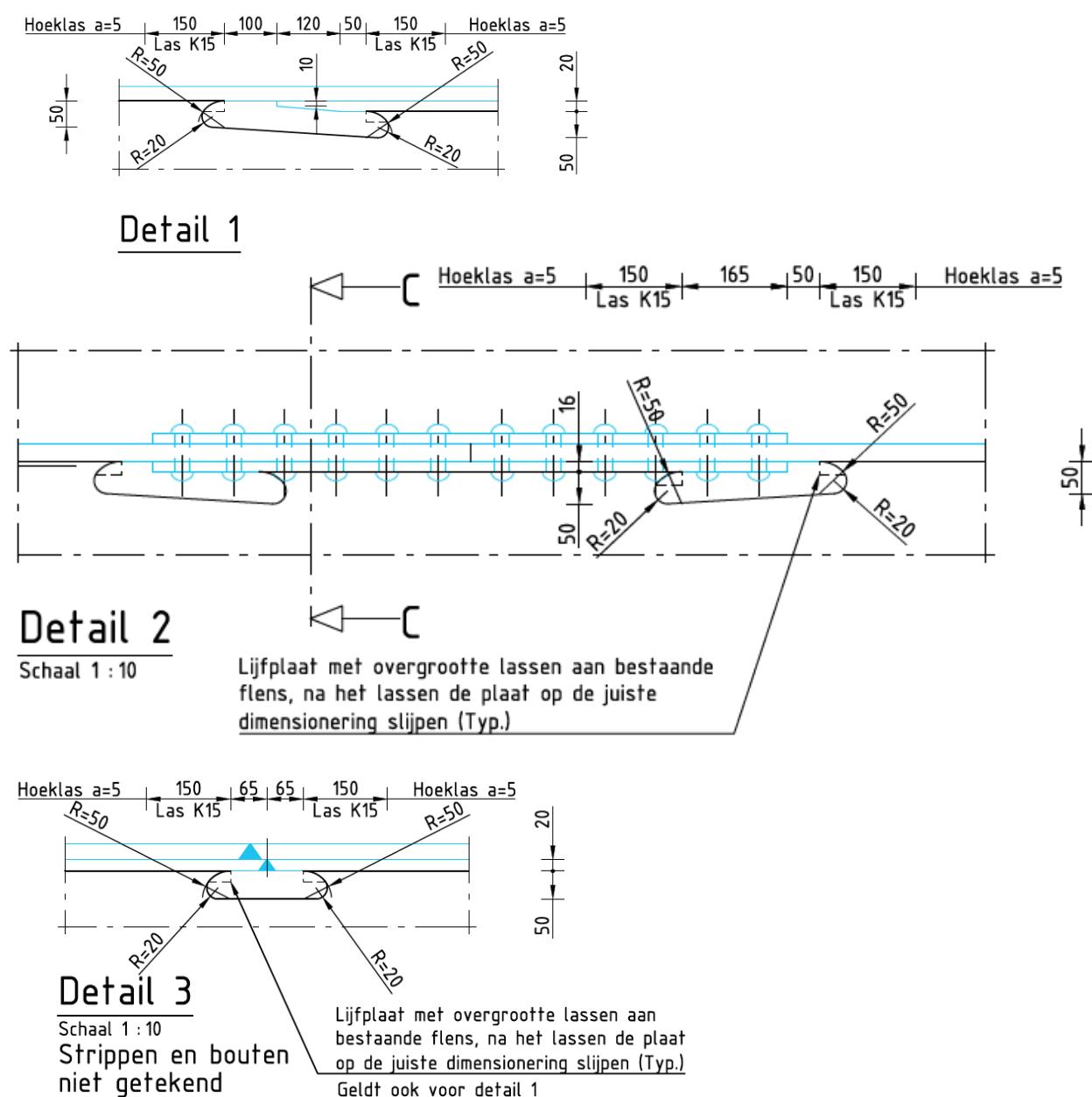
$\gamma_{Mf} = 1,35$	Hoogte v/a onderzijde	HRB west	HRB oost	PRB west
		2018	2018	2018
17-3	400	0,7		0,7
17-4	400	0,7		0,7
17-5	300	0,7		0,7
17-6	400	0,8		0,8
17-10	300	0,8		0,7
17-11	500	0,8	0,5	0,8
17-12	500	0,8	0,4	0,8

Tabel 39 Hoogte waarbij de schade  $D \leq 0,8$  van verbinding type 17 voor eind 2018

Uitgangspunt voor het burr grinden is een diepte van 1,0 mm +/- 0,5 mm aan één zijde. De lijfdikte kan hierbij dus afnemen van 12 mm tot 10,5 mm. Daar tegenover staat een verbetering van de detailcategorie ( $1,3 * 80 = 104$ ). Aangezien het detail ook voldeed bij een detailcategorie 80, zonder afname van de dikte van het lichaam ( $D < 0,1$ ), kan worden aangenomen dat dit detail ook voldoet na burr grinden. De afname van de dikte (14%) weegt ruimschoots op tegen de toename van de detailcategorie (30%).

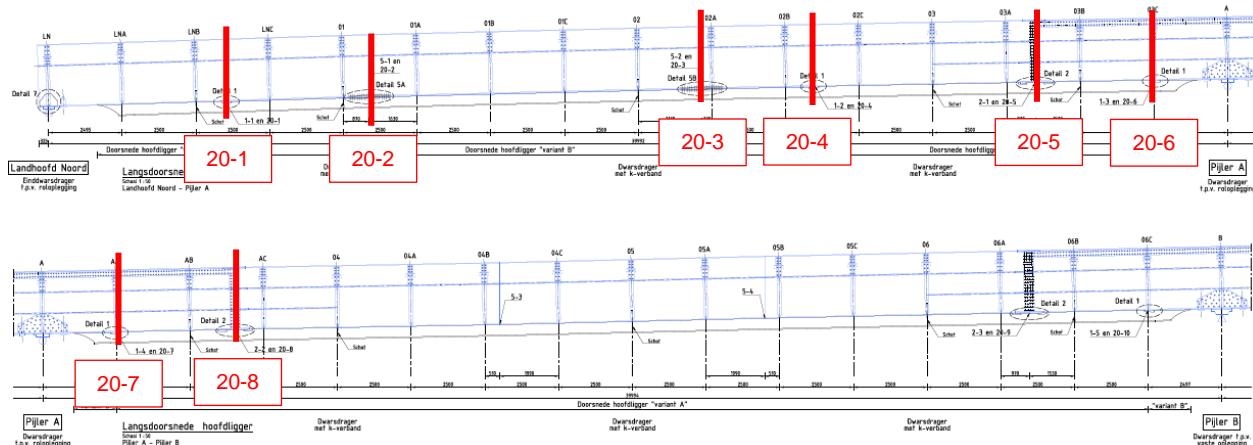
## 4.13 Type 20: Lasverbinding ter plaatse van de uitsparing in het lijf van het T-stuk

De hoofdliggers van de aanbruggen worden met een omgekeerd T-stuk versterkt om de spanningen in de onderflens van de hoofdligger te reduceren. Ter plaatse van de lassen aan de uiteinden van de opdikplaten (type 1, detail 1), de geklonken verbindingen (type 2, detail 2) en ter plaatse van de V-naden die overkluisd worden (type 5, detail 3) wordt een uitsparing aangebracht aan de bovenzijde van het lijf, omdat deze aansluiting anders lastig te realiseren is en/of om de (bestaande) verbindingen te kunnen inspecteren, zie Figuur 40.



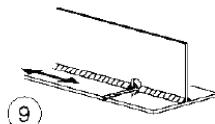
Figuur 40 Geometrie van de uitsparingen in het lijf van het T profiel

De verbinding wordt getoetst op de locaties aan het einde van de opdikplaten (20-1, 20-4, 20-6 en 20-7), ter plaatse van de sectiedelingen (20-5, 20-8) en ter plaatse van de V-naad die overkluisd worden (20-2 en 20-3) in de buitenste velden.



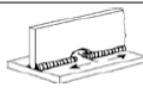
Figuur 41 Locatie van de uitsparingen in het lijf van het T profiel

Voor de uitsparingen in het lijf met hoogte kleiner dan 60 mm wordt conform NEN-EN 1993-1-9 detailcategorie 71 aangehouden, zie Figuur 42.

71		9) Stompe langslassen, hoeklassen of onderbroken lassen met een uitsparing waarvan de hoogte niet groter is dan 60 mm. Voor uitsparingen met een hoogte > 60 mm volgens detail 1) in tabel 8.4.	9) $\Delta\sigma$ gebaseerd op de normaalspanning in de flens.
----	---	--	--

Figuur 42. De detailcategorie van een uitsparing in het lijf, detail 9 Tabel 8.2 van NEN-EN 1993-1-9.

Echter, uit de literatuur blijkt dat de vermoeiingsterkte van dit soort uitsparingen beïnvloed worden door de hoogte van de schuifspanning in het lijf. Het effect van de schuifspanning in het lijf wordt in het IIW rapport "Recommendations for fatigue design of welded joints and components" [9] meegenomen voor de bepaling de detailcategorie, zie Figuur 43. De detailcategorie is daarbij afhankelijk van de verhouding tussen de schuifspanning in het lijf en normaalspanning in de onderflens.

325		Longitudinal butt weld, fillet weld or intermittent weld with cope holes (based on normal stress in flange $\sigma$ and shear stress in web $\tau$ at weld ends), cope holes not higher than 40 % of web	$\tau/\sigma = 0$ 0.0–0.2 0.2–0.3 0.3–0.4 0.4–0.5 0.5–0.6 >0.6	71 63 56 50 45 40 36	28 25 22 20 18 16 14	Analysis based on normal stress in flange and shear stress in web at weld ends Representation by formula: Steel: $FAT = 71 \cdot (1 - \Delta\tau/\Delta\sigma)$ but not lower than 36 Alum.: $FAT = 28 \cdot (1 - \Delta\tau/\Delta\sigma)$ but not lower than 14
-----	---	--	--	--	--	--

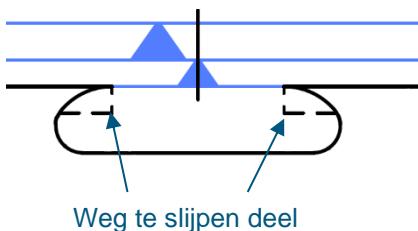
Figuur 43 Detailcategorie ter plaatse van een uitsparing als functie van de schuif- en normaalspanning [9]

De verhouding van de schuifspanning in het lijf en de normaalspanning in de (bestaande) onderflens is bepaald voor de UGT belastingen voor het maatgevende detail die het dichtst bij de oplegging ligt (20-6). Voor deze snede is de dwarskracht ca. 1200 kN, wat resulteert in een schuifspanning van ca. 42 N/mm<sup>2</sup>. De spanning in de (bestaande) onderflens is ca. 200 N/mm<sup>2</sup> in de UGT. Hiermee komt de verhouding op 0,21, wat resulteert in een detailcategorie  $\Delta\sigma_c = 56$  N/mm<sup>2</sup>. Dit is een conservatieve aanname, omdat het maximale moment in principe niet gelijktijdig optreedt met de maximale dwarskracht. Voor verbinding 20-3 en 20-4 zal de verhouding zeker onder de 0,2 liggen en is uitgegaan van  $\Delta\sigma_c = 63$  N/mm<sup>2</sup>. Met deze conservatieve aanname zijn in eerste instantie alle verbindingen doorgerekend. De toetsresultaten zijn weergegeven in Tabel 40 aangegeven.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
20-1	0,4	0,0	0,2	0,0
20-2	0,6	0,0	0,3	0,0
20-3	0,6	0,0	0,3	0,0
20-4	1,3	0,1	0,7	0,0
20-5	0,1	0,0	0,0	0,0
20-6	0,1	0,0	0,0	0,0
20-7	0,1	0,0	0,1	0,0
20-8	0,1	0,0	0,0	0,0

Tabel 40 Schadegetallen van verbinding type 20 voor eind 2050.

Verbinding 20-4 voldoet voor de westelijke ligger van de HRB niet aan de schade eis  $D \leq 1,0$ . Bovengenoemde detailcategorie is echter conservatief, omdat er geen rekening mee is gehouden dat alle poortjes met een versterkte las (volledige doorlassing) aan het einde worden uitgevoerd, vergelijkbaar met detail 3 conform tabel 8-4 van NEN-EN 1993-1-9. Hierbij moet een vloeiende overgangsronding gerealiseerd worden door voorafgaand aan het lassen de schetsplaat te bewerken en door achteraf de laszone (gestippeld weergegeven in Figuur 44 Principe afronding lijf ter plaatse van laspoortjesFiguur 44) te slijpen met een stiftfrees evenwijdig aan de richting van de overspanning zodat de volledige lasteen in dwarsrichting is verwijderd.



Figuur 44 Principe afronding lijf ter plaatse van laspoortjes

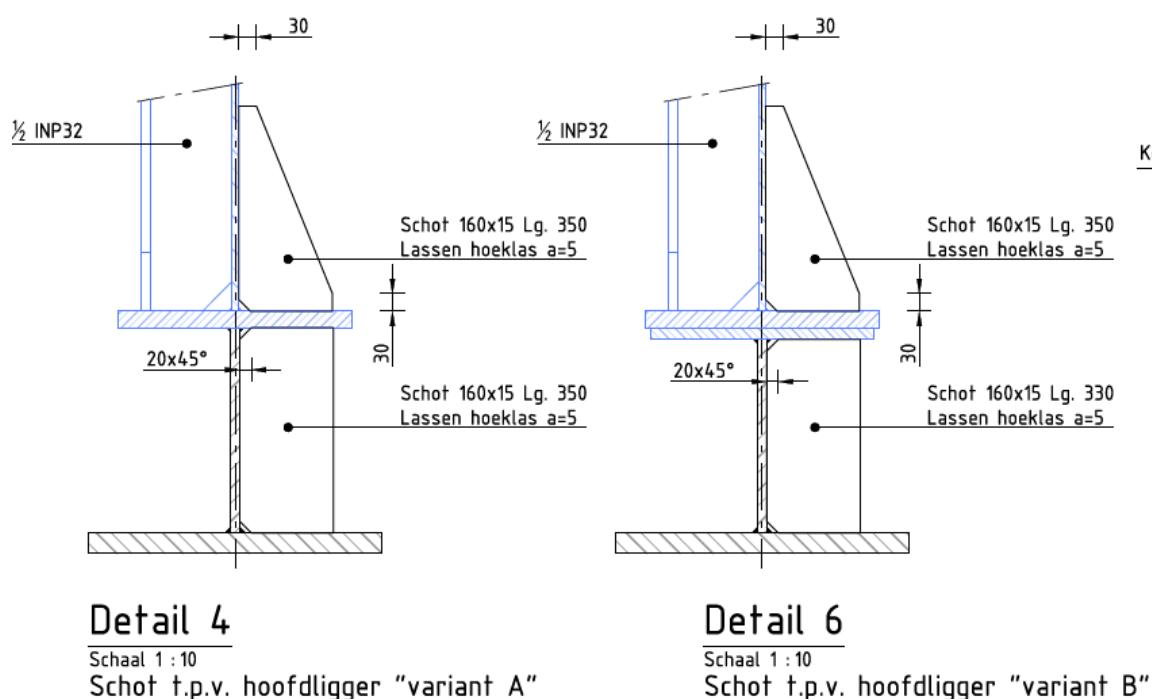
De norm geeft geen detailcategorie voor een dergelijke verbinding. Als indicatie is uitgegaan van 30% verbetering, vergelijkbaar met de verbetering bij burr grinding volgens IIW document [IW-2259-15 [9]. De detailcategorie wordt dan  $63 * 1,3 = 81,9$ . Verbinding 20-4 is daarom opnieuw getoetst met deze detailcategorie, zie Tabel 41. Hiermee voldoet het detail wel aan de vermoeiingseis.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
20-4	0,3	0,0	0,2	0,0

Tabel 41 Schadegetallen van verbinding type 20-4 voor eind 2050, DC=81,9.

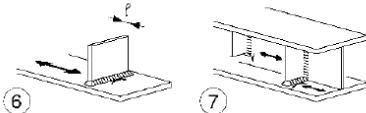
#### 4.14 Type 21: Lasverbinding schotten op onderflens van het T stuk

Uit de stabiliteitstoetsing in paragraaf 5.1.4 is gebleken dat het nodig is om een steunen toe te voegen tegen het zijdelings uitknikken van de onderflens. De schotten worden met een hoeklas aan de onderflens en lijf van het T stuk en aan onderflens van de hoofdliggers gelast, zie Figuur 45. Omdat er in het verlengde van de dwarsverstijver, aan de binnenzijde van de hoofdlijker, een verbinding onder de onderflens aanwezig is met de onderrand van het k-verband dienen de schotten aan de buitenzijde geplaatst te worden. Boven de onderflens dient ook een schot te komen om een stijve verbinding met de dwarsverstijver te creëren.



Figuur 45 Detail van de schotten in de onderflens T-stuk

De detailcategorie is aangehouden conform NEN-EN 1993-1-9, detail 7 in Tabel 8.4 en is gelijk aan DC = 80.

80	$\ell \leq 50 \text{ mm}$		<u>Aangelaste platen in de dwarsrichting:</u> 6) Gelast op een plaat. 7) Verticale verstijvingen, gelast aan een profiel of een plaatlijger. 8) Tussenschotten in gelaste kokerprofielen, gelast aan de	<u>Details 6) en 7):</u> De uiteinden van de lassen zijn zorgvuldig zijn geslepen om mogelijk aanwezige randinkartelingen te verwijderen. 7) $\Delta\sigma$ berekend met hoofdspanningen indien de
----	---------------------------	---	--	--

Figuur 46 Detailcategorie van de lasverbinding tussen de schot en onderflens.

Voor de vermoeiingsberekening is om de 5 m een toets uitgevoerd voor dit detail, zodat de exacte locatie praktisch gekozen kan worden. De locaties komen overeen met type 3. De toetsresultaten zijn in Tabel 42 weergegeven voor  $\gamma_{Mf} = 1.35$ .

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
21-1	0,0	0,0	0,0	0,0
21-2	0,2	0,0	0,1	0,0
21-3	1,5	0,0	0,7	0,0
21-4	0,5	0,0	0,2	0,0
21-5	0,3	0,0	0,2	0,0
21-6	0,2	0,0	0,1	0,0
21-7	0,0	0,0	0,0	0,0
21-8	0,2	0,0	0,1	0,0
21-9	0,0	0,0	0,0	0,0
21-10	0,2	0,0	0,1	0,0
21-11	0,4	0,0	0,2	0,0
21-12	0,4	0,0	0,2	0,0

Tabel 422 Schadegetallen van verbinding type 21 voor eind 2050, DC=80

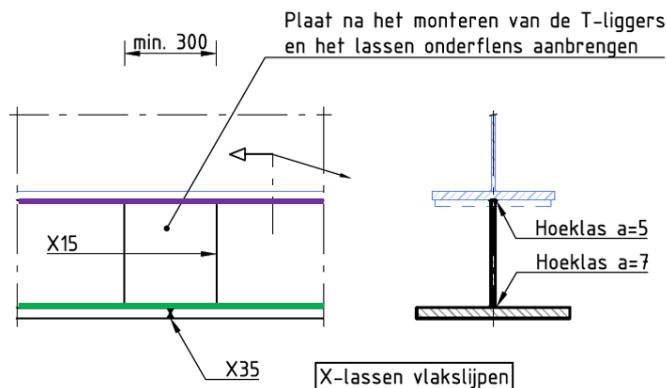
De resultaten laten zien dat alleen ter plaatse van 21-3 in de HRB west niet aan de schade eis  $D \leq 1,0$  kan worden voldaan. Indien een schot tussen ca. 13 en de 19 m vanaf de eindoplegging wordt geplaatst, dient de teen van de las met burr grinding te worden nabehandeld. Volgens IIW [9] wordt de vermoeiingsterkte van de verbinding met deze behandeling 30% verbeterd, waarmee de detailcategorie  $80 * 1,3 = 104$  wordt. De verbinding 21-3 wordt opnieuw getoetst met deze detailcategorie en voldoet aan de schade eis  $D \leq 1,0$ .

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
21-3	0,4	0,0	0,2	0,0

Tabel 43 Schade getallen van verbinding type 21-3 voor eind 2050, DC=104.

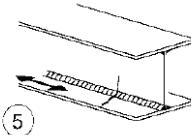
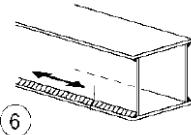
## 4.15 Type 22: Langslas tussen het lijf en de onderflens van het T stuk

Het T-stuk is samengesteld uit een lijfplaat en een onderflens. De verbinding tussen het lijf en de onderflens van het T-stuk wordt met een hoeklas  $a = 7$  gerealiseerd, zie Figuur 47 (groen weergegeven). De hoeklas met de bestaande onderflens wordt uitgevoerd als hoeklas  $a = 5$  mm (paars weergegeven), zodat de warmte-inbreng in de bestaande constructie beperkt kan blijven. De verticale lassen worden in de volgende paragraaf behandeld.



Figuur 47 Hoeklassen tussen lijf van het T-stuk en de flens.

Volgens Tabel 8.2 van NEN-EN 1993-1-9 bedraagt de detailcategorie van de langslas 100, zie Figuur 48.

100	 	5) Handmatig gelaste hoeklassen of stompe lassen. 6) Handmatig of automatisch of volledig gemechaniseerd gelaste stompe lassen, uitgevoerd aan slechts één kant, in het bijzonder bij kokerprofielen.	5), 6) Tussen flens en lijfplaten is een zeer goede passing vereist. De rand van het lijf is voldoende af te schuinen voor het behoorlijk uitvoeren van een regelmatige penetratie ter plaatse van de laswortel, zonder uitvloeden.
-----	---	--	---

Figuur 48 Detailcategorie van de langslas in het profiel, NEN-EN 1993-1-9.

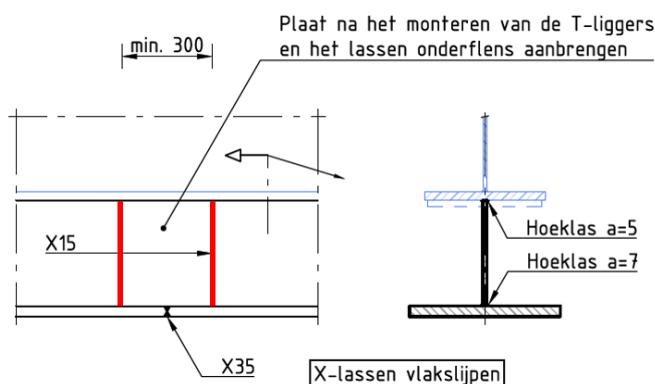
Deze hoeklas is om de 5 m op vermoeiing getoetst. De locaties komen overeen met type 3. Tabel 44 toont de resultaten van de vermoeiingsberekening. Overal wordt voldaan aan de schade-eis  $D \leq 1$ .

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
22-1	0,0	0,0	0,0	0,0
22-2	0,1	0,0	0,0	0,0
22-3	0,7	0,0	0,4	0,0
22-4	0,2	0,0	0,1	0,0
22-5	0,1	0,0	0,1	0,0
22-6	0,1	0,0	0,0	0,0
22-7	0,0	0,0	0,0	0,0
22-8	0,1	0,0	0,0	0,0
22-9	0,0	0,0	0,0	0,0
22-10	0,1	0,0	0,0	0,0
22-11	0,2	0,0	0,1	0,0
22-12	0,2	0,0	0,1	0,0

Tabel 44 Schadegetallen van verbinding type 22 voor eind 2050, DC=100.

## 4.16 Type 23: Verbinding lijf en flens T stuk – X-lassen

Het T-stuk zal in verschillende delen aangebracht moeten worden. In het versterkingsontwerp is het uitgangspunt dat de verschillende delen van het T-stuk onderling verbonden worden middels een lasverbinding, zie Figuur 49. De stompe lassen in het lijf (rood weergegeven) en in de flens (X35) worden uitgevoerd als x-lassen die vlakgeslepen worden conform NEN-EN 1993-1-9 tabel 8.3 detail 3. Hierbij is er van uit gegaan dat eerst de las in de onderflens wordt aangebracht, vervolgens wordt een rechthoekige plaat in het lijf vastgelast met de flenzen en het lijf van het T-stuk.



Figuur 49 X-naad lasverbinding tussen de sectiedelingen van het T stuk (in lijf rood weergegeven).

De detailcategorie van een X naad verbinding is in Tabel 8.3 van NEN-EN 1993-1-9 detail 3 als DC = 112 weergegeven waarbij het effect van de plaatdikte in de berekening moet worden meegenomen. Uitgaande van een flensdikte van 35 mm is de detailcategorie DC = 112\*(25/35)<sup>0,2</sup> = 105.

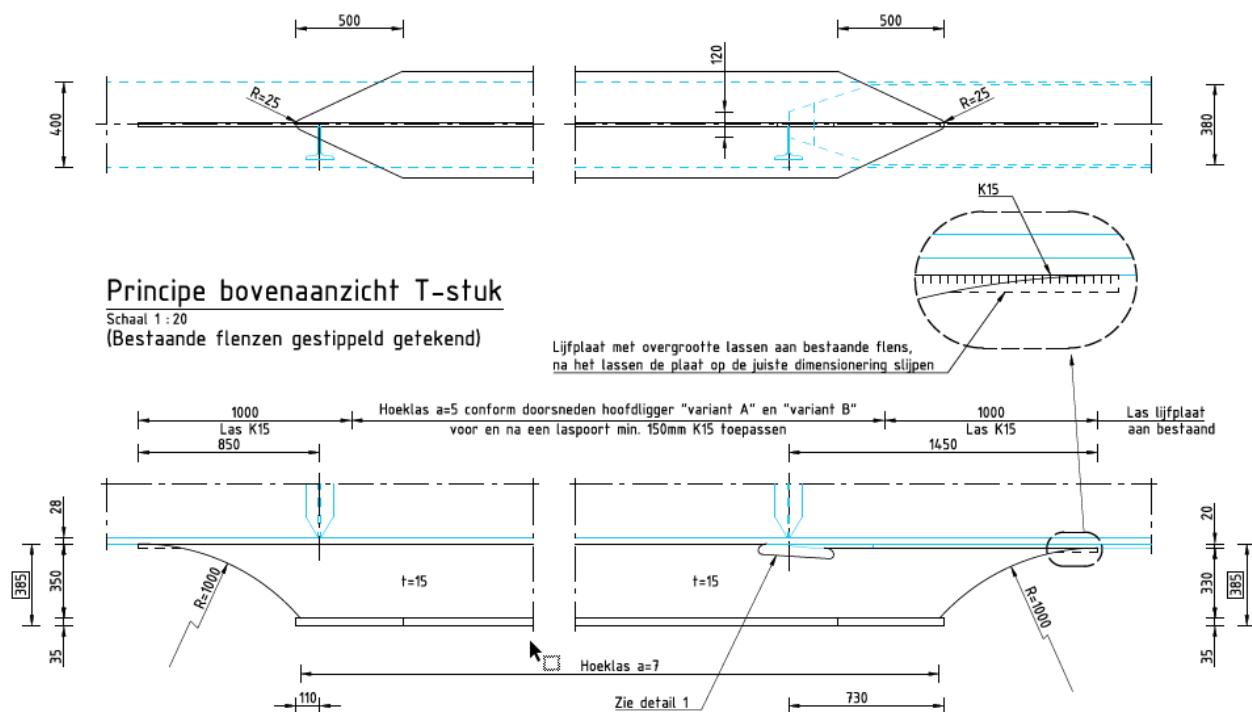
112	Invloed van de afmetingen voor $t > 25 \text{ mm}$ : $k_s = (25/t)^{0,2}$		<u>Zonder onderlegstrip:</u> 1) Stuiklassen in dwarsrichting in platen en stripren . 2) Stuiklassen in flens en lijven van plaatliggers, uitgevoerd voor het samenstellen. 3) Stompelassen van volledige doorsneden van gewalste profielen zonder uitsparingen. 4) Stuiklassen in dwarsrichting in platen of stripren, die zijn afgeschuind over de breedte of de dikte, met een helling $\leq 1/4$ .	- Allelassen zijn vlakgeslepen tot het plaatoppervlak evenwijdig aan de richting van de pijl. - Lasuitloopstukken zijn gebruikt en zijn achteraf verwijderd; de pлаatranden zijn vervolgens geslepen in de spanningsrichting. - Gelast aan beide zijden; gecontroleerd door NDO. <u>Detail 3:</u> Is uitsluitend van toepassing op stuiken van gewalste profielen, die zijn afgesneden en gelast.
-----	--	--	---	---

Figuur 50 De detailcategorie van de X-naad lasverbinding tussen de sectiedelingen van het T-stuk

De detailcategorie is hoger dan de detailcategorie die voor de langslas tussen lijf en flens (type 22) is aangehouden (DC = 100). Aangezien vermoeiing van de langslas over de gehele lengte voldeed, zal dit ook gelden voor de (vlakgeslepen) x-naad.

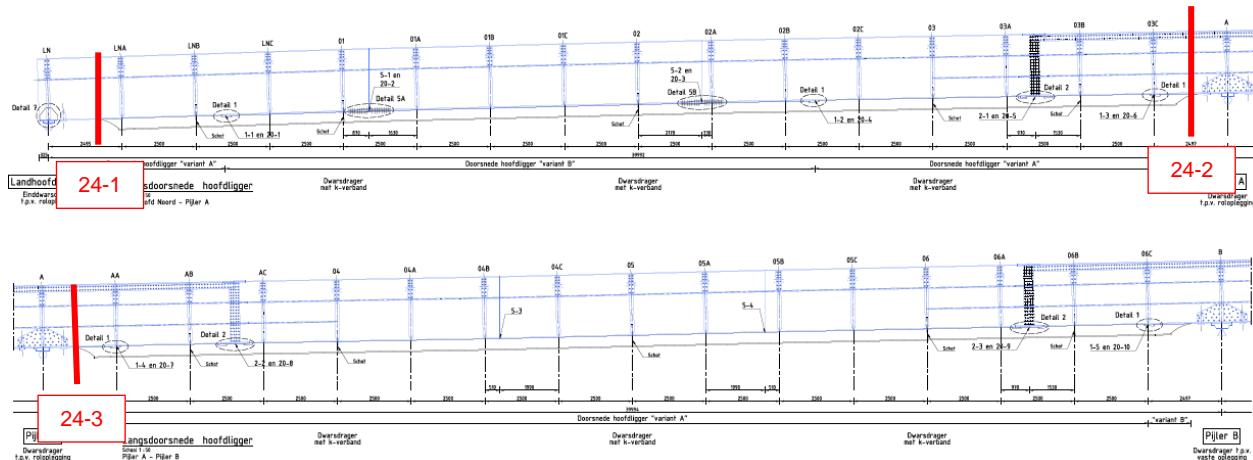
## 4.17 Type 24: Verbinding einde lijf T-stuk met bestaande onderflens

Het lijf van het T-stuk wordt beëindigd met een afgerond einde van de lijfplaat, zie Figuur 51. Daarnaast wordt de breedte van de flens afgeschuind naar het einde van de flens. Hierdoor zal in de onderflens van het T-stuk nauwelijks spanning meer aanwezig zijn bij de beëindiging van de flens, wat normaliter een ongunstig detail is voor vermoeiing. Ook aan de zijde van de bestaande onderflens is door de afronding een geleidelijke overgang gecreëerd, wat vermoeiingstechnisch gunstiger is. De hoeklas tussen lijf T-stuk en de bestaande onderflens wordt over het laatste deel uitgevoerd als k-las in plaats van twee hoeklassen. Hierbij dient de afronding naar het lijf te worden vlakgeslepen in een vloeiende overgang, zie ook rapport T&P-BF7387-R011. Het detail van de beëindiging van de lijfplaat van het T-stuk op de bestaande onderflens wordt op vermoeiing getoetst.



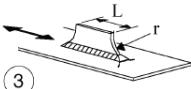
Figuur 51 Aansluiting einde van de lijfplaat van het T-stuk met de onderflens van de hoofdligger.

Deze verbinding komt op 6 locaties voor per hoofdlijn. Vanwege symmetrie zijn de eerste drie locaties getoetst.



Figuur 52 Getoetste locaties type 24.

Voor deze verbinding wordt detailcategorie 80 volgens Tabel 8.4 (detail 3) van NEN-EN 1993-1-9 aangehouden, zie Figuur 53.

80	$r > 150 \text{ mm}$	  versterkt	3) In de lengterichting door hoeklassen aangelaste schetsplaten met een overgangsronding naar de plaat of de buis; het einde van de hoeklas is versterkt (volledige doorlassing); de lengte van de versterkte las is $> r$ .	<b>Details 3 en 4):</b> Vloeiente overgangsronding met straal $r$ , door voorafgaand aan het lassen de schetsplaat te bewerken of te branden en door achteraf de laszone te slijpen evenwijdig aan de richting van de pijl zodat de volledige laststeen in dwarsrichting is verwijderd.
----	----------------------	--	--	--

Figuur 53 Detailcategorie voor verbinding type 24, NEN-EN 1993-1-9.

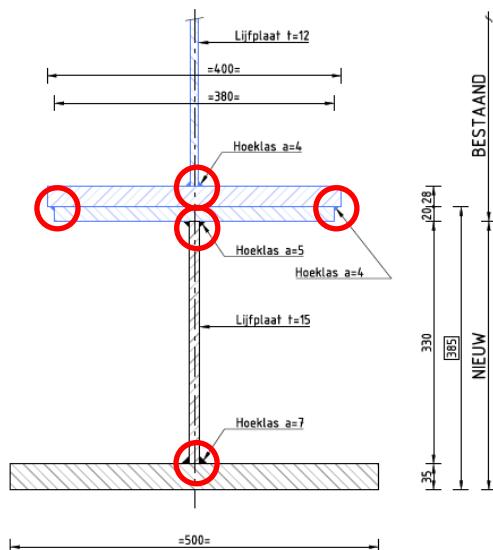
De toetsresultaten zijn weergegeven in Tabel 45 voor eind 2050 bij  $\gamma_{MF} = 1.35$ . Alle verbindingen voldoen aan de schade-eis  $D \leq 1,0$ .

$\gamma_{MF} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
24-1	0,1	0,0	0,0	0,0
24-2	0,1	0,0	0,1	0,0
24-3	0,2	0,0	0,1	0,0

Tabel 45 Schadegetallen van verbinding type 24 voor eind 2050, DC=80.

## 4.18 Type 25: Schuifspanning lassen einde lijf T-stuk

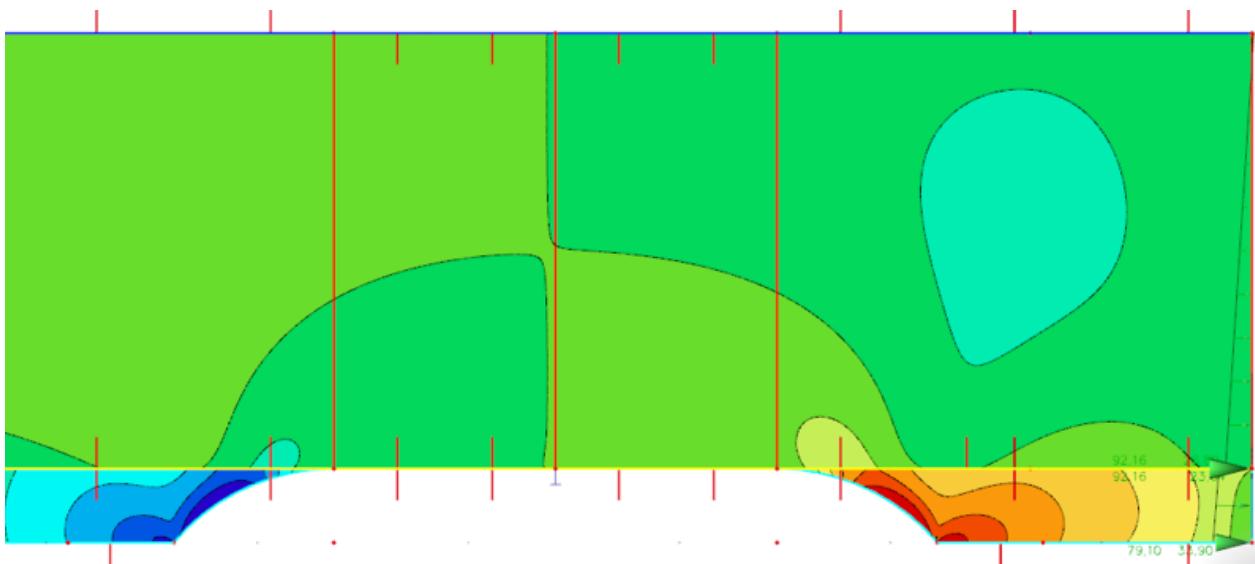
Naast de toetsing op normaalspanning dienen ook de flanklassen getoetst te worden op vermoeiing door schuifspanningswisselingen in de las. Door het toevoegen van het T-stuk zal er meer schuifspanning door de bestaande lassen gaan, met name aan het einde van het T-stuk. Ook de nieuwe lassen worden op schuifspanning belast.



Figuur 54 Hoeklas tussen onderflens en lijf en tussen opdikplaat en onderflens

De schuifspanning zal met name aan het einde van het T-stuk, ter plaatse van het tussensteunpunt, het grootst zijn omdat hier de spanning in het T-stuk overgedragen moet worden naar de onderflens en het lijf van de bestaande hoofdlijger. Met behulp van een plaatmodel is gekeken wat de schuifspanningen zijn ter plaatse van de verschillende lassen. Aan de rechterzijde van het plaatmodel is de normaalspanning in de hoofdlijger ten gevolge van de eenheidslast ( $2 \times 50 \text{ kN}$ ) geplaatst, om een vertaling te maken van de normaalspanning in het globale rekenmodel naar de schuifspanning ter plaatse van de lassen.

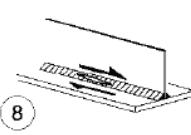
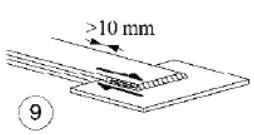
De schuifspanningen ( $\tau_{xy}$ ) aan het einde van het t-stuk zijn in onderstaand figuur weergegeven.



Figuur 55 Schuifspanningen aan het einde van het T-stuk.

Te zien is dat met name aan de onderzijde van het lijf van het T-stuk de grootste schuifspanningspiek optreedt. Ter plaatse van de bestaande lassen zijn de schuifspanningen een stuk kleiner, maar is ook de keeldoorsnede van delassen kleiner. De schuifspanningen zijn vertaald naar de schuifspanning in de las met de formule  $\tau_2 = \tau_{xy} * t_w / 2a$ . De schuifspanning in de las zelf blijft het grootst ter plaatse van de lasverbinding aan de onderzijde van het T-stuk, ondanks de grotere keeldoorsnede.

De detailcategorie van deze verbinding is aangehouden conform detail 8 in tabel 8.5 van NEN-EN 1993-1-9 als DC = 80 met  $m_1 = 5$ .

80 $m = 5$	 	8) Ononderbroken hoeklassen die een schuifstroom overdragen, zoals delassen tussen de flenzen en de lijfplaat in plaatliggers.  9) Met hoeklassen gelaste overlachte verbinding.	8) $\Delta\tau$ te berekenen in de keeldoorsnede van de las.  9) $\Delta\tau$ te berekenen in de keeldoorsnede van de las, waarbij de totale lengte van de las wordt beschouwd. Delassen eindigen op meer dan 10 mm van de plaatrand, volgens 4) en 5) hierboven.
---------------	---	--	---

Figuur 56 Detailcategorie van de lasverbinding tussen de lijf en onderflens

De berekening is in eerste instantie voor de periode 2018-2050 uitgevoerd. Hieruit volgt dat er nagenoeg geen vermoeiingsschade optreedt. De locaties komen overeen met type 24.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west	HRB oost	PRB west	PRB oost
Jaar	2050	2050	2050	2050
25-2	0,0	0,0	0,0	0,0
25-3	0,1	0,0	0,0	0,0

Tabel 46 Schadegetallen van verbinding type 25 voor 2018-2050, DC=80.

Voor de bestaande lassen in de periode voor 2018 geldt dat er sprake is van een onversterkte doorsnede zonder T-stuk. De schuifspanning zal in deze periode dus kleiner geweest zijn. Voor de periode voor 2018 kan worden aangenomen dat er geen schade zal zijn opgetreden.

## 5 Sterkte en stabiliteit

### 5.1 Hoofdlijker

#### 5.1.1 Berekeningsaanpak

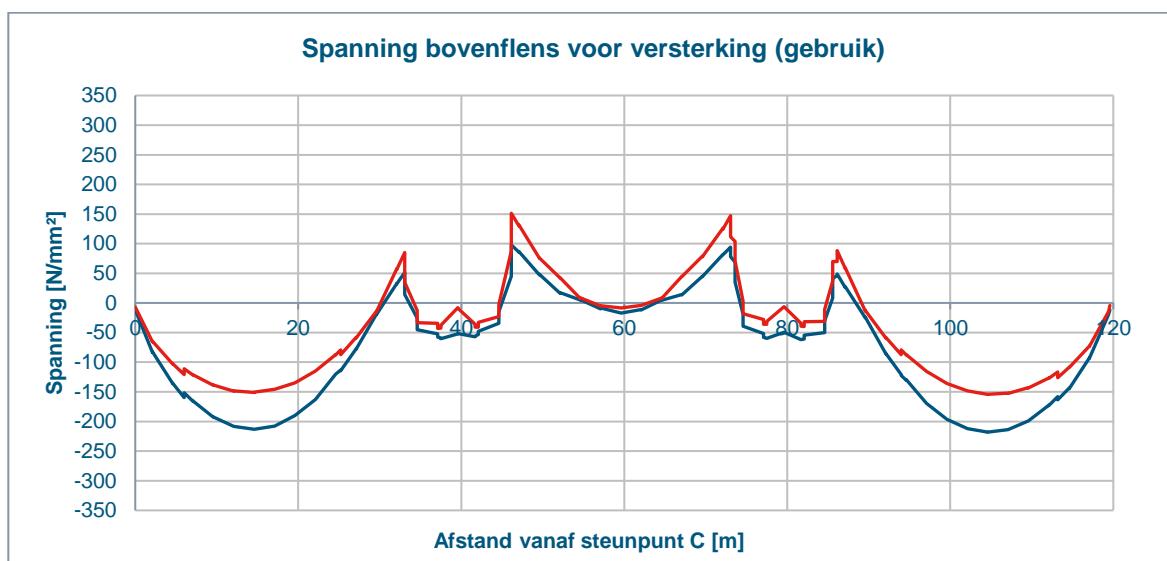
De hoofdlijker wordt over vrijwel de gehele lengte versterkt met een T-stuk onder de bestaande onderflens. Hierdoor zullen de spanningen over het algemeen afnemen. Er is daarom een vergelijking gemaakt tussen de spanningen voor versterking en na versterking. Hierbij wordt zowel de bestaande onderflens beschouwd, als de nieuwe onderflens, omdat het uitgangspunt voor de berekening is dat deze laatste alleen de variabele belastingen op zal nemen.

In de bepaling van de spanningen worden, net als in de herberekening, de momenten om de zwakke as verwaarloosd, omdat deze niet op de juiste wijze door het eindige elementen model bepaald kunnen worden en uit het lokale model is gebleken dat deze relatief klein zijn (ca. 4 N/mm<sup>2</sup> voor een tandemstelsel van 600 kN). Voor de onderbouwing wordt verwezen naar de verificatieberekening van de bestaande situatie [T&P-BF7387-R005].

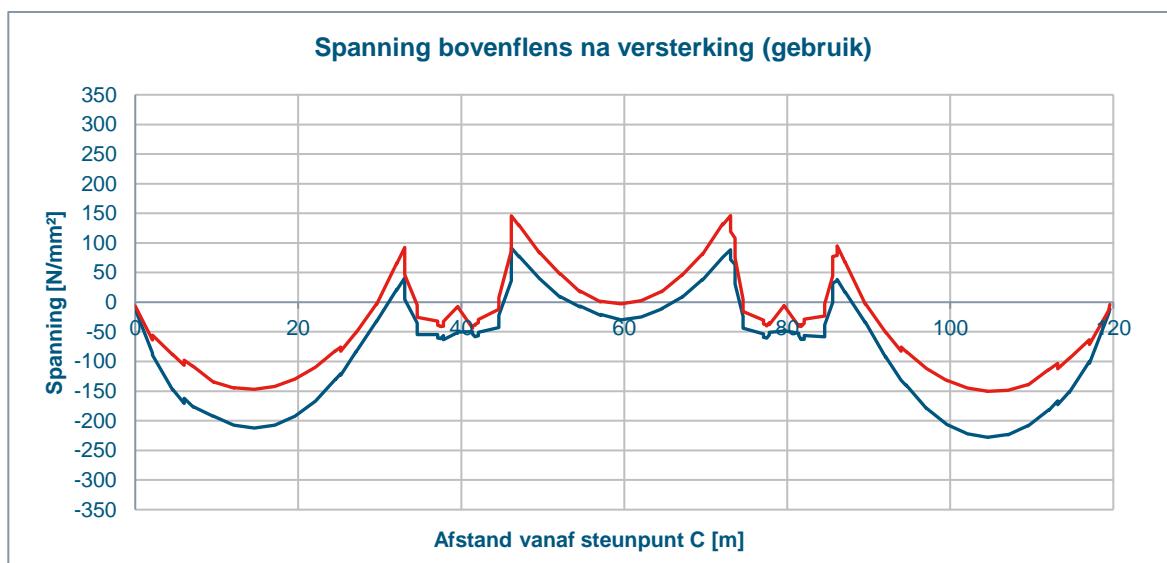
Opgemerkt wordt dat, vanwege symmetrie, de tandemstelsels alleen op de tweede helft van de brug plus het eerste tussensteunpunt zijn toegepast, om rekentijd te besparen. De spanningen in de eerste helft van de brug moeten dus gelijk genomen worden aan de tweede helft.

### 5.1.2 Resultaten

In onderstaande figuren zijn de spanning in de bovenflens ten gevolge van de normaalkracht ( $N_{Ed}$ ) plus het moment om de sterkte as ( $M_{y,Ed}$ ) weergegeven over de lengte van de brug, inclusief de voorspanning bij het tussensteunpunt. In het bovenste figuur de oorspronkelijk spanningsverdeling voor versterking gegeven, in het onderste figuur de spanning na versterking. De spanningen zijn gegeven op gebruiksniveau, waarbij de rode lijn overeenkomt met de maximale spanningen en de blauwe lijn met de minimale spanningen.



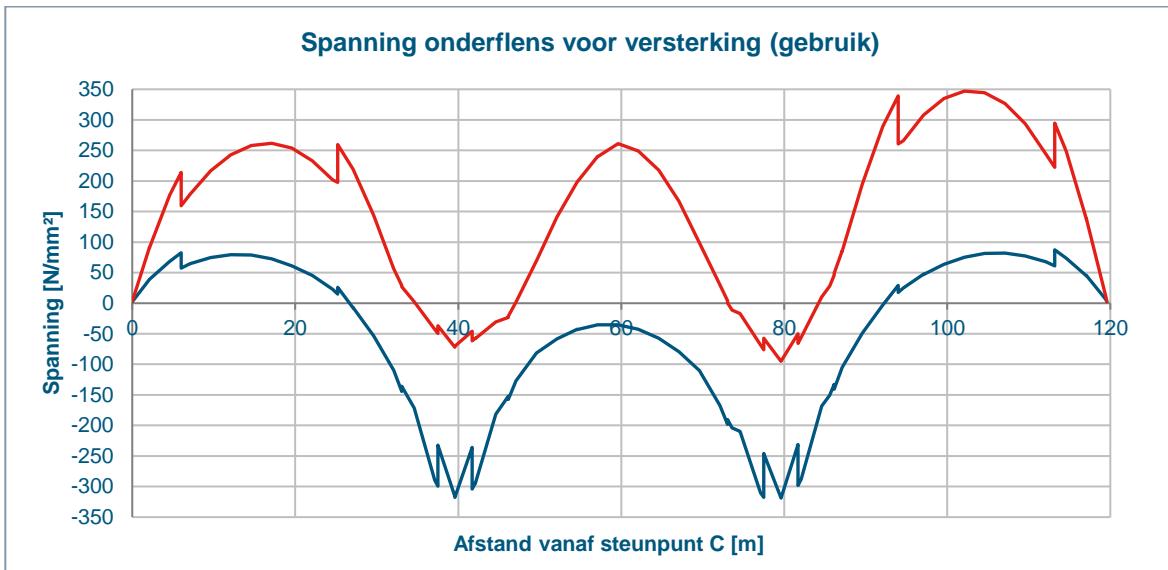
Figuur 57 Spanningen in de bovenflens van de hoofdlijger voor versterking t.g.v.  $N_{Ed} + M_{y,Ed}$  (gebruik)



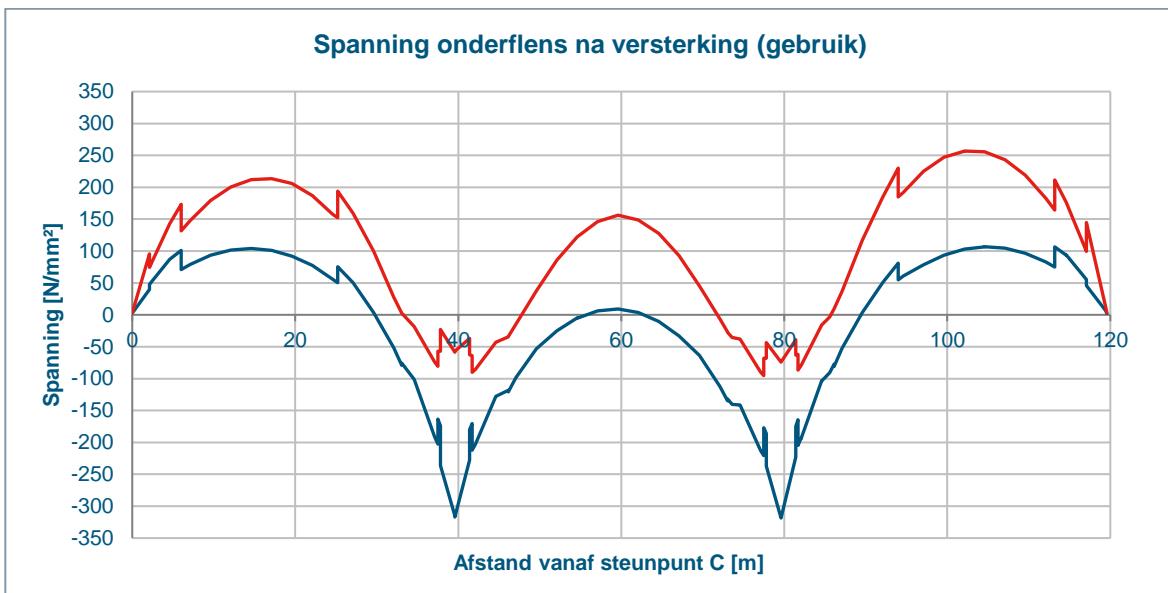
Figuur 58 Spanningen in de bovenflens van de hoofdlijger na versterking t.g.v.  $N_{Ed} + M_{y,Ed}$  (gebruik)

Te zien is dat de spanningen in de bovenflens nagenoeg gelijk blijven. Dit valt te verklaren doordat enerzijds de buigtraagheid van de hoofdlijger toe is genomen (voor de veranderlijke belastingen), maar anderzijds zal het zwaartepunt van de versterkte doorsnede naar beneden schuiven. Per saldo veranderd de spanning maar weinig.

De spanningen in de oorspronkelijke onderflens zijn in onderstaande figuren weergegeven, ook weer voor de situatie voor en na versterking. Ook hier zijn de spanningen op gebruiksniveau weergegeven.



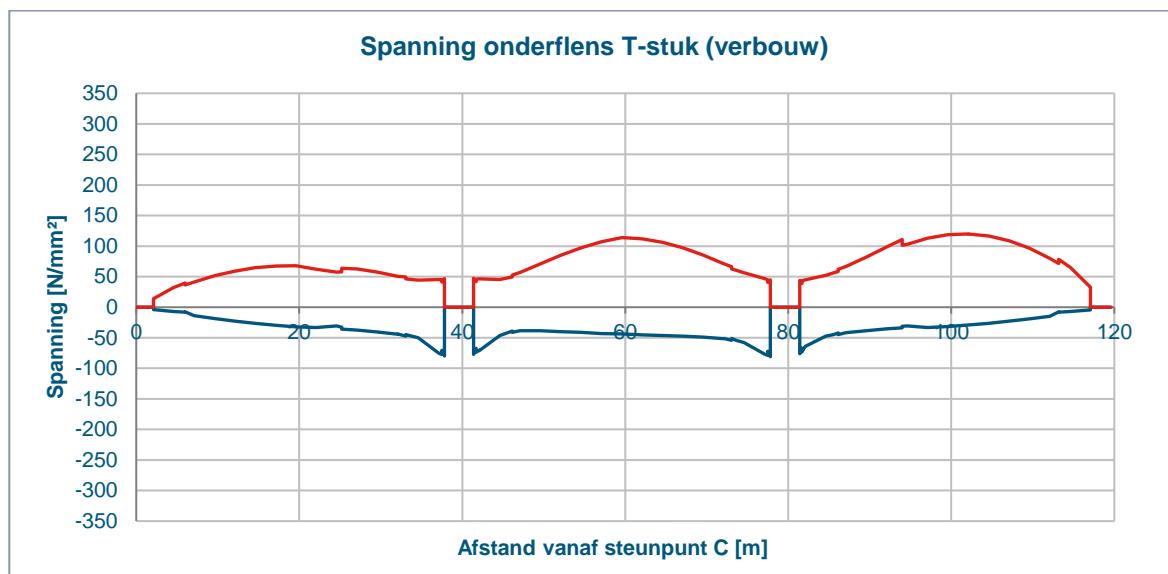
Figuur 59 Spanningen in de onderflens van de hoofdlijger voor versterking t.g.v.  $N_{Ed} + M_{y,Ed}$  (gebruik)



Figuur 60 Spanningen in de oorspronkelijke onderflens van de hoofdlijger na versterking t.g.v.  $N_{Ed} + M_{y,Ed}$  (gebruik)

Voor de oorspronkelijke onderflens is te zien dat de spanningen in het veld met ca. 100 N/mm<sup>2</sup> af zijn genomen in veld 2 en 3. Ter plaatse van het tussensteunpunt is te zien dat de spanning gelijk blijft, omdat dit deel niet versterkt is. Wel is de spanning in de eerstvolgende piek aan het einde van de opdikplaat afgangen, omdat de versterking tot voorbij dit punt is getrokken. Alle spanningen blijven in de nieuwe situatie ruim onder de vloeistressing ( $f_y = 350$  N/mm<sup>2</sup>). De grootste spanning wordt gevonden bij het (niet versterkte) tussensteunpunt en is gelijk aan 318 N/mm<sup>2</sup>.

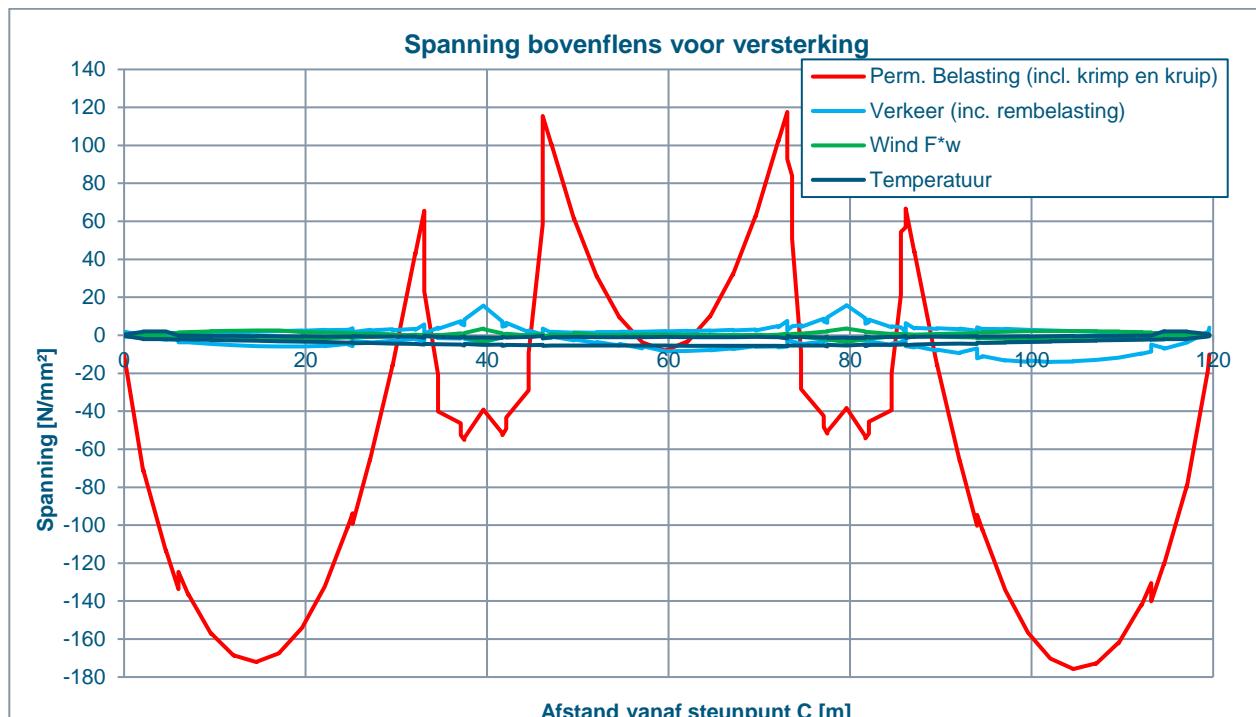
De spanning in de nieuwe onderflens is weergegeven in onderstaand figuur. Hiervoor is uitgegaan van de spanningen op verbouwniveau, omdat dit een nieuw onderdeel betreft.



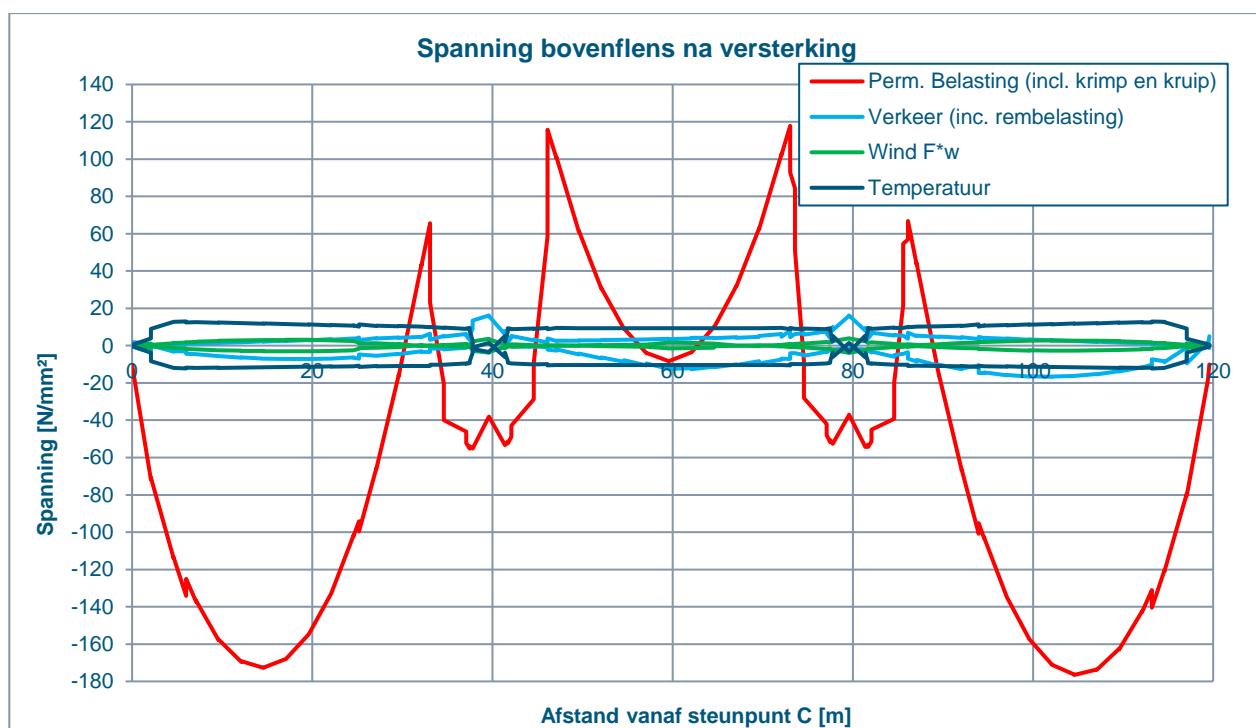
Figuur 61 Spanningen in de nieuwe onderflens (T-stuk) van de hoofdlijger na versterking t.g.v.  $N_{Ed} + M_{y,Ed}$  (verbouw)

De spanningen in de nieuwe onderflens zijn maximaal 120 N/mm<sup>2</sup>, waarmee ze ruim onder de vloeistressing ( $f_y = 355$  N/mm<sup>2</sup>) blijven. De ruime marge valt te verklaren doordat het T-stuk alleen de variabele belasting zal opnemen en het ontwerp niet zozeer voor de sterkte nodig was, maar meer voor de verlaging van de spanningen in de oorspronkelijke onderflens voor vermoeiing.

In onderstaande figuren is de spanning in de bovenflens van de stalen ligger van de individuele belastingcomponenten weergegeven over de lengte van de aanbrug (zonder belastingfactor). Het bovenste figuur geeft de spanningen voor de niet-versterkte situatie, het onderste voor de situatie na versterking.

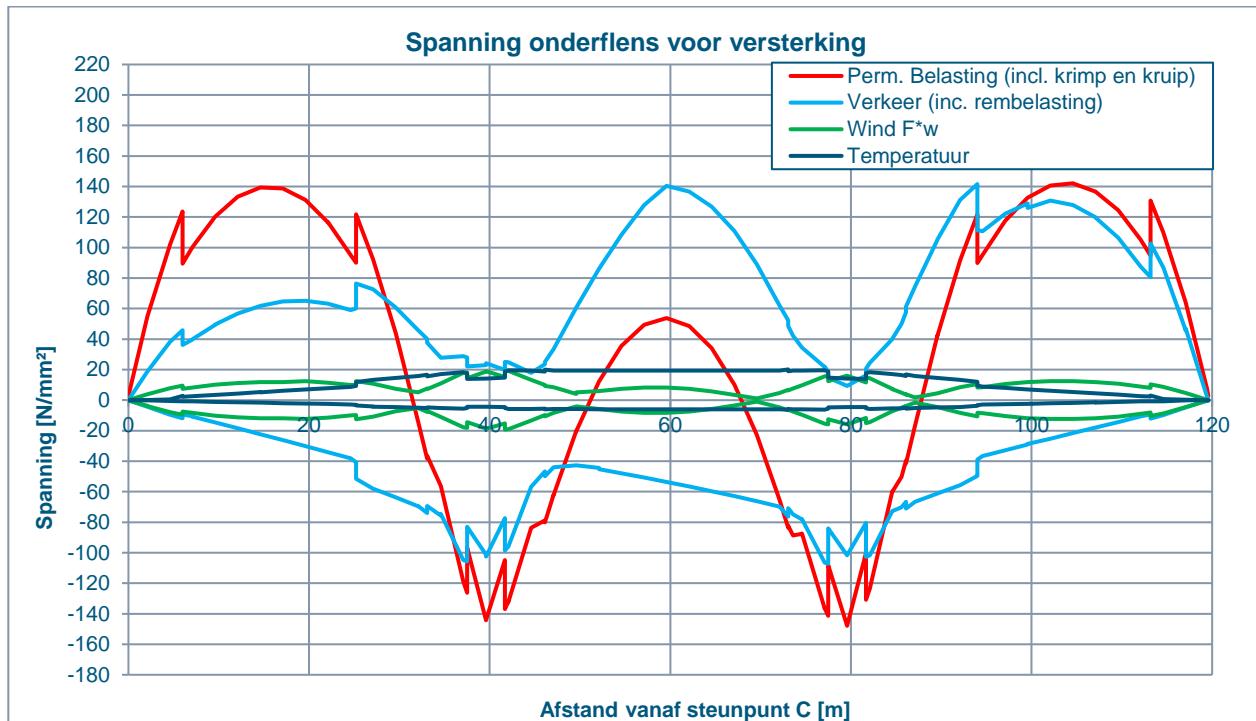


Figuur 62 Spanningen in de bovenflens van de hoofdliggers voor versterking t.g.v.  $N + M_y$  (per belastingsgroep)

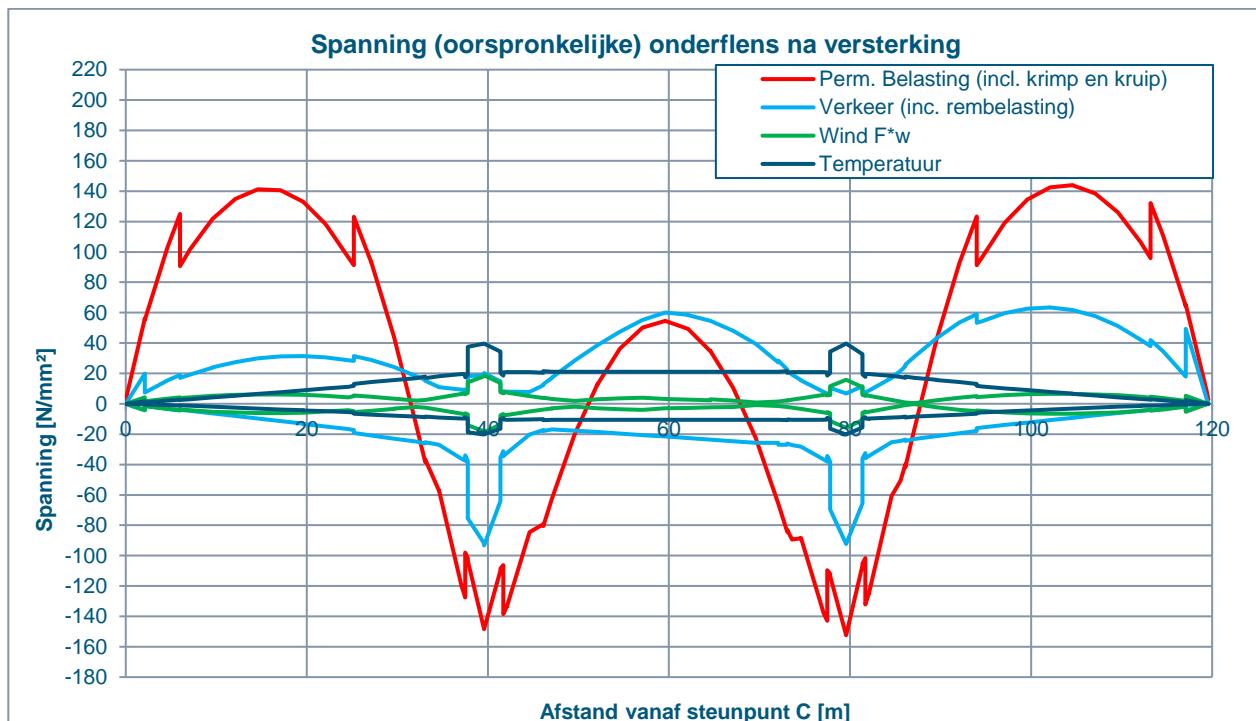


Figuur 63 Spanningen in de bovenflens van de hoofdliggers na versterking t.g.v.  $N + M_y$  (per belastingsgroep)

In onderstaande figuren is op vergelijkbare wijze de spanning in de onderflens van de stalen ligger van de individuele belastingcomponenten weergegeven over de lengte van de aanbrug (zonder belastingfactor).



Figuur 64 Spanningen in de onderflens van de hoofdliggers voor versterking t.g.v.  $N + M_y$  (per belastingsgroep)

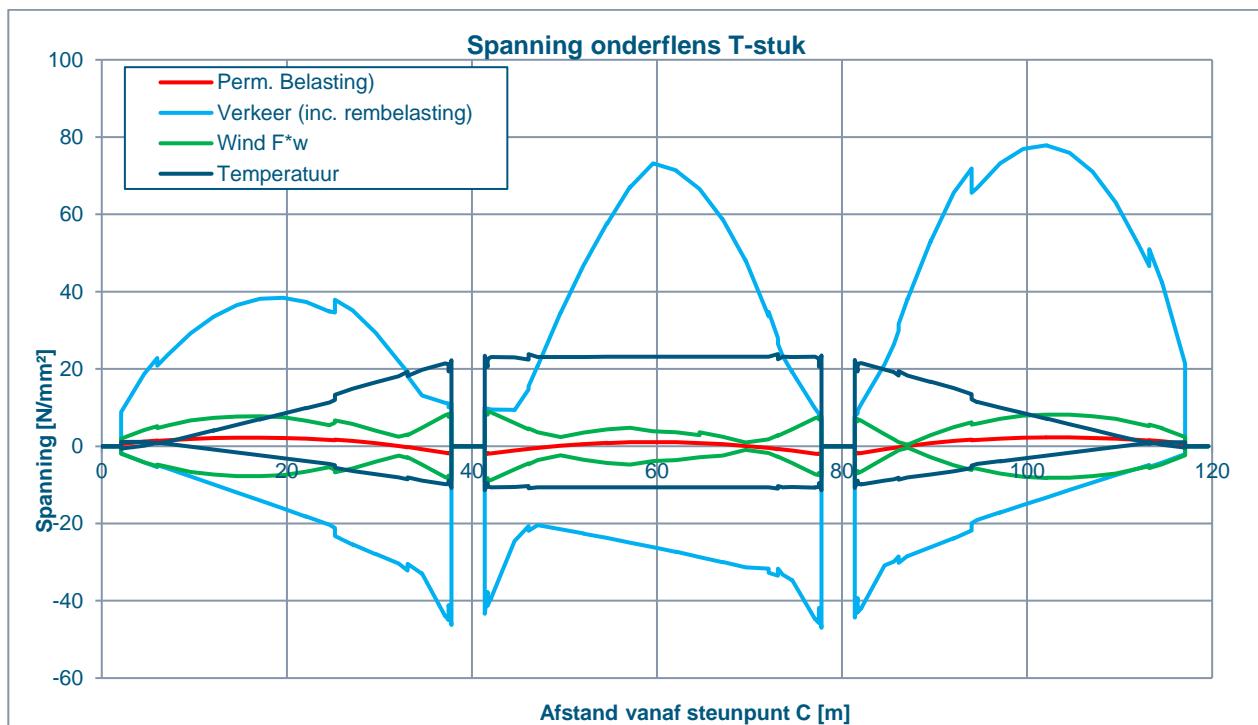


Figuur 65 Spanningen in de oorspronkelijke onderflens van de hoofdliggers met versterking t.g.v.  $N + M_y$  (per belastingsgroep)

Te zien is dat de spanningen door de permanente belastingen nagenoeg gelijk zijn tussen de niet-versterkte situatie en de versterkte situatie. Dit valt te verklaren doordat de permanente belasting alleen door de onversterkte doorsnede worden opgenomen. Alleen het eigen gewicht van het T-stuk wordt door de versterkte doorsnede opgenomen.

Verder is te zien dat de spanningen door de verkeersbelastingen zijn afgenoem door de versterkte doorsnede, zoals verwacht. De spanningen door wind zijn nagenoeg gelijk gebleven, doordat enerzijds de doorsnede-eigenschappen zijn toegenomen, maar anderzijds is de windbelasting ook iets toegenomen. De spanningen door de temperatuurbelasting zijn juist hoger geworden. Dit valt te verklaren doordat er bij een verticale temperatuurcomponent over de hoogte van de hoofdlijn sprake is van een belasting door verhinderde kromming. Doordat de stijfheid van de hoofdlijnen is toegenomen, zal ook de spanning toenemen. De bijdrage van de temperatuurbelasting in de UGT is echter maar beperkt en wordt ruimschoots gecompenseerd door de afname van de verkeersbelasting.

De spanningen in de flens van het T-stuk zijn in onderstaand figuur weergegeven.



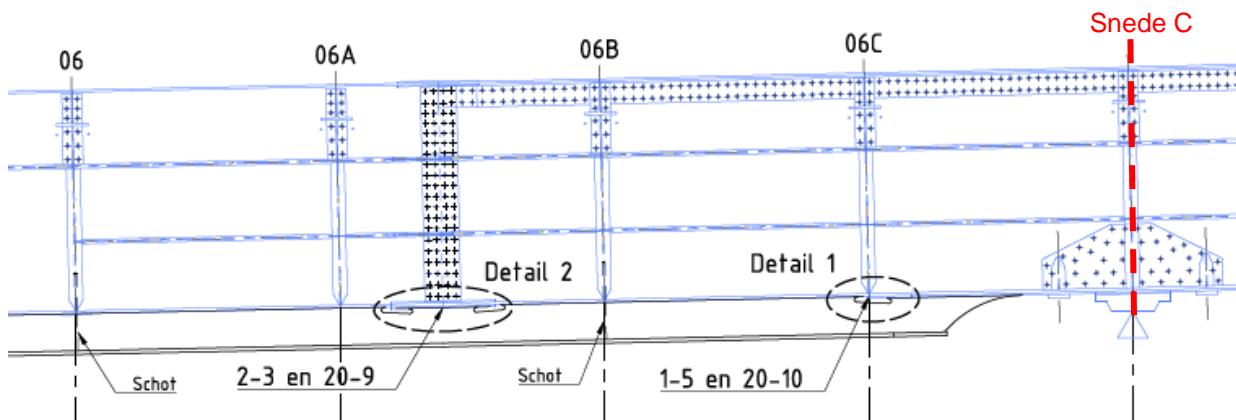
Figuur 66 Spanningen in de nieuwe onderflens (T-stuk) van de hoofdlijnen na versterking t.g.v.  $N + M_y$  (per belastingsgroep)

Zoals te zien is, zijn de spanningen door de permanente belastingen nagenoeg nul, omdat dit deel alleen door het eigen gewicht van het T-stuk wordt belast.

Geconcludeerd wordt dat de spanningen in het versterkte deel van de hoofdlijn in de UGT aan de bovenzijde nagenoeg gelijk blijven en aan de onderzijde afnemen. In het niet-versterkte deel bij de steunpunten blijven de spanningen in de UGT gelijk als in de situatie voor versterking.

### 5.1.3 Plooien van het lijf

De spanningen in de hoofdlijger zijn in de versterkte situatie afgenumen ten opzichte van de situatie voor versterking. Alleen voor de snede ter plaatse van het tussensteunpunt (sneude C) geldt dat de spanning nagenoeg gelijk is gebleven.



Figuur 67 Locatie sneude C (tussensteunpunt)

Voor deze snede is de toetsing opnieuw uitgevoerd, voornamelijk omdat deze ook nodig is voor de toetsing van de vijzelpunten. De berekening is weergegeven in Bijlage C1.a Hieruit volgen de volgende resultaten.

Snede	Locatie dx [mm]	Spanning klasse 3 zonder verstijver [N/mm <sup>2</sup> ]	Spanning klasse 3 met verstijver [N/mm <sup>2</sup> ]	Spanning klasse 4 met verstijver [N/mm <sup>2</sup> ]	UC normaalspanningen t.g.v. buiging en normaalkracht	UC afschuiving	UC normaalkracht, dwarskracht en buiging	UC plooien veroorzaakt door flens
C (voor verst.)	79588	-319	294	-330	0,94	0,76	0,83	0,28
C (na verst.)	79588	-318	-293	-329	0,94	0,77	0,85	0,28

Tabel 47 Overzicht van de unity checks voor de plooitoetsing van de hoofdlijger (UGT)

Voor de spanningen in het T-stuk geldt dat deze dusdanig laag zijn (maximaal -82 N/mm<sup>2</sup> druk) dat ook in het T-stuk plooien van het lijf niet op zal treden. Bovendien zitten de langsverstijvers (flenzen) relatief dicht bij elkaar (350 mm), zodat deze relatief veel steun zullen geven aan het lijf.

### 5.1.4 Stabiliteit

#### Knikken van de bestaande onderflens

Naast de sterkteberekening is stabiliteit van de gedrukte onderflens (knikken uit het vlak) gecontroleerd. De kniklengte is bepaald conform NEN-EN 1993-1-1 Bijlage C.2.4.2 door de gedrukte onderflens te beschouwen als een scharnierend opgelegde ligger tussen twee k-verbanden, die ter plaatse van de tussendwarsdragers verend is ondersteund. Hieruit volgt dat voor de kniklengte 3,0 m aangehouden kan worden.

De toetsing is uitgevoerd conform art 6.3.1, waarbij onderflens is beschouwd als een op druk belaste staaf. Voor deze equivalente staaf is voor de bepaling van het oppervlak en het traagheidsmoment uitgegaan van het oppervlak van de onderflens plus 1/3 van de (effectieve) delen van het lijf op druk. Hierbij zijn de langsverstijvers op druk ook voor 1/3 meegenomen.

De berekening is weergegeven in de Mathcad berekeningen waar ook de plooitoetsing is uitgevoerd, omdat het effectieve deel van het lijf meegenomen moet worden in de berekening. Hiervoor wordt verwezen naar Bijlage C1. De resultaten van de kniktoetsing zijn in onderstaande tabel samengevat. Uit de berekeningen blijkt dat de ligger niet gevoelig is voor knik van de onderflens.

Snede	Locatie dx [mm]	UC
C (voor verst.)	79588	0,94
C (na verst.)	79588	0,94

Tabel 48 Overzicht van unity checks voor stabiliteit van de onderflens van de hoofdlijger (UGT gebruik)

#### Knikken van de nieuwe onderflens

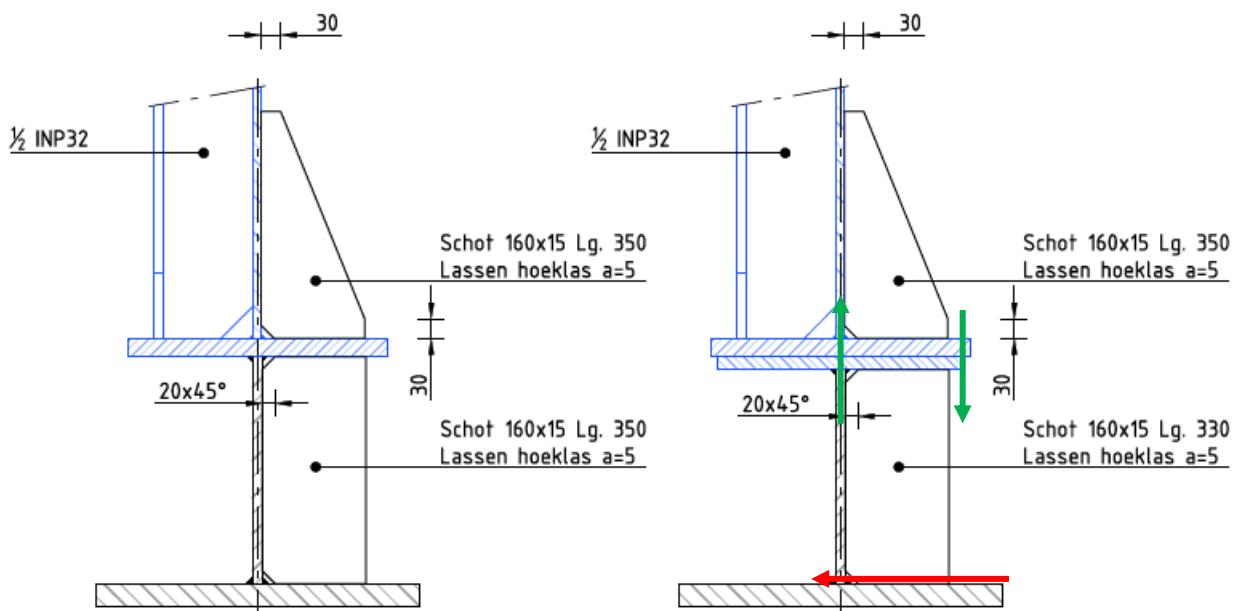
Naast de bestaande onderflens is ook de nieuwe onderflens van het T-stuk getoetst op knikstabiliteit. Uit de spanning in het nieuwe T-stuk volgt dat de grootste drukspanningen optreden in veld 1 en 3, maximaal -81 N/mm<sup>2</sup>. Hiervoor wordt de onderflens plus de helft van het lijf van het T-stuk beschouwd als een ligger belast op druk. De toetsing op knikstabiliteit is uitgevoerd conform NEN-EN 1993-1-1 art. 6.3.1

Uit de berekening volgt dat de maximale toelaatbare kniklengte ca. 18 meter is. Praktisch gezien is er bij elk k-verband een schot toegepast. De berekeningen zijn weergegeven in Bijlage C1.i.

Snede	Kniklengte [m]	UC
Veld 3	18	0,91

Tabel 49 Overzicht van unity check voor stabiliteit van de onderflens (T-stuk) van de hoofdlijger (verbouw)

De schotten worden, na het aanbrengen van het T-stuk, met een hoeklas aan de onderflens en lijf van het T-stuk en aan de onderflens van de hoofdliggers gelast, zie Figuur 68. Om een stijve verbinding met de dwarsverstijver te verkrijgen wordt boven de onderflens van de bestaande hoofdligger ook een schot gelast. Het toepassen van het schot aan de binnenzijde (links in onderstaand figuur) is niet mogelijk, in verband met de aanwezigheid van de verbinding met de onderrand van het k-verband aan die zijde.



Figuur 68 Detail van de schotten in de onderflens T-stuk

De schotten (zijdelingse steunen) dienen conform NEN-EN 1993-1-1 art. 6.3.2.5(2) gedimensioneerd te zijn op de grootste van de volgende krachten

$$N_{st,Ed} = 0,01 \times A_f \times \sigma_{t,Ed} = 0,01 \times 35 \times 500 \times -81 \text{ N/mm}^2 = 14,1 \text{ kN}$$

$$N_{st,Ed} = 0,005 \times A_f \times f_y = 0,005 \times 35 \times 500 \times -355 \text{ N/mm}^2 = 31,1 \text{ kN}$$

Voor de berekening van de zijdelingse steun wordt uitgegaan van een horizontale kracht aan de onderzijde van het schot (rood weergegeven). Door de arm tot de bestaande onderflens zal er een moment ontstaan dat moet worden opgenomen door een verticale trekkkracht door de las tussen de opdikplaat en de onderflens van de bestaande hoofdligger en een drukkracht ter plaatse van het lijf (groen weergegeven). De verticale kracht is  $31,1 \text{ kN} \times 330 \text{ mm} / 190 \text{ mm} = 54,0 \text{ kN}$ .

Uitgaande van een dikte van het schot van 15 mm en een spreiding onder  $45^\circ$  over de dikte van de opdikplaat ( $t = 20 \text{ mm}$ ) zal de belasting door  $15 \text{ mm} + 2 \times 20 \text{ mm} = 55 \text{ mm}$  las ( $a = 4 \text{ mm}$ ) opgenomen moeten worden. Hieruit volgt een spanning in de las van  $\sigma_1 = \tau_1 = 54,0 \text{ kN} \times \sqrt{2} / (2 \times 4 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}) = 174 \text{ N/mm}^2$ . Dit resulteert in de volgende UC.

$$[174^2 + 3 \times (174^2)]^{0,5} = 348 \text{ N/mm}^2 \leq 510 / (1,0 \times 1,25) = 408 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{UC} = 0,85$$

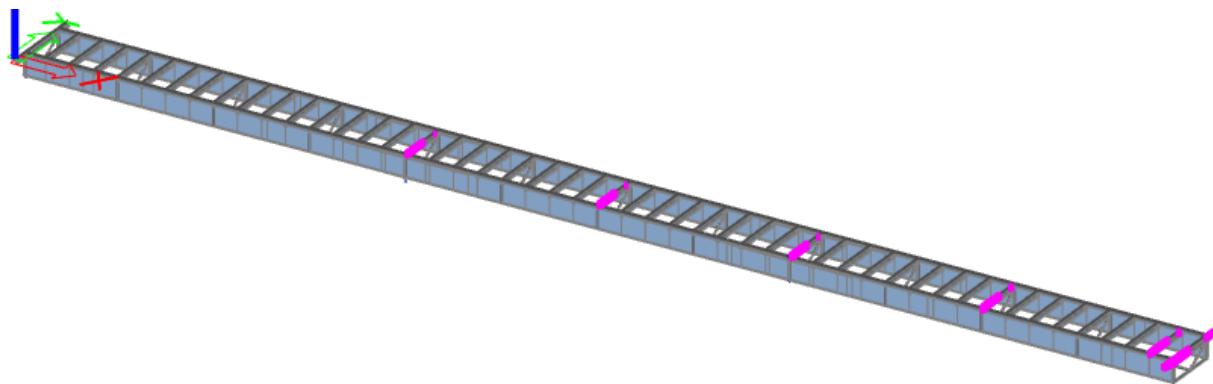
### 5.1.5 Langsverstijvers

De spanningen in de langsverstijvers zullen uiteraard ook afnemen of nagenoeg gelijk blijven. Omdat deze in de onversterkte situatie al voldeden, zijn deze niet opnieuw getoetst.

## 5.2 Dwarsdragers

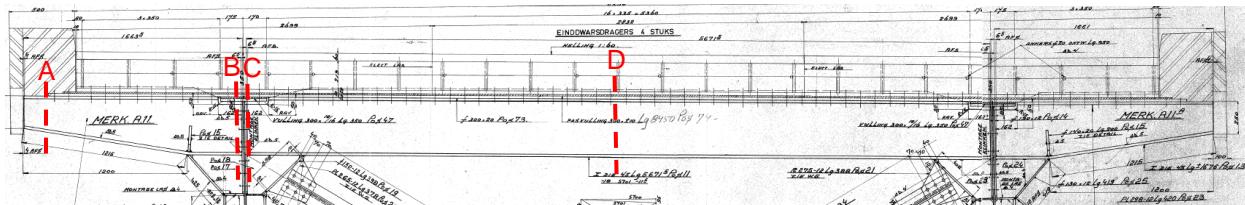
De dwarsdragers zullen waarschijnlijk slechts minimaal beïnvloed worden door de versterking van de hoofdliggers. Gezien de ruime marge in UC's worden hier op voorhand echter geen problemen mee verwacht.

De toetsing van de dwarsdragers is voor dezelfde dwarsdragers uitgevoerd als in de verificatieberekening van de bestaande situatie. Hierbij is het tandemstelsel op een zestal dwarsdragers geplaatst, namelijk op de dwarsdragers in het midden van veld 2 en 3, ter plaatse van de tussensteunpunten en het eindsteunpunt (einddwarsdrager) en de eerste dwarsdrager direct naast het eindsteunpunt (i.v.m. de afwijkende geometrie van de einddwarsdrager).



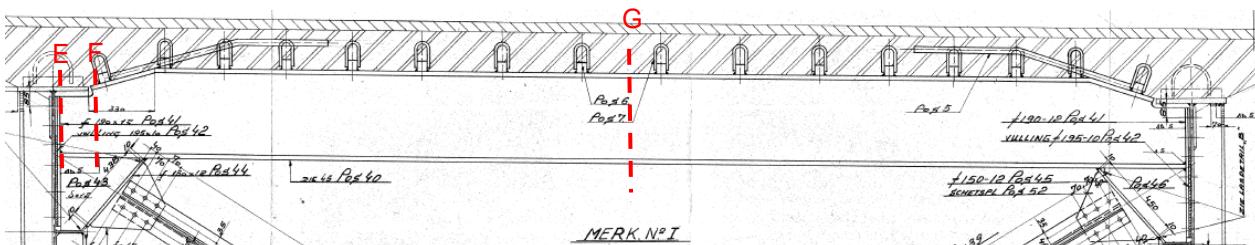
Figuur 69 Getoetste dwarsdragers (roze weergegeven)

De einddwarsdragers zijn in de herberekening getoetst in vier snedes, namelijk in de uitkraging, net naast de opdikplaat in de bovenflens (A) en bij de aansluiting op de hoofdligger, en in de dwarsdrager, bij de aansluiting op de hoofdligger (C) en in het veld (D). De spanningen zijn voor deze 4 locaties vergeleken tussen de situatie voor en na versterking.



Figuur 70 Getoetste snedes einddwarsdragers

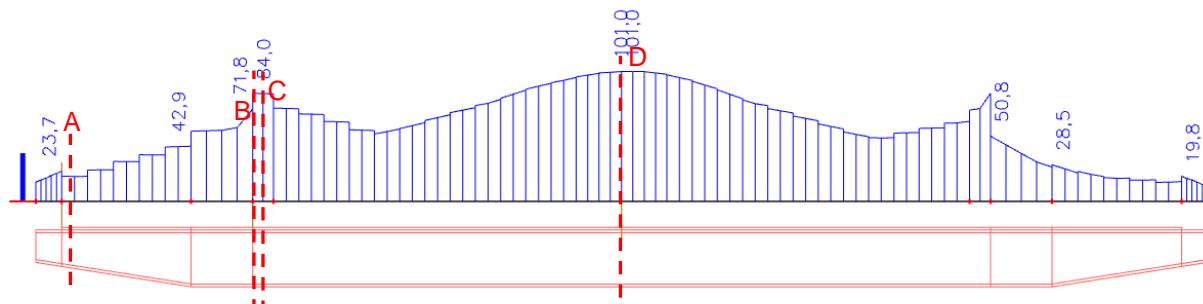
De overige dwarsdragers zijn getoetst in drie snedes, namelijk ter plaatse van de aansluiting met de hoofdligger (E), in de doorsnede met variabele hoogte (F) en in het veld (G). Ook hier zijn de spanningen vergeleken tussen de situatie voor en na versterking.



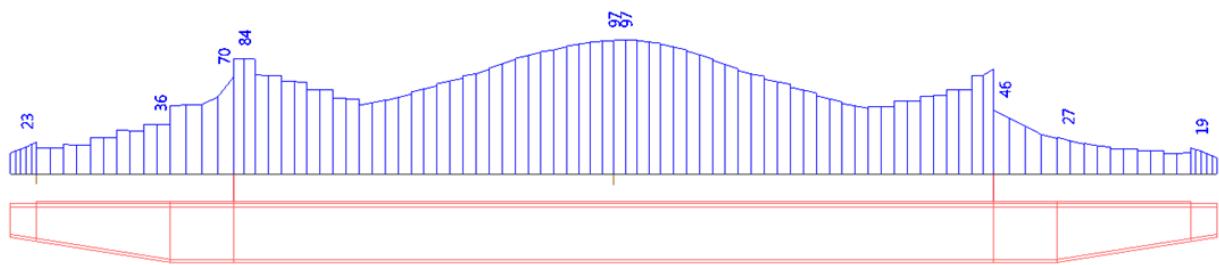
Figuur 71 Getoetste snedes dwarsdragers

### 5.2.1 Spanningen einddwarsdrager

De (Von Mises) spanningen in de einddwarsdrager zijn gegeven in onderstaand figuur, waarbij Figuur 72 de spanningen voor versterking weergeven en Figuur 73 de spanningen na versterking. In beide gevallen is uitgegaan van gebruiksniveau. Het figuur geeft de omhullende van de Von Mises spanningen in de gehele ligger (boven- en onderflens) weer. De maximale spanning treedt op in het veldmidden.



Figuur 72 Von Misses spanningen in de einddwarsdrager voor versterking (gebruik)



Figuur 73 Von Misses spanningen in de einddwarsdrager na versterking (gebruik)

Te zien is dat de spanningen in het veldmidden iets afgangen zijn, de spanningen bij het steunpunt (hoofdligger) zijn gelijk gebleven. De verschillen zijn echter minimaal, zoals verwacht.

### 5.2.2 Toetsing einddwarsdrager

De toetsing van het staal in de staal-betonligger is uitgevoerd door de krachten uit te lezen in het excentrische balkelement. Door de samenwerking met het betondek zal er in het excentrische balkelement een trek (veld) of drukkracht (steunpunt) ontstaan in combinatie met het moment. Deze krachten en momenten in het staal zijn vervolgens getoetst met behulp van Excel. Deze toetsing is gegeven in Bijlage C2.

Uit de herberekening is gebleken dat snede C maatgevend was voor de einddwarsdrager. Deze snede is daarom opnieuw getoetst op gebruiksniveau. De toetsresultaten van de einddwarsdrager zijn in Tabel 50 weergegeven. Per kolom is een maatgevende kracht of moment gegeven (dikgedrukt) met de bijbehorende snedekrachten uit dezelfde belastingcombinatie.

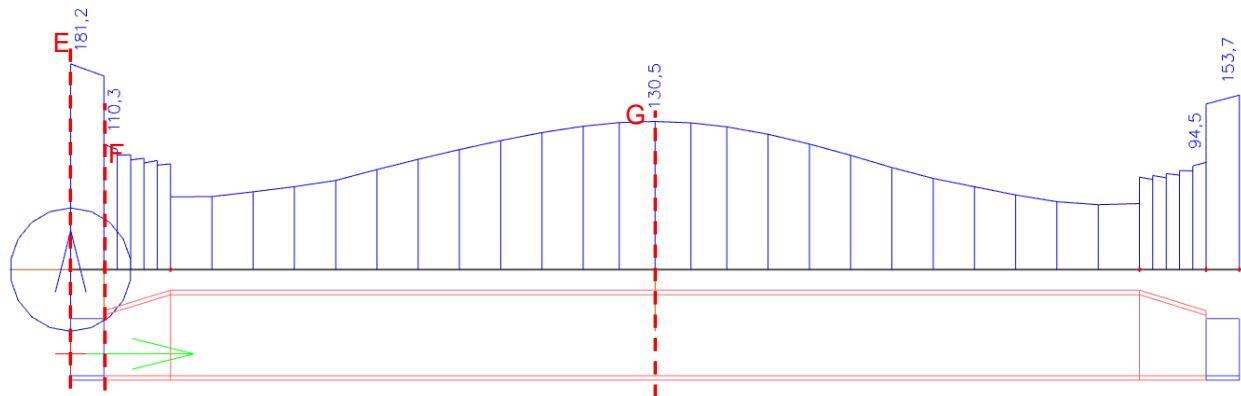
Snedec							
	N <sub>min</sub>	N <sub>max</sub>	V <sub>y,max</sub>	V <sub>z,max</sub>	M <sub>y,min</sub>	M <sub>y,max</sub>	M <sub>z,max</sub>
<b>Normaalkracht [kN]</b>	<b>-757</b>	<b>0</b>	-423	-563	-749	-47	-423
<b>Dwarskracht zwakke as [kN]</b>	75	0	<b>149</b>	90	72	77	149
<b>Dwarskracht sterke as [kN]</b>	165	0	139	<b>215</b>	162	62	139
<b>Moment om de sterke as [kNm]</b>	-91	0	-13	-68	<b>-95</b>	<b>52</b>	-13
<b>Moment om de zwakke as [kNm]</b>	22	0	56	33	22	32	<b>56</b>
<b>UC (sterkte)</b>	<b>0,39</b>	<b>0,00</b>	<b>0,37</b>	<b>0,37</b>	<b>0,39</b>	<b>0,23</b>	<b>0,37</b>
<b>UC (stabilititeit)</b>	<b>0,46</b>	<b>0,00</b>	<b>0,42</b>	<b>0,43</b>	<b>0,46</b>	<b>0,26</b>	<b>0,42</b>

Tabel 50 Overzicht van de unity checks voor de toetsing van de einddwarsdrager (gebruik)

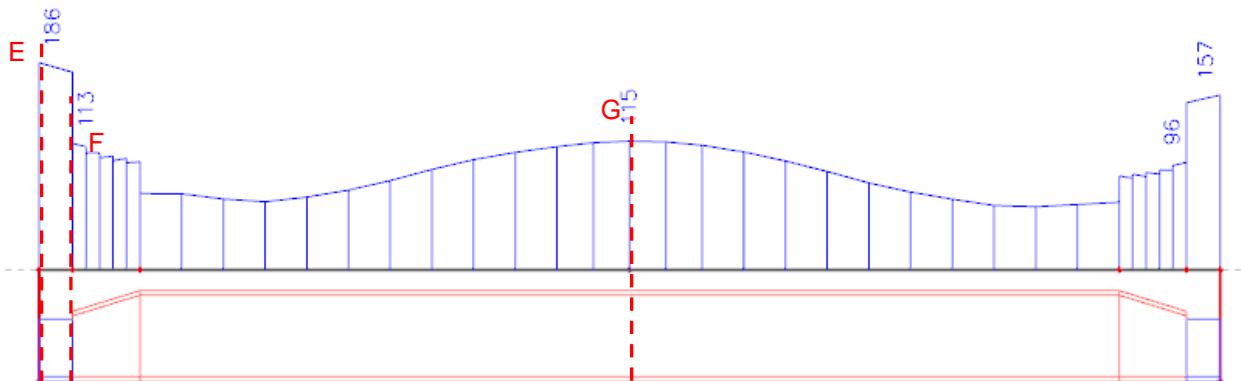
De maximale UC van de einddwarsdrager is met 0,05 toegenomen tot UC = 0,46 door de versterking, maar voldoet nog steeds ruim.

### 5.2.3 Spanningen dwarsdragers

In de normale dwarsdragers zijn drie snedes getoetst, zoals eerder toegelicht in 5 verschillende dwarsdragers. In Figuur 74 zijn de maximale Von Misses spanningen voor deze verschillende snedes weergegeven voor de situatie voor versterking, op gebruiksniveau. Figuur 75 geeft dezelfde Von Mises spanningen voor de situatie na versterking. De spanningen in de overige dwarsdragers zijn weergegeven in Bijlage C2. De spanningen blijven overall onder de vloeistofspanning ( $f_y = 215 \text{ N/mm}^2$ ).



Figuur 74 Von Misses spanningen in de normale dwarsdragers voor versterking (gebruik)



Figuur 75 Von Misses spanningen in de normale dwarsdragers na versterking (gebruik)

Te zien is dat de spanningen aan het einde iets zijn toegenomen, terwijl de spanningen in het veld iets zijn afgenomen. Dit valt te verklaren doordat de hoofdligger iets stijver zal reageren, en de dwarsdrager zich daardoor iets meer als tweezijdig ingeklemde ligger zal gedragen.

### 5.2.4 Toetsing dwarsdragers

De doorsnedetoetsingen (sterkte en stabiliteit) zijn op vergelijkbare wijze als voor de einddwarsdrager uitgevoerd. Uit de herberekening is gebleken dat snede E maatgevend was. Dit is ook hier weer de snede waar ook de spanningen zijn toegenomen. De toetsresultaten zijn in Tabel 51 weergegeven. Opgemerkt wordt dat snede E is getoetst als klasse 1 profiel. De overige snedes zijn als klasse 3 getoetst (conservatief).

Snedes E							
	N <sub>min</sub>	N <sub>max</sub>	V <sub>y;max</sub>	V <sub>z;max</sub>	M <sub>y;min</sub>	M <sub>y;max</sub>	M <sub>z;max</sub>
<b>Normaalkracht [kN]</b>	-910	5	-160	-845	-883	-90	-379
Dwarskracht zwakke as [kN]	3	5	70	6	5	2	35
Dwarskracht sterke as [kN]	216	70	46	238	199	74	107
Moment om de sterke as [kNm]	-25	-18	-4	-11	-25	22	-5
Moment om de zwakke as [kNm]	1	0	0	0	1	0	8
UC (sterkte)	<b>0,64</b>	<b>0,18</b>	<b>0,20</b>	<b>0,58</b>	<b>0,48</b>	<b>0,20</b>	<b>0,30</b>
UC (stabiliteit)	<b>0,87</b>	<b>0,00</b>	<b>0,14</b>	<b>0,69</b>	<b>0,86</b>	<b>0,27</b>	<b>0,39</b>

Tabel 51 Overzicht van de unity checks voor de toetsing van de normale dwarsdrager in snede E (gebruik)

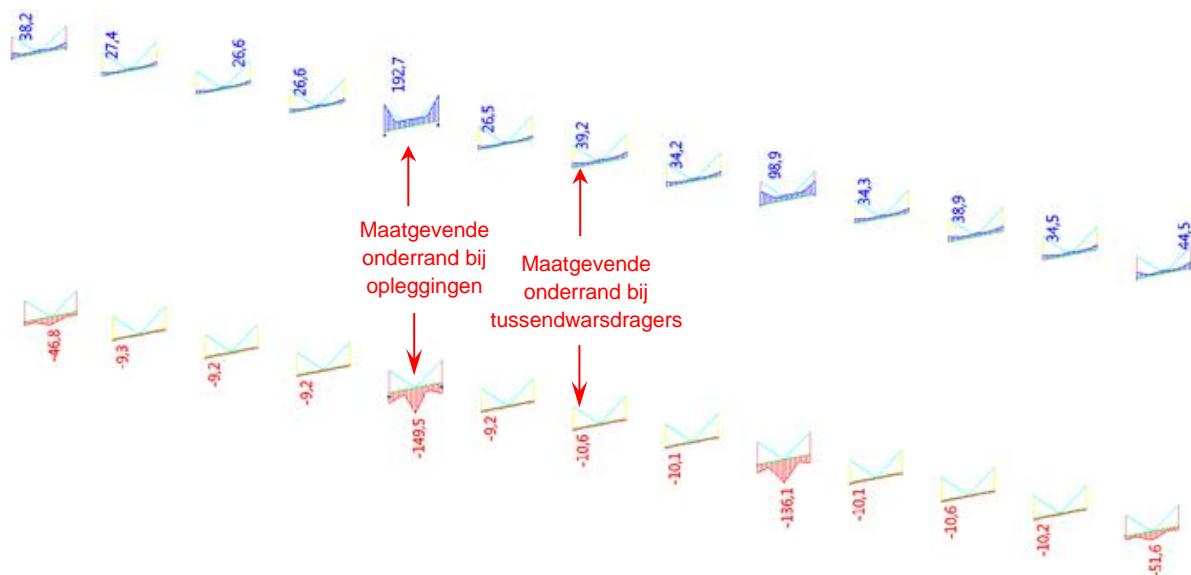
Geconcludeerd wordt dat het staal in de dwarsdragers voldoen op sterkte en stabiliteit.

## 5.3 K-verbanden

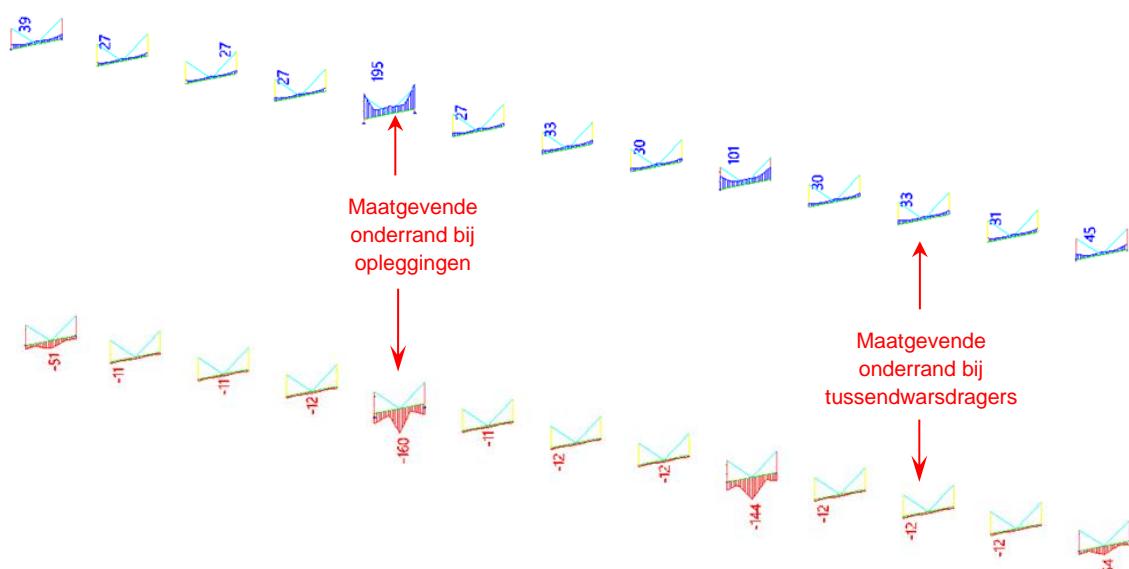
Voor de toetsing van de K-verbanden zijn de omhullende van de normaalspanningen in de verschillende staven met hulp van Scia Engineer bepaald om de maatgevende doorsneden te bepalen. De staven met de hoogste spanningen zijn getoetst met behulp van Excel.

### 5.3.1 Toetsing van de onderrand van de K-verbanden

Er zijn twee soorten profielen voor de onderranden gebruikt. De onderranden bij de steunpunten zijn halve DIN 30 profielen terwijl voor de onderranden van de K-verbanden bij de tussendwarsdragers halve DIE 26 profielen zijn gebruikt. De omhullende trek- en drukspanningen in de UGT (gebruksniveau) in de onderrand van de K-verbanden en portalen zijn in Figuur 76 weergegeven voor de situatie voor versterking en in Figuur 77 voor de situatie na versterking.



Figuur 76 Druk- en trekspanningen in de onderranden van de K-verbanden voor versterking (gebruik)



Figuur 77 Druk- en trekspanningen in de onderranden van de K-verbanden na versterking (gebruik)

Te zien is dat de spanningen bij de opleggingen iets oplopen. De UC van de onderranden van de tussendwarsdragers waren in de verificatieberekening van de situatie zonder versterking dusdanig laag (UC = 0,22) dat deze niet opnieuw getoetst zijn. Voor de onderrand van de K-verbanden bij de tussensteunpunten is deze toetsing wel opnieuw uitgevoerd. De resultaten van deze toetsing zijn weergegeven in Tabel 52.

Onderrand bij tussenopleggingen							
	N <sub>min</sub>	N <sub>max</sub>	V <sub>y,max</sub>	V <sub>z,max</sub>	M <sub>y,min</sub>	M <sub>y,max</sub>	M <sub>z,max</sub>
<b>Normaalkracht [kN]</b>	<b>-229</b>	<b>355</b>	355	-186	-155	-186	201
<b>Dwarskracht zwakke as [kN]</b>	0	0	<b>0</b>	0	0	0	0
<b>Dwarskracht sterke as [kN]</b>	6	0	0	<b>10</b>	10	8	9
<b>Moment om de sterke as [kNm]</b>	7	2	2	-16	<b>-16</b>	<b>10</b>	-13
<b>Moment om de zwakke as [kNm]</b>	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
<b>UC (sterkte)</b>	<b>0,36</b>	<b>0,28</b>	<b>0,28</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,32</b>	<b>0,42</b>
<b>UC (stabilititeit)</b>	<b>0,47</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,75</b>	<b>0,71</b>	<b>0,55</b>	<b>0,68</b>

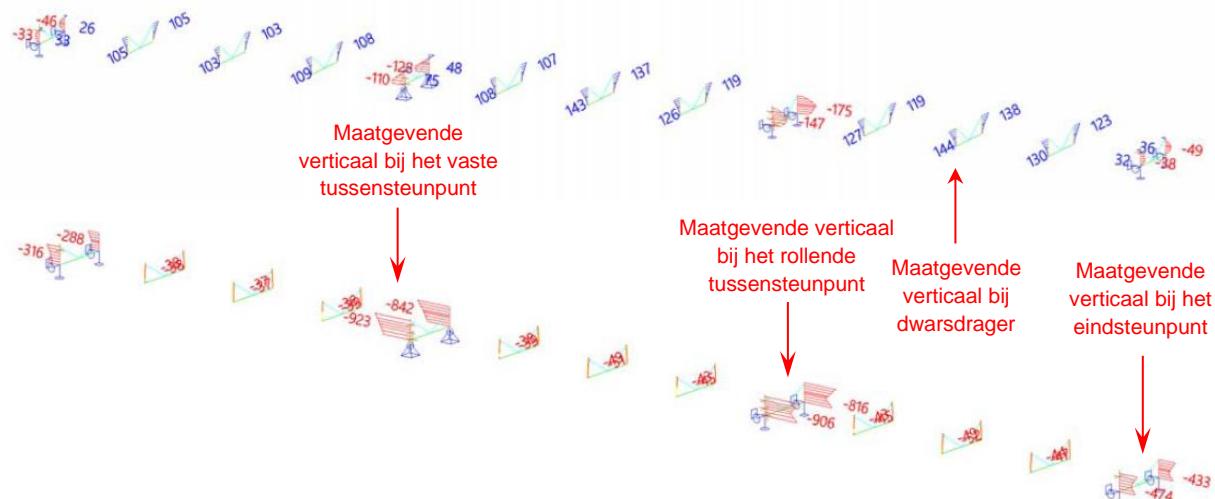
Tabel 52 Overzicht van de unity checks voor de toetsing van de onderrand bij de tussenoplegging (gebruik)

De UC op sterke neemt toe van 0,49 in de situatie voor versterking naar 0,50 in de situatie na versterking, uitgaande van het niveau gebruik. Voor de stabilitetstoetsing is de toename wat groter, van UC = 0,61 naar 0,75. Voor deze laatste UC is de combinatie met maximale Vz maatgevend, wat enigszins ongebruikelijk is (meestal is de combinatie maximaal M of maximaal N maatgevend). In de maatgevende combinatie neemt het moment beperkt toe, maar de normaalkracht verdubbelt bijna. Dit komt doordat er een andere combinatie maatgevend is geworden voor max Vz, waar een andere normaalkracht bij hoort.

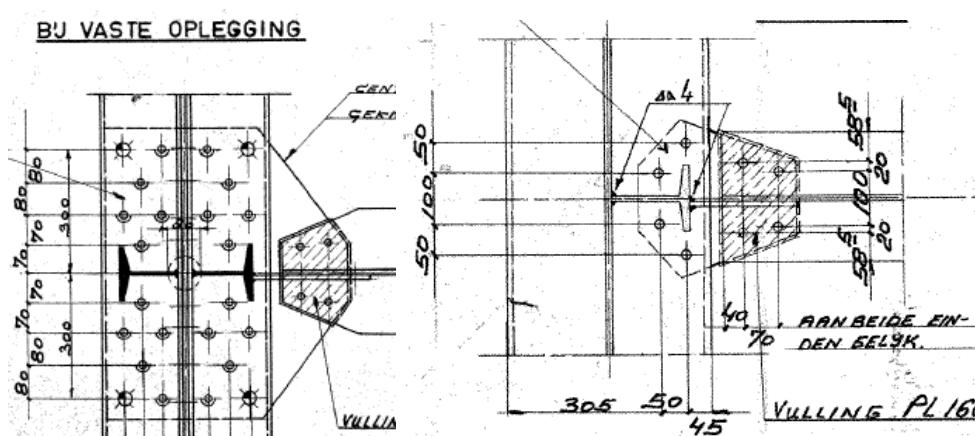
Voor deze combinatie neemt de sterktoetsting toe van 0,48 naar 0,50, dit is ook het beeld van de toename voor de andere combinaties. Echter, in de stabilitetstoetsing is het effect van deze normaalkracht wat extremer, doordat de UC op knik toeneemt van 0,09 naar 0,18. Bovendien zit hier in de combinatie met kip nog een combinatiefactor overheen, wat maakt dat de UC meer toeneemt dan op het eerste gezicht verwacht zou worden.

### 5.3.2 Toetsing van de verticalen van de K-verbanden

Er zijn twee soorten profielen voor de verticalen van de K-verbanden gebruikt. De verticalen bij de steunpunten zijn uit 2 halve INP 32 profielen aan weerszijde van het lijf van de hoofdligger samengesteld terwijl voor de verticalen in de K-verbanden bij de tussendwarsdragers één half INP 32 profiel is gebruikt. De lijven van de halve INP 32 profielen zijn aan het lijf van de hoofdligger gelast (zie Figuur 79). De omhullende trek- en drukspanningen in de verticalen van de K-verbanden en portalen zijn in Figuur 78 weergegeven. De hoge spanningen bij de portalen zijn niet correct, omdat hierin door SCIA ook de momenten in het vlak van het lijf van de hoofdligger worden meegenomen. Deze zullen in werkelijkheid niet optreden. De verticaal van het portaal bij de eindsteunpunt voldeed niet in de herberekening en moet daarom versterkt worden. Hierop zal bij de toetsing verder worden ingegaan.



Figuur 78 Druk en trekspanningen in verticalen van K-verbanden (UGT)

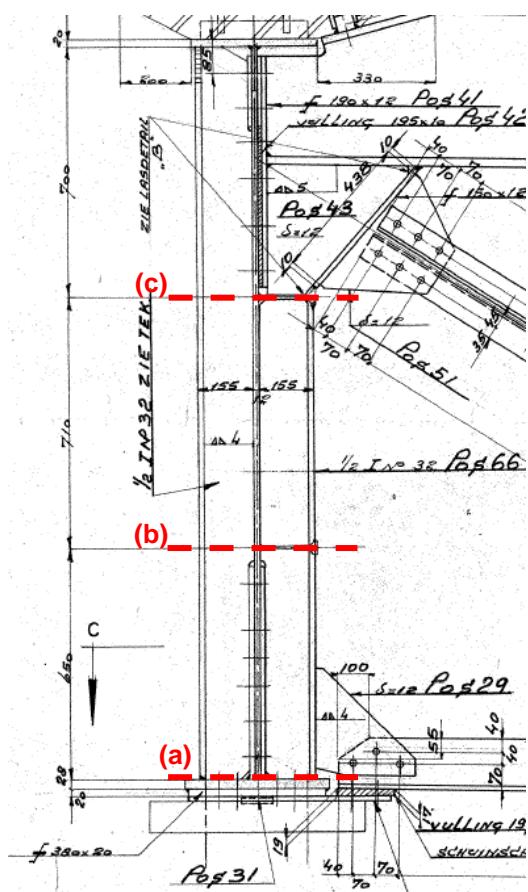


Figuur 79 Doorsnede van de verticalen bij het tussensteunpunt (links) en de tussendwarsdragers (rechts)

Voor portaal B van de hoofdbrug is aangetoond dat de normaalkracht in de verticaal niet constant, zoals in het staafmodel wordt gevonden, maar verloopt over de lengte van de staaf (zie Bijlage C3 van de verificatieberekening van de hoofdbruggen). Voor het verloop van de normaalkracht wordt conservatief uitgegaan van een lineair verlopende normaalkracht die aan de onderzijde gelijk is aan de staafkracht en aan de bovenzijde gelijk is aan de belasting t.g.v. van twee wielen (300 kN) van het tandemstelsel op rijstrook 1 maal de belastingfactor (1,25). Voor de onderbouwing hiervan wordt verwezen naar de Bijlage C3 in de verificatieberekeningen van de hoofdbrug. Het aanhouden van een lineair verloop is conservatief.

### Tussensteunpunten

Voor de toetsing zijn in eerste instantie drie sneden getoetst, aan de onderzijde (a), net boven de opdikplaat (b) en net onder het schot (c). Bij de doorsnedetoetsing in Excel van de verticalen is de bijdrage van het lijf van de hoofdliggers meegenomen in de doorsnede. Hierbij is een meewerkende breedte aan beide zijden van het profiel van  $15\epsilon * t_w$  meegenomen. Hierbij is rekening gehouden met de opdikplaten op het lijf ter plaatse van de tussensteunpunten, waardoor uitgegaan is van  $t_w = 3*12$  mm. Hiermee mag aan weerszijde van het lijf van het INP profiel  $15*3*12*\sqrt{(235/350)} = 442$  mm worden meegenomen.



Figuur 80 Getoetste sneden

Voor de capaciteit is uitgegaan van de plastische capaciteit van de doorsnede. In snede a is rekening gehouden met de extra opdikplaten op het lijf. Voor het lijf is uitgegaan van  $f_y = 350$  N/mm<sup>2</sup>, voor de INP profielen van  $f_y = 215$  N/mm<sup>2</sup>.

De toetsresultaten van de verticalen bij de tussensteunpunten zijn in Tabel 53 t/m Tabel 54 weergegeven.

Verticaal van K-verband bij het vaste tussensteunpunt						
Snede	(a)		(b)		(c)	
	N <sub>max</sub>	M <sub>max</sub>	N <sub>max</sub>	M <sub>max</sub>	N <sub>max</sub>	M <sub>max</sub>
Optredende normaalkracht [kN]	-5058	-4760	-3521	-2669	-1959	-1615
Capaciteit normaalkracht N <sub>pl</sub> [kN]	-12864	-12864	-5434	-5434	-5434	-5434
Moment om de sterke as [kNm]	31	-61	69	82	108	135
Momentcapaciteit M <sub>pl</sub> [kNm]	-307	307	-218	-218	-218	-218
UC (sterkte)	0,56	0,71	0,96	0,87	0,86	0,92
UC (stabilitet)	0,49	0,53	0,83	0,71	0,64	0,65

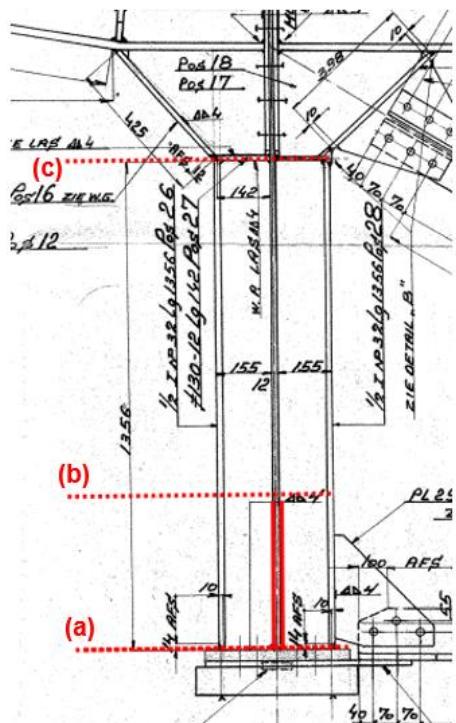
Tabel 53 Overzicht van de unity checks voor de toetsing van de verticaal van het K-verband bij het vaste tussensteunpunt (gebruik)

Verticaal van K-verband bij het rollende tussensteunpunt						
Snede	(a)		(b)		(c)	
	N <sub>max</sub>	M <sub>max</sub>	N <sub>max</sub>	M <sub>max</sub>	N <sub>max</sub>	M <sub>max</sub>
Optredende normaalkracht [kN]	-5139	-4897	-3576	-3055	-1987	-1667
Capaciteit normaalkracht N <sub>pl</sub> [kN]	-12864	-12864	-5434	-5434	-5434	-5434
Moment om de sterke as [kNm]	142	160	16	23	-116	-143
Momentcapaciteit M <sub>pl</sub> [kNm]	-307	-307	-218	-218	218	218
UC (sterkte)	0,86	0,90	0,73	0,67	0,90	0,96
UC (stabilitet)	0,63	0,64	0,69	0,60	0,56	0,66

Tabel 54 Overzicht van de unity checks voor de toetsing van de verticaal van het K-verband bij het rollende tussensteunpunt (gebruik)

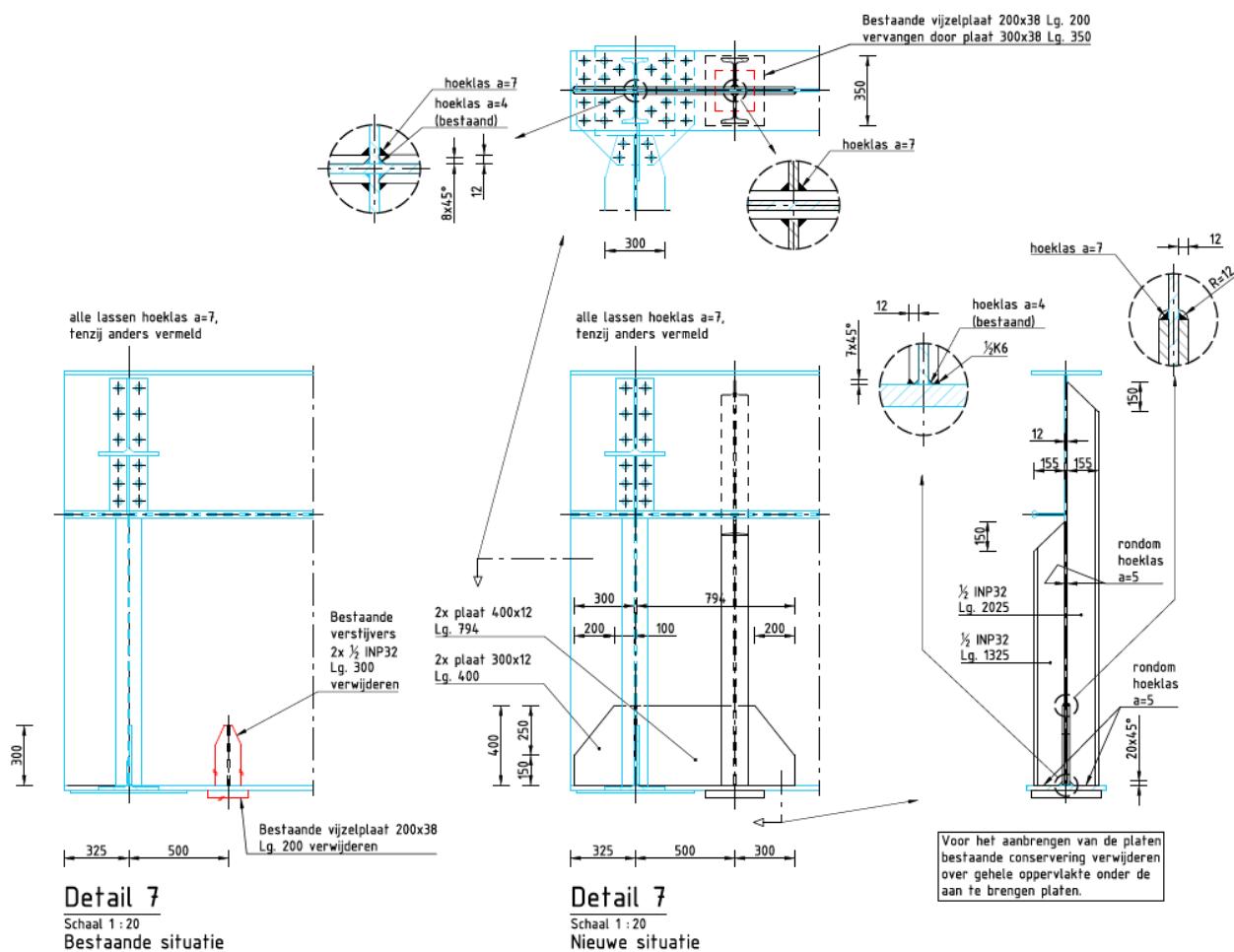
## Verticalen portaal eindsteunpunten

Uit de toetsing van de verticalen van de portalen bij de eindsteunpunten is gebleken dat de verticalen aan de onderzijde (snede a) niet voldeden aan de sterkte-eis.



Figuur 81 Getoetste sneden verticalen

Voor het eindsteunpunt is daarom een versterking boven de oplegging ontworpen, zie Figuur 82. Deze bestaat uit een plaat van 300 mm x 400 mm x 12 mm en een platen van 794 mm x 400 mm x 12 mm, beide aan weerszijden van het lijf van de hoofdlijger. De versterking is zodanig ontworpen dat de platen doorlopen tot voorbij de vijzelpunten, welke ook versterkt moeten worden (zie paragraaf 5.6.2). De platen worden, na verwijdering van de vijzelpunten, tegen het lijf en onderflens van de hoofdlijger gelast, zie ook rapport T&P-BF7387-R011 voor een volledige beschrijving van de aanpassing. De toetsing is opnieuw uitgevoerd, uitgaande van het niveau verbouw. Conservatief zijn snede b en c ook op verbouwniveau getoetst.



Figuur 82 Versterkingsmaatregel verticaal bij het eindsteunpunt

De meewerkende breedte is gelijk gehouden als in de herberekening, waarbij is uitgegaan van  $t_w = 12$  mm, en dus een meewerkende breedte van  $15*12*\sqrt{235/350} = 147$  mm (per zijde). De toetsresultaten van de verticaal bij het eindsteunpunt na versterking zijn in Tabel 55 weergegeven.

Verticaal van K-verband bij het eindsteunpunt						
Snedes	(a)		(b)		(c)	
	N <sub>max</sub>	M <sub>max</sub>	N <sub>max</sub>	M <sub>max</sub>	N <sub>max</sub>	M <sub>max</sub>
Optredende normaalkracht [kN]	-2454	-1661	-2059	-1416	-1085	-830
Capaciteit normaalkracht N <sub>pl</sub> [kN]	-5430	-5430	-2956	-2956	-2956	-2956
Moment om de sterke as [kNm]	90	121	36	51	-88	-115
Momentcapaciteit M <sub>pl</sub> [kNm]	240	240	210	210	210	210
UC (sterkte)	0,83	0,81	0,87	0,72	0,78	0,83
UC (stabilitet)	0,61	0,51	0,76	0,57	0,52	0,55

Tabel 55 Overzicht van de unity checks voor de toetsing van de verticaal van de K-verbanden bij de eindsteunpunten (verbouw)

### Overige verticalen

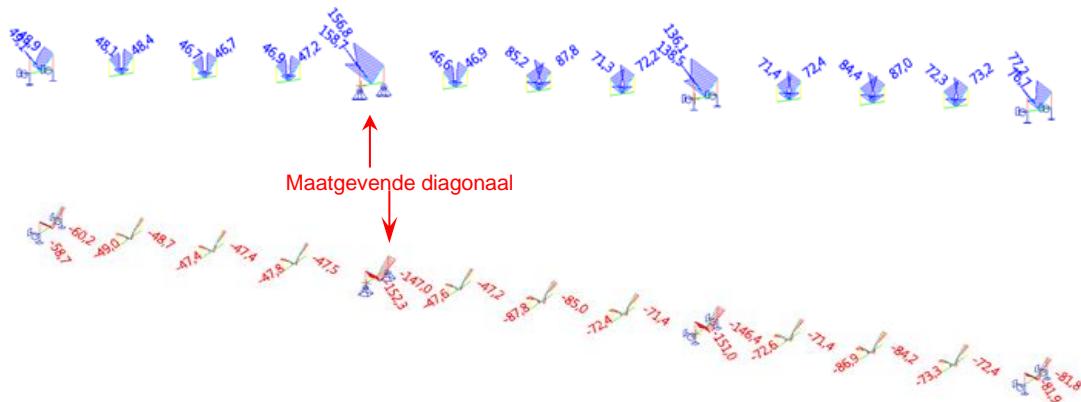
Voor de toetsing van de verticalen bij de tussendwarsdragers is conservatief alleen uitgegaan van de doorsnede van het INP profiel, dus zonder meewerkende breedte van het lijf. Hieruit volgen de volgende resultaten.

Verticaal van K-verband bij de tussendwarsdrager		
	N <sub>max</sub>	M <sub>max</sub>
Optredende normaalkracht [kN]	1,8	1,7
Capaciteit normaalkracht N <sub>pl</sub> [kN]	835	835
Moment om de sterke as [kNm]	-10,0	-10,9
Momentcapaciteit M <sub>pl</sub> [kNm]	-16	-16
UC (sterkte)	0,61	0,67
UC (stabilitet)	0,00	0,00

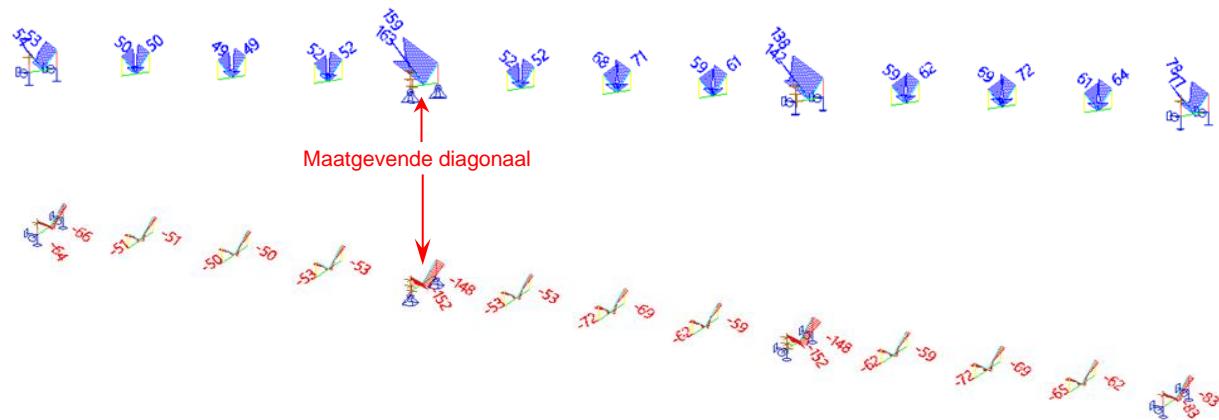
Tabel 56 Overzicht van de unity checks voor de toetsing van de verticalen van de K-verbanden bij de tussendwarsdrager (gebruik)

### 5.3.3 Toetsing diagonalen van K-verbanden

De diagonalen van de K-verbanden en de portalen bestaan uit 2 L80x80x10 profielen. In Figuur 83 zijn de omhullende trek- en drukspanningen van de staafdoorsnede uit Scia weergegeven voor de situatie voor versterking. Figuur 84 geeft de spanningen voor de situatie na versterking.



Figuur 83 Druk-trekspanningen in de diagonalen van de K-verbanden voor versterking (gebruik)



Figuur 84 Druk-trekspanningen in de diagonalen van de K-verbanden na versterking (gebruik)

De resultaten van de toetsing is weergegeven in Tabel 57.

Diagonalen van de K-verbanden							
	N <sub>min</sub>	N <sub>max</sub>	V <sub>y;max</sub>	V <sub>z;max</sub>	M <sub>y;min</sub>	M <sub>y;max</sub>	M <sub>z;max</sub>
Normaalkracht [kN]	-325	320	-283	-283	-286	291	291
Dwarskracht zwakke as [kN]	1,0	0,4	1,4	1,4	1,4	0,7	0,7
Dwarskracht sterke as [kN]	1,0	0,4	1,4	1,4	1,4	0,7	0,7
Moment om de sterke as [kNm]	-1,1	1,1	-1,7	-1,7	-1,7	2,0	2,0
Moment om de zwakke as [kNm]	1,1	1,1	1,7	1,7	1,7	2,0	2,0
UC (sterkte)	0,60	0,60	0,60	0,60	0,61	0,64	0,64
UC (stabiliteit)	0,91	0,00	0,88	0,88	0,89	0,00	0,00

Tabel 57 Overzicht van de unity checks voor de toetsing van de diagonalen van de K-verbanden (gebruik)

## 5.4 Betondek

De versterking zal voor het betondek beperkt invloed hebben. Zo is de spanning in de bovenflens van de hoofdlijger niet noemenswaardig veranderd door de versterking, doordat enerzijds de buigtijfheid is toegenomen, maar anderzijds het zwaartepunt naar beneden is geschoven. De verwachting is dat dit daarom ook voor het betondek geldt.

De stalen liggers zijn getoetst in paragraaf 5.1 (hoofdlijger) en paragraaf 5.2 (dwarsdragers). De toets van het betondek is in dit hoofdstuk uitgewerkt. De volgende berekeningen zijn hiervoor uitgevoerd:

- Toetsing staalbetonliggers
- Toetsing betondek in het veld

Voor de modeluitvoer en berekeningen wordt verwezen naar Bijlage C4.b t/m e.

### 5.4.1 Toetsing staalbetonliggers

De staalbeton hoofdliggers en dwarsdragers zijn op de maatgevende posities getoetst als staalbetondorsnede. De volgende toetsingen zijn uitgevoerd:

- Hoofdlijger gewapend deel: maximaal veldmoment ter plaatse van het midden van veld 3
- Hoofdlijger gewapend deel: maximaal steunpuntsmoment ter plaatse van de overgang van het voorgespannen deel naar het gewapend deel in veld 2
- Hoofdlijger voorgespannen deel: maximaal steunpuntsmoment boven steunpunt E
- Dwarsdrager: maximaal veldmoment ter plaatse van dwarsdrager in het veldmidden van veld 2
- Dwarsdrager: maximaal steunpuntsmoment ter plaatse van steunpunt E

De toetsingen zijn uitgevoerd conform NEN-EN 1994-2 waarbij uit is gegaan van de elastische weerstandscapaciteit. Om de bouwfasering en de variërende betonstijfheid mee te nemen zijn de spanningen in het staalprofiel, betonstaalwapening, voorspanning en het beton voor iedere bouwfase apart bepaald.

In H5.4.3 is aangetoond dat het betondek in de karakteristieke combinatie ongescheurd blijft. Echter in de fundamentele combinatie zal het dek ter plaatse van een steunpuntsmoment in de hoofdlijger wél scheuren. Daarom is in de toetsing van het steunpuntsmoment van de hoofdlijger in het voorgespannen deel het scheurmoment bepaald. Het stijfheidsaandeel van het beton is in de bepaling van het doorsnede evenwicht alléén meegenomen tot aan het scheurmoment. Voor de snedetoets is de stijfheid van beton onder trek op 0 N/mm<sup>2</sup> aangehouden.

NB. Deze benadering is voor het steunpuntsmoment niet helemaal correct, omdat er na scheuren weer een nieuw evenwicht zal optreden. Aanvullend is een berekening gemaakt waarbij is uitgegaan van een stijfheid van beton van  $f_{cd}/1,75\% = 12190 \text{ N/mm}^2$  voor alle fasen (i.p.v. de n-methode) en de momenten volgens de gereduceerde belastingcombinatie. Hieruit volgt dat het betondek boven het tussensteunpunt net op trek komt ( $\sigma_c = 0,4 \text{ N/mm}^2$ ) op maar ruim onder de rekenwaarde van de treksterkte blijft ( $f_{ctd} = 1,4 \text{ N/mm}^2$ ). In overleg met RWS is besloten om niet het exacte evenwicht in gescheurde toestand te bepalen. Dit zal maar zeer beperkt invloed hebben op de spanningen in de hoofdlijger.

#### 5.4.1.1 Effectieve breedte staalbetonligger

De effectieve breedte is hetzelfde aangehouden als in de herbereking van de situatie voor versterking. Voor de hoofdlijker en de dwarsdrager is uitgegaan van een constante effectieve breedte van respectievelijk 4,72 m en 1,25 m.

#### 5.4.1.2 Toetsing staalbetondronsede

De staalbetonliggers in langs- en dwarsrichting zijn getoetst op de omhullende waarden van de normaalkracht en het moment. Voor het voorgespannen deel is de normaaltrekkkracht ( $N_{Ed}$ ) uit het model gecombineerd met de normaaldrukkkracht ( $N_{Ed,vsp}$ ) uit het separate model waarmee de voorspanning is gemodelleerd.

De optredende spanningen en de unity checks zijn in onderstaande tabel weergegeven voor zowel de situatie voor versterking als de situatie na versterking. Voor de berekeningen van de situatie voor versterking wordt verwezen naar de verificatieberekening. De berekening van de situatie na versterking zijn gegeven in Bijlage C4.g.

Onderdeel	Moment	Versterkt	Spanning $\sigma_{Ed}$ [MPa]				UC
			beton	wap	Vsp.	staal	
Hoofdlijker voorgespannen	Steunpunt	voor	-	54	651 <sup>1</sup>	-320	0,91
		na	-	67	664 <sup>1</sup>	-320	0,93
Hoofdlijker niet voorgespannen Wap 2 x 45 Ø16	Steunpunt	voor	-	50	-	235 <sup>1</sup>	0,67
		na	-	38	-	233 <sup>1</sup>	0,67
Hoofdlijker niet voorgespannen Wap 39 + 69Ø16	Steunpunt	voor	-	51	-	236 <sup>1</sup>	0,68
		na	-	40	-	236 <sup>1</sup>	0,67
Hoofdlijker niet voorgespannen	Veld	voor	-8,8	-73	-	339 <sup>1</sup>	0,97
		na	-7,6	-67	-	247 <sup>1</sup>	0,70
Dwarsdrager	Steunpunt	voor	-	59	-	-72 <sup>1</sup>	0,33
		na	-	77	-	-87 <sup>1</sup>	0,40
Dwarsdrager	Veld	voor	-6,7	-33	-	129 <sup>1</sup>	0,60
		na	-6,6	-32	-	124 <sup>1</sup>	0,58

<sup>1</sup> maatgevend

Tabel 58 Overzicht unity checks staalbetonlijker

Te zien is dat spanningen in het versterkte veld van de hoofdlijker afnemen. Bij het steunpunt is er nauwelijks verschil. De spanningen bij het steunpunt van de dwarsdrager nemen juist toe, doordat de verstijfde hoofdlijker zorgt voor een iets grotere inklemming. In het veld nemen de spanning juist weer af.

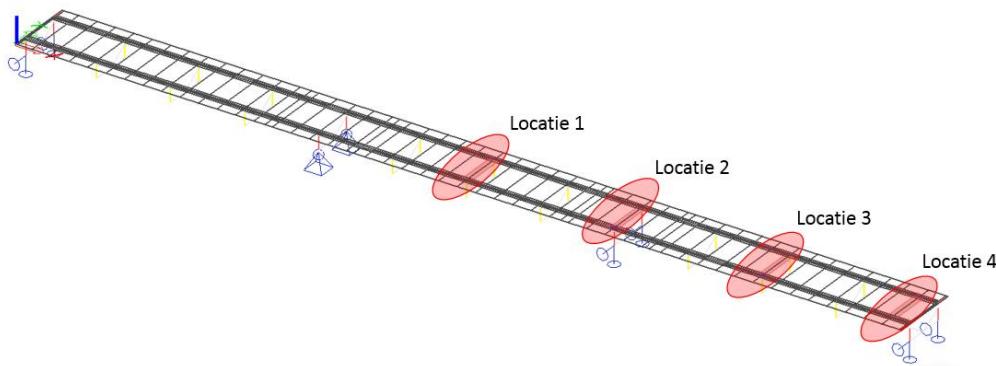
#### 5.4.1.3 Toetsing schuifverbinding

De schuifverbinding is niet opnieuw getoetst. Voor de hoofdlijker zal de schuifkracht nauwelijks beïnvloed worden door de versterking. Voor de dwarsdrager is de invloed wat groter, maar gezien de UC in de situatie voor versterking (max 0,48), zal de schuifverbinding nooit maatgevend worden.

## 5.4.2 Toetsing betondek

### 5.4.2.1 Toetsing moment + normaalkracht

Ter plaatse van het veld, tussen de dwarsdragers en ter plaatse van het overstek werkt het betondek niet samen als staalbetondoorsnede. Deze betondoorsneden zijn daarom apart getoetst op buiging en normaalkracht. De snedekrachten in het dek bestaan uit lokale en globale effecten. Om de maatgevende globale effecten te verkrijgen zijn de betondoorsneden op 4 posities op de brug getoetst.

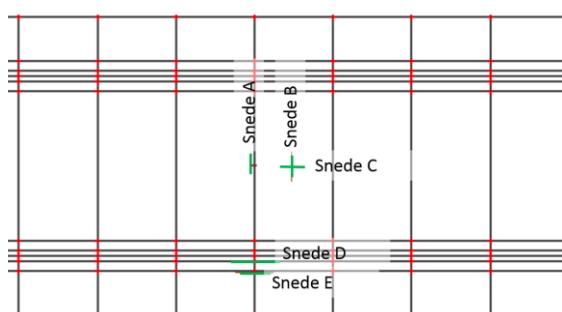


Figuur 85 Overzicht toets locaties

Om de maatgevende lokale effecten te verkrijgen zijn voor iedere locatie 5 verschillende sneden getoetst:

- **Snede A:** Maximaal steunpuntsmoment in langsrichting ( $mx+$ ) boven de dwarsdrager. De snede heeft een lengte van  $2d = 300\text{mm}$ .
- **Snede B:** Maximaal veldmoment in langsrichting ( $mx-$ ) tussen twee dwarsdragers. De snede heeft een lengte van  $2d = 300\text{mm}$ .
- **Snede C:** Maximaal veldmoment in dwarsrichting ( $my-$ ) tussen twee dwarsdragers. De snede heeft een lengte van  $2d = 300\text{mm}$ .
- **Snede D:** Maximaal steunpuntsmoment ( $my+$ ) in dwarsrichting ter plaatse van de uitkraging ( $h=300\text{mm}$ ). De snede is genomen direct naast bovenflens van de hoofdligger. De snede heeft een lengte van  $2d = 500\text{mm}$ .
- **Snede E:** Maximaal steunpuntsmoment ( $my+$ ) in dwarsrichting ter plaatse van de uitkraging ( $h=200\text{mm}$ ). De snede is genomen aan het begin van de dekverdikking. De snede heeft een lengte van  $2d = 500\text{mm}$ .

Overzicht sneden locaties 1 t/m 4



Figuur 86 Overzicht sneden per locatie

## Projectgerelateerd



In onderstaande tabel zijn de krachten en unity checks van de maatgevende sneden gepresenteerd. Voor de berekeningen van de situatie voor versterken wordt verwezen naar de verificatieberekening. De berekeningen van de situatie na versterking zijn gegeven in Bijlage C4.f.

Positie	Onderdeel	Snede	h	Voorsp.	Voor versterking			Na versterking		
					N <sub>Ed</sub>	M <sub>Ed</sub>	UC	N <sub>Ed</sub>	M <sub>Ed</sub>	UC
				[kN/m]	[kN/m]	[kNm/m]		[kN/m]	[kNm/m]	
Steunpunt E	M <sub>stp</sub> langsrichting	Snede 2A	200	-1372	1151	42,6	0,74	1188	42,8	0,77
	M <sub>veld</sub> langsrichting	Snede 2B	200	-1372	1055	57,8	0,68	1079	52,7	0,63
	M <sub>veld</sub> dwarsrichting	Snede 2C	200	-	-98,6 <sup>2</sup>	63,0	0,99 <sup>1</sup>	-6,3 <sup>2</sup>	58,6	1,02 <sup>1</sup>
	M <sub>stp</sub> dwarsrichting h=300	Snede 2D	300	-	83,2	127,5	0,81 <sup>1</sup>	45,8	124,1	0,77 <sup>1</sup>
	M <sub>stp</sub> dwarsrichting h=200	Snede 2E	200	-	0,0	54,6	0,63 <sup>1</sup>	0,0	54,4	0,61 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> obv lineaire combinatie van maximaal moment

<sup>2</sup> De ontwerpgroothed voor de normaaldrukkracht (myD- + nyD) wordt door SCIA conservatief op 0 gezet. Daarom is er uitgegaan van de basiswaarde (my + ny) van de normaalkracht

Tabel 59 Overzicht unity checks voorgespannen deel

Positie	Onderdeel	Snede	h	Voor versterking			Na versterking		
				N <sub>Ed</sub>	M <sub>Ed</sub>	UC	N <sub>Ed</sub>	M <sub>Ed</sub>	UC
				[kN/m]	[kNm/m]		[kN/m]	[kNm/m]	
Midden veld 2	M <sub>stp</sub> langsrichting	Snede 1A	200	120,5	14,4	0,36	200,9	22,1	0,63
	M <sub>veld</sub> langsrichting	Snede 1B	200	-808,8 <sup>2</sup>	69,0	0,64 <sup>1</sup>	-730,6 <sup>2</sup>	59,1	0,57 <sup>1</sup>
	M <sub>veld</sub> dwarsrichting	Snede 1C	200	-244,6	64,1	0,88 <sup>1</sup>	-175,0	58,8	0,86 <sup>1</sup>
	M <sub>stp</sub> dwarsrichting h=300	Snede 1D	300	-90,6	84,7	0,48 <sup>1</sup>	-86,3	87,0	0,49 <sup>1</sup>
	M <sub>stp</sub> dwarsrichting h=200	Snede 1E	200	-51,5	40,7	0,60 <sup>1</sup>	-49,2	42,0	0,62 <sup>1</sup>
Midden veld 3	M <sub>stp</sub> langsrichting	Snede 3A	200	104,6	14,7	0,36	93,0	22,0	0,53
	M <sub>veld</sub> langsrichting	Snede 3B	200	-1099,5 <sup>2</sup>	68,9	0,58 <sup>1</sup>	-930,2 <sup>2</sup>	49,5	0,44 <sup>1</sup>
	M <sub>veld</sub> dwarsrichting	Snede 3C	200	-245,5	63,1	0,86 <sup>1</sup>	-181,8	58,7	0,85 <sup>1</sup>
	M <sub>stp</sub> dwarsrichting h=300	Snede 3D	300	-97,6	84,7	0,86 <sup>1</sup>	-87,6	86,9	0,64 <sup>1</sup>
	M <sub>stp</sub> dwarsrichting h=200	Snede 3E	200	-55,4	40,8	0,45 <sup>1</sup>	-50,7	42,1	0,47 <sup>1</sup>
Steunpunt F	M <sub>stp</sub> langsrichting	Snede 4A	200	85,3	20,2	0,48	75,9	24,6	0,58
	M <sub>veld</sub> langsrichting	Snede 4B	200	46,2	63,4	0,97	41,5	52,4	0,80
	M <sub>veld</sub> dwarsrichting	Snede 4C	200	-239,0 <sup>2</sup>	63,73	0,88 <sup>1</sup>	-188,5 <sup>2</sup>	54,3	0,78 <sup>1</sup>
	M <sub>stp</sub> dwarsrichting h=300	Snede 4D	300	50,1	127,7	0,79 <sup>1</sup>	58,5	98,1	0,61 <sup>1</sup>
	M <sub>stp</sub> dwarsrichting h=200	Snede 4E	200	45,0	57,5	0,69 <sup>1</sup>	-66,8	43,3	0,48 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> obv lineaire combinatie van maximaal moment

<sup>2</sup> De ontwerpgroothed voor de normaaldrukkracht (nyD + nxD) wordt door SCIA conservatief op 0 gezet. Daarom is er uitgegaan van de basiswaarde (ny + nx) van de normaalkracht

Tabel 60 Overzicht unity checks gewapend deel

Met name de Unity Checks van de sneden A (langsrichting, steunpunt) in het gewapende dek nemen toe. Dit komt met name door de toename van de temperatuur effecten, door de hogere stijfheid van de hoofdlijn door het toevoegen van het T-stuk. Dit is in lijn met de hogere spanning in de stalen bovenflens van de hoofdlijn door de temperatuur belasting. Voor de hoofdlijn zelf geldt dat het effect van de grotere temperatuur effecten op de totale UC relatief beperkt is, omdat de spanningen niet bepaald worden door de permanente belasting. Voor het (gewapende) betondek geldt dit echter niet, omdat deze pas in één van de laatste fasen gestort is, waardoor de krachten niet door de veranderlijke belastingen worden bepaald. Hierdoor is het effect op de UC groter. Desondanks voldoet de betondoorsnede ook na versterking nog steeds. De geringe overschrijding in snede 2C wordt als acceptabel gezien, zeker omdat nog niet gerekend is met de gereduceerde windbelasting en belasting combinaties.

#### 5.4.2.2 Toetsing dwarskracht

De toetsing van het dek op dwarskracht en pons zal door de versterking niet veranderen. De toets is daarom niet opnieuw uitgevoerd voor de versterkte situatie.

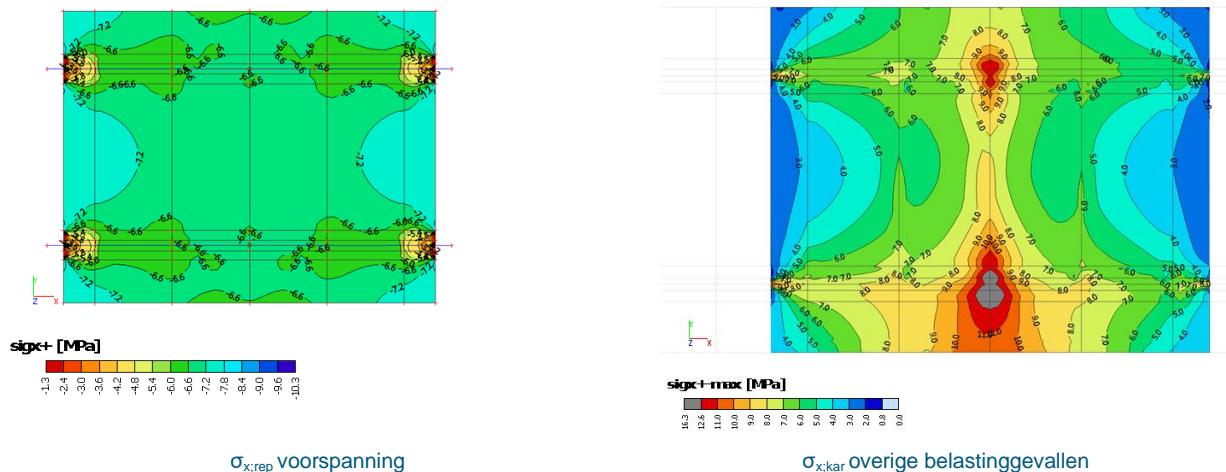
#### 5.4.3 Toetsing aanname ongescheurd dek

Voor de stijfheid van het beton is uitgegaan van ongescheurd beton; zie uitgangspuntennotitie H 8.4.7. Op basis van de modeluitvoer is geverifieerd of de aanname klopt dat het gehele betondek onder druk blijft. Hierbij wordt het dek als gescheurd verondersteld als de optredende spanning in de karakteristieke belasting combinatie groter is dan tweemaal  $f_{ctm}$ . Voor beton K450 komt dit neer op een maximale spanning van  $2 * 3,02 \text{ Mpa} = 6,0 \text{ Mpa}$ .

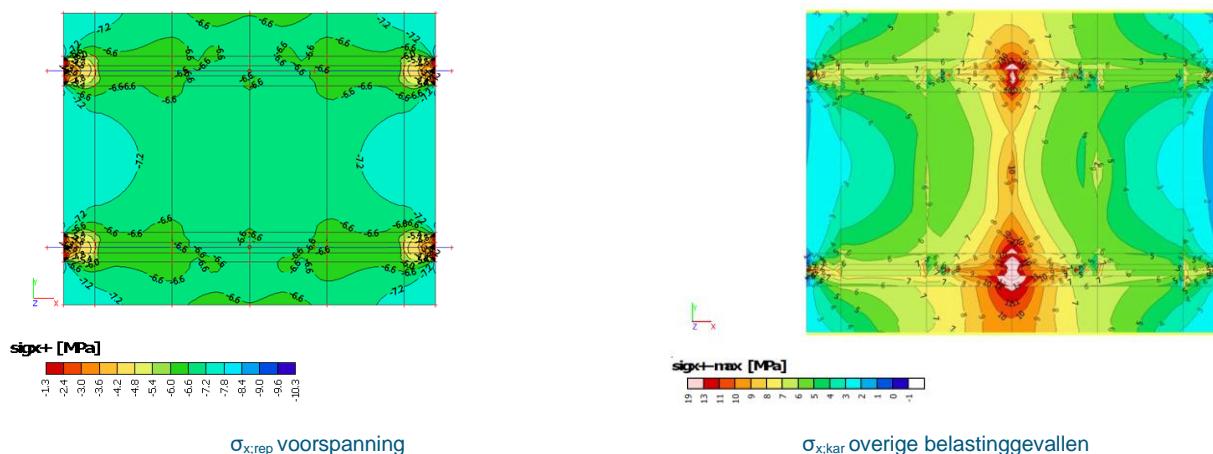
Op basis van onderstaande analyse is geconcludeerd dat het gehele betondek in de eindsituatie ongescheurd blijft, ook na de versterking van de hoofdlijn en de portalen. In de modellering is de ongescheurde stijfheid van het beton dan ook correct meegenomen.

### Voorgespannen dek

In Figuur 87 en Figuur 88 is te zien dat de gemiddelde drukspanning ten gevolge van voorspanning 6,6 MPa bedraagt. In de rechter figuren zijn de maximale trekspanningen ten gevolge van de overige belastinggevallen weergegeven, waarbij Figuur 87 de situatie voor versterking weergeeft en Figuur 88 de situatie na versterken. Daar waar de spanning hoger is dan  $| -6,6 | + 6,0 = 12,6 \text{ MPa}$  is sprake van gescheurd beton.



Figuur 87 Normaalspanningen voorgespannen betondek voor versterking (gebruik)

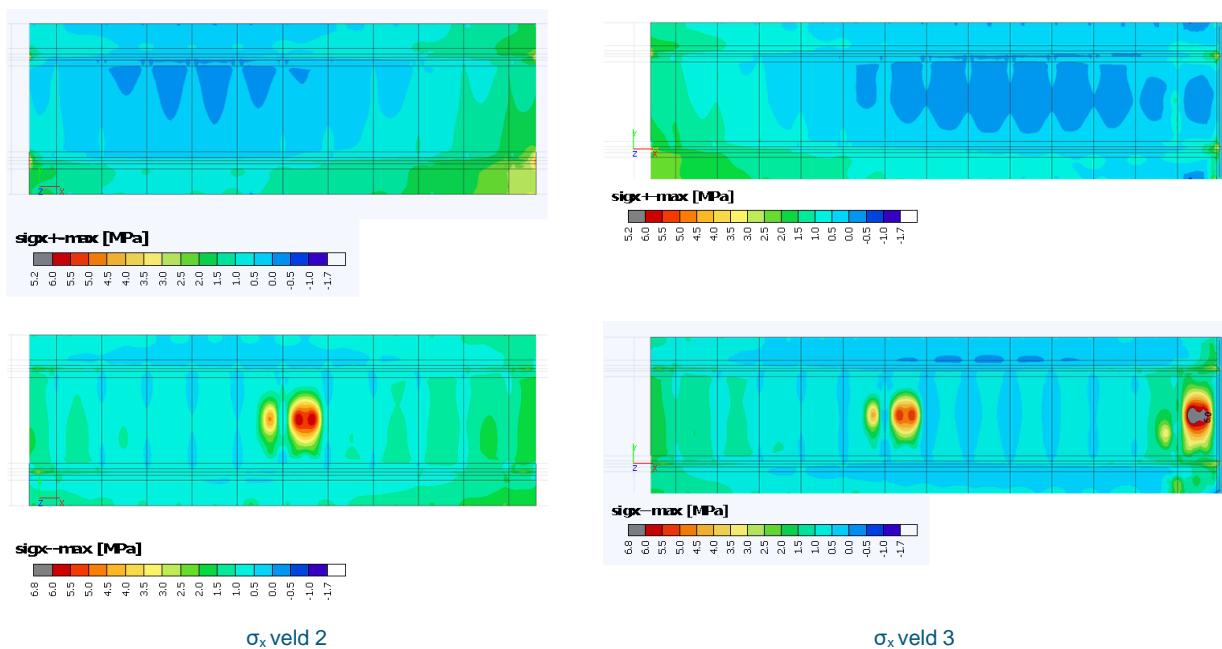


Figuur 88 Normaalspanningen voorgespannen betondek na versterking (gebruik)

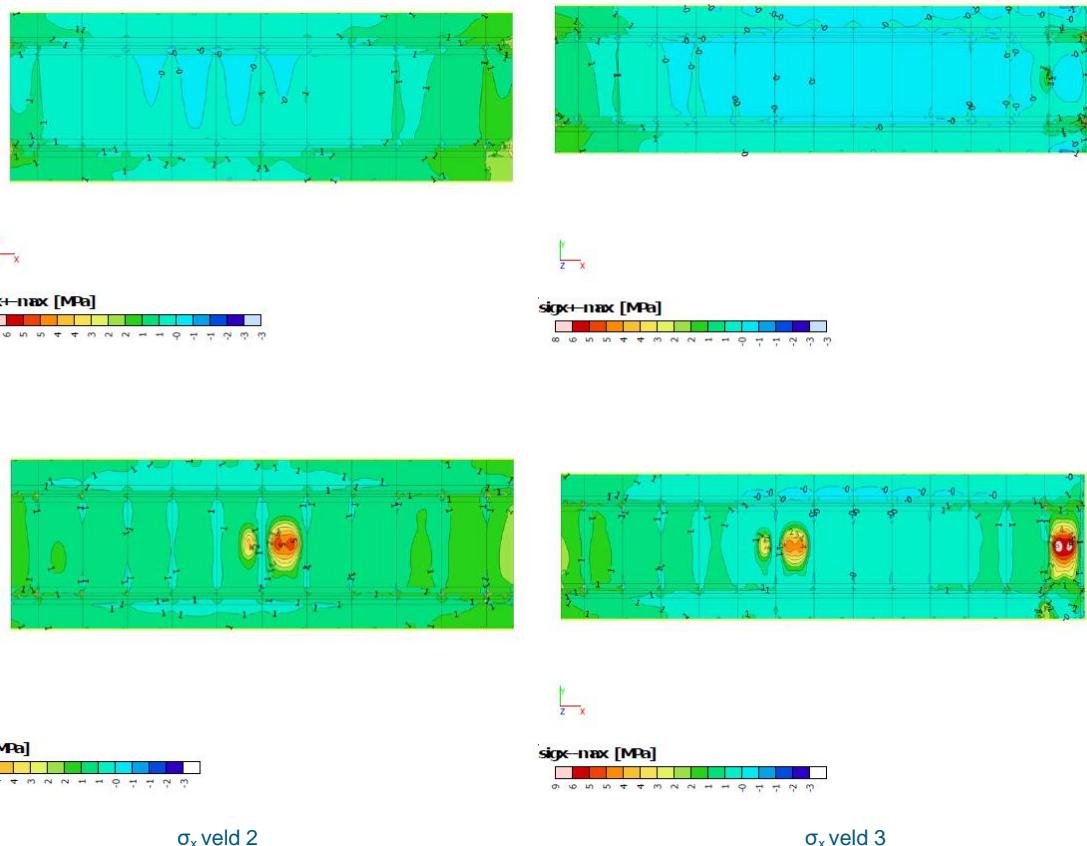
Te zien is dat zeer lokaal, ter plaatse van de opleggingen (grijze gebied), scheurvorming op zal treden. Gezien de beperkte omvang van het gebied (circa 1m) is de aanname dat het gehele voorgespannen dek ongescheurd blijft gehandhaafd. In de versterkte situatie is het gescheurde nagenoeg gelijk gebleven ten opzichte van de onversterkte situatie.

### Gewapende dek

In Figuur 89 en Figuur 90 zijn de maximale trekspanningen aan de onder- en bovenzijde van het betondek van veld 2 en veld 3 weergegeven voor respectievelijk de situatie voor versterking en na versterking. Te zien is dat de optredende langsspanningen in het gehele gewapende dek onder de maximale trekspanning van  $2 f_{ctm}$  (= 6,0 MPa) blijven. Enkel zeer lokaal, ter plaatse van de onderzijde van het dek tussen de eerste twee dwarsdragers is de spanning hoger. Gezien de beperkte omvang van het gebied (circa 1m) waar de spanning hoger is dan 6,0 MPa is de aanname dat het dek ongescheurd blijft gehandhaafd. Er zijn geen grote verschillen in de situatie voor en na versterking, zoals verwacht.



Figuur 89 Normaalspanningen (langsrichting) gewapend betondek voor versterking



Figuur 90 Normaalspanningen (langsrichting) gewapend betondek na versterking

## 5.5 Inspectiepaden

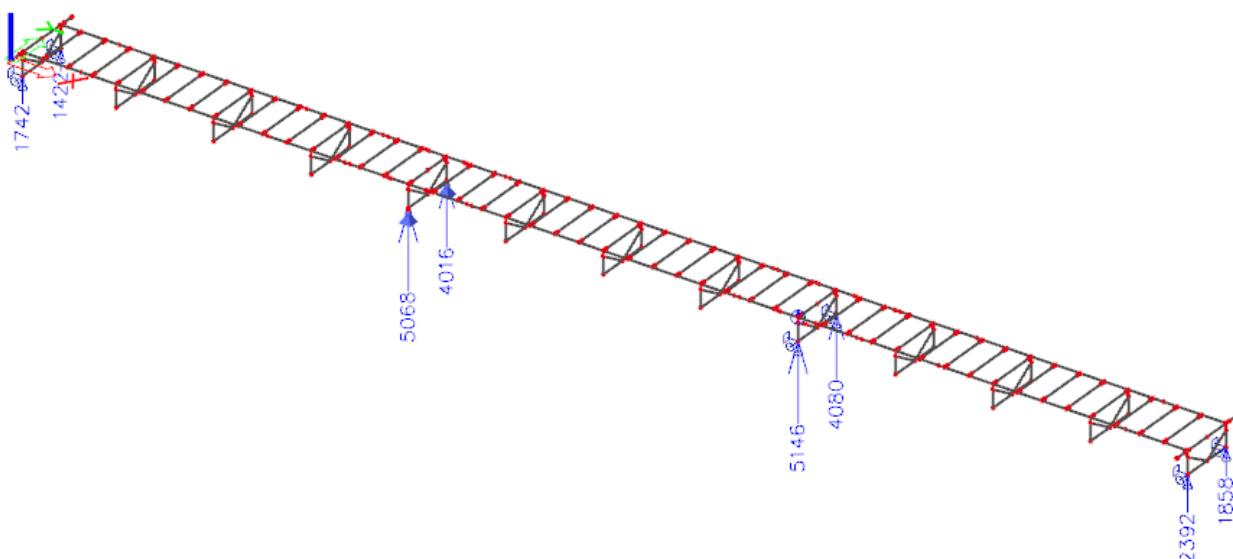
De constructie van de inspectiepaden wordt door de versterking niet beïnvloed. Voor de berekening van dit onderdeel wordt verwezen naar de verificatieberekening [T&P-BF7387-R005]. Gecorrodeerde onderdelen kunnen vervangen worden conform bestaand.

## 5.6 Opleggingen en vijzelpunten

### 5.6.1 Opleggingen

#### Ontwerp oplegreacties

De oplegreacties zijn op vergelijkbare wijze als in de verificatieberekening vergeleken met de capaciteit van de opleggingen. In de Scia berekening worden de volgende oplegreacties gevonden in de situatie na versterking op gebruiksniveau.



Figuur 91 Oplegreacties UGT gebruik

Het tandemstelsel is vanwege symmetrie alleen toegepast op de rechterhelft van de brug plus boven het vaste steunpunt. De reactiekracht van pijler C dient daarom gelijk aangehouden te worden als pijler F.

#### Toetsing conform NEN 1337-4

##### Pijler C/F

Wanneer deze toetsing volgens de huidige norm (NEN 1337-4:2005) uitgevoerd wordt, wordt een karakteristieke weerstand van de contactdruk per eenheidslengte gevonden van:

$$N'_{Rk} = 23 \cdot R \cdot \frac{f_u}{E_d} = 23 \cdot 175 \cdot \frac{600^2}{210000} = 6,90 \text{ kN/mm}$$

Uitgaande van een lengte van 376 mm en  $\gamma_m = 1$  wordt een capaciteit gevonden van

$$N'_{Rd} = \frac{N'_{Rk}}{\gamma_m^2} \cdot 376 \text{mm} = 6,90 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \cdot 376 \text{mm} = 2594 \text{kN}$$

Uitgaande van een oplegreactie op gebruiksniveau in de versterkte situatie (2392 kN) wordt een  $UC = 0,92$  gevonden, waarmee de oplegging voldoet.

### Pijler D

Voor de taatsoplegging van pijler D wordt een karakteristieke weerstand van de contactdruk uitgerekend volgens ontwerpversie van NEN-EN 1337-6:2018, omdat de huidige versie van deze norm (NEN-EN 1337-6:2004) een foutieve formule voor de capaciteit bevat:

$$N_{Rd} = 139 \cdot \frac{\left(\frac{f_u}{\gamma_m}\right)^3 \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{E^2 \cdot (r_1 - r_2)^2} = 139 * \frac{\left(\frac{450}{1,0}\right)^3 \cdot 265^2 \cdot -250^2}{210000^2 \cdot (265 - 250)^2} = 5603 \text{ kN}$$

Uitgaande van een oplegreactie op gebruiksniveau (5068 kN) wordt een UC = 0,90 gevonden, waarmee de oplegging voldoet.

### Pijler E

De oplegging van pijler E wordt een karakteristieke weerstand van de contactdruk per eenheidslengte gevonden van:

$$N'_{Rk} = 23 \cdot R \cdot \frac{f_u}{E_d} = 23 \cdot 235 \cdot \frac{600^2}{210000} = 9,27 \text{ kN/mm}$$

Uitgaande van een lengte van 516 mm en  $\gamma_m = 1$  wordt een capaciteit gevonden van

$$N'_{Rd} = \frac{N'_{Rk}}{\gamma_m^2} \cdot 516 \text{ mm} = 9,27 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \cdot 516 \text{ mm} = 4781 \text{ kN}$$

Uitgaande van een oplegreactie op gebruiksniveau (5146 kN) wordt een UC gevonden van **UC = 1,08**.

Wanneer wordt uitgegaan van de gereduceerde belastingcombinaties, zoals beschreven in de uitgangspuntenrapportage paragraaf 6.4 en 6.9, wordt een oplegreactie van 4892 kN gevonden, met een **UC = 1,02**. De oplegging voldoet dus net niet. Gezien de geringe overschrijding wordt dit als acceptabel gezien.

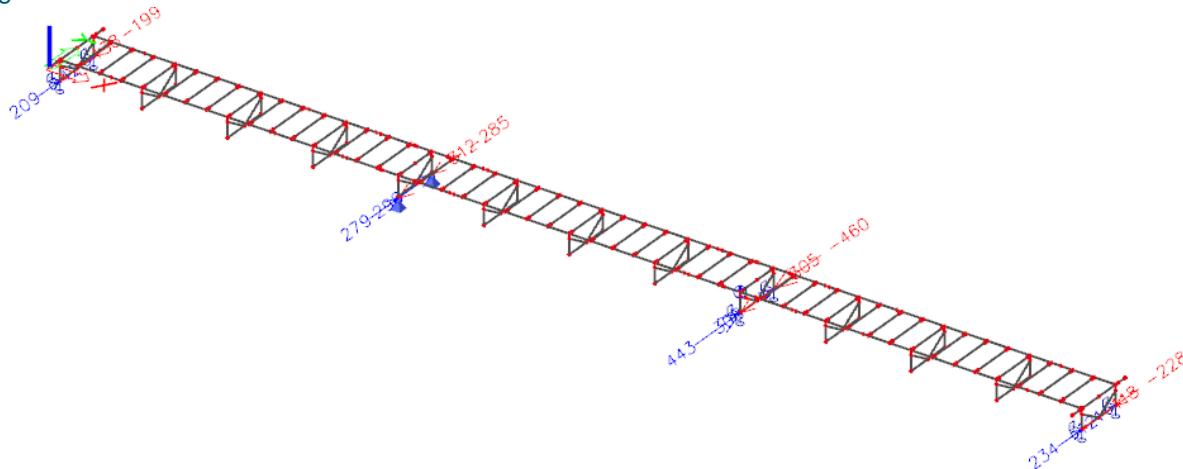
Steunpunt	Capaciteit (UGT)	Optreden (voor versterking ) Rz [kN]	UC	Optredend (na versterking) Rz [kN]	UC
Pijler C-F	2594	2359 (2228)	0,91 (0,86)	2392 (2259)	0,92 (0,87)
Pijler D (vaste opl)	5603	5022 (4767)	0,90 (0,85)	5068 (4817)	0,90 (0,86)
Pijler E (rol opl)	4781	5092 (4835)	1,06 (1,01)	5146 (4892)	1,07 (1,02)

Tabel 61 Vergelijking oplegreacties gebruiksniveau met berekende capaciteit conform NEN-EN 1337

Geconcludeerd wordt dat de verticale oplegreacties voldoen, mits er geen sprake is van materiaalafname door corrosie.

## Horizontale oplegreacties in dwarsrichting

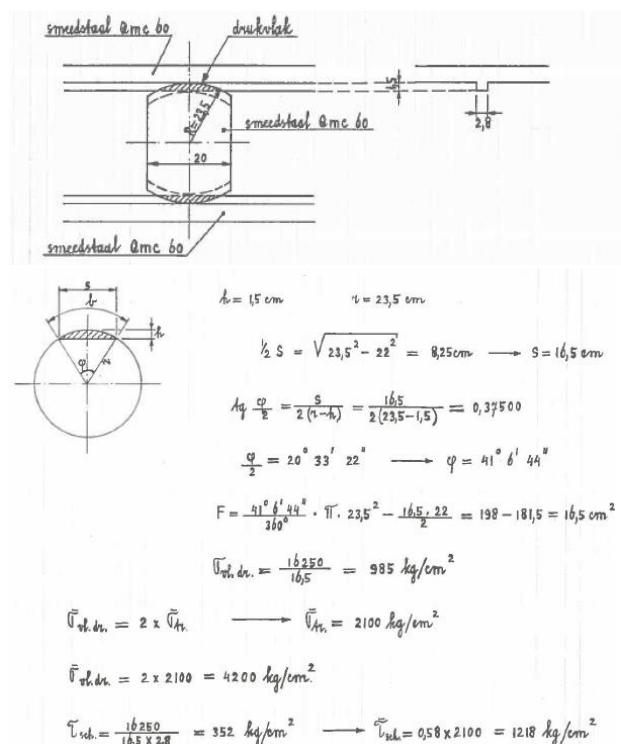
Er zijn geen ontwerpcapaciteiten van de opleggingen bekend. Daarom is de capaciteit bepaald analoog aan de (her)berekening [BBV0010-01]. Volgens SCIA worden de onderstaande horizontale oplegreacties gevonden.



Figuur 92 Horizontale oplegreacties UGT gebruik

## Pijler C en F

De capaciteit wordt analoog aan de herberekening [BBV-0010-01] bepaald. Maatgevend is het drukvlak(nok) aan de boven- en onderzijde van de rol. In de herberekening [BBV-0010-01] is abusievelijk uitgegaan van een capaciteit van 2x de treksterkte. Dit lijkt een fout te zijn en is daarom niet toegepast.



Figuur 93 Fragment van berekening nok opleggingen 158 ton en 203 ton uit [BBV-0010-01]

**Op basis van de nieuwe belastingen kan analoog de volgende berekening worden gemaakt.**

**Pijler C en F**

$F_h = 234 \text{ kN (UGT)}$	$F_h = 460 \text{ kN (UGT)}$
$\sigma_{vl,dr} = 234 \text{ kN} / 16,5 \text{ cm}^2 = 142 \text{ N/mm}^2$ $f_{vl,dr} = 340 \text{ N/mm}^2$ $UC = 137 / 340 = 0,42$	$\sigma_{vl,dr} = 460 \text{ kN} / 16,5 \text{ cm}^2 = 278 \text{ N/mm}^2$ $f_{vl,dr} = 340 \text{ N/mm}^2$ $UC = 278 / 340 = 0,82$
$\tau_{f,Ed} = 234 \text{ kN} / 16,5 \text{ cm} \times 2,8 \text{ cm} = 50,6 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{f,Rd} = 0,58 * 340 \text{ N/mm}^2 = 197 \text{ N/mm}^2$ $UC = 50,6 / 197 = 0,26$	$\tau_{f,Ed} = 460 \text{ kN} / 16,5 \text{ cm} \times 2,8 \text{ cm} = 100 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{f,Rd} = 0,58 * 340 \text{ N/mm}^2 = 109 \text{ N/mm}^2$ $UC = 100 / 109 = 0,51$

**Pijler D (vaste oplegging)**

Voor de opleggingen ter plaatse van pijler D (vaste oplegging) zijn geen horizontale capaciteiten gegeven. Ook in de herberekening wordt er verder niet gerekend aan de horizontale capaciteit van de vaste oplegpunten. Hierover kan dan ook geen uitspraak worden gedaan of deze voldoet. Overwogen kan worden hier een herberekening van uit te laten voeren.

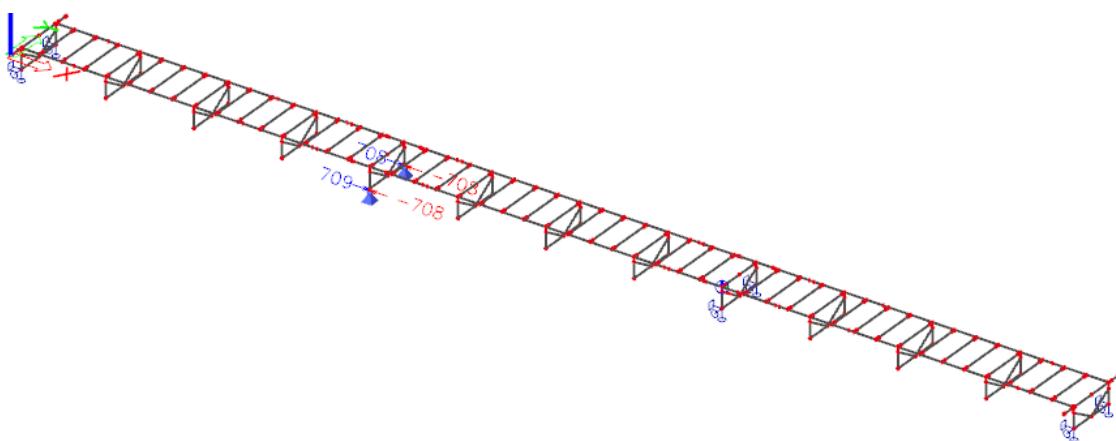
Steunpunt	Voor versterking			Na versterking		
	Ry [kN]	UC druk	UC afschuiving	Ry [kN]	UC druk	UC afschuiving
Pijler C-F	219	0.39	0.24	234	0.42	0.26
Pijler D (vaste oplegging)	283			312		
Pijler E (rol oplegging)	429	0.76	0.47	460	0.82	0.51

Tabel 62 UC's opleggingen voor en na versterking (UGT gebruik)

### Horizontale oplegreacties langsrichting

Bij pijler D ontstaan naast de oplegreacties in dwarsrichting ook oplegreacties in langsrichting.

Onderstaand figuur geeft de gevonden oplegreacties weer. Ook voor de langsrichting geldt dat er geen horizontale capaciteiten van de oplegging gegeven zijn in de ontwerp- en herberekeningen. Hierover kan dan ook geen uitspraak worden gedaan of deze voldoet. Aanbevolen wordt hier een herberekening van uit te voeren. Wel wordt opgemerkt dat de horizontale oplegreacties in langsrichting relatief hoog zijn en in belangrijke mate veroorzaakt worden door de volledig vast gemodelleerde steunpunten. In werkelijkheid hebben de opleggingen speling, waardoor de dwangkrachten lager zullen zijn. Ten opzichte van de situatie voor versterking (728 kN) zijn de horizontale krachten iets lager geworden, wat verklaard kan worden doordat de windbelasting iets lager is, omdat gerekend is met de gereduceerde windbelasting. Deze reductie is groter als de toename door de hogere hoofdliggers.



Figuur 94 Horizontale oplegreacties in langsrichting UGT gebruik

### Reacties per belastinggeval

Om meer inzicht te krijgen in de belastingafdracht van de verschillende belastinggevallen zijn in onderstaande tabel de bijdragen van de verschillende belastingcomponenten (zonder belastingfactor) samengevat.

		Pijler C-F			Pijler D (vaste opl)			Pijler E (rol opl)		
		R <sub>X,max</sub>	R <sub>Y,max</sub>	R <sub>Z,max</sub>	R <sub>X,max</sub>	R <sub>Y,max</sub>	R <sub>Z,max</sub>	R <sub>X,max</sub>	R <sub>Y,max</sub>	R <sub>Z,max</sub>
UGT (gebruik)	[kN]	0	234	2392	709	312	5068	0	460	5146
BGT (kar)	[kN]	0	178	1950	528	216	4173	0	336	4234
Permanent	[kN]	0	32	846	0	5	2223	0	60	2248
Verkeer	[kN]	0	48	955	17	24	1609	0	29	1620
Remmen	[kN]	0	5	13	325	1	3	0	1	12
Wind F*w	[kN]	0	92	137	194	170	320	0	216	337
Temperatuur	[kN]	0	68	67	1	57	67	0	74	72

Tabel 63 Resultaten belastinggevallen reactiekragten

De permanente belasting en de verkeersbelasting geven de grootste bijdrage aan de oplegkrachten. Het effect van de temperatuur en rembelastingen is klein in vergelijking met de bijdrage van windbelasting.

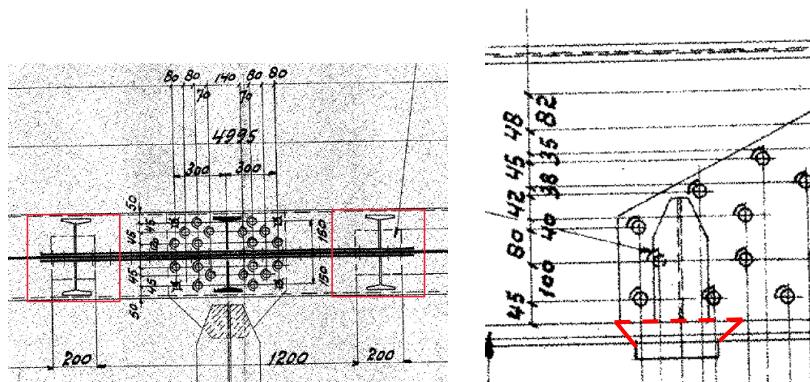
## 5.6.2 Vijzelpunten

### Vijzelpunten ter plaatse van de tussensteunpunten

De vijzelpunten zijn getoetst op de oplegspanning ter plaatse van het lijf, in de snede net boven de onderflens. Deze oplegdruk is, door het nieuwe T-stuk, iets toegenomen. Daarnaast is een toetsing uitgevoerd van de dwarsgerichte belasting in het lijf van de hoofdligger, welke getoetst dient te worden op de interactie met de spanningen (plooï) in langsrichting. De berekening is opgenomen in de plooitoetsing van de hoofdligger van snede C, zie Bijlage C1.

#### Oplegspanning lijf en verstijver

In de snede in het lijf net boven de onderflens is een toets uitgevoerd op de vergelijkspanning, uitgaande van een spreiding van de oplegdruk onder  $45^\circ$  in de onderflens. Aan weerszijde van het lijf zijn verstijvers aangebracht, welke meegenomen zijn in het oppervlak. Aangenomen wordt dat de brug volledig belast wordt tijdens het vijzelen en dat elk vijzelpunt 50% van de belasting opneemt (hydraulisch gekoppelde vijzels).



Figuur 95 Oplegvlakken vijzelpunten ter plaatse van pijler B

In onderstaande tabel zijn de resultaten samengevat. Voor het lijf is rekening gehouden met de spanningen in langrichting.

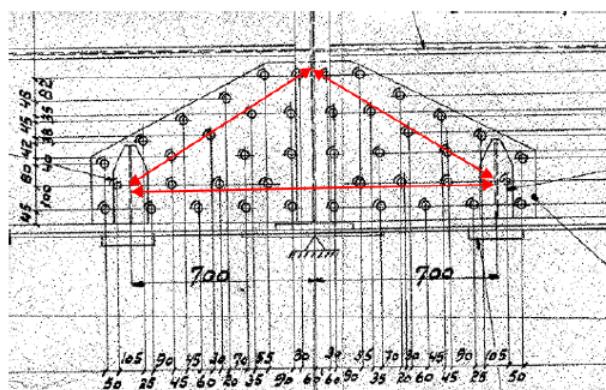
Steunpunt	Voor versterking			Na versterking		
	$\sigma_{vgl,Ed}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	UC	$\sigma_{vgl,Ed}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	UC
Pijler E (lijf)	329	350	0,94	329	350	0,94
Pijler E (verstijver)	138	215	0,40	140	215	0,40

Tabel 64. Overzicht unity checks oplegdruk boven vijzelpunten (UGT gebruik)

De toename van de spanningen door de versterking is minimaal en kan verklaard worden door de toename van het eigen gewicht door het T-stuk.

#### Toetsing dwarsgerichte belasting

Aangenomen wordt dat de dwarsgerichte belasting boven de vijzelpunten deels via de opdikplaten worden afgedragen naar de dwarsverstijver boven het normale steunpunt. Het andere deel wordt via de lijfplaat zelf afgedragen. Voor de verdeling van de belastingen over deze twee systemen wordt aangenomen dat deze zich verdeeld op basis van de dikte van de verschillende platen. Getoetst worden de trek- en drukdiagonalen in de opdikplaten en de interactie tussen plooï en dwarsgerichte belastingen in het lijf boven de vijzelpunten, zie Bijlage C1.b en c.



Figuur 96 Afdracht van de dwarsgerichte belastingen in de opdikplaten ter plaatse van pijler E

In de interactie formule wordt het combinatie van het buiging moment en dwarsgerichte belasting getoetst. De maximale dwarsgerichte belasting treedt op bij verkeer boven de oplegging, terwijl het maximale moment optreedt bij verkeer in het veld. Daarom is de interactieformule aangenomen dat bij het maximale moment er 80% van de dwarsgerichte belasting aanwezig is.

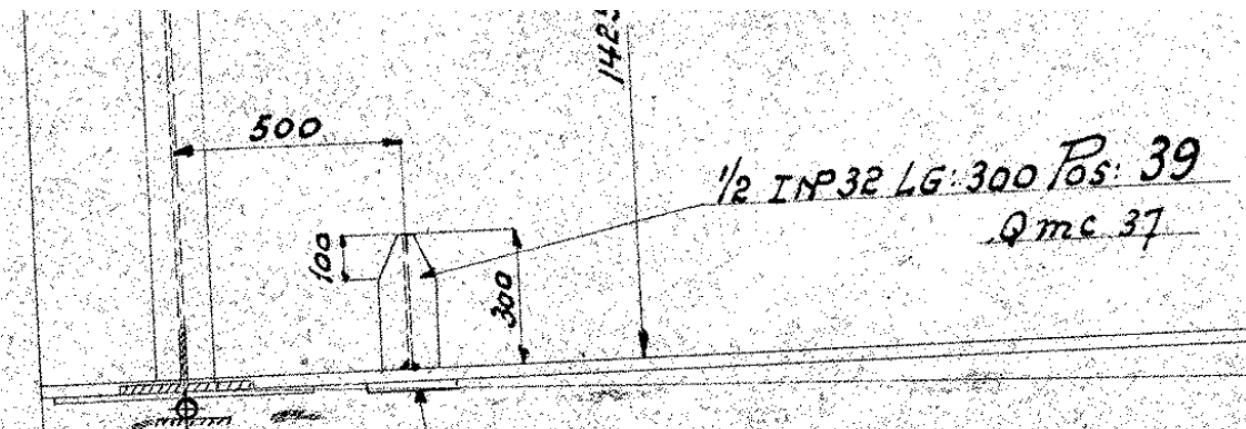
Steunpunt	Voor versterking			Na versterking		
	$\sigma_{vgl,Ed}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	UC	$\sigma_{vgl,Ed}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	UC
Pijler E (drukdiagonaal)	263	350	0,75	266	350	0,76
Pijler E (trekband)	155	350	0,44	157	350	0,45
Pijler E (dwarsgerichte belasting $\eta_2$ )	$UC = \eta_2 = F_{vp}/F_{Rd}$		0.73	$UC = \eta_2 = F_{vp}/F_{Rd}$		0.74
Pijler E (interactie plooï en dwarsgerichte	$UC = (0.8*\eta_1 + 0.8*\eta_2) / 1.4$		0.96	$UC = (0.8*\eta_1 + 0.8*\eta_2) / 1.4$		0.96

Tabel 65 Overzicht unity checks oplegdruk boven vijzelpunten (UGT gebruik)

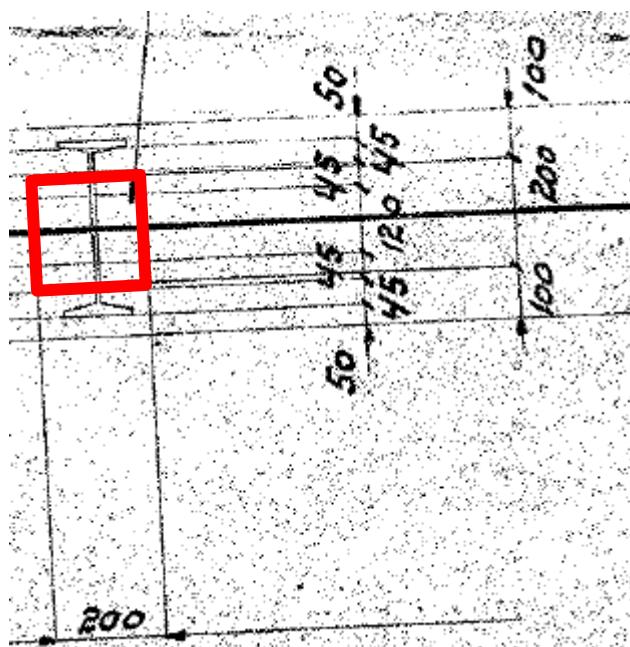
De toename van de spanningen door de versterking is minimaal.

### Vijzelpunten ter plaatse van de eindsteunpunten

De vijzelpunten ter plaatse van de eindsteunpunten zijn in de huidige situatie niet in staat de verkeersbelasting te dragen, omdat enerzijds het oplegblad onder de onderflens te smal is (200 mm) om de oplegkrachten (met name moment in het vlak van het portaal) in te kunnen leiden in de flenzen van de  $\frac{1}{2}$  INP32 profielen aan weerszijde van het lijf. Daarnaast zijn de  $\frac{1}{2}$  INP32 profielen boven het vijzelpunt maar 300 mm lang, waardoor de spanning volledig in het lijf zal moeten worden opgenomen, wat zal resulteren in plooij van het lijf. Dit zal onder volledige verkeersbelasting nooit voldoen, zeker gezien de UC van het normale eindsteunpunt, wat wel een volledige dwarsverstijver boven de oplegging heeft.

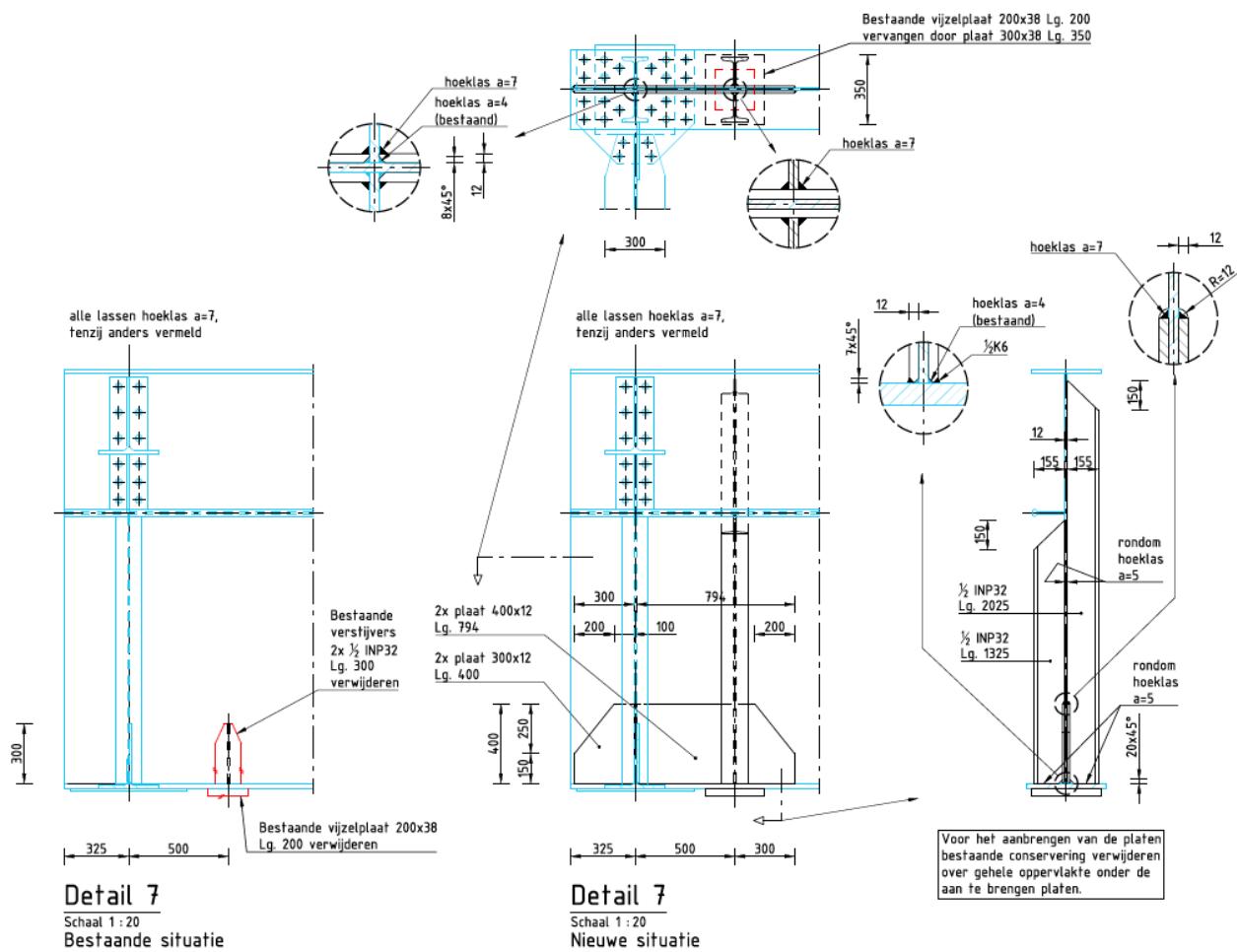


Figuur 97 Zijaanzicht van de huidige vijzelpunten ter plaatse van de eindsteunpunten



Figuur 98 Onderaanzicht van de huidige vijzelpunten ter plaatse van de eindsteunpunten

Als versterkingsmaatregel dient aan de onderzijde eenzelfde oplegvlak gecreëerd te worden als bij de eindopleggingen t.b.v. de krachtsinleiding in het vijzelpunt en dienen de  $\frac{1}{2}$  INP profielen boven de vijzelpunten langer te worden, om de kracht over voldoende lengte over te kunnen dragen naar het eindportaal/in te kunnen leiden vanuit het lijf van de hoofdligger. Hiervoor dienen de bestaande  $\frac{1}{2}$  INP32 profielen boven het vijzelpunt en de vijzelplaat onder de onderflens (200x200x38 mm) verwijderd te worden (rood weergegeven). De opdikplaten die worden toegevoegd voor de versterking van de verticalen boven de eindsteunpunten dienen tot voorbij de vijzelpunten door te lopen. Vervolgens dienen aan weerzijde van het lijf/de opdikplaten  $\frac{1}{2}$  INP32 profielen toegepast te worden boven het vijzelpunt die aan de buitenzijde tot nagenoeg bovenaan doorloopt en aan de binnenzijde tot net onder de dwarsverstijver doorloopt. Onder de onderflens dient een nieuwe vijzelplaat van 300x300x38 mm te worden toegepast.



Figuur 99 Versterking vijzelpunten ter plaatse van de eindsteunpunten

Over de lengte van de dwarsverstijver boven het vijzelpunt zullen de krachten geleidelijk via het lijf worden overgebracht naar de dwarsverstijver boven het eindsteunpunt en naar het lijf van de hoofdligger (inleiding dwarskracht). Voor de afmetingen van de profielen is uitgegaan van dezelfde doorsneden als van de dwarsverstijvers bij de eindoplegging. De sterktevergelijking komt daarom overeen met die van de verticalen van de k-verbanden bij de eindoplegging, zie paragraaf 5.3.2. Het oplegblok onder de onderflens is zodanig gekozen dat de kracht volledig kan worden in geleid in de flenzen van de  $\frac{1}{2}$  INP32 profielen en de meewerkende breedte van het lijf (147 mm aan weerszijden van de verstijvers).

## 6 Toetsing verbindingen

In de verificatieberekening zijn de volgende verbindingen getoetst op sterkte.

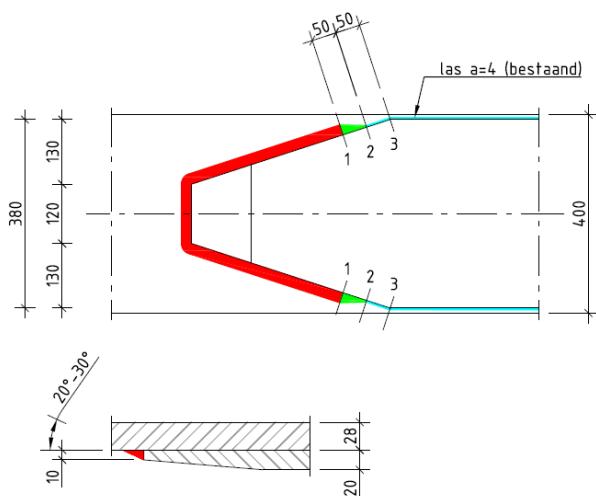
- Type 1 – lasverbinding onderflens hoofdligger
- Type 2 – klinknagelverbinding sectiedeling hoofdligger
- Type 4 – verbinding horizontalen K-verband met dwarsverstijver
- Type 7 – verbinding dwarsdragers met hoofdligger
- Type 9 – verbinding diagonalen

Per verbinding is gekeken of er sprake is van een toename van de krachten of de spanningen in de verbinding. Indien dit het geval is, is de verbinding opnieuw getoetst op sterkte. Daarnaast zijn de volgende nieuwe verbindingen gecontroleerd.

- Type 25 – Lasverbinding einde T-stuk
- Type 26 – Overkluiting V-naden

### 6.1 Verbinding: Type 1

De opdikplaat is met een hoeklas aan de onderflens van de hoofdligger gelast. De lasverbinding moet de spanning in de opdikplaat naar de onderflens van de hoofdligger overdragen. In de verificatieberekening is aangetoond dat de lasverbinding in de huidige situatie voldoet. In de versterkte situatie is de spanning in de opdikplaat afgenoemd, omdat het T-stuk onder de onderflens tot voorbij de uiteinden van de opdikplaten zijn doorgetrokken. Daarnaast is de bestaande las uitgebouwd van een las  $a = 4$  mm naar  $a = 8,6$  mm.

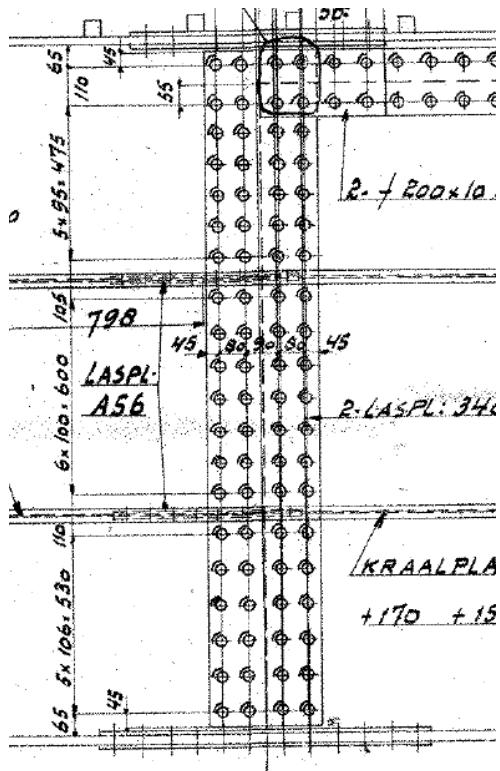


Figuur 100 Versterking van de lassen op de uiteinden van de opdikplaten.

Omdat zowel de over te brengen kracht is afgenoemd, als de keeldorsnede is vergroot, zal de verbinding ook in de versterkte situatie voldoen.

## 6.2 Verbinding: Type 2

De sectiedelingen van de hoofdlijger bevinden zich bij het begin en einde van het voorgespannen betondek. Ter plaatse van een sectiedeling zijn beide delen van de hoofdlijger met een klinknagelverbinding onderling verbonden.



Figuur 101 Zijaanzicht verbinding type 2

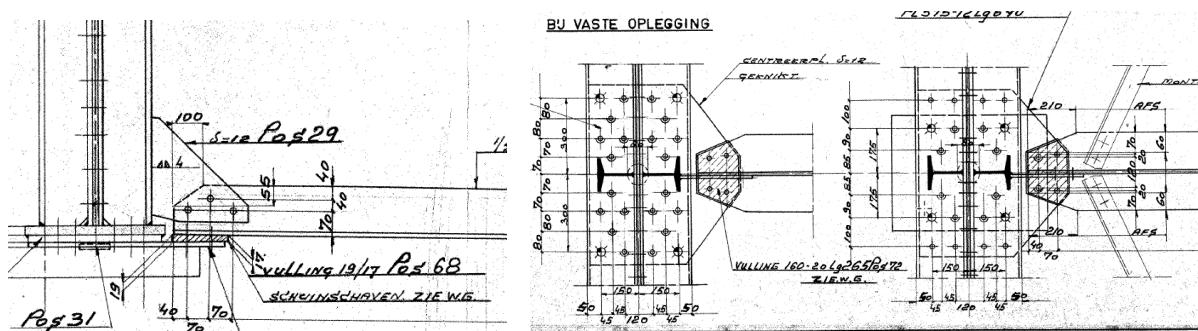
Uit de berekeningen in de huidige situatie zonder versterking is gebleken dat de verbinding voldoet. De versterking met het T-stuk wordt ook in de doorsnede met de sectiedeling toegepast. De spanningen zullen daardoor afnemen, zoals is aangetoond in de sterkteberekening. De verbinding zal daarom ook in de versterkte situatie voldoen.

### 6.3 Verbinding: Type 4

De onderrand van de k-verbanden zijn met de onderflens van de hoofdligger en de dwarsverstijver verbonden. Deze verbinding is niet bij alle K-verbanden gelijk, zo zit er een verschil in het profieltype en de klinknagelafstanden tussen de verbinding in de onderrand van het portaal bij de opleggingen en de tussenliggende k-verbanden. In de verificatieberekening is onderscheid gemaakt in type 4-1 (tussenliggende k-verbanden) en 4-2 (k-verband bij de oplegging).

Voor de tussenliggende k-verbanden werd een maximale UC in de verbinding van 0,20 gevonden in de huidige situatie. In de versterkte situatie zal er geen noemenswaardige verandering van de krachten optreden. Deze verbinding is daarom niet opnieuw getoetst.

Ter plaatse van de tussenopleggingen bestaat de horizontaal onderrand uit een  $\frac{1}{2}$  DIN 30 profiel.



Figuur 102 Verbinding horizontalen van K-verbanden met de hoofdliggers bij vaste oplegging.

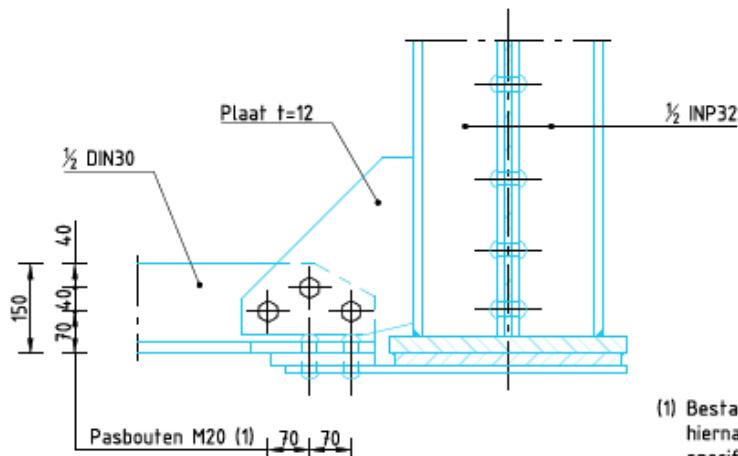
Met behulp van Mathcad zijn de klinknagels, lasverbinding en netto doorsnede opnieuw getoetst, zie Bijlage D1. Maatgevend is de verbinding ter plaatse van de vaste oplegging. De resultaten van de berekeningen zijn samengevat in Tabel 66.

Detail Type 4-2: Verbinding tussen onderrand van K-verbanden en hoofdligger (vaste tussenoplegging)				
Toetsaspect	Onderflens	Lijf	Verbindingsplaat	Knieschotplaat
Afschuiving klinknagels	1,00 (0,97)	1,15 (1,15)		
Netto doorsnede	0,26 (0,26)	0,75 (0,73)	0,55 (0,55)	0,75 (0,73)
Las verbinding				0,22 (0,21)

Tabel 66 Toetsingsresultaten van de verbinding tussen horizontaal met hoofdligger bij de vaste oplegging (gebruik).

Te zien is dat afschuiving van de klinknagels in het lijf niet meer voldoet. Ter vergelijking, in de huidige situatie voor versterking was de UC = 1,00. Ook onder de gereduceerde belastingcombinaties voldoet deze verbinding niet, zie Bijlage D1c. Maatgevend is afschuiving van de klinknagel, stuik voldoet wel. De 3 klinknagels (rond 20) in het lijf dienen daarom vervangen te worden.

Gekozen is voor een pasbout M20, kwaliteit 8.8, omdat de wrijving bij een voorspaninjectiebout niet gegarandeerd kan worden door de coating tussen de beide platen en de hars onvoldoende sterkte heeft om te voorkomen dat de bout gaat bewegen. Mocht bij het uitboren blijken dat het gat niet voldoet aan de eisen t.a.v. de gattolleranties voor een M20, dan dient het gat opgeboord te worden tot een M24 pasbout. Voor de volledige beschrijving van de uit te voeren stappen wordt verwezen naar rapport T&P-BF7387-R011.



- (1) Bestaande klinknagels ( $d=20$ ) uitboren, hierna gat uitboren conform specificaties leverancier.  
Indien het uitgeboorde gat groter is dan de steeldiameter van de pasbout dan een M24 toepassen. Klinknagels één voor één vervangen.  
Pasbouten 20% voorspannen.

### Detail versterking k-verband

Schaal 1 : 10

Alleen ter plaatse van vaste oplegging  
(pijler B en D)

Figuur 103 Versterking onderrand ter plaatse van vaste oplegging

De berekening van de boutverbinding is weergegeven in Bijlage D1d en is uitgevoerd op verbouwniveau. Hiermee wordt een UC van 0,67 gevonden voor de boutverbinding in het lijf.

Detail Type 4-2: Verbinding tussen onderrand van K-verbanden en hoofdligger (vaste tussenoplegging) (lijf met pasbouten)		
Toetsaspect	Lijf	Knieschotplaat
Afschuiving klinknagels	0,79	
Netto doorsnede	0,78	0,78
Las verbinding		0,23

Tabel 67 Toetsingsresultaten van de verbinding tussen horizontaal met hoofdligger bij de vaste oplegging (verbinding lijf met pasbouten).

Omdat de verbinding bij het vaste tussensteunpunt niet voldoet, is ook de verbinding bij het rollende tussensteunpunt gecontroleerd. Deze blijkt wel te voldoen. Dit kan verklaard worden doordat er hier meer belasting via de verticalen wordt afgedragen door de rotatie-inklemming, en dus minder via de diagonalen en onderrand.

Detail Type 4-2: Verbinding tussen onderrand van K-verbanden en hoofdligger (rollende tussenoplegging)				
Toetsaspect	Onderflens	Lijf	Verbindingsplaat	Knieschotplaat
Afschuiving klinknagels	0,84	0,84		
Netto doorsnede	0,21	0,36	0,44	0,36
Las verbinding				0,17

Tabel 68 Toetsing resultaten van de verbinding tussen horizontaal met hoofdligger bij de vaste oplegging.

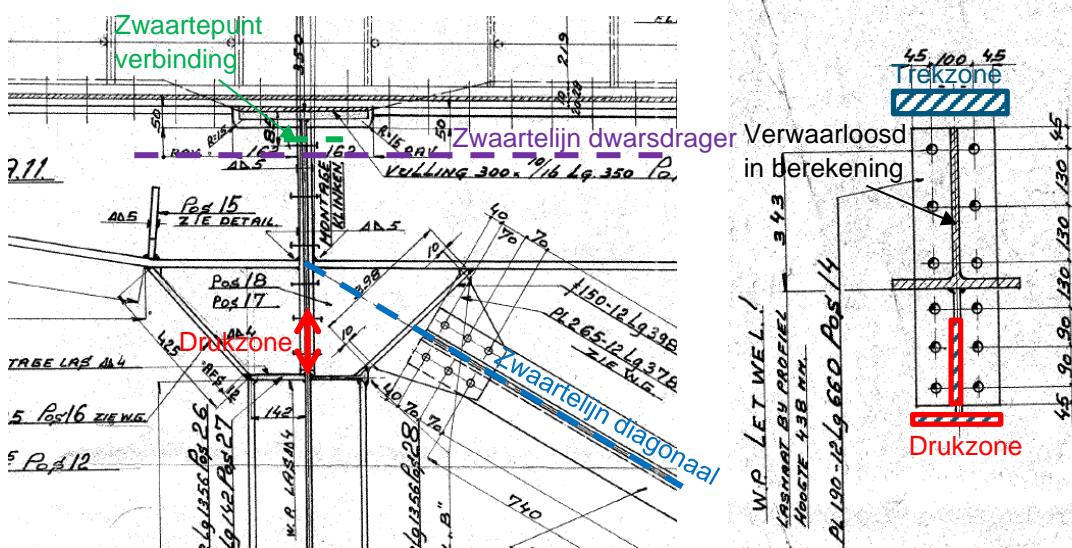
Geconcludeerd wordt dat de verbindingen tussen de onderrand van de K-verbanden en de hoofdligger voldoen in de versterkte situatie.

## 6.4 Verbinding: Type 7 en 10, 11 en 12

Voor de toetsing van de verbindingen van de dwarsdragers met de hoofdligger, console en de diagonaal van het K-verbanden is onderscheid gemaakt tussen de einddwarsdragers (type 7) en de overige dwarsdragers (type 10, 11 en 12).

### 6.4.1 Einddwarsdragers: Type 7

De einddwarsdragers zijn met een kopplaat met klinknagels verbonden aan het lijf van de hoofdligger. De kopplaat is met een hoeklas bevestigd aan beide zijden van het lijf en de flens van de dwarsdrager. De consoles zijn op dezelfde wijze verbonden met de hoofdligger. Figuur 104 toont de geometrie van de verbinding bij de einddwarsdrager.



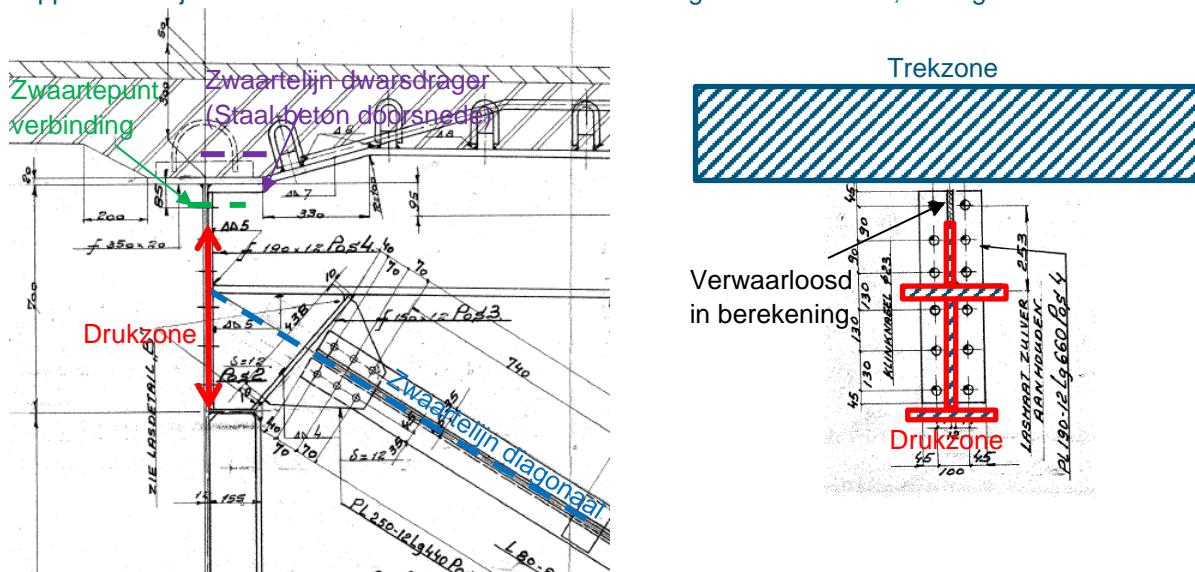
De resultaten van de berekeningen zijn samengevat in Tabel 69. Uit de berekening blijkt dat alle toetsingen voldoen. De UC's zijn nagenoeg gelijk als in de niet-versterkte situatie.

Detail Type 7: Verbinding tussen einddwarsdrager en hoofdliggers					
Toetsaspect	Klinknagels bovenflens	Klinknagels lijf	Las in het lijf	Las in de schot	Netto doorsnede
Console	0,17	0,13	0,22	0,43	0,31
Einddwarsdrager	0,22	0,19	0,50	0,74	0,53

Tabel 69 Unity checks verbindingen in einddwarsdrager.

#### 6.4.2 Overige dwarsdragers: Type 10, 11 en 12

De overige dwarsdragers (DIE 45) zijn met een aangelaste kopplaat en klinknagels verbonden met het lijf van de hoofdliggers. De bovenflens en een deel van het lijf van de dwarsdrager zijn ter plaatse van de kopplaat verwijderd ten behoeve van de afschuifverbinding in het betondek; zie Figuur 105.



Figuur 105 Overzicht van verbinding tussen dwarsdragers en hoofdligger.

De maximale spanningen treden op in de tussendwarsdrager ter plaatse van de rollende tussensteunpunt (type 11). De dwarsdragers ter plaatse van de overige K-verbanden (type 10) en de tussengelegen dwarsdragers (type 12) hebben lagere spanningen.

Uit de berekening blijkt dat een groot deel van de staaldoorsnede t.p.v. de verbinding op druk blijft. Voor de berekening is daarom de flens van het schot (150x12 mm), het lijf van het schot, de onderflens van de dwarsdrager en een deel van het lijf van de dwarsdrager (200 mm) meegenomen als drukpunt (rood weergegeven in Figuur 105). Het bovenste deel van het lijf wordt op trek belast en is niet meegenomen in de doorsnede (zwart weergegeven in Figuur 105), omdat hier een relatief slappe verbinding aanwezig is (kopplaat die haaks op zijn vlak op trek wordt belast). De trekbelasting in de bovenflens wordt opgenomen door de verankering die aan de bovenflens is gelast.

De snedekrachten zijn bepaald in de samengestelde staalbeton ligger, met een meewerkende breedte van 1,25 m. Het verschil in zwaartelijn van de staal-betondoorsnede van de dwarsdrager (paars weergegeven in Figuur 105) en de normaal- en dwarskracht van de diagonaal (lichtblauw weergegeven in Figuur 105) ten opzichte van het zwaartepunt van de verbinding (groen weergegeven in Figuur 105) zijn in de berekening meegenomen als toeslag op het moment. Voor de berekeningen wordt verwezen naar Bijlage D2. De resultaten zijn in Tabel 70 gepresenteerd.

<b>Detail Type 10, 11 en 12: Verbinding tussen dwarsdrager en hoofdliggers</b>					
Toetsaspect	Klinknagels lijf	Las in het lijf	Las in de onderflens	Las in de schot	Netto doorsnede onderzijde
Overige dwarsdragers	0,40	0,60	0,55	0,81	0,58

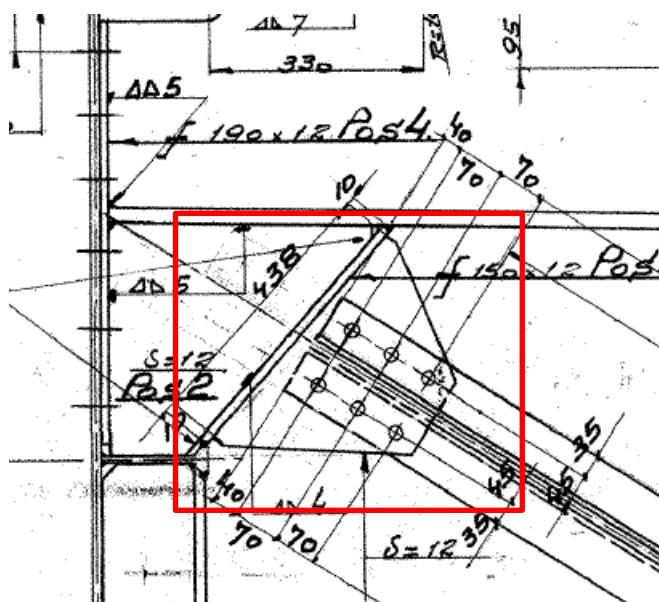
Tabel 70 Unity check overzicht van de verbindingen tussendwarsdrager en hoofdlijn.

## 6.5 Verbinding: Type 9

Voor de diagonalen zijn in de verificatieberekening twee type verbindingen getoetst; de verbinding aan de bovenzijde met de dwarsdrager (type 9-1) en de verbinding aan de onderzijde met de horizontaal (type 9-2). Maatgevend was de bovenzijde van de diagonalen. Deze verbinding is daarom opnieuw getoetst.

### 6.5.1 Verbinding van diagonalen met dwarsdragers: Type 9-1

De diagonalen bestaan uit twee hoekprofielen L80x80x10 en zijn met een geklonken schetsplaatverbinding verbonden met de dwarsdrager. De schetsplaat is met een hoeklas verbonden aan de flens van het schot tussen de dwarsdrager en dwarsverstijver; zie Figuur 106.



Figuur 106 Verbinding diagonalen van K-verbanden met de dwarsdragers,

Met behulp van Mathcad zijn de klinknagels, de lasverbinding en netto doorsnedes getoetst. De maatgevende krachten in de verbinding zijn bepaald met behulp van SCIA en zijn gegeven in Bijlage D3. Maatgevend is de diagonaal bij de vaste steunpunten. De resultaten van de berekeningen zijn samengevat in Tabel 71.

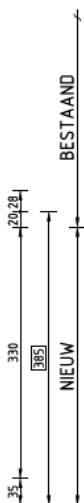
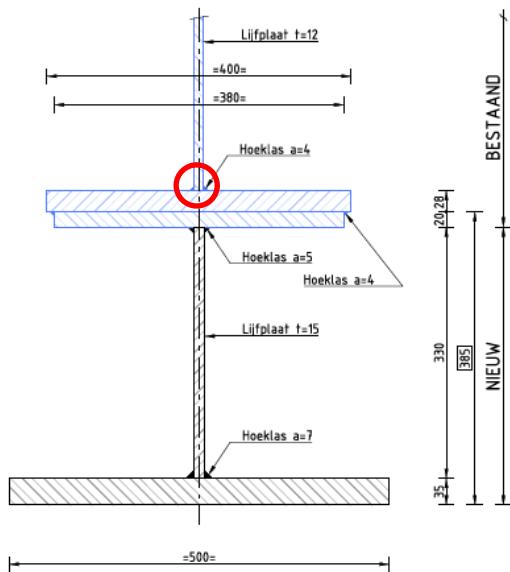
Detail Type 9-1: Verbinding tussen diagonalen en dwarsdragers				
Toetsaspect	Afschuiving klinknagels	Netto doorsnede profiel	Netto doorsnede schetsplaat	Las verbinding
Westelijk zijde	0,85	0,75	0,65	0,41

Tabel 71 Toetsing resultaten van de verbinding tussen diagonalen met dwarsdragers

## 6.6 Verbinding: Type 25 – Lasverbinding einde T-stuk

### 6.6.1 Lasverbinding lijf – flens bestaande hoofdlijker

Tussen het lijf en de flens en tussen de flens en de opdikplaat van de bestaande hoofdlijkers is een hoeklas  $a = 4$  mm aangebracht.



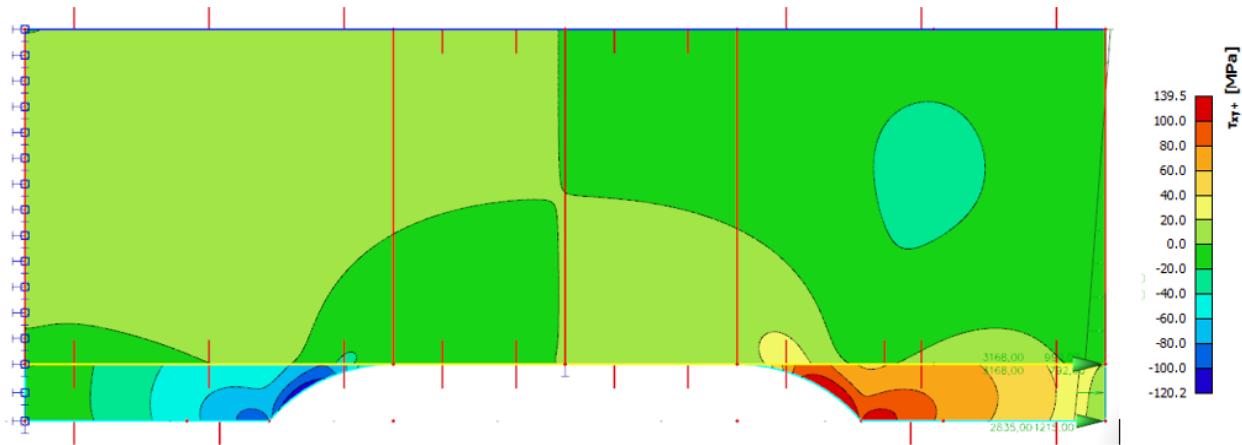
Figuur 107 Hoeklas tussen onderflens en lijf en tussen opdikplaat en onderflens

Door het toevoegen van het T-stuk zal er meer schuifspanning door deze verbinding gaan, met name aan het einde van het T-stuk, omdat hier de spanningen in het T-stuk overgedragen moeten worden naar de bestaande hoofdlijker. De schuifspanningen ten gevolge van het eigen gewicht en permanente belastingen, voor aanbrengen van het T-stuk, zijn bepaald met behulp van de volgende formule.

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} S_y}{t_w I_y}$$

Voor  $S_y$  is het oppervlak van het afschuivende deel genomen. Voor de versterking met het T-stuk bestaat dit enkel uit de onderflens met opdikplaat. Conservatief is uitgegaan van de maximale dwarskracht ter plaatse van het steunpunt. De schuifspanning in het lijf is omgerekend naar de schuifspanning in de las met  $\tau_{las} = \tau_{Ed} * (t_w / 2a)$ . De schuifspanning in de las door de permanente belasting, inclusief belastingfactoren, is 72 N/mm<sup>2</sup>, zie Bijlage D4.

De schuifspanningen ten gevolge van de variabele belastingen en eigen gewicht T-stuk is op vergelijkbare wijze als in de vermoeiingsberekeningen bepaald met een lokaal plaatmodel, waarbij aan de rechterzijde de normaalspanning ten gevolge van de variabele belasting plus eigen gewicht T-stuk (UGT verbouw) op het model is geplaatst.

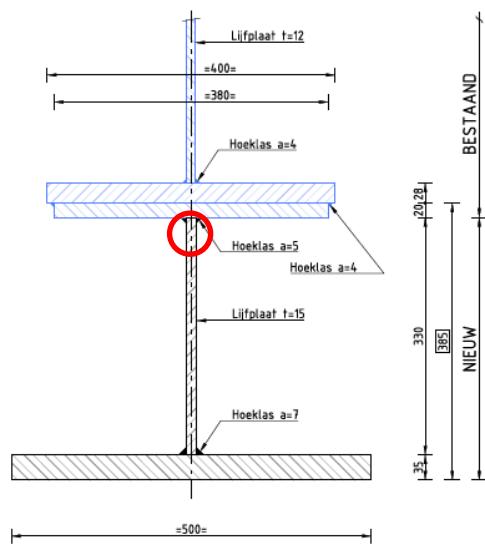


Figuur 108 Hoeklas tussen onderflens en lijf en tussen opdikplaat en onderflens

De schuifspanning in het bestaande lijf is aan het einde maximaal  $40 \text{ N/mm}^2$ . Vertaald naar de las is dit  $60 \text{ N/mm}^2$ . Hiermee komt de totale schuifspanning op  $132 \text{ N/mm}^2$  (UGT verbouw).

### 6.6.2 Lasverbinding lijf T-stuk – onderflens bestaande hoofdligger

Tussen het lijf van het T-stuk en de onderflens van de bestaande hoofdliggers is een hoeklas  $a = 5 \text{ mm}$  aangebracht.

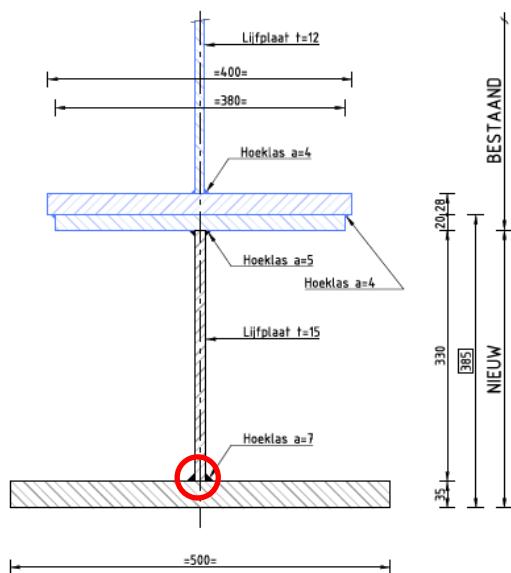


Figuur 109 Hoeklas tussen lijf T-stuk en onderflens

De schuifspanning in het lijf van het T-stuk ter plaatse van de lasverbinding met de onderflens is maximaal  $100 \text{ N/mm}^2$ . Vertaald naar de las is dit  $150 \text{ N/mm}^2$  (UGT verbouw), wat resulteert in een UC = 0,74. Hierbij is conservatief uitgegaan van een hoeklas, in werkelijkheid wordt het einde van het T-stuk volledig doorgelast over 1000 mm.

### 6.6.3 Lasverbinding lijf T-stuk – onderflens T-stuk

Tussen het lijf van het T-stuk en de onderflens het T-stuk is een hoeklas  $a = 7 \text{ mm}$  aangebracht.

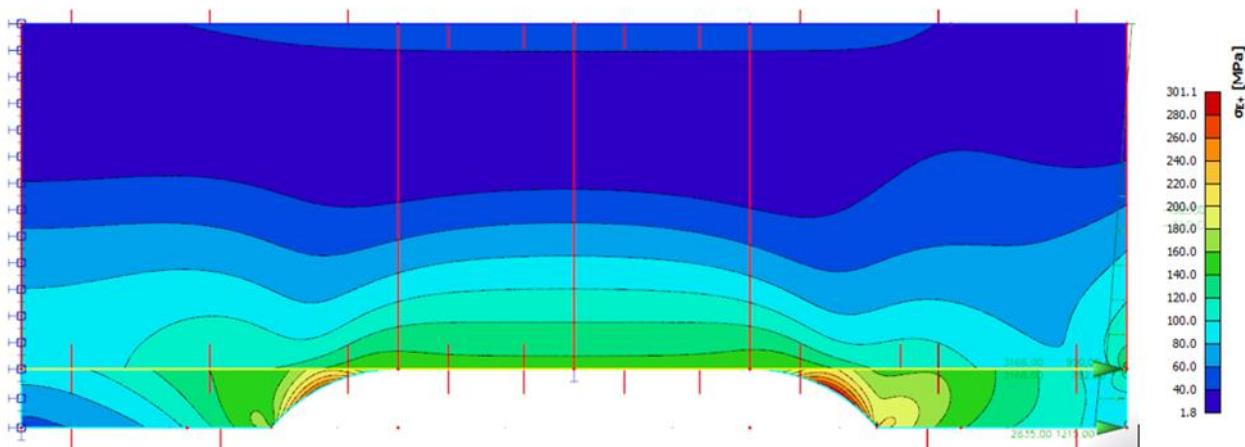


Figuur 110 Hoeklas tussen lijf T-stuk en onderflens T-stuk

De schuifspanning in het lijf van het T-stuk ter plaatse van de lasverbinding met de onderflens van het T-stuk is  $140 \text{ N/mm}^2$ . Vertaald naar de las is dit  $150 \text{ N/mm}^2$  (UGT verbouw), wat resulteert in een UC = 0,73.

### 6.6.4 Spanningen in T-stuk

Door de vorm van het T-stuk kunnen er ook spanningsconcentraties ontstaan in de lijfplaat zelf. Gecontroleerd is of de Von Mises spanningen in het lijf en de flens van het T-stuk onder de vloeispanning blijven ( $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ ). De hoogste spanningen treden op het lijf en blijven ruim onder de vloeispanning (UC = 0,86).



Figuur 111 Von Mises spanningen aan het einde van het T-stuk

## 6.6.5 Samenvatting resultaten

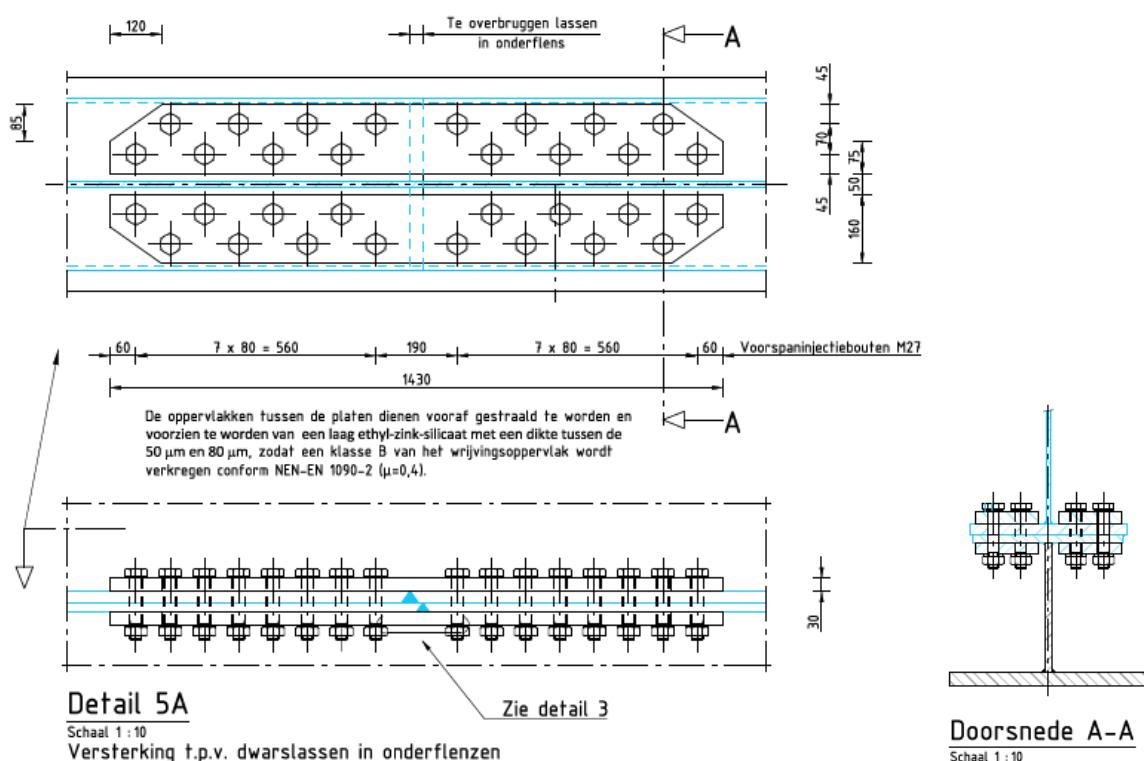
In onderstaande tabel zijn de resultaten samengevat. Alle toetsaspecten voldoen.

Detail Type 25		
Toetsaspect	$\tau_{las}$ of $\sigma_E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	UC
Hoeklas lijf – onderflens bestaande hoofdlijker	132	0,65
Hoeklas lijf T-stuk – onderflens bestaande hoofdlijker	150	0,74
Hoeklas lijf T-stuk – onderflens T-stuk	150	0,73
Von mises spanningen	301	0,86

Tabel 72 Toetsingsresultaten verbindingen einde T-stuk

## 6.7 Verbinding: Type 26 – Overkluizing V-naden onderflens

Zoals beschreven in paragraaf 4.5 is het voor verbinding 5-1 en 5-2 noodzakelijk om de V-naden in de bestaande onderflens te overkluizen. Voor deze verbindingen is daarom een overkluizing ontworpen die de functie van de oorspronkelijke lassen over zal gaan nemen, indien deze bezwijken. Voor de overkluizing worden zowel boven als onder de huidige onderflens twee strippen toegepast (160x30), welke verbonden worden door middel van voorgespannen injectiebouten (M27 10.9). Uitgangspunt is dat eerst de v-naden eerst gebruggrind worden, het T-stuk wordt aangebracht en dat pas daarna de overkluizing wordt aangebracht.



Figuur 112 Overkluizing V-naad bestaande onderflens

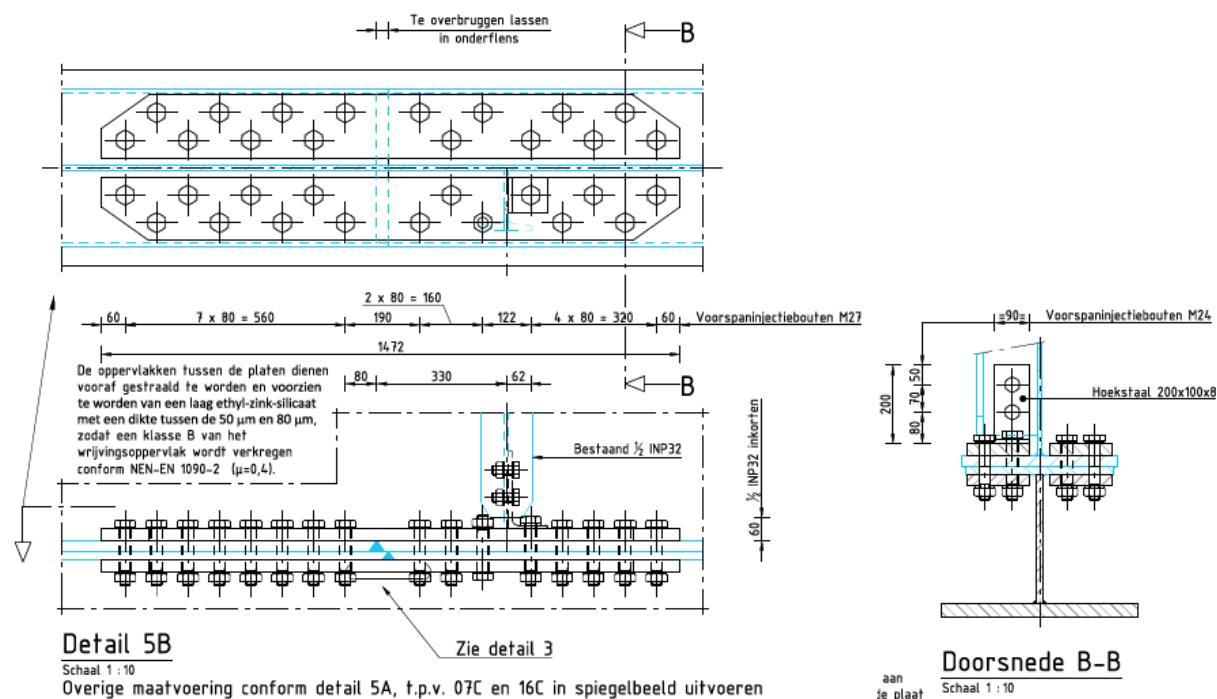
In de berekening is uitgegaan van 2x8 voorspaninjectiebouten per zijde. De verbinding is ontworpen om de volledige optredende kracht (UGT verbouw) in de (bestaande) onderflens, na versterking met het T-stuk, op te nemen. De overkluizing is dus in staat om de spanning in de beide flensplaten volledig over te kunnen nemen. Dit is conservatief, omdat de bovenste flensplaat in principe niet in zou moeten kunnen scheuren. In de berekening is uitgegaan van de gecombineerde weerstand van wrijving plus stuik van de injectiehars. Uitgangspunt is daarbij een kunsthars van het merk Araldite SW404 met een harder HY2404, waarvoor conform de ROBK een (ondergrens) voor de rekenwaarde van de stuikspanning van 150 N/mm<sup>2</sup> (lange duur) geldt.

De oppervlakken tussen de platen dienen vooraf gestraald te worden en voorzien te worden van een laag ethyl-zink-silicaat zodat een klasse B van het wrijvingsoppervlak wordt verkregen conform NEN-EN 1993-1-8 ( $\mu = 0,4$ ). De voorspanning op de bout is aangehouden als 70% van  $f_{ub}$ . De verbinding is berekend met behulp van Mathcad en is weergegeven in Bijlage D5. De resultaten van de berekening zijn weergegeven in onderstaande tabel.

<b>Detail Type 26</b>				
Toetsaspect	Afschuiving bouten	Stuik hars + wrijving	Netto doorsnede profiel	Netto doorsnede schetsplaat
Westelijk zijde	0,85	0,78	0,83	0,92

Tabel 73 Toetsingsresultaten van de overkluizing

Ter plaatse van de bestaande dwarsverstijvers (verbinding 5-2) zal het patroon iets afwijkend zijn en zal de dwarsverstijver ingekort moeten worden. Met het aanbrengen van de versterking in de onderflens dient ook de dwarsverstijver weer verbonden te worden met de overkluizing. Hiervoor wordt uitgegaan van een boutverbinding met een hoekstaal L200x100x8, welke wordt verbonden met één van de voorspaninjectiebouten in de onderflens.



Figuur 113 Overkluizing V-naad bestaande onderflens met dwarsverstijver

## 7 Conclusies

In deze rapportage zijn een aantal versterkingen ontworpen voor de aanbruggen van de IJsselbrug en is de constructieve sterkte, stabiliteit en vermoeiing getoetst van de bestaande en nieuwe onderdelen. De versterkingen zijn zodanig ontworpen dat de brug weer een restlevensduur van (minimaal) 30 jaar heeft. Belangrijkste versterking is het aanbrengen van een T-stuk over nagenoeg de gehele lengte van de hoofdliggers, met uitzondering van het deel bij de steunpunten, in combinatie met het burr grinden en eventueel opnieuw aanbrengen van diverse lassen. Op deze wijze wordt enerzijds de aanwezige vermoeiingsschade verwijderd en worden anderzijds de spanningswisselingen die de vermoeiingsschade veroorzaakt verlaagd.

Naast bovengenoemde versterking van de hoofdligger voor vermoeiing zijn lokaal een aantal aanvullende versterkingen noodzakelijk. Dit betreffen de volgende versterkingen:

- Overkluiting v-naden onderflens (vermoeiing) (paragraaf 4.5 en 6.7)
- Onderzijde verticaal portaal eindsteunpunten (sterkte) (paragraaf 5.3.2)
- Vijzelpunten eindsteunpunten (sterkte) (paragraaf 5.6.2)
- Verbinding onderrand vaste opleggingen (verbinding) (paragraaf 6.3)
- Verbindingen knieshot dwarsdrager – langsverstijver – dwarsverstijver en eindsteunpunt (paragraaf 4.9) **en** tussensteunpunt (paragraaf 4.10)

## Bijlage A

### Invoer geometrie SCIA Engineer

IJsselbrug

## Bijlage B

### Invoerbelastingen SCIA Engineer

IJsselbrug

## Bijlage C

### Toetsing op sterke en stabiliteit

IJsselbrug

## Bijlage C1

### Toetsing hoofdlijger

IJsselbrug

## Bijlage C2

### Toetsing dwarsdragers

IJsselbrug

## Bijlage C3

### Toetsing K-verbanden

IJsselbrug

## Bijlage C4

### Toetsing betondek

IJsselbrug

## Bijlage D

### Toetsing verbindingen

IJsselbrug

## Bijlage D1

### **Detail type 4 – Verbinding onderrand K-verband - hoofdlijger**

IJsselbrug

## Bijlage D2

**Detail type 7, 10, 11 en 12 –  
Verbinding dwarsdragers/consoles -  
hoofdlijger**

IJsselbrug

## Bijlage D3

### Detail type 9 – Verbindingen diagonalen

IJsselbrug

## Bijlage D4

### Detail type 25 – Verbinding einde T-stuk

IJsselbrug

## Bijlage D5

### Detail type 26 – Overkluizing V-naden

IJsselbrug

## Bijlage E

### Toetsing op vermoeiing

IJsselbrug

## Bijlage E1

### Detail type 1 – Las uiteinde van de opdikplaat

IJsselbrug

## Bijlage E2

### **Detail type 2 – Geklonken verbinding in sectie delen van de brug**

IJsselbrug

## Bijlage E3

### **Detail type 3 – Verticale verstijvers binnenzijde-las met de onderflens**

IJsselbrug

## Bijlage E4

### **Detail type 4 – Geklonken verbinding dwarsverband met hoofdliggers**

IJsselbrug

## Bijlage E5

### **Detail type 5 – Gelaste verbinding in sectie delen van de brug**

IJsselbrug

## Bijlage E6

### **Detail type 6 – Flanklas tussen opdikplaat en onderflens**

IJsselbrug

## Bijlage F

### Toetsing op vermoeiing – na versterking

IJsselbrug

## Bijlage F1

### Detail type 1 – Las uiteinde van de opdikplaat

IJsselbrug

## Bijlage F2

### **Detail type 2 – Geklonken verbinding in sectie delen van de brug**

IJsselbrug

## Bijlage F3

### **Detail type 3 – Verticale verstijvers binnenzijde-las met de onderflens**

IJsselbrug

## Bijlage F4

### **Detail type 4 – Geklonken verbinding dwarsverband met hoofdliggers**

IJsselbrug

## Bijlage F5

### **Detail type 5 – Gelaste verbinding in sectie delen van de brug**

IJsselbrug

## Bijlage F6

### **Detail type 6 – Flanklas tussen opdikplaat en onderflens**

IJsselbrug

## Bijlage F7

### **Detail type 13 – Flanklas tussen het lijf en onderflens hoofdlijger**

IJsselbrug

## Bijlage F8

**Detail type 14 – Verbinding  
dwarsverstijver – langsverstijver –  
schot einddw. dr.**

IJsselbrug

## Bijlage F9

**Detail type 15 – Verbinding  
dwarsverstijver – langsverstijver –  
schot tussendw. dr**

IJsselbrug

## Bijlage F10

**Detail type 17 – Verticale  
plooiverstijver – Las met lijf van de  
hoofdlijger**

IJsselbrug

## Bijlage F11

### Detail type 20 – Lasverbinding ter plaatse van uitsparing lijf T-stuk

IJsselbrug

## Bijlage F12

### **Detail type 21 – Lasverbinding schotten op onderflens hoofdligger**

IJsselbrug

## Bijlage F13

### **Detail type 22 – Langslas lijf T-stuk met flenzen**

IJsselbrug

## Bijlage F14

### Detail type 24 – Lasverbinding einde lijf T-stuk

IJsselbrug

## Bijlage F15

### **Detail type 25 – Lasverbinding einde lijf T-stuk (Schuifspanning)**

IJsselbrug