

RAPPORT

Verificatieberekening IJsselbrug A12

Hoofdbruggen

Klant: Rijkswaterstaat

Referentie: T&P-BF7387-R004-F2.0

Status: 2.0/Definitief

Datum: 23 maart 2020

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: Verificatieberekening IJsselbrug A12

Ondertitel: Verificatieberekening Hoofdbruggen

Referentie: T&P-BF7387-R004-F2.0

Status: 2.0/Definitief

Datum: 23 maart 2020

Projectnaam: Herberekening en versterkingsontwerp IJsselbrug A12

Projectnummer: BF7387

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

Opgesteld door: E. Klamer, N. Elbers, A. Akyel

Gecontroleerd door: Rob Soetekouw

Datum/paraaf: 23-3-2020



Goedgekeurd door: Karel Vis

Datum/paraaf: 23-3-2020



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

1	Leeswijzer	1
1.1	Referenties	1
2	Modellering	2
2.1	Belastingen	2
2.2	Invloed inspectie op de modellering	2
3	Sterkte en stabiliteit	4
3.1	Hoofdlijker	4
3.1.1	Berekeningsaanpak	4
3.1.2	Resultaten	6
3.1.3	Berekeningsaanpak plooij van het lijf	8
3.1.4	Resultaten plooberekening	10
3.1.5	Windbelasting op lijf	11
3.1.6	Stabiliteit	12
3.1.7	Langsverstijvers	13
3.2	Dwarsdragers	15
3.2.1	Berekeningsaanpak	15
3.2.2	Resultaten	15
3.3	K-verbanden en portalen	17
3.3.1	Berekeningsaanpak staafmodel	17
3.3.2	Resultaten K-verbanden	18
3.3.3	Resultaten portalen	18
3.3.4	Portaal A	21
3.3.4.1	Modellering	21
3.3.4.2	Sterkte-analyse portaal A	22
3.3.4.3	Plastische doorsnede-toetsing verticaal portaal A	23
3.3.5	Portaal B	26
3.3.5.1	Modellering	26
3.3.5.2	Sterkteanalyse portaal B	27
3.3.5.3	Plastische doorsnede-toetsing verticaal portaal B	29
3.3.6	Portaal C	36
3.3.6.1	Modellering	36
3.3.6.2	Sterkteanalyse portaal C	37
3.3.6.3	Plastische doorsnede-toetsing verticaal portaal C	39
3.4	Stalen rijdek	41
3.4.1	Berekeningsaanpak	41
3.4.2	Resultaten rijplaat	42
3.4.3	Resultaten bulbs	43

3.5	Opleggingen en vijzelpunten	44
3.5.1	Verticale oplegreacties	44
3.5.2	Horizontale oplegreacties dwarsrichting	47
3.5.3	Horizontale oplegreacties langsrichting	50
3.5.4	Oplegreacties per belastinggeval	51
3.5.5	Vijzelpunten	52
3.6	Inspectiepad	54
3.6.1	Berekeningsaanpak	54
3.6.2	Resultaten inspectiepad	54
4	Verbindingen	55
4.1	Verbinding type A – Lasverbinding opdikplaat onderflens hoofdligger	55
4.2	Verbinding type B en C – Geklonken verbindingen brugsecties	56
4.3	Verbinding type K – Klinknagelverbinding flenspakket	58
4.4	Verbinding Type L – Verbinding console/dwarsdrager met hoofdligger	59
4.4.1	Verbinding L1 – Verbinding console – hoofdligger	59
4.4.2	Verbinding L2 – Verbinding dwarsdrager – hoofdligger	60
4.5	Verbinding type P – Diagonalen K-verbanden en portalen	61
4.6	Verbinding type Q – Onder- en bovenrand K-verbanden en portalen	63
4.7	Verbinding type R – Klinknagelverbinding t.p.v. sectiedelingen	65
4.8	Verbinding type S – Langsverstijvers	67
5	Vermoeiing	71
5.1	Aanpak	71
5.2	Spanningswisseling t.g.v. zijdelings uitbuigen	71
5.3	Type A: Las uiteinde opdikplaat onderflens van hoofligger	79
5.4	Type B: Flensverbreders ter hoogte van klinklas bij sectiedeling	82
5.5	Type C: Geklonken verbindingen brugsecties	85
5.6	Type D: Dwarsverstijver binnenzijde – flens hoofdligger	88
5.7	Type E: Dwarsverstijver binnenzijde – lijf hoofdligger	92
5.8	Type F: Dwarsverstijver buitenzijde – flens hoofdligger	95
5.9	Type G: x-naad onderflens hoofdligger	98
5.10	Type H: Flensverbreders ter hoogte van opleggingen	102
5.11	Type I: Dwarsverstijver buitenzijde – lijf hoofdligger	104
5.12	Type J: Langslas tussen lijf profiel en lijf plaat	107
5.13	Type K: Klinkverbinding tussen flensen in het flenspakket	110
5.14	Type N: Langslas tussen opdikplaat en onderflens	113
5.15	Type O: X-naad ½ DIN profielen	116
5.16	Type P: X-naad lijfplaat hoofdligger	121

5.17	Type S: Doorkoppeling langsverstijvers	123
5.18	Type T: Lasverbinding vijzelpunten	129
5.19	Dwarsdragers	132
5.19.1	Inleiding	132
5.19.2	Balastmetingen	133
5.19.2.1	Verwerking en filtering van de meetdata	133
5.19.2.2	Invloed undercut las	134
5.19.3	Vergelijking berekening en meting	136
5.19.4	Excentriciteit knieschot – lijf dwarsverstijver	137
5.20	Type DD-zK: Verbinding hoofdlijker - tussendwarsdragers	139
5.20.1	Locatie getoetste dwarsdrager	139
5.20.2	Getoetste details	140
5.20.3	Detail A1/B - Aansluiting schot – onderflens dwarsdrager	142
5.20.4	Detail A2 – Aansluiting schot – onderflens dwarsdrager	147
5.20.5	Detail C – Onderflens dwarsdrager (nominaal)	149
5.20.6	Detail D – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver	150
5.20.7	Detail E – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver	154
5.20.8	Detail F – Aansluiting horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver	156
5.20.9	Detail G – Aansluiting lijf/schot dwarsdrager – kopschot op lijf hoofdlijker	159
5.20.10	Detail H – Aansluiting lijf dwarsverstijver – verticale flens langsverstijver	163
5.20.11	Detail I – Aansluiting onderflens dwarsdrager – kopschot	164
5.20.12	Detail J – Onderflens dwarsdrager t.p.v. einde schot	165
5.21	Type DD-K30: Verbinding hoofdlijker - dwarsdrager met K-verband met 1/2 INP30 dwarsverstijver	166
5.21.1	Locatie getoetste dwarsdrager	166
5.21.2	Getoetste details	167
5.21.3	Detail A1/B - Aansluiting schot – onderflens dwarsdrager	169
5.21.4	Detail A2 – Aansluiting schot – onderflens dwarsdrager	173
5.21.5	Detail C – Onderflens dwarsdrager (nominaal)	175
5.21.6	Detail D – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver	176
5.21.7	Detail E – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver	181
5.21.8	Detail F – Aansluiting horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver	183
5.21.9	Detail G – Aansluiting lijf/schot dwarsdrager – kopschot op lijf hoofdlijker	186
5.21.10	Detail H – Aansluiting lijf dwarsverstijver – verticale flens langsverstijver	191
5.21.11	Detail I – Aansluiting onderflens dwarsdrager – kopschot	193
5.21.12	Detail J – Onderflens dwarsdrager t.p.v. einde schot	194
5.22	Type DD-K24: Verbinding hoofdlijker - dwarsdrager met K-verband met 1/2 INP24 dwarsverstijver	195
5.22.1	Locatie getoetste dwarsdrager	195
5.22.2	Getoetste details	196
5.22.3	Detail A1/B - Aansluiting schot – onderflens dwarsdrager	198
5.22.4	Detail D – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver	200
5.22.5	Detail E – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver	204
5.22.6	Detail F – Aansluiting horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver	206

5.23	Type DD-STPA: Verbinding hoofdlijker - dwarsdragers portaal A	209
5.23.1	Locatie getoetste dwarsdrager	209
5.23.2	Getoetste details	210
5.23.3	Detail A1/B - Aansluiting schot – onderflens dwarsdrager	212
5.23.4	Detail C – Onderflens dwarsdrager (nominaal)	216
5.23.5	Detail D – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver	217
5.23.6	Detail E – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver	220
5.23.7	Detail F – Aansluiting horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver	223
5.23.8	Detail G – Aansluiting lijf/schot dwarsdrager – kopschot op lijf hoofdlijker	226
5.23.9	Detail I – Aansluiting onderflens dwarsdrager – kopschot	228
5.23.10	Detail J – Onderflens dwarsdrager t.p.v. einde schot	230
5.24	Type DD-STPB: Verbinding hoofdlijker - dwarsdragers portaal B	231
5.24.1	Locatie getoetste dwarsdrager	231
5.24.2	Getoetste details	232
5.24.3	Detail A1/B - Aansluiting schot – onderflens dwarsdrager	233
5.24.4	Detail A2 – Aansluiting schot – onderflens dwarsdrager	237
5.24.5	Detail C – Onderflens dwarsdrager (nominaal)	239
5.24.6	Detail D – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver	240
5.24.7	Detail E – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver	244
5.24.8	Detail F – Aansluiting horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver	247
5.24.9	Detail G – Aansluiting lijf/schot dwarsdrager – kopschot op lijf hoofdlijker	250
5.24.10	Detail H – Aansluiting lijf dwarsverstijver – verticale flens langsverstijver	252
5.24.11	Detail I – Aansluiting onderflens dwarsdrager – kopschot	253
5.24.12	Detail J – Onderflens dwarsdrager t.p.v. einde schot	254
5.25	Type DD-STPC: Verbinding hoofdlijker - dwarsdragers portaal C	255
5.25.1	Locatie getoetste dwarsdrager	256
5.25.2	Getoetste details	256
5.25.3	Detail A/B - Aansluiting schot – horizontale plaat onder onderflens dwarsdrager	260
5.25.4	Detail C – Onderflens dwarsdrager (nominaal)	263
5.25.5	Detail D – Aansluiting schot – verticale flens dwarsverstijver	264
5.25.6	Detail E – Onderflens dwarsdrager t.p.v. lijn dwarsdrager	269
5.25.7	Detail F – Horizontale plaat onder dwarsdrager t.p.v. verticale schotten	271
5.25.8	Detail G – Aansluiting lijf/schot dwarsdrager – kopschot op lijf hoofdlijker	274
5.25.9	Detail H – Aansluiting onderzijde knieschot – lijf dwarsverstijvers	277
5.25.10	Detail I – Aansluiting onderflens dwarsdrager – kopschot	278
5.26	Type DD-Of: Langslas onderflens-lijf dwarsdrager	280
6	Vervormingen	282
6.1	Voegvervormingen	282
6.2	Vervormingen opleggingen	284
7	Aanvaring op de constructie	285
7.1	Aanpak	285
7.2	Vervormingen	286
7.3	Spanningen	287

7.4	Conclusie	290
8	Conclusies	291
8.1	Sterkte en stabiliteit	291
8.2	Verbindingen	291
8.3	Vermoeiing	291
8.4	Vervormingen	292
8.5	Aanvaring	292

Bijlagen

Bijlage A Belastingen

- Bijlage A1 Blijvende belastingen
- Bijlage A2 Verkeersbelastingen
- Bijlage A3 Windbelasting
- Bijlage A4 Temperatuurbelasting
- Bijlage A5 Overige belastingen

Bijlage B Modellering

- Bijlage B1 Belastinginvoer SCIA Engineer – globale model
- Bijlage B2 Belastinginvoer SCIA Engineer – lokale model
- Bijlage B3 Validatie belastinginvoer – globale model
- Bijlage B4 Validatie belastinginvoer – lokale model

Bijlage C Toetsing sterke en stabiliteit

- Bijlage C1 Toetsing hoofdlijger
- Bijlage C2 Toetsing dwarsdragers
- Bijlage C3 Toetsing K-verbanden en portalen
- Bijlage C4 Toetsing rijdek
- Bijlage C5 Toetsing inspectiepad

Bijlage D Toetsing verbindingen

- Bijlage D1 Detail type A – Las einde opdikplaat
- Bijlage D2 Detail type B en C – Geklonken verbindingen brugsecties
- Bijlage D3 Detail type K – Klinkverbinding flenspakket
- Bijlage D4 Detail Type DD-zK – Verbinding tussen hoofdlijger en console/dwarsdrager
- Bijlage D5 Detail type P – Verbindingen diagonalen
- Bijlage D6 Detail type Q – Verbindingen horizontalen onder- en bovenrand K-verbanden
- Bijlage D7 Detail type R – Verbindingen dekconstructie
- Bijlage D8 Detail type S – Verbinding langsverstijvers bij sectiedeling

Bijlage E Toetsing vermoeiing

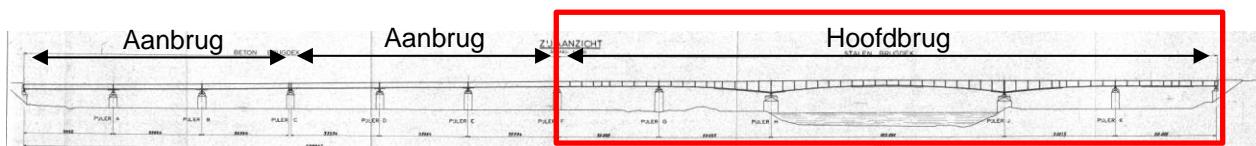
- Bijlage E1 Detail type A – Las einde opdikplaat
- Bijlage E2 Detail type B – Flensverbreders ter hoogte van klinklas bij sectiedeling
- Bijlage E3 Detail type C – Geklonken verbindingen brugsecties
- Bijlage E4 Detail type D – Verticale plooiverstijvers binnenzijde - las met onderflens
- Bijlage E5 Detail type E – Verticale plooiverstijvers binnenzijde - las met lijf hoofdlijger

- Bijlage E6 Detail type F – Verticale plooiverstijver buitenzijde - las met onderflens
- Bijlage E7 Detail type G – X-naad in onderflens hoofdligger
- Bijlage E8 Detail type H – Flensverbreder ter hoogte van opleggingen
- Bijlage E9 Detail type I – Verticale plooiverstijver buitenzijde - las met lijf dwarsdrager
- Bijlage E10 Detail type J – Langslas lijf
- Bijlage E11 Detail type K – Klinkverbinding flenspakket
- Bijlage E12 Detail Type DD-K30 – Verbindingen tussen hoofligger en dwarsdrager met K-verband $\frac{1}{2}$ INP30
- Bijlage E13 Detail Type DD-K24 – Verbindingen tussen hoofligger en dwarsdrager met K-verband $\frac{1}{2}$ INP30
- Bijlage E14 Detail type N – Langslas tussen opdikplaat en onderflens
- Bijlage E15 Detail type O – X-las $\frac{1}{2}$ DIN profielen flensen hoofdligger
- Bijlage E16 Detail type P – X-las in lijfplaat hoofdligger
- Bijlage E17 Detail type DD-Of – Langslas lijf-onderflens dwarsdrager
- Bijlage E18 Detail type S – Koppeling langsverstijvers ter plaatse van portaal C
- Bijlage E19 Detail type T – Lasverbinding vijzelpunten
- Bijlage E20 Detail Type DD-zK – Verbindingen tussen hoofligger en tussendwarsdragers
- Bijlage E21 Detail Type DD-STPA – Verbindingen tussen hoofligger en dwarsdrager portaal A
- Bijlage E22 Detail Type DD-STPB – Verbindingen tussen hoofligger en dwarsdrager portaal B
- Bijlage E23 Detail Type DD-STPC – Verbindingen tussen hoofligger en dwarsdrager portaal C
- Bijlage F Vervormingen**
- Bijlage F1 Voegvervorming SCIA uitvoer
- Bijlage F2 Vervorming t.p.v. opleggingen SCIA uitvoer
- Bijlage G Vergelijking rekmetingen – FEM dwarsdragers hoofdbrug**
- Bijlage G1 Vergelijking rekmetingen – FEM dwarsdragers hoofdbrug
- Bijlage H Analyse undercut**
- Bijlage H1 DIANA Analyse undercut las

Versie	Aanpassing	Datum
D0.1	Eerste concept, ter toetsing (intern) (H1 t/m H4)	23-08-2018
D0.2	Tweede concept, ter toetsing (intern) (H1 t/m H4)	5-9-2018
D0.3	Derde concept, interne toetsing verwerkt, ter controle naar RWS (H1 t/m H4)	17-9-2018
D0.4	Vierde concept, ter toetsing (intern) (H5 t/m H7)	17-9-2018
D0.5	Vijfde concept, interne toetsing verwerkt, ter controle naar RWS (H5 t/m H7)	26-10-2018
D0.6	Zesde concept, opmerkingen RWS verwerkt. ter toetsing (intern)	28-1-2019
F1.0	Eerste Definitieve versie	12-2-2019
F1.1	<ul style="list-style-type: none"> - Toetsing stabiliteit onderflens aangepast van kiptoets naar kniktoets (§3.1.6) - Toetsing torsiestabiliteit langsverstijvers gecorrigeerd (formule λ_s) (§3.1.7) - Toetsing verticalen portalen aangepast o.b.v. verlopende normaalkracht (§3.3) - Analyse verloop normaalkracht verticalen toegevoegd (§3.3.4) - Fout in schadeberekening type H2 gecorrigeerd (§5.10) 	2-5-2019
F1.2	Toevoeging dat alle koppelstukken van de sectiedelingen vervangen moeten worden (§4.8 en §8.2) Toevoeging vermoeiing doorkoppeling onderste langsverstijver t.p.v. portaal C (§5.21)	27-5-2019
F1.3	Toetsing vermoeiing vijzelplaten toegevoegd (§5.22)	24-7-2019
F2.0	Referenties TNO/IIW toegevoegd (§1.1) UGT toetsing portalen met plaatmodel toegevoegd (§3.3.4 t/m 3.3.6) Vermoeiing aansluiting dwarsdragers – hoofdliggers o.b.v. metingen toegevoegd (§5.19 t/m 5.25)	23-3-2020

1 Leeswijzer

In deze rapportage worden de resultaten van de verificatieberekeningen van de hoofdbrug(gen) van de IJsselbrug A12 behandeld. Deze rapportage dient in samenhang met het uitgangspuntenrapport herberekening IJsselbrug A12 [T&P-BF7387-R001-F1,1] gelezen te worden.



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

In het uitgangspuntenrapport zijn onder andere de toegepaste materialen, bouwfasing en de belastingen beschreven die van toepassing zijn voor de berekening van de zowel de hoofd- als de aanbruggen. Ook wordt in het uitgangspuntenrapport de modellering behandeld, inclusief de SCIA invoer, alsmede de verificatie van het eindige elementen model. Deze onderdelen zullen daarom ook niet in deze rapportage herhaald worden. Uitzondering zijn de belastingen, waarbij de belastingen specifiek voor de hoofdbrug verder zijn uitgewerkt (hoofdstuk 2). Ook zijn in dit hoofdstuk de oplegcondities gecontroleerd.

In hoofdstuk 3 zal worden ingegaan op de sterkte- en stabiliteitstoetsing van de verschillende constructieonderdelen. Hoofdstuk 4 gaat vervolgens in op de toetsing van de verbindingen. De resultaten van de vermoeiingsanalyse worden behandeld in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 zal worden ingegaan op de vervormingen van de voegovergangen en de opleggingen. In hoofdstuk 7 zal vervolgens worden ingegaan op de gevolgen van de aanvaarbelasting. In hoofdstuk 8 worden de resultaten samengevat en worden, indien nodig, aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek en/of versterkingen.

1.1 Referenties

Naast de referenties in de uitgangspuntenrapportage zijn de volgende rapporten gebruikt voor de verificatieberekeningen:

- [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 Memorandum 0100313038-A/VSS. Detailcategorieën en inspectie-intervallen na versterkingen aan de brug bij Rheden, 2018
- [6] TNO Rapport TNO-2019-R11393. Rekmetingen IJsselbrug, 2019
- [7] TNO Rapport TNO-2019-R11394. Diverse adviezen vermoeiingslevensduur dwarsdrageraansluitingen IJsselbrug, 2020
- [8] TNO Rapport TNO-2019-R10527. Risicoanalyse lasimperfecties in de IJsselbrug A12, 2019
- [9] TNO Rapport TNO-2020-R10226. Rekmetingen IJsselbrug, 2020
- [10] IIW document IIW-2259-15 ex XIII-2460-13/XV-1440-13. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, 2016
- [11] IIW-Doc. XIII-2380r3-11/XV-1383r3-11. IIW Guideline for the Assessment of Weld Root Fatigue, 2012

2 Modellering

De modellering van de hoofdbrug is behandeld in uitgangspuntenrapport. Aanvullingen hierop zijn in dit hoofdstuk behandeld.

2.1 Belastingen

Het belastingen voor de IJsselbrug zijn behandeld in uitgangspuntenrapport. Hierbij is zowel ingegaan op de belastingen op de hoofd- als de aanbruggen. In Bijlage A zijn de belastingen van de hoofdbrug verder uitgewerkt ten behoeve van de invoer in de rekenmodellen in SCIA Engineer.

De verschillende belastingen zijn in de volgende bijlagen weergegeven:

Bijlage A1: Blijvende belastingen

Bijlage A2: Verkeersbelastingen

Bijlage A3: Windbelasting

Bijlage A4: Temperatuurbelasting

Bijlage A5: Overige belastingen (warmwaterleiding en aanvaarbelasting)

De invoer van de belastingen en belastingcombinaties in het SCIA model is weergegeven in Bijlage B1 voor het globale model en Bijlage B2 voor het lokale model. De belastinginvoer is geverifieerd door een controle van de resultanten, zie Bijlage B3 voor het globale model en Bijlage B4 voor het lokale model.

2.2 Invloed inspectie op de modellering

Voor de besprekking en toelichting op de resultaten van de inspectie wordt verwezen naar rapport T&P-BF7387-R009. Tijdens de inspectie zijn geen noemenswaardige gebreken geconstateerd die invloed hebben op de modellering van de brug. Geconstateerde materiaalafname van de hoofddraagconstructie bleek in alle gevallen minder dan 5% te zijn. Zo vertonen de consoles oppervlakkige corrosie, maar blijft deze corrosie qua doorsnede-afname beperkt.



Figuur 2 – Corrosie aansluiting inspectiepaden op rand dekconstructie.

Wel vertonen de verbindingen van de inspectiepaden aanzienlijke corrosie. Aanbevolen wordt deze te vervangen. Voor de modellering van de hoofddraagconstructie heeft dit echter geen gevolgen.



Figuur 3 – Corrosie aansluiting inspectiepaden op rand dekconstructie.

Ook is geconstateerd dat de eerste diagonaal van de rivieroverspanning aan één zijde is geknikt. Het is onduidelijk waardoor dit exact is gebeurt, mogelijk is dit tijdens een eerdere inspectie van de brug gebeurd door een botsing met een hoogwerker op een boot of laagwerker. Aanbevolen wordt om dit mee te nemen met het groot onderhoud. Voor de modellering is dit echter niet meegenomen.



Figuur 4 – Vervorming van de diagonaal van een van de diagonalen in de rivieroverspanning.

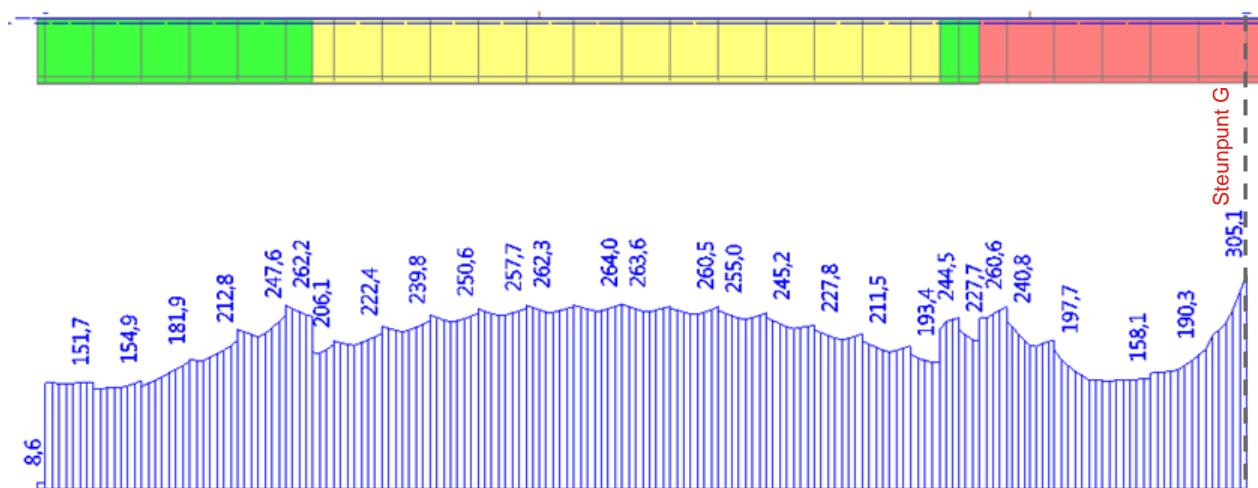
De geometrie van de constructie blijkt ook overeen te komen met de tekeningen. De constructie is dan ook gemodelleerd overeenkomstig met de ontwerptekeningen. Wel zijn bij verbinding A5, B4 en B7 in de hoofdrijbaan west aanpassingen aan de verbinding uitgevoerd, zie TNO rapport [2018 R10290B]. Dit heeft echter geen gevolgen voor de modellering.

3 Sterkte en stabiliteit

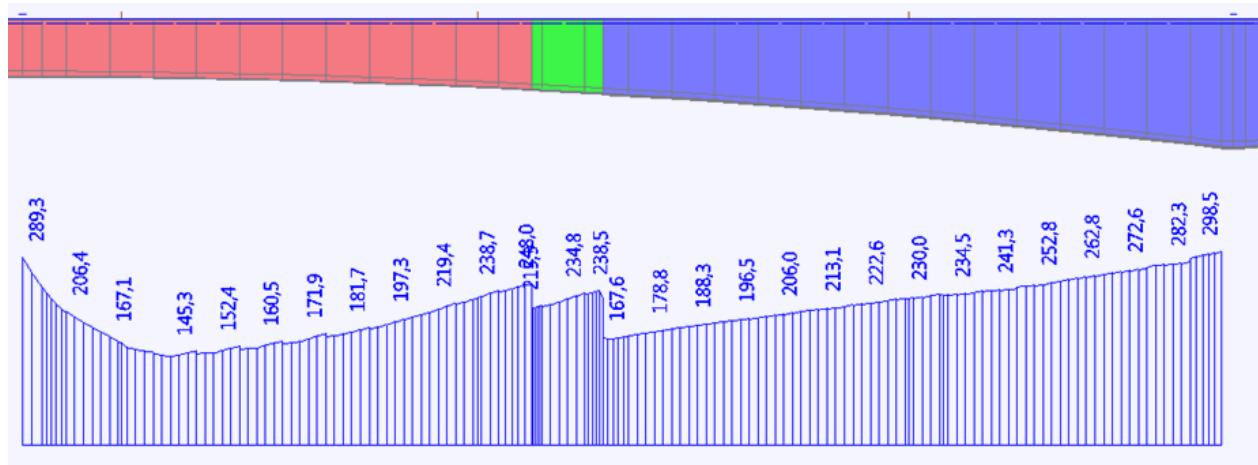
3.1 Hoofdligger

3.1.1 Berekeningsaanpak

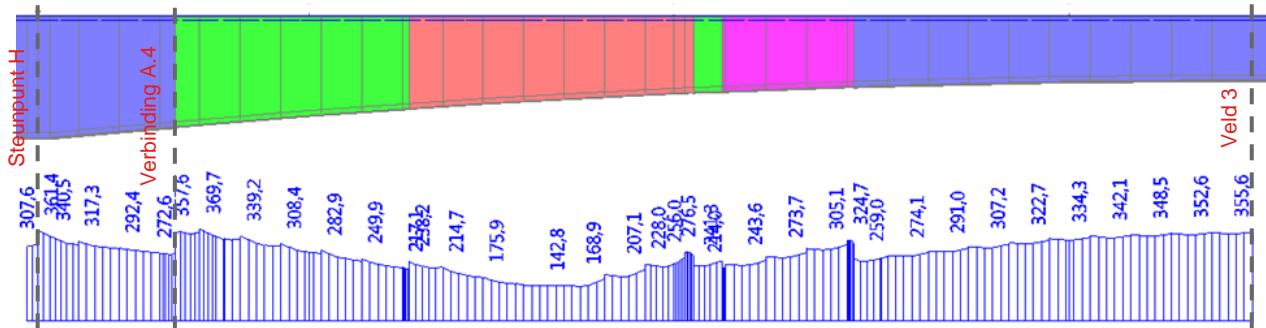
Om de maatgevende doorsneden te bepalen voor de toetsing van de hoofdliggers zijn in eerste instantie de Von Mises spanningen (o.b.v. het Huber Hencky vloeicriterium) bepaald met behulp van SCIA Engineer (zie ook Bijlage C1.a). In onderstaande figuren zijn de Von Mises-spanningen in de hoofdligger van de omhullende van de UGT weergegeven voor de eerste 3 velden.



Figuur 5 – Von Mises spanningen hoofdliggers veld 1 (UGT)



Figuur 6 – Von Mises spanningen hoofdliggers veld 2 (UGT)



Figuur 7 – Von Mises spanningen hoofdliggers veld 3 (UGT)

In de spanningen zijn verschillende spongen zichtbaar. Deze worden veroorzaakt door overgangen in de doorsnede van de onderflens en/of dekplaatdikte. Daarnaast zijn kleine pieken zichtbaar die oplopen richting de dwarsdragers. Deze worden veroorzaakt door het moment om de zwakke as (M_z).

Te zien is dat met name ter plaatse van de steunpunten G en H, het midden van de rivieroverspanning (veld 3) en nabij verbinding A.4 de hoogste spanningen optreden. De Von Mises spanningen zijn bij steunpunt H, het midden van de rivieroverspanning en nabij verbinding A.4 hoger dan de toelaatbare vloeispanning van 350 N/mm².

In de SCIA berekening van de Von Mises spanningen worden ook momenten om de zwakke as (M_z) meegenomen. De berekening van M_z zal echter niet juist zijn omdat:

- De hoofdligger voor dwarse buiging niet vormvast zal zijn, door het relatief buigslappe, hoge lijf. Alleen het onderste deel van de hoofdligger is voor dwarsbuiging relevant. De bovenflens is namelijk verbonden met het dek. Hierdoor zal de dwarse stijfheid (I_z) niet correct zijn en dus ook M_z niet juist zijn.
- Bovendien zitten de verticale verstijvers en het K-verband in het model niet verbonden met de onderflens van de hoofdligger, omdat er gebruik is gemaakt van balk-elementen voor de hoofdliggers. De verticale verstijvers en de K-verbanden zullen ervoor zorgen dat de belastingen in dwarsrichting op de hoofdligger direct wordt afgedragen naar het dek.
- Daarnaast zit het balkelement niet op de juiste hoogte om de optredende dwarsbuiging juist te modelleren, het doel van het model is namelijk om de buiging om de sterke as juist te modelleren, zodat het zwaartepunt alleen voor de langsrichting correct is.

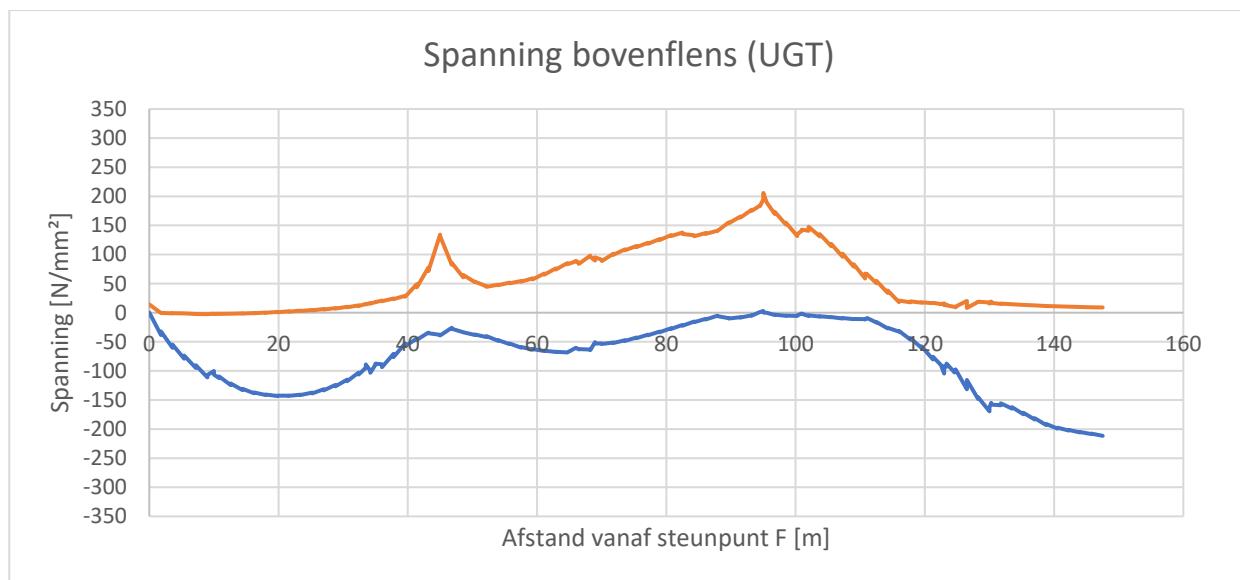
De grootte van de spanning door dwarse buiging is onderzocht in hoofdstuk 5.2, waar is gekeken naar de spanning door dwarse buiging t.g.v. een eenheidslast van 2x50 kN voor de vermoelingsberekeningen in een lokaal model met plaatelementen. Deze spanning in de onderflens bleek maximaal 0,7 N/mm² te zijn. Voor een tandemstelsel van 600 kN is dit dus ca. 4 N/mm². Voor de onderbouwing hiervan wordt verwezen naar hoofdstuk 5.2.

De extra spanning die dit geeft, zal maar zeer beperkt extra druk en trek geven in de onderflens. Hierdoor gaat de flens aan één zijde iets eerder vloeien, maar de rek aan de vloeiente zijde wordt beperkt door de gedrukte andere zijde van de onderflens die niet vloeit. Hierdoor zullen de vloeirekken zeer beperkt blijven, ruim binnen de toelaatbare vloeirekgrens.

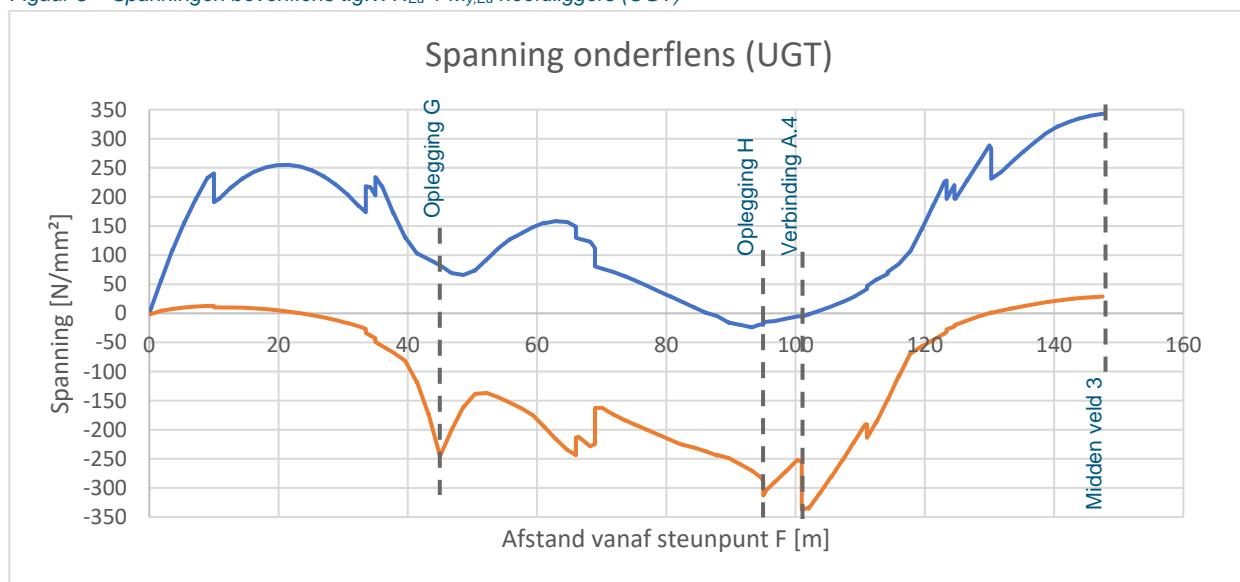
In overleg met Rijkswaterstaat is besloten om het moment om de zwakke as voor de sterkteberekening te verwaarlozen.

3.1.2 Resultaten

In onderstaand figuren zijn de spanning in de boven- en onderflens ten gevolge van de normaalkracht (N_{Ed}) plus het moment om de sterke as ($M_{y,Ed}$) weergegeven voor de helft van de brug. Voor de bovenflens wordt uitgegaan van de flens van de excentrische balk, dit komt dus overeen met de onderzijde van het dek. Voor de berekening van de spanningen in het dek wordt verwezen naar paragraaf 3.4.



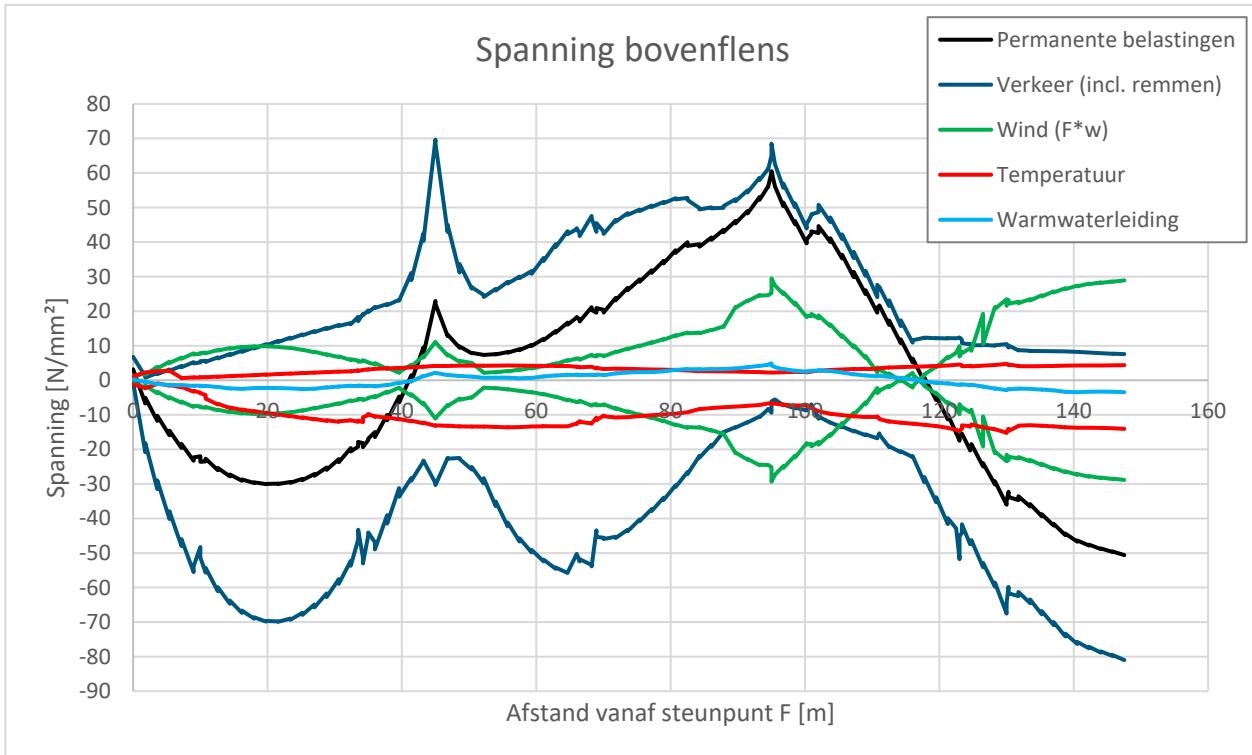
Figuur 8 – Spanningen bovenflens t.g.v. $N_{Ed} + M_{y,Ed}$ hoofdliggers (UGT)



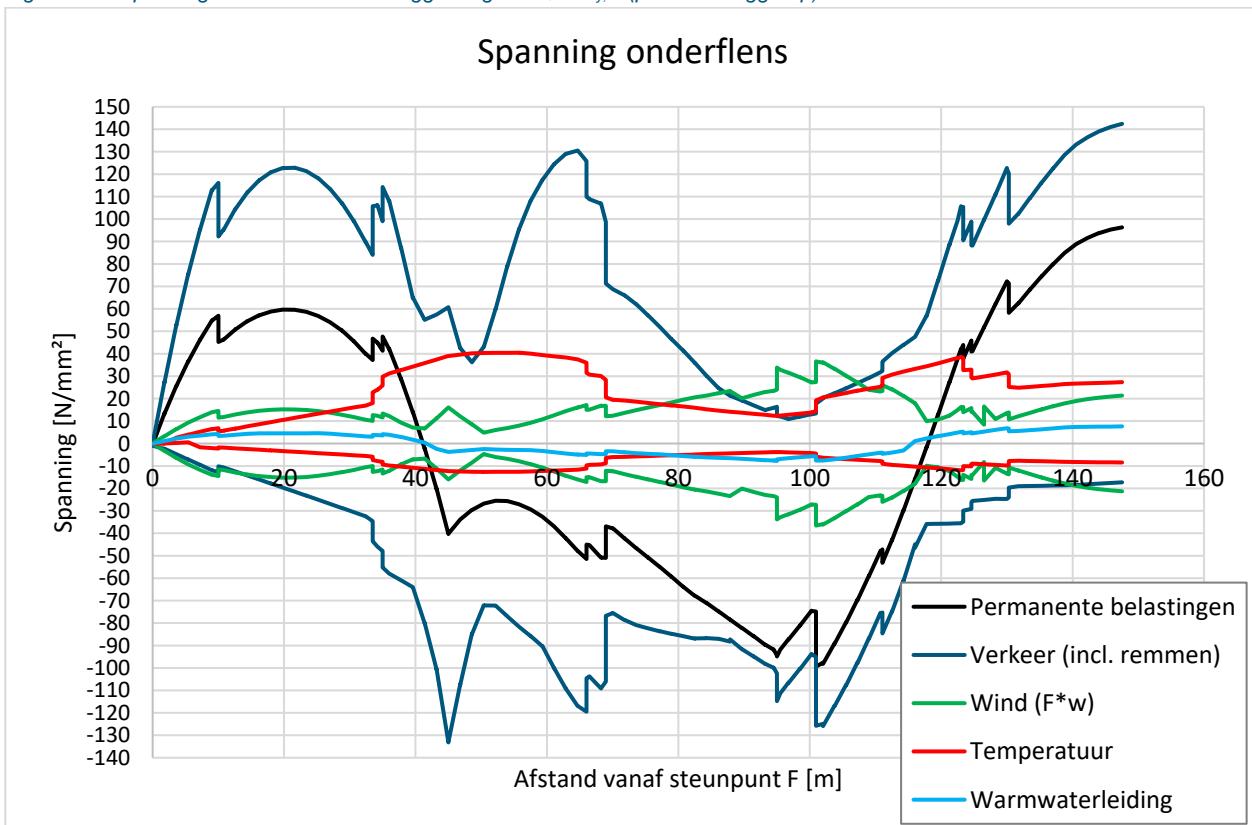
Figuur 9 – Spanningen onderflens t.g.v. $N_{Ed} + M_{y,Ed}$ hoofdliggers (UGT)

Te zien is dat de spanningen onder de vloegrens van 350 N/mm² blijven.

In onderstaande figuren is de spanning in de boven- en de onderflens van de individuele belastingcomponenten weergegeven over de lengte van de halve brug (zonder belastingfactor).



Figuur 10 – Spanningen bovenflens hoofdliggers t.g.v. $N_{Ed} + M_{y,Ek}$ (per belastinggroep)



Figuur 11 – Spanningen onderflens hoofdliggers t.g.v. $N_{Ed} + M_{y,Ek}$ (per belastinggroep)

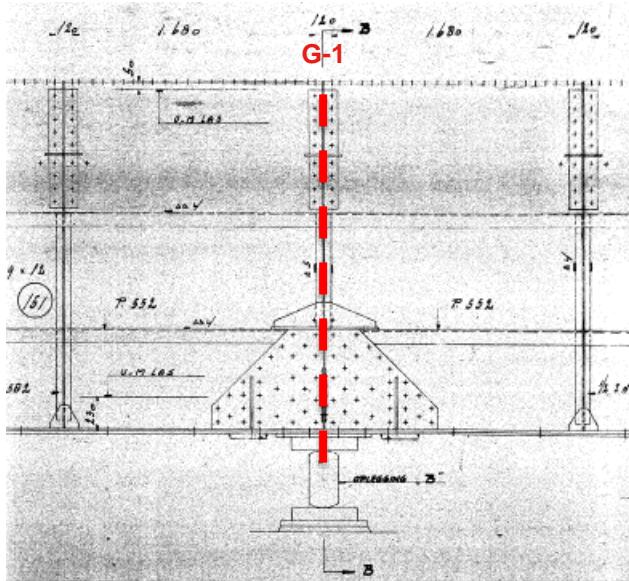
3.1.3 Berekeningsaanpak plooij van het lijf

Bij de bepaling van bovengenoemde spanningen is nog geen rekening gehouden met plooij van de hoofdliggers en de aanwezigheid van de langsverstijvers. De extra langsverstijvers resulteren in een iets grotere doorsnede, terwijl plooij er juist voor zorgt dat er gerekend moet worden met een gereduceerde doorsnede. Daarom zijn met behulp van Mathcad plooiberekeningen gemaakt van een viertal maatgevende snedes, zoals in Figuur 9 is weergegeven, waarbij zowel de extra langsverstijvers als de gereduceerde effectieve doorsnede t.b.v. de plooitoetsing zijn meegenomen. Vervolgens zal op basis van de resultaten worden bekeken of het noodzakelijk is om nog meer snedes te toetsen. De berekeningen zijn weergegeven in Bijlage C1.b t/m f. De snedekrachten van de getoetste snedes zijn weergegeven in Bijlage C1.a.

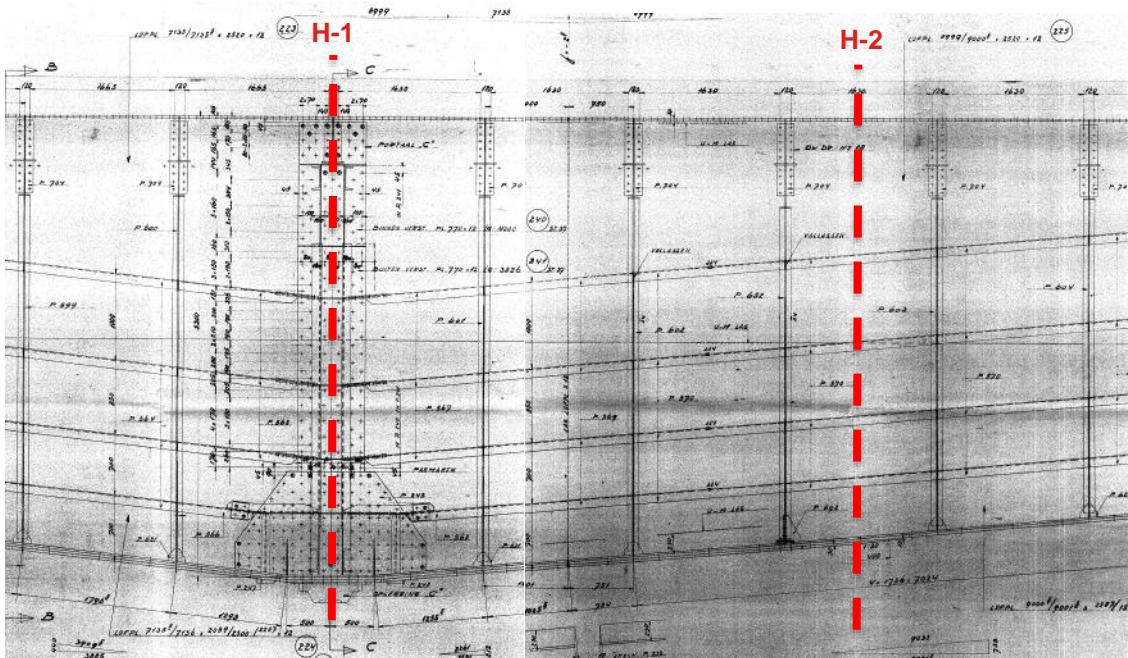
In de plooiberekeningen zijn de volgende onderdelen getoetst, conform NEN-EN 1993-1-5:

- Toetsing bruto doorsnede (exclusief plooiverstijvers)
- Toetsing effectieve doorsnede (inclusief plooiverstijvers) op
 - o Weerstand tegen normaalspanningen (t.g.v. buiging)
 - o Weerstand tegen afschuiving (t.g.v. dwarskracht)
 - o Interactie tussen dwarskracht en buigend moment
- Toetsing verstijvingen en detailleren
 - o Controle starre of vervormbare dwarsverstijvingen t.a.v. normaalspanningen
 - o Controle starre of vervormbare dwarsverstijvingen t.a.v. afschuiving
 - o Controle starre of vervormbare verstijving aan de oplegging
- Toetsing plooien veroorzaakt door de flens

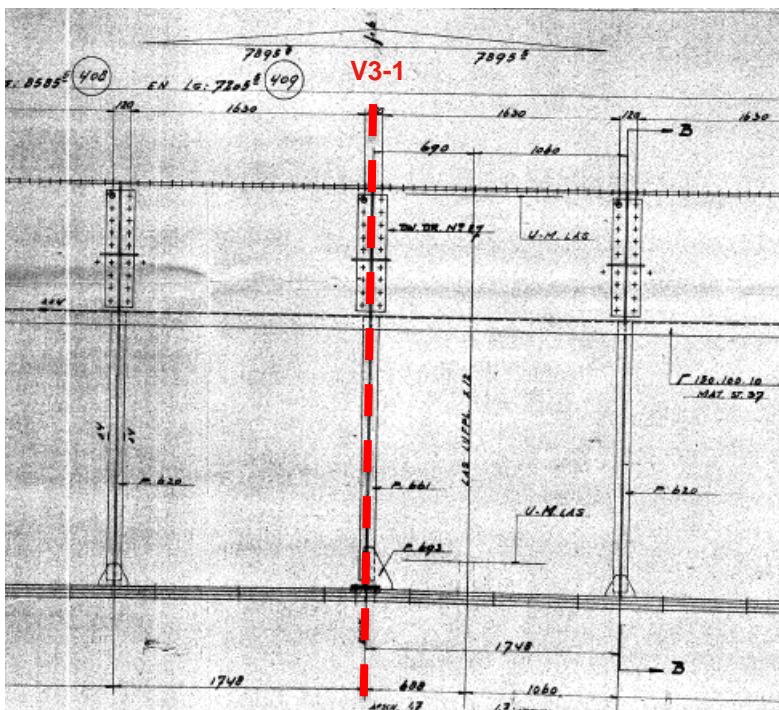
De bovenstaande toetsingen zijn uitgevoerd voor de vier maatgevende sneden, zoals in onderstaande figuren weergegeven.



Figuur 12 – Snede G-1 [A.85363]



Figuur 13 – Snede H-1 en H-2 [A.85365]



Figuur 14 – Snede V3-1 (middenveld 3 (rivieroverspanning)) [A.85367]

3.1.4 Resultaten plooiberekening

Uit de berekeningen volgt dat de dwarsverstijvers bij de K-verbanden als starre dwarsverstijvers t.a.v. normaalspanningen en afschuiving mogen worden beschouwd. De tussenliggende dwarsverstijvers moeten echter in sommige gevallen als vervormbare dwarsverstijvers worden aangehouden voor zowel normaalspanningen (H-1, H-2) als afschuiving (H-1, H-2, V3-1). Voor deze gevallen is de kritieke plooispanssning van het veld tussen twee K-verbanden bepaald met behulp van EB-plate, zodat rekening kan worden gehouden met de tussenliggende flexibele dwarsverstijvers. Ook is vastgesteld dat er sprake is van een starre verstijving aan de opleggingen.

De toetsresultaten van de belangrijkste sterkte-toetsingen zijn voor deze vier maatgevende sneden weergegeven in onderstaande tabel.

Snede	Locatie dx [mm]	Spanning o.b.v. klasse 3 [N/mm ²]	Spanning o.b.v. klasse 4 [N/mm ²]	UC normaalspanningen t.g.v. buiging	UC afschuiving	UC dwarskracht en buiging	UC plooien veroorzaakt door flens
G-1	44996	-246	-249	0,71	0,62	0,73	0,46
H-1	95015	-313	-325	0,93	0,61	0,74	0,68
H-2	100953	-337	-357	1,02	0,55	0,60	0,49
V3-1	147525	343	343	0,98	0,14	0,98	0,30

Tabel 1 – Overzicht van unity checks voor plooitoetsing van hoofdlijger (UGT)

Opgemerkt wordt dat de spanning op basis van klasse 3 is uitgevoerd zonder de langsverstijvers, terwijl de toetsing op basis van klasse 4 met langsverstijvers is uitgevoerd.

Voor de toetsing op “plooien veroorzaakt door de flens” is ervan uitgegaan dat plooien optreedt in de lijfplaat tussen de flens en de tweede langsverstijver, zonder rekening te houden met de steun van de eerste langsverstijver. In werkelijkheid zal er plooï optreden tussen de onderflens en de eerste langsverstijver, maar omdat deze mogelijk niet volledig als stijve ondersteuning kan worden beschouwd is uitgegaan van de hoogte tussen de gedrukte flens en de tweede langsverstijver. In de berekening is rekening gehouden met de kromming van de onderflens.

Het blijkt dat alleen de snede H-2, bij verbinding A.4 net niet voldoet op plooï door langsspanningen. Daarom is voor deze snede gekeken of de doorsnede wel voldoet met de gereduceerde windbelasting en gereduceerde belastingcombinaties, zoals beschreven in het uitgangspuntenrapport (paragraaf 6.4 en 6.9). Wanneer de plooitoetsing wordt uitgevoerd met deze gereduceerde snedekrachten voldoet de doorsnede wel (zie Bijlage C1.f.).

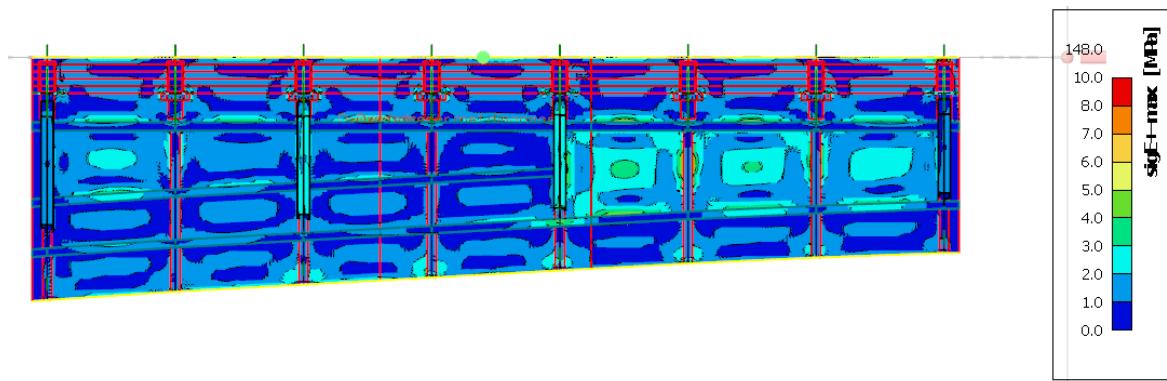
Snede	Locatie dx [mm]	Spanning o.b.v. klasse 3 [N/mm ²]	Spanning o.b.v. klasse 4 [N/mm ²]	UC normaalspanningen t.g.v. buiging	UC afschuiving	UC dwarskracht en buiging	UC plooien veroorzaakt door flens
H-2	100953	-320	-338	0,97	0,52	0,59	0,49

Tabel 2 – Overzicht van unity checks voor plooitoetsing van hoofdlijger (gereduceerde belastingcombinaties)

Uit de berekeningen blijkt dat de toename van de spanningen door de doorsnedereductiemethode maximaal 20 N/mm² is. De hoogte van het meest gedrukte plaatveld is qua hoogte vrij constant over de lengte van de brug. In de velden is dit altijd 900 mm (bovenzijde), bij de steunpunten 700 mm (onderzijde). Op basis hiervan zal de mate van verstijving tegen plooien over de lengte van de brug vergelijkbaar zijn. De toename van de spanning na het in rekening brengen van de doorsnede-reductie zal in andere sneden dus ook niet heel veel meer toenemen als de hier berekende 20 N/mm². De maximale druk in veld 1 is -143 N/mm² (bovenflens), in veld 2 maximaal -244 N/mm² (onderflens). Ook na het in rekening brengen van de doorsnede-reductie zullen de spanningen in deze velden (ruim) lager zijn dan de vloegrens van 350 N/mm². Deze snedes zijn daarom niet verder getoetst.

3.1.5 Windbelasting op lijf

In de berekening van de hoofdlijger is nog geen rekening gehouden met spanningen door windbelasting haaks op het lijf. De windbelasting moet via de lijfplaat naar de verstijvers worden afgedragen en vervolgens naar de K-verbanden en het dek. Met behulp van het lokale model is gekeken naar de grootte van de spanningen in de lijfplaat en de plooiverstijvers door de windbelasting.



Figuur 15 – Spanningen in lijfplaat en plooiverstijvers door windbelasting F^*w (gezien vanaf de binnenzijde brug)

Te zien is dat de spanningen in de lijfplaat in de buitenste velden maximaal 3 N/mm² zijn, wat overeenkomt met een handberekening van deze spanningen. In de grotere velden lopen de spanningen iets verder op tot maximaal 5 N/mm², maar hier zullen de spanningen t.g.v. buiging niet maximaal zijn. Ook in de plooiverstijvers worden spanningen van maximaal 5 N/mm² gevonden. Gezien de lage spanningen is het verantwoord om deze te verwaarlozen in de berekening.

3.1.6 Stabiliteit

Knik van de onderflens

Naast de sterkteberekening is stabiliteit van de onderflens (knikken uit het vlak) gecontroleerd. De dwarsverstijvers bij de tussendwarsdragers zijn niet in staat om voldoende steun te geven tegen het knikken van de onderflens. Daarom is uitgegaan van een kniklengte die overeenkomt met de lengte tussen de K-verbanden. De toetsing is uitgevoerd conform art 6.3.1, waarbij bij de onderflens is beschouwd als een gedrukte staaf. Bij de bepaling van het oppervlak en het traagheidsmoment is 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 plooitoetsingen zijn 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.

Snede	Locatie dx [mm]	UC
G-1	44996	0,71
H-1	95015	0,93
H-2	100953	1,03 (0,97) ¹

¹ gereduceerde belastingcombinaties

Tabel 3 – Overzicht van unity checks voor stabiliteit van de onderflens van de hoofdlijger (UGT)

Er wordt een kleine overschrijding gevonden voor snede H2. Bij de gereduceerde windbelasting en gereduceerde belastingcombinaties voldoet de toetsing wel. In de berekening is bovendien nog niet meegenomen dat over de eerste 700 mm een extra flensplaat aanwezig is van 550x30 mm, met daarna nog een schuin toeopende stuk van 650 mm. Hierdoor is er extra weerstand tegen knikken van de onderflens aanwezig.

3.1.7 Langsverstijvers

Sterkte

De langsverstijvers hebben een lagere vloeigrens (QMc 37) in vergelijking met de hoofdliggers (LQMc 52). De spanning ter hoogte van de 1^e langsverstijver is daarom ook getoetst op de lagere vloeispanning. Veld 3 is niet verder getoetst, aangezien de langsverstijver vrijwel in de neutrale lijn zit.

Snede	Locatie dx [mm]	Spanning o.b.v. klasse 4 [N/mm ²]	UC normaalspanningen t.g.v. buiging
G-1	44996	-134	0,62
H-1	95015	-248	1,15
H-2	100953	-279 (-265) ¹	1,30 (1,23) ¹

¹ gereduceerde belastingcombinaties

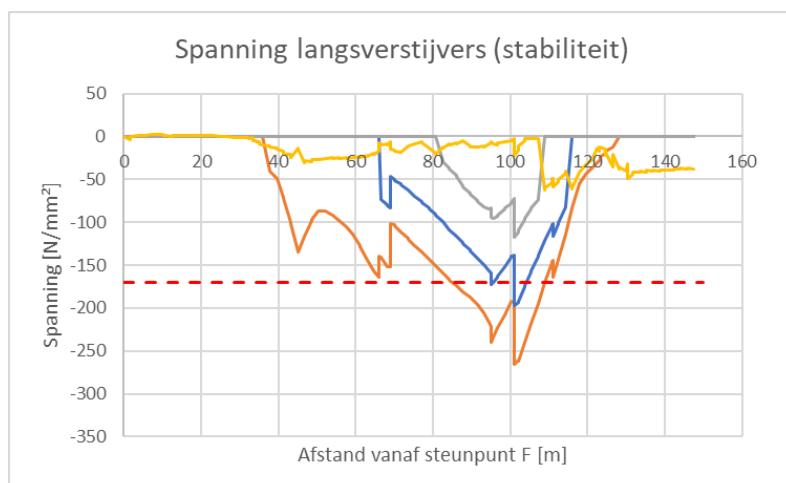
Tabel 4 – Overzicht van unity checks voor de spanning in de 1^e langsverstijver van hoofdlijger (UGT)

Te zien is dat de spanningen ter plaatse van snede H-1 en H-2 te hoog zijn ten opzichte van de vloeispanning ($f_y = 215 \text{ N/mm}^2$). Hierdoor zal de onderste langsverstijver in de UGT gaan vloeien.

Torsieknik van de verstijvers

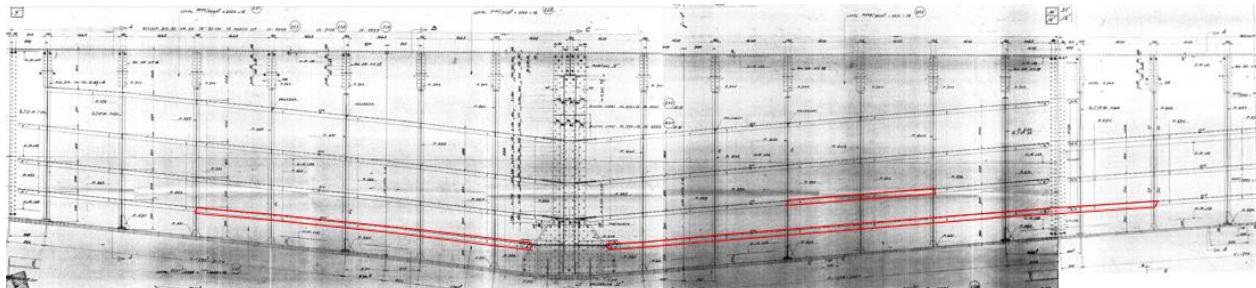
De torsiestijfheid van de dwars- en langsverstijvers zijn in eerste instantie getoetst aan het stijfheids criterium conform NEN-EN 1993-1-5 art. 9.2.1(8). De dwarsverstijvers voldoen aan deze eis, de langsverstijvers niet. In deze toetsing is de lengte tussen de steunen geen parameter, waardoor deze toetsing dus erg conservatief is. Conform de Nationale Bijlage kan de torsiestabiliteit ook worden aangetoond door te voldoen aan art. 13.8.3 van NEN 6771. Hierbij wordt wel rekening gehouden met de lengte van de langsverstijver tussen de steunen. Uit de berekeningen volgt dat torsieknik van de langsverstijvers optreedt bij een (equivalente) drukspanning van -189 N/mm². Hierin zit een bijdrage van de schuifspanning van ca 19 N/mm², wat betekend dat de normaalspanning in de langsverstijver maximaal -170 N/mm² mag zijn. De berekeningen zijn bijgevoegd in de Mathcad berekeningen van de plooiberekeningen in Bijlage C1.

In onderstaand figuur is nogmaals de spanning weergegeven in de langsverstijvers en de spanning waarbij torsieknik optreedt. Te zien is dat de spanningen ter plaatse van snede H-1 en H-2 te hoog zijn ten opzichte van de spanning waarbij torsieknik optreedt ($f_y = -170 \text{ N/mm}^2$).



Figuur 16 – Spanningen in de langsverstijvers en torsieknikspanning (UGT)

In het figuur hieronder is in rood aangegeven in welk gebied de langsverstijver niet voldoet.



Figuur 17 – Gebied waar de langsspanningen hoger zijn dan toelaatbaar

Aanbevolen wordt om de langsverstijvers in het aangegeven gebied te vervangen, of indien de hoofdligger in dit gebied versterkt wordt voor andere redenen (bijvoorbeeld vermoeiing), aan te tonen dat de langsverstijver in de versterkte situatie wel voldoet.

3.2 Dwarsdragers

3.2.1 Berekeningsaanpak

De dwarsdragers van de hoofdoverspanning zijn getoetst aan het vloeispanningscriterium. Hiervoor zijn de Von Mises-spanningen uit het lokale SCIA engineer model gebruikt; zie Bijlage C2. In dit model zijn alle relevante belastingen gemodelleerd waardoor belastingeffecten uit het globale model niet meegenomen hoeven te worden.

De dwarsdrager is niet getoetst op knik en kip aangezien de onderflens grotendeels op trek blijft en het profiel aan de bovenzijde gesteund is door het stalen rijdek. Alleen ter plaatse van de aansluiting met de hoofdligger ontstaat druk in de onderflens door een steunpuntmoment. Uit figuur 1 blijkt echter dat de Von Mises spanningen met 90 MPa relatief laag zijn. Ditzelfde geldt ook voor de console, buiten de hoofdligger.

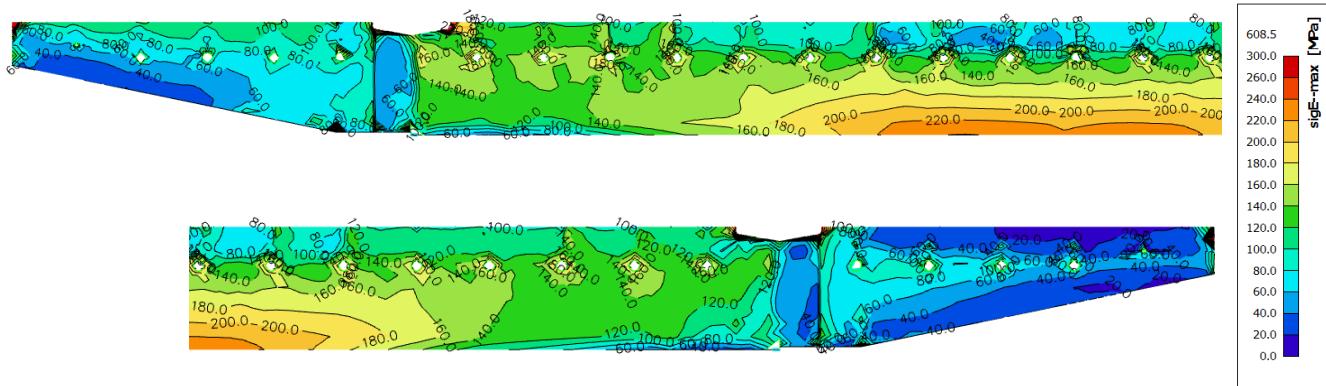
De onderflens van de dwarsdrager valt in doorsnedeklasse 3. Het lijf valt in klasse 1, De dwarsdrager hoeft daarom niet getoetst te worden op plooij.

3.2.2 Resultaten

In onderstaande afbeeldingen zijn de maximale Von Mises spanningen in de maatgevende dwarsdrager weergegeven. De maximale UGT spanning in de dwarsdrager bedraagt 240 MPa en treedt op in de onderflens. De maatgevende belastingcombinatie is “6.10b gr1a verkeer normaal”.

De SCIA resultaten laten op een aantal plekken een overschrijding van vloeispanning zien. Het gaat hier echter om zeer lokale spanningspieken die gerelateerd zijn aan scherpe netelementen en zijn derhalve genegeerd.

De maximale von Mises spanning in de consoles bedraagt 120 MPa en treedt op in de bovenzijde van het lijf.



Figuur 18 – Von Mises spanningen dwarsdrager

Snede	σ_d [N/mm ²]	f_{yd} [N/mm ²]	UC
Dwarsdrager - onderflens	240	350	0,68
Console – bovenzijde lijf	120	350	0,63

Tabel 5 – Overzicht van unity checks sterkte toetsing dwarsdragers

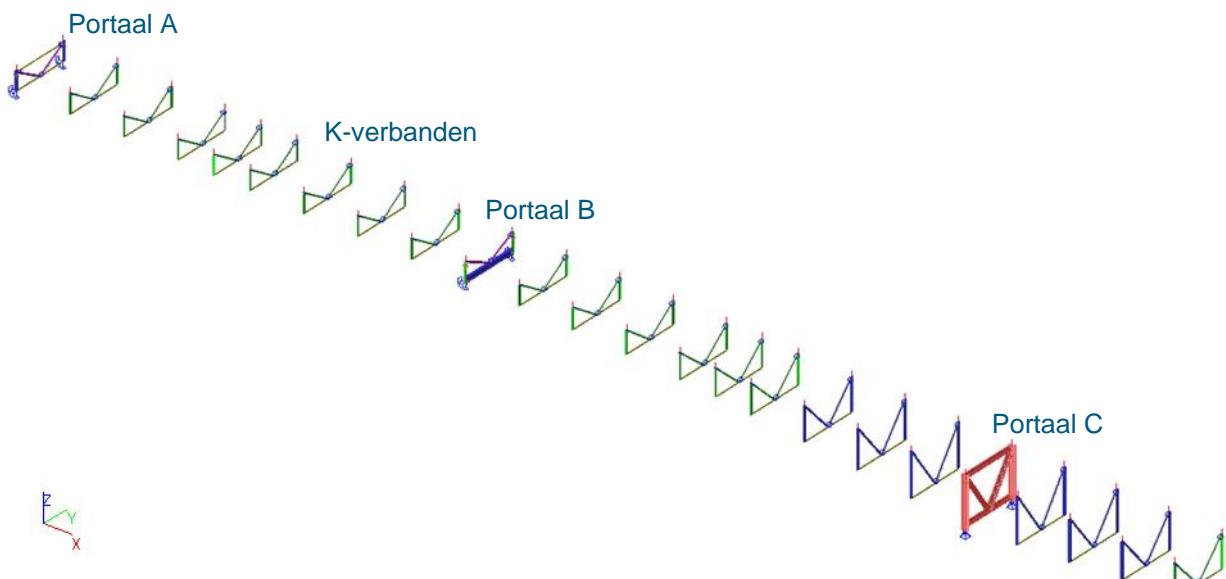
Om meer inzicht te krijgen in de samenstelling van de maximale spanningen zijn in Bijlage C2 en onderstaande tabel de bijdragen van de verschillende belastingcomponenten (zonder belastingfactor) samengevat.

Belasting dwarsdragers	Veld onderzijde
	σ_{\max} [mPa]
UGT (DD UGT)	240
Permanente belastingen	6
Verkeer	120
Rem	0
Wind F*w	1
Temperatuur	21
Warmwaterleiding	7

Tabel 6 – Resultaten belastinggevallen diagonaal (in snede buiten knoop)

3.3 K-verbanden en portalen

In dit hoofdstuk zijn de aanpak en de resultaten van de toetsing van de sterkte en stabiliteit van de K-verbanden en portalen gepresenteerd. Voor de modeluitvoer en berekeningen wordt verwezen naar Bijlage C3.



Figuur 19 – Locatie K-verbanden en portalen

3.3.1 Berekeningsaanpak staafmodel

Voor de toetsing van de K-verbanden en portalen is in eerste instantie gebruik gemaakt van de resultaten van het globale staafmodel. Op basis van de staafkrachten uit dit model zijn de doorsneden op sterkte en stabiliteit getoetst. De doorsnede-toetsing is uitgevoerd met Excel spreadsheets.

In eerste instantie is bij de toetsingen uitgegaan van conservatieve waarden voor de kniklengtefactor en interactiefactoren en is gerekend met de maximale krachten. Bij het niet voldoen van de toetsing zijn de werkelijke waarden bepaald en is de snede waar nodig verplaatst vanuit de knoop naar de dag van de verbinding.

Bij de doorsnede-toetsing van de verticalen van de portalen is de bijdrage van het lijf van de hoofdliggers meegenomen. Hierbij is een meewerkende breedte aan beide zijden van het profiel van $15\epsilon * t_w$ meegenomen, waarbij voor t_w is gerekend op de lijfdikte inclusief opdikplaten in het lijf. Voor de plootoetsing van het lijf van de hoofdligger wordt verwezen naar paragraaf 3.1.

Voor de toetsing van de onderrand van portaal B is rekening gehouden met de trekopleggingen. In het rekenmodel is de oplegging ter plaatse van de drukoplegging aangehouden, zodat er niet een niet-lineaire berekening uitgevoerd hoeft te worden. De onderrand is handmatig gecontroleerd op het moment wat ontstaat bij een maximale trekkkracht in de trekoplegging (zie paragraaf 3.5.1). Het optredende moment is $M_y = 529 \text{ kN} * 0.85 \text{ m} = 450 \text{ kNm}$.

3.3.2 Resultaten K-verbanden

Alle onderdelen van de K-verbanden voldoen op sterkte en stabiliteit. De maatgevende UC bedraagt 0,66 en treedt op in een verticaal.

Profiel diagonalen	sterkte	stabiliteit
Diagonalen 2x L80x8	0,31	0,31
Diagonalen 2x L90x9	0,25	0,30
Horizontalen 0,5 DIN 20	0,03	0,09
Verticaal 0,5 INP24 + 0,5 INP 24	0,59	0,59
Verticaal 0,5 INP24 + 0,5 INP 30	0,66	0,66
Verticaal 0,5 INP24	0,34	0,34
Verticaal 0,5 INP30	0,33	0,33
Verticaal L90x9	0,23	0,25

Tabel 7 – Overzicht van unity checks K-verbanden

3.3.3 Resultaten portalen

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de UC's van de verschillende onderdelen van de portalen.

Locatie	profiel	sterkte	stabiliteit
Diagonaal portaal A	2x L100x10 2LX	0,44	0,60
Diagonaal portaal B	2x L100x10 2LX	1,11 / 0,96 ¹	0,95 / 0,79 ¹
Diagonaal portaal C	2x UNP 260	1,12 / 1,11 ¹ / 0,79 ^{1,3}	0,96 / 0,95 ¹ / 0,83 ^{1,3}
Onder- en bovenrand portaal A	Horizontalen 0,5 DIN 20	0,26	0,37
Onderrand portaal B	I-profiel	0,15 / 0,65 ²	0,22 / 0,41 ²
Onder- en bovenrand portaal C	2x UNP 260	1,20 / 1,19 ¹ / 0,98 ^{1,3}	0,85 / 0,84 ¹ / 0,65 ^{1,3}
Verticaal portaal A	1/2 INP30 + 1/2 INP30	1,05 / 1,01 ¹ / 1,00 ^{1,3}	0,86 / 0,80 ¹ / 0,79 ^{1,3}
Verticaal portaal B	150x12+126x12 + 0,5 INP30	1,82 / 1,69 ¹ / 1,59 ^{1,3}	1,33 / 1,23 ¹ / 1,17 ^{1,3}
Verticaal portaal C	samengesteld	1,02 / 0,98 ¹	1,04 / 0,99 ¹

¹ gereduceerde windbelasting en belastingcombinatie cf. uitgangspuntenrapport §6.4 en §6.9

² belastingcombinatie trekverbinding

³ gereduceerde windbelasting ($CsCd = 0,85$ en b/d_{tot} gebaseerd op de breedte van twee bruggen)

Tabel 8 – Overzicht van unity checks portalen

Uit de berekening onder de normale belastingcombinaties volgt dat diverse diagonalen, verticalen en onderranden van de portalen niet voldoen. Daarom is gekeken of deze onderdelen wel voldoen onder de gereduceerde windbelasting en belastingcombinaties, zoals beschreven in het uitgangspuntenrapport, paragraaf 6.4 en 6.9. De UC bij deze belastingcombinaties is aangegeven met een subscript ¹. Ook bij deze combinatie bleken nog een aantal onderdelen niet te voldoen.

Gereduceerde windbelasting ($c_{scd} = 0,85$ en b/d_{tot} o.b.v. twee bruggen)

In overleg met Rijkswaterstaat is daarom de volgende optimalisatie doorgevoerd in de toetsing van de portalen. In de bepaling van de windbelasting bleek nog enige conservatisme te zitten. Met een aparte berekening is de toetsing opnieuw uitgevoerd, waarbij de volgende zaken zijn aangepast.

- c_{scd} factor in de berekening van de windbelasting is aangehouden als 0,85 in plaats van 1,00
- b/d_{tot} verhouding in de bepaling van de windbelasting is gebaseerd op de twee stalen bruggen tezamen in plaats van één enkele brug

De berekening van de aangepaste windbelasting is weergegeven in Bijlage A3c en d. Wanneer de constructie met deze aangepaste windbelasting wordt doorgerekend, blijkt dat alleen de verticaal van portaal B niet voldoet. De resultaten zijn in bovenstaande tabel aangeduid met een subscript ³.

Om inzicht te krijgen in de belastingaandelen van de verschillende type belastingen is in onderstaande paragrafen een uitsplitsing van de spanning per belastingtype gegeven voor de diagonalen en verticalen van portaal B en C (op basis van het oorspronkelijke model zonder reducties in windbelasting). De spanning is de maximale waarde van N_{max} + bijbehorende M_y + M_z en $M_{y,max}$ met bijbehorende $N + M_z$.

Diagonalen

De UC van de diagonalen wordt hoofdzakelijk bepaald door de normaalkracht en buiging om de sterke as.

Belasting diagonalen	Portaal B	Portaal C
	σ_{max} [mPa]	σ_{max} [mPa]
UGT (HL UGT)	-238	-255
BGT (HL kar)	-180	-173
Permanente belastingen	-27	-4
Verkeer	-86	-17
Rem	-1	0
Wind F^*w	-61	-153
Temperatuur	-11	-2
Warmwaterleiding	-2	-1

Tabel 9 – Resultaten belastinggevallen diagonaal (in snede buiten knoop)

Opgemerkt wordt dat de profielen van klasse 1 zijn, waardoor de UC niet één te vergelijken is met de spanning. Het aandeel normaalkracht in de maatgevende toetsing (N_{max}) bedraagt circa 70%. De normaalkracht is overeenkomstig de oorspronkelijke ontwerpberekening. Door wind en verkeer ontstaan buigende momenten waardoor de UC in eerste instantie boven de 1,0 uitkwam. Deze buigende momenten zijn niet meegenomen in de oorspronkelijke ontwerpberekening. Na reductie van de windbelasting blijkt dat de diagonalen wel voldoen.

Verticalen

De bijdragen van de verschillende belastingen aan de spanningen in de verticalen zijn in onderstaande tabel weergegeven (op basis van het oorspronkelijke model zonder reducties in windbelasting).

Belasting verticalen	Portaal B	Portaal C
	σ_{\max} [mPa]	σ_{\max} [mPa]
UGT (HL UGT)	-381	-220
BGT (HL kar)	-303	-175
Permanente belastingen	-59	-68
Verkeer	-191	-68
Rem	-2	-1
Wind F*w	-37	-33
Temperatuur	-28	-1
Warmwaterleiding	-4	-6

Tabel 10 – Resultaten belasting gevallen verticalen (in snede buiten knoop)

Conclusie

Op basis van de resultaten van de berekening met het globale model blijkt dat de verticalen en diagonalen kritisch zijn, waarbij de verticaal van portaal B niet voldoet. Het gebruik van het globale (staaf)model voor de toetsing van de portalen heeft echter een aantal beperkingen. De belangrijkste beperkingen van het gebruik van het globale model zijn:

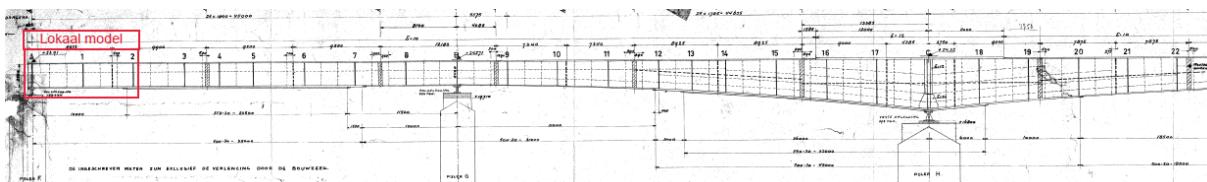
- In het staafmodel wordt de dwarskracht uit de hoofdlijger aan de bovenzijde van de verticaal als normaalkracht ingeleid en als druk afgedragen naar de oplegging. In werkelijkheid wordt de dwarskracht over de lengte van de verticaal ingeleid door middel van schuifspanningen. De normaalkracht zal daardoor in werkelijkheid van boven naar beneden geleidelijk toenemen.
- In het staafmodel is het niet (goed) mogelijk om rekening te houden met alle verstijvingsschotjes en met kruisingen van staven. Zo is gebruik gemaakt van starre bindingen over de hoogte van de dwarsdrager om een verbinding te maken tussen hoofdlijger en verticaal/diagonaal. Daarnaast zijn de schotjes niet meegenomen in het staafmodel. Hoewel de toetssneden zijn afgestemd op de daadwerkelijke doorsnede van de verticale staaf in de betreffende snede, heeft de wijze van modelleren waarschijnlijk wel invloed op de stijfheden in het model, en dus de momentverdeling in het portaal.
- In het staafmodel zijn de tandemstelsels alleen ingevoerd voor de maatgevende posities van de hoofdlijger. Voor de dwarsdrager en voor het maatgevende moment in de verticalen zal de maatgevende positie iets meer naar het midden van het de dwarsdrager moeten worden geplaatst, zoals in het lokale plaatmodel is gedaan.

In overleg met Rijkswaterstaat is besloten om voor elk van de portalen een hybride model te maken, bestaande uit een deel rondom het portaal wat volledig is opgebouwd met plaat elementen, wat gekoppeld is met het globale staafmodel voor de rest van de brug. De modellen zijn beschreven in de Uitgangspuntenrapportage, paragraaf 7.4.3, waarbij voor de UGT toetsing van de portalen gebruik is gemaakt van hybride model A, B en C. In de hybride modellen is rekening gehouden met de maatgevende positie van het tandemstelsel voor de portalen.

3.3.4 Portaal A

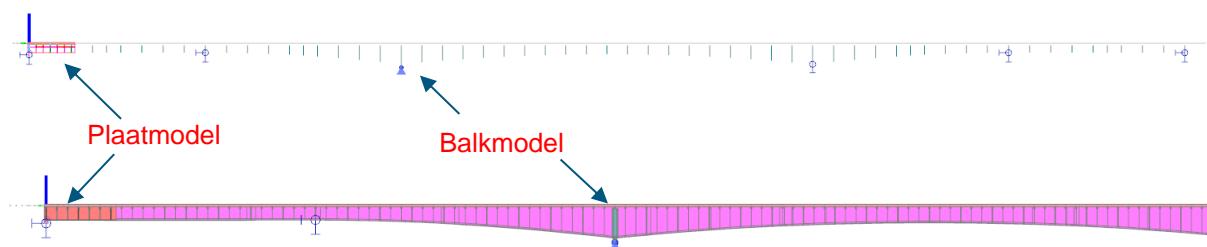
3.3.4.1 Modellering

Voor portaal A is een hybride model opgezet met een combinatie van staaf- en schaalelementen. De locatie en de afmetingen van het deel met schaalelementen is in overleg met Rijkswaterstaat bepaald en heeft een lengte van ca. 10 m, van portaal A tot en met het tweede K-verband, zie Figuur 20.

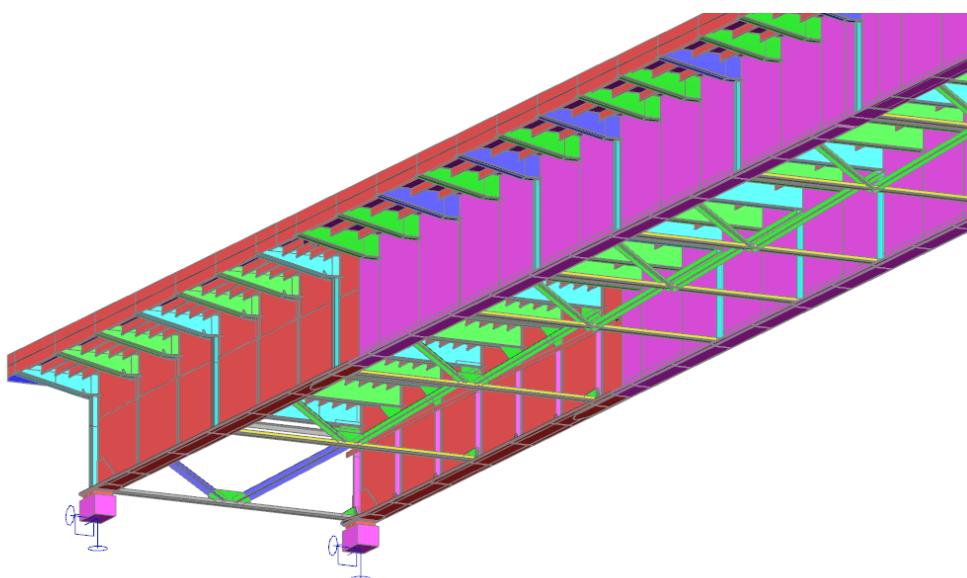


Figuur 20 – De locatie van het deel dat is gemodelleerd met plaatelementen

Het model is beschreven in de uitgangspuntenrapportage, paragraaf 7.4.3, en bestaat uit een gedeelte dat volledig is gemodelleerd met plaatelementen (rood weergegeven) en een gedeelte dat is gemodelleerd met hoofdzakelijk staafelementen (m.u.v. de dekplaat) (roze weergegeven), zie Figuur 21.



Figuur 21 – Hybride model A bestaande uit een gecombineerd plaat- en balkmodel



Figuur 22 – 3D weergave schuin-onder aanzicht hybride model A

De opbouw van het model en de validatie van het model wordt in het uitgangspuntenrapport behandeld en wordt daarom hier niet herhaald.

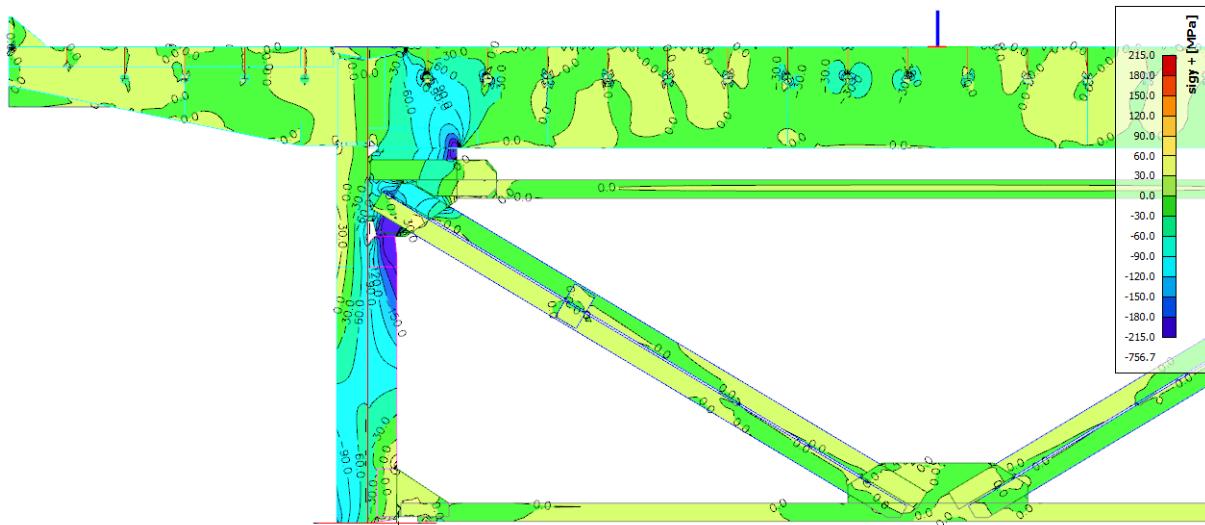
3.3.4.2 Sterkte-analyse portaal A

Op basis van doorsnedetoetsing van portaal A (met het globale staafmodel) volgt dat met name de verticaal en de diagonaal kritisch zijn. Er is daarom een toetsing uitgevoerd met het hybride model, uitgaande van de gereduceerde windbelasting en gereduceerde belastingcombinaties, zie hoofdstuk 6.4.4 en 6.9.3.2 van de uitgangspuntenrapportage.

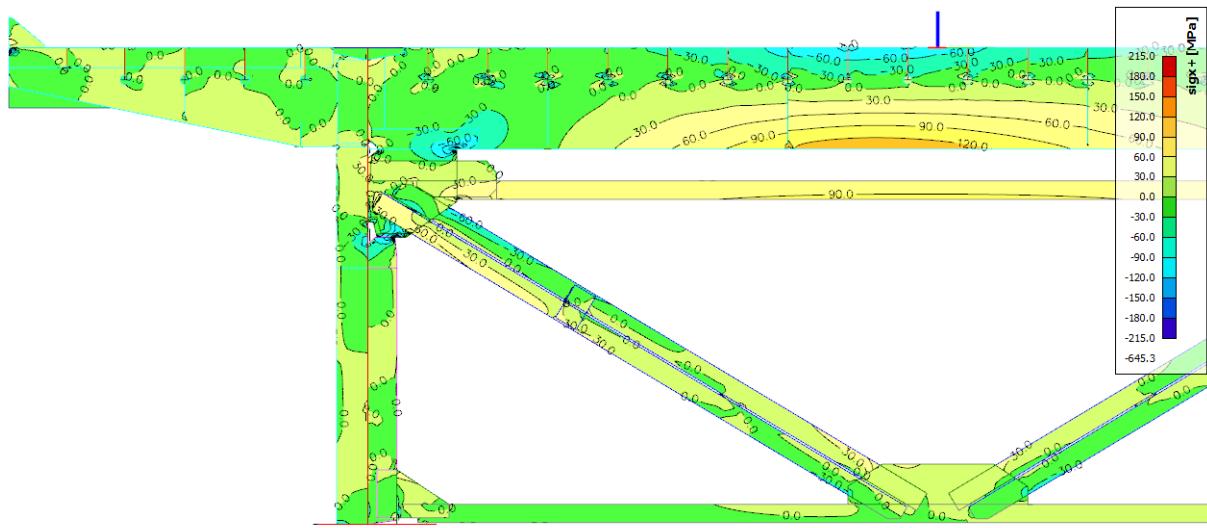
Om de rekentijd van het hybride model te beperken, zijn alleen de voor portaal A relevante tandemstelsels (positie maatgevend voor hoofdlijker en dwarsdrager/portaal) in het rekenmodel ingevoerd. Uit de analyse van het globale model volgt dat het effect van de temperatuurbelasting op de verticaal van portaal A beperkt is. In het hybride model is de temperatuurbelastingen daarom verwaarloosd. De overige belastingen zijn wel overeenkomstig met het globale model aangehouden.

Uit de berekening volgt dat belastingcombinatie 6.10b, gr1a maatgevend is voor de verticaal, met het tandemstelsel boven op de dwarsdrager van het portaal, de UDL belasting op veld 1 en een windbelasting in x+ richting (oost). Om een goed beeld van de spanningen binnen deze combinatie te krijgen is deze combinatie ingevoerd als lineaire combinatie. Hierdoor kan het werkelijke spanningsbeeld bekijken worden, zonder dat er sprake is van een omhullend spanningsbeeld van meerdere belastingcombinaties.

In Figuur 23 zijn de verticale spanningen aan één zijde van de plaat (σ_y+) in deze maatgevende lineaire UGT combinatie weergegeven. Figuur 24 geeft de spanningen in horizontale richting van één zijde van de plaat (σ_x+). De vloegrens in de dwarsdrager is $f_y = 215 \text{ N/mm}^2$.



Figuur 23 – Spanningen σ_y+ in portaal A



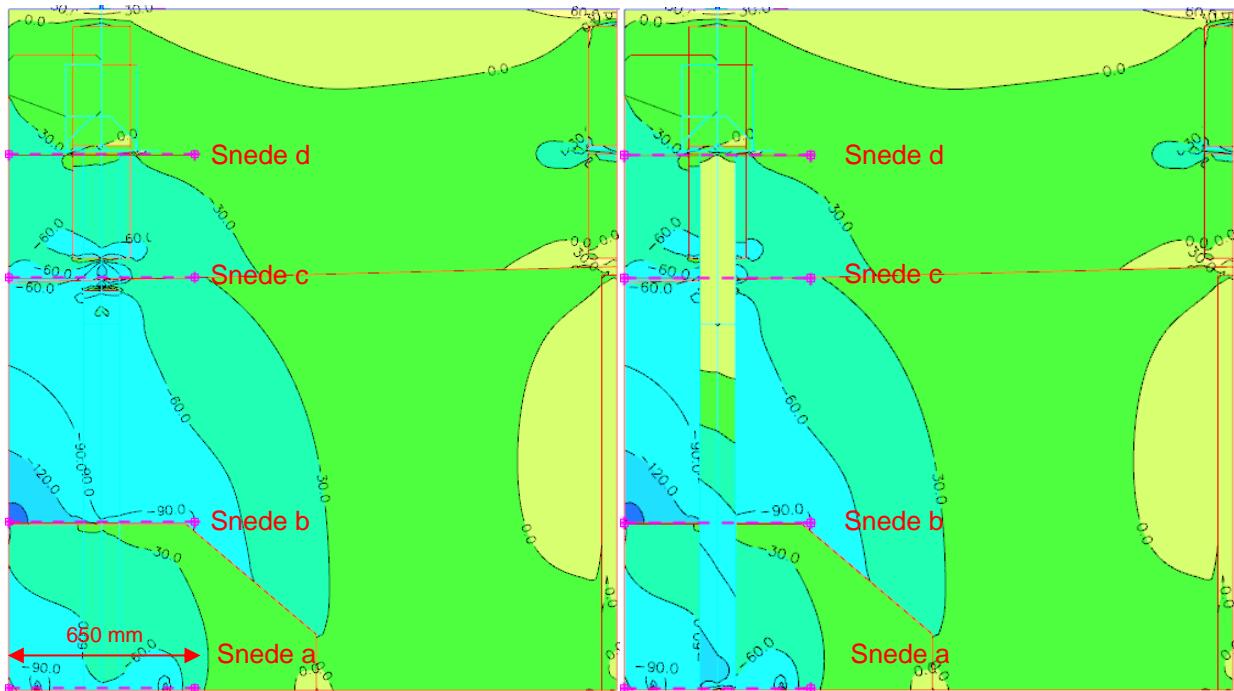
Figuur 24 – Spanningen σ_x+ in portaal A

De spanningen blijven over het algemeen onder de vloeistofspanning ($f_y = 215 \text{ N/mm}^2$), met uitzondering van de spanningen in de verticaal ter plaatse van het schot tussen dwarsdrager en dwarsverstijver. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door spanningsconcentraties door de aanwezigheid van laspoortjes en haakse aansluitingen, met name ter plaatse van de aansluiting van het schot op de onderflens van de dwarsdrager en de aansluiting van het schot op de langsverstijver.

3.3.4.3 Plastische doorsnede-toetsing verticaal portaal A

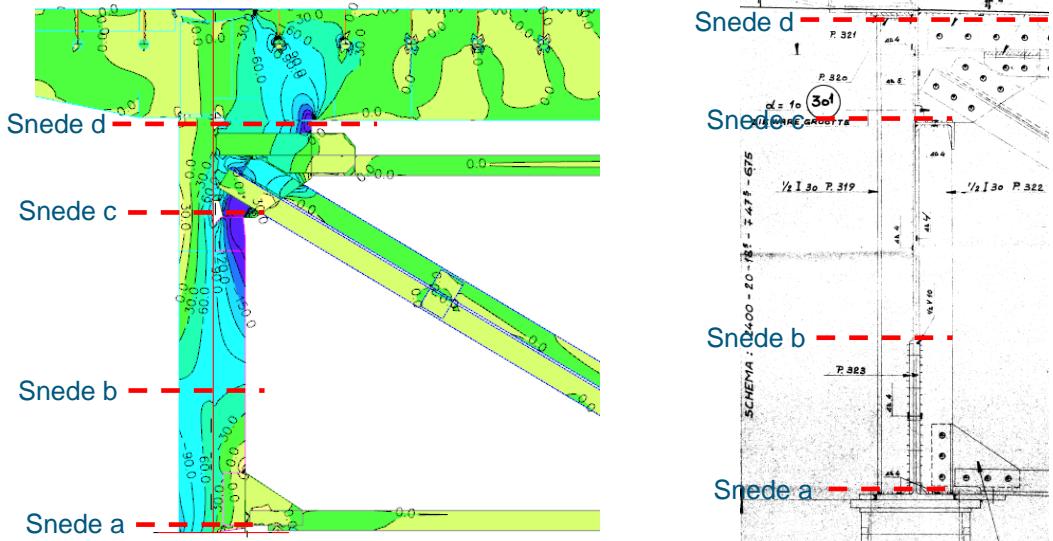
Omdat de overschrijdingen in de verticaal veelal zeer lokaal optreden is er gekeken of de gehele doorsnede wel voldoet op basis van de plastische doorsnede-capaciteit. Hiervoor is het nodig om de normaalkracht en het moment in de gehele doorsnede van de verticaal te bepalen. Hiervoor zijn een viertal sneden in de het model gelegd waarvoor de op tredende normaalkracht en moment wordt bepaald. De sneden zijn genomen over de flens en het lijf van de dwarsverstijver plus de meewerkende breedte van het lijf van de hoofdlijger. De meewerkende breedte is aan één zijde beperkt tot 325 mm in verband met het einde van de hoofdlijger. Er is daarom uitgegaan van een meewerkende breedte van $2 \times 325 = 650 \text{ mm}$, zie Figuur 25.

Uit de spanningen kan door SCIA een integratie van de spanningen over de geselecteerde elementen worden gemaakt in het vlak van de snede. Hiermee kan de normaalkracht het moment worden bepaald in de betreffende snede. In onderstaand figuur zijn de spanningen in verticale richting in het lijf van de hoofdlijger (links) en in de flens van de dwarsverstijver (rechts) weergegeven onder de maatgevende belastingcombinatie. In de figuren zijn de sneden roze weergegeven.



Figuur 25 – Spanningen σ_y - in het lijf (links) en in de flens (rechts)

Op basis van de omhullende UGT spanningen in de dwarsverstijver zijn vier kritische doorsneden bepaald, zie Figuur 26. Voor deze sneden is een integratie van de krachten uitgevoerd voor vier maatgevende belastingcombinaties. Vervolgens is een doorsnedetoetsing uitgevoerd met deze optredende krachten en momenten, waarbij rekening is gehouden met de plastische capaciteit van de doorsnede, zie Bijlage C3-q.4 t/m q.7.



Figuur 26 – Getoetste doorsnedes in de dwarsverstijver van portaal A.

In onderstaande tabel zijn de resultaten weergegeven voor de combinatie met gereduceerde windbelasting ($c_s c_d = 0,85$) en gereduceerde belastingfactoren.

Verticaal portaal A ¹								
Snede	(a)		(b)		(c)		(d)	
	N _{max}	M _{max}						
Optredende normaalkracht [kN]	-1973	-1803	-1427	-1137	-938	-860	-738	-522
Capaciteit normaalkracht N _{pl} [kN]	-8218	-8218	-4214	-4214	-3752	-3752	-4353	-4353
Moment om de sterke as [kNm]	76	94	-4	-12	-39	-62	-59	-122
Momentcapaciteit M _{pl} [kNm]	184	184	128	128	-140	-140	-440	-440
UC (sterkte)	0,65	0,73	0,37	0,36	0,53	0,67	0,41	0,62
UC (stabilitet)	0,74	0,82	0,40	0,39	0,57	0,73	0,30	0,40

¹ gereduceerde windbelasting ($c_s c_d = 0,85$ en b/d_{tot} gebaseerd op de breedte van twee bruggen)

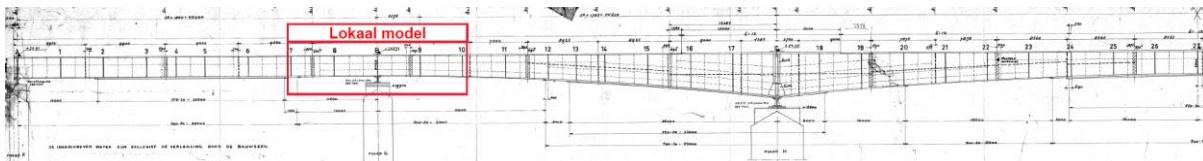
Tabel 11 – Overzicht van de unity checks voor de toetsing van de verticaal van het K-verband bij portaal A (UGT)

Te zien is dat, zoals verwacht, de normaalkracht van boven naar beneden toeneemt. Uit de toetsing volgt dat de verticaal voldoet, op basis van de plastische capaciteit. Maatgevend is de snede net boven de oplegging (snede a).

3.3.5 Portaal B

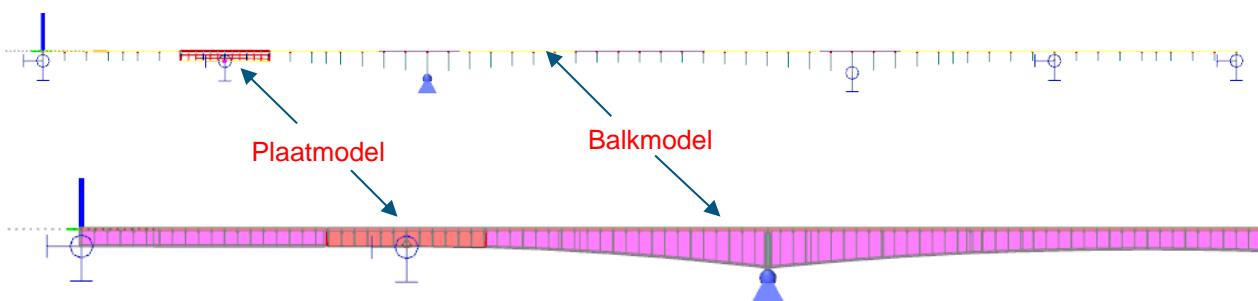
3.3.5.1 Modellering

Voor portaal B is een vergelijkbaar hybride model opgezet als voor portaal A. De locatie en de afmetingen van dit deel dat met plaatelementen is gemodelleerd is in overleg met Rijkswaterstaat bepaald en heeft loopt van 2 K-verbanden voor portaal B tot 2 K-verbanden na portaal B, van dwarsdrager met K-verband 7 t/m 10, zie Figuur 27.

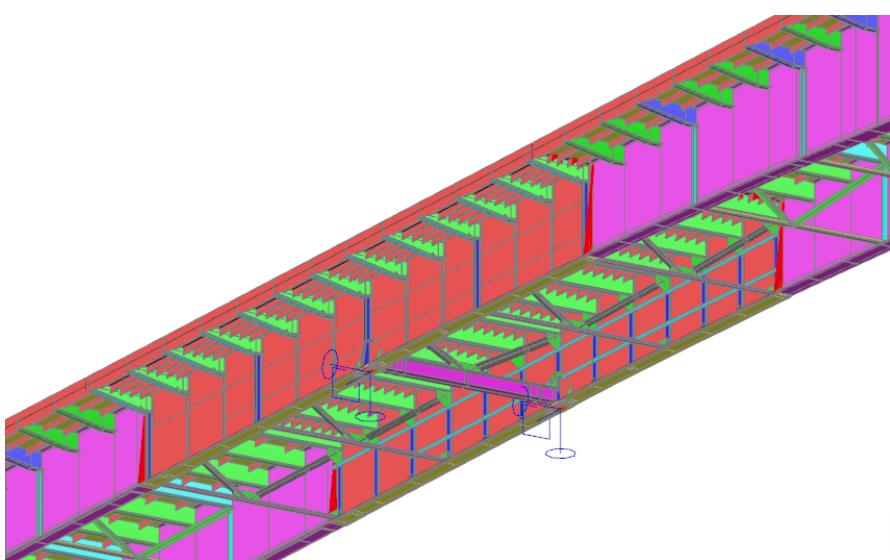


Figuur 27 – De locatie van het deel dat is gemodelleerd met plaatelementen

Het model is beschreven in de uitgangspuntenrapportage, paragraaf 7.4.3, en bestaat uit een gedeelte dat volledig is gemodelleerd met plaatelementen (rood weergegeven) en een gedeelte dat is gemodelleerd met hoofdzakelijk staafelementen (m.u.v. de dekplaat) (roze weergegeven), zie Figuur 28.



Figuur 28 – Hybride model B bestaande uit een gecombineerd plaat- en balkmodel



Figuur 29 – 3D weergave schuin-onder aanzicht hybride model B

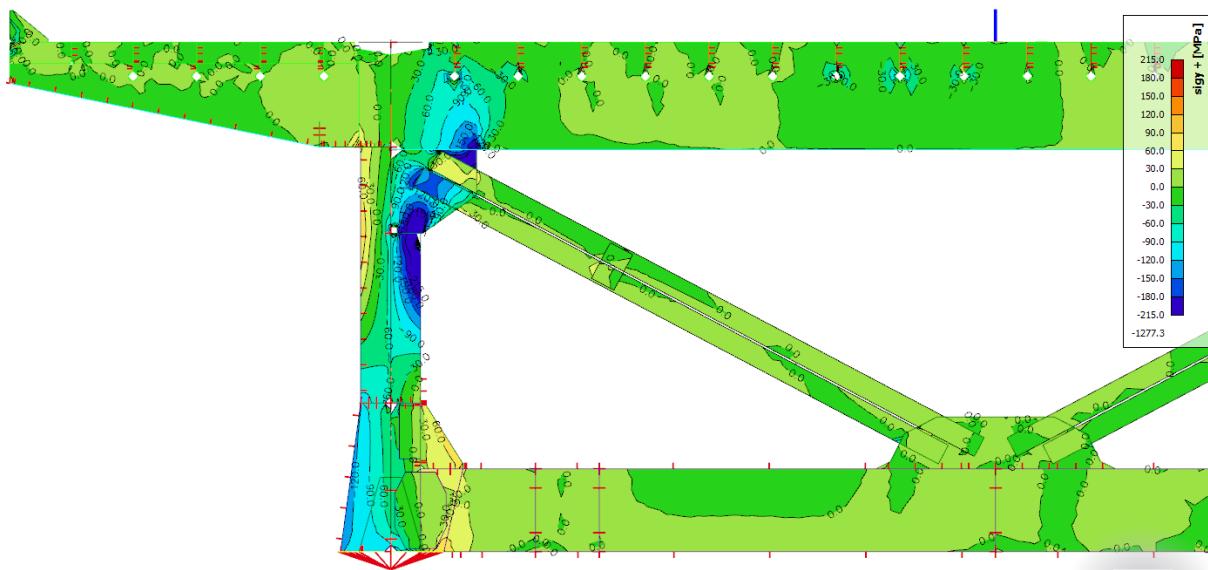
De opbouw van het model en de validatie van het model wordt in het uitgangspuntenrapport behandeld en wordt daarom hier niet herhaald.

3.3.5.2 Sterkteanalyse portaal B

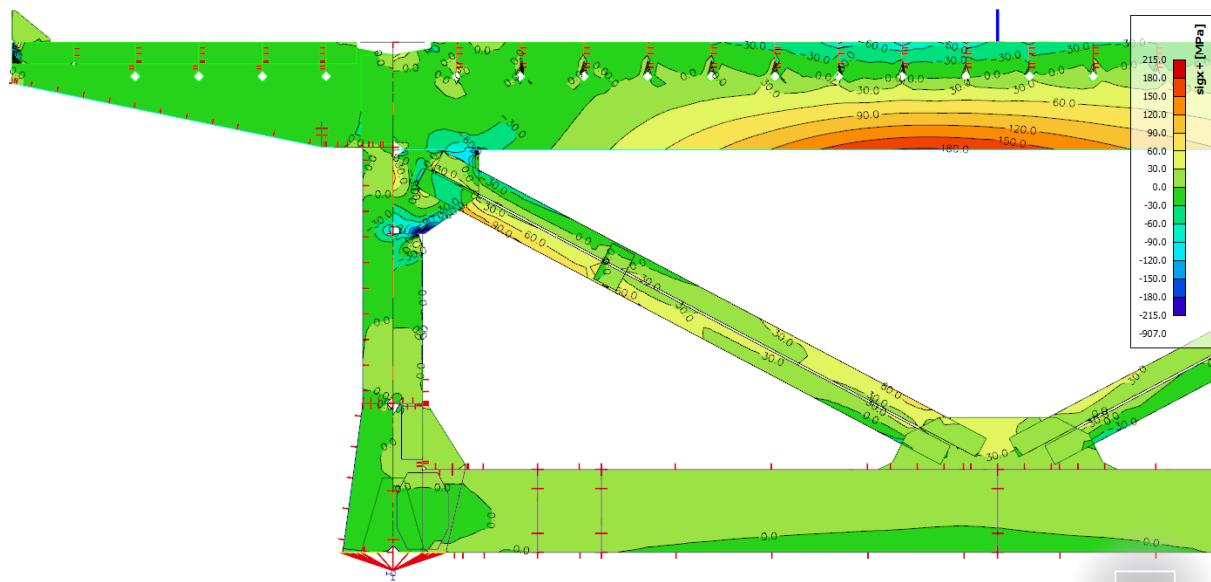
Op basis van doorsnedetoetsen van het portaal (met het globale model) volgt dat met name de verticaal en de diagonaal kritisch zijn. Er is daarom een toetsing uitgevoerd met het hybride model, uitgaande van de gereduceerde windbelasting en gereduceerde belastingcombinaties, zie hoofdstuk 6.4.4 en 6.9.3.2 van de uitgangspuntenrapportage. Net als voor portaal A is de temperatuurbelasting verwaarloosd in het hybride model. De overige belastingen zijn wel overeenkomstig met het globale model aangehouden.

Uit de berekening volgt dat belastingcombinatie 6.10b, gr1a maatgevend is voor de verticaal, met het tandemstelsel boven op de dwarsdrager van het portaal, de UDL belasting op veld 1, 2 en 4 en een windbelasting in x+ richting. Om een goed beeld van de spanningen binnen deze combinatie te krijgen is deze combinatie ingevoerd als lineaire combinatie. Hierdoor kan het wekelijke spanningsbeeld bekijken worden, zonder dat er sprake is van een omhullend spanningsbeeld van meerdere belastingcombinaties.

In Figuur 30 zijn de verticale spanningen aan één zijde van de plaat (σ_y+) in deze maatgevende lineaire UGT combinatie weergegeven. Figuur 31 geeft de spanningen in horizontale richting (σ_x+).



Figuur 30 – Spanningen σ_y+ in portaal B

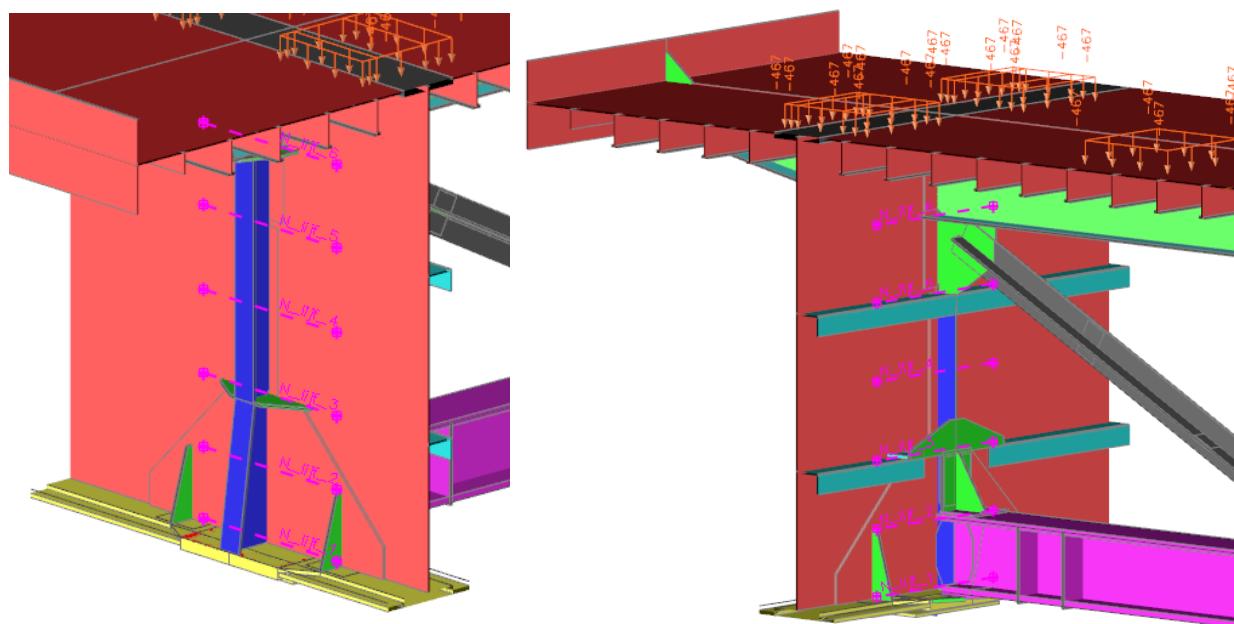


Figuur 31 – Spanningen σ_x+ in portaal B

De spanningen blijven over het algemeen onder de vloeistressing ($f_y = 215 \text{ N/mm}^2$), met uitzondering van de spanningen in de verticaal ter plaatse van het schot tussen dwarsdrager en dwarsverstijver, vergelijkbaar als voor portaal A. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door spanningsconcentraties door de aanwezigheid van laspoortjes en haakse aansluitingen, met name ter plaatse van de aansluiting van het schot op de onderflens van de dwarsdrager en de aansluiting van het schot op de langsverstijver.

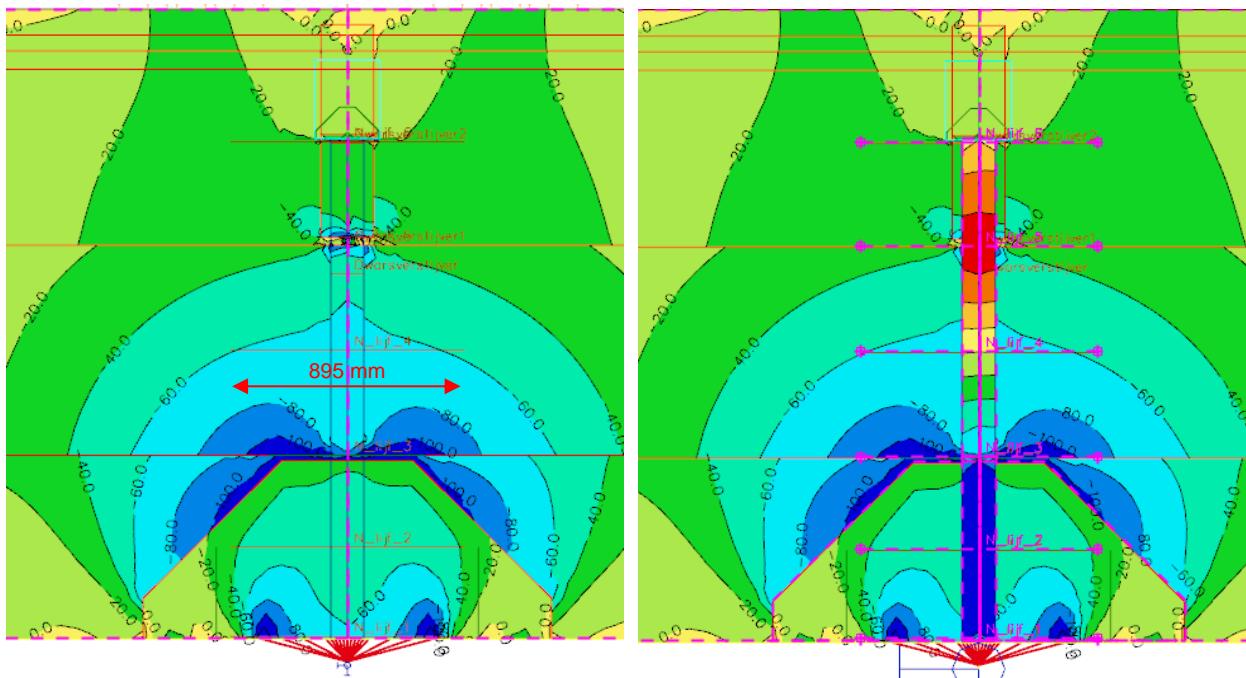
3.3.5.3 Plastische doorsnede-toetsing verticaal portaal B

Omdat de overschrijdingen in de verticaal veelal zeer lokaal optreden is er gekeken of de gehele doorsnede wel voldoet op basis van de plastische doorsnede-capaciteit. Net als voor portaal A zijn er daarom verschillende sneden in het model aangebracht en is een plastische toetsing uitgevoerd van de maatgevende sneden. De sneden zijn genomen over de flens en het lijf van de dwarsverstijver plus de meewerkende breedte van het lijf van de hoofdlijger ($b = 2 \cdot 15 \cdot \epsilon t_w = 895 \text{ mm}$). Aanvullend hierop is ook een analyse gemaakt van het verloop van de normaalkracht en moment in de verticaal, waarbij een vergelijking is gemaakt met het balkmodel.



Figuur 32 – Sneden over de dwarsverstijver

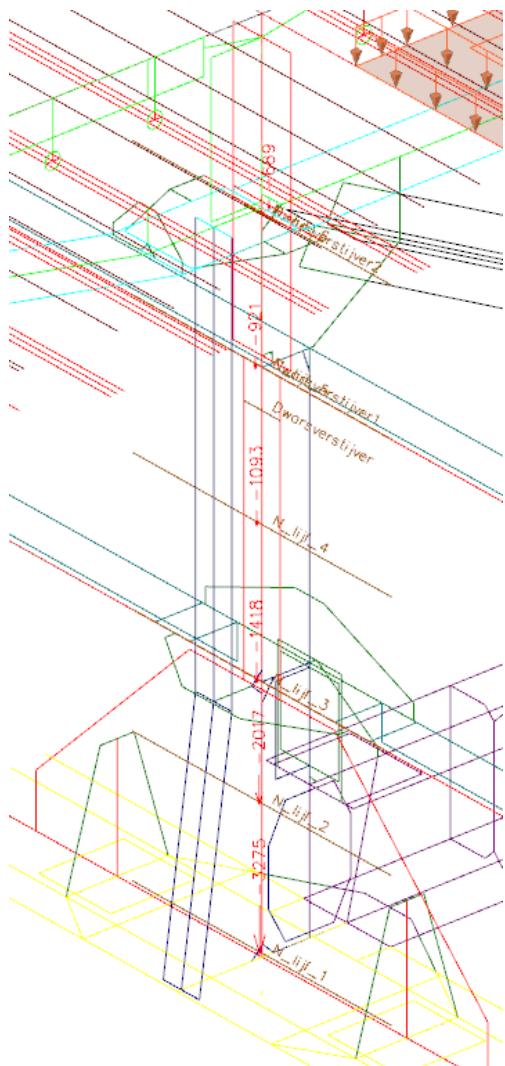
Uit de spanningen kan door SCIA een integratie over de geselecteerde elementen worden gemaakt in het vlak van de snede. Hiermee kan een normaalkrachtenlijn en een momentenlijn worden samengesteld. In onderstaand figuur zijn de spanningen in verticale richting in het lijf van de hoofdlijper (links) en in de flens van de dwarsverstijver (rechts) weergegeven onder de maatgevende belastingcombinatie. In het rechter figuur zijn de sneden roze weergegeven.



Figuur 33 – Spanningen σ_y in het lijf (links) en in de flens (rechts)

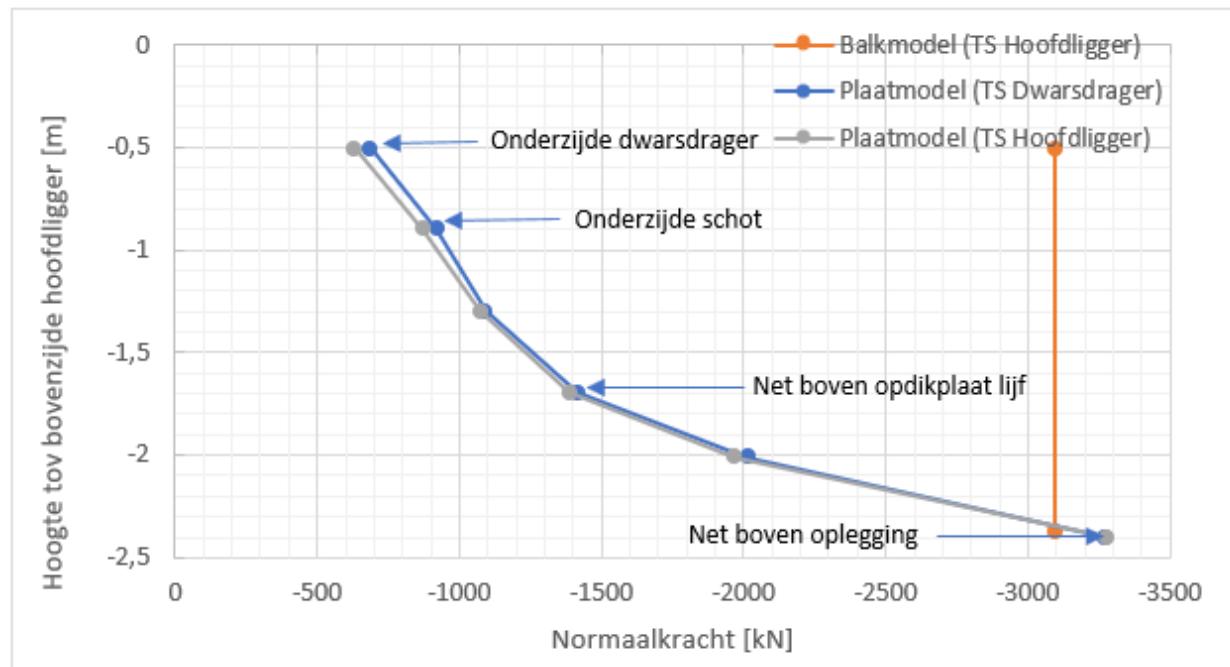
Uit de spanningsverdeling in het lijf van de hoofdlijper wordt al duidelijk dat de drukspanning oploopt richting de oplegging, wat er op wijst dat de normaalkracht geleidelijk toeneemt over de lengte van de verticaal, in tegenstelling tot hetgeen gevonden wordt in een staafmodel (constante normaalkracht).

Uit de integratie van de spanningen over de meewerkende breedte van het lijf van de hoofdlijger en over de dwarsverstijver volgen de volgende normaalkrachten onder de maatgevende belastingcombinatie.



Figuur 34 – Normaalkrachten in de sneden

In onderstaande grafiek is de normaalkracht over de lengte van de verticaal weergegeven voor twee maatgevende combinaties (TS normaal, maatgevende positie TS voor hoofdlijker en voor dwarsdrager).

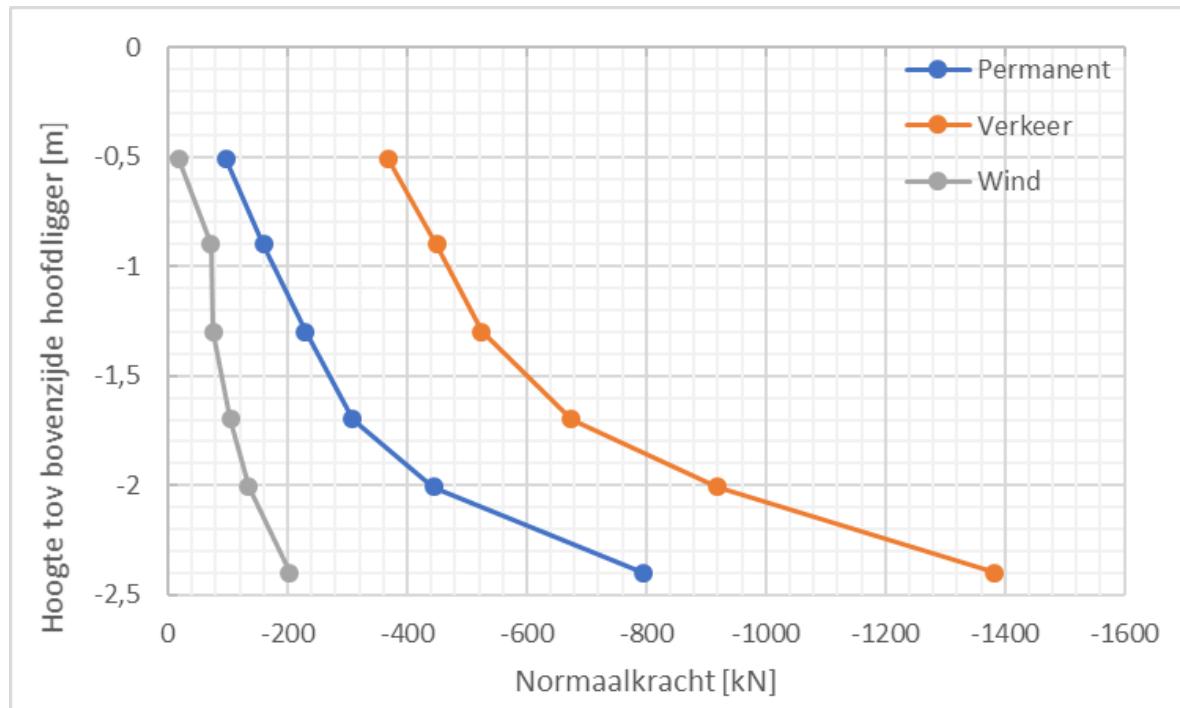


Figuur 35 – Normaalkrachten over de hoogte van de dwarsverstijver

Het verloop van de normaalkracht valt te verklaren door dat deze via schuifspanning opgebouwd zal worden over de hoogte van het lijf van de hoofdlijker. De normaalkracht aan de onderzijde (-3275 kN) komt goed overeen met de oplegreactie voor deze maatgevende combinatie (3216 kN) in het hybride model. In het balkmodel wordt een constante normaalkracht over de gehele hoogte gevonden van -3096 kN (bij gelijke positie tandemstelsel), wat dus qua orde grootte vergelijkbaar is. Het aanhouden van een constante normaalkracht zoals gevonden in het staafmodel is dus te conservatief met name voor sneden aan de bovenzijde van de verticaal.

De oplegreactie komt in het staafmodel voor ca 1600 kN (dwarskracht) uit de hoofdlijker in veld 1, ca. 1150 kN uit de hoofdlijker veld 2 en ca. 300 kN uit de dwarsdrager. De relatief lage bijdrage uit de dwarsdrager komt omdat een wiel van de assen nagenoeg boven de hoofdlijker staat en dus in het staafmodel via de stijve hoofdlijker zal worden afgedragen.

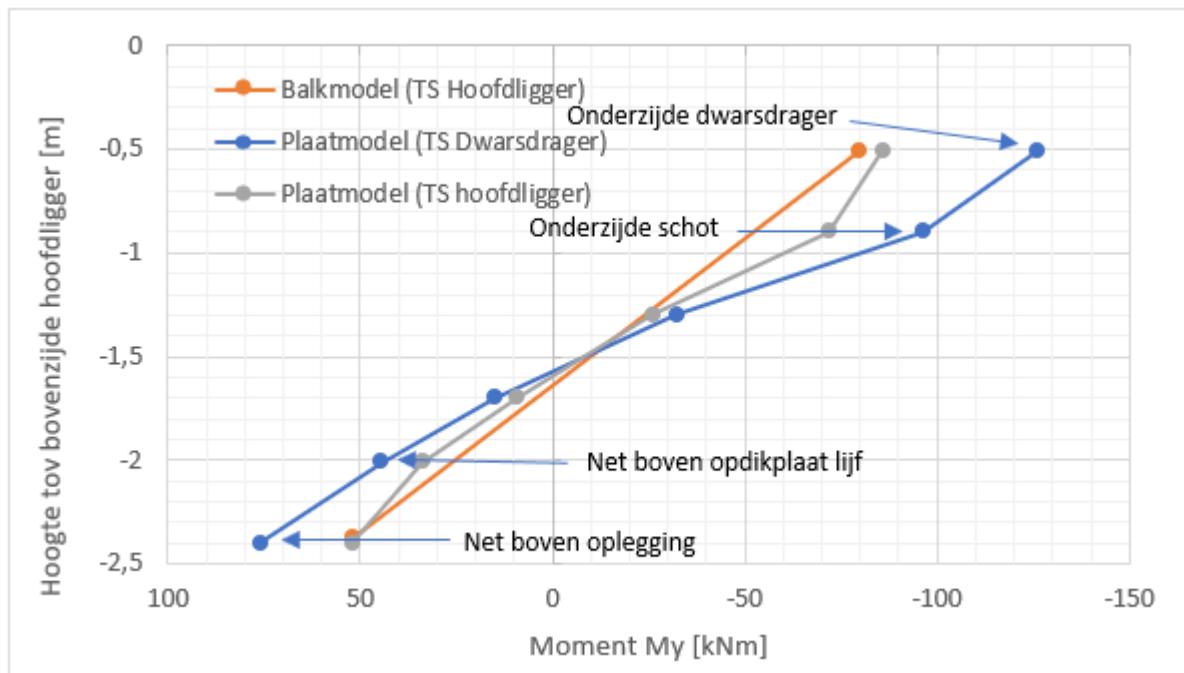
In onderstaande grafiek is te zien dat alle type belastingen een vergelijkbaar verloop in de normaalkracht hebben.



Figuur 36 – Normaalkracht per belastinggeval over de hoogte van de dwarsverstijver

Wanneer de lijnen zouden worden geëxtrapoleerd tot aan de bovenzijde (0 m), dan lopen de normaalkrachten t.g.v. de wind en de permanente belastingen nagenoeg terug naar 0 kN. De lijn van de verkeersbelasting loopt terug naar ca. 300 kN, wat overeenkomt met de wielprinten die boven de hoofdlijker staan.

Dezelfde analyse kan voor de momentenlijn gemaakt worden. Hiermee wordt het volgende beeld gevonden voor de twee maatgevende combinaties (TS normaal, maatgevende positie TS voor hoofdligger en voor dwarsdrager).



Figuur 37 – Momenten over de hoogte van de dwarsverstijver

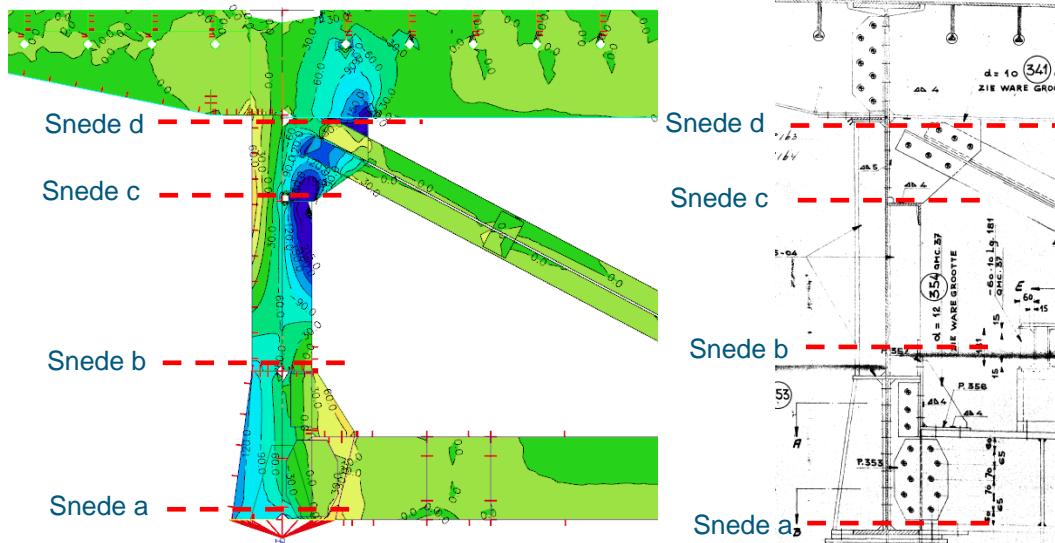
Te zien is dat de momentenlijnen uit het plaatmodel en het balkmodel met het tandemstelsel op de positie die maatgevend is voor de hoofdligger goed overeenkomen en dus vrijwel lineair over de hoogte verlopen. Ook is te zien dat wanneer het tandemstelsel wordt verschoven naar de maatgevende positie voor de dwarsdrager/verticaal de momenten iets toenemen.

Conclusie

Het aanhouden van een constante normaalkracht in de verticalen, zoals gevonden wordt in het staafmodel, is te conservatief. Zeker aan de bovenzijde zijn de normaalkrachten aanzienlijk lager dan in het staafmodel wordt gevonden. De momentenlijn komt wel goed overheen tussen beide modellen, echter dient wel rekening gehouden te worden met de juiste positionering van het tandemstelsel om de maatgevende momenten te vinden in het portaal.

Doorsnedestoetsing verticaal portaal B

Op basis van de spanningen in de dwarsverstijver zijn vier kritische doorsneden bepaald. Voor deze sneden is een integratie van de krachten uitgevoerd, uitgaande van 4 maatgevende belastingcombinaties. Vervolgens is een doorsnedetoetsing uitgevoerd met deze optredende krachten en momenten, waarbij rekening is gehouden met de plastische capaciteit van de doorsnede, zie Bijlage C3.



Figuur 38 – Getoetste doorsneden in de dwarsverstijver van portaal B.

In onderstaande tabel zijn de resultaten weergegeven voor de combinatie met gereduceerde windbelasting ($c_{scd} = 0,85$) en gereduceerde belastingfactoren.

Verticaal portaal B ¹								
Snede	(a)		(b)		(c)		(d)	
	N _{max}	M _{max}						
Optredende normaalkracht [kN]	-3440	-3062	-1463	-1359	-964	-918	-756	-687
Capaciteit normaalkracht N _{pl} [kN]	-11234	-11234	-5213	-5213	-4728	-4728	-5357	-5357
Moment om de sterke as [kNm]	36	90	8	23	-66	-96	-67	-128
Momentcapaciteit M _{pl} [kNm]	300	300	129	129	-116	-116	-310	-310
UC (sterkte)	0,44	0,57	0,34	0,44	0,57	0,90	0,22	0,41
UC (stabilitéit)	0,48	0,64	0,37	0,47	0,57	0,83	0,36	0,54

¹ gereduceerde windbelasting ($c_{scd} = 0,85$ en b/d_{tot} gebaseerd op de breedte van twee bruggen)

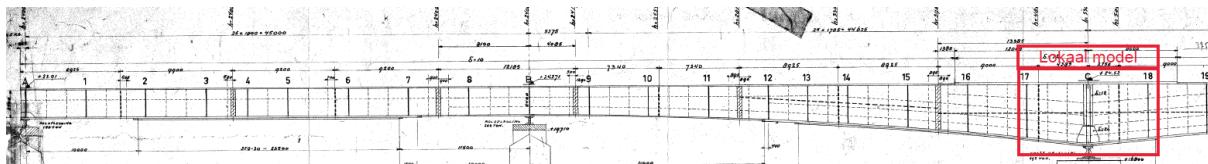
Tabel 12 – Overzicht van de unity checks voor de toetsing van de verticaal van het K-verband bij portaal B (UGT)

Uit de toetsing volgt dat de verticaal voldoet, op basis van de plastische capaciteit. Maatgevend is daarbij de snede aan de onderzijde van het schot bij de aansluiting op de langsverstijver (snede c).

3.3.6 Portaal C

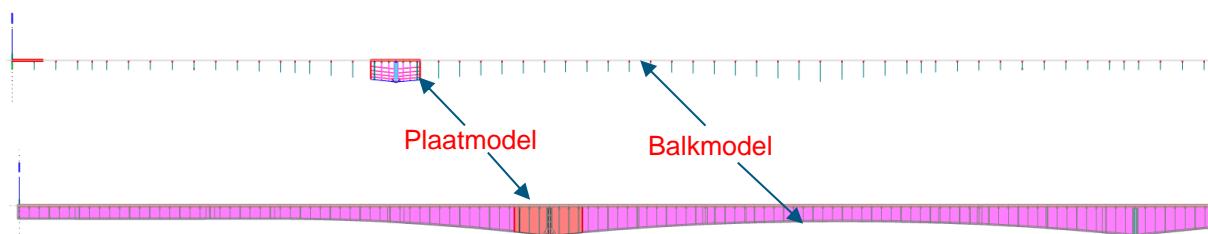
3.3.6.1 Modellering

Voor portaal C is een vergelijkbaar hybride model opgezet als voor portaal A en B. De locatie en de afmetingen van het deel dat met plaatelementen is gemodelleerd is in overleg met Rijkswaterstaat bepaald en loopt van 1 K-verband voor portaal C tot 1 K-verband na portaal C, van dwarsdrager met K-verband 17 t/m 18, zie Figuur 39.

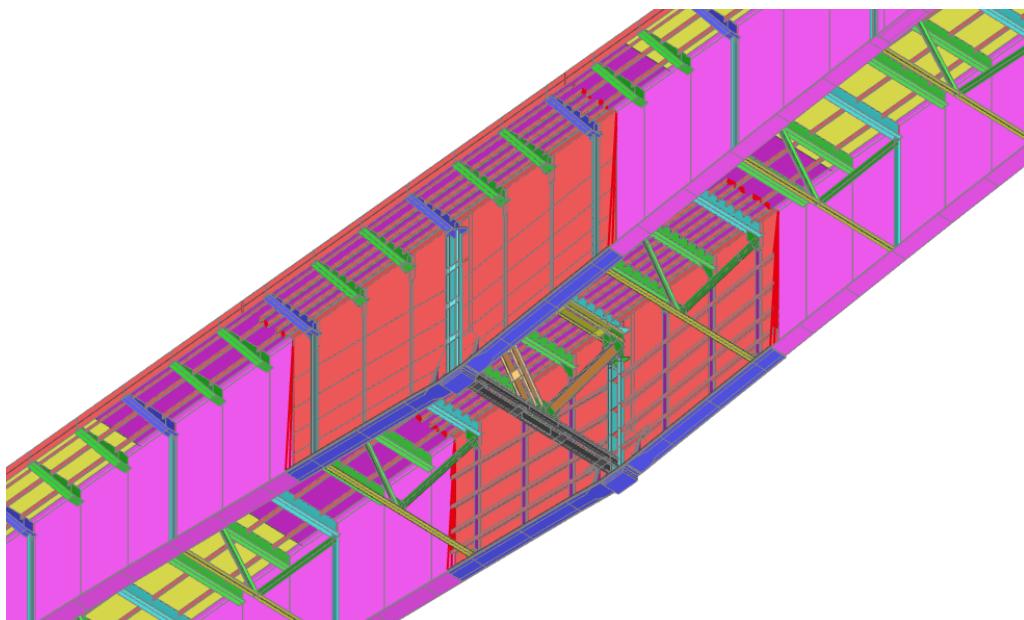


Figuur 39 – De locatie van het lokaal model.

Het model is beschreven in de uitgangspuntenrapportage, paragraaf 7.4.3, en bestaat uit een gedeelte dat volledig is gemodelleerd met plaatelementen (rood weergegeven) en een gedeelte dat is gemodelleerd met hoofdzakelijk staafelementen (m.u.v. de dekplaat) (roze weergegeven), zie Figuur 40.



Figuur 40 – Hybride model C bestaande uit een gecombineerd plaat- en balkmodel



Figuur 41 – 3D weergave schuin-onder aanzicht hybride model C

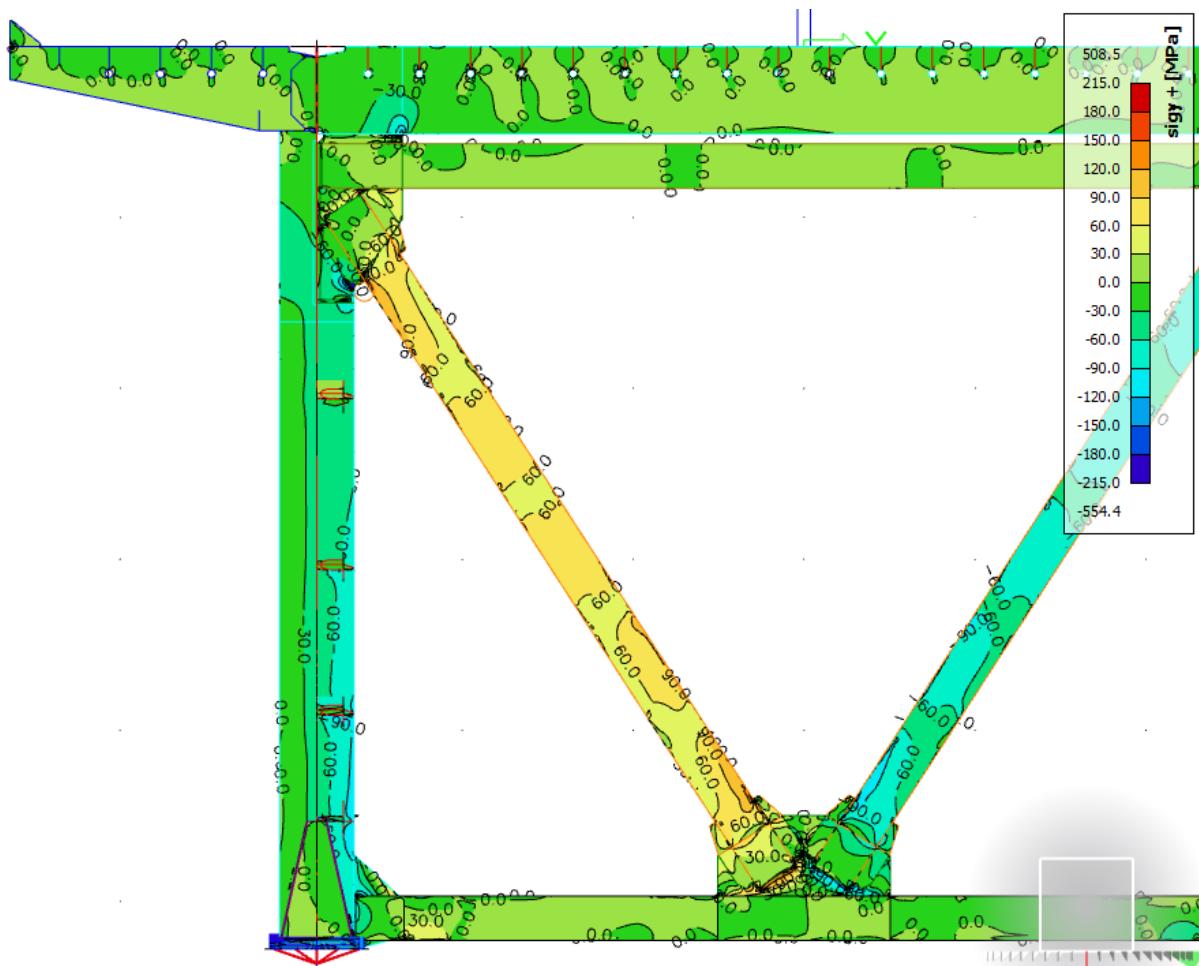
De opbouw van het model en de validatie van het model wordt in het uitgangspuntenrapport behandeld en wordt daarom hier niet herhaald.

3.3.6.2 Sterkteanalyse portaal C

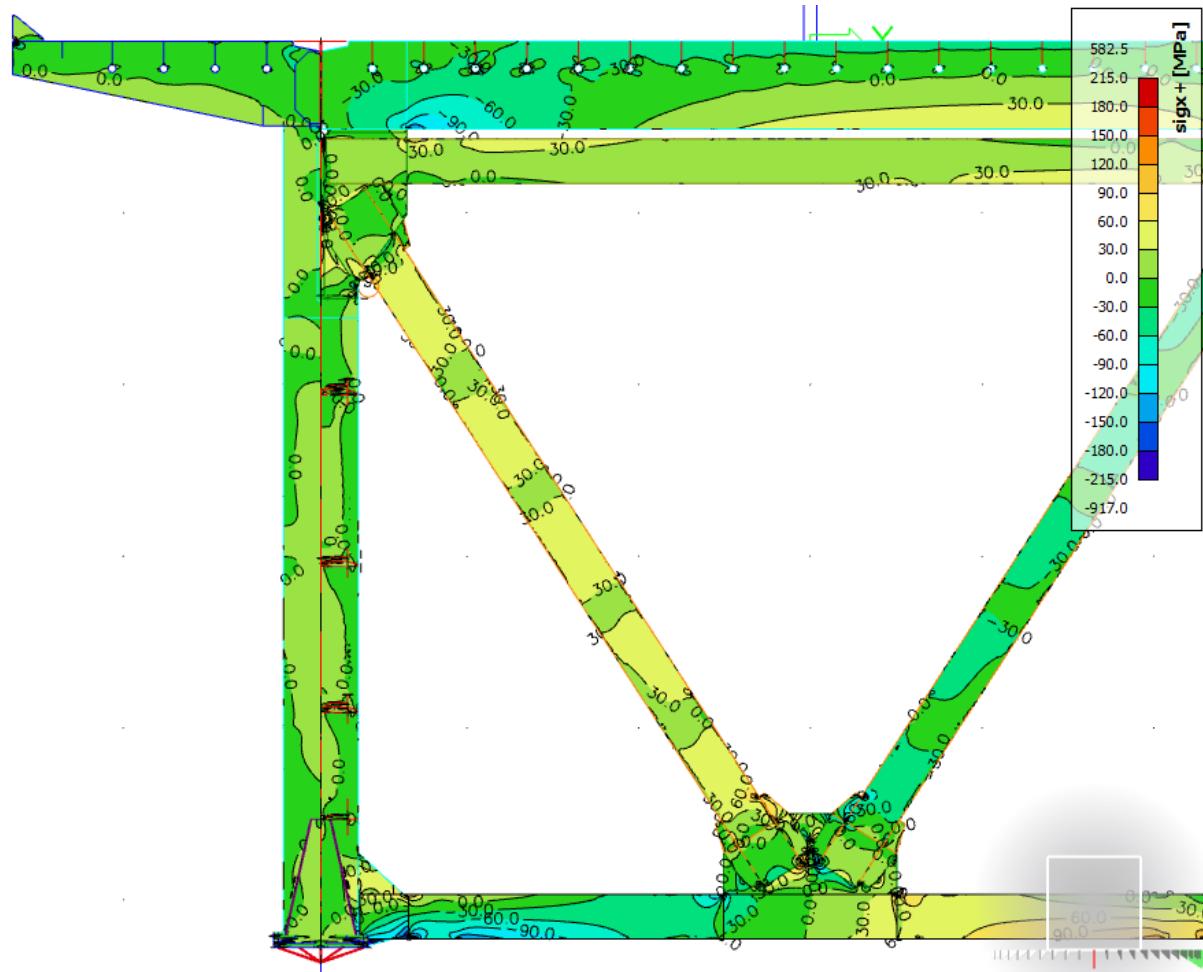
Op basis van doorsnedetoetsen van het portaal (met het globale model) volgt dat met name de verticaal en de diagonaal kritisch zijn. Er is daarom een toetsing uitgevoerd met het hybride model, uitgaande van de gereduceerde windbelasting en gereduceerde belastingcombinaties, zie hoofdstuk 6.4.4 en 6.9.3.2 van de uitgangspuntenrapportage. Net als voor portaal A is de temperatuurbelasting verwaarloosd in het hybride model. De overige belastingen zijn wel overeenkomstig met het globale model aangehouden.

Uit de berekening volgt dat belastingcombinatie 6.10b, gr1a maatgevend is voor de verticaal, met het tandemstelsel boven op de dwarsdrager van het portaal, de UDL belasting op veld 2, veld 3 en veld 5 en een windbelasting in x+ richting (oost). Om een goed beeld van de spanningen binnen deze combinatie te krijgen is deze combinatie ingevoerd als lineaire combinatie. Hierdoor kan het werkelijke spanningsbeeld bekeken worden, zonder dat er sprake is van een omhullend spanningsbeeld van meerdere belastingcombinaties.

In Figuur 42 zijn de verticale spanningen aan één zijde van de plaat (σ_y+) in deze maatgevende lineaire UGT combinatie weergegeven. Figuur 43 geeft de spanningen in horizontale richting (σ_x+)



Figuur 42 – Spanningen σ_y+ in portaal C



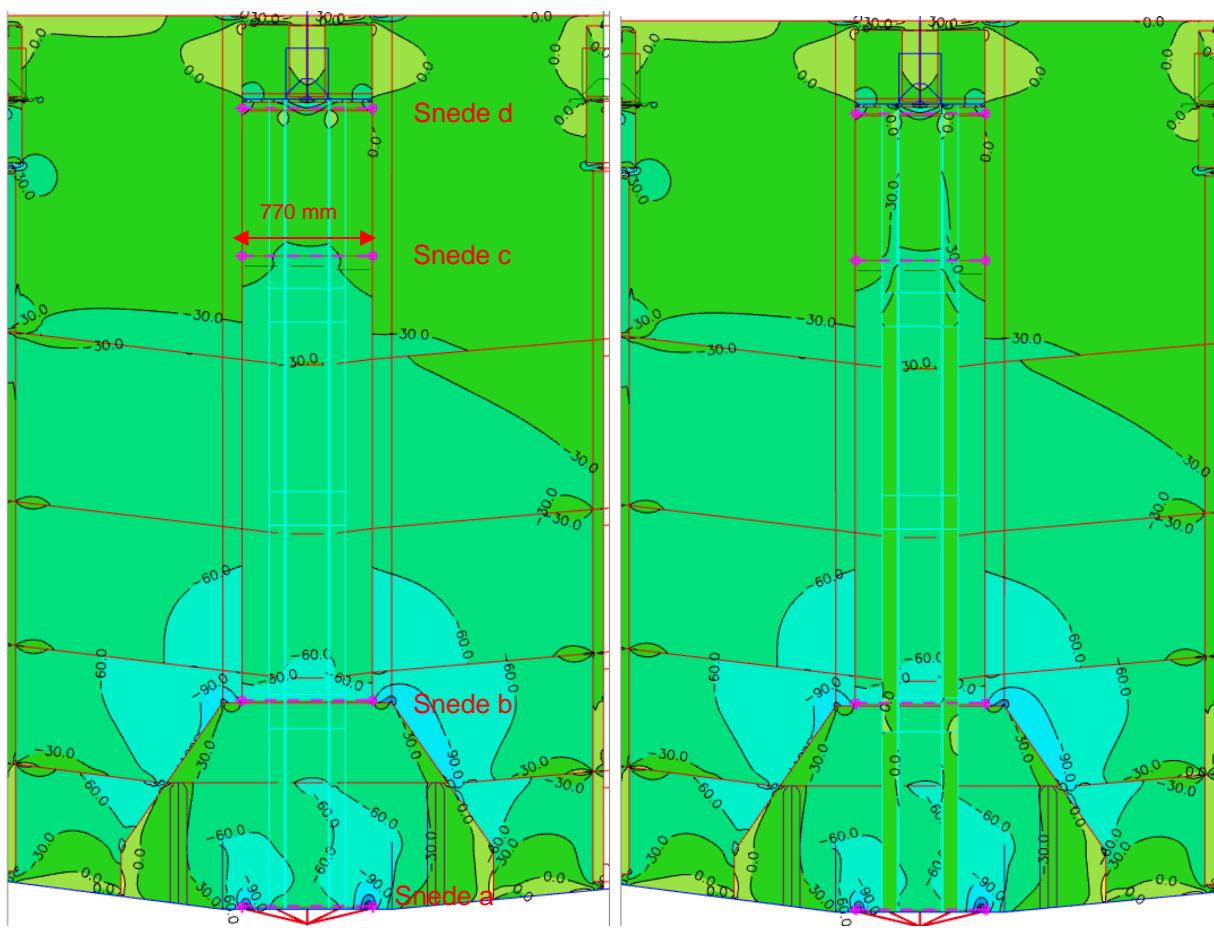
Figuur 43 – Spanningen σ_{x+} in portaal C

De spanningen blijven over het algemeen onder de vloeistressing ($f_y = 215 \text{ N/mm}^2$), met uitzondering van de spanningen in de verticaal ter plaatse van het schot tussen dwarsdrager en dwarsverstijver. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door spanningsconcentraties door de aanwezigheid van laspoortjes en haakse aansluitingen, met name ter plaatse van de aansluiting van het schot op de onderflens van de dwarsdrager en de aansluiting van het schot op de langsverstijver.

3.3.6.3 Plastische doorsnede-toetsing verticaal portaal C

Omdat de overschrijdingen in de verticaal veelal zeer lokaal optreden is er gekeken of de gehele doorsnede wel voldoet op basis van de plastische doorsnede-capaciteit. Net als voor portaal A en B zijn er daarom verschillende sneden in het model aangebracht en is een plastische toetsing uitgevoerd van de maatgevende sneden. De sneden zijn genomen over de flens en het lijf van de dwarsverstijver plus de meewerkende breedte van het lijf van de hoofdlijker. Voor de meewerkende breedte is uitgegaan van de (smalste) breedte van de opdikplaten op het lijf, die over de gehele hoogte doorloopt ($b = 770 \text{ mm}$).

Uit de spanningen kan door SCIA een integratie over de geselecteerde elementen worden gemaakt in het vlak van de snede. Hiermee kan de normaalkracht het moment worden bepaald in de betreffende snede. In onderstaand figuur zijn de spanningen in verticale richting in het lijf van de hoofdlijker (links) en in de flens van de dwarsverstijver (rechts) weergegeven onder de maatgevende belastingcombinatie. De sneden zijn roze weergegeven.

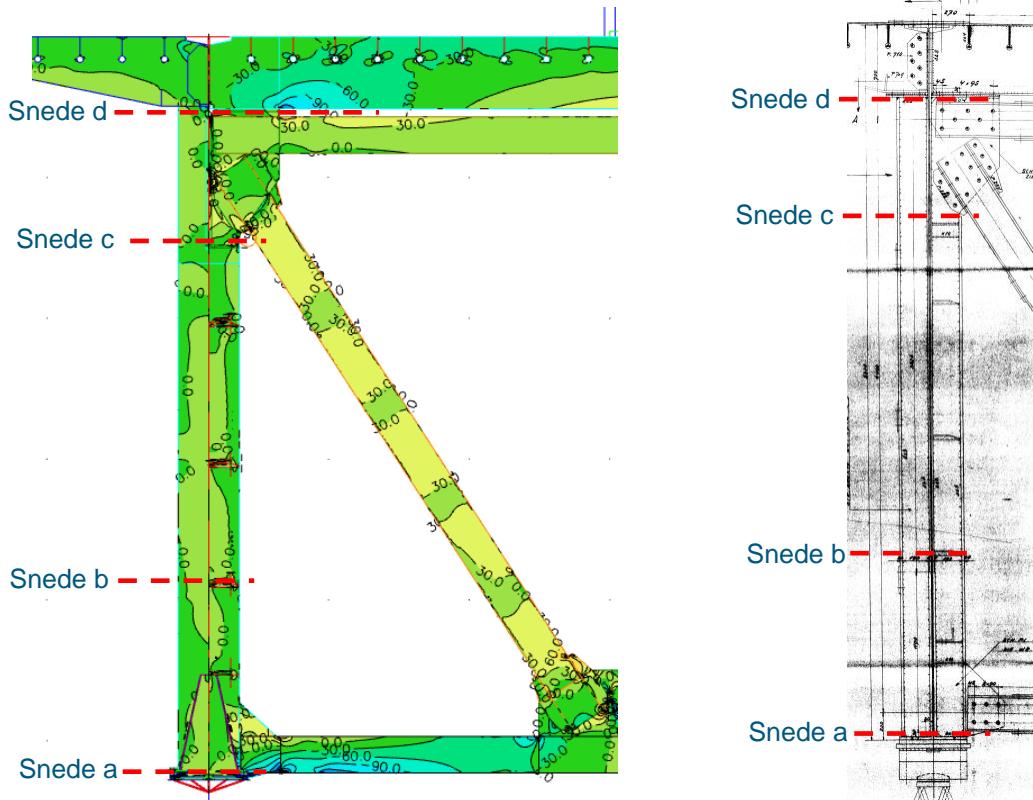


Figuur 44 – Spanningen σ_{y+} in het lijf (links) en in de flens (rechts)

Uit de spanningsverdeling in het lijf van de hoofdlijker wordt al duidelijk dat de drukspanning oploopt richting de oplegging, wat er op wijst dat de normaalkracht geleidelijk toeneemt over de lengte van de verticaal.

Doorsnedestoetsing verticaal portaal C

Op basis van de spanningen in de dwarsverstijver zijn vier kritische doorsneden bepaald. Voor deze sneden is een integratie van de krachten uitgevoerd, uitgaande van de maatgevende vier belastingcombinaties. Vervolgens is een doorsnedestoetsing uitgevoerd met deze optredende krachten en momenten, waarbij rekening is gehouden met de plastische capaciteit van de doorsnede, zie Bijlage C3.



Figuur 45 – Getoetste doorsnedes in de dwarsverstijver van portaal C.

In onderstaande tabel zijn de resultaten weergegeven voor de combinatie met gereduceerde windbelasting ($c_s c_d = 0,85$) en gereduceerde belastingfactoren.

Snedes	(a)		(b)		(c)		(d)	
	N _{max}	M _{max}						
Optredende normaalkracht [kN]	-4409	-2420	-2442	-2020	-1367	-105	-523	-465
Capaciteit normaalkracht N _{pl} [kN]	-13227	-13227	-10647	-10647	-9787	-9787	-10948	-10948
Moment om de sterke as [kNm]	-121	213	-136	-141	-19	-57	-58	-97
Momentcapaciteit M _{pl} [kNm]	-709	709	-653	-653	-456	-456	-927	-927
UC (sterkte)	0,50	0,48	0,44	0,36	0,18	0,14	0,11	0,17
UC (stabilitet)	0,49	0,40	0,40	0,39	0,19	0,13	0,10	0,11

¹ gereduceerde windbelasting ($c_s c_d = 0,85$ en b/d_{tot} gebaseerd op de breedte van twee bruggen)

Tabel 13 – Overzicht van de unity checks voor de toetsing van de verticaal van het K-verband bij portaal C (UGT)

Uit de toetsing volgt dat de verticaal voldoet, op basis van de plastische capaciteit. Maatgevend is daarbij de snede net boven de oplegging (snede a).

3.4 Stalen rijdek

In dit hoofdstuk zijn de aanpak en de resultaten van de toetsing van het stalen rijdek gepresenteerd. Voor de modeluitvoer en berekeningen wordt verwezen naar Bijlage C4.

3.4.1 Berekeningsaanpak

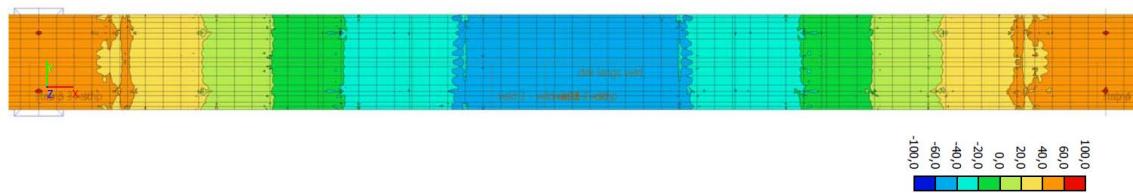
Het stalen rijdek bestaat uit een staalplaat met bulbs. Beide onderdelen zijn getoetst aan het vloeispanningscriterium. Hiervoor zijn de Von Mises-spanningen uit het lokale en globale SCIA engineer model gecombineerd.

In het lokale model is een gedeelte van het rijdek gemodelleerd met plaatelementen. Dit geeft een realistisch beeld van de optredende spanningen door lokale effecten. In het globale model is de rijplaat als 2D element gemodelleerd en de bulbs als 1D elementen. Dit model is gebruikt om het globale effect van normaalkracht in het dek mee te nemen. In beide modellen zijn alle belastinggevallen meegenomen.

De getoetste spanning is als volgt bepaald:

$$\sigma_{v;tot} = \sqrt{\left(\sigma_x + \frac{N_{glob}}{A}\right)^2 - \left(\sigma_x + \frac{N_{glob}}{A}\right)\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\sigma_{xy}^2}$$

In het globale model is voor de rijplaat uitgegaan van een gemiddelde normaalkracht over de halve breedte van het rijdek. Bij de bulbs zijn de normaalkrachten uit de staaf gebruikt. Op onderstaand figuur is te zien dat de langsspanningen gelijkmatig over de breedte van het dek optreden. Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat het shearlag effect klein is en het geoorloofd is om in de toetsing uit te gaan van een gemiddelde langsspanning over de halve breedte van het dek.



Figuur 46 – Normaalspanningen rijplaat permanente belastingen

Bij het optellen van de spanningen door het tandemstelsel (TS) is rekening gehouden met het voorkomen van dubbeltellingen. Zo zullen lokale belastingeffecten niet noodzakelijkerwijs gelijktijdig met globale effecten optreden. Dit speelt met name bij de tussensteunpunten. Bij de bepaling van de maximale normaaltrekspanning boven het steunpunt zijn daarom twee belastingsituaties beschouwd:

1. De maximale trekkracht (uit het globale model) ten gevolge van het belastinggeval TS treedt op boven het steunpunt indien het laststelsel zich in het veld bevindt. Deze belastingsituatie leidt echter niet tot extra te sommeren spanningen door lokale effecten van het tandemstelsel.
2. De maximale trekspanning (uit het lokale model) treedt op indien het tandemstelsel boven het steunpunt staat. Deze belastingsituatie leidt echter tot lage spanningen ten gevolge van de globale effecten van het tandemstelsel.

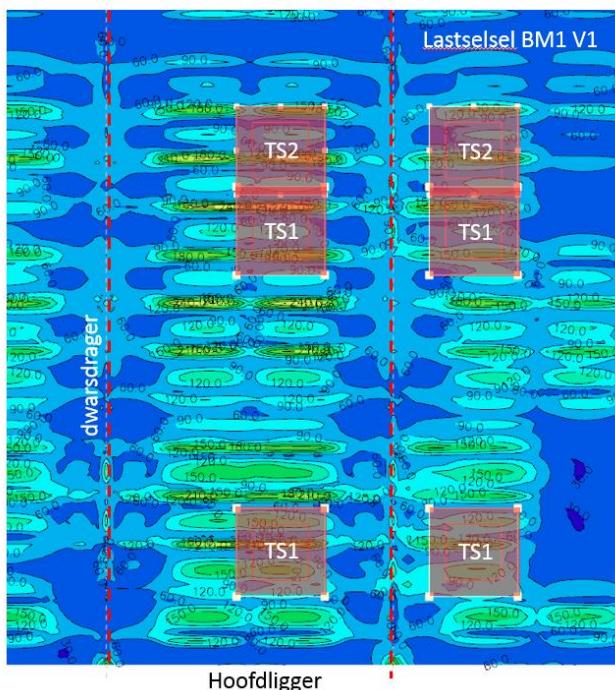
Uit analyse van de resultaten blijkt dat de lokale belastingeffecten (buiging in het dek) groter zijn dan de globale belastingeffecten (normaalkracht in het dek door buiging hoofdligger) en dat daarmee situatie 2 maatgevend is voor de spanningen boven het steunpunt. Daarom is de normaalkracht van het belastinggeval TS uit het globale model in mindering gebracht op de totale omhullende UGT normaalkracht, zodat er niet belastingeffecten van twee verschillende posities van het tandemstelsel gecombineerd worden.

3.4.2 Resultaten rijplaat

In onderstaande tabel zijn de maatgevende Von Mises spanningen in de rijplaat gepresenteerd. Alle onderdelen voldoen aan het niveau gebruik. Om meer inzicht te krijgen in de samenstelling van de maximale spanningen zijn in Bijlage C4 de bijdragen van de verschillende belastingcomponenten (onder belastingfactor) samengevat. Van het lokale model zijn de maximale Von Mises spanningen uit het lokale model samen met de maatgevende laststelselpositie weergegeven in Figuur 47.

Locatie	σ_{Ed} [N/mm ²]	f_{yd} [N/mm ²]	UC
Steunpunt bovenzijde (trek)	331	350	0,98
Steunpunt onderzijde (trek)	273	350	0,77
Veld bovenzijde (druk)	309	350	0,92
Veld onderzijde (druk)	292	350	0,84

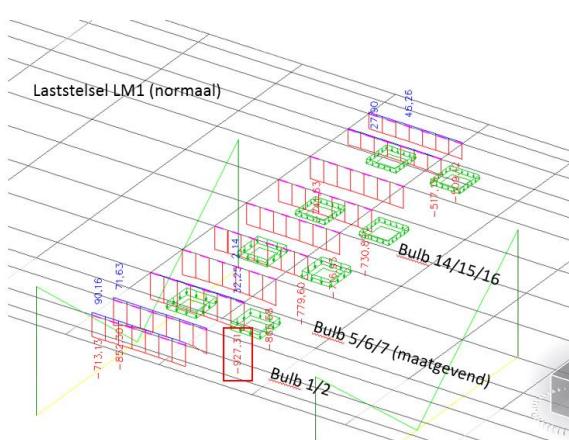
Tabel 14 – Overzicht unity checks rijplaat



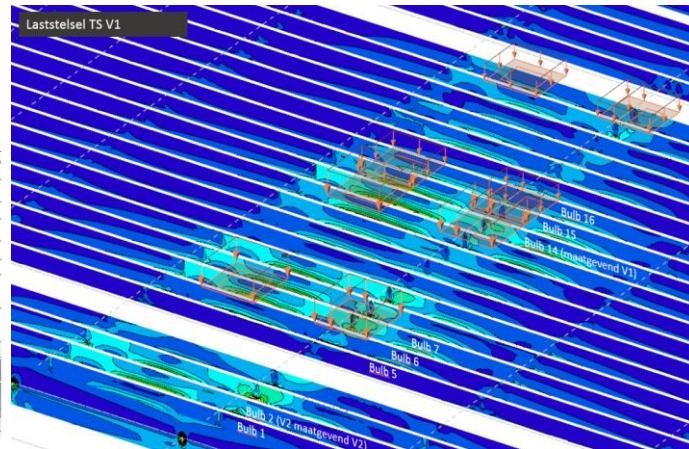
Figuur 47 – Maximale Von Mises spanningen (lokaal model) met locatie maatgevend laststelsel

3.4.3 Resultaten bulbs

Voor de bulbs zijn de maximale trek en drukspanningen bepaald van drie locaties; de consoles (bulb 2), nabij de hoofdlijn (bulb 7) en in het midden van het rijdek (bulb 14). In onderstaande tabel zijn de Von Mises spanningen bepaald. Ook voor de bulbs zijn de globale en lokale belastingeffecten opgeteld en gecorrigeerd voor dubbeltellingen uit het tandemstelsel.



Maatgevende bulbs globaal model (bulb 5/6/7)



Maatgevende bulbs lokaal model (bulbs 2 en 14)

Figuur 48 – Locaties van de bulbs

De maximale UC treedt op ter plaatse van het steunpunt van bulb 2. De overschrijding is echter zeer minimaal. Indien gerekend wordt met de gereduceerde windbelasting en gereduceerde belastingcombinaties, zoals beschreven in het uitgangspuntenrapport (paragraaf 6.4 en 6.9) dan zullen de unity checks onder de 1,0 komen te liggen.

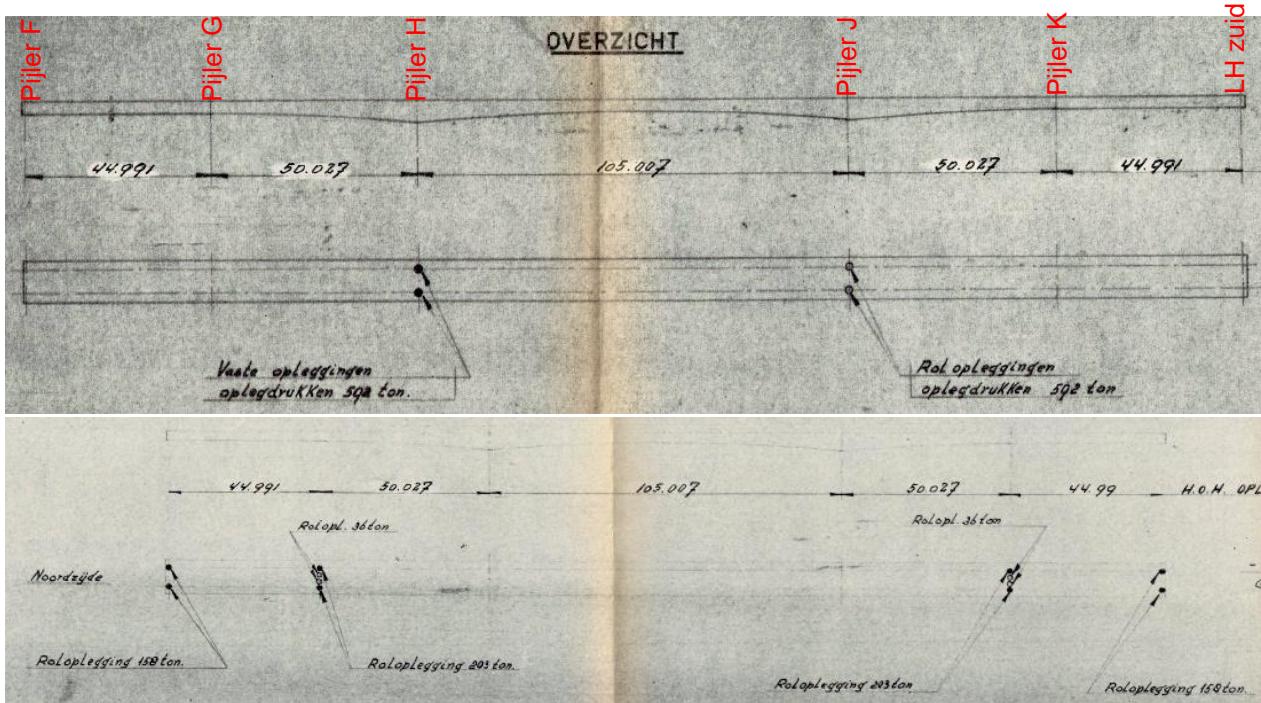
Onderdeel	Locatie	σ_{Ed} [N/mm ²]	f_{yd} [N/mm ²]	UC
Bulb 2	Steunpunt (trek)	365	350	1,04
	Veld (druk)	268		0,77
Bulb 7	Steunpunt (trek)	352	350	1,01
	Veld (druk)	239		0,68
Bulb 14	Steunpunt (trek)	349	350	1,00
	Veld (druk)	207		0,59

Tabel 15 – Overzicht unity checks bulbs

3.5 Opleggingen en vijzelpunten

3.5.1 Verticale oplegreacties

De oplegreacties zijn vergeleken met de ontwerpbelastingen. Volgens tekening [A.21582] en [A.21583] zijn de ontwerpcapaciteiten als volgt.

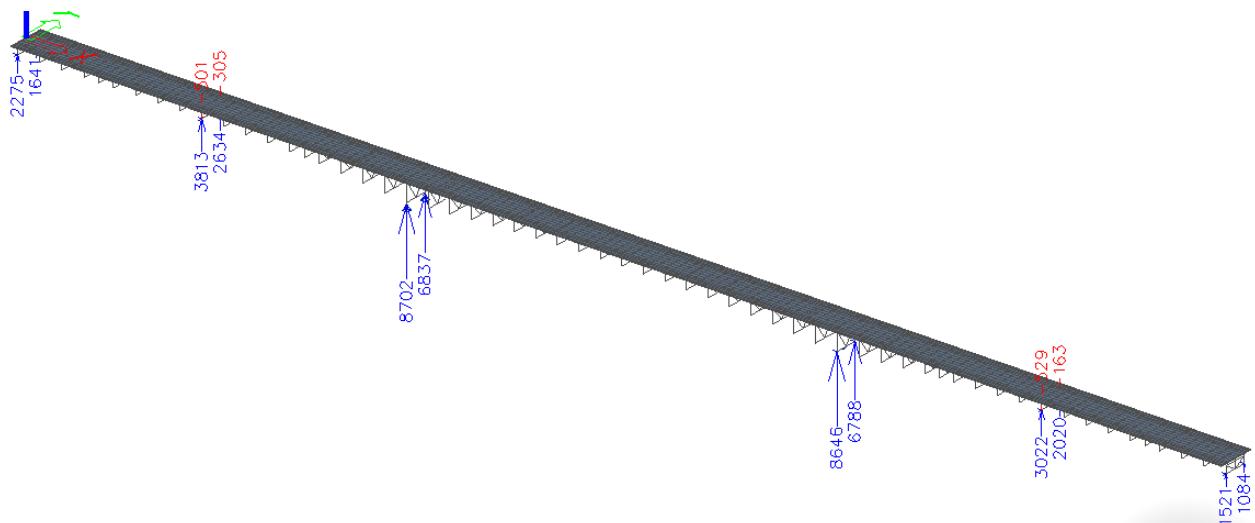


Figuur 49 – Ontwerpwaarden capaciteit opleggingen

Ter plaatse van Pijler J wordt voor de oostelijke brug een nieuwe bolsegment oplegging aangebracht. Deze heeft een verticale capaciteit van 8511 kN (UGT) volgens [17245-ONT-001_02]. In de westelijke brug blijft de huidige roloplegging aanwezig.

Ten tijde van de bouw van de brug was het gebruikelijk om de capaciteit te toetsen aan de BGT waarde van de optredende belastingen. In de capaciteit werd rekening gehouden met een veiligheidsfactor van normaliter 1,5. Voor de vergelijking zijn daarom de ontwerpbelastingen vermenigvuldigd met een factor 1,5 om tot een UGT capaciteit te komen. In de Scia berekening worden de volgende oplegreacties gevonden in de UGT. Opgemerkt wordt dat de brug in het model tot de helft belast is met tandemstelsels plus een tandemstelsel t.p.v. pijler J. De hoogste reactiekrachten van pijler F en G dienen dan ook symmetrisch voor de niet belaste zijde te worden aangehouden.

In de berekening worden de volgende oplegreacties gevonden.



Figuur 50 – Oplegreacties UGT

Op basis van deze oplegreacties en ontwerpcapaciteiten is in onderstaande tabel de vergelijking samengevat.

Steunpunt	Rz [kN]	Ontwerpbelasting (BGT) [kN]	Capaciteit (BGT x 1,5) [kN]	UC
Pijler F	2275	1580	2370	0,96
Pijler G (druk)	3813	2030	3045	1,25
Pijler G (trek)	529	360	540	0,98
Pijler H (vaste opl)	8702	5920	8880	0,98
Pijler J (rol opl)	8646	5920	8880	0,97
Pijler J (bolsegm.)	8646		8511	1,02

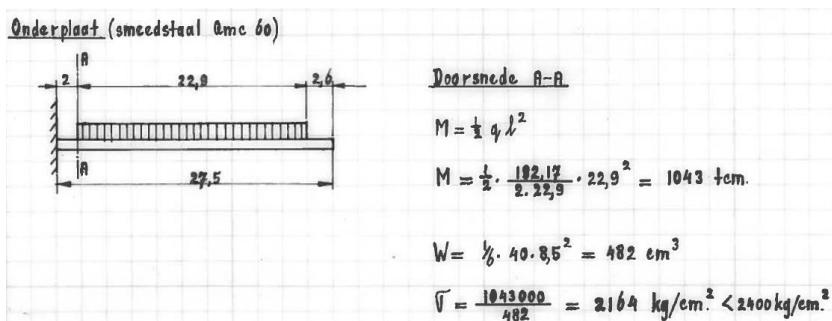
Tabel 16 – Vergelijking oplegreacties UGT met ontwerpwaarden

De oplegreactie t.p.v. pijler G is groter als de ontwerpwaarde volgens tekening. De oplegreactie ter plaatse van pijler J is groter dan de ontwerpwaarde volgens de berekening in [17245-ONT-001_02]. Er is daarom gekeken naar de oplegreactie onder de gereduceerde windbelasting en gereduceerde belastingcombinaties, zoals beschreven in het uitgangspuntenrapport (paragraaf 6.4 en 6.9). Met deze belastingen voldoet de oplegreactie op pijler J wel, op G voldoet hij nog niet.

Steunpunt	Rz [kN]	Ontwerpbelasting (BGT) [kN]	Capaciteit (BGT x 1,5) [kN]	UC
Pijler G (druk)	3550	2030	3045	1,17
Pijler J (bolsegm.)	8281		8511	0,97

Tabel 17 – Vergelijking oplegreacties UGT met gereduceerde belastingcombinaties met ontwerpwaarden

Er is voor de rolplegging t.p.v. pijler G daarom iets verder gekeken naar de mogelijke reserve die nog in de berekening zit. In de NET-berekening is een (her)berekening van de oplegging uitgevoerd. Hierin werd uitgegaan van een oplegreactie van 182,17 ton, waarbij de maatgevende toetsing de toetsing van de onderplaat is met een UC van $2164/2400 = 0,90$, Wanneer deze wordt teruggerekend naar een UC van 1,0 wordt een maximale (BGT) capaciteit van $182,17/0,90 = 202$ ton gevonden. Dit is vrijwel gelijk aan de capaciteit volgens tekening (203 ton). Op basis hiervan zou dus geconcludeerd kunnen worden dat er geen reservecapaciteit in de oplegging zit t.o.v. de capaciteit op tekening.



Figuur 51 – Fragment uit [BBV-0010-01]

In deze berekening wordt echter als conservatief uitgangspunt aangenomen dat de onderplaat in het midden is ingeklemd, waarbij de uitkraging in lengterichting van de rol is aangenomen. In werkelijkheid zal de belasting echter in breedterichting zijn belasting afdragen en kan dus van een aanzienlijk breder verdeling worden uitgegaan dan de gehanteerde 2 cm. Daarmee zal deze spanning nooit maatgevend zijn.

Het volgende maatgevende onderdeel van de verbinding is de rol. Hiervoor wordt een capaciteit van 219,84 ton gevonden, wat overeenkomt met een UGT capaciteit van 3298 kN. Uit de SCIA berekening volgt een oplegreactie van 3550 kN onder de (gereduceerde) UGT combinaties, waarmee een **UC = 1,08** wordt gevonden.

$$\begin{aligned}
 \text{Rol (smeedstaal 8mc 60)} \\
 r &= 20 \text{ cm} & L &= 2 \times 22,9 = 45,8 \text{ cm} \\
 P &= 182,17 \text{ ton} \\
 C &= \frac{1}{2} \times \frac{1}{r} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{20} = 0,025 \\
 \bar{P} \times C &\leq 120 L \\
 \bar{P} \times 0,025 &\leq 120 \times 45,8 \\
 \bar{P} &= \frac{120 \times 45,8}{0,025} = 219840 \text{ kg} = 219,84 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

Figuur 52 – Fragment uit [BBV-0010-01]

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

$$N'_{Rk} = 23 * R * \frac{f_u}{E_d} = 23 * 200 * \frac{600^2}{210000} = 7,89 \text{ kN/mm}$$

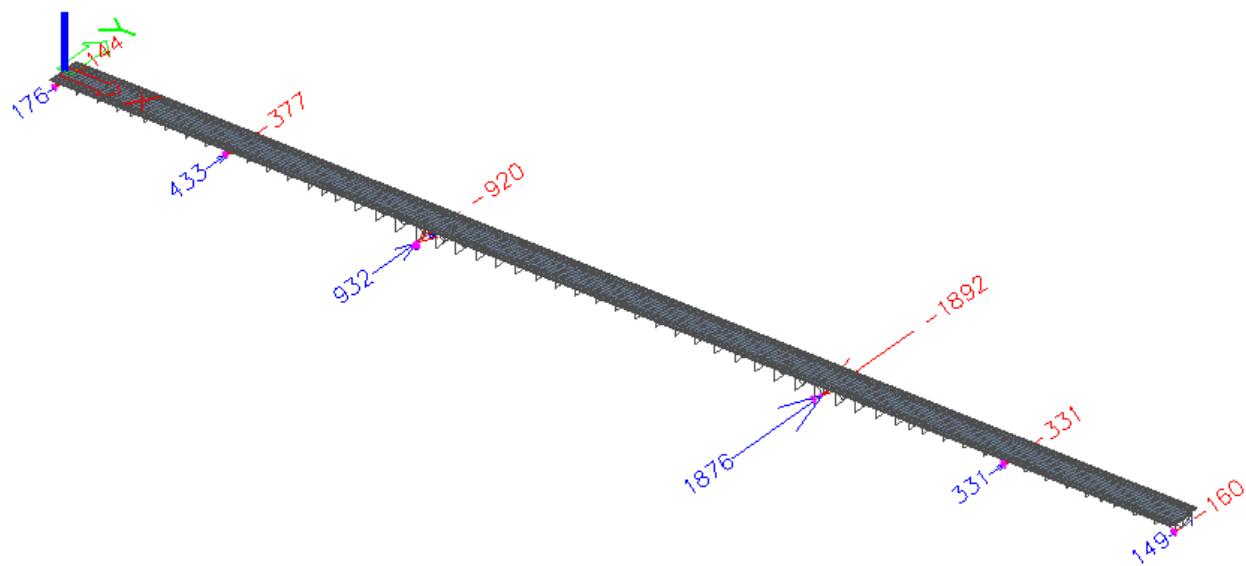
Uitgaande van een lengte van 458 mm en $\gamma_m = 1$ wordt een capaciteit gevonden van

$$N'_{Rd} = \frac{N'_{Rk}}{\gamma_m^2} * 458 \text{ mm} = 7,89 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} * 458 \text{ mm} = 3612 \text{ kN}$$

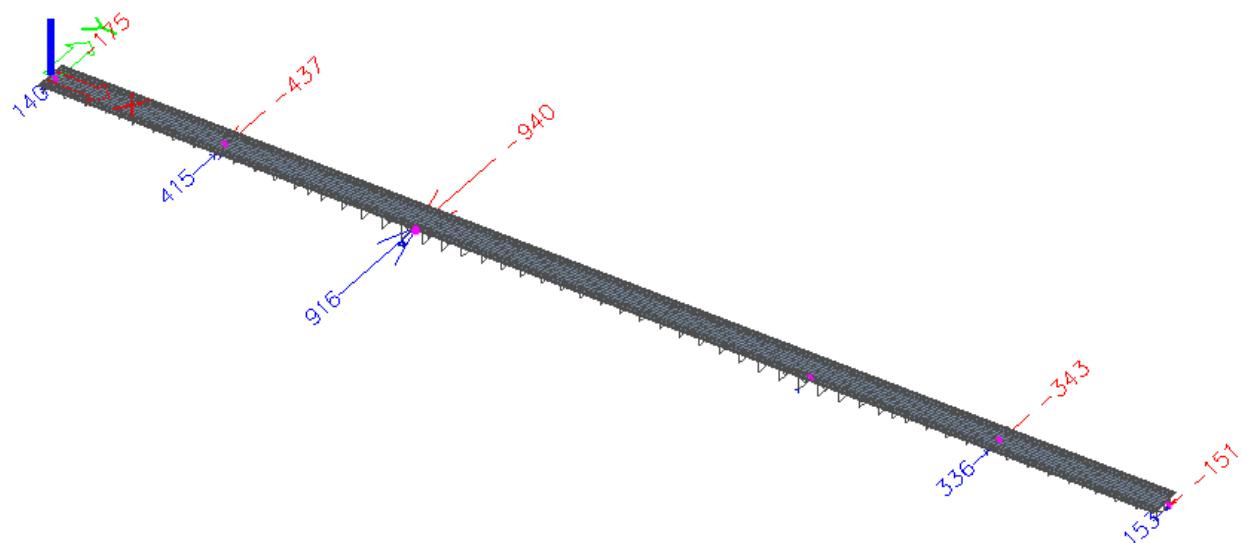
Uitgaande van een oplegreactie onder de (gereduceerde) UGT combinatie wordt een **UC = 0,98** gevonden, waarmee de oplegging voldoet.

3.5.2 Horizontale oplegreacties 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. Voor Pijler J zijn deze in het oplegpunkt halverwege de onderrand gegeven, voor de nieuwe situatie in de oostelijke brug. Voor de westelijke brug wordt deze oplegreactie verdeeld over de twee rolopleggingen en zijn dus vergelijkbaar met pijler H.



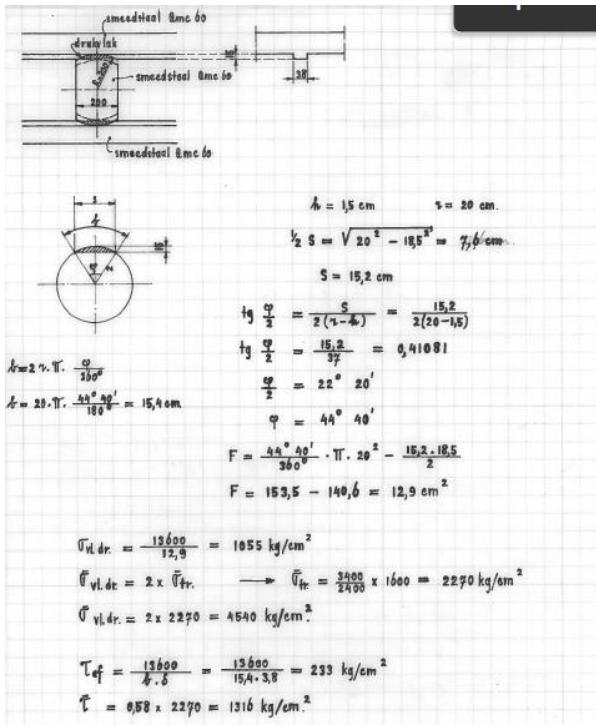
Figuur 53 – Horizontale oplegreacties in dwarsrichting UGT (westelijke hoofdlijker + middenoplegging pijler J)



Figuur 54 – Horizontale oplegreacties in dwarsrichting UGT (oostelijke hoofdlijker)

Pijler F en G

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 55 – 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 F/L

$F_h = 176 \text{ kN (UGT)}$
$\sigma_{vl,dr} = 176 \text{ kN} / 12.9 \text{ cm}^2 = 136 \text{ N/mm}^2$
$f_{vl,dr} = 340 \text{ N/mm}^2$
$UC = 136 / 340 = 0,40$

$\tau_{f,Ed} = 176 \text{ kN} / (15.4 \text{ cm} \times 3.8 \text{ cm}) = 30 \text{ N/mm}^2$

$\tau_{f,Rd} = 0,58 \times 340 \text{ N/mm}^2 = 197 \text{ N/mm}^2$

$UC = 30 / 197 = 0,15$

Pijler G/K

$F_h = 437 \text{ kN (UGT)}$
$\sigma_{vl,dr} = 437 \text{ kN} / 12.9 \text{ cm}^2 = 338 \text{ N/mm}^2$
$f_{vl,dr} = 340 \text{ N/mm}^2$
$UC = 338 / 340 = 1,00$

$\tau_{f,Ed} = 437 \text{ kN} / (15.4 \text{ cm} \times 3.8 \text{ cm}) = 75 \text{ N/mm}^2$

$\tau_{f,Rd} = 0,58 \times 340 \text{ N/mm}^2 = 197 \text{ N/mm}^2$

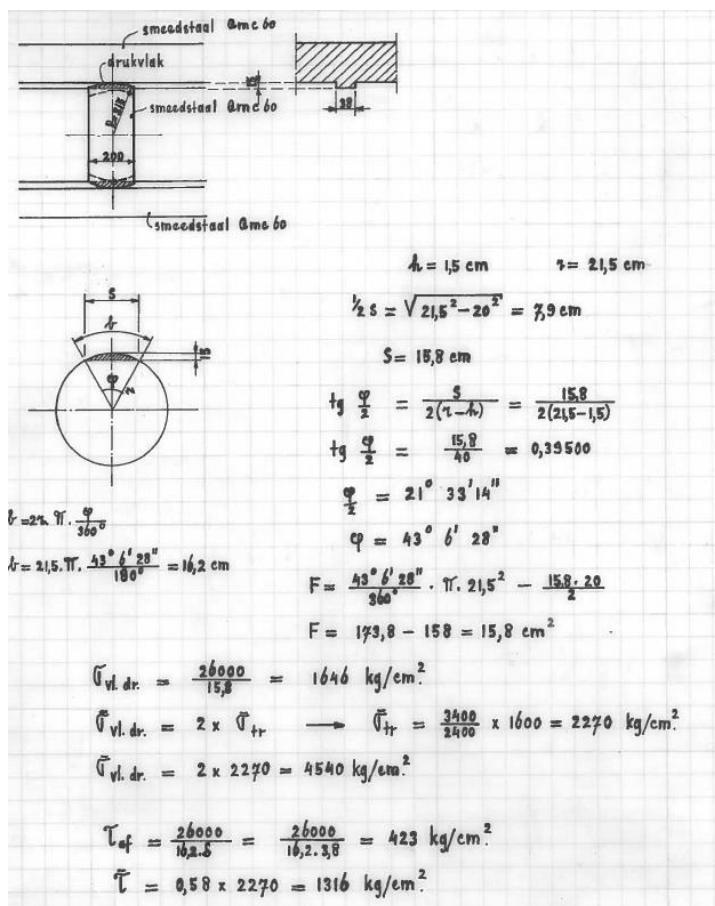
$UC = 73 / 197 = 0,38$

Pijler H (vaste oplegging)

Voor pijler H 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. Aanbevolen wordt hier een herberekening van uit te voeren.

Pijler J (roloplegging)

De nok van de bestaande roloplegging ter plaatse van pijler J is iets groter. Bovendien zijn er twee rollen aanwezig, waardoor het oppervlak 2x zo groot is.



Figuur 56 – Fragment van berekening nok roloplegging 592 ton uit [BBV-0010-01]

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

Pijler J (roloplegging)

$F_h = 1892 \text{ kN} / 2 = 946 \text{ kN}$ (UGT)
$\sigma_{vl,dr} = 946 \text{ kN} / 2 \times 15.8 \text{ cm}^2 = 299 \text{ N/mm}^2$
$f_{vl,dr} = 340 \text{ N/mm}^2$
$UC = 299 / 340 = 0.88$
$\tau_{f,Ed} = 946 \text{ kN} / 2 \times 16.2 \text{ cm} \times 3.8 \text{ cm} = 77 \text{ N/mm}^2$
$\tau_{f,Rd} = 0.58 \times 340 \text{ N/mm}^2 = 197 \text{ N/mm}^2$
$UC = 77 / 197 = 0.39$

Pijler J (dwarsfixatie onderrand portaal)

Ter plaatse van de oostelijke brug wordt naast de bolsegmentopleggingen (rollend in beide richtingen) een horizontaal fixatiepunt halverwege de onderrand van het portaal aangebracht. Conform [17245-ONT-003] is dit fixatiepunt ontworpen op een horizontale oplegreactie van 1650 kN. De optredende horizontale oplegreactie is 1892 kN. Hiermee zou de oplegging niet voldoen. Wanneer er echter gerekend wordt met een gereduceerde windbelasting met $cscd = 0,85$ en b/d op basis van 2 bruggen wordt er een ca 30% lagere windbelasting, en dus ook oplegreactie gevonden. De horizontale oplegreactie met deze aangepaste windbelasting is 1342 kN, waarmee een $UC = 1342 \text{ kN} / 1650 \text{ kN} = 0,81$ gevonden wordt.

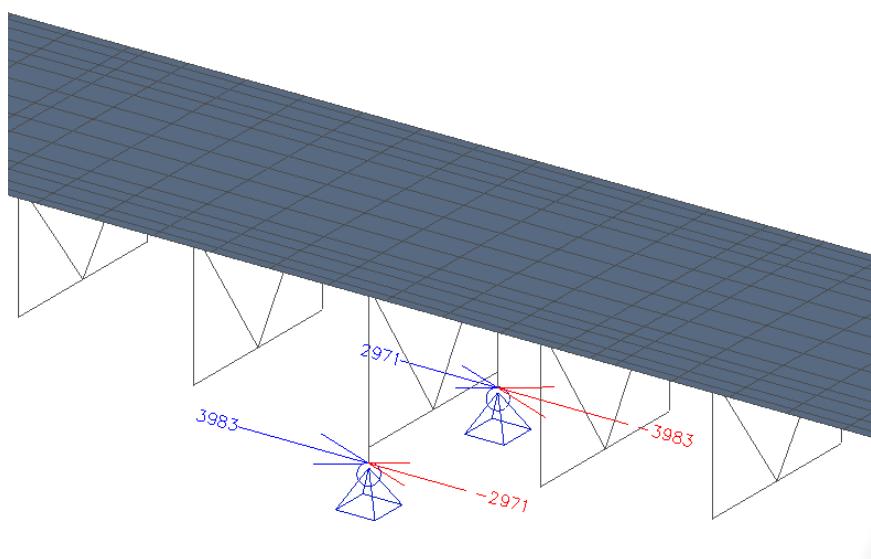
Pijler J (dwarsfixatie onderrand portaal)

Steunpunt	UC druk	UC afschuiving
Pijler F/L	0,40	0,15
Pijler G/K	1,00	0,38
Pijler H (vaste oplegging)		
Pijler J (roloplegging)	0,88	0,39
Pijler J (dwarsfixatie)	0,81	nvt

Tabel 18 – UC's opleggingen

3.5.3 Horizontale oplegreacties langsrichting

Bij pijler H 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 spelling, waardoor de wrikkrachten lager zullen zijn.



Figuur 57 – Horizontale oplegreacties in langsrichting UGT

3.5.4 Oplegreacties 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 F			Pijler G				Pijler H		
		R _{X,max}	R _{Y,max}	R _{Z,max}	R _{X,max}	R _{Y,max}	R _{Z,max} ¹	R _{X,max}	R _{Y,max}	R _{Z,max}	
UGT	[kN]	0	176	2275	0	437	3813	-529	3983	940	8702
BGT	[kN]	0	126	1833	0	306	3046	-142	2971	637	6898
Permanent	[kN]	0	2	535	0	7	801	771	22	14	2634
Verkeer	[kN]	0	37	1101	0	75	1834	-587	1477	37	2723
Remmen	[kN]	0	2	4	0	0	30	-30	351	0	19
Wind F*w	[kN]	0	74	138	0	218	328	-328	1059	582	1331
Temperatuur	[kN]	0	42	49	0	36	26	-26	57	42	27
Warmwaterleiding	[kN]	0	0	41	0	0	53	0	115	1	187

¹ negatieve waarden zijn trekkrachten

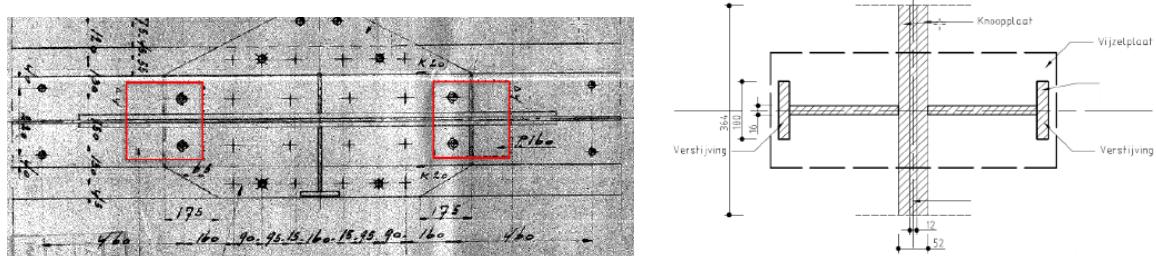
Tabel 19 – Resultaten belastinggevallen reactiekrachten

3.5.5 Vijzelpunten

De vijzelpunten zijn getoetst op de oplegspanning ter plaatse van het lijf, in de snede net boven de onderflens van de hoofdligger. Daarnaast zal een deel van de belasting via het lijf afgedragen worden naar boven en daardoor een dwarsgerichte belasting in het plaatveld veroorzaken. Deze dwarsgerichte belasting dient getoetst te worden op de interactie met de spanningen in langsrichting en is daarom opgenomen in de plooitoetsingen van snede G-1 en H-1, zie Bijlage C1.b en c.

Oplegspanning lijf en verstijver

In de snede net boven het lijf is een toets uitgevoerd op de vergelijkspanning, uitgaande van een spreiding van de oplegdruk onder 45° 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 58 – Oplegvlakken vijzelpunten ter plaatse van pijler G (links) en pijler H (rechts)

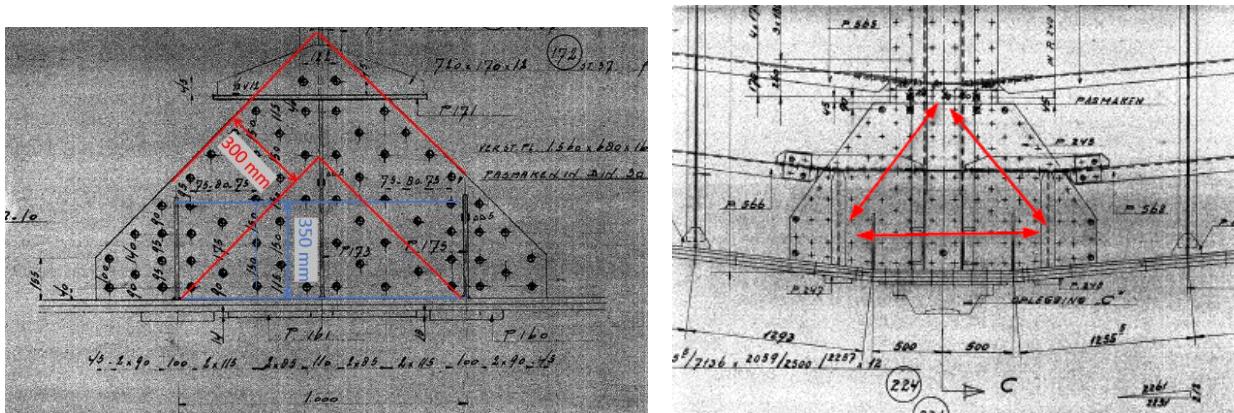
In onderstaande tabel zijn de resultaten samengevat. Voor het lijf is rekening gehouden met de spanningen in langrichting.

Steunpunt	$\sigma_{vgl,Ed}$ [N/mm ²]	f_{yd} [N/mm ²]	UC
Pijler G (lijf)	262	350	0,75
Pijler G (verstijver)	85	215	0,48
Pijler H (lijf)	307	350	0,88
Pijler H (verstijver)	156	215	0,73

Tabel 20 – Overzicht unity checks oplegdruk boven vijzelpunten

Toetsing dwarsgerichte belasting

Aangenomen wordt dat de dwarsgerichte belasting boven de vijzelpunten deels via de opdikplaten worden afgedragen naar de dwarsverstijvers 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 plooien en dwarsgerichte belastingen in het lijf boven de vijzelpunten, zie Bijlage C1.b en c. In onderstaande figuren zijn de aangehouden trek- (rood) en druk- (blauw) diagonalen weergegeven, inclusief de aangehouden breedtes.



Figuur 59 – Afdracht van de dwarsgerichte belastingen in de opdikplaten ter plaatse van pijler G (links) en pijler H (rechts)

Steunpunt	$\sigma_{vgl,Ed}$ [N/mm ²]	f_{yd} [N/mm ²]	UC
Pijler G (drukdiagonaal)	175	215	0,81
Pijler G (trekband)	210	215	0,98
Pijler G (dwarsgerichte belasting η_2)	$UC = \eta_2 = F_{vp}/F_{Rd}$		0,42
Pijler G (interactie plooien en dwarsgerichte)	$UC = (\eta_1 + 0,8*\eta_2) / 1,4$		0,75
Pijler H (drukdiagonaal)	161	215	0,75
Pijler H (trekband)	192	215	0,89
Pijler H (dwarsgerichte belasting η_2)	$UC = \eta_2 = F_{vp}/F_{Rd}$		0,60
Pijler H (interactie plooien en dwarsgerichte)	$UC = (\eta_1 + 0,8*\eta_2) / 1,4$		1,01

Tabel 21 – Overzicht unity checks oplegdruk boven vijzelpunten

NB. Bovengenoemde berekening is conservatief, omdat er in de berekening uitgegaan wordt dat het eerste veld ook kan plooien. In werkelijkheid is dit niet het geval, omdat hier een driemaal zo dik lijf aanwezig is met aan weerszijde een schot.

In het document “commentary to EN 1993-1-5” wordt in hoofdstuk 6.4 een aantal wijzigingen voorgesteld. Hierbij wordt ook duidelijker onderscheid gemaakt tussen plooi van het eerste veld en plooi van het lijf over de hele hoogte. Er is daarom ook een berekening uitgevoerd met deze aangepaste formules. Hiermee worden iets gunstigere UC’s gevonden.

Steunpunt	$\sigma_{vgl,Ed}$ [N/mm ²]	f_{yd} [N/mm ²]	UC
Pijler G (dwarsgerichte belasting η_2)	$UC = \eta_2 = F_{vp}/F_{Rd}$	0,38	
Pijler G (interactie plooi en dwarsgerichte)	$UC = (\eta_1 + 0,8*\eta_2) / 1,4$	0,73	
Pijler H (dwarsgerichte belasting η_2)	$UC = \eta_2 = F_{vp}/F_{Rd}$	0,52	
Pijler H (interactie plooi en dwarsgerichte)	$UC = (\eta_1 + 0,8*\eta_2) / 1,4$	0,96	

Tabel 22 – Overzicht unity checks dwarsgerichte belastingen boven vijzelpunten conform “commentary to EN 1993-1-5”

Aangetoond is dat de vijzelpunten voldoen.

3.6 Inspectiepad

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van de toetsing van het inspectiepad gepresenteerd. Voor de berekeningen wordt verwezen naar Bijlage C5.

3.6.1 Berekeningsaanpak

Er wordt in de berekeningen onderscheid gemaakt in de normale consoles en de “versterkte” consoles die een lichtmast aan het einde hebben. De momenten in de consoles zijn bepaald met behulp van een handberekening in Mathcad. Voor de consoles met een lichtmast is rekening gehouden dat wind zowel buiging als torsie in de console kan geven.

3.6.2 Resultaten inspectiepad

Alle consoles van de inspectiepaden voldoen op sterkte en stabiliteit. De versterkte console is niet verder getoetst op stabiliteit (kip) i.v.m. de lage UC op sterkte.

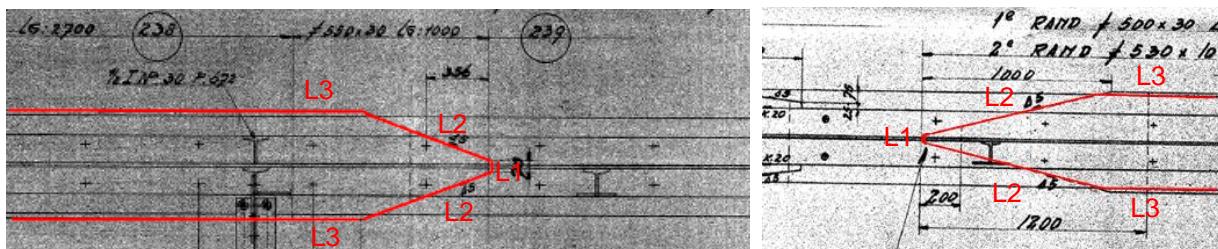
Profiel diagonalen	sterkte	stabiliteit
Normale console	0,75	0,95
Versterkte console met lichtmast	0,14	

Tabel 23 – Unity checks Inspectiepad

4 Verbindingen

4.1 Verbinding type A – Lasverbinding opdikplaat onderflens hoofdlijger

In de onderflens zijn op een aantal plekken een 2^e flensplaat onder de onderflens aangebracht. Aan het einde van deze buitenste flensplaat moet de spanning in de plaat via een lasverbinding naar de 1^e flensplaat worden overgebracht. Aan het einde van de flensplaat is een afschuining aangebracht in zowel de breedte als de dikte (van 30 mm naar 10 mm).



Figuur 60 – Detail type A4 (links) en A5 (rechts)

Op basis van de spanningen in de onderflens in de snede met extra opdikplaat is het maatgevende einde bepaald. Getoetst zijn verbinding A1, A4 en A5. Verbinding A2 en A3 hebben een lagere spanning als respectievelijk A1 en A4.

Met behulp van Mathcad zijn de lasverbindingen getoetst, zie Bijlage D1. Hiervoor is uitgegaan van de kracht in de 2^e opdikplaat, die via de las wordt overgebracht naar de onderflens. Voor de lengte van de las is uitgegaan van het kopse deel (L1), het schuine deel (L2) en indien nodig een deel van de las die parallel aan de onderflens loopt (L3). In eerste instantie is getoetst of de las voldoet indien alleen L1 en L2 worden meegenomen (UC_{las1+2}). Indien dit niet voldoet is ook gekeken bij welke lengte van L3 de lasverbinding voldoet ($UC_{las1+2+3}$). Het resultaat van de berekening is samengevat in Tabel 24. Omdat de las in principe doorloopt, mag ook een langer deel van de las meegenomen worden, waarmee de UC in werkelijkheid lager ligt als hetgeen is aangegeven in Tabel 24.

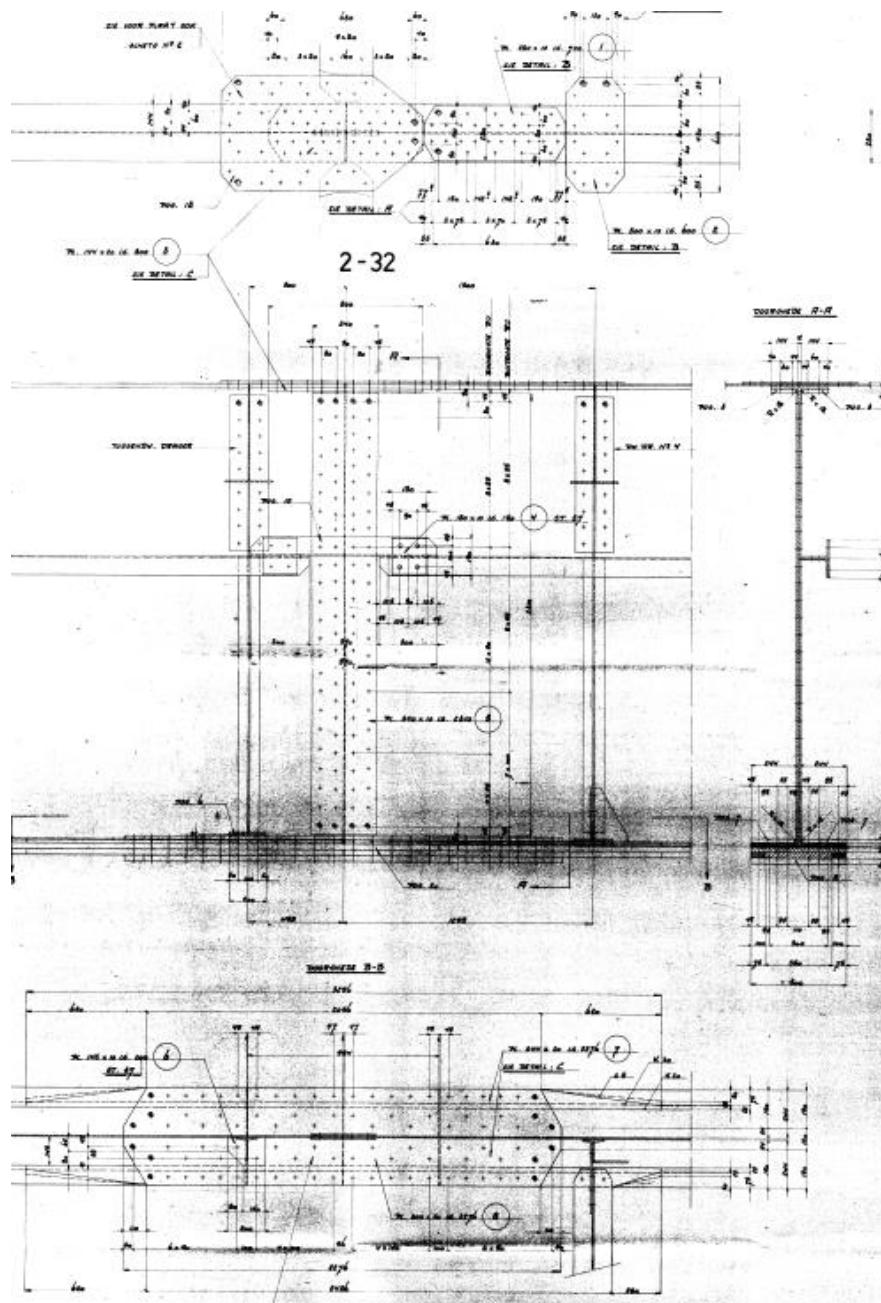
Detail Type A: Las tegen uiteinde opdikplaat										
Code	Dwarsdrager nummer	Aanvullende beschrijving	dx	$\sigma_{onder,max}$	$\sigma_{onder,min}$	L1 [mm]	L2 [mm]	L3 [mm]	UC_{las1+2}	$UC_{las1+2+3}$
A1	6-7	Uiteinde opdikplaat 350 mm breed	10000	191	10	70	424	400	1,71	< 0,90
A2	19-20	Uiteinde opdikplaat 350 mm breed	33498	174	-27	70	424	400	< 1,7	< 0,90
A3	39-40	Uiteinde opdikplaat 550 mm breed	68962	81	-163	70	599	1000	< 2,57	< 0,98
A4	57-58	Uiteinde opdikplaat 550 mm breed	100953	-5	-254	70	599	1000	2,57	< 0,98
A5	74-75	Uiteinde opdikplaat 530 mm breed	124584	197	-21	0	954	0	0,43	< 0,43

Tabel 24 – Spanningen in onderflens en Unity check van de lasverbinding ter plaatse van einde opdikplaat

De relatieve lage UC van verbinding A5 kan verklaard worden doordat de 2^e opdikplaat slechts 10 mm dik is, waardoor de kracht die door de las moet relatief klein is t.o.v. verbinding A1 t/m A4 ($t = 30 \text{ mm}$).

4.2 Verbinding type B en C – Geklonken verbindingen brugsecties

De brug is tijdens de bouw in brugsecties aangevoerd en vervolgens aan elkaar geklonken. Ter plaatse van deze sectiedelingen zijn diverse koppelplaten in de onder- en bovenflens en het lijf toegepast om de sectiedelen met elkaar de verbinden. In deze paragraaf worden de klinknagels en de verbindingsplaten getoetst van de hoofdligger.



Figuur 61 – Detail type C – geklonken verbinding sectiedeling (weergegeven is verbinding C1)

In eerste instantie zijn op basis van de spanningen in de hoofdligger in de snedes ter plaatse van de sectiedelingen de maatgevende verbindingen bepaald. Getoetst zijn verbinding C1 en C8, de twee verbindingen met de hoogste trekspanning in de onderflens. De weergegeven spanningen zijn bepaald als de spanningen zonder de flensverbreders. De werkelijke spanningen zullen daardoor iets lager zijn.

Detail Type C: Geklonken verbinding brugsecties					M_{max}		M_{min}	
Code	Dwarsdrager nummer	Aanvullende beschrijving	As sectie-deling	dx	σ_{boven}	σ_{onder}	σ_{boven}	σ_{onder}
C1	11-12	Klinklas bij sectiedeling in veld 1	2	18499	-141	252	0	7
C2	21-22	Klinklas bij sectiedeling in veld 1	4	36897	-82	195	22	-62
C3	28-29	Klinklas bij sectiedeling in veld 2	5	49095	-35	68	61	-155
C4	36-37	Klinklas bij sectiedeling in veld 2	7	63783	-68	158	80	-225
C5	46-47	Klinklas bij sectiedeling in veld 2	9	81631	-24	24	135	-222
C6	60-61	Klinklas bij sectiedeling in veld 3	12	106764	-9	17	103	-260
C7	69-70	Klinklas bij sectiedeling in veld 3	14	122510	-90	213	15	-38
C8	79-80	Klinklas bij sectiedeling in veld 3	16	139630	-195	315	11	21

Tabel 25 – Spanningen in de hoofdligger ter plaatse van de sectiedelingen

De verbindingen zijn met behulp van Mathcad getoetst, zie Bijlage D2. Getoetst zijn de klinknagels en de netto doorsneden van de hoofdligger en de koppelplaten. Het resultaat van de berekening is samengevat in Tabel 26.

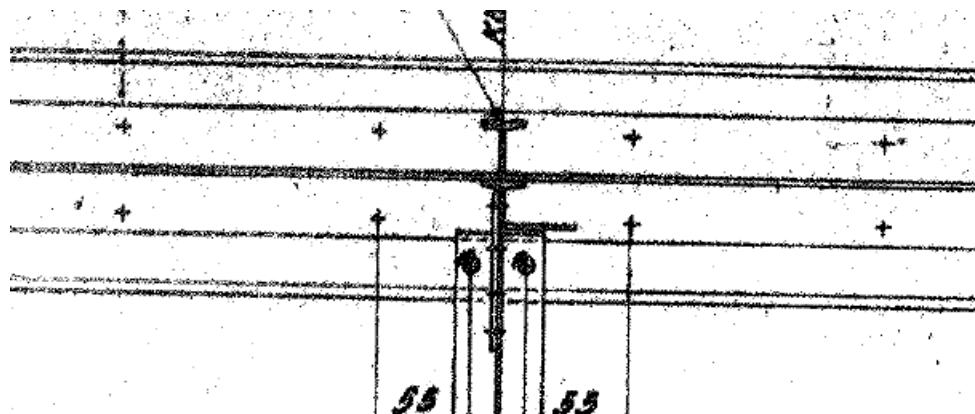
Detail Type C: Geklonken verbinding brugsecties	Verbinding C1			Verbinding C8		
	Bovenflens	Lijf	Onderflens	Bovenflens	Lijf	Onderflens
Afschuiving klinknagels	0,39	0,62	0,70	0,48	0,88	0,85
Netto doorsnede hoofdligger	0,41	0,73	0,74	0,56	1,00	0,98
Netto doorsnede verbindingssplaten	0,28	0,46	0,62	0,38	0,62	0,81

Tabel 26 – Unity checks verbinding C1 en C8

Uit de toetsingen volgt dat de netto doorsnede in alle onderdelen maatgevend is. De trekspanningen in de hoofdligger ter plaatse van de overige sectiedelingen zijn lager, waardoor aangenomen kan worden dat de andere verbindingen ook zullen voldoen. De drukspanning in verbinding C6 is (iets) hoger als in verbinding C8, maar gezien de lage UC's van de bovenflens en het feit dat voor druk uitgegaan mag worden van de bruto doorsnede, kan worden aangenomen dat deze verbinding ruim zal voldoen aan de sterke-eis.

4.3 Verbinding type K – Klinknagelverbinding flenspakket

In de onderflens van de hoofdligger zijn klinknagels toegepast om het platenpakket bij elkaar te houden. Ter plaatse van de snede met de hoogste trekspanning (midden veld 3) is een toets op de netto doorsnede gedaan.



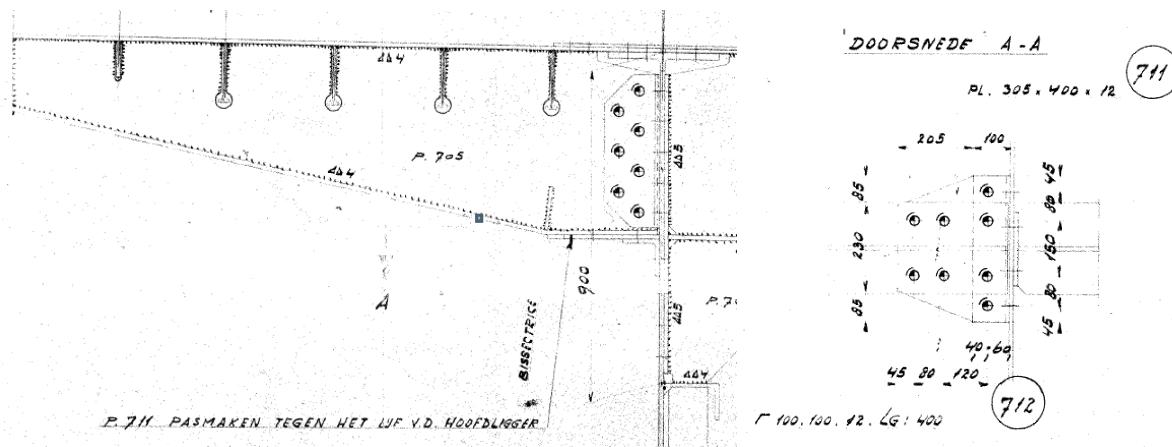
Figuur 62 – Detail type K – Klinknagel verbinding flenspakket

In de netto doorsnedetoets van de onderflens wordt een unity check van **1,04** gevonden. Hierbij is rekening gehouden met gereduceerde doorsnede t.g.v. plooij. Er is daarom ook gekeken naar de spanning onder de gereduceerde belastingcombinaties, zoals beschreven in paragraaf 6.4 en 6.9 in het uitgangspuntenrapport. Onder deze combinatie wordt een UC van **0,97** gevonden, waarmee geconcludeerd wordt dat dan de verbinding voldoet.

4.4 Verbinding Type L – Verbinding console/dwarsdrager met hoofdlijker

4.4.1 Verbinding L1 – Verbinding console – hoofdlijker

De console is door middel van hoekstalen op het lijf en onder de onderflens verbonden met het lijf van de hoofdlijker. Hierbij is in de onderflens een verbrede plaat aangebracht. De bovenflens van de console is aan de bovenzijde door gekoppeld met de dwarsdrager en de bovenflens van de hoofdlijker.



Figuur 63 – Detail Type DD-zK1 Verbinding console – hoofdlijker (links zijaanzicht, rechts verbrede plaat en hoekstaal onderflens)

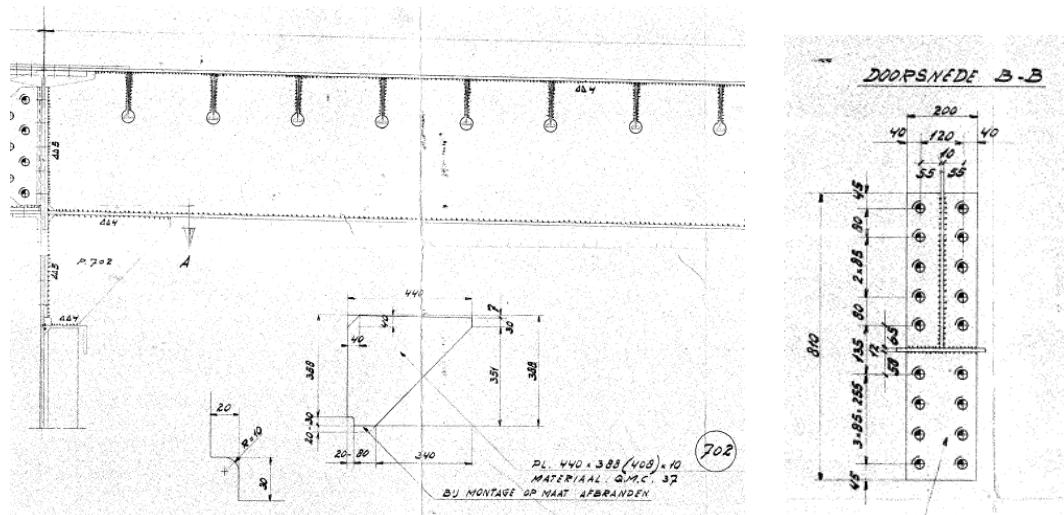
De verbinding is getoetst op basis van de snedekrachten die bepaald zijn met in het lokale model van de dekconstructie. Hiervoor zijn de spanningen in de onderflens, lijfplaat en het dek geïntegreerd tot een normaalkracht, dwarskrachten en momenten ter plaatse van de snede bij de verbinding, zie Bijlage D4a. Voor het dek is een breedte van 300 mm aangehouden, overeenkomstig met de breedte van de verbindingsplaat van de bovenflens. De snedekrachten zijn vervolgens vertaald naar krachten in de verbindingsmiddelen (klinknagels, hoekstalen en platen) in de verbinding. Hierbij wordt aangenomen dat de klinknagels in het lijf niet bijdragen aan de overdracht van het moment, omdat deze minder stijf zullen reageren door de verbinding met hoekstalen. De verschillende onderdelen zijn getoetst met behulp van Mathcad, zie Bijlage D4b.

Detail Type DD-zK1: Verbinding console – hoofdlijker			
Onderdeel	Klinknagels	Netto doorsnede console	Netto doorsnede verbinding
Bovenflens	0,52	0,39	0,39
Lijf	0,22	0,40	0,31
Onderflens console – plaat onderflens	0,58	0,39	0,43
Plaat onderflens – hoekstaal	0,87	0,39	0,25

Tabel 27 – Unity checks verbinding L1 console - hoofdlijker

4.4.2 Verbinding L2 – Verbinding dwarsdrager – hoofdlijger

De dwarsdrager is op een vergelijkbare wijze als de console verbonden met de hoofdlijger. Afwijkend voor de verbinding van de dwarsdrager ten opzichte van de verbinding van de console is het gelaste kopschot en de gelaste verbinding van de onderflens.



Figuur 64 – Detail Type DD-zK2 Verbinding dwarsdrager – hoofdlijger (links zijaanzicht, rechts aanzicht kopplaat)

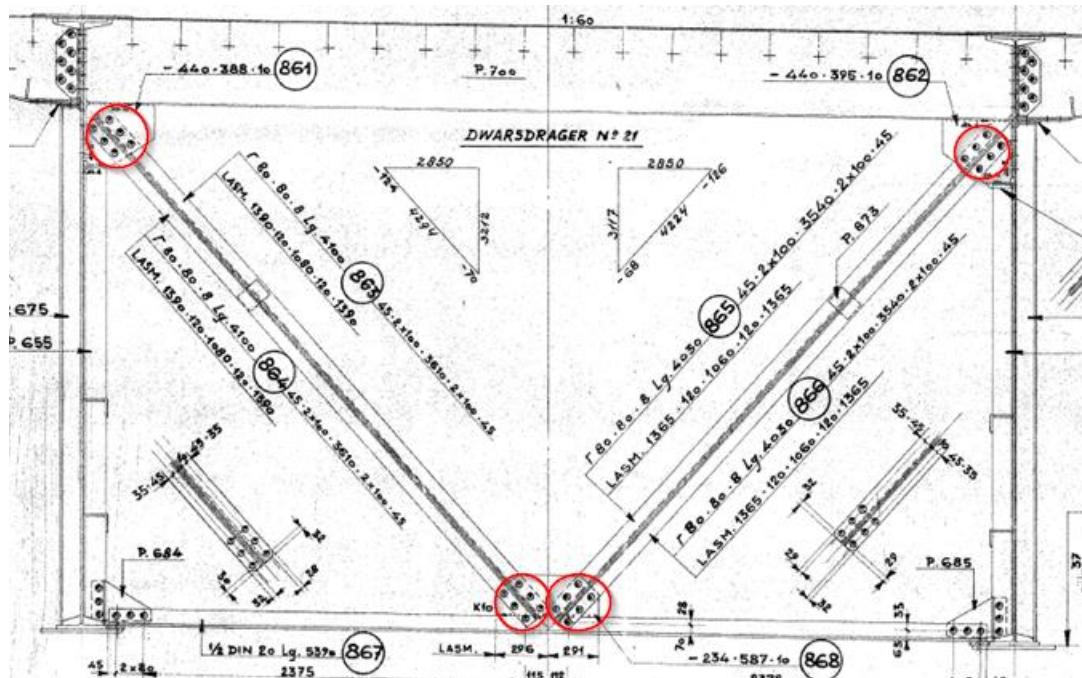
De verbinding is vergelijkbaar als bij de verbinding van de console, getoetst op basis van de snedekrachten die bepaald zijn met in het lokale model van de dekconstructie. Hiervoor zijn de spanningen in de onderflens, lijf (inclusief knieschot) en dek, geïntegreerd tot een normaalkracht, dwarsdrachten en momenten ter plaatse van de snede bij de verbinding, zie Bijlage D4c. Daarbij is zowel een snedekrachten bepaald t.p.v. een verbinding van een tussendwarsdrager als t.p.v. een dwarsdrager met K-verband. De snedekrachten zijn vervolgens vertaald naar krachten in de verbindingsmiddelen (klinknagels en lassen) in de verbinding. Deze onderdelen zijn getoetst met behulp van Mathcad, zie Bijlage D4d. De resultaten van de berekeningen zijn samengevat in onderstaande tabel.

Detail Type DD-zK2: Verbinding dwarsdrager – hoofdlijger				
Onderdeel	Klinknagels	Netto doorsnede console	Netto doorsnede verbinding	Lasverbinding
Bovenflens	0,46	0,34	0,34	
Lijf	0,23			0,26
Onderflens				0,70

Tabel 28 – Unity checks verbinding L2 dwarsdrager - hoofdlijger

4.5 Verbinding type P – Diagonalen K-verbanden en portalen

Aan het einde van de diagonalen is aan de bovenzijde een klinknagelverbinding aanwezig met het knieschot onder de dwarsdrager en aan de onderzijde met de onderrand. De verbindingen aan de boven en onderzijde zijn vrijwel identiek, waardoor de maatgevende van de vier getoetst is.



Figuur 65 – Detail type P Verbinding diagonalen K-verbanden – hoofdlijger

De snedekrachten aan het einde van de staaf zijn vertaald naar krachten in de verbindingsmiddelen (klinknagels) in de verbinding. De klinknagels en de netto doorsnede van de diagonalen en verbindingsplaten zijn getoetst met behulp van Mathcad, zie Bijlage D5. Voor de verbinding van portaal C was het nodig om een plastische verdeling van de momenten en normaalkrachten aan te houden. De resultaten van de berekeningen zijn samengevat in onderstaande tabel. In eerste instantie voldoen de verbindingen van portaal B en C niet. Daarom is gekeken of de verbindingen wel voldoen bij een gereduceerde windbelasting, zoals beschreven bij de sterkte-toetsing van het portaal (paragraaf 3.3.3). Bij deze gereduceerde windbelasting voldoen alle verbindingen.

Detail Type P: Verbinding diagonalen K-verbanden en portalen			
Onderdeel	Klinknagels	Netto doorsnede profiel	Netto doorsnede plaat
K-verband 2xL80x80x8	0,08	0,34	0,26
K-verband 2xL90x90x9	0,12	0,40	0,41
Portaal A	0,32	0,66	0,83
Portaal B	1,18 / 0,94 ¹	1,06 / 0,92 ¹	0,80 / 0,70 ¹
Portaal C	1,16 / 0,84 ¹	1,30 / 0,95 ¹	1,30 / 0,95 ¹

¹ gereduceerde windbelasting ($C_s C_d = 0,85$ en B/D gebaseerd op de breedte van twee bruggen)

Tabel 29 – Unity checks verbinding type P – diagonalen K-verbanden en portalen

Om meer inzicht te krijgen in de aandelen van de belastingen aan de krachten in de verbinding zijn in onderstaande tabel de bijdragen van de verschillende belastingcomponenten (zonder belastingfactor) samengevat in de snede met de maximale UC. De UC wordt door zowel N en My bepaald.

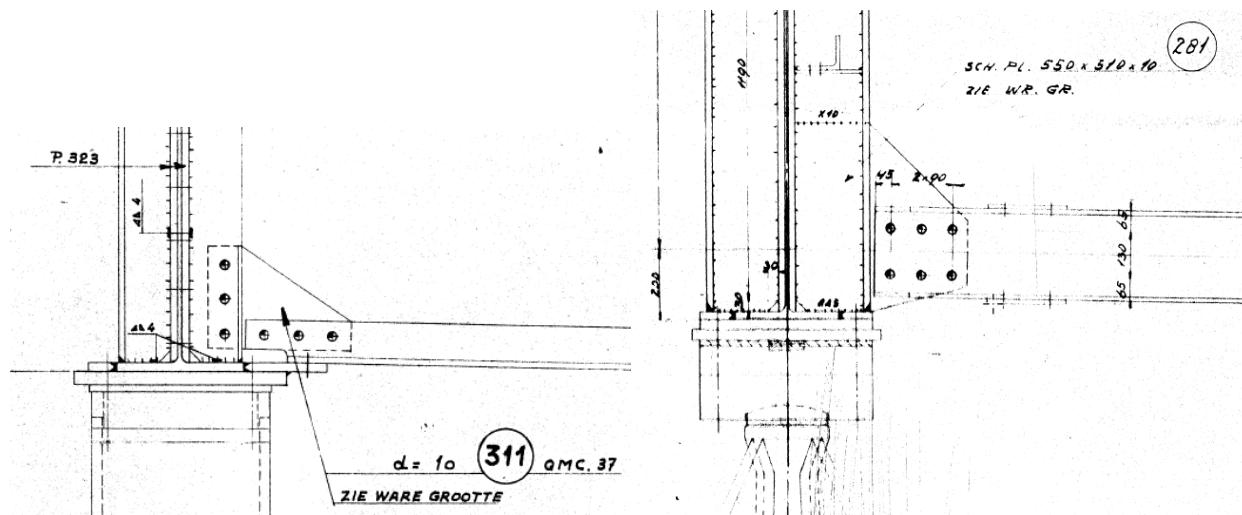
Belasting	Portaal B		Portaal C	
	N [kN]	My [kNm]	N [kN]	My [kNm]
UGT	-537	-4,3	-1611	-67,6
BGT	-390	-3,5	-1082	-47,3
Permanente belastingen	-44	-1,0	-32	-8,7
Verkeer	-116	-2,0	-64	-1,7
Rem	-2	-0,0	0	-0,1
Wind F*w	-214	-0,3	-1038	-35,1
Temperatuur	-36	-0,0	-11	-0,8
Warmwaterleiding	-3	-0,1	-1	-0,4

Tabel 30 – Normaalkracht en momentbijdragen ($N + My$) van de verschillende belastingcomponenten in verbinding P

Te zien is dat bij portaal B met name verkeer een grote bijdrage aan het moment in de verbinding geeft, terwijl Wind F*w een grote bijdrage geeft aan de normaalkracht. Voor Portaal C geldt dat Wind F*w verantwoordelijk is voor vrijwel de volledige normaalkracht en het grootste deel van het moment.

4.6 Verbinding type Q – Onder- en bovenrand K-verbanden en portalen

De onder- en bovenrand van de K-verbanden en de portalen zijn via een schot verbonden met de dwarsverstijvers op het lijf van de hoofdlijker.



Figuur 66 – Detail type Q - Verbinding onderrand K-verbanden – hoofdlijker (links) en onderrand portaal C (rechts)

De snedekrachten van de onder- en bovenrand zijn ter plaatse van het hart van de verbinding vertaald naar krachten in de verbindingsmiddelen (klinknagels). De klinknagels en de netto doorsnede van de onder- en bovenrand en de verbindingssplaten zijn getoetst met behulp van Mathcad, zie Bijlage D6. De resultaten van de berekeningen zijn samengevat in onderstaande tabel.

Detail Type Q: Verbinding onder- en bovenrand K-verbanden en portalen					
Onderdeel	Klinknagels profiel	Klinknagels t.p.v. verstijver	Netto doorsnede profiel	Netto doorsnede plaat	Kopplaat en schot op bovenflens
Onderrand portaal A	0,39	0,46	0,39	0,31	
Bovenrand portaal A	0,83		0,33	0,53	
Onderrand portaal B	0,63		0,12	0,24	0,88
Onderrand portaal C (t.p.v. bolsegmentoplegging)	1,47 / 1,16 ¹		0,91 / 0,72 ¹	0,78 / 0,62 ¹	
Onderrand portaal C (t.p.v. vaste oplegging en bestaande roloplegging)	2,49 / 1,85 ¹		1,35 / 1,00 ¹	1,45 / 1,07 ¹	
Bovenrand portaal C	0,34		0,42	0,48	

¹ gereduceerde windbelasting ($C_s C_d = 0,85$ en b/d_{tot} gebaseerd op de breedte van twee bruggen) en belastingcombinaties

Tabel 31 – Unity checks verbinding Q – onder- en bovenrand K-verbanden en portalen

Er is voor portaal C onderscheid gemaakt in enerzijds de bestaande vaste opleggingen (pijler H, beide bruggen) en de bestaande rolopleggingen (pijler J, westelijke brug) en anderzijds de (nieuwe) bolsegmentoplegging, met een horizontale oplegging halverwege de onderrand, (pijler J, oostelijke brug). Voor de verbindingen van portaal C ter plaatse van deze laatste pijler wordt een lagere UC gevonden, omdat de kracht vanuit de diagonalen direct naar de horizontale oplegging wordt afgedragen en dus niet door de verbinding hoeft te gaan. Wel wordt opgemerkt wordt dat in de SCIA berekening een hoger moment wordt gevonden in de verbinding van de onderrand van portaal C t.p.v de bolsegmentoplegging als in de ontwerpnota van edilon sedra [17245-ONT-003]. Het verschil met deze berekening zit hem in de grootte van de horizontale oplegreactie.

Alleen de verbindingen van de onderrand van portaal C voldoen in eerste instantie niet. De berekening van de verbindingen bij portaal C zijn daarom herhaald met het model waarin de windbelasting is gereduceerd op basis van $c_{scd} = 0,85$ en een b/d_{tot} verhouding van de twee bruggen, in combinatie met de gereduceerde belastingcombinaties conform paragraaf 6.4 en 6.9 van de uitgangspuntenrapportage. Voor de toelichting hierop wordt verwezen naar paragraaf 3.3.3. Ook met deze gereduceerde belasting voldoen de verbindingen bij portaal C niet. Deze zullen dus versterkt moeten worden.

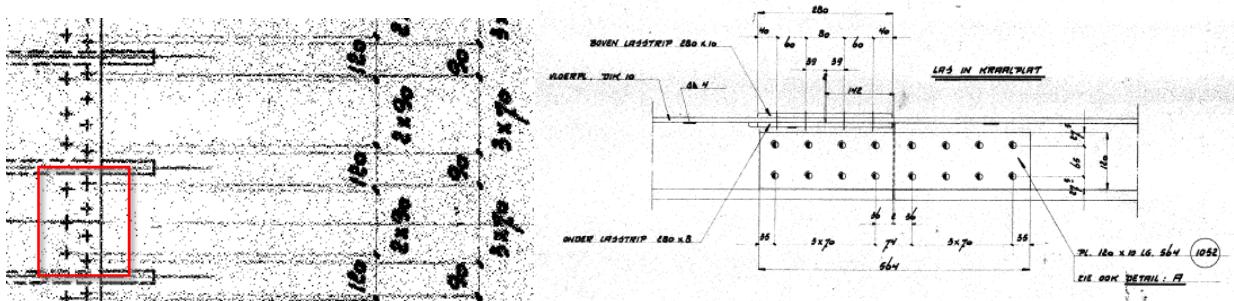
Om meer inzicht te krijgen in de oorzaak van de overschrijdingen zijn in onderstaande tabel de bijdragen van de verschillende belastingcomponenten (zonder belastingfactor) samengevat voor de snede in de onderrand van portaal C ter plaatse van de verbinding, op basis van het model zonder reductie van de windbelasting. De UC wordt hoofdzakelijk bepaald door het moment M_y ter plaatse van de verbinding. Te zien is dat de windbelasting de grootste bijdrage geeft.

Belasting	Moment M_y (Glijoplegging) [kNm]	Moment M_y (Vaste oplegging) [kNm]
UGT	-107	-151
BGT	-78	-107
Permanente belastingen	-14	-16
Verkeer	-16	-14
Rem	0	0
Wind F_w^*	-44	-75
Temperatuur	-6	-3
Warmwaterleiding	-1	-1

Tabel 32 – Momentbijdragen (M_y) van de verschillende belastingcomponenten in verbinding Q

4.7 Verbinding type R – Klinknagelverbinding t.p.v. sectiedelingen

Ter plaatse van de sectiedelingen zijn in het dek en de bulbs klinknagelverbindingen toegepast. Het dek is verbonden met een plaat aan de boven- en onderzijde van het dek en de bulbs met een plaat aan weerszijde van het lijf. Om de plaat aan de onderzijde van het dek aan te kunnen brengen is een deel van het lijf van de bulbs, net onder het dek verwijderd, waarna een plaat er onder is gelast.



Figuur 67 – Detail type R - Verbinding dekconstructie (boven) en bulbs (rechts)

De verbinding in het dek is getoetst ter plaatse van de sectiedeling waar de grootste spanningen optreden uit het globale gedrag. Onderstaande tabel geeft de trek- en drukspanningen in de bovenflens van de hoofdligger weer ter plaatse van de sectiedelingen. Op as 5 wordt de grootste trekspanning gevonden, op as 8 de grootste drukspanning. Daarom is voor deze snedes de verbinding gecontroleerd, waarbij rekening is gehouden met de spanningen uit het lokale model (dekconstructie).

Detail Type R: Geklonken verbinding brugsecties						
Code	Dwarsdrager nummer	Aanvullende beschrijving	As sectiedeling	dx	σ_{min}	σ_{max}
R1	11-12	Klinklas bij sectiedeling in veld 1	2	18499	-141	0
R2	21-22	Klinklas bij sectiedeling in veld 1	4	36897	-82	22
R3	28-29	Klinklas bij sectiedeling in veld 2	5	49095	-35	61
R4	36-37	Klinklas bij sectiedeling in veld 2	7	63783	-68	80
R5	46-47	Klinklas bij sectiedeling in veld 2	9	81631	-24	135
R6	60-61	Klinklas bij sectiedeling in veld 3	12	106764	-9	103
R7	69-70	Klinklas bij sectiedeling in veld 3	14	122510	-90	15
R8	79-80	Klinklas bij sectiedeling in veld 3	16	139630	-195	11

Tabel 33 – Spanningen in de bovenflens van de hoofdligger ter plaatse van de sectiedelingen

De klinknagels en de netto doorsnede van de dekconstructie (bulb, dekplaat) en de verbindingsplaten zijn getoetst met behulp van Mathcad, zie Bijlage D4g. De resultaten van sterkte-toetsing zijn samengevat in onderstaande tabel.

Detail Type R: Klinknagelverbinding dekconstructie t.p.v. sectiedelingen			
Onderdeel	Klinknagels	Netto doorsnede dek/bulb	Netto doorsnede verbindingsplaat
Verbinding dekplaat t.p.v. sectiedeling R5	0,60	0,65	0,38
Verbinding bulbs t.p.v. sectiedeling R5	0,65	1,01 / 0,99 ¹	0,86
Verbinding dekplaat t.p.v. sectiedeling R8	0,96	0,85	0,56
Verbinding bulbs t.p.v. sectiedeling R8	0,54	0,67	0,57

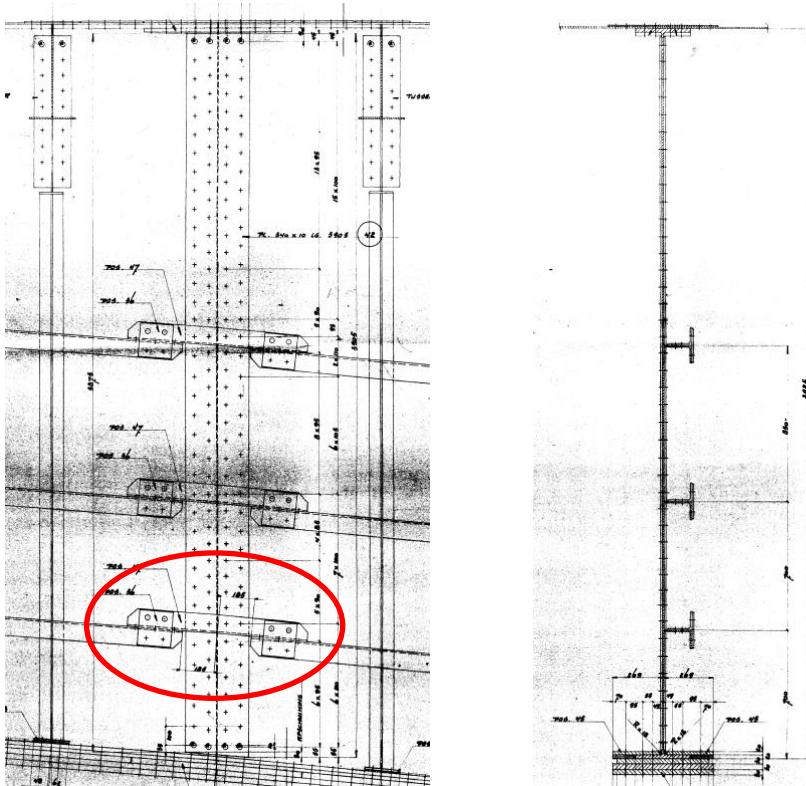
¹ gereduceerde windbelasting en belastingcombinatie cf. uitgangspuntenrapport §6.4 en §6.9

Tabel 34 – Unity checks verbinding R – dekplaat en bulbs

De verbinding van de bulbs voldoet net niet in de toetsing van de netto doorsnede van de dekconstructie. In de berekening is echter conservatief geen rekening gehouden met het feit dat een (klein) deel van de spanning al via de las tussen lijf bulb en de verbindingsplaat aan de onderzijde van het dek is overgedragen in het deel voor de eerste klinknagelrij. Wanneer dit meegenomen wordt, zal de constructie wel voldoen. Ook voldoet de constructie wanneer gerekend wordt met de gereduceerde belastingcombinatie.

4.8 Verbinding type S – Langsverstijvers

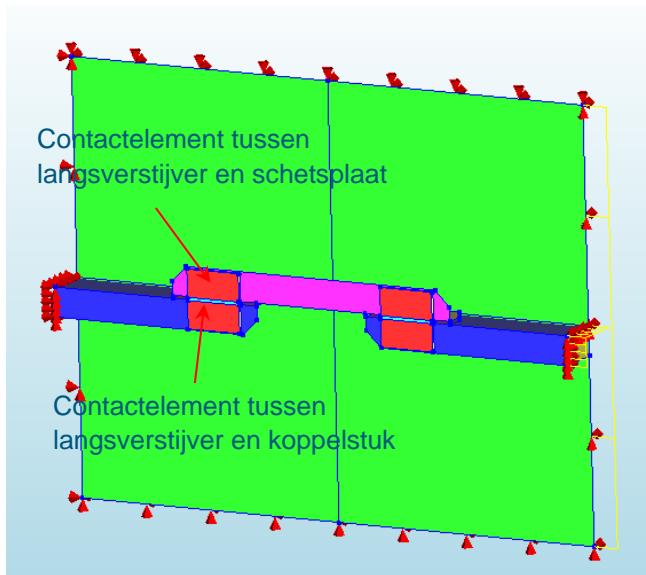
In de hoofdbrug zijn de sectiedelingen van de hoofdliggers als klinknagelverbinding uitgevoerd. Ter plaatse van deze sectiedelingen zijn de langsverstijvers doorgekoppeld met geklonken hoekprofielen, zie Figuur 68.



Figuur 68 – Detail type S - Verbinding tussen de langsverstijvers t.p.v. sectiedelingen

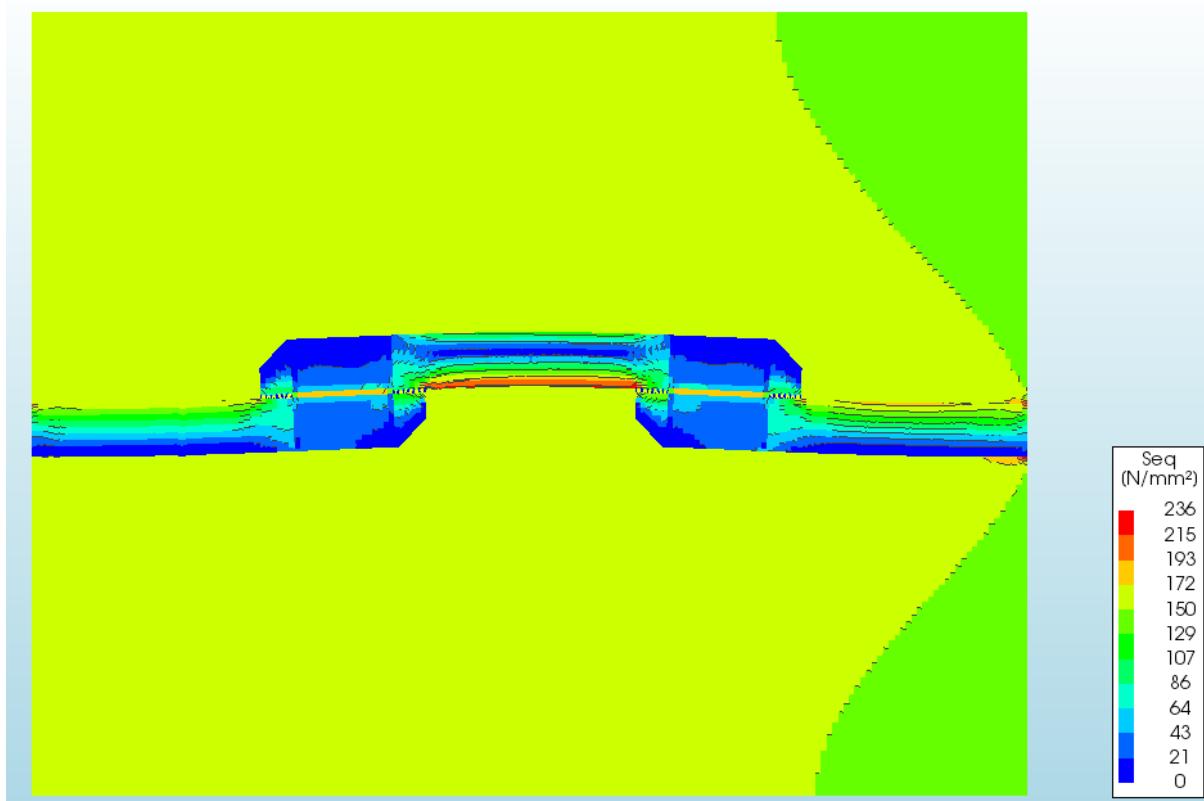
In Bijlage D8 zijn voor elke sectiedeling de spanningen in de langersverstijvers bepaald op basis van de UGT belastingcombinaties en de afzonderlijke belastingcomponenten. Hoewel de spanningen in de langsverstijver zelf ter plaatse van de sectiedeling lager zijn dan de vloeispanning, blijkt dat door de excentrische aansluiting van het koppelstuk extra momenten ontstaan die er voor zorgen dat het koppelstuk en de langsverstijver kunnen gaan vloeien. Indien er vanuit gegaan wordt dat het moment volledig door het koppelstuk en de langsverstijver worden opgenomen, ontstaan zeer grote spanningen in de UGT. Het is echter aannemelijk dat een deel van de buiging door de lijfplaat van de hoofdligger opgenomen zal worden. Om een goede berekening van de verdeling van de spanningen in de langsverstijver, het koppelstuk en de lijfplaat te bepalen, is een plaatmodel van de verbinding gemaakt met behulp van DIANA. Doel van dit model is, naast het bepalen van de spanningsverdeling, ook het bepalen van de uitbuiging van de lijfplaat en de langsverstijver door het vloeien van (onderdelen van) de verbinding. Een grote uitbuiging kan namelijk leiden tot een verminderde steun tegen plooistabiliteit.

Een uitgebreide toelichting op het model en de modellering is gegeven in Bijlage D8. Figuur 69 toont het DIANA model waarbij een de randen van het model overeenkomen met de aansluiting van het lijf op de onderflens (onder), de tweede langsverstijver (boven) en de dwarsverstijvers (links en rechts) van het veld met de koppeling. Voor het model is gebruik gemaakt van plaatelementen en contactelementen. Aan de plaat elementen zijn niet-lineaire materiaaleigenschappen toegekend, zodat het vloeien meegenomen kan worden. Op de rechter zijde van het model is op de plaatrand en de rand van de langsverstijver een spanning van 170 N/mm² aangebracht, overeenkomstig met de maximale spanning in de UGT.

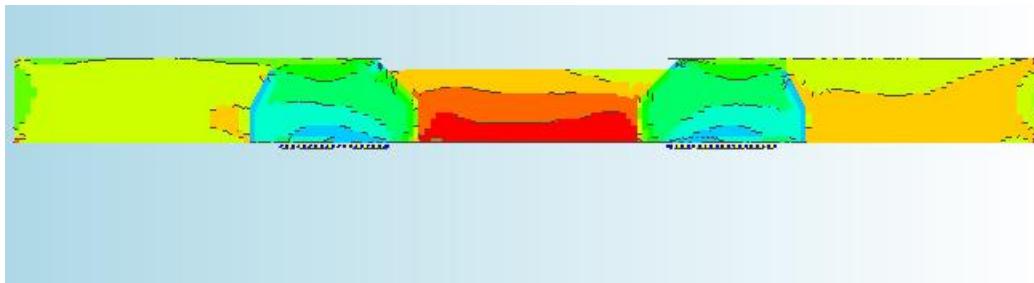


Figuur 69 – FEM model met koppelstuk en contactelementen.

Het model is zowel lineair als niet-lineair doorgerekend. Uit de niet-lineaire berekening volgt het volgende spanningsbeeld.



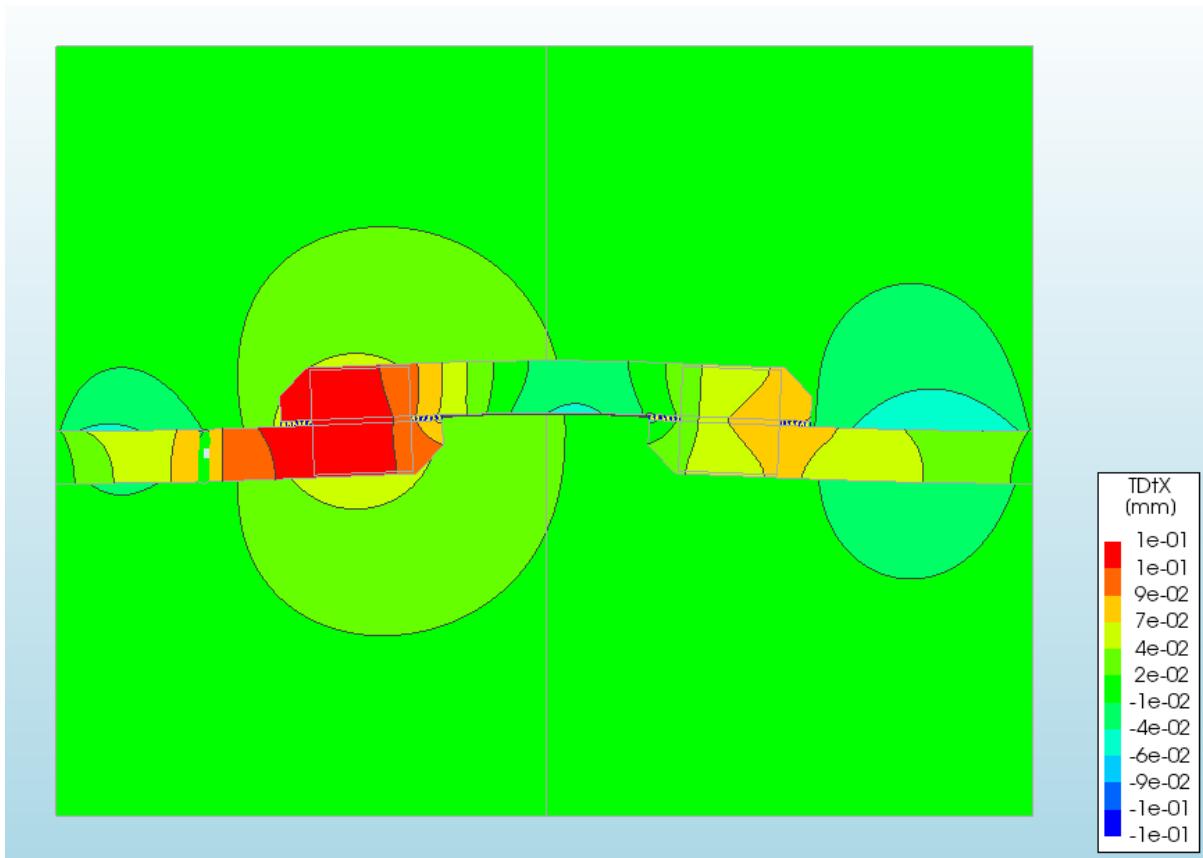
Figuur 70 – Von Misses spanningen niet-lineair berekening in de volledige belaste situatie (170 N/mm^2) (vooraanzicht).



Figuur 71 – Von Misses spanningen niet-lineair berekening in de volledige belaste situatie (170 N/mm^2) (bovenaanzicht).

Te zien is dat in het koppelstuk vloeien van de verbinding optreedt. In de langsverstijver zelf treedt geen vloeien op.

Naast de analyse van de spanningen is ook gekeken naar de vervormingen uit het vlak van het lijf. Deze vervormingen kunnen in theorie invloed hebben op de plooistabiliteit van de hoofdlijger.



Figuur 72 – Vervorming uit het vlak van het lijf volgens de niet-lineaire analyse voor de UGT belasting (170 N/mm^2).

De maximale vervorming van de lijfplaat zelf is 0,09 mm in de niet-lineair berekening. Deze maximale vervorming treedt op bij de aansluiting met de langsverstijver.



Wanneer deze vervormingen worden vergeleken met de toelaatbare excentriciteiten volgens de Eurocode, dan kan geconcludeerd worden dat deze extra vervorming verwaarloosbaar klein is. Zo wordt volgens NEN-EN 1993-1-5 tabel C.2 voor een langsverstijver met lengte a en liggerhoogte b uitgegaan van het minimum van $a/400$ en $b/400$. Dit komt neer op $1800/400 = 4,5$ mm. Geconcludeerd wordt dat de extra vervorming uit het vlak door het vloeien van het koppelstuk geen invloed zal hebben op de kniktoetsing van de langsverstijver en/of plooien van het lijf.

Dit neemt echter niet weg dat de verbinding van de plooiverstijver versterkt moet worden, om vloeien te voorkomen. Het vloeien van het koppelstuk zal namelijk wel een invloed hebben op de stijfheid van de langsverstijver tegen knik en/of steun tegen plooien.

De toetsing van de verbindingsmiddelen is uitgevoerd in Mathcad, zie Bijlage D8.c. Hierbij is uitgegaan van de spanningen volgens de lineaire berekening en is onderscheid gemaakt in de opstaande flens en het lijf (= liggende flens) van de langsverstijver en dezelfde onderdelen van het koppelstuk. Uit de spanningen in de verschillende onderdelen zijn de krachten op de klinknagels bepaald. Uit deze berekening volgt dat de verbinding t.p.v. sectiedeling S6 niet voldoet, met een UC van 1,33, waarbij stuik van de klinknagel in het lijf (liggende flens) van het koppelstuk maatgevend is. Op basis van deze UC kan worden afgeleid dat de toelaatbare spanning $170 \text{ N/mm}^2 / 1,33 = 127 \text{ N/mm}^2$ is. Dit zou betekenen dat de onderste verbinding ter plaatse van C5 en C6 niet voldoet op sterkte. De onderste verstijver ter plaatse van C4 (125 N/mm^2) en C7 (129 N/mm^2) zitten net op de rand, maar door herverdeling van een klein deel van de krachten kan beredeneerd worden dat deze verbinding wel voldoet.

Vanwege vermoeiing en de recent geconstateerde geluiden in de verbinding is, in overleg met Rijkswaterstaat, besloten om alle koppelstukken te vervangen, ondanks dat deze rekenkundig wel voldoen. Hierop zal verder worden ingegaan in het versterkingsontwerp.

5 Vermoeiing

5.1 Aanpak

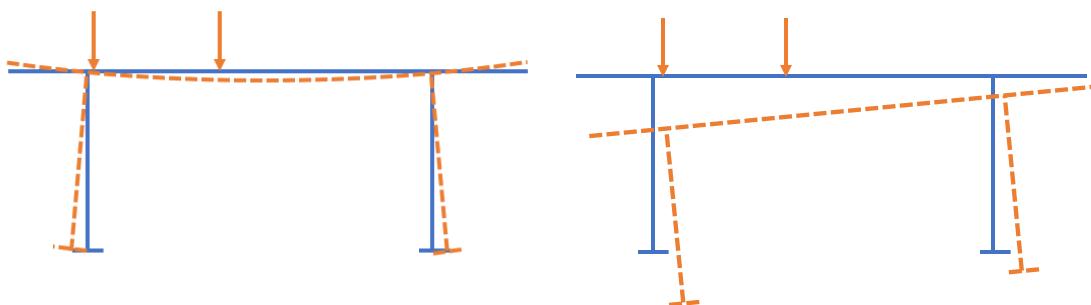
De aanpak van de vermoeiingsberekening is beschreven in de uitgangspuntenrapportage. In dit hoofdstuk worden de uitkomsten van de vermoeiingsberekeningen besproken. Allereerst zal in paragraaf 5.2 worden ingegaan op de spanningen t.g.v. het zijdelings uitbuigen en wordt bepaald of en zo ja hoe deze meegenomen moeten worden in de vermoeiingsberekeningen van de hoofdlijn. In paragraaf 5.3 en verder worden vervolgens per type verbinding een overzicht van de verbinding, de schadecategorie en de resultaten van de berekening van de schade door vermoeiing gegeven. De resultaten worden gepresenteerd voor $\gamma_{MF} = 1,35$, zowel in tabelvorm als grafisch. Voor $\gamma_{MF} = 1,15$ en $\gamma_{MF} = 1,0$ zijn samenvattingen van de resultaten in het begin van de betreffende bijlagen gegeven, om de rapporttekst enigszins compact te houden.

Voor de hoofdrijbaan geldt dat er van rijrichting is veranderd in 1990. Er is daarom voor de HRB voor de volgende aanpak gekozen. De schadeontwikkeling wordt één maal doorgerekend met verkeer richting Utrecht (aangeduid met "tot 1989"), en één maal met verkeer richting Duitsland (aangeduid met "vanaf 1990"). In de beide berekeningen wordt er (fictief) van uitgegaan dat de gehele periode (1964-2050) in dezelfde richting wordt gereden. Vervolgens wordt de schade bepaald door de juiste periodes met de juiste rijrichting bij elkaar op te tellen.

- HRB west:
 - Schade periode 1964-1989, berekening HRB west (tot 1989, verkeer richting Utrecht) +
 - Schade periode 1990-2050, berekening HRB west (vanaf 1990, verkeer richting Duitsland)
- HRB oost:
 - Schade periode 1964-1989, berekening HRB oost (tot 1989, verkeer richting Utrecht) +
 - Schade periode 1990-2050, berekening HRB oost (vanaf 1990, verkeer richting Duitsland)

5.2 Spanningswisseling t.g.v. zijdelings uitbuigen

Met behulp van het lokale model is onderzocht hoe groot de spanningen in de onderflens van de hoofdlijn zijn door het zijdelings uitbuigen van de onderflens. Door een belasting op het dek zal het dek tussen de hoofdliggers willen doorbuigen. Hierdoor zal er een hoekverdraag aan de bovenzijde van het lijf van de hoofdlijn ontstaan, welke de onderflens naar buiten zullen duwen, zie Figuur 73 links. Deze vervorming wordt echter (lokaal) tegengegaan door de k-verbanden.



Figuur 73 – Zijdelings uitbuigen van de onderflens (links) en rotatie van de brug (rechts)

Naast het zijdeling uitbuigen zal de brug ook roteren door de excentrische belasting, zie Figuur 73 rechts. Hierdoor zal de onderflens ook enigszins gaan krommen, doordat deze vervorming ter plaatse van de opleggingen wordt tegengehouden.

Om de grootte van de spanningen in de onderflens door buiging om de zwakke as te bepalen is een lokaal model opgezet. Voor de beschrijving van het model wordt verwezen naar het uitgangspuntenrapport.

Als randvoorwaarden is het dek op as 11 en as 14 in langs- en dwarsrichting (x en y-richting) verend gesteund, zie Figuur 74. In z-richting is aan de bovenzijde van het lijf van de hoofdligger een verende ondersteuning gemodelleerd op as 11 en 14. De veerconstantes zijn afgeleid uit het globale model door op de betreffende as een eenheidslast te zetten en de bijbehorende vervorming van de betreffende punten in de afzonderlijke richtingen te bepalen. Hieruit volgen de volgende veerstijfheden.

$$\text{As 11} \quad k_x = 100 \text{ kN/m} / 1,8 \text{ mm} = 55,6 \text{ MN/mm}^2$$

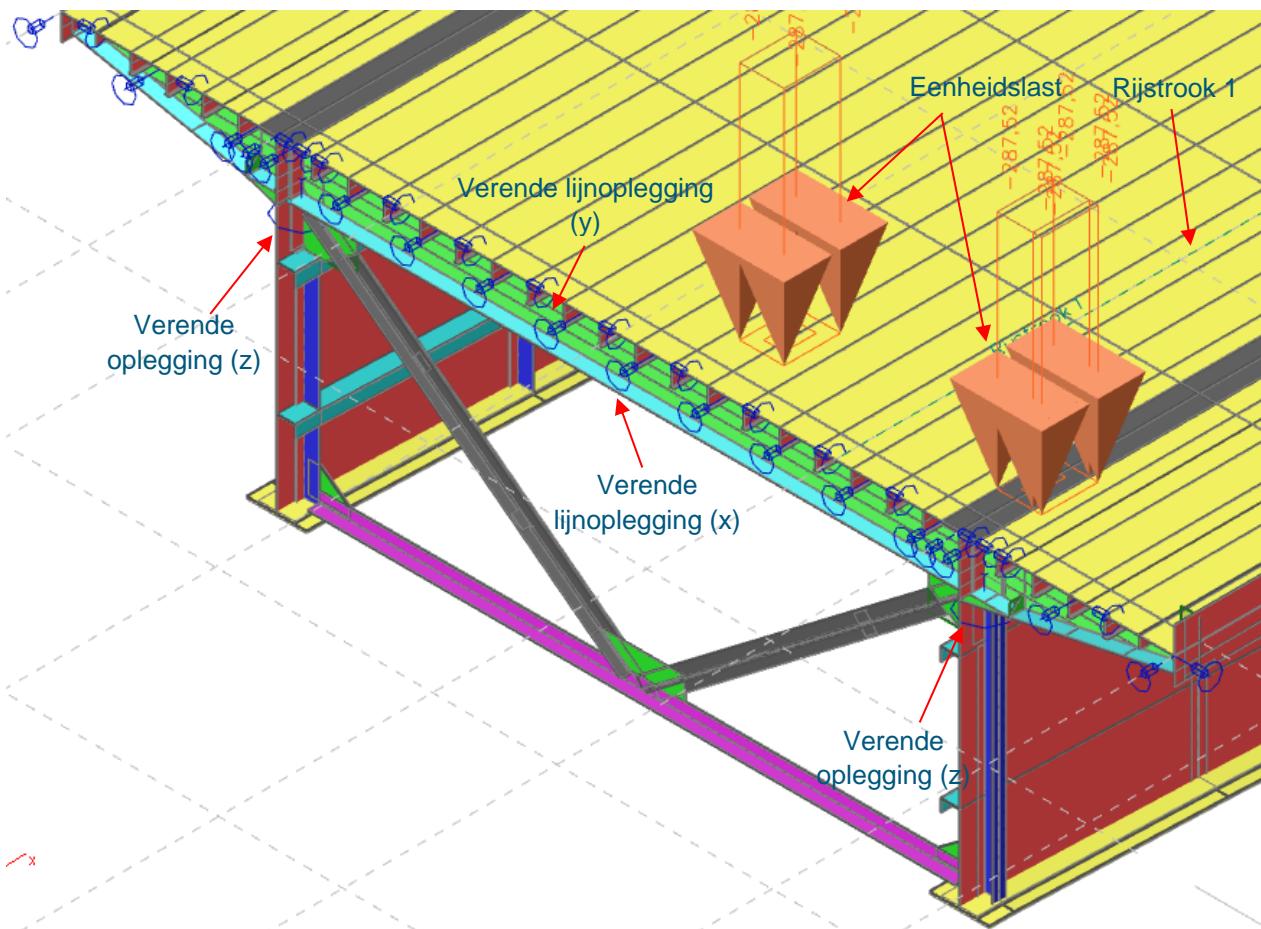
$$k_y = 100 \text{ kN/m} / 7,6 \text{ mm} = 13,2 \text{ MN/mm}^2$$

$$k_z = 100 \text{ kN} / 3,2 \text{ mm} = 31 \text{ MN/m}$$

$$\text{As 14} \quad k_x = 100 \text{ kN/m} / 1,9 \text{ mm} = 52,6 \text{ MN/mm}^2$$

$$k_y = 100 \text{ kN/m} / 9,1 \text{ mm} = 11 \text{ MN/mm}^2$$

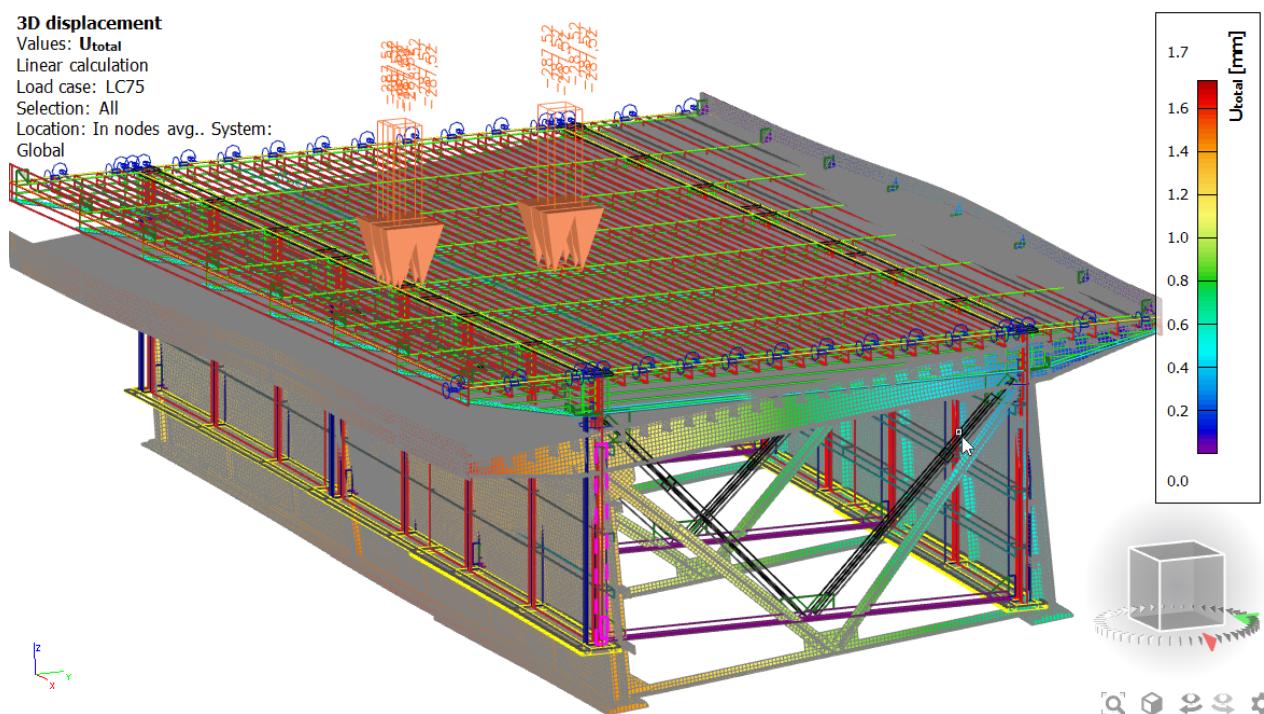
$$k_z = 100 \text{ kN} / 2,7 \text{ mm} = 37 \text{ MN/m}$$



Figuur 74 – Lokale model met oplegcondities voor de bepaling van spanningen door dwarse buiging

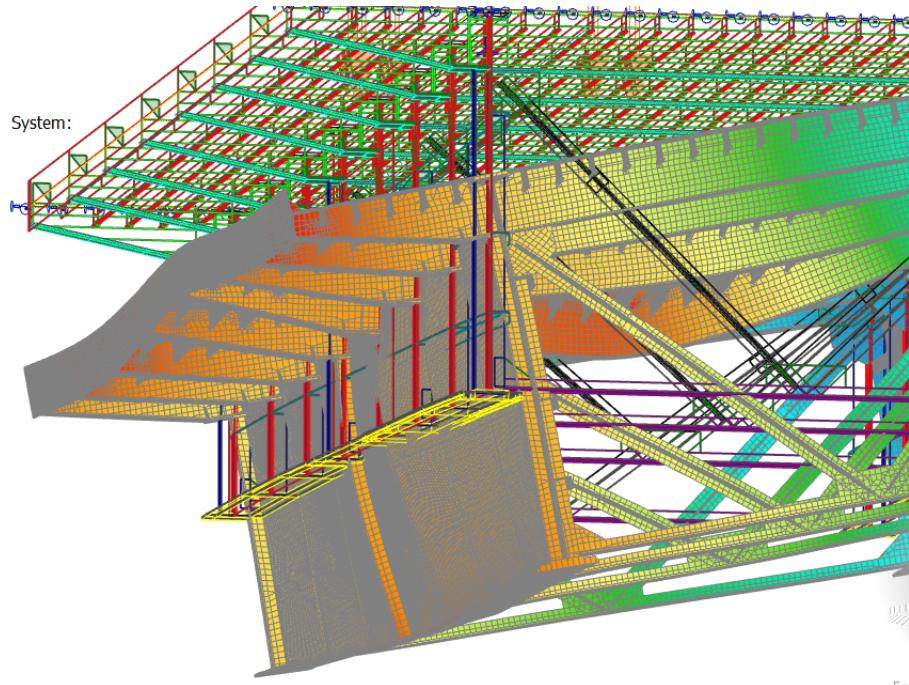
Over het dek is op rijstrook 1 een eenheidslast van 2x50 kN geplaatst, waarbij de wielen h.o.h. 2,15 m uit elkaar staan, symmetrisch ten opzichte van het midden van rijstrook 1, op basis van figuur A.1 van NEN 8701. De eenheidslast is in stappen van 0,1 m over het model verplaatst. De resultaten voor rijstrook 2 kunnen bepaald worden door de resultaten in de minst belaste hoofdlijn te lezen, rekening houdend met de richting van het uitbuigen van de onderflens.

In onderstaande figuren zijn de vervormingen in de doorsnede te zien bij een aslast precies tussen 2 k-verbanden in (5^e dwarsdrager). De vervormingen laten zien dat de constructie enigszins roteert. Dit gedrag komt overeen met het gedrag in het globale model.



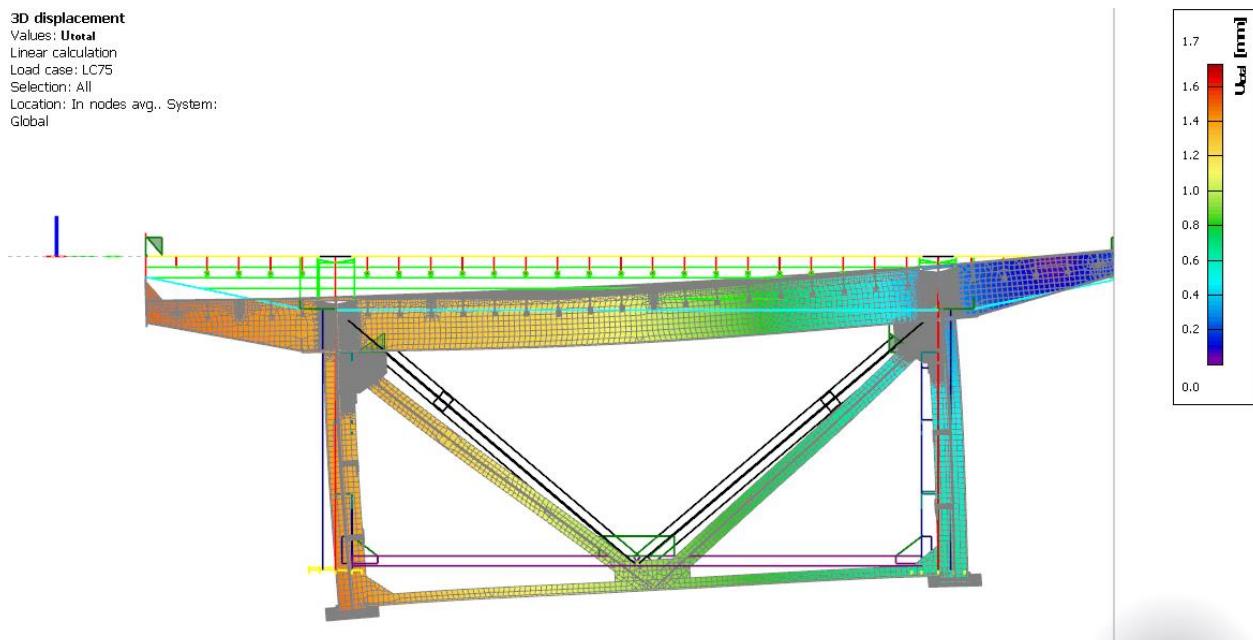
Figuur 75 – 3D vervorming lokale model bij eenheidslast op 5^e dwarsdrager (3D overzicht)

Ook is te zien dat door de doorbuiging van de dwarsdrager/dek de consoles omhoog wippen, en het lijf van de hoofdlijger uitbuigt. Hierdoor roteert de onderflens lokaal.

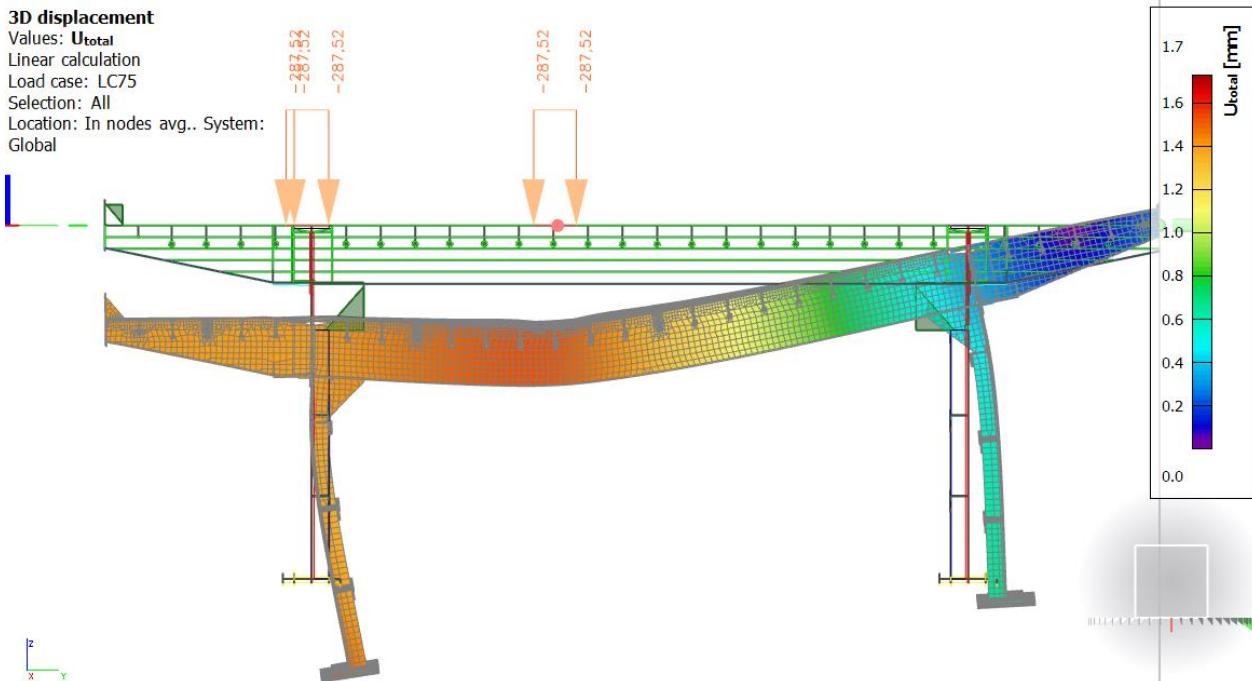


Figuur 76 – 3D vervorming lokale model bij eenheidslast op 5^e dwarsdrager (vervorming lijf en onderflens)

In beide onderstaande figuren is de aslast op dezelfde locatie, precies tussen 2 k-verbanden geplaatst (5^e dwarsdrager). In het bovenste figuur is de verplaatsing weergegeven van de dwarsdrager met k-verband (4^e dwarsdrager), in het onderste figuur van de dwarsdrager precies tussen de k-verbanden in (5^e dwarsdrager). Het verschil in vervorming is een maat voor de zijdelingse uitbuiging.

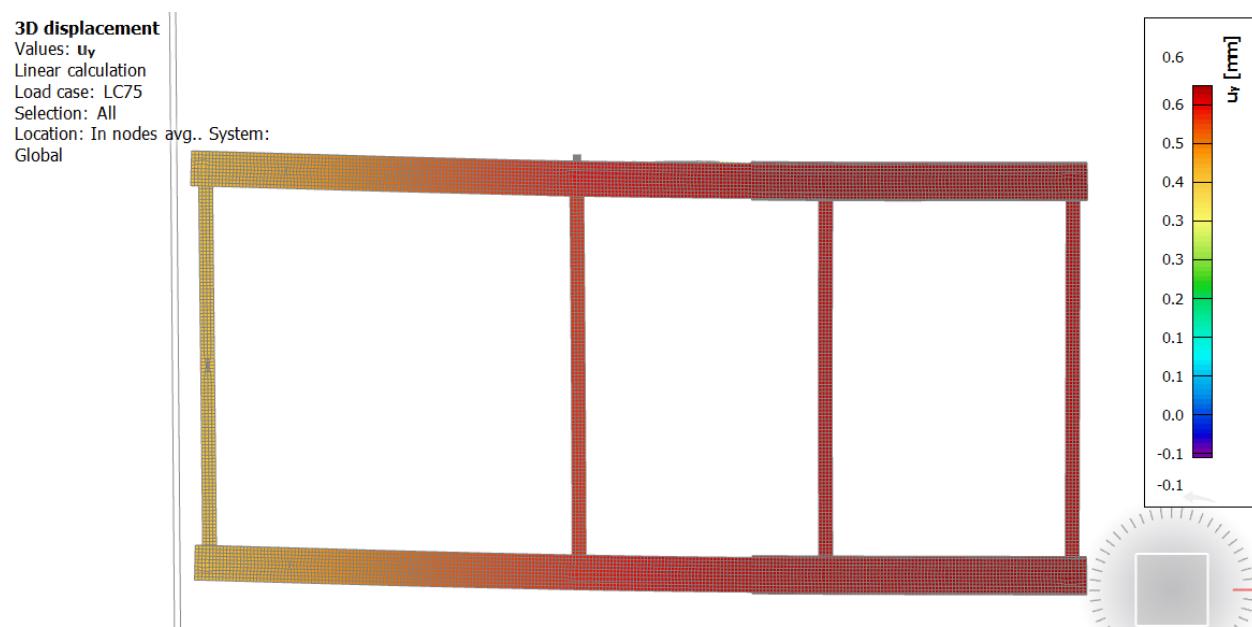


Figuur 77 – 3D vervorming k-verband t.p.v 4^e dwarsdrager bij eenheidslast tussen 2 k-verbanden in (5^e dwarsdrager) (doorsnede)



Figuur 78 – 3D vervorming dwarsdrager tussen 2 k-verbanden in (5° dwarsdrager) bij een eenheidslast op dezelfde dwarsdrager (doorsnede)

In onderstaand figuur is de zijdelingse uitbuiging (u_y) van de onderflens weergegeven.



Figuur 79 – Zijdelingse vervorming u_y onderflens bij eenheidslast tussen 2 k-verbanden in (5° dwarsdrager) (onderaanzicht)

De figuren geven vervormingen, geen krommingen.

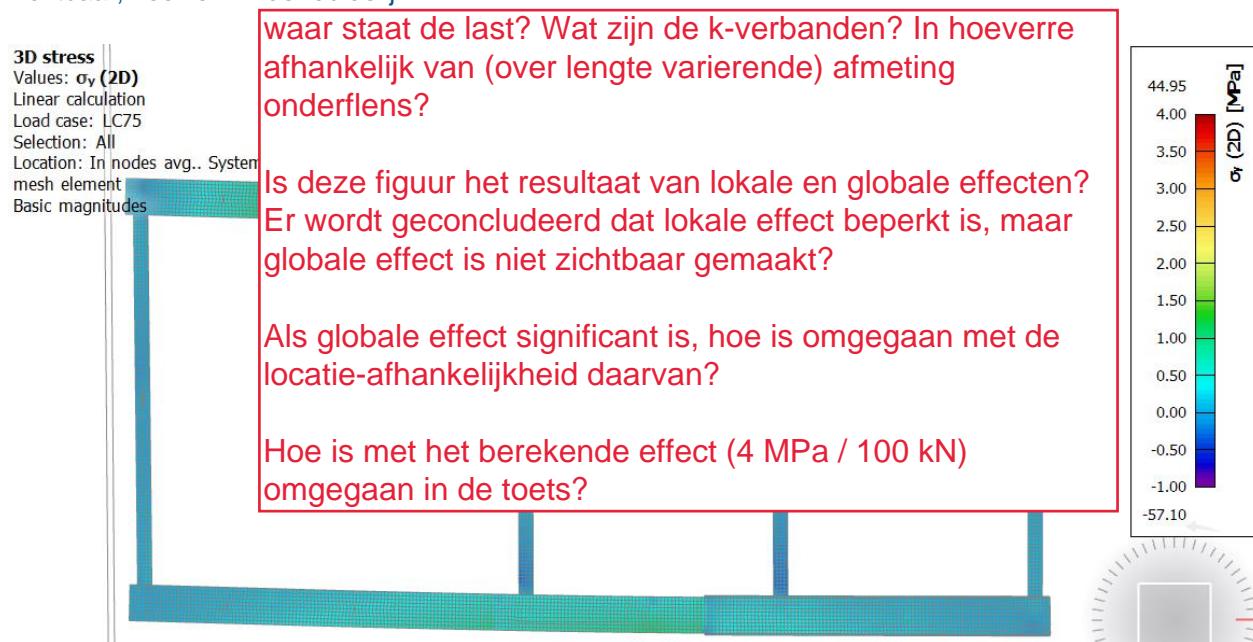
Te zien is dat de spanningswisselingen, en de vervormingen zijn daarvoor geen indicatie. Hoe kan ik zien dat de spanningswisselingen beperkt zijn tussen 2 k-verbanden? Ok volgt hierna. voertug op rijstrook 1.

van de doorsnede van de uitbuiging lijkt voor de richting uitbuigen. Dit zal opleveren als een

Niet ten gevolge van lokale buiging tussen twee K-verbanden.

Spanningen

Eenzelfde beeld is terug te zien in spanningen in de onderflens. In onderstaand figuur zijn de spanningen weergegeven in de onderflens bij een eenheidslast tussen de 2 k-verbanden in. Het verschil in spanning tussen de linker en rechter zijde van de flens is zeer beperkt, alleen bij de dikte-overgang is hierin een kleine verstoring zichtbaar. Ook bij de aansluiting van de dwarsverstijvers is een kleine verstoring zichtbaar, hoewel minder duidelijk.



Figuur 80 – Spanningen in de onderflens bij eenheidslast tussen 2 k-verbanden in (5^e dwarsdrager) (onderaanzicht)

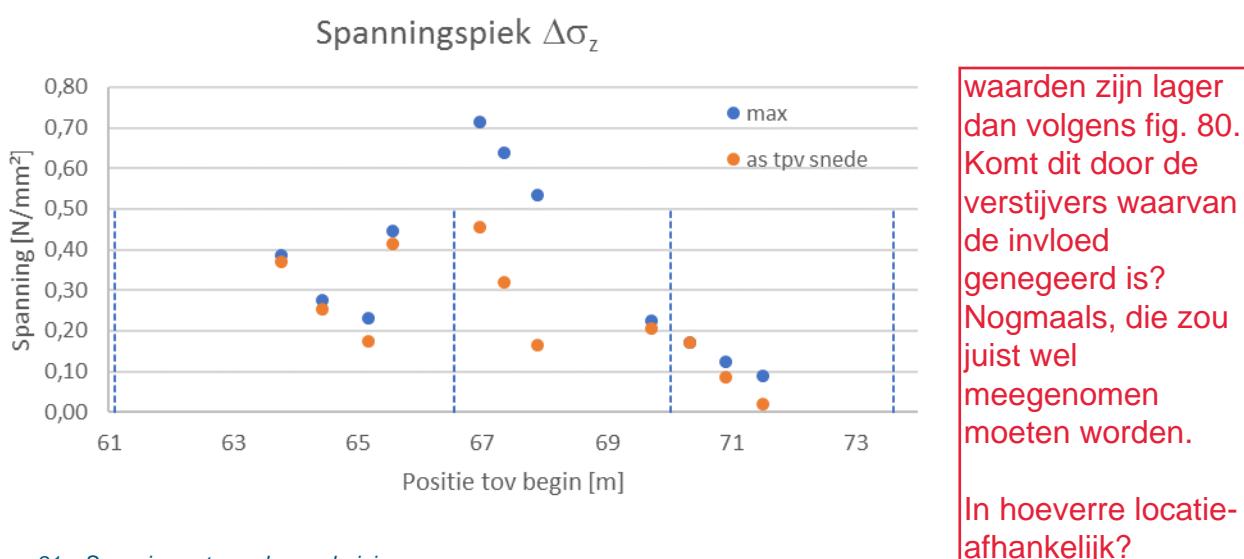
Rijstrook 1

welke?

Op een 11-tal locaties zijn de invloedslijnen bepaald voor de spanningen t.g.v. dwarse buiging door verkeer op rijstrook 1. Omdat in het model ook langsbuiging zal ontstaan, zijn de spanningen t.g.v. dwarse buiging bepaald door het verschil in spanning te bepalen tussen de linker- en rechterzijde van de onderflens en dit te delen door 2. Dit is dan de optredende trek- en drukspanning in de uiterste vezel van de onderflens als gevolg van M_z . De snedes zijn zodanig gekozen dat deze niet in de eerste helft van het eerste veld en de tweede helft van het laatste veld zitten in verband met randverstoringen door de oplegcondities van het rekenmodel. Ook zijn de snedes zodanig gekozen dat zij zo minimaal mogelijk verstoord worden door de aansluitingen van de verticale verstijvers op de onderflens en dikte overgangen in de onderflens.

Als dergelijke aansluitingen in het schaalelementenmodel tot spanningverhoging leidt, zou het juist wel meegenomen moeten worden.

De maximale spanning t.g.v. dwarse buiging gedurende de passage van de eenheidslast zijn in onderstaande grafiek weergegeven. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de maximale spanning die optreedt gedurende de wisseling (blauwe waarden) en de spanning wanneer de as precies boven de beschouwde snede staat (oranje waarden). Omdat de spanning t.g.v. N+My sneller toeneemt, zal voor het bepalen van de totale wisseling de spanning t.g.v. Mz die optreedt wanneer de as precies boven de beschouwde snede staat (oranje waarden) maatgevend zijn en opgeteld moeten worden bij de spanning t.g.v. N+My. De verticale lijnen in de grafiek komen overeen met de positie van de K-verbanden.



Figuur 81 – Spanningen t.g.v. dwarse buiging

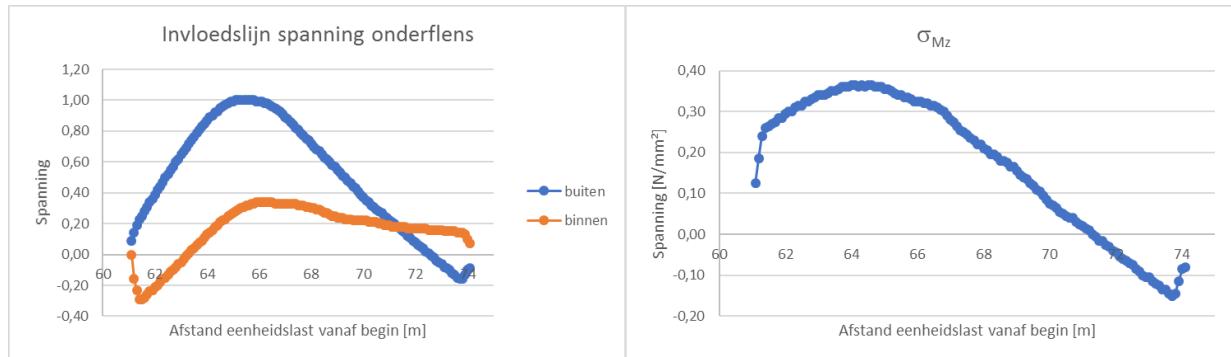
Opgemerkt wordt dat er drie verschillende afmetingen van de onderflens zijn te onderscheiden in het beschouwde stuk. In snede 1 t/m 4 is een plaat van 500x20 mm in de onderflens aanwezig, in snede 5 t/m 7 een plaat van 500x30 mm en in snede 8 t/m 10 een plaat van 500x30 mm + 550x30 mm. Hierdoor zijn de spanningen niet één op één te vergelijken.

wat wordt bedoeld, en (met name) hoe is hiermee dan omgegaan?

De maximale spanning t.g.v. dwarse buiging die opgeteld moet worden bij de spanningen t.g.v. N+My zijn de oranje aangegeven spanningen, aangezien deze optreden als de aslast t.p.v. de beschouwde snede staat. Bij ca. 67 m treedt de maximale spanning op van ca $\sigma_{Mz} = 0,5 \text{ N/mm}^2$. De spanning in deze snede t.g.v. het globale gedrag (N+My) onder een eenheidslast van 2x50 kN is 15 N/mm². De toename van de spanning door dwarse buiging is slechts 3%. Op basis van deze geringe toename is het globale rekenmodel voldoende nauwkeurig gevonden dat er geen correctie op de spanningen toegepast hoeft te worden voor de verificatie van de hoofddraagconstructie op sterkte en vermoeiing. Bovendien valt de iets hogere spanning t.g.v. dwarse buiging weg tegen de overschatting van de spanningen door het verwaarlozen van de langsverstijvers in de doorsnede-eigenschappen in het globale rekenmodel.

Rijstrook 2

Uit metingen door TNO is gebleken dat de spanningen door zijdelingse uitbuiging als gevolg van verkeer op rijstrook 2 procentueel wat groter zijn dan voor rijstrook 1. Daarom is op dezelfde locatie als waar de metingen zijn uitgevoerd (snede 3) ook de spanningswisselingen t.g.v. verkeer op rijstrook 2 bepaald.



Figuur 82 – Spanningen t.g.v. dwarse buiging t.p.v. snede 3

Hieruit volgt een spanning t.g.v. dwarse buiging van ca $\sigma_{Mz} = 5,38 \text{ N/mm}^2$. De invloed van dwarse buiging is dus **begrijp ik niet. Ik verwacht het omgekeerde.** uit langsbuiging $/\text{mm}^2 = 6\%$. Zoals gengesteld aan de spanning door verkeer op rijstrook 1, doordat rotatie van de brug de overhand heeft. **Dit zal vooral spelen in het midden van de overspanningen en wat minder bij de opleggingen.**

Omdat het effect van verkeer op rijstrook 2 voor de verschillende liggers verschillend werkt is hieronder per ligger een beschouwing gemaakt van het effect.

Parallelrijbaan west (zwaarst belaste ligger)

- Invloed dwarse buiging van verkeer op rijstrook 1 is zeer **bijgesteld**
- Invloed dwarse buiging van verkeer **op rijstrook 1 en 2 is tegengesteld (gunstig)**

geldt voor globaal, niet voor lokaal effect. Daar wordt het juist versterkt.

Parallelrijbaan oost (lichtst belaste ligger)

- Invloed dwarse buiging van verkeer op rijstrook 1 is iets minder beperkt als bij westelijke ligger, maar nog steeds klein (6%)
- Invloed dwarse buiging van verkeer op rijstrook 1 en 2 is tegengesteld (gunstig)
- De totale schade wordt voor de oostelijke ligger voor 61% veroorzaakt door een voertuig op rijstrook 1 en 2 samen en 39% door een voertuig op rijstrook 1
- Heel kort door de bocht betekend dat de invloed op het schadegetal van dwarse buiging ca. $61\% + 1,06^3 \cdot 39\% = 107\%$ is.

Uitgaande dat lokale effect i.d.d. verwaarloosbaar is.

Hoofdrijbaan

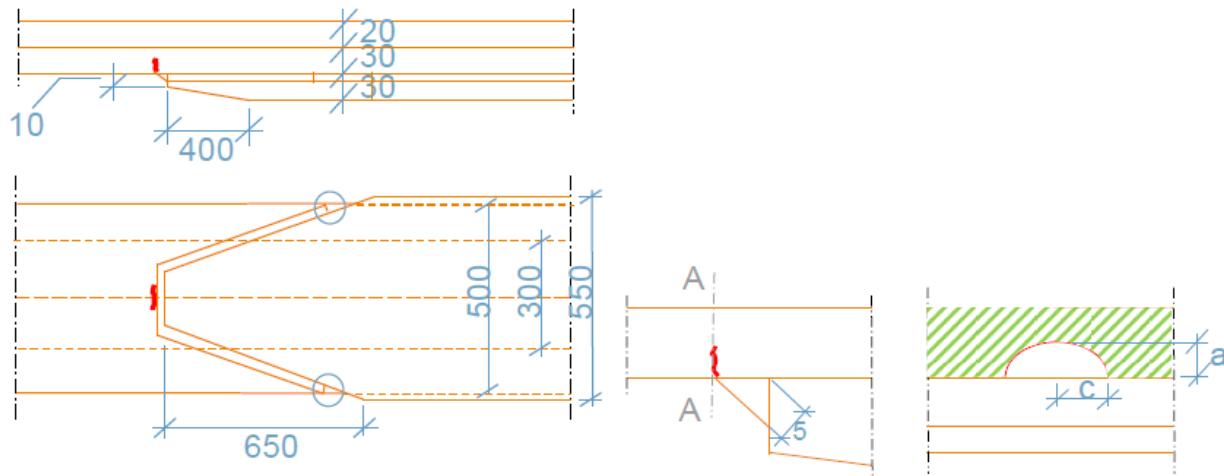
- De hoofdrijbaan heeft door het wisselen van rijrichting een combinatie van bovenstaande, waarmee het effect dus klein blijft

Uit de metingen van TNO blijkt tevens dat de spanningen door langsbuiging ($N+My$) bij verkeer op rijstrook 2 door het model overschat worden. **De spanningen bij verkeer op rijstrook 2 blijken in de metingen tussen de 1,12 tot 1,27 maal lager te zijn als door het lokale model voorspeld. Voor rijstrook 1 blijkt dat de spanningen door langsbuiging redelijk goed overeenkomen. De overschatting van de spanningen in het model bij verkeer op rijstrook 2 compenseren ruimschoots de (geringe) effecten van de dwarse buiging bij verkeer op diezelfde rijstrook.** Er is daarom besloten om de invloed van dwarse buiging niet mee te nemen in de berekening.

Ok.

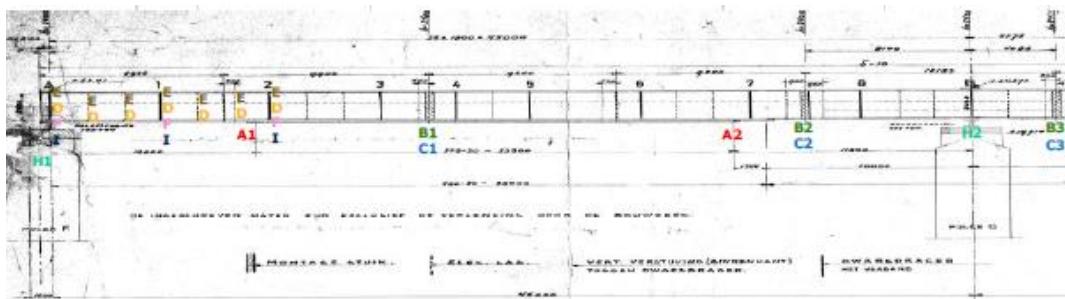
5.3 Type A: Las uiteinde opdikplaat onderflens van hoofdlijger

De onderflens van de hoofdlijger is op verschillende locaties met een opdikplaat versterkt. De opdikplaat is met een hoeklas van 5 mm verbonden met de onderflens. Bij het uiteinde is de opdikplaat taps toelopend met meestal een haaks einde. De meest kritische scheurlocatie is de lassteen aan de doorgaande flens aan de kopse kant van de verbinding (zie Figuur 83).

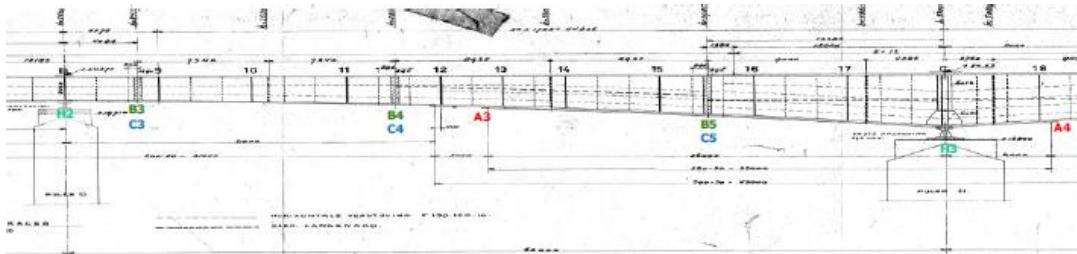


Figuur 83 – Het overzicht van de verbinding met kritische scheurlocatie (niet op schaal) [R11499].

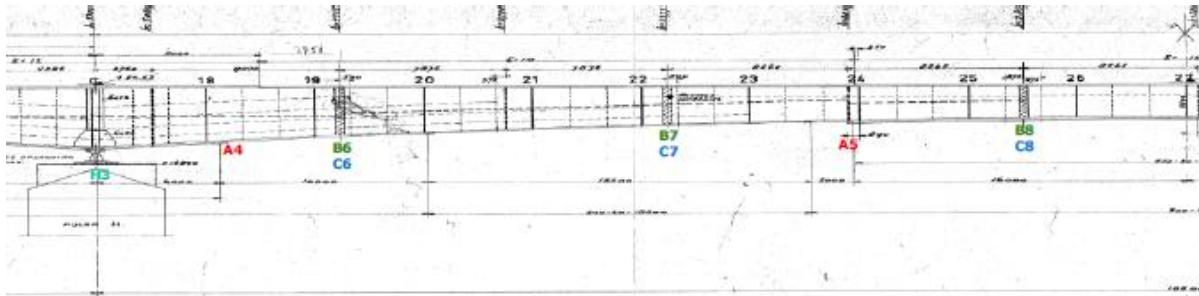
Deze verbinding komt per hoofdlijger op 10 verschillende locaties van de hoofdbrug voor, in totaal dus 40 locaties. Vanwege symmetrie zijn voor elke hoofdlijger locatie A1 t/m A5 getoetst, zie Figuur 84 t/m Figuur 86.



Figuur 84 – Locatie van de verbinding type A – H in het 1^e veld

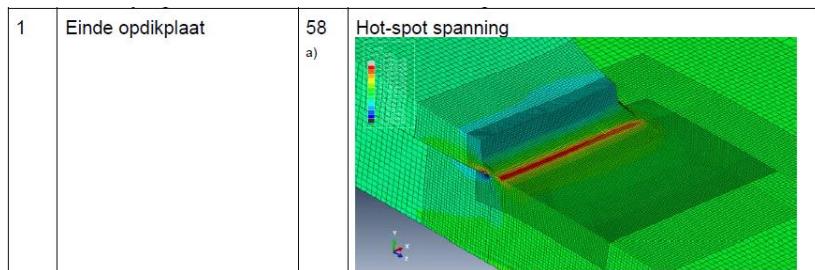


Figuur 85 – Locatie van de verbinding type A – H in het 2^e veld



Figuur 86 – Locatie van de verbinding type A – H in het 3^e veld

De detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van deze verbinding is door TNO met behulp van de 'hot spot spanningsinterpolatie' methode bepaald voor de aanbrug als $\Delta\sigma_c = 58 \text{ N/mm}^2$ waar de knikpunt van de S-N curve bij 10^7 ligt. Conform rapport R11499 mag voor de hoofdbrug uitgegaan worden van dezelfde categorie.



Figuur 87 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding type 1 (aanbrug) en type A (hoofdbrug)

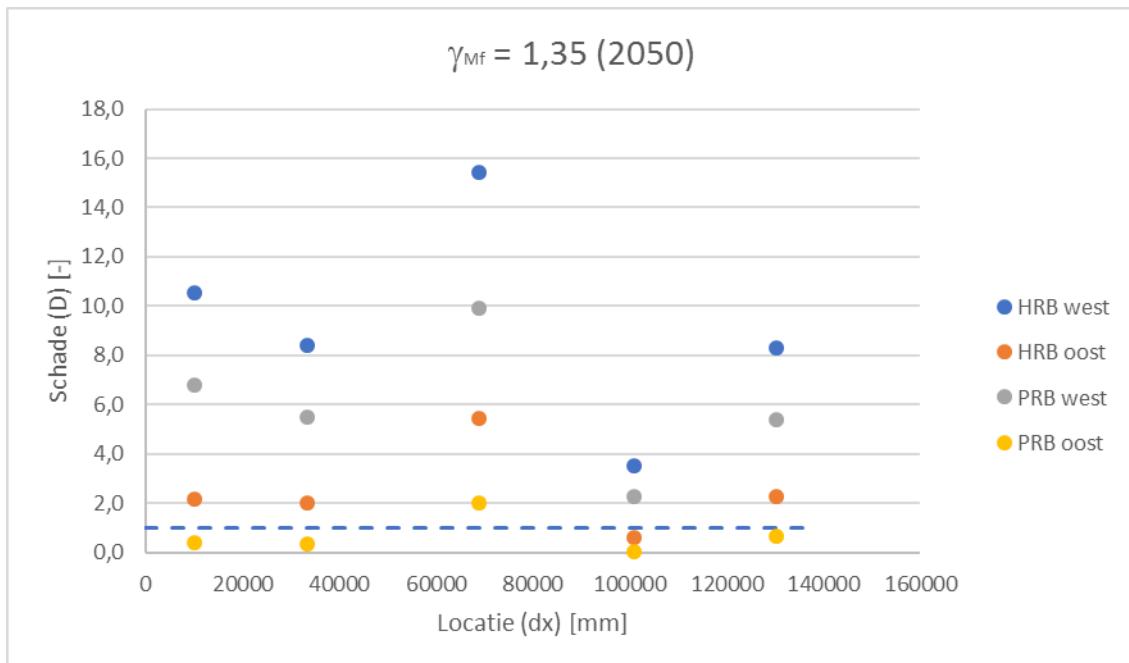
Voor A5 in de westelijke ligger van de hoofdrijbaan (HRB) is een reparatievoorstel door TNO bepaald. Na de versterking heeft dit detail een detailcategorie 75,4. Deze nieuwe detailcategorie is gebaseerd op Hobbacher's IIW recommendations [10] waarin is vermeld dat de detailcategorie met een factor 1,3 toeneemt na burr grinding. Deze berekening is volgens TNO memorandum 0100313038-A/VSS [5] conservatief, gezien het uitbouwen van de las met de helling 1/3 hierbij nog niet in rekening is gebracht. Door het uitvoeren van de reparatie wordt de rekenkundige vermoeiingsschade teruggebracht naar nul.

De berekening wordt voor de 5 locaties (A1 t/m A5) voor 3 verschillende veiligheidsfactoren $\gamma_{MF} = 1.35$, 1.15 en 1.00 uitgevoerd. De toetsresultaten (schadegetallen) zijn in de afzonderlijke hoofdliggers bepaald, namelijk voor de hoofdrijbaan-west (HRB west), de hoofdrijbaan-oost (HRB oost), de parallelrijbaan-west (PRB-west) en de parallelrijbaan-oost (PRB-oost), omdat voor elke hoofdligger geldt dat ze verschillend belast zijn. Hierbij is voor A5 in de HRB west een berekening gemaakt van de situatie van voor (A5) en na versterking (A5 rep).

Tabel 35 geeft de resultaten weer voor $\gamma_{Mf} = 1.35$. De toetsresultaten met de andere veiligheidsfactoren zijn in Bijlage E1 weergegeven. De meeste verbindingen blijken niet te voldoen aan de schade-eis $D < 1,0$ bij $\gamma_{Mf} = 1.35$. Dit geldt ook voor de gerepareerde verbinding. Hiervoor geldt dat deze in 2036 niet meer voldoet aan de schade-eis, overeenkomstig met het in TNO memo [0100313038-A/VSS] vermelde jaar 2036.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
A1	3,1	10,5	1,7	2,2	3,1	6,8	0,2	0,4
A2	2,5	8,4	1,6	2,0	2,6	5,5	0,2	0,3
A3	4,9	15,4	3,2	5,4	4,6	9,9	0,9	2,0
A4	1,0	3,5	0,5	0,6	1,0	2,3	0,0	0,0
A5	2,6	8,3	1,5	2,3	2,5	5,4	0,3	0,7
A5 (rep)		2,1						

Tabel 35 – Schadegetallen van verbinding type A voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)



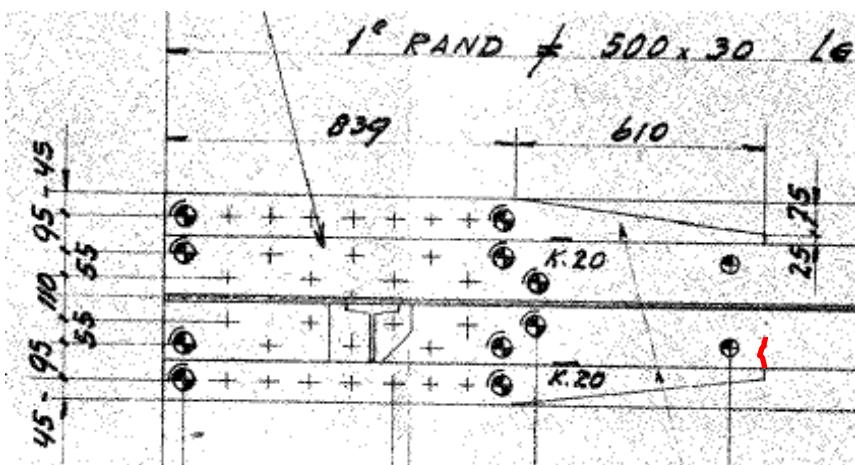
Figuur 88 – Presentatie van schadegetallen voor de eerste helft van de brug voor 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$) (voor reparatie)

5.4 Type B: Flensverbreders ter hoogte van klinklas bij sectiedeling

De hoofdbrug is in een aantal secties opgesplitst. Ter plaatse van deze sectiedelingen is de onderflens verbreed door het aanlassen van een extra plaat (flensverbreders). De flensverbreders hebben verschillende afmetingen en komen in totaal 16 keer voor per hoofdligger.



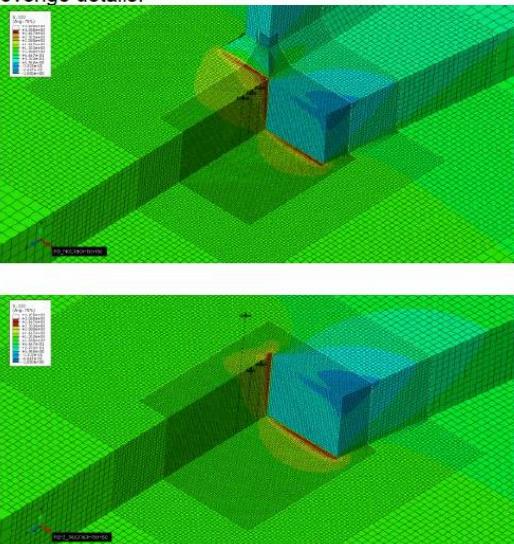
Figuur 89 – Foto van de verbinding [R11499].



Figuur 90 – Overzicht van de verbinding met kritische scheurlocatie

Vanwege symmetrie zijn alleen de eerste 8 details op vermoeiing getoetst (B1 t/m B8). Voor de locaties wordt verwezen naar Figuur 84 t/m Figuur 86.

De detailcategorie is door TNO bepaald met behulp van de 'hot spot spanningsinterpolatie' methode, zie rapport [R11499], en hangt af van het aanwezig zijn van een dwarsverstijver in het invloedsgebied van de lasverbinding aan het einde van de flensverbreder. Voor de details met een dwarsverstijver geldt detailcategorie 40 (B2, B4 en B7). Voor de overige details geldt categorie 46. Het knikpunt van de S-N curve ligt bij 10^7 .

B	Flensverbreder	40-46	Hot-spot spanning a) Detailcategorie 40 geldt in het geval van aanwezigheid van een flensverbreder met dwarsverstijver in het invloedsgebied (geldig voor details B2, B4 en B7). Detailcategorie 46 geldt voor de overige details.
			

Figuur 91 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding type B

NB: In de analyse door TNO is ervan uitgegaan dat er een las aanwezig is tussen de kopse kant van de verbreder en de doorgaande flens. Deze aanname is door Rijkswaterstaat/Infra Inspectie geverifieerd, waardoor de aangehouden categorie door TNO kan worden gehanteerd.

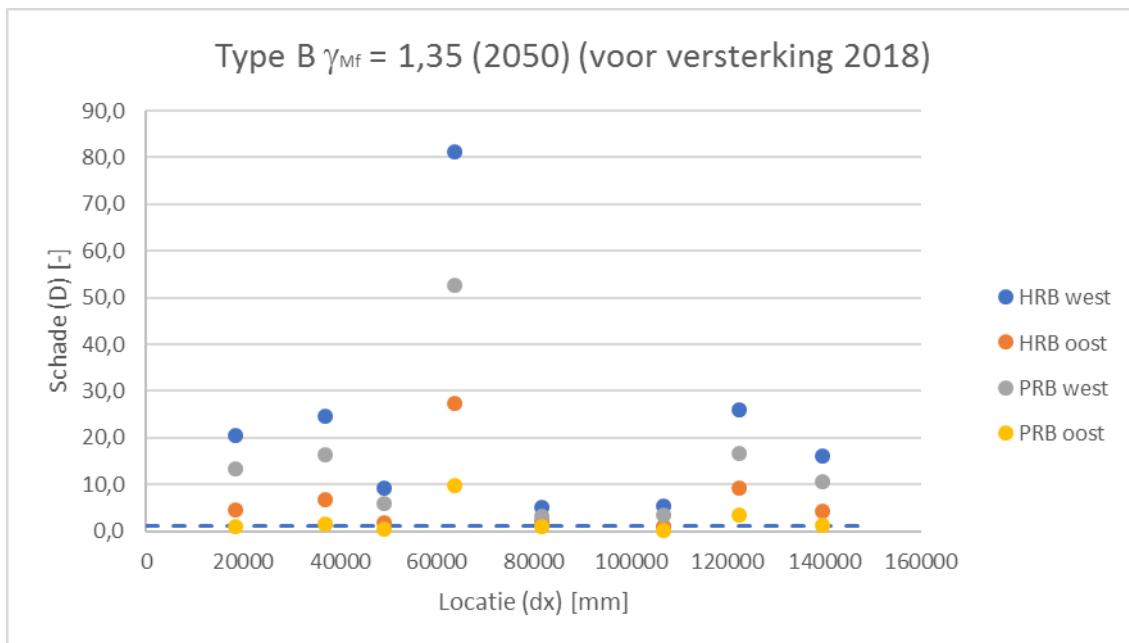
Voor B4 en B7 is voor de westelijke ligger van de hoofdrijbaan een reparatievoorstel door TNO bepaald [0100313038-A/VSS]. Na de versterking heeft dit detail een detailcategorie 100, omdat er een vloeiente overgang wordt gecreëerd. Hierdoor blijft alleen een langslas over, welke conform tabel 8.1 uit de NEN-EN 1993-1-9 als categorie 100 mag worden aangehouden. Door het uitvoeren van de reparatie wordt de rekenkundige vermoeiingsschade teruggebracht naar nul.

De berekening wordt voor de 8 locaties (B1 t/m B8) voor 3 verschillende veiligheidsfactoren $\gamma_{MF} = 1.35$, 1.15 en 1.00 uitgevoerd. Hierbij is voor B4 en B7 van de HRB west een berekening gemaakt van de situatie van voor (B4/B7) en na versterking (B4 rep/B7 rep).

Tabel 35 geeft de resultaten weer voor $\gamma_{Mf} = 1.35$. De toetsresultaten met de andere veiligheidsfactoren zijn in Bijlage E2 weergegeven. De meeste verbindingen blijken niet te voldoen aan de schade-eis $D < 1,0$ bij $\gamma_{Mf} = 1.35$. Dit geldt ook voor de gerepareerde verbinding B4. Deze voldoet eind 2032 niet meer aan de schade-eis. Dit is nagenoeg gelijk aan het in de TNO memo [0100313038-A/VSS] vermelde jaar 2034.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
B1	6,2	20,4	3,5	4,5	6,3	13,4	0,4	0,8
B2	7,7	24,7	5,1	6,6	7,8	16,3	0,6	1,4
B3	2,8	9,1	1,4	1,8	2,9	6,0	0,1	0,3
B4	26,2	81,3	16,9	27,4	25,1	52,6	4,6	9,8
B5	1,6	5,0	1,1	2,1	1,4	3,1	0,4	0,9
B6	1,6	5,3	0,9	1,0	1,6	3,4	0,0	0,1
B7	8,3	25,9	5,6	9,2	7,9	16,6	1,5	3,4
B8	5,0	16,1	3,0	4,3	4,9	10,5	0,5	1,1
B4 (rep)		2,8						
B7 (rep)		0,5						

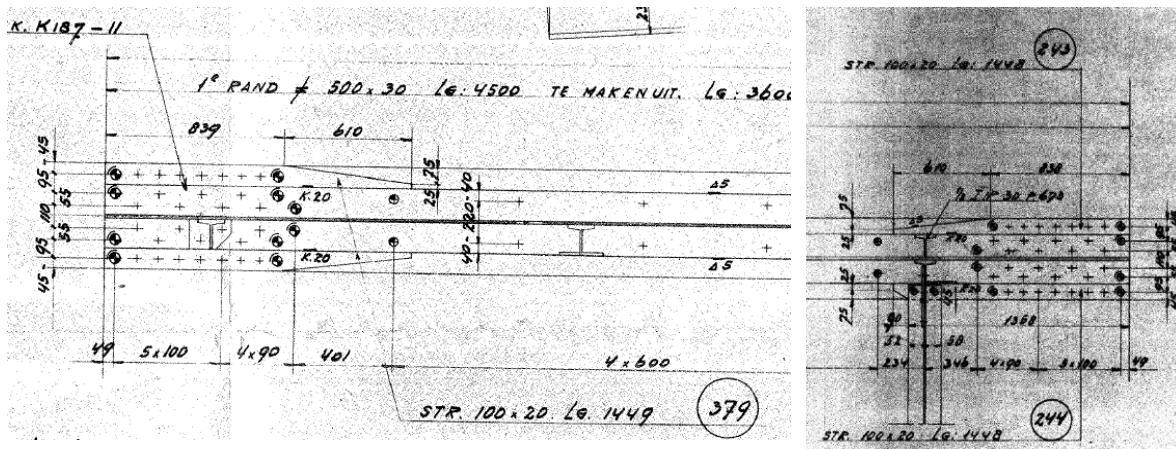
Tabel 36 – Schadegetallen van verbinding type B voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)



Figuur 92 – Presentatie van schadegetallen voor de eerste helft van de brug voor 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$) (voor reparatie)

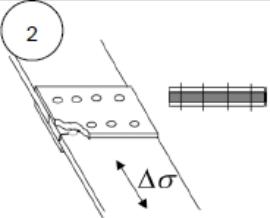
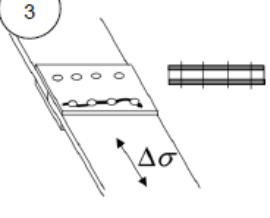
5.5 Type C: Geklonken verbindingen brugsecties

De hoofdbrug is in een aantal secties opgesplitst. Ter plaatse van deze sectiedelingen zijn klinknagelverbindingen in de hoofdligger toegepast. In totaal zijn er 16 sectiedelingen per hoofdligger, vanwege symmetrie zijn C1 tot en met C8 getoetst, zie Figuur 84 t/m Figuur 86.



Figuur 93 – Onderaanzicht onderflens [Tekening A.85383/A.85365/A.85366]

De detailcategorie $\Delta\sigma_c$ voor de vermoeiingsberekening van deze verbinding volgt uit de RBK en bedraagt 80 N/mm^2 . Voor de helling van de eerste tak van SN curve (m_1) is 5 aangehouden conform de RBK. De spanningen zijn bepaald aan de onderzijde van de flens, op basis van de netto doorsnede van de onderflens, maar inclusief de flensverbreding. Hierbij is uitgegaan van een snede met vier gaten in de onderflens. De eigenschappen van de (netto)doorsnede-eigenschappen zijn bepaald met SCIA.

80 $m = 5$		2) Middelste platen	<ul style="list-style-type: none"> Zie noot ^{a)} Spanning in de middelste plaat. Als aan één of meer eisen van detail 1) niet is voldaan, zie noot ^{b)}
80 $m = 5$		3) Stuikplaten	<ul style="list-style-type: none"> Zie noot ^{a)} Spanning in de stuikplaat. De verhouding stuikspanning t.o.v. netto spanning is kleiner dan 2: $\sigma_{stuik}/\sigma_{netto} < 2$. Klinknagels met $f_{ur} \leq 400 \text{ N/mm}^2$, of Klinknagels met $f_{ur} > 400 \text{ N/mm}^2$ waarbij geen corrosiebeschermende coating of menie op de contactoppervlakken is aangebracht, zie noot ^{b)}

Figuur 94 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding type C

De berekening is voor de 8 locaties (C1 t/m C8) voor 3 verschillende veiligheidsfactoren $\gamma_{MF} = 1.35, 1.15$ en 1.00 uitgevoerd. De toetsresultaten (schadegetallen) zijn in de afzonderlijke hoofdliggers bepaald, namelijk voor de hoofdrijbaan-west (HRB west), de hoofdrijbaan-oost (HRB oost), de parallelrijbaan-west (PRB-west) en de parallelrijbaan-oost (PRB-oost).

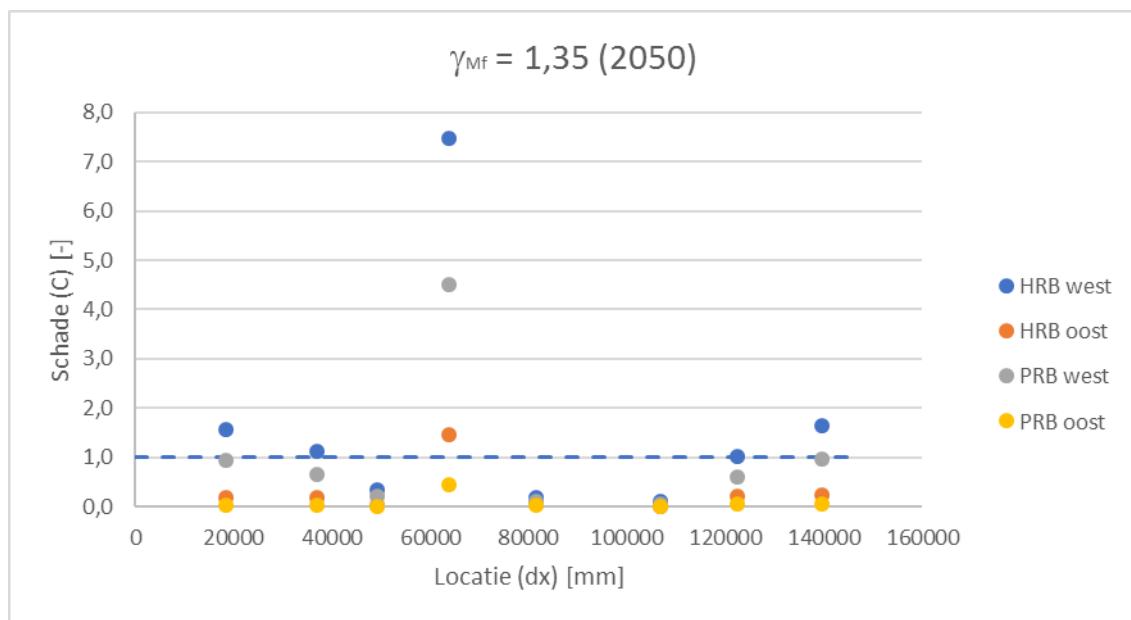
Onderflens

Tabel 37 en Figuur 95 geven de resultaten weer voor $\gamma_{Mf} = 1.35$ voor de klinknagelverbinding in de onderflens. De toetsresultaten met de andere veiligheidsfactoren zijn in Bijlage E3 weergegeven. Circa 40% van de verbindingen blijken niet te voldoen aan de schade-eis $D < 1,0$ bij $\gamma_{Mf} = 1.35$. De meest kritische verbinding bevindt zich bij C4 in de hoofdrijbaan west. De schade eind 2050 bedraagt hier 7,5.

wanneer wordt
D=1 bereikt?

	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
C1	0,4	1,6	0,1	0,2	0,3	0,9	0,0	0,0
C2	0,3	1,1	0,1	0,2	0,2	0,7	0,0	0,0
C3	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
C4	1,9	7,5	0,9	1,5	1,7	4,5	0,1	0,4
C5	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
C6	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
C7	0,2	1,0	0,1	0,2	0,2	0,6	0,0	0,1
C8	0,4	1,6	0,2	0,2	0,4	1,0	0,0	0,1

Tabel 37 – Schadegetallen van verbinding type C (onderflens) voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)



Figuur 95 – Presentatie van schadegetallen (onderflens) voor de eerste helft van de brug voor 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)

Bovenflens

Tabel 38 geven de resultaten weer voor $\gamma_{Mf} = 1.35$ voor de klinknagelverbinding in de bovenflens. De toetsresultaten met de andere veiligheidsfactoren zijn in Bijlage E3 weergegeven. Alle schadegetallen zijn gelijk aan 0,0 bij $\gamma_{Mf} = 1.35$, doordat de spanning in de bovenflens aanzienlijk lager is vergeleken met de onderflens.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
C1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 38 – Schadegetallen van verbinding type C (bovenflens) voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)

Lijf

Voor verbinding C4 en C8 is gekeken naar de schade in de onderste rijen klinknagels in het lijf. Deze sneden hadden de hoogste schadegetallen bij de toetsing van de onderflens. Omdat de spanning afneemt over de hoogte van het lijf, zijn voor verbinding C4 de rijen 1, 3, 5, 6 en 7 getoetst, gezien vanaf de onderflens. Voor C8 is alleen rij 1 getoetst.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
C4 lijf rij 1	1,4	5,5	0,7	1,1	1,3	3,3	0,1	0,3
C4 lijf rij 3	0,8	3,2	0,4	0,6	0,7	2,0	0,1	0,2
C4 lijf rij 5	0,5	1,8	0,2	0,3	0,4	1,1	0,0	0,1
C4 lijf rij 6	0,3	1,3	0,1	0,2	0,3	0,7	0,0	0,1
C4 lijf rij 7	0,2	0,8	0,1	0,1	0,2	0,5	0,0	0,0
C8 lijf rij 1	0,2	1,0	0,1	0,1	0,2	0,6	0,0	0,0

Tabel 39 – Schadegetallen van verbinding type C (lijf) voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)

In het lijf van verbinding C4 voldoet in de westelijke hoofdlijger van de hoofdrijbaan rij 1 t/m 6 van de klinknagels, gezien vanaf onder, niet aan de schade-eis $D < 1,0$ bij $\gamma_{Mf} = 1.35$. Van de westelijke hoofdlijger van de parallelrijbaan voldoet rij 1 t/m 5 niet. De oostelijke liggers voldoen wel over de hele hoogte van het lijf. Ook in verbinding C8 voldoen de klinknagels in het lijf aan de schade-eis.

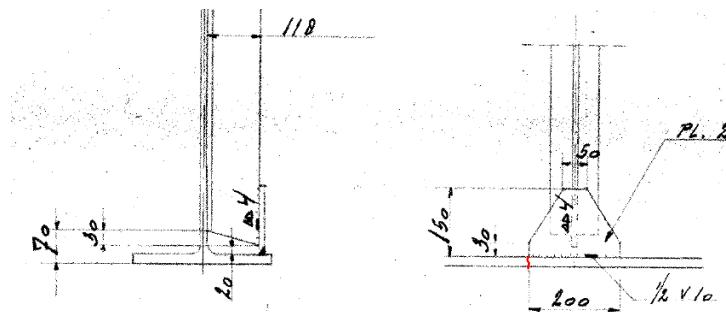
idem

5.6 Type D: Dwarsverstijver binnenzijde – flens hoofdlijker

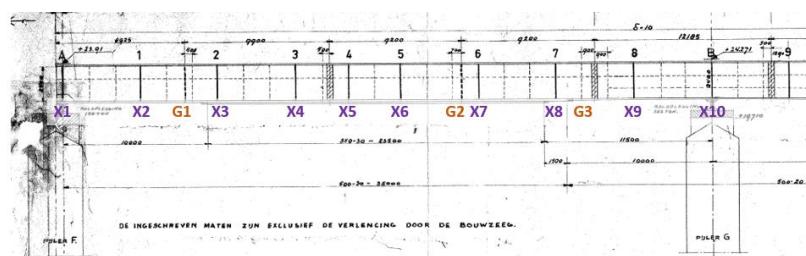
Bij iedere dwarsdrager is een verticale dwarsverstijver op het lijf van de hoofdlijker toegepast. De verstijver is met een $\frac{1}{2}$ V-las van 10 mm verbonden aan de onderflens van de hoofdlijker. De kritische scheurlocatie is de teen van de las aan de flens van de kopse kant van de verbinding, met rood aangegeven in Figuur 96. De keelmaat van de las is aangenomen als 4 mm, maar heeft volgens TNO feitelijk een verwaarloosbare invloed op de spanningsintensiteit.

wat wordt bedoeld,
en ref.?

Per hoofdlijker zijn 167 dwarsverstijvers toegepast. Hiervan zijn de posities ter plaatse van de K-verbanden en portalen van de halve brug getoetst (D1 tot en met D30); zie Figuur 97 tot en met Figuur 99.

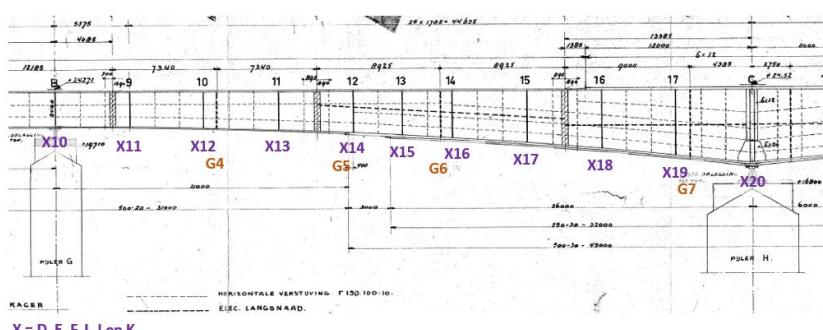


Figuur 96 – Detail verbinding verticale plooiverstijver - flens [A.85317]



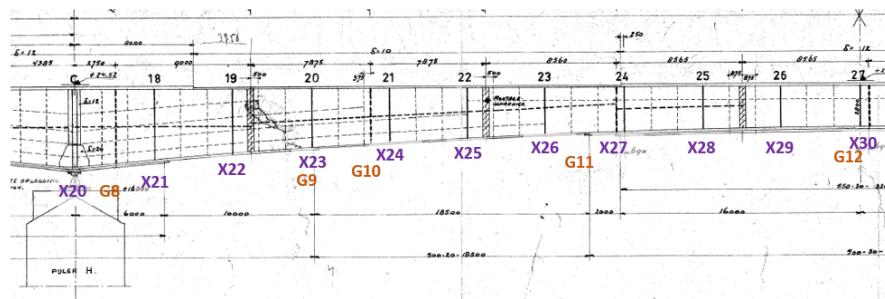
X = D, E, F, I, J en K

Figuur 97 – Locatie van de verbinding type D – G en I - K in het 1^e veld



X = D, E, F, I, J en K

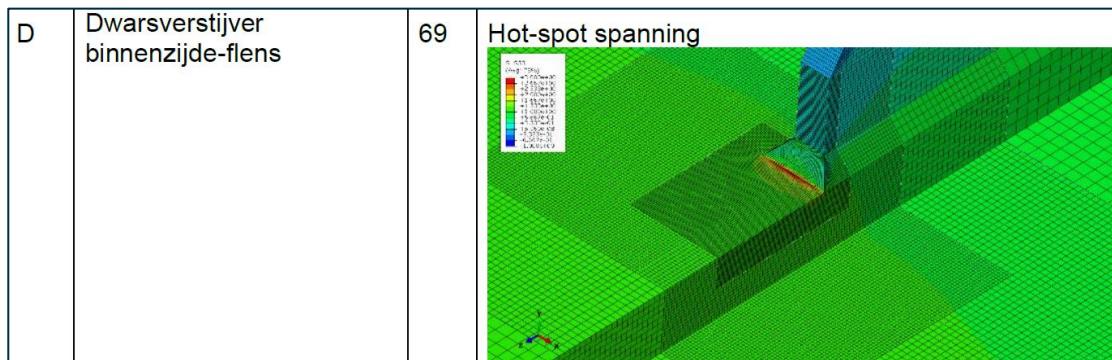
Figuur 98 – Locatie van de verbinding type D – G en I - K in het 2^e veld



X = D, E, F, I, J en K

Figuur 99 – Locatie van de verbinding type D – G en I - K in het 3^e veld

De detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van deze verbinding is door TNO met behulp van de 'hot spot spanningsinterpolatie' methode bepaald als $\Delta\sigma_c = 69 \text{ N/mm}^2$.



Figuur 100 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding type D

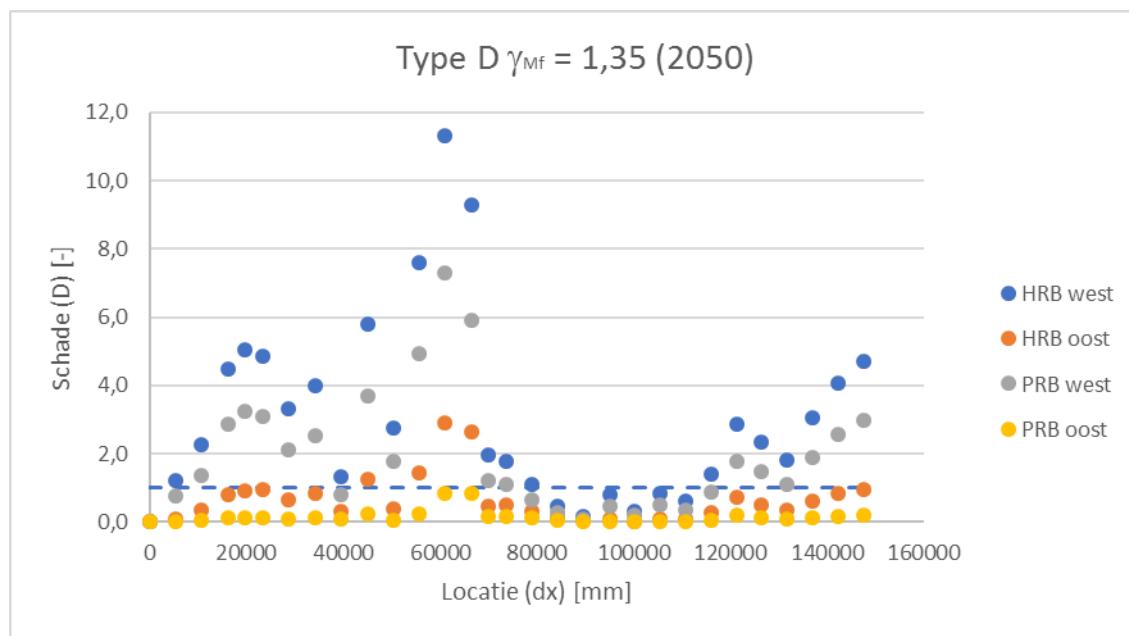
De berekening is voor de 30 locaties (D1 t/m D30) voor 3 verschillende veiligheidsfactoren $\gamma_{MF} = 1.35, 1.15$ en 1.00 uitgevoerd. De toetsresultaten (schadegetallen) zijn in de afzonderlijke hoofdliggers bepaald, namelijk voor de hoofdrijbaan-west (HRB west), de hoofdrijbaan-oost (HRB oost), de parallelrijbaan-west (PRB-west) en de parallelrijbaan-oost (PRB-oost).

Tabel 40en Figuur 101 geven de resultaten weer voor $\gamma_{Mf} = 1.35$. De toetsresultaten met de andere veiligheidsfactoren zijn in Bijlage E4. weergegeven. Circa 40% van de verbindingen blijken niet te voldoen aan de schade-eis $D < 1,0$ bij $\gamma_{Mf} = 1.35$. De meest kritische verbinding bevindt zich bij D13 (midden 2^e veld) in de hoofdrijbaan west. De schade in 2050 bedraagt hier 11,3.

idem

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
D1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
D2	0,3	1,2	0,1	0,1	0,3	0,8	0,0	0,0
D3	0,6	2,3	0,3	0,3	0,5	1,4	0,0	0,0
D4	1,3	4,5	0,7	0,8	1,2	2,9	0,0	0,1
D5	1,5	5,1	0,7	0,9	1,4	3,2	0,0	0,1
D6	1,4	4,9	0,8	1,0	1,4	3,1	0,0	0,1
D7	0,9	3,3	0,5	0,7	0,9	2,1	0,0	0,1
D8	1,1	4,0	0,7	0,9	1,1	2,5	0,0	0,1
D9	0,4	1,3	0,2	0,3	0,3	0,8	0,0	0,1
D10	1,7	5,8	0,9	1,3	1,7	3,7	0,1	0,2
D11	0,8	2,7	0,3	0,4	0,8	1,8	0,0	0,0
D12	2,3	7,6	1,1	1,4	2,3	4,9	0,1	0,3
D13	3,5	11,3	1,9	2,9	3,4	7,3	0,4	0,8
D14	2,8	9,3	1,6	2,6	2,7	5,9	0,4	0,9
D15	0,5	2,0	0,3	0,5	0,5	1,2	0,1	0,1
D16	0,5	1,8	0,3	0,5	0,5	1,1	0,1	0,2
D17	0,3	1,1	0,2	0,3	0,2	0,7	0,0	0,1
D18	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,1
D19	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
D20	0,2	0,8	0,1	0,1	0,2	0,5	0,0	0,0
D21	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
D22	0,2	0,8	0,1	0,1	0,2	0,5	0,0	0,0
D23	0,1	0,6	0,1	0,1	0,1	0,4	0,0	0,0
D24	0,4	1,4	0,2	0,3	0,4	0,9	0,0	0,1
D25	0,8	2,9	0,5	0,7	0,8	1,8	0,1	0,2
D26	0,7	2,3	0,3	0,5	0,6	1,5	0,0	0,1
D27	0,5	1,8	0,2	0,3	0,5	1,1	0,0	0,1
D28	0,9	3,0	0,4	0,6	0,8	1,9	0,0	0,1
D29	1,2	4,1	0,6	0,8	1,1	2,6	0,1	0,2
D30	1,3	4,7	0,7	1,0	1,3	3,0	0,1	0,2

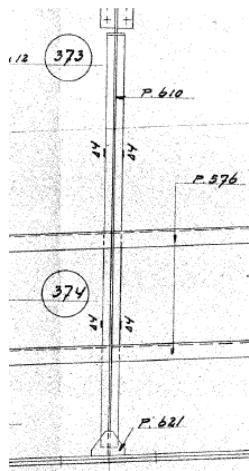
Tabel 40 – Schadegetallen van verbinding type D voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)



Figuur 101 – Presentatie van schadegetallen voor de eerste helft van de brug voor 2050 ($\gamma_{Mf} = 1,35$)

5.7 Type E: Dwarsverstijver binnenzijde – lijf hoofdlijker

Bij iedere dwarsdrager is een verticale dwarsverstijver op het lijf van de hoofdlijker toegepast. De verstijver is met een las van 4 mm verbonden aan het lijf van de hoofdlijker. Per hoofdlijker zijn 167 dwarsverstijvers toegepast. Hiervan zijn de posities ter plaatse van de K-verbanden en portalen van de halve brug getoetst (E1 tot en met E30); zie Figuur 97 tot en met Figuur 99.



Figuur 102 – Detail verbinding verticale plooiverstijver - lijf [A.85362-A.85367/A.85377]

De detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van deze verbinding is door TNO met behulp van de 'hot spot spanningsinterpolatie' methode bepaald als $\Delta\sigma_c = 80 \text{ N/mm}^2$.

E	Dwarsverstijver binnenzijde-lijf	80	Hot-spot spanning
---	-------------------------------------	----	-------------------

Figuur 103 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding type E

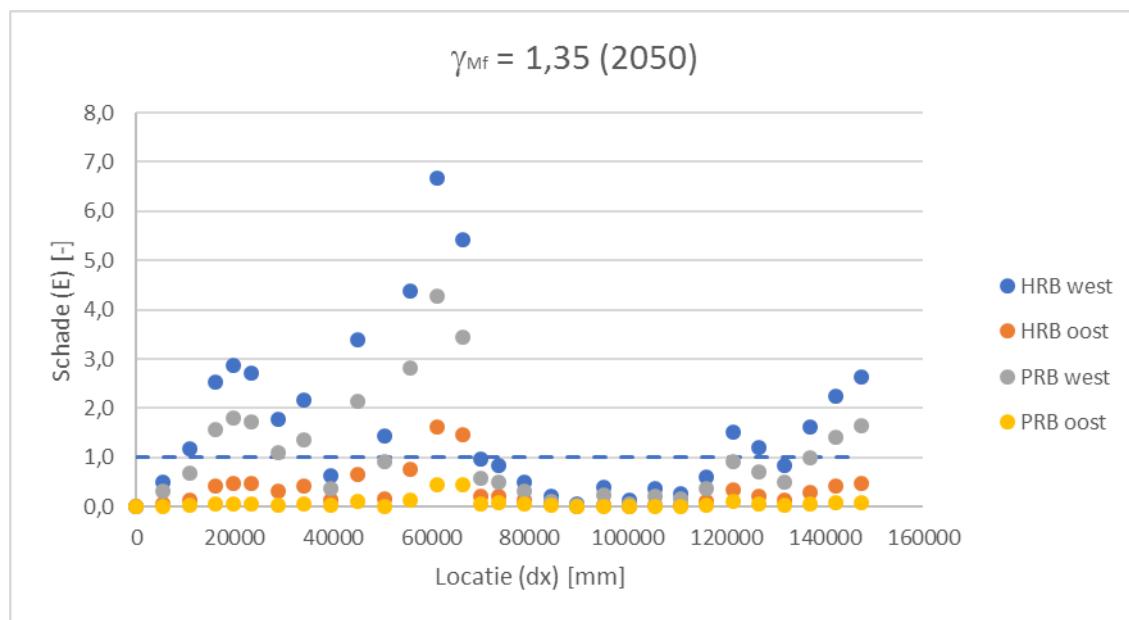
De berekening is voor de 30 locaties (E1 t/m E30) voor 3 verschillende veiligheidsfactoren $\gamma_{Mf} = 1.35, 1.15$ en 1.00 uitgevoerd. De toetsresultaten (schadegetallen) zijn in de afzonderlijke hoofdlijgers bepaald, namelijk voor de hoofdrijbaan-west (HRB west), de hoofdrijbaan-oost (HRB oost), de parallelrijbaan-west (PRB-west) en de parallelrijbaan-oost (PRB-oost).

Tabel 41 en Figuur 104 geven de resultaten weer voor $\gamma_{Mf} = 1.35$. De toetsresultaten met de andere veiligheidsfactoren zijn in Bijlage E5 weergegeven. Circa 25% van de verbindingen blijken niet te voldoen aan de schade-eis D < 1,0 bij $\gamma_{Mf} = 1.35$. De meest kritische verbinding bevindt zich bij E13 (midden veld 2) in de hoofdrijbaan west. De schade in 2050 bedraagt hier 6,7.

idem

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
E1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
E2	0,1	0,5	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0
E3	0,3	1,2	0,1	0,1	0,2	0,7	0,0	0,0
E4	0,7	2,5	0,3	0,4	0,6	1,6	0,0	0,1
E5	0,8	2,9	0,4	0,5	0,8	1,8	0,0	0,1
E6	0,8	2,7	0,4	0,5	0,7	1,7	0,0	0,1
E7	0,5	1,8	0,3	0,3	0,5	1,1	0,0	0,0
E8	0,6	2,2	0,4	0,4	0,6	1,4	0,0	0,1
E9	0,2	0,6	0,1	0,1	0,1	0,4	0,0	0,0
E10	1,0	3,4	0,5	0,7	0,9	2,1	0,0	0,1
E11	0,4	1,4	0,1	0,2	0,4	0,9	0,0	0,0
E12	1,3	4,4	0,6	0,8	1,3	2,8	0,0	0,1
E13	2,0	6,7	1,1	1,6	2,0	4,3	0,2	0,4
E14	1,6	5,4	0,9	1,5	1,5	3,4	0,2	0,4
E15	0,2	1,0	0,1	0,2	0,2	0,6	0,0	0,1
E16	0,2	0,8	0,1	0,2	0,2	0,5	0,0	0,1
E17	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0
E18	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
E19	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
E20	0,1	0,4	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
E21	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
E22	0,1	0,4	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
E23	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
E24	0,1	0,6	0,1	0,1	0,1	0,4	0,0	0,0
E25	0,4	1,5	0,2	0,3	0,4	0,9	0,0	0,1
E26	0,3	1,2	0,1	0,2	0,3	0,7	0,0	0,1
E27	0,2	0,9	0,1	0,1	0,2	0,5	0,0	0,0
E28	0,4	1,6	0,2	0,3	0,4	1,0	0,0	0,1
E29	0,6	2,3	0,3	0,4	0,6	1,4	0,0	0,1
E30	0,7	2,6	0,4	0,5	0,7	1,6	0,0	0,1

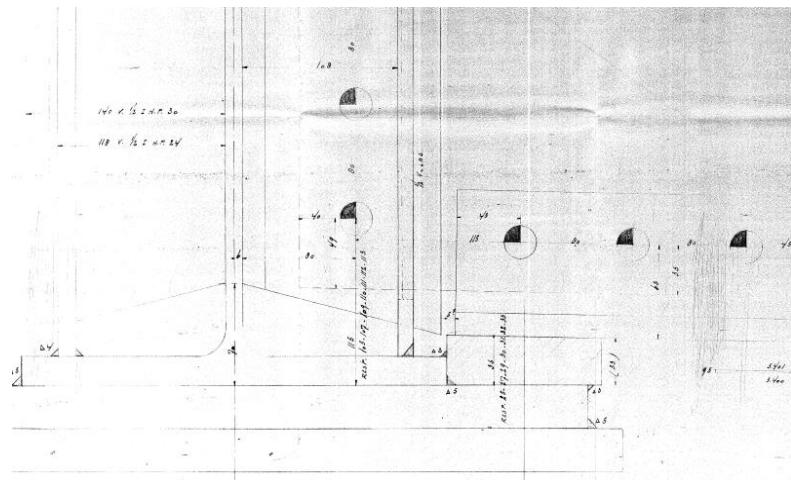
Tabel 41 – Schadegetallen van verbinding type E voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)



Figuur 104 – Presentatie van schadegetallen voor de eerste helft van de brug voor 2050 ($\gamma_{Mf} = 1,35$)

5.8 Type F: Dwarsverstijver buitenzijde – flens hoofdlijker

Bij iedere K-verband is naast een dwarsverstijver aan de binnenzijde ook een verticale dwarsverstijver aan de buitenzijde op het lijf van de hoofdlijker toegepast. De flens van de verstijver aan de buitenzijde is met een las van 4 mm verbonden aan de onderflens van de hoofdlijker. Per hoofdlijker zijn 59 dwarsverstijvers toegepast. Hiervan zijn de posities ter plaatse van de K-verbanden en de portalen van de halve brug getoetst (F1 tot en met F30); zie Figuur 97 tot en met Figuur 99.



Figuur 105 – Detail verbinding verticale plooverstijver - flens [A.85377]

De detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van deze verbinding is door TNO bepaald als $\Delta\sigma_c = 71 \text{ N/mm}^2$; zie [R11499, bijlage D Tabel 8.4, Detail 1].

Detail category	Constructional detail		Description	Requirements
80	80	$L \leq 50 \text{ mm}$	Longitudinal attachments: 1) The detail category varies according to the length of the attachment L.	The thickness of the attachment must be less than its height. If not see Table 8.5, details 5 or 6.
	71	$50 < L \leq 80 \text{ mm}$		
	63	$80 < L \leq 100 \text{ mm}$		
	71	$100 < L \leq 400$		

Figuur 106 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding type F

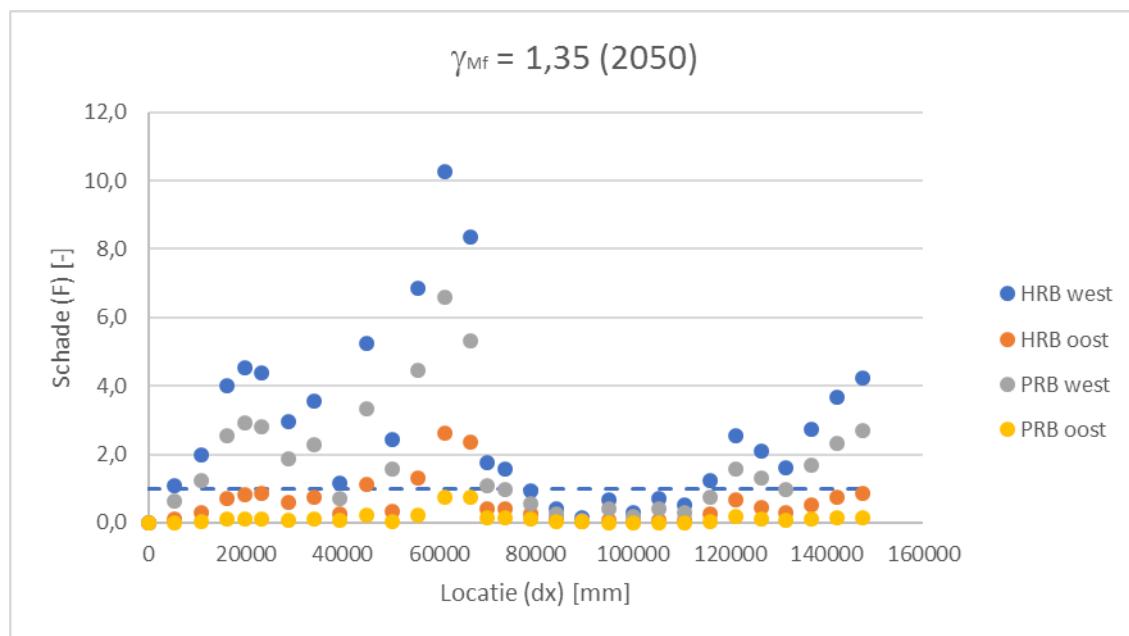
De berekening is voor de 30 locaties (F1 t/m F30) voor 3 verschillende veiligheidsfactoren $\gamma_{Mf} = 1.35, 1.15$ en 1.00 uitgevoerd. De toetsresultaten (schadegetallen) namelijk voor de hoofdrijbaan-west (HRB west), de hoofdrijbaan-oost (PRB-west) en de parallelrijbaan-oost (PRB-oost).

DC gebaseerd op TNO rapport in 2017, op basis van een voorstel dat destijds besproken was in Eurocodeverband. In 2018 is echter een aangepast voorstel besproken in Eurocodeverband o.b.v. aanvullende proeven, waaruit voor $100 < L/\text{mm} < 200$ volgt: DC = 63 met knikpunt bij 10^7 wisselingen (zie bijlage).
Omdat dit detail erg lijkt op die geanalyseerd in figuur 100, en de daar afgeleide DC van 69 nagenoeg overeenkomt met de hier toegepaste DC van 71, stellen we voor om het zo te laten. Ook omdat het document in de bijlage nog steeds een voorstel is, en dus (althoewel met kleine kans) nog aangepast zou kunnen worden.

Figuur 107 en Tabel 42 geven de resultaten weer voor $\gamma_{Mf} = 1.35$. De toetsresultaten met de andere veiligheidsfactoren zijn in Bijlage E6 weergegeven. Circa 40% van de verbindingen blijken niet te voldoen aan de schade-eis $D < 1,0$ bij $\gamma_{Mf} = 1.35$. De meest kritische verbinding bevindt zich bij F13 in de hoofdrijbaan west. De schade in 2050 bedraagt hier 10,3.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
F1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
F2	0,3	1,1	0,1	0,1	0,3	0,6	0,0	0,0
F3	0,5	2,0	0,2	0,3	0,5	1,2	0,0	0,0
F4	1,1	4,0	0,6	0,7	1,1	2,6	0,0	0,1
F5	1,3	4,5	0,7	0,8	1,3	2,9	0,0	0,1
F6	1,2	4,4	0,7	0,8	1,2	2,8	0,0	0,1
F7	0,8	3,0	0,5	0,6	0,8	1,9	0,0	0,1
F8	1,0	3,6	0,6	0,8	1,0	2,3	0,0	0,1
F9	0,3	1,2	0,2	0,3	0,3	0,7	0,0	0,1
F10	1,5	5,3	0,8	1,1	1,5	3,3	0,1	0,2
F11	0,7	2,4	0,3	0,3	0,7	1,6	0,0	0,0
F12	2,0	6,8	1,0	1,3	2,0	4,4	0,1	0,2
F13	3,1	10,3	1,7	2,6	3,0	6,6	0,3	0,8
F14	2,5	8,4	1,5	2,4	2,4	5,3	0,3	0,8
F15	0,5	1,8	0,2	0,4	0,4	1,1	0,0	0,1
F16	0,4	1,6	0,2	0,4	0,4	1,0	0,1	0,1
F17	0,2	0,9	0,1	0,3	0,2	0,6	0,0	0,1
F18	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0
F19	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
F20	0,2	0,7	0,1	0,1	0,1	0,4	0,0	0,0
F21	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
F22	0,2	0,7	0,1	0,1	0,1	0,4	0,0	0,0
F23	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0
F24	0,3	1,2	0,2	0,2	0,3	0,7	0,0	0,0
F25	0,7	2,6	0,4	0,7	0,7	1,6	0,1	0,2
F26	0,6	2,1	0,3	0,4	0,5	1,3	0,0	0,1
F27	0,4	1,6	0,2	0,3	0,4	1,0	0,0	0,1
F28	0,8	2,7	0,4	0,5	0,7	1,7	0,0	0,1
F29	1,0	3,7	0,5	0,7	1,0	2,3	0,1	0,2
F30	1,2	4,2	0,6	0,9	1,2	2,7	0,1	0,2

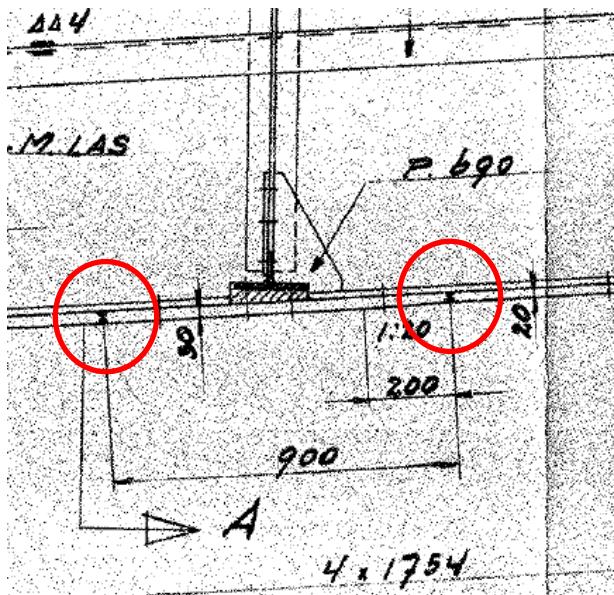
Tabel 42 – Schadegetallen van verbinding type F voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)



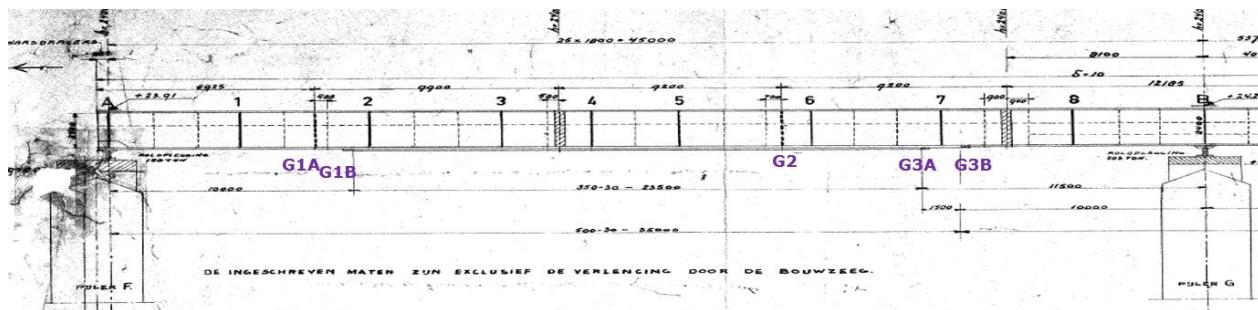
Figuur 107 – Presentatie van schadegetallen voor de eerste helft van de brug voor 2050 ($\gamma_{Mf} = 1,35$)

5.9 Type G: x-naad onderflens hoofdlijker

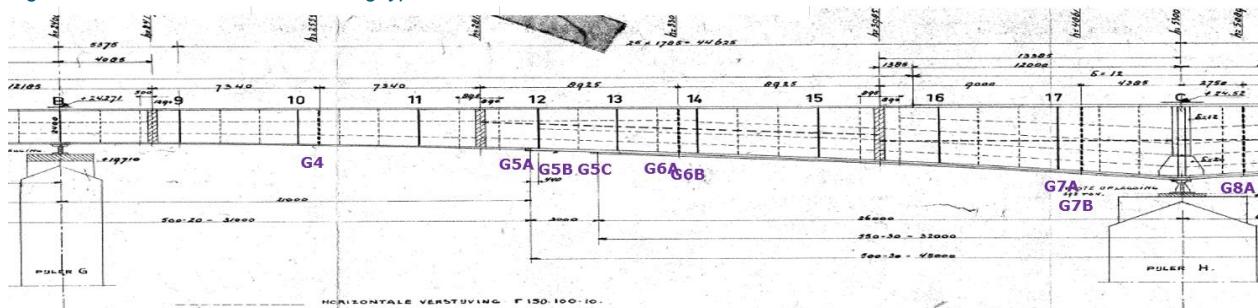
De onderflens van de hoofdlijker is voorzien van opdikplaten. Daar waar deze platen doorlopen zijn ze met een x-naad aan elkaar gelast. In totaal zijn er per hoofdlijker 46 x-naden in de onderflens aanwezig, zie Figuur 109 t/m Figuur 111. Omdat de locatie van een aantal details nagenoeg samenvallt, zijn een aantal locaties gegroepeerd. Vanwege symmetrie zijn alleen G1 t/m G12 getoetst.



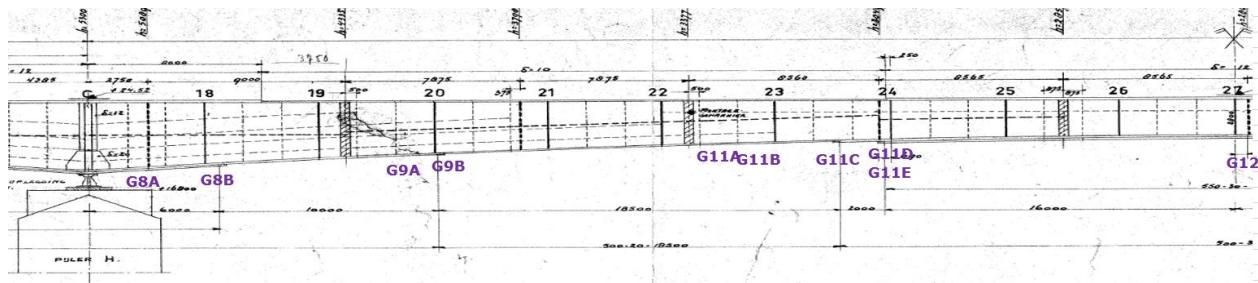
Figuur 108 – Detail lasverbinding onderflens [Bron: A.85366]



Figuur 109 – Locatie van de verbinding type G in het 1^e veld

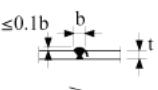


Figuur 110 – Locatie van de verbinding type G in het 2^e veld



Figuur 111 – Locatie van de verbinding type G in het 3^e veld

De detailcategorie $\Delta\sigma_c$ voor de vermoeiingsberekening van deze verbinding volgt uit de NEN-EN 1993-1-9 tabel 8.3 Detail 5 en bedraagt 90 N/mm². Voor verbinding G1, G2, G6, G7, G8 en G12 is een factor $k_s = (25 / 30)^{0,2} = 0,96$ in rekening gebracht. Voor de andere verbindingen is een factor $k_s = 1,0$ toegepast. Is de dikte van de opdikplaat kleiner dan 25mm waardoor de factor k_s gelijk is aan 1,0.

<p>90</p> <p>Invloed van de afmetingen voor $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0,2}$</p>	<p>$\leq 0.1b$</p>  <p>(5)</p>  <p>(6)</p>	<p>$\leq 1/4$</p>  <p>(7)</p> 	<p>Is steeksproefgewijs gecontroleerd dat de geometrie van de las i.d.d. voldoet aan de r.v.w. behorend bij DC=90?</p>	<p>schting in allede leidige ngen. schting in h ede of de 4. De oergang moet en behoren machinaal kerfvrif te zijn bewerkt.</p>	<p>- De hoogte van de overdikte van de las mag niet groter zijn dan 10 % van de lasbreedte, met een vloeiente overgang naar de plaatoppervlakken. - Lasuitloopstukken zijn gebruikt en zijn achteraf verwijderd; de plaatranden zijn vervolgens geslepen in de spanningsrichting. - Gelast aan beide zijden; gecontroleerd door NDO.</p> <p>Details 5 en 7: Lassen uitgevoerd onder de hand.</p>
---	--	--	--	---	--

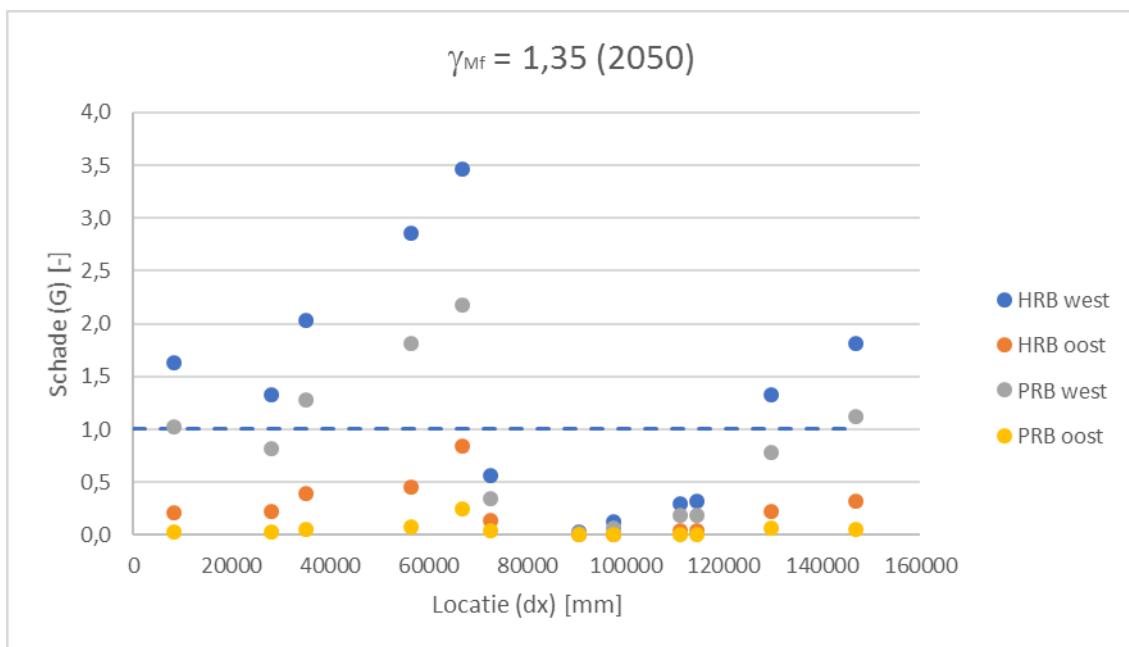
Figuur 112 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding type G

De berekening is voor de 12 locaties (G1 t/m G12) voor 3 verschillende veiligheidsfactoren $\gamma_{Mf} = 1.35, 1.15$ en 1.00 uitgevoerd. De toetsresultaten (schadegetallen) zijn in de afzonderlijke hoofdliggers bepaald, namelijk voor de hoofdrijbaan-west (HRB west), de hoofdrijbaan-oost (HRB oost), de parallelrijbaan-west (PRB-west) en de parallelrijbaan-oost (PRB-oost).

Tabel 43 en Figuur 113 geven de resultaten weer voor $\gamma_{Mf} = 1,35$. De toetsresultaten met de andere veiligheidsfactoren zijn in Bijlage E7 weergegeven. Circa 25% van de verbindingen blijken niet te voldoen aan de schade-eis $D < 1,0$ bij $\gamma_{Mf} = 1,35$. De meest kritische verbinding bevindt zich bij G5 in de hoofdrijbaan west. De schade in 2050 bedraagt hier 3,5.

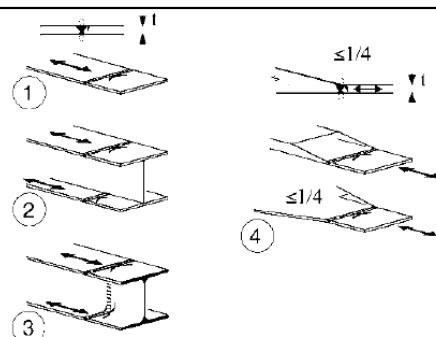
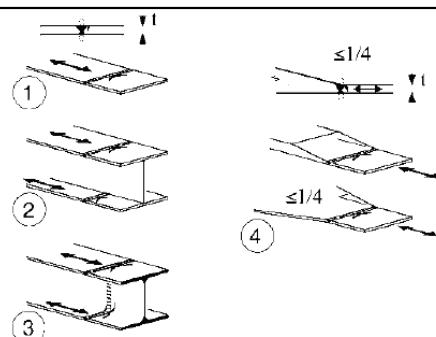
$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
G1	0,4	1,6	0,2	0,2	0,4	1,0	0,0	0,0
G2	0,4	1,3	0,2	0,2	0,3	0,8	0,0	0,0
G3	0,6	2,0	0,3	0,4	0,5	1,3	0,0	0,0
G4	0,8	2,9	0,4	0,5	0,8	1,8	0,0	0,1
G5	1,0	3,5	0,5	0,8	0,9	2,2	0,1	0,2
G6	0,1	0,6	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0
G7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G8	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
G9	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
G10	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
G11	0,4	1,3	0,1	0,2	0,3	0,8	0,0	0,1
G12	0,5	1,8	0,2	0,3	0,5	1,1	0,0	0,1

Tabel 43 – Schadegetallen van verbinding type G voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1,35$) (DC = 90)



Figuur 113 – Presentatie van schadegetallen voor de eerste helft van de brug voor 2050 ($\gamma_{Mf} = 1,35$)

Voor de niet-bereikbare zijdes van de x-lassen die tussen de platen zitten geldt dat deze in het verleden zijn vlakgeslepen. Hiervoor kan een hogere detailcategorie aangehouden worden, namelijk detailcategorie 112, conform detail 1 van tabel 8.3.

Detail-categorie	Constructiedetail		Beschrijving	Eisen
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 strips . 2) Stuiklassen in flenzen en lijnen van plaatliggers, uitgevoerd voor het samenstellen. 3) Stompe lassen van volledige doorsneden van gewalste profielen zonder uitsparingen. 4) Stuiklassen in dwarsrichting in platen of strips, die zijn afgeschuin over de breedte of de dikte, met een helling $\leq 1/4$.	<ul style="list-style-type: none"> - Alle lassen zijn vlakgeslepen tot het plaatoppervlak evenwijdig aan de richting van de pijl. - Lasuitloopstukken zijn gebruikt en zijn achteraf verwijderd; de plaatranden zijn vervolgens geslepen in de spanningsrichting. - Gelast aan beide zijden; gecontroleerd door NDO. Detail 3). <p>Is uitsluitend van toepassing op stuiken van gewalste profielen, die zijn afgesneden en gelast.</p>

Figuur 114 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding type G (vlakgeslepen zijde)

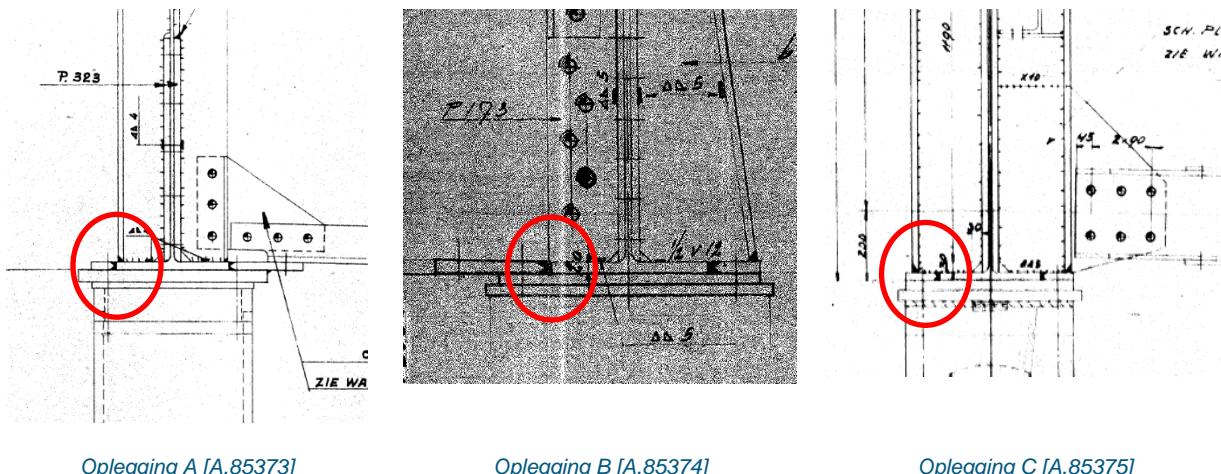
Het maken van onderscheid tussen de vlakgeslepen las en de niet-vlekgeslepen las biedt mogelijk voordelen bij het bepalen van de versterkingen, omdat de vlakgeslepen zijde lastiger/niet te bereiken is. De schadegetallen zijn in onderstaande tabel weergegeven voor $\gamma_{Mf} = 1,35$. Hierbij is rekening gehouden met de dikte van de plaat, zoals beschreven onder Figuur 107.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
G1	0,1	0,5	0,0	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0
G2	0,1	0,4	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0
G3	0,2	0,7	0,1	0,1	0,1	0,4	0,0	0,0
G4	0,3	1,1	0,1	0,1	0,2	0,6	0,0	0,0
G5	0,4	1,4	0,2	0,3	0,3	0,8	0,0	0,1
G6	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
G7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G9	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G10	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G11	0,1	0,4	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0
G12	0,1	0,6	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0

Tabel 44 – Schadegetallen van verbinding type G voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1,35$) (DC = 112)

5.10 Type H: Flensverbreding ter hoogte van opleggingen

Ter plaatse van de opleggingen is de onderflens van de hoofdligger voorzien van een flensverbreding. Deze verbreding komt in totaal 6 keer per hoofdligger voor. Vanwege symmetrie zijn alleen H1 t/m H3 getoetst. zie Figuur 84 t/m Figuur 86.



Figuur 115 – Detail flensverbreders opleggingen

De detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van deze verbinding is door TNO met behulp van de 'hot spot spanningsinterpolatie' methode bepaald als $\Delta\sigma_c = 46 \text{ N/mm}^2$; zie TNO rapport [R11499 tabel 5.3], overeenkomstig type B.

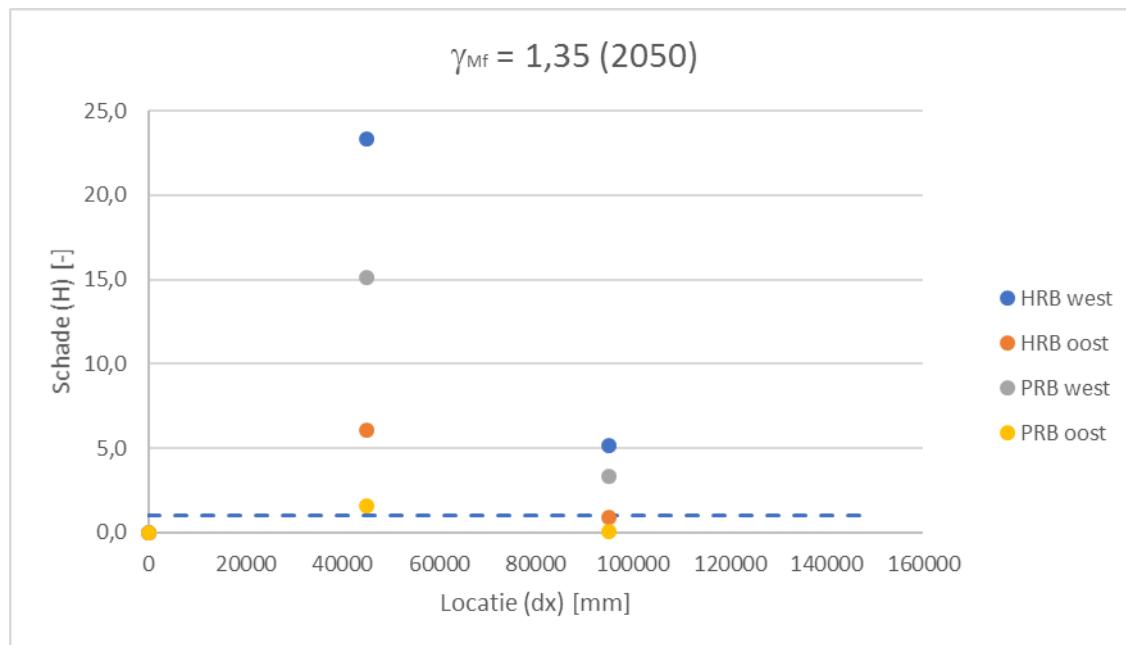
De berekening is voor de 3 locaties (H1 t/m H3) voor 3 verschillende veiligheidsfactoren $\gamma_{Mf} = 1.35, 1.15$ en 1.00 uitgevoerd. De toetsresultaten (schadegetallen) zijn in de afzonderlijke hoofdliggers bepaald, namelijk voor de hoofdrijbaan-west (HRB west), de hoofdrijbaan-oost (HRB oost), de parallelrijbaan-west (PRB-west) en de parallelrijbaan-oost (PRB-oost).

Tabel 45 en Figuur 107 geven de resultaten weer voor $\gamma_{Mf} = 1.35$. De toetsresultaten met de andere veiligheidsfactoren zijn in Bijlage E8 weergegeven. De meeste verbindingen ter plaatse van de tussensteunpunten blijken niet te voldoen aan de schade-eis $D < 1,0$ bij $\gamma_{Mf} = 1,35$. De meest kritische verbinding bevindt zich bij H2 in de hoofdrijbaan west. De schade in 2050 bedraagt hier 23,3.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
H1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
H2	7,2	23,3	4,4	6,1	7,1	15,1	0,7	1,5
H3	1,5	5,2	0,8	0,9	1,5	3,4	0,0	0,1

Tabel 45 – Schadegetallen van verbinding type H voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)

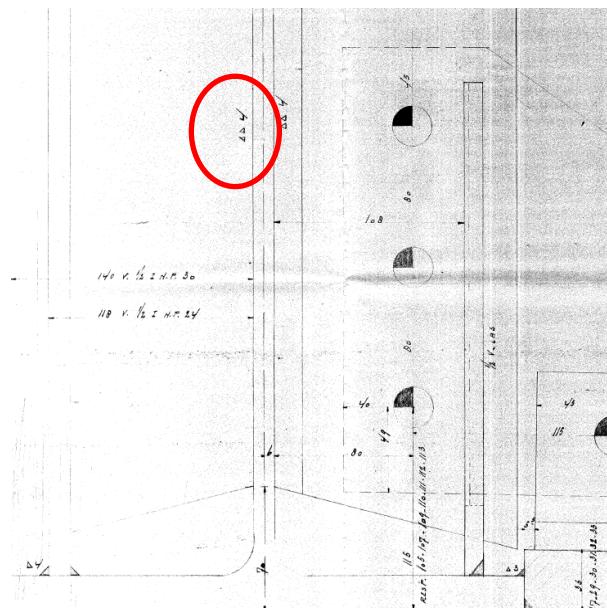
vergelijking TNO-
rapport?



Figuur 116 – Presentatie van schadegetallen voor de eerste helft van de brug voor 2050 ($\gamma_{Mf} = 1,35$)

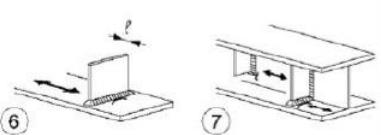
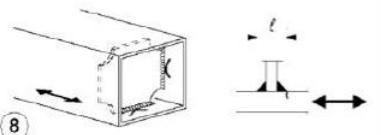
5.11 Type I: Dwarsverstijver buitenzijde – lijf hoofdlijker

Bij ieder K-verband is aan de buitenzijde een verticale dwarsverstijver op het lijf van de hoofdlijker toegepast. Het lijf van deze verticale verstijver is met een las van 4 mm aan het lijf van de hoofdlijker gelast. Per hoofdlijker zijn 59 dwarsverstijvers toegepast. Hiervan zijn vanwege symmetrie de posities over de eerste helft van de brug getoetst (I1 tot en met I30); zie Figuur 97 tot en met Figuur 99.



Figuur 117 – Detail las tussen lijf verstijver en lijf hoofdlijker [A.85377]

De detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van deze verbinding is door TNO bepaald als $\Delta\sigma_c = 80 \text{ N/mm}^2$; zie [R11499, bijlage D Tabel 8.4, Detail 7].

Detail category	Constructional detail		Description	Requirements
80 $L \leq 80 \text{ mm}$	$l \leq 50\text{mm}$		<u>Transverse attachments:</u> 6) Welded to plate. 7) Vertical stiffeners welded to a beam or plate girder. 8) Diaphragm of box girders welded to the flange or the web. May not be possible for small hollow sections. The values are also valid for ring stiffeners.	<u>Details 6) and 7):</u> Ends of welds to be carefully ground to remove any undercut that may be present. 7) $\Delta\sigma$ to be calculated using principal stresses if the stiffener terminates in the web, see left side.
56 $80 \leq L \leq 200 \text{ mm}$	$50 < l \leq 80\text{mm}$			

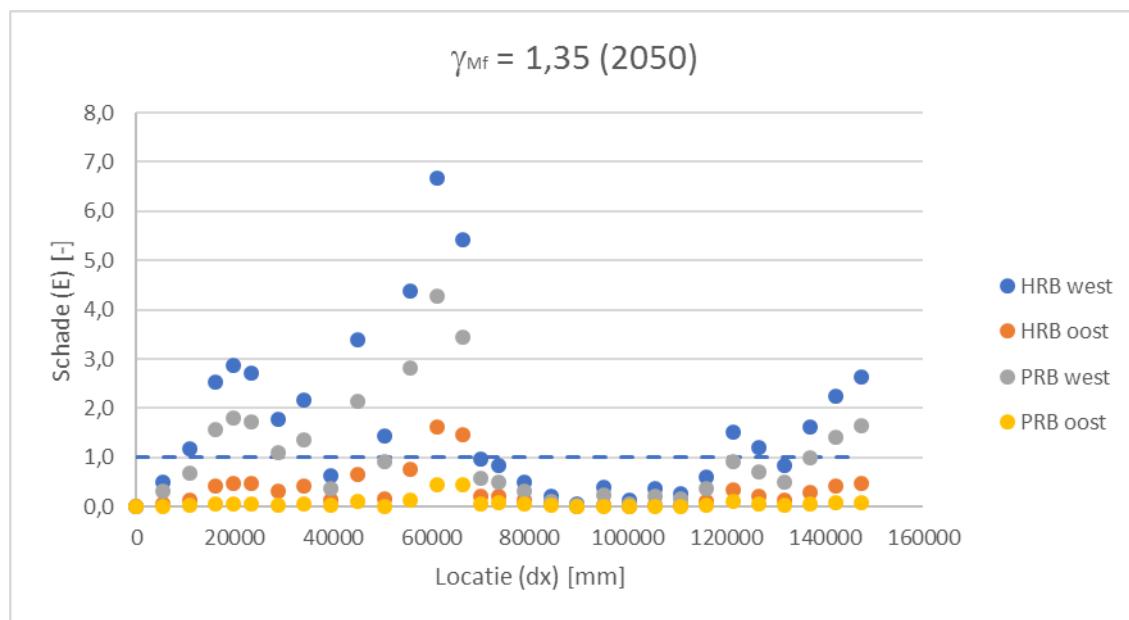
Figuur 118 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding type I

De locaties en de detailcategorie van type I is gelijk aan type E. Daarom wordt voor de vermoeiingsberekening verwezen naar H5.7. Voor de volledigheid zijn de resultaten hieruit overgenomen.

Tabel 46 en Figuur 119 geven de resultaten weer voor $\gamma_{Mf} = 1.35$. De toetsresultaten met de andere veiligheidsfactoren zijn in Bijlage E9 weergegeven. Circa 40% van de verbindingen blijken niet te voldoen aan de schade-eis $D < 1,0$ bij $\gamma_{Mf} = 1.35$. De meest kritische verbinding bevindt zich bij I13 in de hoofdrijbaan west. De schade in 2050 bedraagt hier 6,7.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
I1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
I2	0,1	0,5	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0
I3	0,3	1,2	0,1	0,1	0,2	0,7	0,0	0,0
I4	0,7	2,5	0,3	0,4	0,6	1,6	0,0	0,1
I5	0,8	2,9	0,4	0,5	0,8	1,8	0,0	0,1
I6	0,8	2,7	0,4	0,5	0,7	1,7	0,0	0,1
I7	0,5	1,8	0,3	0,3	0,5	1,1	0,0	0,0
I8	0,6	2,2	0,4	0,4	0,6	1,4	0,0	0,1
I9	0,2	0,6	0,1	0,1	0,1	0,4	0,0	0,0
I10	1,0	3,4	0,5	0,7	0,9	2,1	0,0	0,1
I11	0,4	1,4	0,1	0,2	0,4	0,9	0,0	0,0
I12	1,3	4,4	0,6	0,8	1,3	2,8	0,0	0,1
I13	2,0	6,7	1,1	1,6	2,0	4,3	0,2	0,4
I14	1,6	5,4	0,9	1,5	1,5	3,4	0,2	0,4
I15	0,2	1,0	0,1	0,2	0,2	0,6	0,0	0,1
I16	0,2	0,8	0,1	0,2	0,2	0,5	0,0	0,1
I17	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0
I18	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
I19	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
I20	0,1	0,4	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
I21	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
I22	0,1	0,4	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
I23	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
I24	0,1	0,6	0,1	0,1	0,1	0,4	0,0	0,0
I25	0,4	1,5	0,2	0,3	0,4	0,9	0,0	0,1
I26	0,3	1,2	0,1	0,2	0,3	0,7	0,0	0,1
I27	0,2	0,9	0,1	0,1	0,2	0,5	0,0	0,0
I28	0,4	1,6	0,2	0,3	0,4	1,0	0,0	0,1
I29	0,6	2,3	0,3	0,4	0,6	1,4	0,0	0,1
I30	0,7	2,6	0,4	0,5	0,7	1,6	0,0	0,1

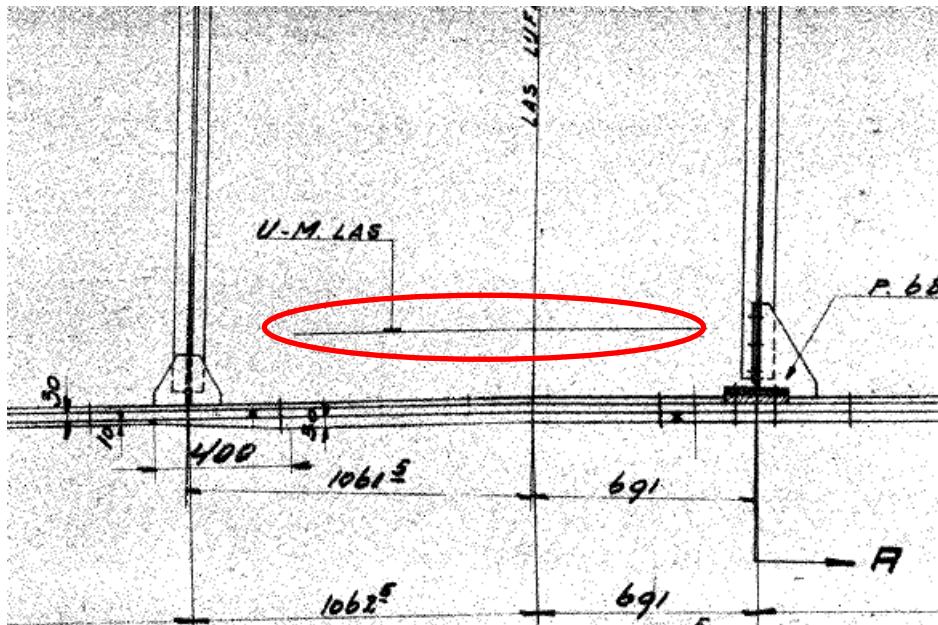
Tabel 46 – Schadegetallen van verbinding type I voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)



Figuur 119 – Presentatie van schadegetallen voor de eerste helft van de brug voor 2050 ($\gamma_{Mf} = 1,35$)

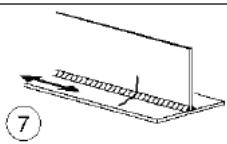
5.12 Type J: Langslas tussen lijf profiel en lijf plaat

In de hoofdlijger zit over de gehele lengte een langslas tussen het halve DIN30 profiel en de lijfplaat. Deze verbinding is uitgevoerd met een x-las. De las is op 30 locaties over de lengte van de halve brug getoetst, ter plaatse van elk K-verband; zie Figuur 97 tot en met Figuur 99. In eerste instantie is de berekening uitgevoerd voor de (maatgevende) las aan de onderzijde.



Figuur 120 – Detail las tussen $\frac{1}{2}$ DIN30 profiel en lijf [A.85367]

De detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van deze verbinding is aangehouden als $\Delta\sigma_c = 100 \text{ N/mm}^2$ conform NEN-EN 1993-1-9 Tabel 8.2 Detail 7. Voor de spanningsberekening is rekening gehouden met de spanning ter hoogte van de las, en dus niet in de onderflens.

100		7) Herstelde automatisch of volledig gemaaniseerd of handmatig uitgevoerde hoeklassen of stompe lassen voor categorieën 1) tot 6).	7) Verbetering door slijpen door een specialist om alle visuele sporen te verwijderen en een degelijke controle kan leiden tot terugkeer naar de oorspronkelijke categorie.
-----	---	--	---

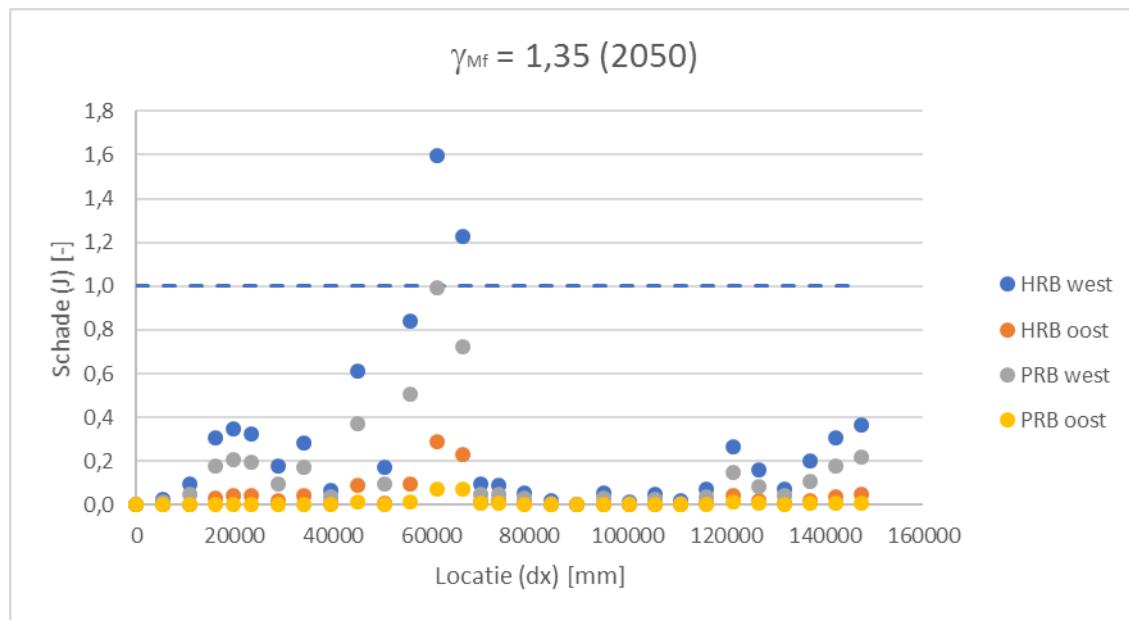
Figuur 121 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding type J (hoofdbrug).

Met een handberekening is ook gekeken of in deze las hoge schuifspanning optreden. Bij een tandemstelsel LM1 (600 kN op rijstrook 1, 400 kN op rijstrook 2) blijkt de schuifspanning orde grootte 10 N/mm² te zijn, waarmee een toetsing op vermoeiing door schuifspanning in de las niet nodig is.

Tabel 47 en Figuur 122 geven de resultaten weer voor $\gamma_{Mf} = 1.35$. De toetsresultaten met de andere veiligheidsfactoren zijn in Bijlage E10 weergegeven. Op een tweetal locaties voldoet de lasverbinding niet, in het midden van het tweede veld. De maximale schade in 2050 bedraagt 1,6.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
J1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
J2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
J3	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
J4	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
J5	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
J6	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
J7	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
J8	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
J9	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
J10	0,2	0,6	0,1	0,1	0,1	0,4	0,0	0,0
J11	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
J12	0,2	0,8	0,1	0,1	0,2	0,5	0,0	0,0
J13	0,4	1,6	0,2	0,3	0,4	1,0	0,0	0,1
J14	0,3	1,2	0,1	0,2	0,3	0,7	0,0	0,1
J15	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
J16	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
J17	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
J18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
J19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
J20	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
J21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
J22	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
J23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
J24	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
J25	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
J26	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
J27	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
J28	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
J29	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
J30	0,1	0,4	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0

Tabel 47 – Schadegetallen van verbinding type J voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)



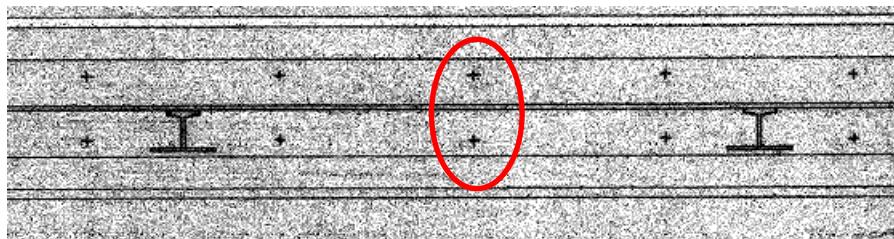
Figuur 122 – Presentatie van schadegetallen voor de eerste helft van de brug voor 2050 ($\gamma_{Mf} = 1,35$)

Een vergelijkbare lasverbinding bevindt zich ook ter plaatse van de bovenzijde van het lijf en soms ook tussen delen van de lijfplaat. Gezien de (aanzienlijk) lagere spanning op deze hoogte in de doorsnede zullen deze ruim voldoen.

Geconcludeerd wordt dat alleen de lasverbinding aan de onderzijde in het midden van veld 2 over een korte lengte niet voldoet bij $\gamma_{Mf} = 1,35$.

5.13 Type K: Klinkverbinding tussen flensen in het flenspakket

De onderflens van de hoofdlijger bestaat uit een verschillend aantal platen. Deze zijn naast de lasverbinding ook met elkaar verbonden met klinknagels over de gehele lengte van de brug. Deze verbinding is op 30 locaties over de lengte van de halve brug getoetst, ter plaatse van elk K-verband; zie Figuur 97 tot en met Figuur 99.



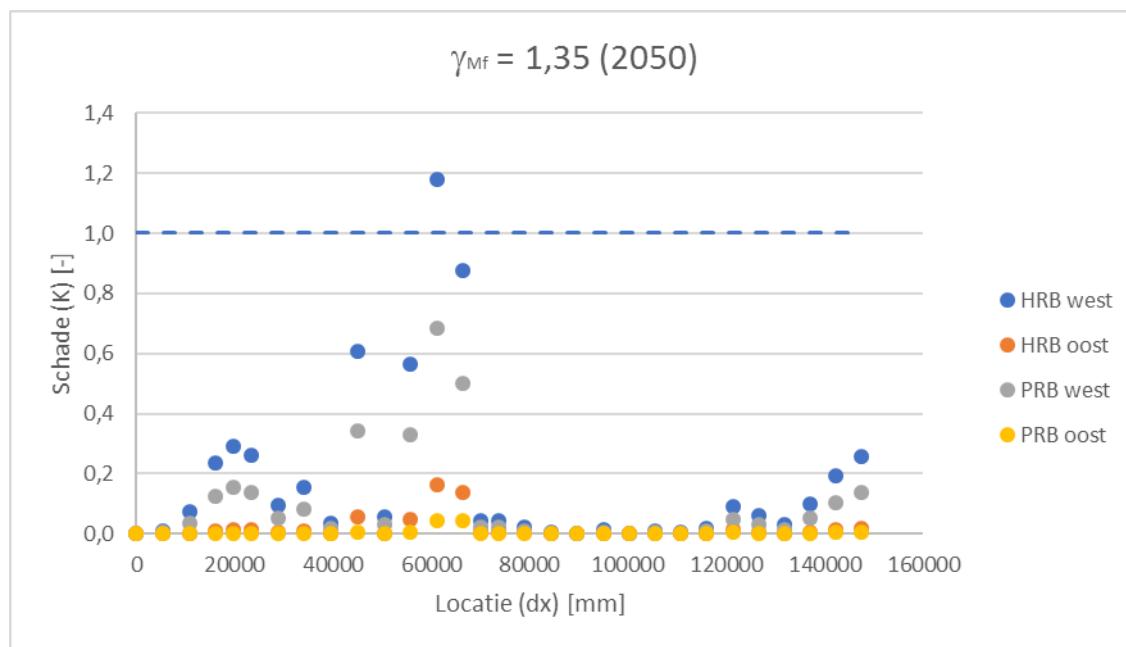
Figuur 123 – Klinknagelverbinding tussen flensen in flenspakket onderflens [A.85367]

De detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van deze verbinding is door TNO bepaald in het rapport "Vermoeiing IJsselbrug Rheden - niet krachtsopnemende klinkverbindingen" paragraaf 4.2 en mag worden aangehouden als $\Delta\sigma_c = 101 \text{ N/mm}^2$, met $m_1 = 4,45$, $m_2 = 6,45$ en het knikpunt van de S-N curve bij $2 \cdot 10^6$.

Figuur 124 en Tabel 48 geven de resultaten weer voor $\gamma_{Mf} = 1.35$. De toetsresultaten met de andere veiligheidsfactoren zijn in Bijlage E11 weergegeven. Alleen in het midden van veld 2 voldoen de klinknagels niet aan de schade-eis. De maximale schade in 2050 bedraagt 1,2 (midden 2^e veld).

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
K1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K3	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K4	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
K5	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
K6	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
K7	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
K8	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
K9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K10	0,1	0,6	0,0	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0
K11	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K12	0,1	0,6	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0
K13	0,3	1,2	0,1	0,2	0,2	0,7	0,0	0,0
K14	0,2	0,9	0,1	0,1	0,2	0,5	0,0	0,0
K15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K24	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K25	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K26	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K28	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
K29	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
K30	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0

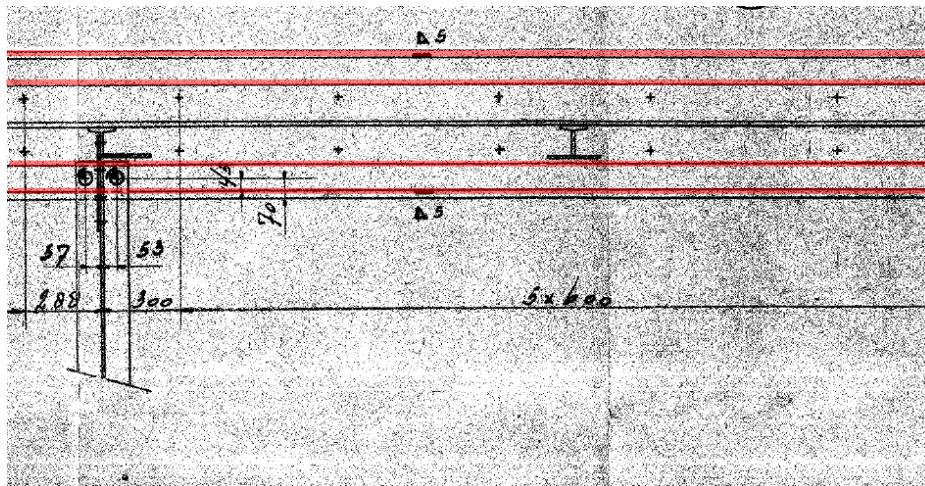
Tabel 48 – Schadegetallen van verbinding type K voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)



Figuur 124 – Presentatie van schadegetallen voor de eerste helft van de brug voor 2050 ($\gamma_{Mf} = 1,35$)

5.14 Type N: Langslas tussen opdikplaat en onderflens

De onderflens van de hoofdlijger is op verschillende locaties met een opdikplaat versterkt. De opdikplaat is met een hoeklas van 5 mm verbonden met de onderflens van het $\frac{1}{2}$ DIN profiel. Ook is de 2^e opdikplaat met een hoeklast van 5 mm verbonden met de 1^e opdikplaat. De las is op 30 locaties over de lengte van de halve brug getoetst, ter plaatse van elk K-verband; zie Figuur 97 tot en met Figuur 99.



Figuur 125 – Detail las tussen opdikplaten en onderflens [A.85364]

De detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van deze verbinding is aangehouden als $\Delta\sigma_c = 100 \text{ N/mm}^2$ conform NEN-EN 1993-1-9 Tabel 8.2 Detail 7.

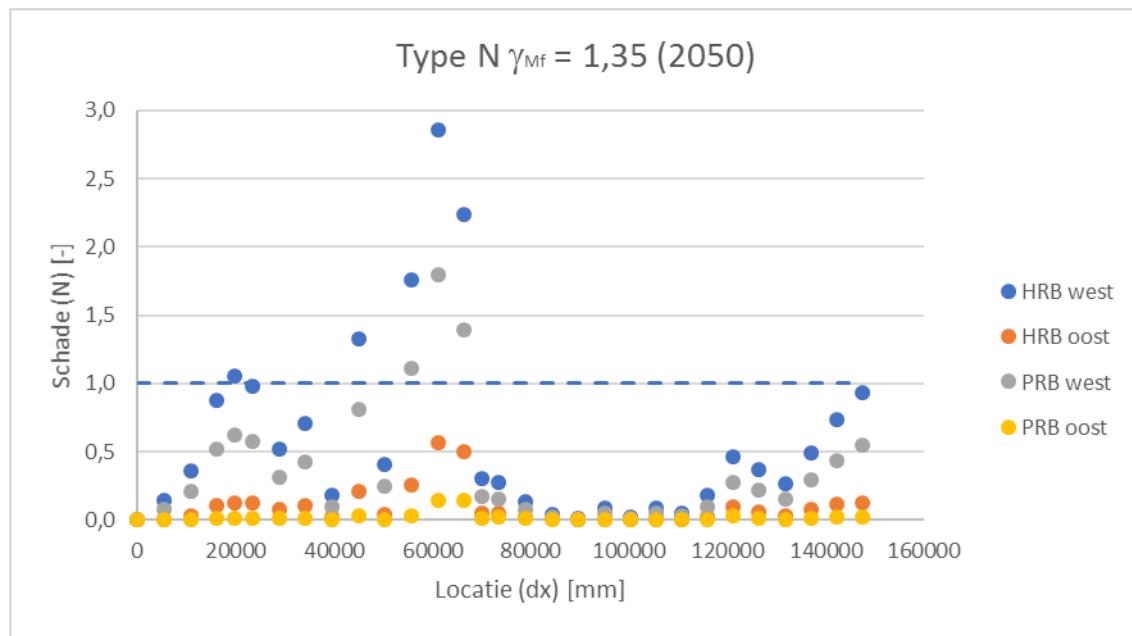
100		7) Hersteld automatisch of volledig gemaaniseerd of handmatig uitgevoerde hoeklassen of stompe lassen voor categorieën 1) tot 6).	7) Verbetering door slijpen door een specialist om alle visuele sporen te verwijderen en een degelijke controle kan leiden tot terugkeer naar de oorspronkelijke categorie.
-----	--	---	---

Figuur 126 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding type N (hoofdbrug).

Tabel 49 en Figuur 126 geven de resultaten weer voor $\gamma_{Mf} = 1.35$. De toetsresultaten met de andere veiligheidsfactoren zijn in Bijlage E13 weergegeven. Op een beperkt aantal locaties voldoet de lasverbinding niet, met name in het midden van het tweede veld. De maximale schade in 2050 bedraagt 2,9 (midden 2^e veld).

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
N1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
N2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
N3	0,1	0,4	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
N4	0,2	0,9	0,1	0,1	0,2	0,5	0,0	0,0
N5	0,3	1,1	0,1	0,1	0,2	0,6	0,0	0,0
N6	0,2	1,0	0,1	0,1	0,2	0,6	0,0	0,0
N7	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0
N8	0,2	0,7	0,1	0,1	0,2	0,4	0,0	0,0
N9	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
N10	0,3	1,3	0,2	0,2	0,3	0,8	0,0	0,0
N11	0,1	0,4	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
N12	0,5	1,8	0,2	0,3	0,5	1,1	0,0	0,0
N13	0,8	2,9	0,4	0,6	0,8	1,8	0,1	0,1
N14	0,6	2,2	0,3	0,5	0,6	1,4	0,1	0,1
N15	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
N16	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
N17	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
N18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
N19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
N20	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
N21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
N22	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
N23	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
N24	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
N25	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0
N26	0,1	0,4	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0
N27	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
N28	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0
N29	0,2	0,7	0,1	0,1	0,2	0,4	0,0	0,0
N30	0,2	0,9	0,1	0,1	0,2	0,6	0,0	0,0

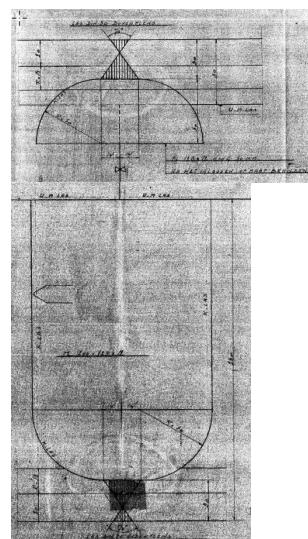
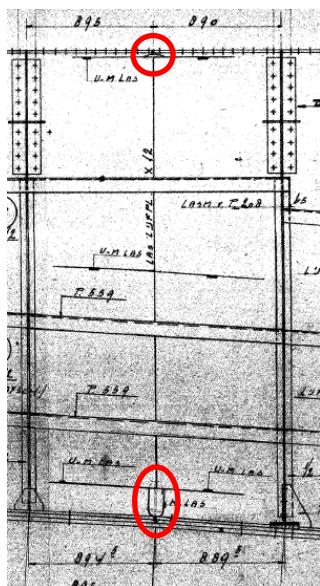
Tabel 49 – Schadegetallen van verbinding type N voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)



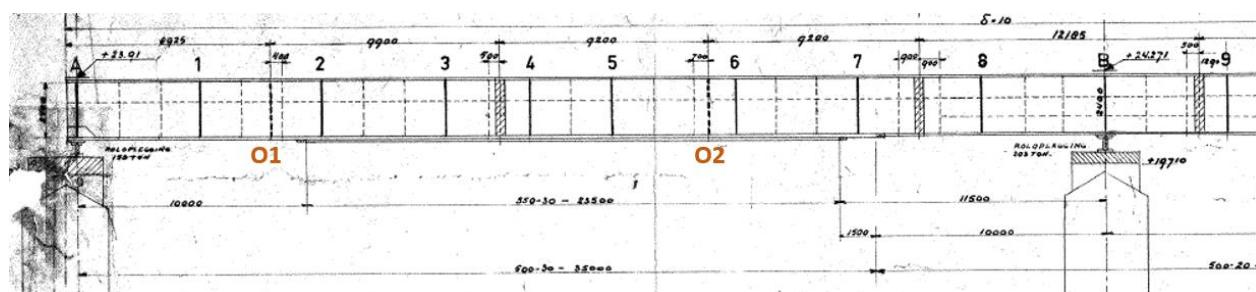
Figuur 127 – Presentatie van schadegetallen voor de eerste helft van de brug voor 2050 ($\gamma_{Mf} = 1,35$)

5.15 Type O: X-naad ½ DIN profielen

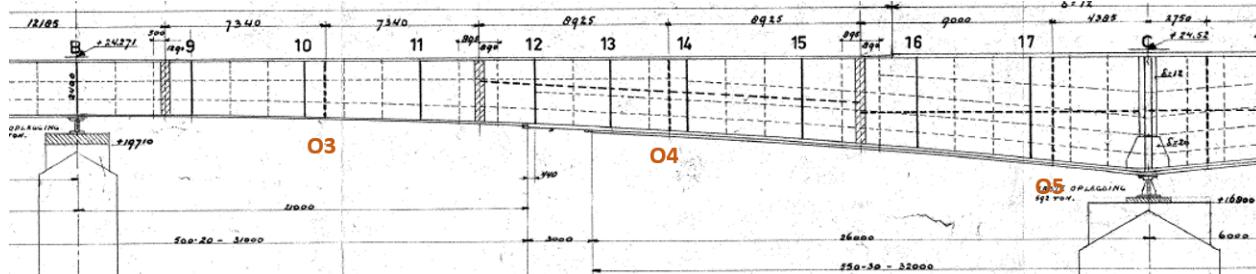
In de hoofdlijn is op een aantal locaties een las in hoogterichting aanwezig. De las is zowel in de lijfplaat als in de ½ DIN profielen van de boven- en onderflens aangebracht. In deze paragraaf is de lasverbinding in het ½ DIN profiel getoetst, de lasverbinding van de lijfplaat is in paragraaf 5.16 getoetst. In totaal zijn er per hoofdlijn 17 las-naden aanwezig, zie Figuur 130 t/m Figuur 132. Vanwege symmetrie zijn alleen O1 t/m O9 getoetst. De lasnaad in de ½ DIN profielen is uitgevoerd als een x-naad in de onderflens. Deze kan volledig worden doorgelast omdat er een U-vormige sparing in het lijf aanwezig was, die vervolgens is dichtgelast met een k-las.



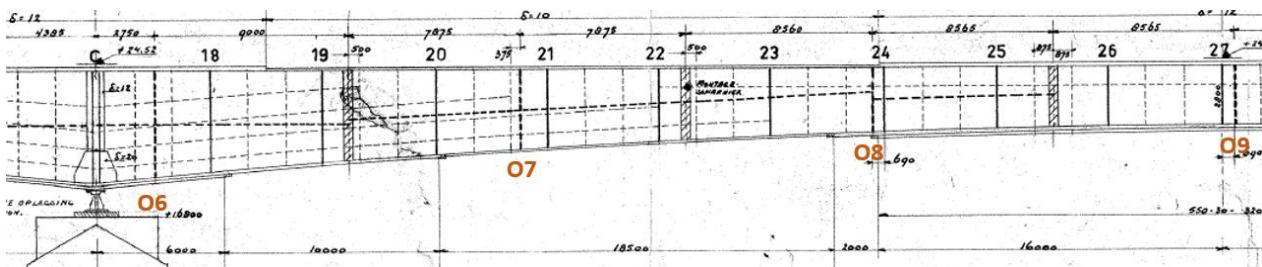
Figuur 128 – Lasverbinding ½ DIN profielen [Bron: A.85365] Figuur 129 – Detail lasverbinding ½ DIN profielen [Bron: A.85365]



Figuur 130 – Locatie van de verbinding type O in het 1^e veld

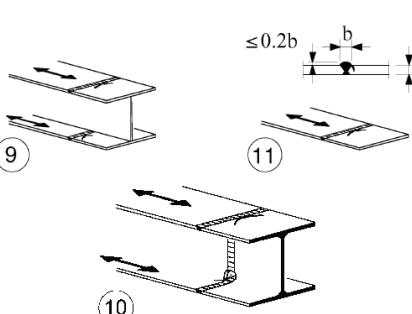
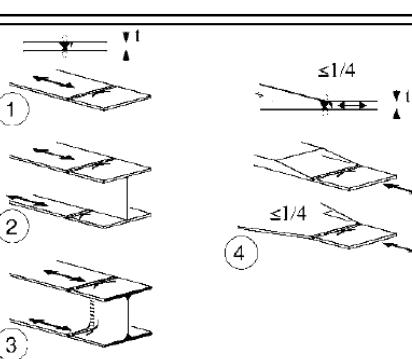


Figuur 131 – Locatie van de verbinding type O in het 2^e veld



Figuur 132 – Locatie van de verbinding type O in het 3^e veld

Voor de detailcategorie kan onderscheid worden gemaakt tussen de zijde van de las die vlakgeslepen is en de zijde die dat niet is. Het vlakslijpen van de lassen is uitgevoerd aan de onderzijde, waar de opdikplaten over de las heen lopen. De detailcategorie $\Delta\sigma_c$ voor de vermoeiingsberekening van niet vlak geslepen zijde volgt uit de NEN-EN 1993-1-9 tabel 8.3 Detail 10 en bedraagt 80 N/mm^2 . Omdat $t < 25 \text{ mm}$ is uitgegaan van $k_s = 1,0$. Voor de vlakgeslepen zijde van de x-naden mag volgens TNO uitgegaan worden van detailcategorie $\Delta\sigma_c = 112$, conform NEN-EN 1993-1-9 tabel 8.3 detail 10, zie Bijlage C van rapport [TNO conceptrapport Risicoanalyse lasimperfecties in de IJsselbrug A12 (002)]. Dit geldt ook voor het deel van de x-naad aan de bovenzijde van de flens ter plaatse van het lijf, omdat hier geen spanningsconcentratie aanwezig is.

80 Invloed van de afmetingen voor $t > 25 \text{ mm}$: $k_s = (25/t)^{0.2}$		9) Stuiklassen in dwarsrichting in gelaste plaatliggers zonder uitsparingen. 10) Stompe lassen van volledige doorsneden van gewalste profielen met uitsparingen. 11) Stuiklassen in dwarsrichting in platen, strippen, gewalste profielen of plaatliggers.	- De hoogte van de overdikte van de las mag niet groter zijn dan 20 % van de lasbreedte, met een vloeiente overgang naar de plaatoppervlakken. - Las niet vlakgeslepen. - Lasuitloopstukken zijn gebruikt en zijn achteraf verwijderd; de plaatranden zijn vervolgens geslepen in de spanningsrichting. - Gelast aan beide zijden; gecontroleerd door NDO. <u>Detail 10:</u> De hoogte van de overdikte van de las mag niet groter zijn dan 10 % van de lasbreedte, met een vloeiente overgang naar de plaatoppervlakken.
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 strippen . 2) Stuiklassen in flenzen en lijven van plaatliggers, uitgevoerd voor het samenstellen. 3) Stompe lassen van volledige doorsneden van gewalste profielen zonder uitsparingen. 4) Stuiklassen in dwarsrichting in platen of strippen, die zijn afgeschuind over de breedte of de dikte, met een helling $\leq 1/4$.	- Alle lassen zijn vlakgeslepen tot het plaatoppervlak evenwijdig aan de richting van de pijl. - Lasuitloopstukken zijn gebruikt en zijn achteraf verwijderd; de plaatranden 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.

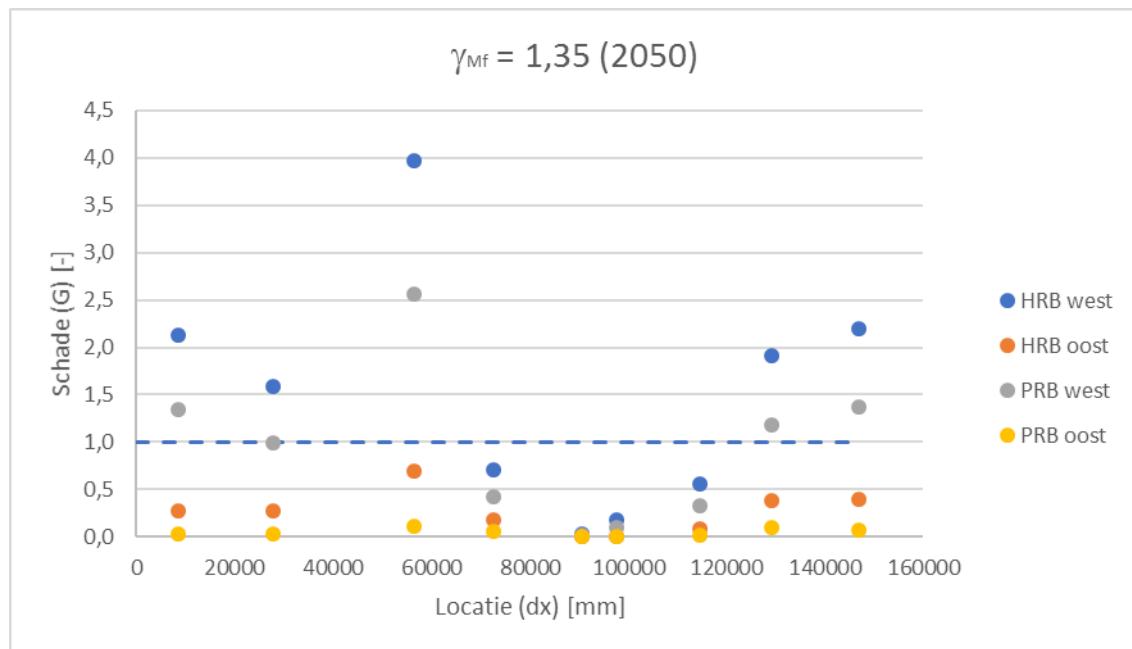
Figuur 133 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding type O

De berekening is voor de 9 locaties (O1 t/m O9) voor 3 verschillende veiligheidsfactoren $\gamma_M = 1.35, 1.15$ en 1.00 uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van de spanning aan de onderzijde van het ½ DIN profiel in de onderflens. De toetsresultaten (schadegetallen) zijn in de afzonderlijke hoofdliggers bepaald, namelijk voor de hoofdrijbaan-west (HRB west), de hoofdrijbaan-oost (HRB oost), de parallelrijbaan-west (PRB-west) en de parallelrijbaan-oost (PRB-oost).

Tabel 50 en Figuur 134 geven de resultaten weer voor de toetsing van de onderflens aan de niet-vlak geslepen zijde met $\gamma_{Mf} = 1.35$ en $\Delta\sigma_c = 80$. De toetsresultaten met de andere veiligheidsfactoren zijn in Bijlage E15 weergegeven. Een aantal lasverbindingen blijken aan de onderzijde niet te voldoen aan de schade-eis $D < 1,0$ bij $\gamma_{Mf} = 1.35$. De meest kritische verbinding bevindt zich bij O3 in de hoofdrijbaan west. De schade in 2050 bedraagt hier 4,0.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
O1	0,6	2,1	0,2	0,3	0,6	1,3	0,0	0,0
O2	0,4	1,6	0,2	0,3	0,4	1,0	0,0	0,0
O3	1,2	4,0	0,5	0,7	1,2	2,6	0,0	0,1
O4	0,2	0,7	0,1	0,2	0,2	0,4	0,0	0,1
O5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O6	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
O7	0,1	0,6	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0
O8	0,5	1,9	0,3	0,4	0,5	1,2	0,0	0,1
O9	0,6	2,2	0,3	0,4	0,6	1,4	0,0	0,1

Tabel 50 – Schadegetallen van verbinding type O (x -naad $\frac{1}{2}$ DIN profiel DC = 80) voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)

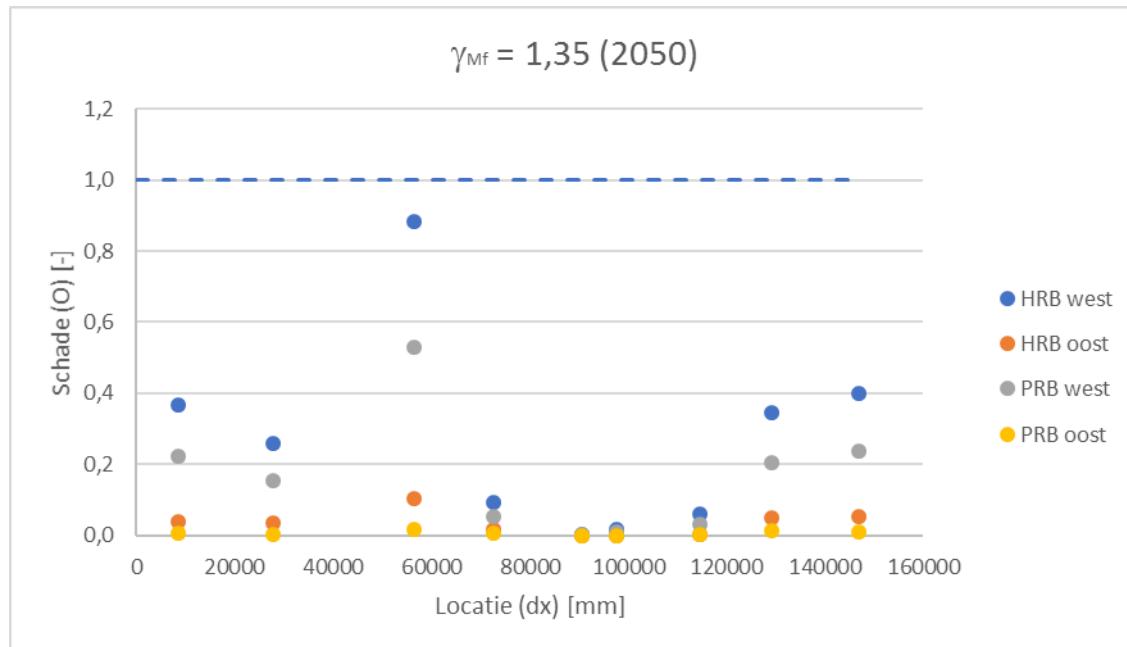


Figuur 134 – Presentatie van schadegetallen voor de eerste helft van de brug voor 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$) ($\frac{1}{2}$ DIN profiel DC = 80)

Tabel 51 en Figuur 135 geven de resultaten weer voor de toetsing van de onderflens aan de vlakgeslepen zijde met $\gamma_{Mf} = 1,35$ en $\Delta\sigma_c = 112$. Bij deze detailcategorie voldoen alle verbindingen.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
Jaar	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
O1	0,1	0,4	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
O2	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
O3	0,2	0,9	0,1	0,1	0,2	0,5	0,0	0,0
O4	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
O5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O7	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O8	0,1	0,3	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0
O9	0,1	0,4	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0

Tabel 51 – Schadegetallen van verbinding type O (x-naad $\frac{1}{2}$ DIN profiel DC = 112) voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1,35$)



Figuur 135 – Presentatie van schadegetallen voor de eerste helft van de brug voor 2050 ($\gamma_{Mf} = 1,35$) ($\frac{1}{2}$ DIN profiel DC = 112)

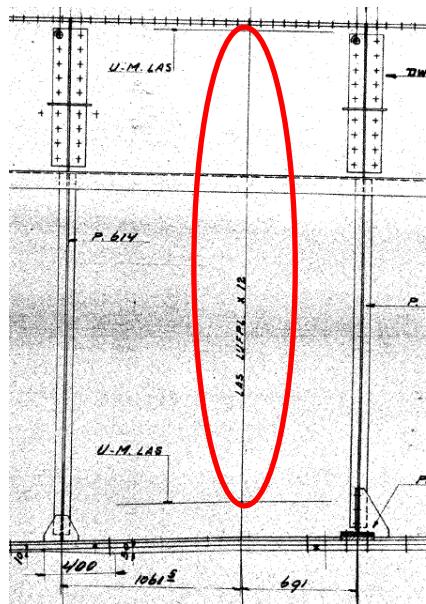
Gezien de schadegetallen van de verbinding in de onderflens aan de niet-vlak geslepen zijde is ook de verbinding in de bovenflens gecontroleerd. Deze blijkt overal te voldoen aan de schade-eis $D < 1,0$ bij $\gamma_{Mf} = 1.35$.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
O1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O4	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O8	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O9	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0

Tabel 52 – Schadegetallen van verbinding type O ($\frac{1}{2}$ DIN profiel bovenflens $DC = 80$) voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)

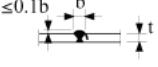
5.16 Type P: X-naad lijfplaat hoofdligger

In het verlengde van de las in het $\frac{1}{2}$ DIN profiel is er ook een lasverbinding (x-las) aanwezig in de lijfplaat. In totaal zijn er per hoofdligger 17 x-naden aanwezig, in dezelfde sneden als type O, zie Figuur 130 t/m Figuur 132. Vanwege symmetrie zijn alleen P1 t/m P9 getoetst.



Figuur 136 – Detail lasverbinding lijfplaat [Bron: A.85367]

De detailcategorie $\Delta\sigma_c$ voor de vermoeiingsberekening van deze verbinding volgt uit de NEN-EN 1993-1-9 tabel 8.3 Detail 5 en bedraagt 90 N/mm^2 . Omdat de plaatdikte 12 mm is, is voor alle berekeningen uitgegaan van een factor k_s gelijk aan 1,0.

90	Invloed van de afmetingen voor $t > 25 \text{ mm}$: $k_s = (25/t)^{0.2}$	$\leq 0.1b$				<p>5) Stuiklassen in dwarsrichting in platen of stripjes. 6) Stompe lassen van volledige doorsneden van gewalste profielen zonder uitsparingen. 7) Stuiklassen in dwarsrichting in platen of stripjes, die zijn afgeschuind over de breedte of de dikte, met een helling $\leq \frac{1}{4}$. De overgangen van de lassen behoren machinaal kerf vrij te zijn bewerkt.</p>	<p>- De hoogte van de overdikte van de las mag niet groter zijn dan 10 % van de lasbreedte, met een vloeiente overgang naar de plaatoppervlakken. - Lasuitloopstukken zijn gebruikt en zijn achteraf verwijderd; de plaatranden zijn vervolgens geslepen in de spanningsrichting. - Gelast aan beide zijden; gecontroleerd door NDO.</p>
							Details 5 en 7: Lassen uitgevoerd onder de hand.

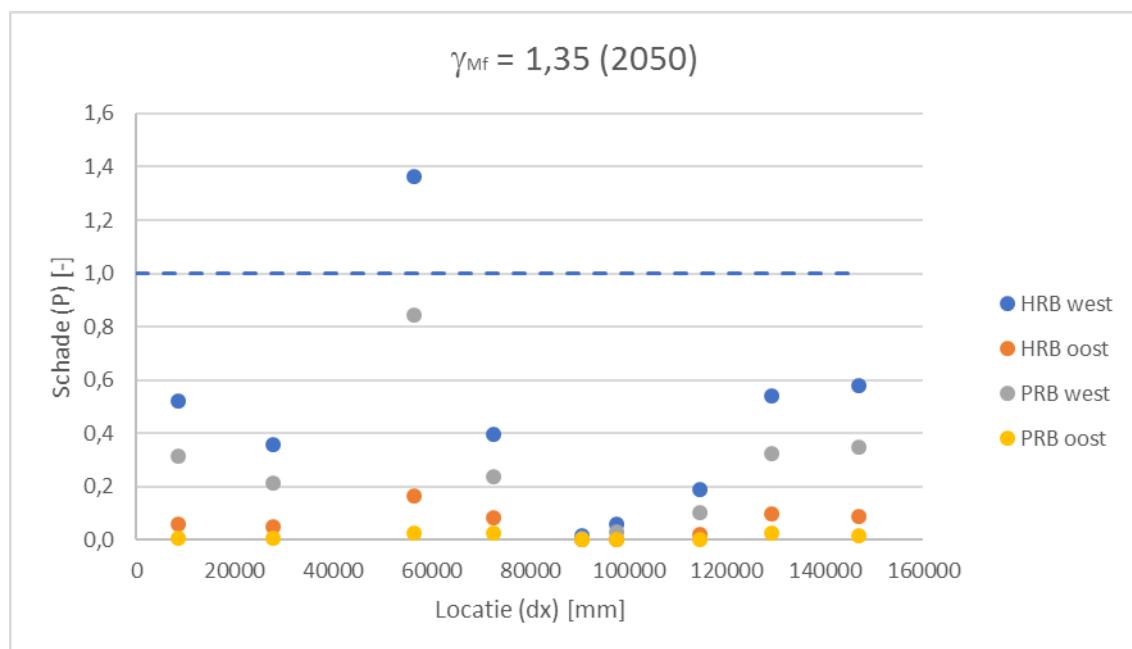
Figuur 137 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding type P

De berekening is voor de 9 locaties (P1 t/m P9) voor 3 verschillende veiligheidsfactoren $\gamma_{Mf} = 1.35, 1.15$ en 1.00 uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van de spanning aan de onderzijde van de lijfplaat, bij de aansluiting op het $\frac{1}{2}$ DIN profiel. De toetsresultaten (schadegetallen) zijn in de afzonderlijke hoofdliggers bepaald, namelijk voor de hoofdrijbaan-west (HRB west), de hoofdrijbaan-oost (HRB oost), de parallelrijbaan-west (PRB-west) en de parallelrijbaan-oost (PRB-oost).

Tabel 53 en Figuur 138 geven de resultaten weer voor $\gamma_{Mf} = 1.35$. De toetsresultaten met de andere veiligheidsfactoren zijn in Bijlage E16 weergegeven. Alleen de lasverbinding ter plaatse van P3 blijkt voor de HRB west aan de onderzijde niet te voldoen aan de schade-eis D < 1,0 bij $\gamma_{Mf} = 1.35$.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
P1	0,1	0,5	0,0	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0
P2	0,1	0,4	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0
P3	0,4	1,4	0,1	0,2	0,3	0,8	0,0	0,0
P4	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
P5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
P6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
P7	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
P8	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0
P9	0,1	0,6	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0

Tabel 53 – Schadegetallen van verbinding type P (onderzijde lijfplaat) voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)



Figuur 138 – Presentatie van schadegetallen voor de eerste helft van de brug voor 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$) (onderzijde lijfplaat)

Voor verbinding P3 in de HRB west is vervolgens gezocht naar de hoogte waar de verbinding wel voldoet. Dit blijkt op 100 mm boven de bovenzijde van het $\frac{1}{2}$ DIN profiel in de onderflens te zijn.

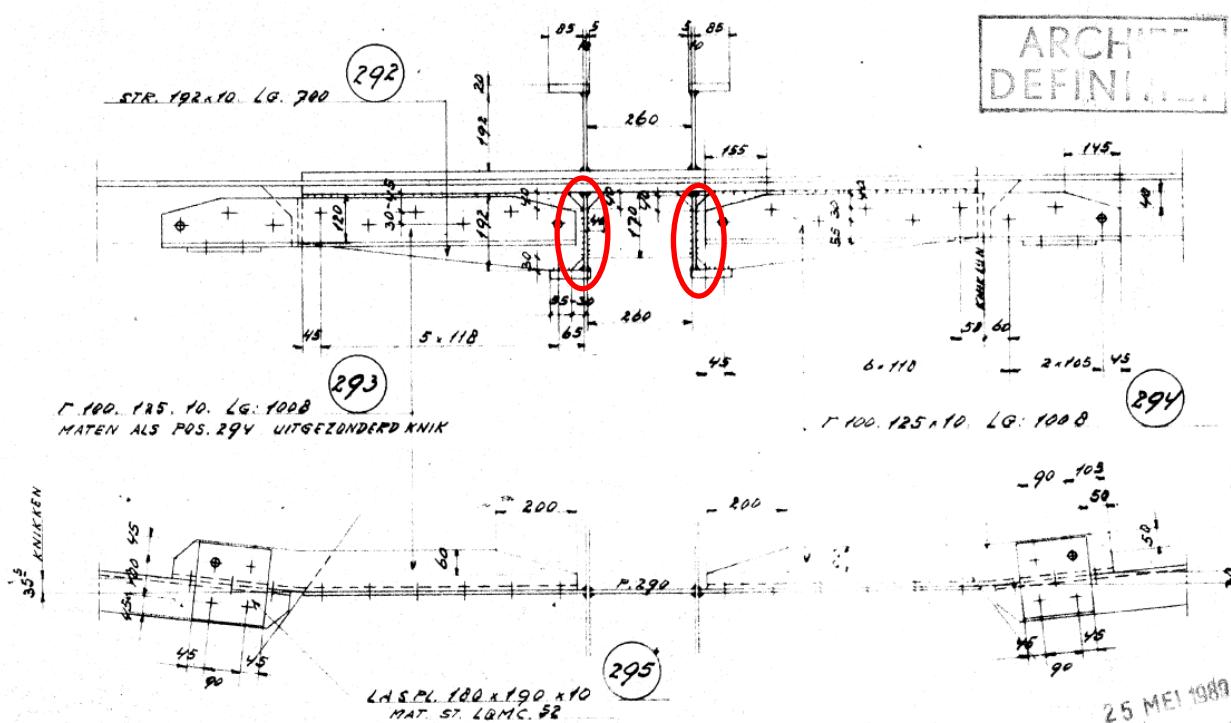
$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
P3	0,2	1,0	0,1	0,1	0,2	0,6	0,0	0,0

Tabel 54 – Schadegetallen van verbinding type P3 (100 mm boven onderzijde lijfplaat) voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1.35$)

De lasverbinding aan de zijde van de bovenflens is verder niet getoetst. Gezien de aanzienlijk lagere spanning aan de bovenzijde, zal de lasverbinding hier wel voldoen.

5.17 Type S: Doorkoppeling langsverstijvers

Ter plaatse van portaal C is een doorkoppeling van de langsverstijver gerealiseerd met een relatief lage detailcategorie (kruisverbinding). Ter plaatste van de dwarsverstijvers is de horizontale plaat die de doorkoppeling van de langsverstijvers verzorgt verbonden middels hoeklassen ($a = 5 \text{ mm}$) met het lijf van de dwarsverstijver. Bovendien zijn er lokaal laspoortjes aangebracht, zodat de verticale lassen van de dwarsverstijver door kunnen lopen. Deze laspoortjes zullen resulteren in een spanningsconcentratie.

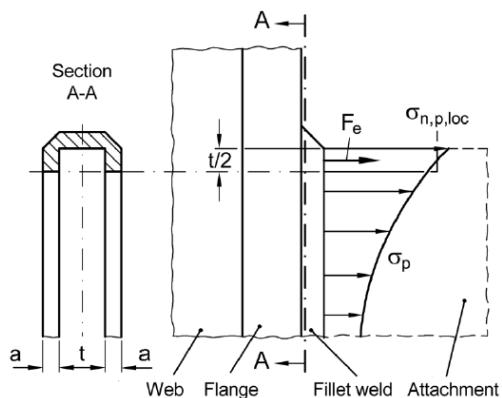


Figuur 139 – Detail lasverbinding lijf en flens dwarsdrager [Bron: A.85378]

Tegenover de relatief ongunstige detailcategorie en de spanningsconcentratie door de laspoortjes staat dat er opdikplaten op het lijf zijn aangebracht en in de onderflens flensverbreders aanwezig zijn. Hierdoor zullen de nominale spanningen lokaal lager zijn.

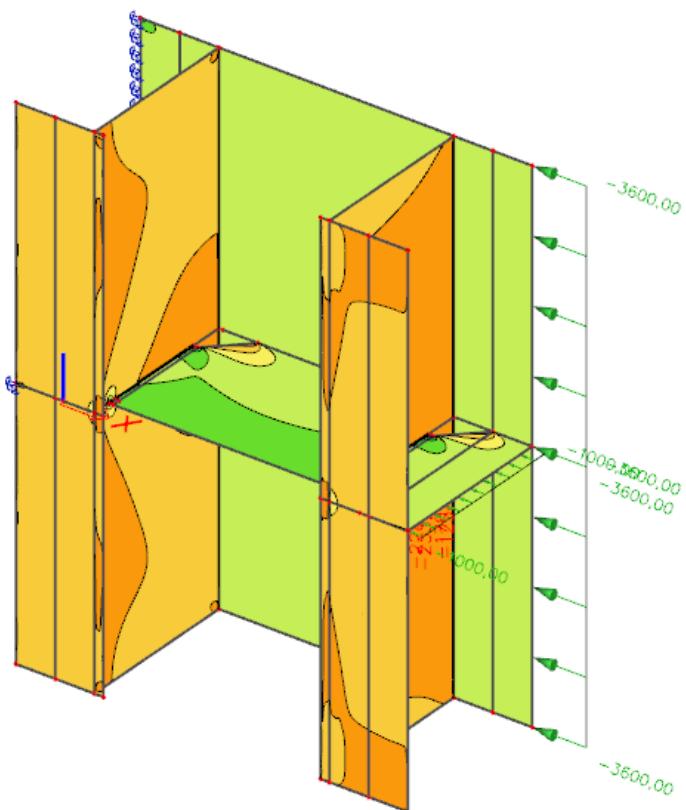
Toetsing wortel van de las

Omdat er in de hoeken van de horizontale plaat laspoortjes zijn aangebracht, is met behulp van een lokaal plaatmodel van de verbinding de spanning in de las bepaald ter plaatse van de spanningsconcentratie. Hiervoor is een eenheidsspanning van -100 N/mm^2 op de rand van de plaat geplaatst en is de spanning in de wortel van de las bepaald volgens het rapport IIW Guideline for the Assessment of Weld Root Fatigue [11]. Hiervoor mag de gemiddelde spanning in de laatste $0,5*t = 5 \text{ mm}$ worden genomen en worden uitgesmeerd over de las die rondom door het laspoortje loopt.

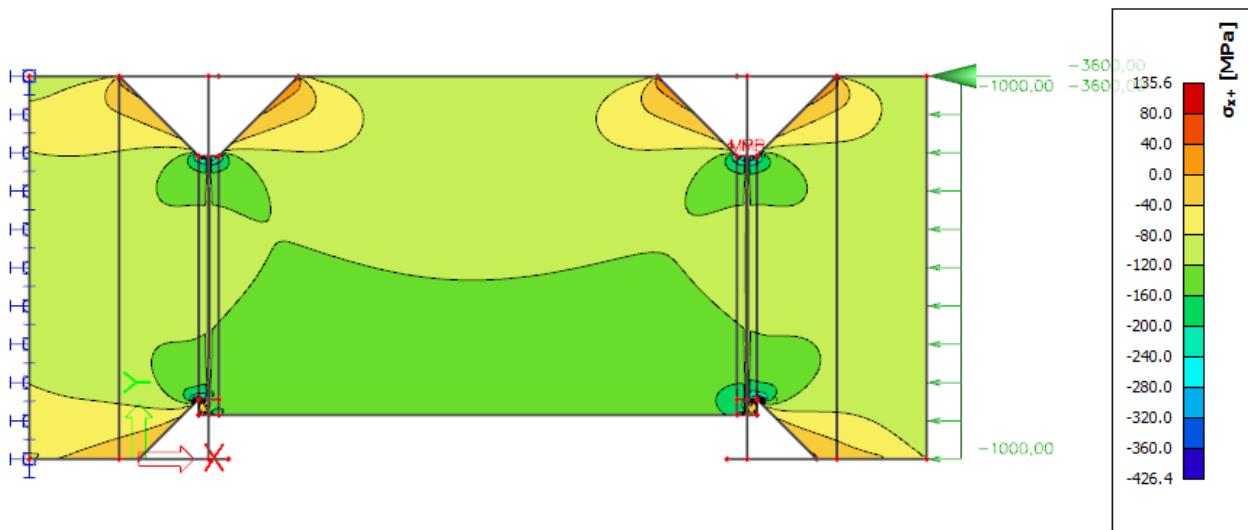


Figuur 140 – Methode voor het bepalen van de spanning aan het einde van de las [11]

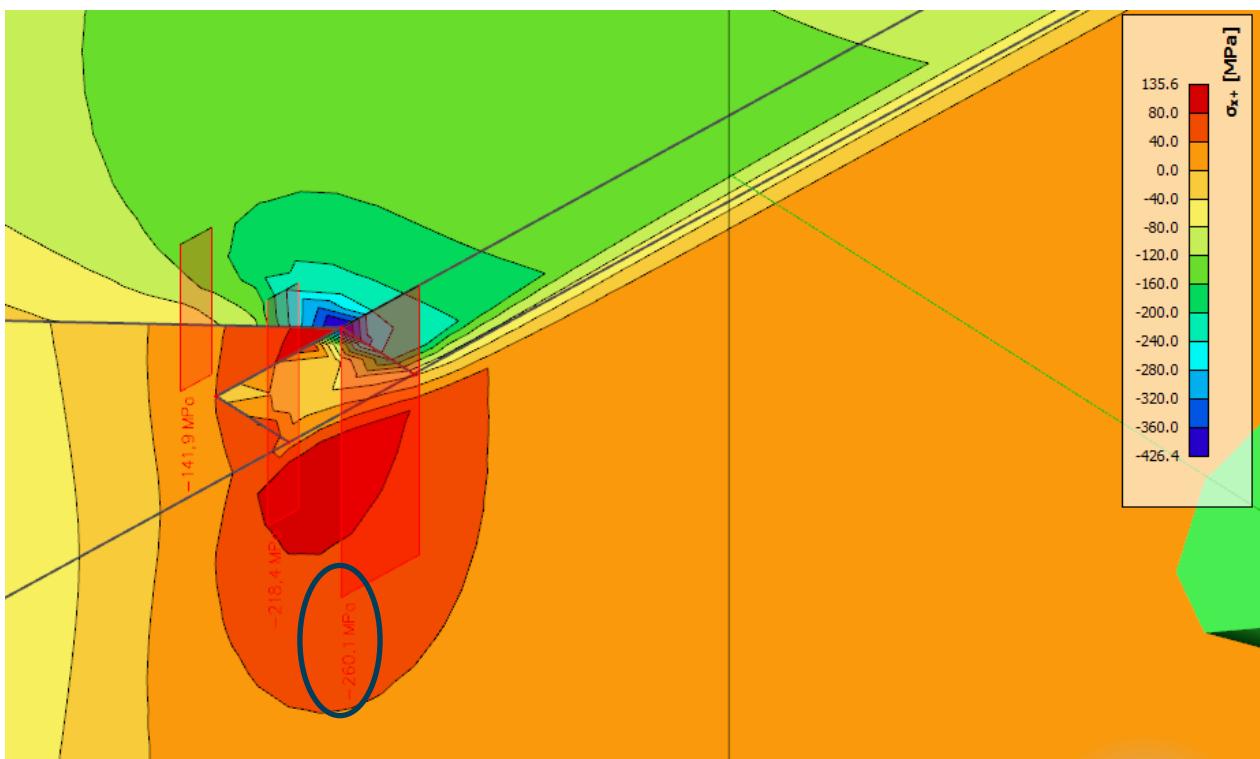
De spanning in de laatste 5 mm is in onderstaand figuur weergegeven, uitgaande van een nominale spanning van -100 N/mm^2 in de plaat.



Figuur 141 – Spanning σ_x in de verbinding onder een eenheidslast van -100 N/mm^2 (3D weergave)



Figuur 142 – Spanning σ_x in de verbinding onder een eenheidslast van -100 N/mm^2 (bovenaanzicht)



Figuur 143 – Spanning σ_x in de verbinding onder een eenheidslast van -100 N/mm^2 (detail t.p.v. de spanningspiek)

De grootste gemiddelde spanning in de laatste 5 mm van de plaat, uitgaande van een eenheidslast van -100 N/mm^2 , is -260 N/mm^2 (spanningsconcentratiefactor 2,6). Hieruit volgt de volgende spanning in de las.

$$\sigma_{\perp,w,loc} = \frac{F_x}{2a \cdot t + a^2} = \frac{-260N/mm^2 \cdot 5mm \cdot 10mm}{2 \cdot 5mm \cdot 10mm + (5mm)^2} = -104 N/mm^2$$

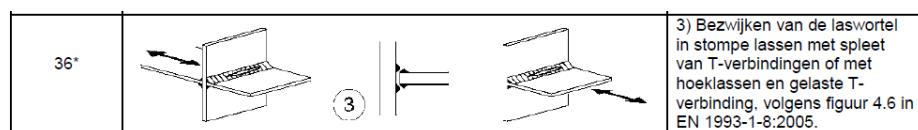
De (maximale) schuifspanning parallel aan de las kan op vergelijkbare wijze worden bepaald en is gelijk aan:

$$\tau_{\parallel,w,loc} = \frac{F_y}{2a \cdot t + a^2} = \frac{-115N/mm^2 \cdot 5mm \cdot 10mm}{2 \cdot 5mm \cdot 10mm + (5mm)^2} = 46 N/mm^2$$

Hieruit volgt een toetsspanning van:

$$\sigma_{n,w,loc} = \sqrt{\sigma_{\perp,w,loc}^2 + \tau_{\parallel,w,loc}^2} = \sqrt{104^2 + 46^2} = 114N/mm^2$$

De spanning in de las is daarom aangehouden als 1,14 maal de nominale spanning. De detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de wortel van de las is aangehouden als $\Delta\sigma_c = 36^\circ$ conform NEN-EN 1993-1-9 Tabel 8.5 Detail 3.



Figuur 144 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding type S (laswortel).

De vermoeiingsberekening is weergegeven in Bijlage E18. Hierbij is uitgegaan van de nominale spanningen uit het balkmodel, waarbij in de doorsnede-eigenschappen de opdikplaten op het lijf, de flensverbreders en de langsverstijvers ter plaatse van de verbinding zijn meegenomen en waarbij bovengenoemde toeslag is toegepast om de nominale spanningen te vertalen naar de spanningen in de las. Uit de berekening volgen de volgende schadegetallen.

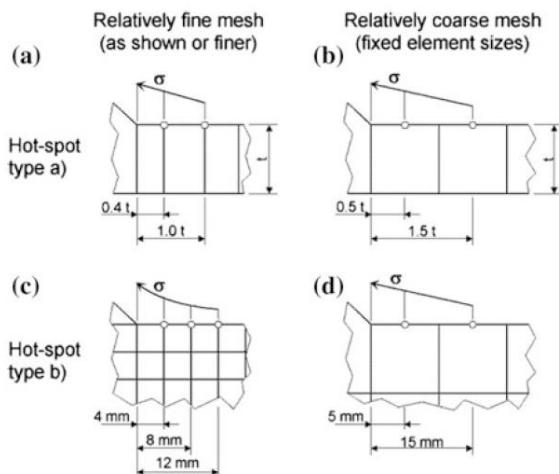
$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
Wortel	0,1	0,4	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0

Tabel 55 – Schadegetallen van verbinding type S (wortel v/d las) voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1,35$)

Toetsing teen van de las

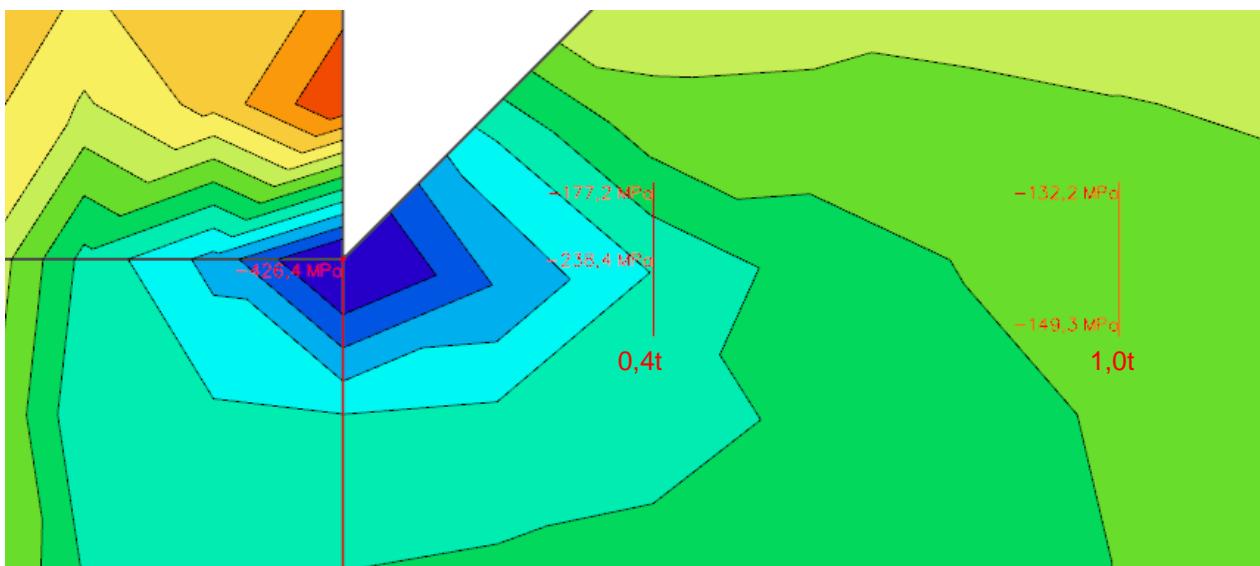
Voor de toetsing van de teen van de las is uitgegaan van een hotspot methode, waarbij de spanning lineair geëxtrapoleerd wordt vanuit de spanning op 0,4t en 1,0t van het snijpunt van de platen, conform (a) uit onderstaand figuur uit IIW-Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components (2016).

Fig. 2.14 Reference points at different types of meshing.
Stress type "a" (a, b), type "b" (c, d)



Figuur 145 – Extrapolatiemethode voor de bepaling van de hotspot spanning [10]

De spanning 0,4t en 1,0t zijn in onderstaand figuur weergegeven, uitgaande van een eenheidsspanning van -100 N/mm².

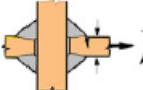


Figuur 146 – Spanningen op 0,4t en 1,0 t.b.v. de bepaling van de hotspot spanning

Hiermee wordt de volgende hotspot spanning gevonden, uitgaande van een nominale spanning van -100 N/mm²:

$$\sigma_{hs} = 1.67 \cdot \sigma_{0.4 \cdot t} - 0.67 \cdot \sigma_{1.0 \cdot t} = 1.67 \cdot -238.4 - 0.67 \cdot -149.3 = -298 \text{ N/mm}^2$$

Voor de berekening is een spanningsconcentratiefactor van 2,98 aangehouden ten opzichte van de nominale spanning. De detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de teen van de las is aangehouden als $\Delta\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2$ conform tabel 3.3 van het IIW reccomendation IIW-2259-15 [10] voor hot spot berekeningen.

6		Cruciform joints with load-carrying fillet welds	Fillet welds, as welded	90	.
---	---	--	-------------------------	----	---

Figuur 147 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding type S (lasteen).

De vermoeiingsberekening is weergegeven in Bijlage E18. Hierbij is uitgegaan van de nominale spanningen uit het balkmodel, waarbij in de doorsnede-eigenschappen de opdikplaten op het lijf, de flensverbreiders en de langsverstijvers ter plaatse van de verbinding zijn meegenomen en waarbij bovengenoemde toeslag is toegepast om de nominale spanningen te vertalen naar de hotspot spanningen in de plaat nabij de laspoortjes. Hieruit volgen de volgende schadegetallen.

$\gamma_{Mf} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
Teen	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0

Tabel 56 – Schadegetallen van verbinding type S (teen v/d las) voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{Mf} = 1,35$)

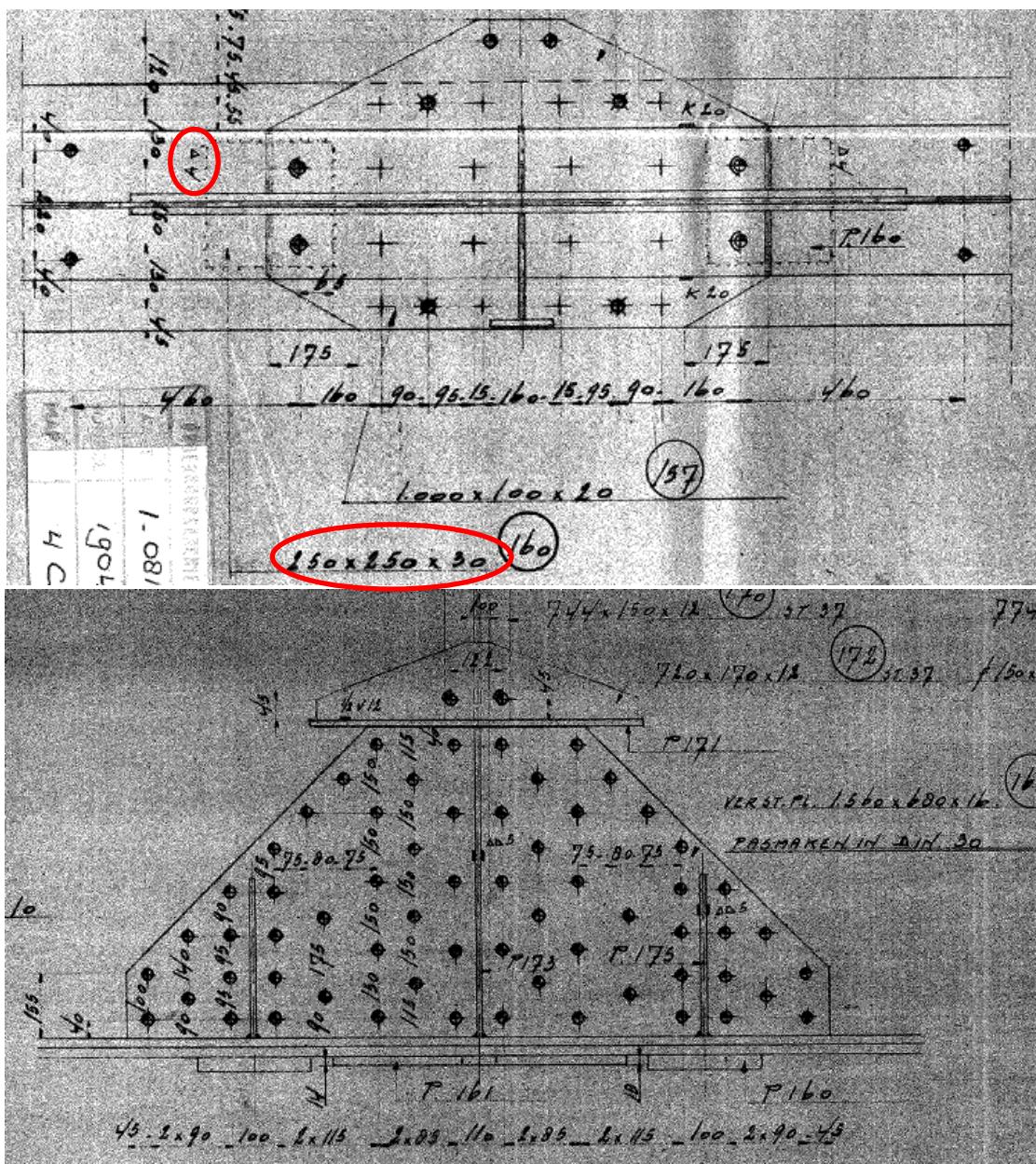
5.18 Type T: Lasverbinding vijzelpunten

Ter plaatse van de tussenopleggingen is boven de vijzelpunten een plaat aan de onderflens gelast voor de inleiding van de vijzelkrachten. De krachtsinleiding (opdikplaat) niet identiek aan type K, maar aanvullende toets uitgevoerd te worden.

krachtsinleiding (opdikplaat) niet identiek aan type K, maar ongunstiger.

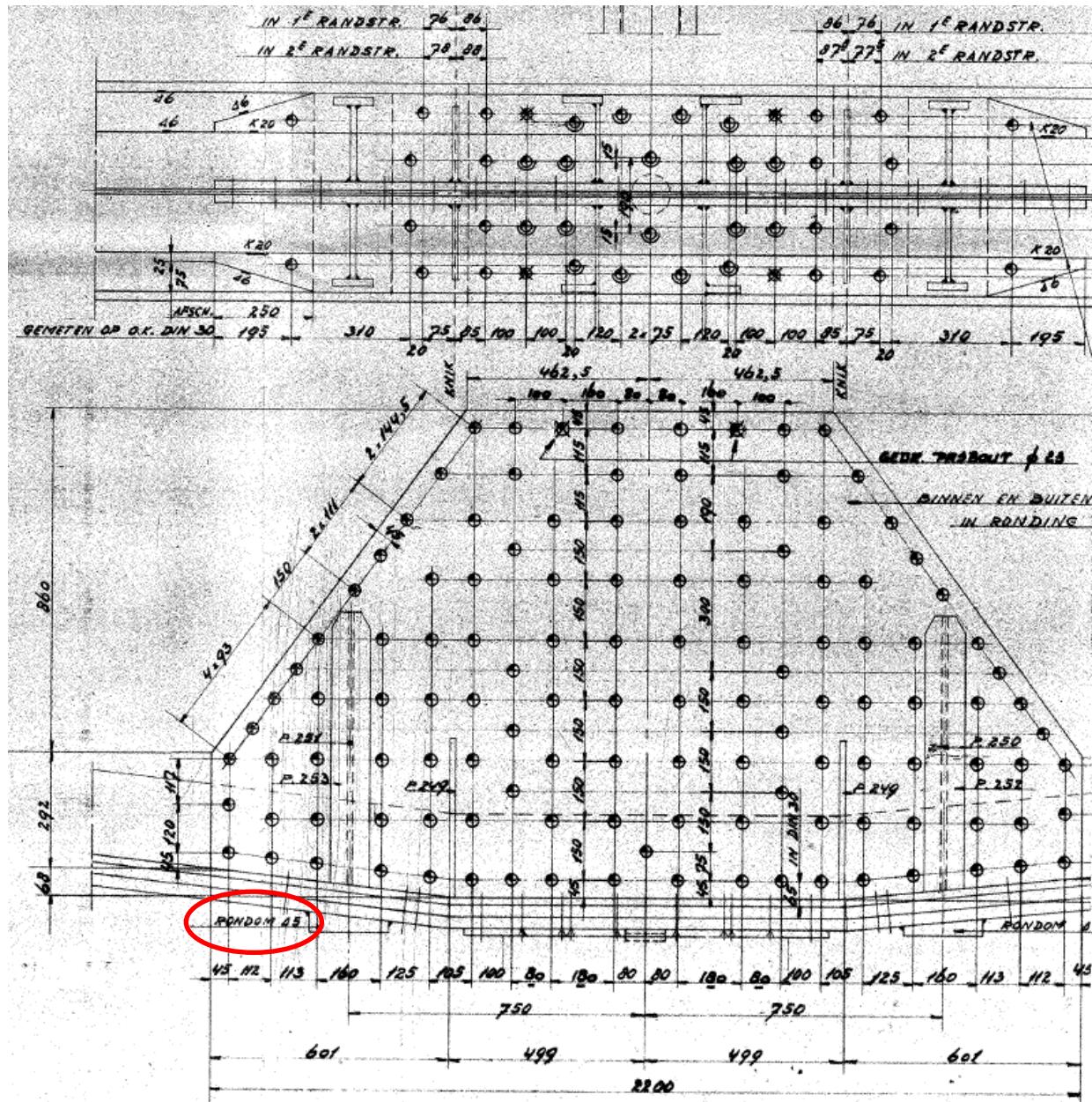
f zijn niet gelast, maar middels type K (niet krachtgedragen) zelpunten dient wel een

Ter plaatse van portaal B (pijler G/K) is een plaat van 250x250 mm toegepast, welke rondom is gelast met een hoeklas $a = 4$ mm, zie Figuur 148.



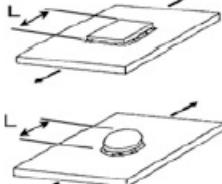
Figuur 148 – Verbinding tussen plaat vijzelpunt en onderflens ter plaatse van portaal B

Ter plaatse van portaal C (pijler H/J) is een plaat van 200x500 mm toegepast, welke rondom is gelast met een hoeklas $a = 5$ mm, zie Figuur 149.



Figuur 149 – Verbinding tussen plaat vijzelpunt en onderflens ter plaatse van portaal C

De toetsing van de vermoeiing is uitgevoerd op basis van de spanningswisseling in de onderflens van de hoofdlijker uitgevoerd. Ter plaatse van portaal C zijn in de betreffende doorsnede flensverbreders aanwezig, ter plaatse van portaal B (net) niet. Deze zijn alleen voor de vijzelpunten bij portaal C meegenomen in de bepaling van de spanningswisseling. De detailcategorie van deze verbinding is niet gegeven in de norm, maar is aangehouden conform [10], Tabel 3.1, detail 513, $\Delta\sigma_c = 63 \text{ N/mm}^2$, uitgaande van $L = 250 \text{ mm}$ en $L = 200 \text{ mm}$.

	Non-loadcarrying rectangular or circular flat studs, pads or plates	
	$L \leq 50 \text{ mm}$	80
	$L > 50 \text{ and } \leq 150 \text{ mm}$	71
	$L > 150 \text{ and } \leq 300 \text{ mm}$	63
	$L > 300 \text{ mm}$	50

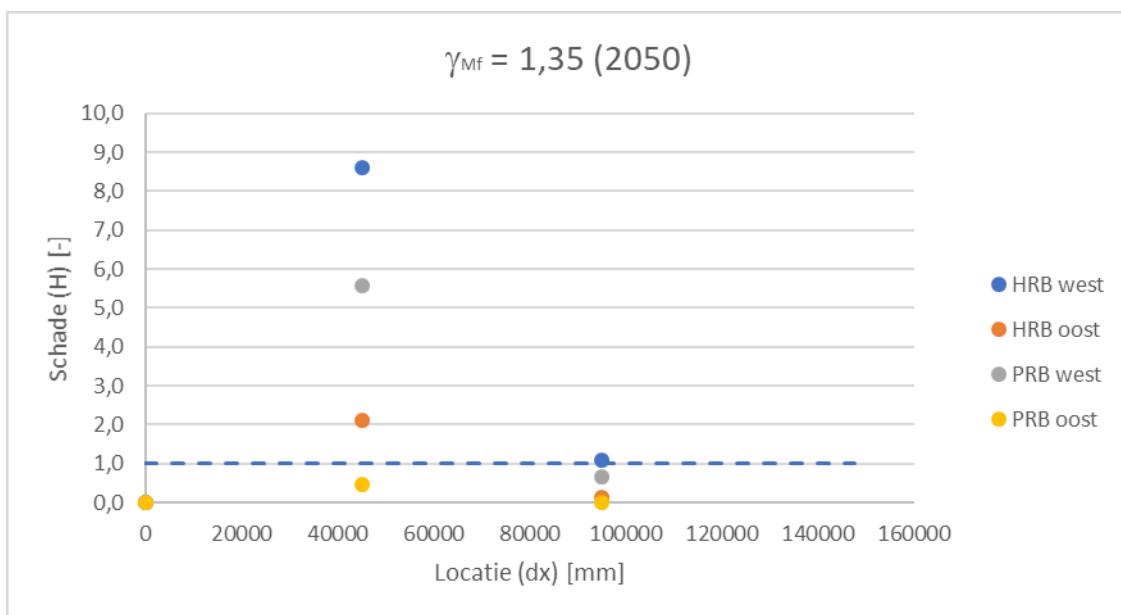
Wel gegeven in EN 1993-1-9: kolom 'requirements' van tabel 8.5 detail 6 verwijst naar detail 1 voor $L < 300 \text{ mm}$. Daarmee volgt een lagere DC. Ter bespreking.

Figuur 150 – Detailcategorie voor verbinding type 18 volgens [10].

De berekening is uitgevoerd ter plaatse van tussensteunpunten, voor 3 verschillende veiligheidsfactoren $\gamma_{MF} = 1,35, 1,15$ en $1,00$. De nummering van de locaties is gelijk als type H aangehouden, dus T2 voor de vijzelpunten bij portaal B en T3 voor de vijzelpunten bij portaal C. De toetsresultaten zijn voor de verschillende hoofdlijkers voor $\gamma_{MF} = 1,35$ weergegeven in Tabel 57 en Figuur 151. De verbindingen voldoen niet overal aan de schade-eis $D \leq 1,0$ bij $\gamma_{MF} = 1,35$. De toetsresultaten met de andere veiligheidsfactoren zijn in Bijlage E19 samengevat.

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

Tabel 57 – Schadegetallen van verbinding type T voor eind 2018 en eind 2050.



Figuur 151 – Presentatie van schadegetallen voor de eerste helft van de brug van verbinding type T voor eind 2050.

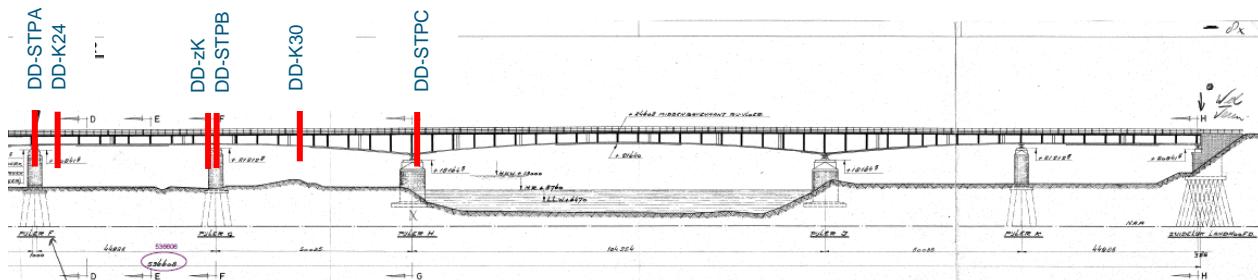
5.19 Dwarsdragers

5.19.1 Inleiding

Voor de toetsing van vermoeiing van de dwarsdrageraansluitingen op de hoofdlijker/dwarsverstijver is gebruik gemaakt van een combinatie van metingen en berekeningen om de vermoeiingsschade te bepalen. Naar aanleiding van de eerste berekeningen aan de dwarsdrageraansluitingen met de hoofdlijker en de observaties aan de brug is in overleg met Rijkswaterstaat besloten om een meetprogramma op te zetten. Doel van deze metingen is om de werkelijke spanningswisselingen te bepalen ter plaatse van verschillende kritieke details, omdat vermoed werd dat het rekenmodel te hoge piekspanningen gaf ter plaatse van discontinuïteiten en aansluitingen.

In opdracht van Rijkswaterstaat en in overleg met Royal HaskoningDHV heeft TNO rekmetingen uitgevoerd op een aantal locaties van de hoofdbrug. Het meetprogramma is beschreven in de TNO rapporten TNO-2019-R11393 [6] en TNO-2020-R10226 [9]. De metingen zijn uitgevoerd aan:

- Een dwarsdrager zonder K-verband (DD-zK)
- Een dwarsdragers met K-verband bij een $\frac{1}{2}$ INP30 dwarsverstijver in de hoofdbrug (DD-K30)
- Een dwarsdragers met K-verband bij een $\frac{1}{2}$ INP24 dwarsverstijver in de hoofdbrug (DD-K24)
- Een dwarsdrager bij portaal A (DD-STPA)
- Een dwarsdrager bij portaal B (DD-STPB)
- Een dwarsdrager bij portaal C (DD-STPC)



Figuur 152 – Locatie getoetste dwarsdragers

Op basis van de metingen zijn door TNO hotspot spanningen bepaald, waarbij zowel continu metingen zijn uitgevoerd waarbij de rekken voor een periode van 24 uur continu zijn gemeten onder normale verkeersbelasting en ballasttesten waarbij rekken gemeten zijn tijdens een aantal passages van een enkel voertuig met bekend gewicht. Het doel van de continu metingen is om het verkeersspectrum te bepalen en te vergelijken met het verkeersspectrum volgens de norm. Het doel van de ballasttest is om de invloedslijn van de spanning per meetlocatie te bepalen en te vergelijken met de berekende invloedslijn. In deze rapportage is met name gebruik gemaakt van de resultaten van de balastmetingen.

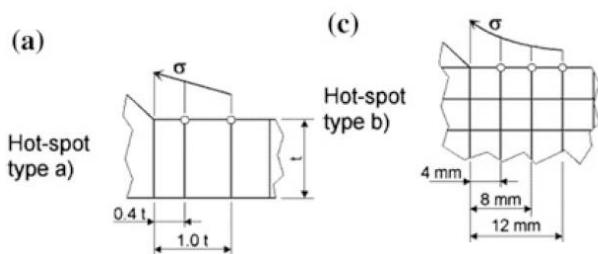
5.19.2 Balastmetingen

Tijdens de balastmetingen is met een vrachtwagen met bekende (gemeten) as-gewichten en as-afstanden over de brug gereden. Tijdens de balastmetingen is de brug vrijgehouden van overig verkeer. Op basis van de metingen kunnen de invloedslijnen bepaald worden voor de verschillende gemeten posities en kan een vergelijking met de berekende invloedslijnen worden gemaakt.

5.19.2.1 Verwerking en filtering van de meetdata

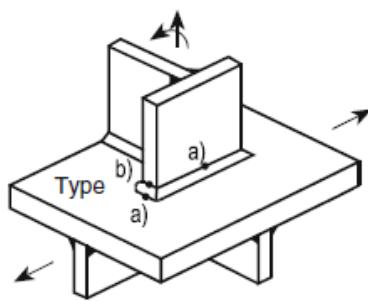
De ruwe meetdata is door TNO verwerkt en gefilterd, zodanig dat de meetruis eruit is gefilterd en de offset van de meetdata gelijk is aan nul vlak voor de passage van het voertuig. Daarnaast is de meetdata (rekken afgezet tegen de tijd) omgezet naar spanningen afgezet tegen de afgelegde afstand, door de rekken te vermenigvuldigen met de elasticiteitsmodulus ($E = 210000 \text{ N/mm}^2$) en de tijd te vertalen naar afgelegde afstand op basis van de snelheid van het voertuig. De locatie van de pieken in de metingen zijn zodanig verschoven dat deze optreden bij dezelfde afgelegde afstand als in de berekening.

Daar waar relevant zijn de metingen geëxtrapoleerd naar de hotspotspanning bij de teen van de las. Hierbij wordt meestal een lineaire extrapolatie gebruikt vanuit de meetwaarden op 0,4t en 1,0t, overeenkomstig met de extrapolatiemethode "type a" conform "IIW Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components" [10].



Figuur 153 – Hotspot extrapolatie type a en b [10]

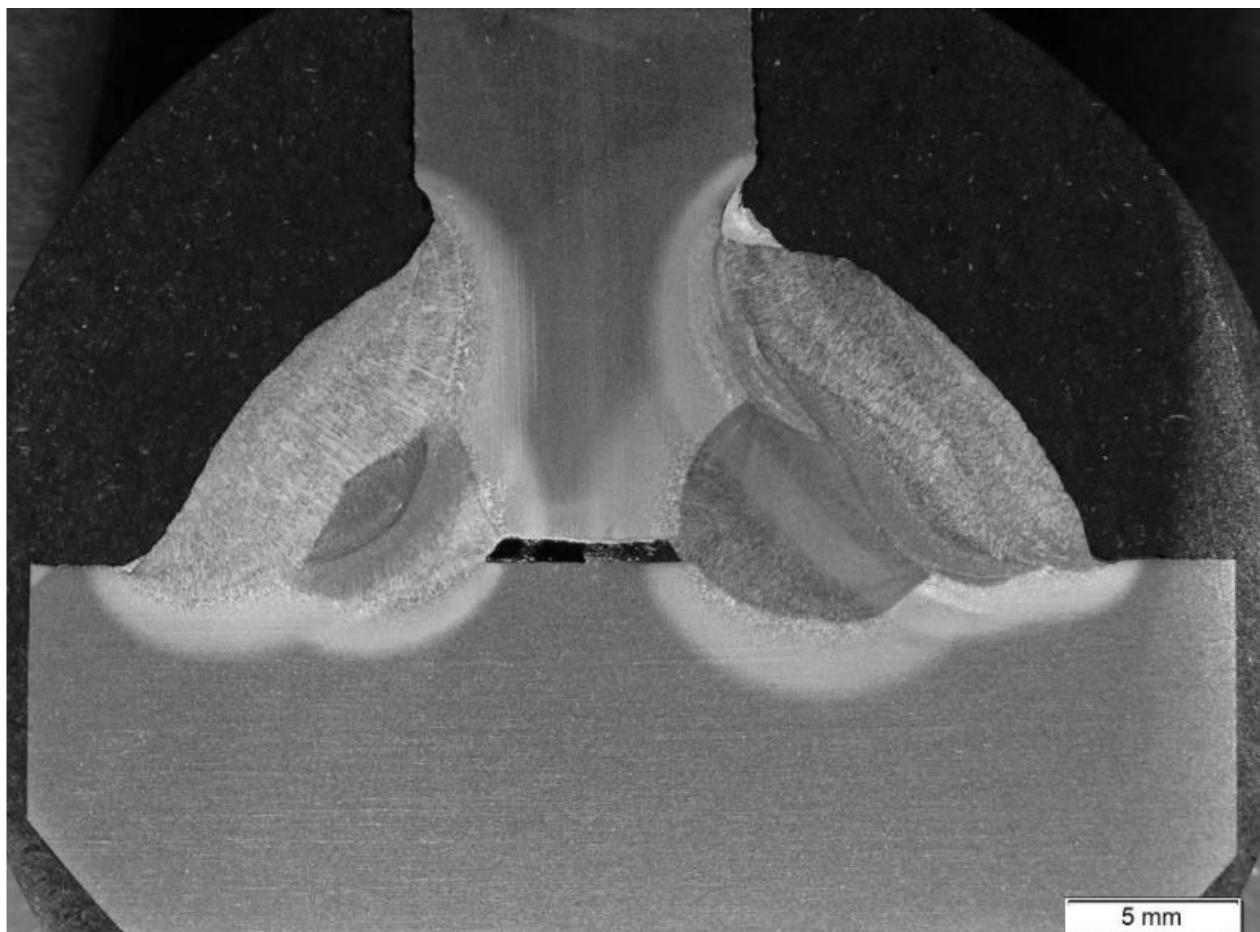
Voor een aantal gevallen is de spanning (ook) bepaald door middel van een kwadratische extrapolatie vanuit de meetresultaten op 4 mm, 8 mm en 12 mm vanaf de teen van de las. Dit wordt aangeduid als type b in "IIW Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components" [10]. Type a wordt normaliter gebruikt voor de hotspot spanning ter plaatse van de teen van de las op het plaatoppervlak, type b voor de teen van de las op de plaat rand.



Figuur 154 – Type Hotspot [10]

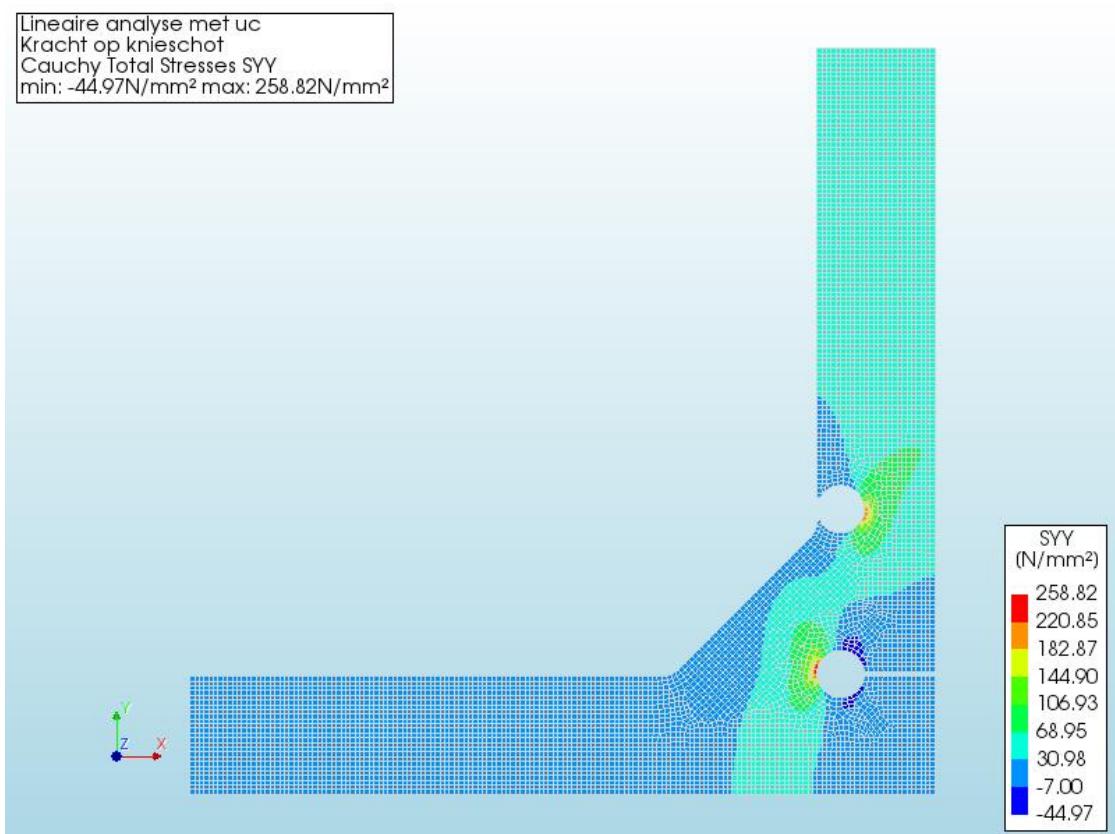
5.19.2.2 Invloed undercut las

Tijdens de metingen is geconstateerd dat op een aantal locaties de lassen terug liggen ten opzichte van het oppervlak van de plaat. In deze rapportage wordt dit aangeduid met de “undercut”. Ter illustratie is in onderstaand figuur een doorsnede over een vergelijkbare lasverbinding met een grote undercut van een andere brug (niet zijnde de IJsselbrug) weergegeven.



Figuur 155 – Undercut bij een lasverbinding (NB. Foto is niet van de IJsselbrug)

De invloed van de undercut op de spanningen op 0,4t en 1,0t is onderzocht met behulp van een DIANA model op basis van plain strain elementen. Ter illustratie is in onderstaand figuur de spanning σ_y weergegeven in verticale richting van een model met 2,0 mm undercut.



Figuur 156 – Spanningen in verticale richting in plain strain model met 2,0 mm undercut

Door de undercut zullen de spanningen aan het plaatoppervlak in de nabijheid van de undercut afnemen, omdat de spanningen vanaf de undercut pas na een zekere afstand weer gelijkmatig verdeeld zijn over de gehele doorsnede. De volledige berekening van de invloed van verschillende afmetingen van de undercut op de spanningen op 0,4t en 1,0t is weergegeven in Bijlage H van deze rapportage. Hieruit volgen de volgende reducties op de spanningen, ten opzichte van een doorsnede zonder undercut.

Undercut [mm]	0,4 t		1,0 t	
	Spanning [N/mm ²]	Percentage	Spanning [N/mm ²]	Percentage
0	48.9	100%	49,2	100%
0,5	44.1	90%	49,4	101%
1,0	36.7	75%	49,4	101%
2,0	22.5	46%	49,5	101%

Tabel 58 – Relatie tussen de diepte van de undercut en de gemeten spanningen

Te zien is dat met name op 0,4 t de invloed aanzienlijk is. Op 1,0 t is de invloed nauwelijks meer aanwezig. TNO heeft daarom de metingen op 0,4 t gecorrigeerd bij de bepaling van de hotspot spanning, door de diepte van de undercut te meten en op basis daarvan de gemeten spanning te corrigeren, door deze te delen door bovenstaande percentage. Met deze gecorrigeerde spanning is vervolgens een hotspot-extrapolatie uitgevoerd, zodat een hotspotspanning verkregen wordt als ware er geen undercut aanwezig.

5.19.3 Vergelijking berekening en meting

In de volgende hoofdstukken zal voor de verschillende meetlocaties een vergelijking gemaakt worden tussen de hotspot of nominale spanningen zoals bepaald uit de meetresultaten door TNO en de hotspot- of nominale spanningen die volgen uit het eindige elementen model. In elk hoofdstuk wordt één dwarsdrager behandeld, waarbij een overzicht wordt gegeven van de locatie van de betreffende dwarsdrager en van de verschillende getoetste details binnen de aansluiting, ook waar niet gemeten is. Voor de details waar metingen zijn uitgevoerd, wordt een vergelijking tussen model en metingen gemaakt van de (gemiddelde) spanningswisseling op 1,0t en op de hotspotlocatie. Voor de locaties waar alleen een nominale spanning is gemeten wordt een vergelijking gemaakt met de nominale spanning in het model.

Tijdens de balastproeven is er met twee snelheden gereden, 80 km/h en 20 km/h. Voor beide snelheden is apart een gemiddelde bepaald en weergegeven. Onder elke grafiek is een “modelfactor” gegeven, wat overeenkomt met de verhouding van de spanningswisseling uit de meting gedeeld door de spanningswisseling die volgt uit het model. In de meeste gevallen is dit gedaan op basis van de wisseling van de achterste as of van de gehele invloedslijn.

Op basis van de modelfactor bij 20 km/h is de spanning van de eenheidslast uit het FEM model terug geschaald en is een vermoeiingsanalyse uitgevoerd met de gecorrigeerde invloedslijn. Er is gekozen voor de spanningen bij 20 km/h omdat deze het minste last hebben van dynamische effecten. Het effect hiervan is namelijk al in de vermoeiingsberekening meegenomen als een dynamische vergrottingsfactor van 1,1, en bij de voegovergang een extra factor 1,15. In de metingen is dan ook te zien dat de spanningen bij 80 km/h soms hoger en soms lager uitvallen ten opzichte van de spanningen bij 20 km/h. Wanneer er meerdere metingen op één locatie zijn uitgevoerd (bijv. noord- en zuidzijde van een plaat), dan is de zijde met de grootste wisseling in de meting gebruikt voor de modelfactor voor de vermoeiingsanalyse.

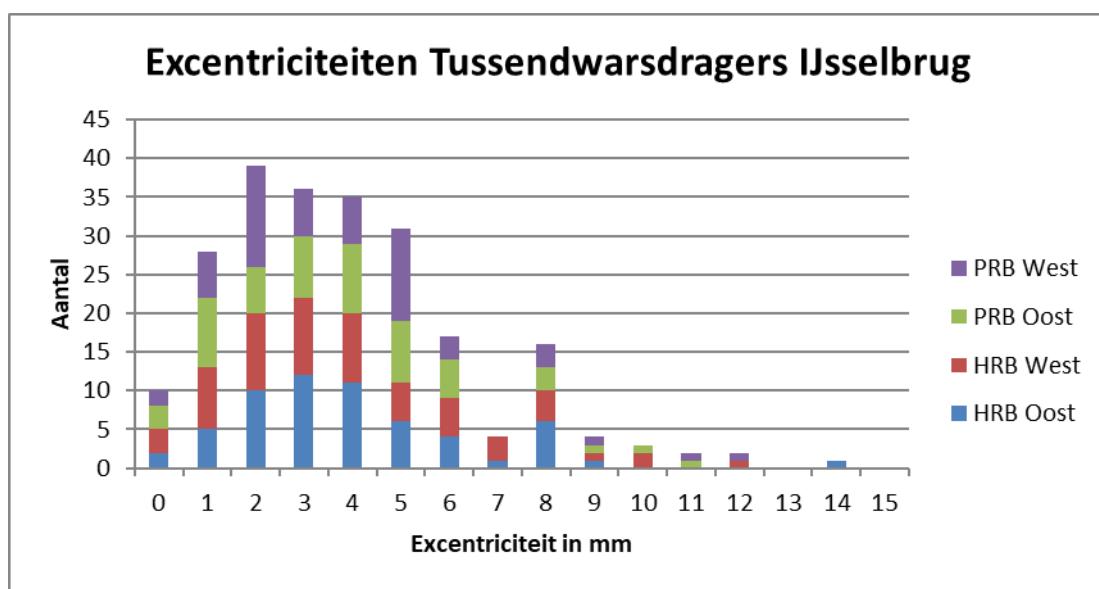
Op de locaties waar niet gemeten is, is de schadeberekening gebaseerd op de spanningswisseling uit het model.

5.19.4 Excentriciteit knieschot – lijf dwarsverstijver

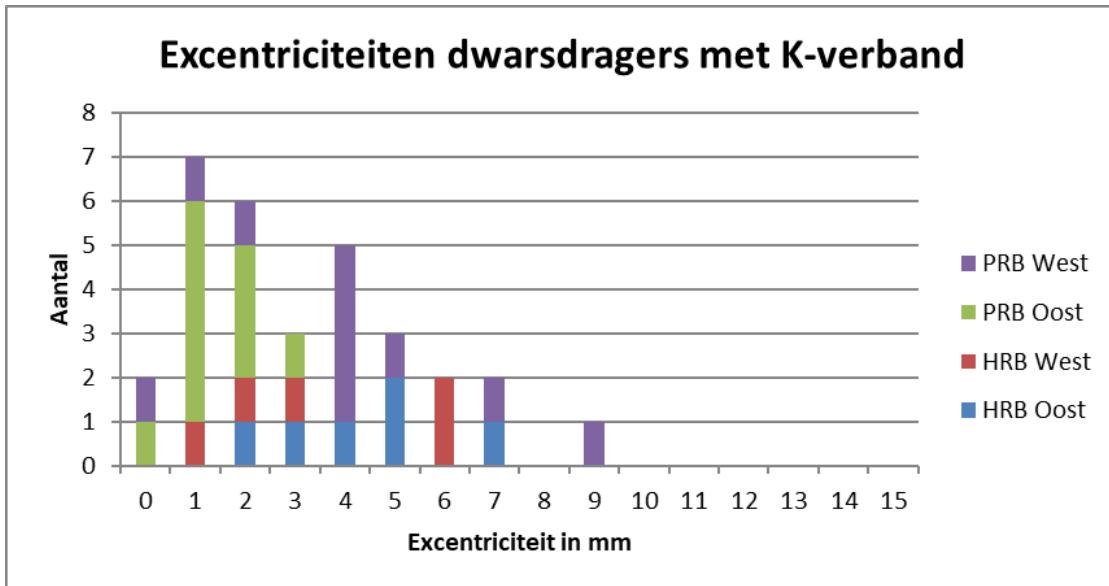
Bij veel dwarsdragers is een excentriciteit aanwezig tussen knieschot en lijf dwarsverstijver. Hollandia heeft hiervoor een inmeting gedaan van de excentriciteit **Error! Reference source not found.**. Dit zal met name effect hebben op de spanningen ter plaatse van de las tussen knieschot en horizontale flens langsverstijver en van de las tussen lijf dwarsverstijver en horizontale flens langsverstijver.



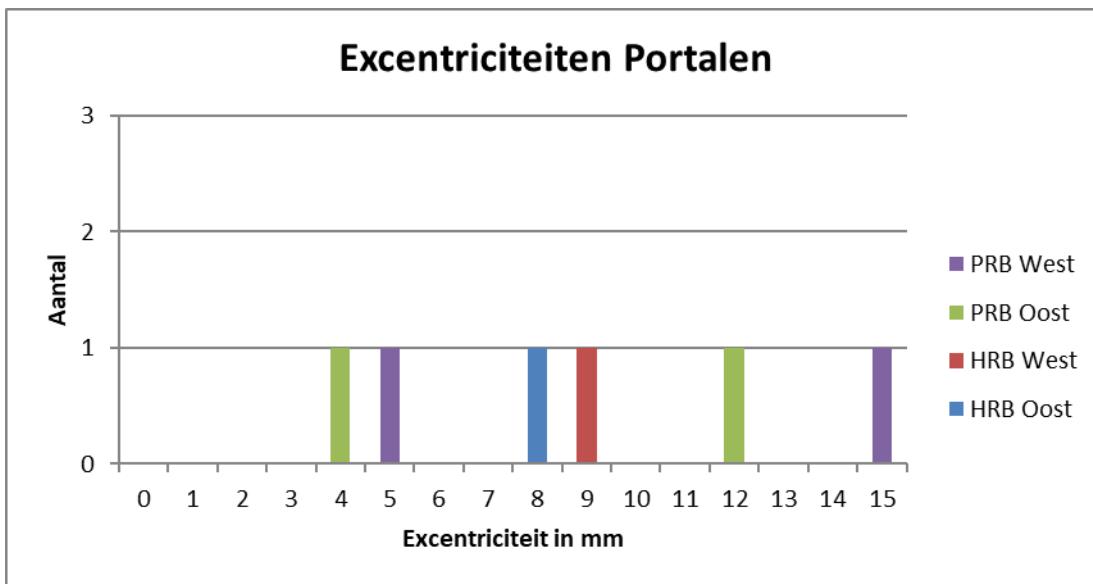
Figuur 157 – Excentriciteit in de dwarsdrager tussen knieschot en lijf dwarsverstijver.



Figuur 158 – Gemeten excentriciteit in de tussendwarsdragers zonder K-verband



Figuur 159 – Gemeten excentriciteit in de dwarsdrager met K-verband

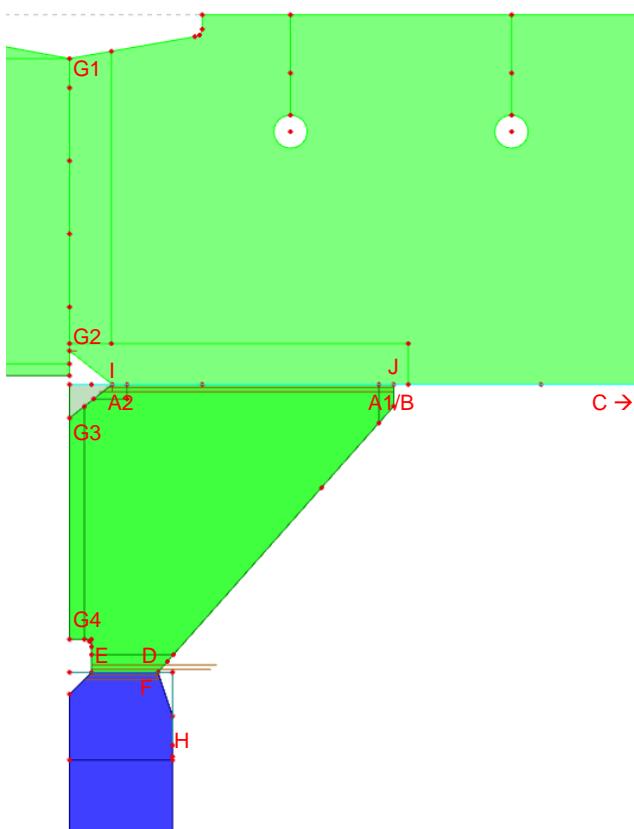
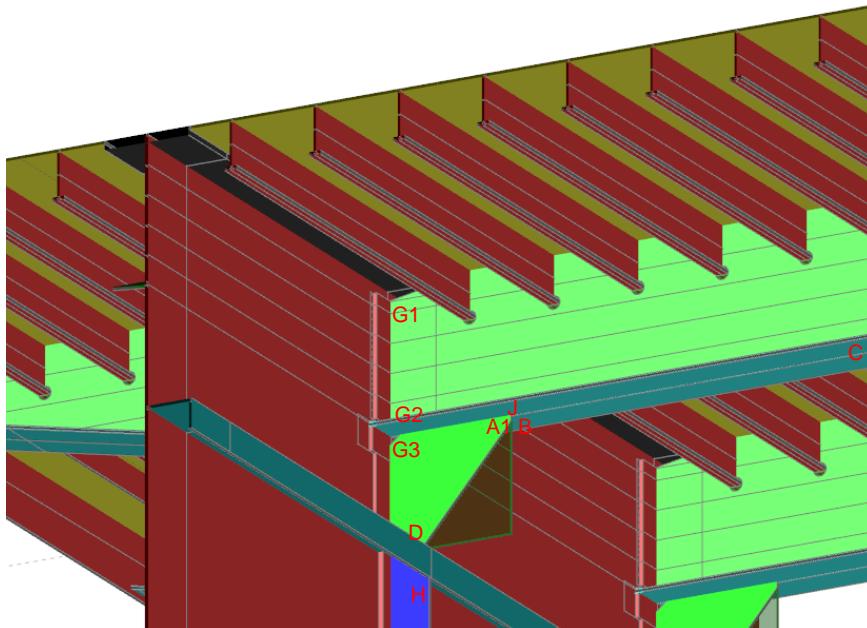


Figuur 160 – Gemeten excentriciteit in de dwarsdrager bij de portalen

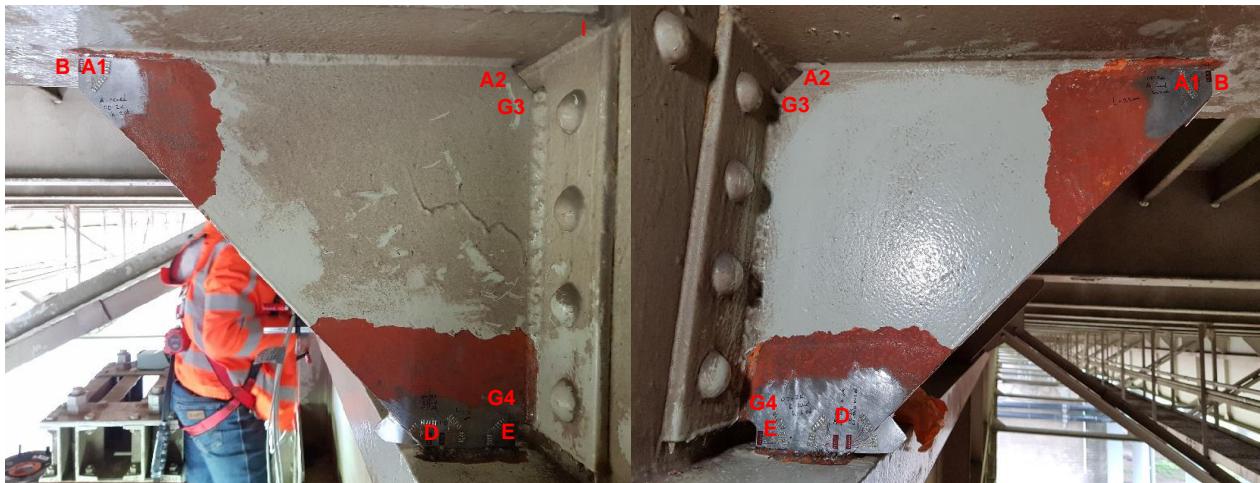
In de volgende hoofdstukken is de schade berekend op basis van metingen. Hierbij zijn dus al effecten van een eventuele aanwezige excentriciteit zijn meegenomen, maar dat hoeft niet per se de maximale excentriciteit te zijn. Omdat de lasverbindingen met de horizontale flens van de langsverstijver over het algemeen toch niet voldoet is niet meer verder gekeken naar andere dwarsdragers met een hogere excentriciteit. Dit effect zal bij de versterkingsberekeningen nader onderzocht worden en meegenomen worden in het versterkingsontwerp.

5.20.2 Getoetste details

In de aansluiting tussen dwarsdrager en hoofdligger zijn verschillende details aanwezig die kritisch zijn ten aanzien van vermoeiing. Per onderdeel zal worden toegelicht hoe de toets-spanning is bepaald, waar de maatgevende snede zit en welke detailcategorie van toepassing is.



Figuur 163 – Getoetste details verbinding dwarsdrager (Type DD-zK)



Noordzijde

Zuidzijde

Figuur 164 – Overzicht details in schot dwarsdrager DD-zK

De volgende tabel geeft een beschrijving van de details die zijn getoetst en/of waar een meting is uitgevoerd.

Detail	Beschrijving	Vermoeiingstoets	Gemeten
A1	Hoeklas schot – onderflens (type a)	x	x
A2	Hoeklas schot – onderflens (type a)	x	
B	Hoeklas schot – onderflens (type b)	x	x
C	Nominale spanning onderflens		x
D	Hoeklas schot – horizontale flens langsverstijver	x	x
E	Hoeklas schot – horizontale flens langsverstijver	x	x
F	Hoeklas lijf dwarsverstijver – horizontale flens langsverstijver	x	x
G1/G2	Hoeklas lijf dwarsdrager – kopschot	x	x
G3/G4	Hoeklas schot – kopschot	x	x
H	Las lijf dwarsverstijver – verticale flens langsverstijver	x	x
I	Onderflens dwarsdrager – kopschot	x	
J	Onderflens dwarsdrager t.p.v. schot	1	
[1]	Niet maatgevend		

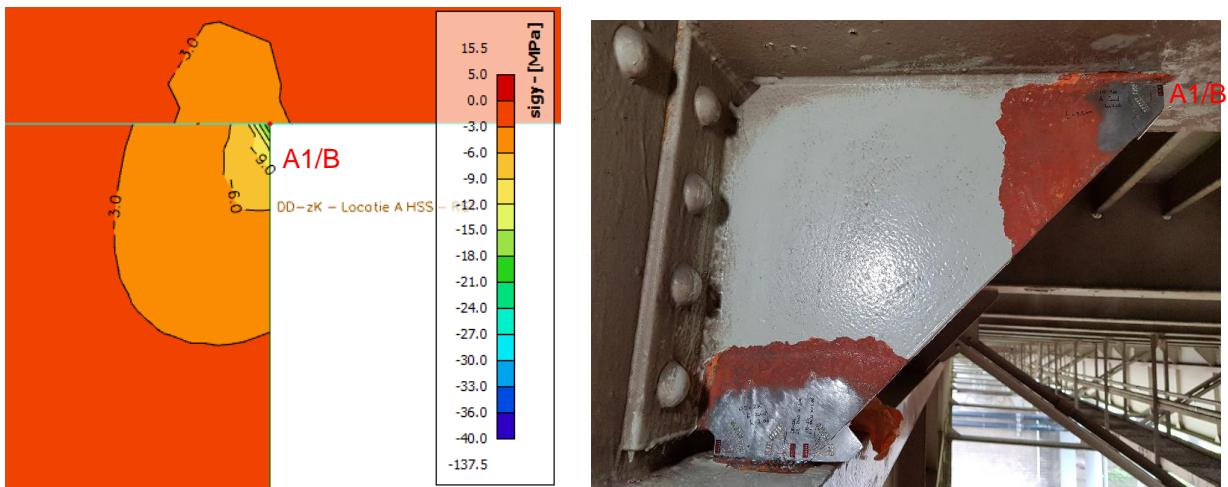
Tabel 59 – Overzicht toets- en meetlocaties tussendwarsdrager (DD-zK)

Voor de verbinding in de bovenflens van de dwarsdrager geldt dat deze direct bereden wordt door een wielprint. Uit de spanningswisselingen uit het lokale model volgt dat lokale buiging van het dek/bovenflens hoofdlijger in de richting haaks op het lijf van de hoofdlijger bepalend is voor de spanningswisseling en dus de vermoeiingsberekening. **Toetsing van de dekconstructie valt echter buiten de scope van de opdracht en is daarom niet verder getoetst. De vermoeiingsberekeningen zijn weergegeven in Bijlage E20.**

Begrijpelijk vanuit oogpunt opdracht RHDHV. Maar hoe gaat RWS hiermee om?

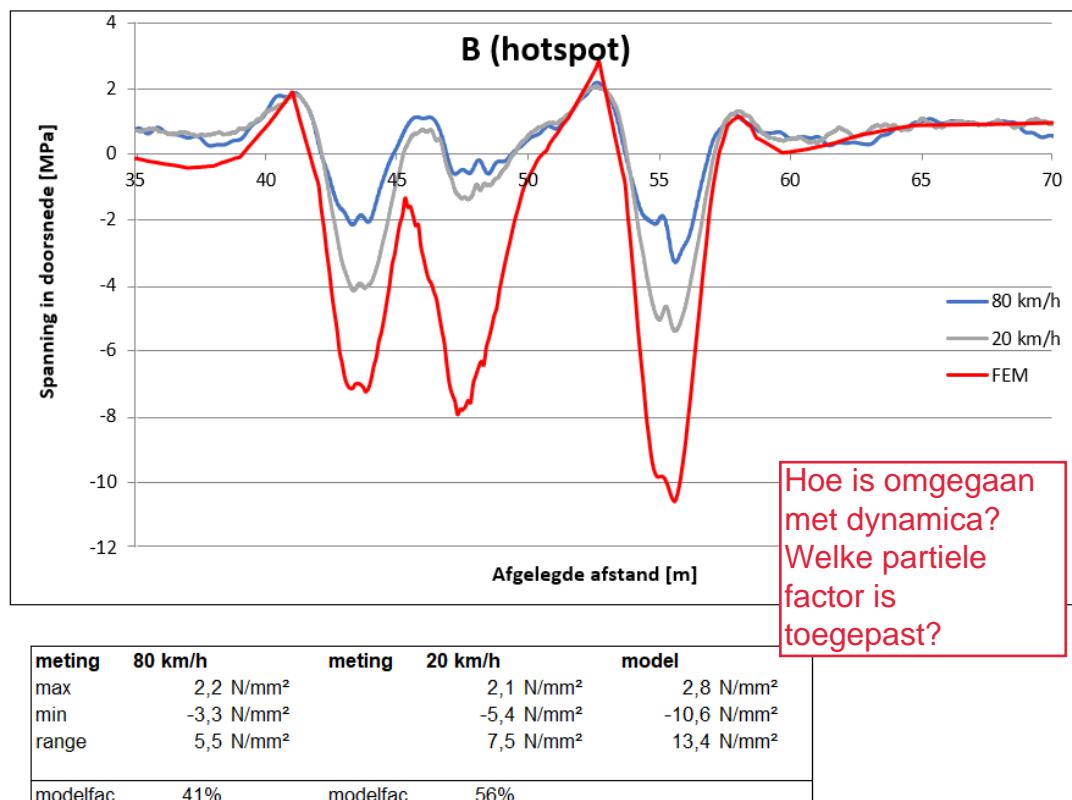
5.20.3 Detail A1/B - Aansluiting schot – onderflens dwarsdrager

Detail A1/B betreft de aansluiting aan de bovenzijde, aan het einde van het schot met de onderflens van de dwarsdrager. Op deze locatie is een spanningsconcentratie aanwezig. Metingen zijn uitgevoerd aan de voor en achterzijde (detail A1) en aan de kopse zijde (detail B).



Figuur 165 – Spanningen ter plaatse van detail A1/B schot – onderflens dwarsdrager

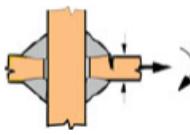
In Bijlage G is de vergelijking van de gemeten spanningen en de berekende spanningen gegeven voor detail A1 (noord en zuid zijde) en detail B. De hoogste gemiddelde gemeten hotspot spanningswisseling treedt op in detail B.



Figuur 166 – Spanningswisseling hotspotspanningen DD-zK detail B

Detail A1/B – Teen van de las

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald (56%). Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (detail B). De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening van de teen van de las vermenigvuldigd met deze modelfactor, waarna een vermoeiingsberekening is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van een hotspot-analyse met een detailcategorie DC = 90, conform tabel 3.3, detail 6 van IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components” [10].

No.	Structural detail	Description	Requirements	FAT Steel	FAT Alu.
6		Cruciform joints with load-carrying fillet welds	Fillet welds, as welded	90	36

Figuur 167 – Detailcategorie voor detail A1 – teen van de las [10]

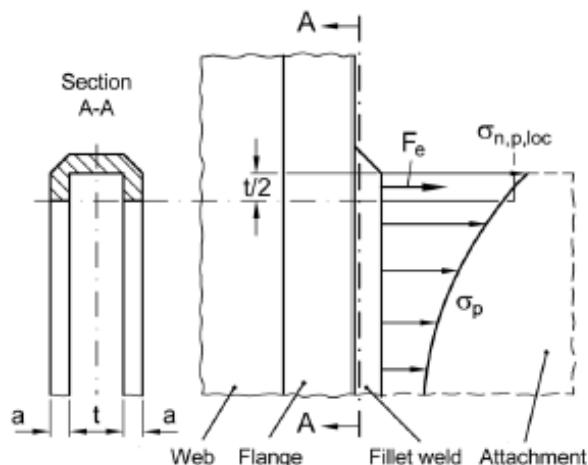
Uit deze berekening volgt dat er op dit moment ter plaatse van detail A1 nog geen schade is opgetreden.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1.35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabel 60 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail A1 – teen van de las

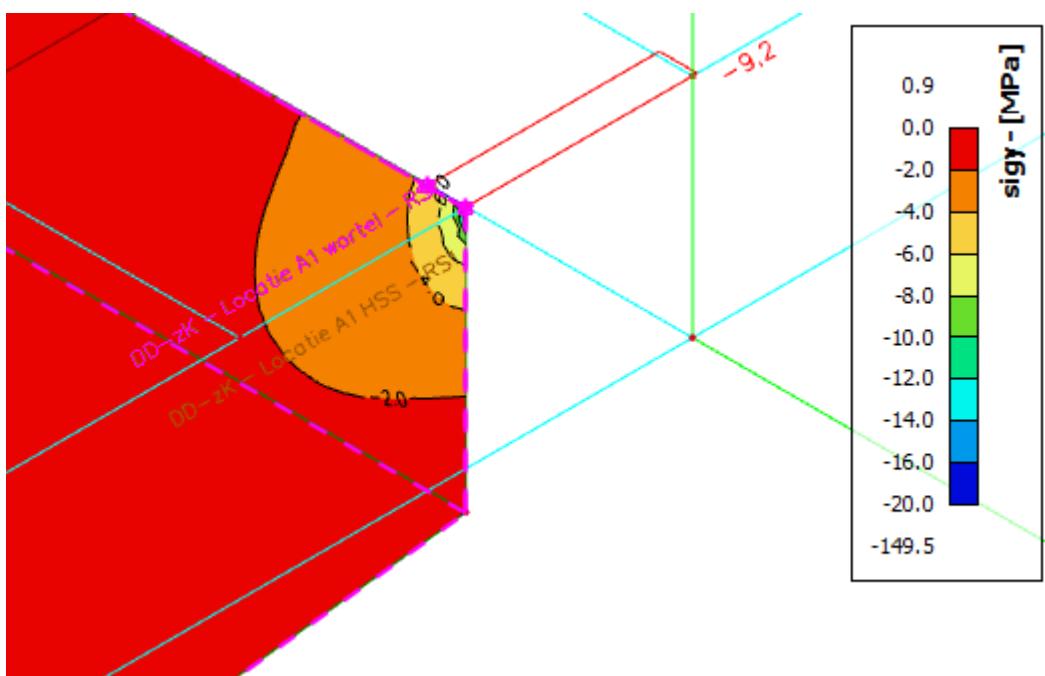
Detail A1/B – wortel van de las

Omdat er een sterke spanningsgradiënt aanwezig is bij het uiteinde van het schot, is de spanningswisseling bepaald conform "IIW Guideline for the Assessment of Weld Root Fatigue" [11] paragraaf 3.3.2. Hierin wordt een methode beschreven voor het bepalen van de spanningswisselingen voor hoeklassen aan de einden van een plaat, waarbij de kracht over de laatste $t/2$ ($= 5 \text{ mm}$) wordt uitgesmeerd over de hoekklassen aan beide zijden van de plaat en de las aan de kopse zijde, zie het gearceerde oppervlak in onderstaand figuur.



Figuur 168 – Geometrie en belasting aan het einde van een aansluiting [11]

De gemiddelde spanning is bepaald met behulp van SCIA door over de laatste 5 mm de gemiddelde spanning in de plaat op te vragen.



Figuur 169 – Gemiddelde spanning in de laatste 5 mm van de plaat (σ_y) t.g.v. de eenheidslast ($2 \times 50 \text{ kN}$)

Voor de toetsing dient de spanningswisseling in de las bepaald te worden. Conform de bovengenoemde methode kan de (maximale) normaalspanning in de las ($a = 4 \text{ mm}$) ten gevolge van de eenheidslast ($2 \times 50 \text{ kN}$) als volgt bepaald worden.

$$\sigma_{\perp,w,loc} = \frac{F_y}{2a \cdot t + a^2} = \frac{\sigma_y \cdot 5\text{mm} \cdot 10\text{mm}}{2 \cdot 4\text{mm} \cdot 10\text{mm} + (4\text{mm})^2} = 0.52 \cdot \sigma_y$$

De (maximale) schuifspanning parallel aan de las kan op vergelijkbare wijze worden bepaald en is gelijk aan:

$$\tau_{\parallel,w,loc} = \frac{F_z}{2a \cdot t + a^2} = \frac{\tau_{xy} \cdot 5\text{mm} \cdot 10\text{mm}}{2 \cdot 4\text{mm} \cdot 10\text{mm} + (4\text{mm})^2} = 0.52 \cdot \tau_{xy}$$

Hieruit volgt een toetsspanning van:

$$\sigma_{n,w,loc} = \sqrt{\sigma_{\perp,w,loc}^2 + \tau_{\parallel,w,loc}^2}$$

Conform TNO Notitie 100315818/ALL mag de verbinding uitgerekend worden met detailcategorie 40, waarbij rekening wordt gehouden met de aanwezige drukspanning. Dit is dus iets gunstiger als detailcategorie 36* conform de Eurocode.

$$\Delta\sigma_{eff} = \begin{cases} \alpha * \Delta\sigma & \text{if } \sigma_{max,i} \leq 0 \\ \Delta\sigma & \text{if } \sigma_{min,i} \geq 0 \\ \sigma_{max,i} - \alpha * \sigma_{min,i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

waarin:

$$\sigma_{max,i} = \frac{\Delta\sigma}{1-R} + \sigma_{res} \quad (6)$$

$$\sigma_{min,i} = \sigma_{max,i} - \Delta\sigma \quad (7)$$

	σ_{res} [N/mm ²]	α [-]	representatief voor
type 1	28.53	0.00	contact tussen platen
type 2	13.12	0.63	geen contact tussen platen

Zowel voor type 1 als type 2 geldt bij deze effectieve spanningsrange een karakteristieke vermoeiingssterkte bij $2 \cdot 10^6$ wisselingen van $\Delta\sigma_c = 40 \text{ N/mm}^2$, een kniepunt bij 10^7 wisselingen en een afkapwaarde bij 10^8 wisselingen, met hellingsparameters $m_1 = 3$ en $m_2 = 5$. Zie Figuur 11 en Figuur 12.

Figuur 170 – Methode voor toetsing hoek- en kruislassen conform [2]

In afwijking van de methode conform IIW [11], waarbij een vergelijkspanning wordt gehanteerd, moet nu onderscheid gemaakt worden tussen de normaalspanning en de schuifspanningen. De normaalspanning loodrecht op de lengteas van de las ($\sigma_{\perp,w,loc}$) wordt getoetst op detailcategorie 40, rekening houdend met de aanwezige (druk)spanning, conform bovenstaande methode van TNO, de schuifspanning evenwijdig aan de lengteas van de las ($\tau_{\parallel,w,loc}$) wordt getoetst op detailcategorie 80, conform NEN-1993-1-9. De schade van de beide berekeningen dient bij elkaar opgeteld te worden.

In onderstaande tabellen zijn de toetsresultaten weergegeven voor de normaalspanning, waarbij getoetst is volgens de methode uit de notitie van TNO, zowel voor type 1 (wel contact tussen de platen) als type 2 (geen contact tussen de platen). De maatgevende van de twee toetsingen dient aangehouden te worden en opgeteld bij de schade door de schuifspanning evenwijdig aan de lengteas van de las.

Type 1	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1.35	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
1.15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1.00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 61 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail A1 – wortel van de las ($DC = 40$, type 1)

Type 2	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1.35	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1.15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1.00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 62 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail A1 – wortel van de las ($DC = 40$, type 2)

De schuifspanningswisseling is dermate laag dat hier geen schade door ontstaat.

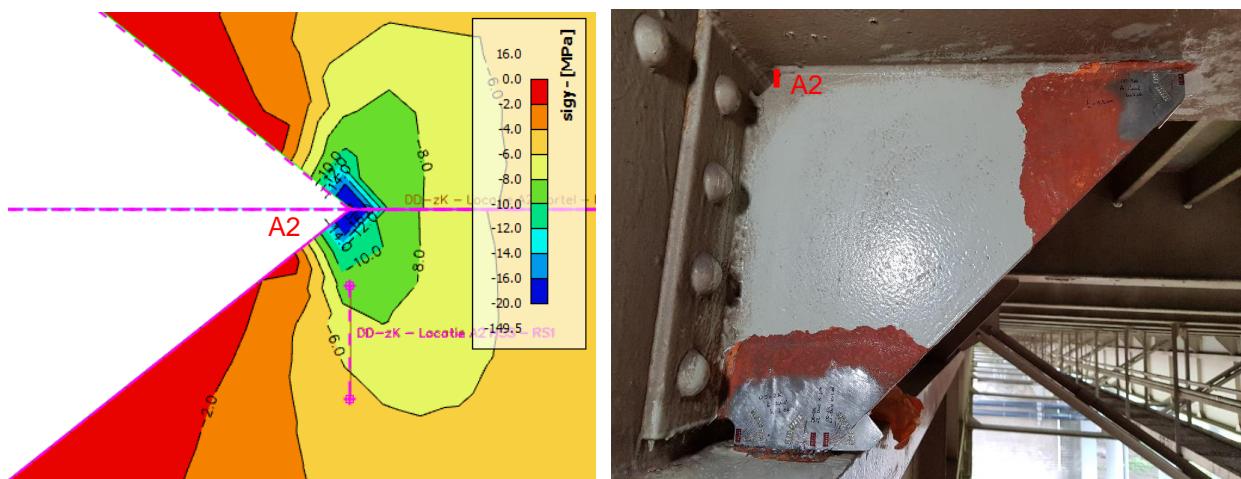
Het is mij onduidelijk of de berekening nu gecorrigeerd is o.b.v. de meting of niet?

5.20.4 Detail A2 – Aansluiting schot – dwarsdrager

Detail A2 bevindt zich bij het laspoortje dicht bij de hoofdlijger, in de aansluiting schot met de onderflens van de dwarsdrager. Er zijn geen metingen aan dit detail uitgevoerd. Dit detail is vergelijkbaar met detail A1 en is op vergelijkbare wijze getoetst, op basis van de berekende invloedslijnen.

Detail A2 – teen van de las

Voor detail A2 geldt dat de berekende hotspotspanning hoger is dan bij detail A1. De schadeberekening voor locatie A2 is daarom ook berekend.



Figuur 171 – Spanningen ter plaatse van locatie A2, aansluiting schot – onderflens dwarsdrager

De schadecategorie is gelijk aan locatie A1 aangehouden als DC = 90, op basis van een hotspot analyse.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1.35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1.15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1.00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 63 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie A2

Locatie A2 – wortel van de las

De schadeberekening van de wortel van de las is op dezelfde wijze als voor locatie A1 uitgevoerd. Ook hier is de schuifspanningswisseling dermate laag dat daar geen schade uit zal ontstaan.

Type 1 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1.35	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
1.15	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
1.00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

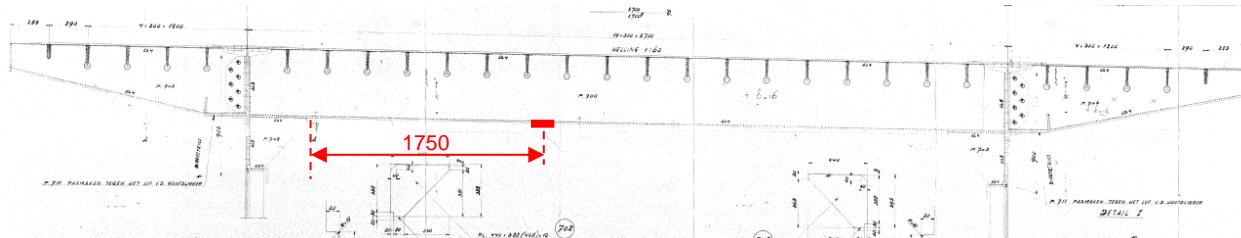
Tabel 64 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie A2 – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 2 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1.35	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
1.15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1.00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

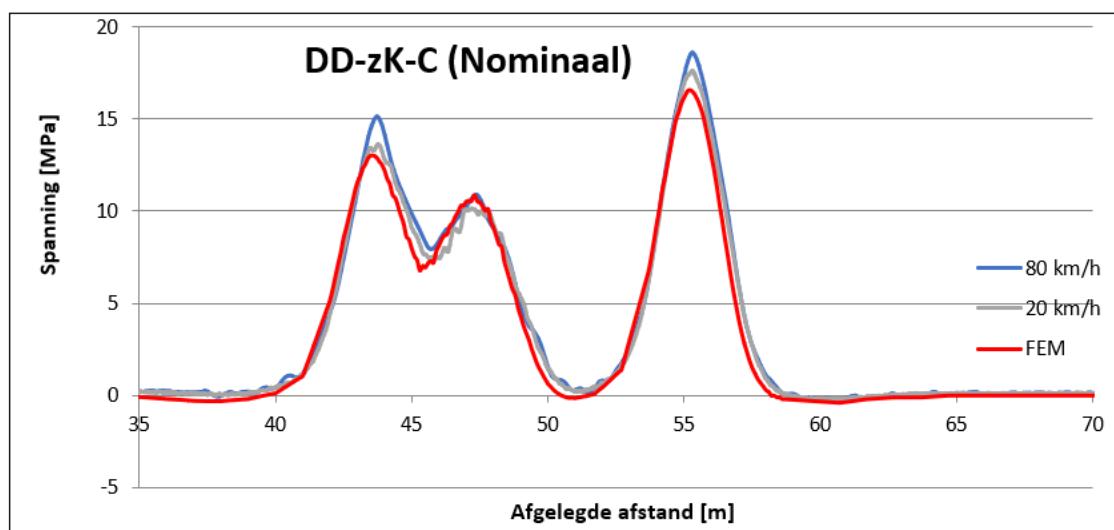
Tabel 65 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie A2 – wortel van de las (DC = 40, type 2)

5.20.5 Detail C – Onderflens dwarsdrager (nominaal)

Ter plaatse van locatie C is een meting uitgevoerd om een vergelijking tussen de nominale spanningen uit het rekenmodel en de metingen uit te kunnen voeren. Hiervoor is gemeten op 1,75 m uit de rand van het schot.



Figuur 172 – Overzicht DD-zK locatie C



meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	18,6 N/mm ²		17,6 N/mm ²	16,6 N/mm ²
min	-0,2 N/mm ²		-0,2 N/mm ²	-0,4 N/mm ²
range	18,8 N/mm ²		17,8 N/mm ²	17,0 N/mm ²
modelfac.	111%	modelfac.	105%	

Figuur 173 – Spanningswisseling (nominaal) DD-zK locatie C

De spanningen komen goed overeen tussen model en meting. Omdat locatie C een nominale spanning betreft en niet een vermoeiingsgevoelig detail is er voor deze locatie geen vermoeiingsberekening uitgevoerd.

5.20.6 Detail D – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver

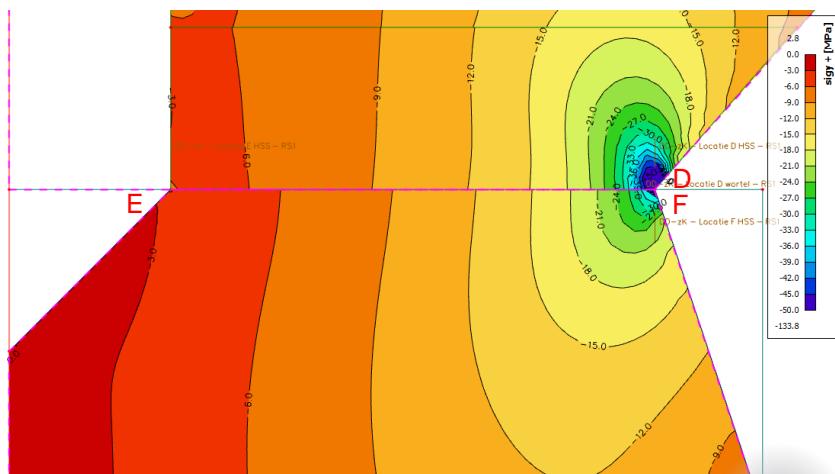
Detail D bevindt zich aan de onderzijde van het schot, bij de aansluiting met de horizontale flens van de langsverstijver. Voor dit detail zijn metingen op twee plekken uitgevoerd, D1 is zo veel mogelijk op de hoek, D2 op 10 mm naar binnen.



Figuur 174 – Detailfoto's DD-zK detail D1 en D2 north

Detail D – teen van de las

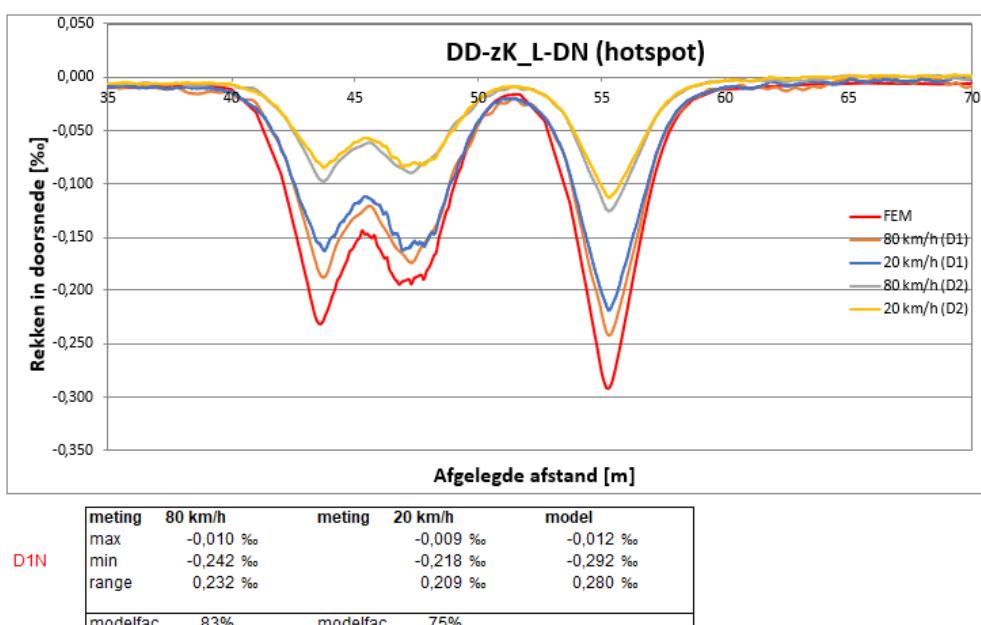
De spanning ter plaatse van de teen van de las is bepaald door de hotspot spanning te bepalen ter plaatse van de spanningspiek aan het einde van het schot, door een extrapolatie van de spanningen op 0,4t en 1,0t.



Figuur 175 – Spanning ter plaatse van de aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver (σ_{y+}) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN)

In afwijking van de overige details is er voor deze locatie gekozen om de vergelijking tussen meting en berekening op basis van de rekken te doen, om zo effecten van dwarscontractie eruit te filteren. In Bijlage G is een vergelijking gemaakt van de berekende hotspotrekken en de gemeten hotspot rekken ter plaatse van D1 en D2, zowel voor de noord- als de zuidzijde.

Op basis van de verhouding van de rekrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald. Deze is gebaseerd op de grootste gemeten rekswisseling bij 20 km/h (van DD-zK detail D1, noordzijde) en is gelijk aan 75%.



Figuur 176 – Hotspotrekken DD-zK detail D, noordzijde

De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening vermenigvuldigd met deze modelfactor (75%), waarna een vermoeiingsberekening van de teen van de las is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van Detailcategorie $\Delta\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2$, o.b.v. IIW rapport "Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components" [10], tabel 3.3, detail 6, vergelijkbaar voor detail A1.

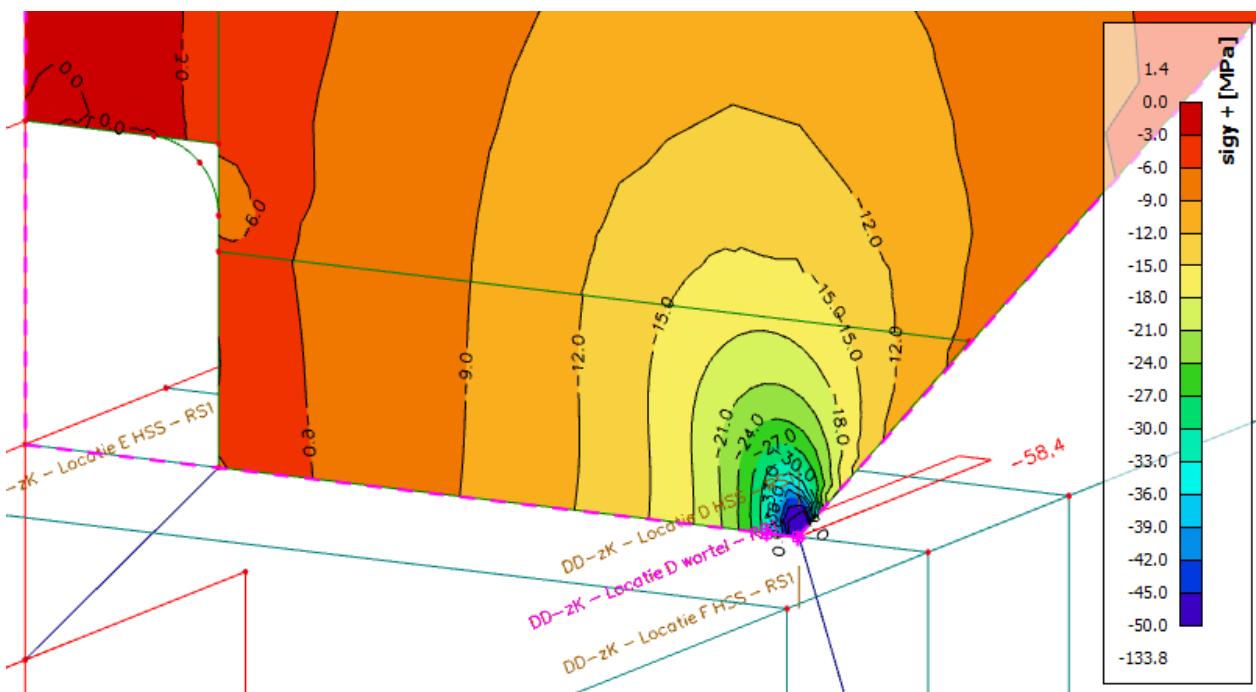
De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald eind 2018 en eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	18,5	48,3	14,6	27,7	15,8	30,6	6,9	13,4
1,15	10,9	28,7	8,6	16,3	9,3	18,2	3,9	7,8
1	6,7	17,9	5,2	9,9	5,8	11,3	2,4	4,7

Tabel 66 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor DD-zK detail D.

Detail D – Wortel van de las

De wortel is op gelijke wijze als voor detail A1 en A2 getoetst. Hiervoor is de gemiddelde spanning in de laatste $t/2 = 5 \text{ mm}$ uitgelezen en vertaald naar een spanning in de las.



Figuur 177 – Gemiddelde spanning in de laatste 5 mm van de plaat (σ_y+) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN) t.p.v. detail D

Onderstaand is het resultaat van de schadeberekening weergegeven voor de normaalspanning in de las ($\sigma_{\perp,w,loc}$), waarbij is getoetst op detailcategorie 40, rekening houdend met de aanwezige (druk)spanning door het eigen gewicht (zie detail A1 voor de beschrijving van deze methode). Er is geen rekening gehouden met de lagere gemeten spanning, omdat het voor de wortel lastig is om eenduidig de reductie te bepalen en er toch al grote overschrijdingen zijn gevonden voor de teen van de las.

Type 1 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 67 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail D – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 2 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	21,7	56,0	17,1	32,1	18,3	35,5	7,8	15,3
1,15	13,1	34,0	10,3	19,3	11,1	21,5	4,7	9,2
1	8,4	21,9	6,6	12,4	7,1	13,8	3,0	5,9

Tabel 68 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail D – wortel van de las (DC = 40, type 2)

Te zien is dat bij type 1, waar wordt uitgegaan van contact tussen de platen, er geen schade optreedt. Dit komt doordat er een relatief hoge spanning door de permanente belasting optreedt, die de eigenspanningen grotendeels compenseert. Hierdoor is nauwelijks de gehele wisseling in druk, die bij methode 1 vermenigvuldigd moet worden met $\alpha = 0,00$. Bij type 2 wordt er wel een (grote) schade gevonden, omdat hier de spanningswisseling in druk wel meegenomen moet worden met $\alpha = 0,63$. Gezien de overschrijding is de schade door de schuifspanning niet meer bepaald, aangezien de verbinding nu al niet voldoet. De schade door de schuifspanning moet eigenlijk nog opgeteld worden bij bovengenoemde schade.

Geconcludeerd wordt dat bij locatie D zowel de teen als de wortel van de las niet voldoet.

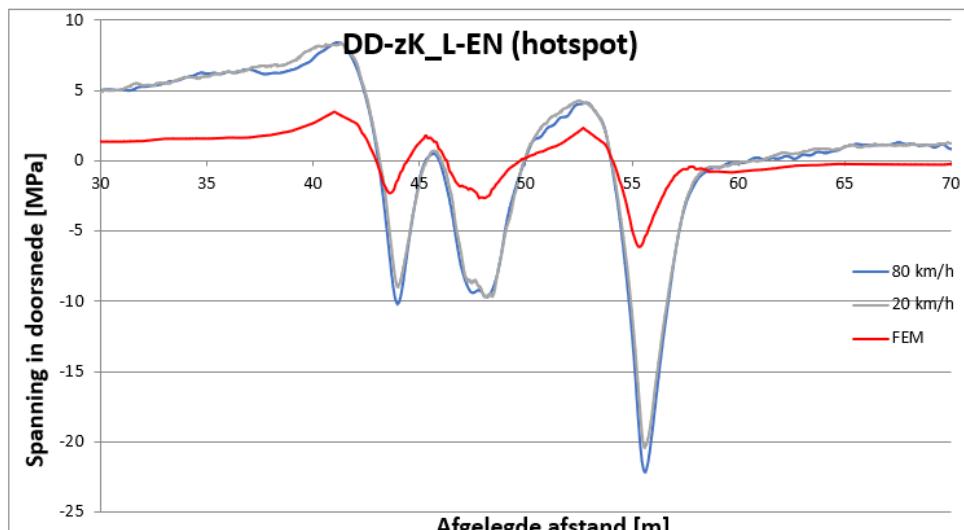
5.20.7 Detail E – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver

Detail E bevindt zich aan de onderzijde van het schot, bij de aansluiting met de horizontale flens van de langsverstijver, aan de zijde dicht bij het lijf van de hoofdlijger. Hier bevindt zich een laspoortje.



Figuur 178 – Detailfoto DD-zK detail E

In het model werden hier relatief lage spanningen gevonden. Tijdens de meting bleek dat de gemeten spanningen aanzienlijk hoger uitvielen. Bijlage G geeft de vergelijking tussen de metingen en de berekende hotspotspanningen. De hoogste spanningen werden gevonden aan de noordzijde, waar de verhouding meting ten opzichte van berekende hotspotspanningswisseling gelijk is aan 292%.



Figuur 179 – Hotspotspanning DD-zK detail E, noordzijde

Detail E – Teen van de las

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald. Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (van DD-zK, detail E, noordzijde) en is gelijk aan 292%. De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening vermenigvuldigd met deze modelfactor, waarna een vermoeiingsberekening van de teen van de las is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van Detailcategorie $\Delta\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2$, o.b.v. IIW rapport "Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components" [10], tabel 3.3, detail 6.

De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald eind 2018 en eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,6	1,9	0,4	0,5	0,6	1,2	0,0	0,1
1,15	0,2	0,7	0,1	0,2	0,2	0,5	0,0	0,0
1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0

Tabel 69 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor DD-zK detail E

Detail E – Wortel van de las

De wortel van de las ter plaatse van locatie E is **vooralsnog** niet verder getoetst, gezien de overschrijdingen bij locatie D en in de teen van de las. Uitgangspunt is dat er een versterking moet komen voor de gehele lasverbinding (detail D en E).

5.20.8 Detail F – Aansluiting horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver

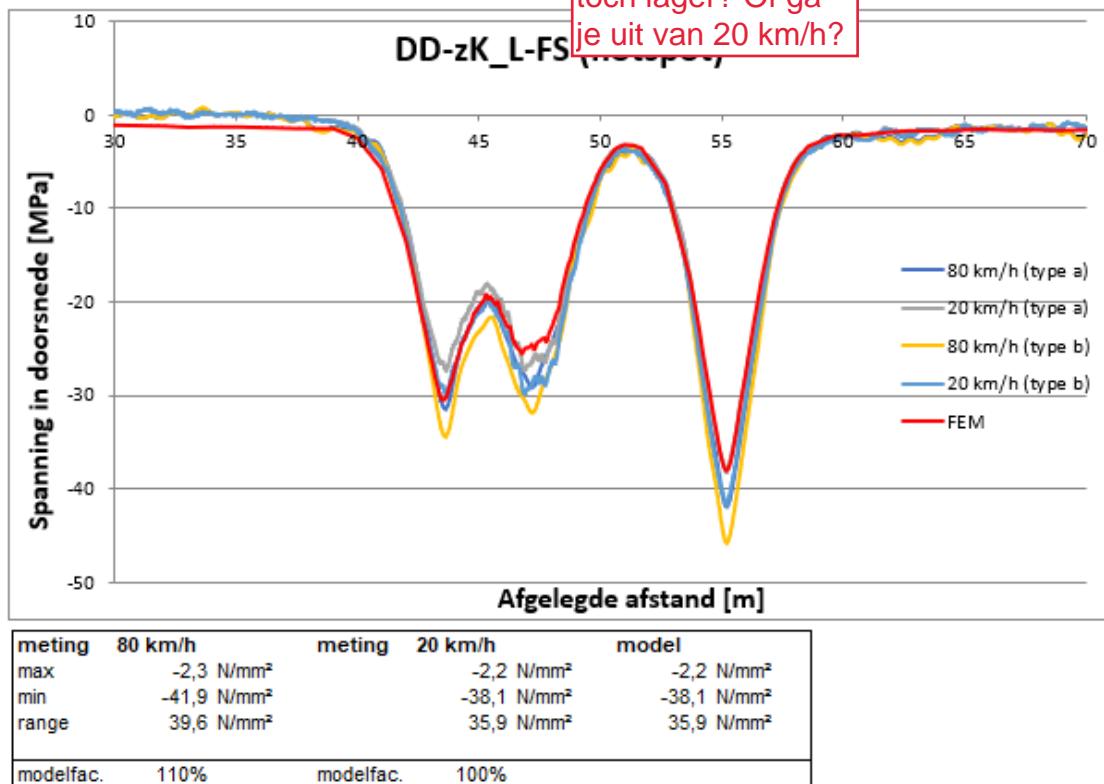
Detail F bevindt zich op het lijf van de dwarsverstijver, net onder de horizontale flens van de langsverstijver, aan de zijde dicht bij de verticale flens van de langsverstijver. Hier bevindt zich een laspoortje.



Figuur 180 – Detailfoto DD-zK detail F

Bijlage G geeft de vergelijking tussen de metingen en de berekende hotspotspanningen. De hoogste spanningen werden gevonden aan de zuidzijde, waar de verhouding meting ten opzichte van berekende hotspotspanningswisseling gelijk is aan 100%.

FEM spanning is
toch lager? Of ga
je uit van 20 km/h?



Figuur 181 – Hotspotspanning DD-zK detail F, zuidzijde

Detail F – Teen van de las

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald. Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (van DD-zK, detail F, zuidzijde). Er is daarbij uitgegaan van een type a extrapolatie. De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening vermenigvuldigd met deze modelfactor, waarna een vermoeiingsberekening van de teen van de las is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van Detailcategorie $\Delta\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2$, o.b.v. IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components” [10], tabel 3.3, detail 6.

De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald eind 2018 en eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	7,3	19,4	5,5	10,4	6,2	12,2	2,4	4,8
1,15	4,1	11,0	3,0	5,8	3,4	6,9	1,3	2,7
1	2,3	6,4	1,7	3,3	2,0	4,0	0,7	1,5

Tabel 70 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor DD-zK detail F

Detail F – Wortel van de las

De wortel ter plaatse van detail F is op gelijke wijze als voor detail D getoetst. Hiervoor is de gemiddelde spanning in de laatste $t/2 = 5,4$ mm uitgelezen en vertaald naar een spanning in de las.

Onderstaand is het resultaat van de schadeberekening weergegeven voor de normaalspanning in de las ($\sigma_{\perp,w,loc}$), waarbij is getoetst op detailcategorie 40, rekening houdend met de aanwezige (druk)spanning door het eigen gewicht [lager??] (beschrijving van deze methode). Er is geen rekening gehouden met de lagere gemeten spanning, omdat het voor de wortel lastig is om eenduidig de reductie te bepalen en er toch al grote overschrijdingen zijn gevonden voor de teen van de las.

Type 1 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,1	0,1	0,3	1,0	0,0	0,0	0,2	0,6
1,15	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 71 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail F – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 2 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	5,6	14,6	4,2	8,0	4,7	9,2	1,8	3,7
1,15	3,2	8,5	2,4	4,5	2,7	5,3	1,0	2,1
1	1,9	5,1	1,4	2,7	1,6	3,2	0,6	1,2

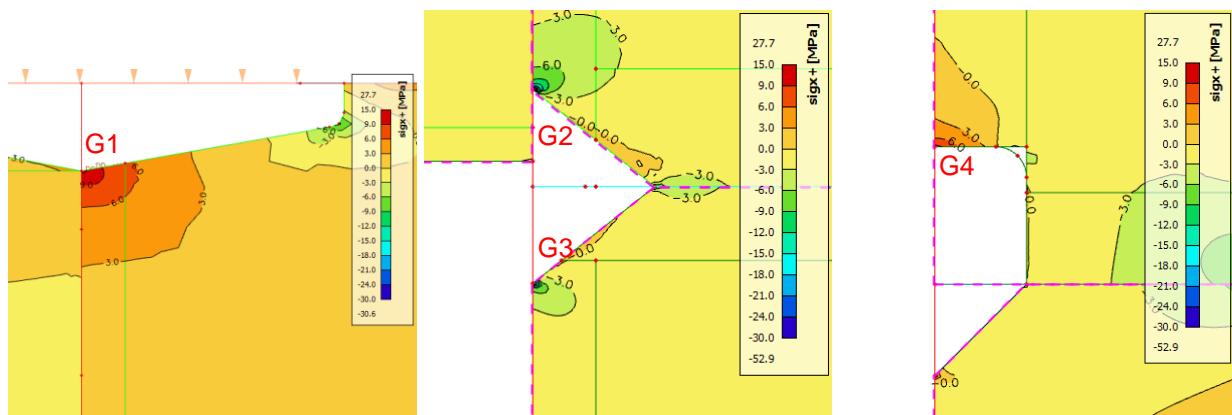
Tabel 72 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail F – wortel van de las (DC = 40, type 2)

Maatgevend is de berekening type 2, waarbij er uitgegaan wordt van geen contact tussen de platen. Gezien de overschrijding is de schade door de schuifspanning niet meer bepaald, aangezien de verbinding nu al niet voldoet. De schade door de schuifspanning moet eigenlijk nog opgeteld worden bij bovengenoemde schade.

Geconcludeerd wordt dat bij locatie F zowel de teen als de wortel van de las niet voldoet.

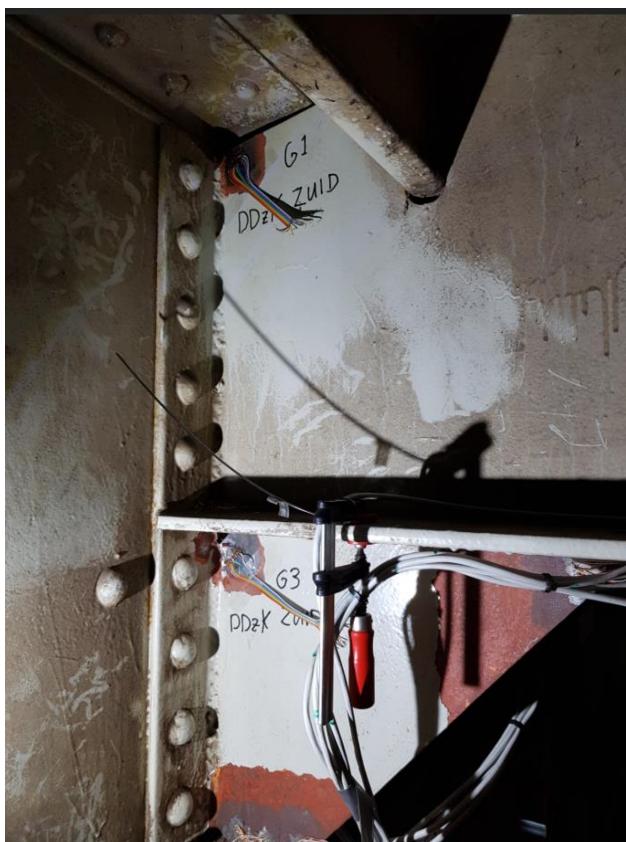
5.20.9 Detail G – Aansluiting lijf/schot dwarsdrager – kopschot op lijf hoofdlijker

De spanningen ter plaatse van de lasverbinding tussen het lijf van de dwarsdrager en het kopschot en tussen het schot onder de dwarsdrager en het kopschot is in onderstaande figuren weergegeven. Het kopschot is op zijn beurt weer verbonden met het lijf van de hoofdlijker met klinknagels. Met name bij de laspoortjes treden spanningsconcentraties op.



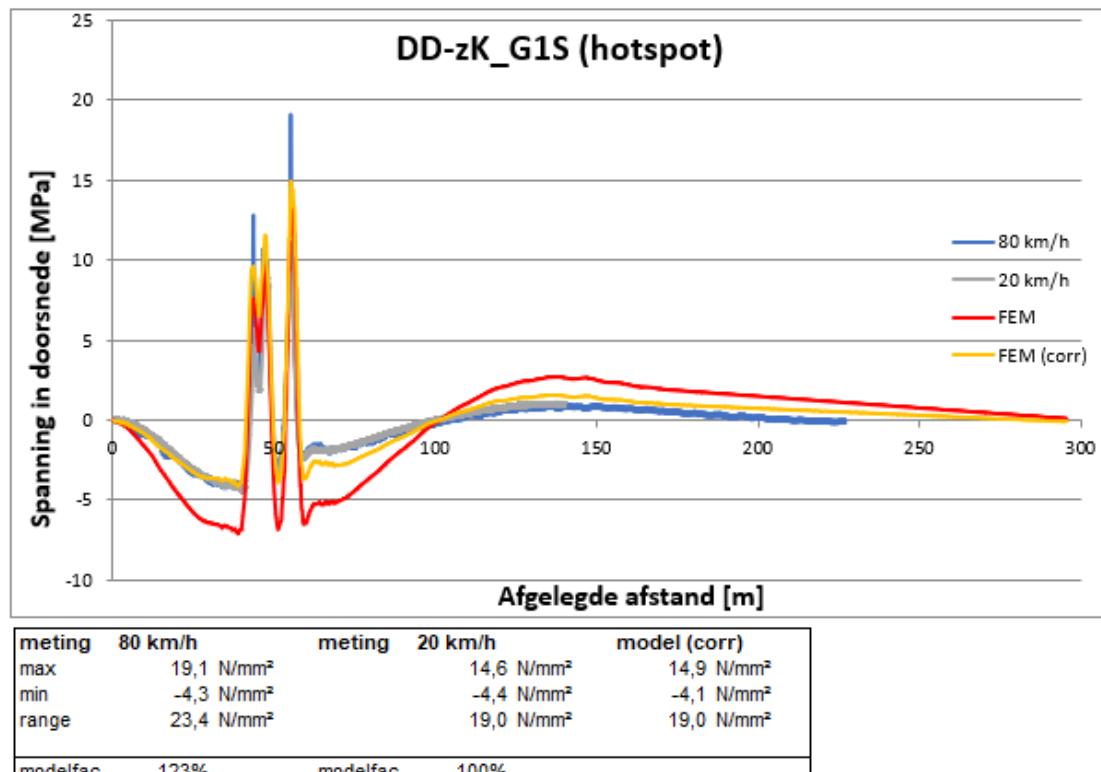
Figuur 182 – Spanningen ter plaatse van aansluiting lijf dwarsdrager/schot – kopschot op lijf hoofdlijker, DD-zk, Detail G

Bij de meting kwam naar voren dat het laspoortje ter plaatse van G2 niet aanwezig blijkt te zijn. Er is daarom besloten om metingen uit te voeren bij G1 en G3. Er is alleen aan de zuidzijde gemeten. Bijlage G geeft de vergelijking tussen de metingen en de berekende hotspotspanningen.



Figuur 183 – Detailfoto's DD-zK locatie G1 en G3

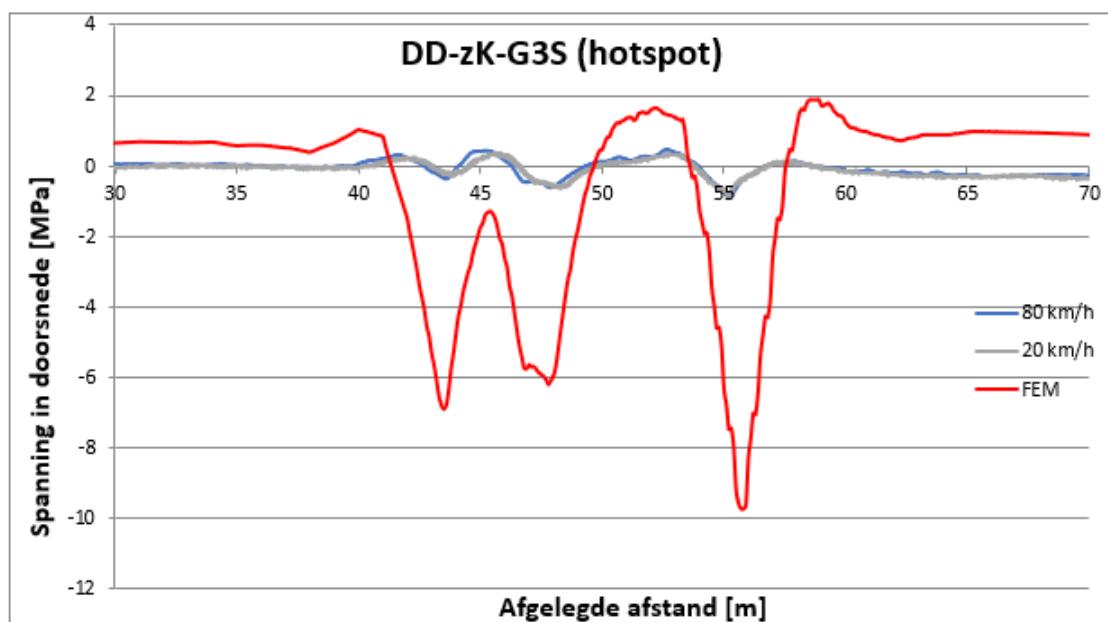
Voor locatie G1 bleek het niet mogelijk te zijn om één factor te bepalen voor de verhouding tussen meting en berekening, maar is onderscheid gemaakt tussen een verschaling voor het globale gedrag en een andere factor voor de verschaling voor het lokale gedrag. Dit is verder toegelicht in Bijlage G. Wanneer met deze gecorrigeerde invloedslijn wordt gerekend, komt de spanningswisseling die berekend wordt (geel weergegeven) overeen met de gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (grijs weergegeven). De verschaling van de invloedslijn is zodanig gedaan dat ook de grootste wisseling qua grote overeenkomt.



Figuur 184 – Hotspotspanning DD-zK detail G1, zuidzijde

Voor locatie G3 is te zien dat de gemeten spanningswisseling nagenoeg nul is. Waarschijnlijk komt dit doordat G3 nagenoeg in de neutrale lijn van de aansluiting ligt. In de berekening werd een aanzienlijk grotere spanning gevonden. Dit zal, onder andere, komen doordat er in het rekenmodel iets andere stijfthes tussen de verschillende onderdelen zullen optreden als in werkelijkheid, bijvoorbeeld door de speling in de klinknagelverbinding.

De gemeten spanningen ter plaatse van G3 zijn dusdanig laag dat er verder niet gerekend is aan vermoeiing.



meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	0,5 N/mm ²		0,4 N/mm ²	1,9 N/mm ²
min	-0,9 N/mm ²		-0,8 N/mm ²	-9,7 N/mm ²
range	1,3 N/mm ²		1,2 N/mm ²	11,6 N/mm ²
modelfac.	11%	modelfac.	10%	

Figuur 185 – Hotspotspanning DD-zK detail G3, zuidzijde

Detail G – Teen van de las

De hoogste spanningswisseling treedt op ter plaatse van detail G1. De toetsing van de teen van de las is daarom uitgevoerd voor detail G1. Hierbij is gerekend met de gecorrigeerde invloedslijn van de hotspotspanning. Omdat de spanning is bepaald met behulp van de hotspot methode is uitgegaan van detailcategorie 90. De schade blijkt net niet te voldoen bij $\gamma_{Mf} = 1,35$.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,4	1,4	0,2	0,2	0,4	0,9	0,0	0,0
1,25	0,3	0,9	0,1	0,1	0,9	0,0	0,0	0,0
1,15	0,2	0,5	0,1	0,1	0,2	0,3	0,0	0,0
1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0

Tabel 73 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie G1 – teen van de las

Er zit echter enige conservatisme in de berekening. Conform TNO rapport TNO-2019-R11394 “Diverse adviezen vermoeiingslevensduur dwarsdrageraansluitingen IJsselbrug” mag er voor de vermoeiingsberekening van de dwarsdragers uitgegaan worden van $\gamma_{Mf} = 1,25$. Bij deze factor voldoet de verbinding wel. Daarnaast is er nog geen rekening gehouden met het werkelijke verkeersspectrum, wat lager is als het aangehouden verkeersspectrum conform NEN 8701.

Detail G – Wortel van de las

De wortel ter plaatse van detail G1 is op gelijke wijze als voor detail F getoetst. Omdat detail G1 op trek wordt belast is er geen verschil tussen de toetsing op type 1 en type 2. Ook hier is gebruik gemaakt van een gecorrigeerde invloedslijn, maar nu op basis van het verschil in invloedslijnen tussen meting en berekening op 1,0t (zie Bijlage G). Er is gekozen voor deze locatie omdat dit beter overeen komt met de nominale spanning. De verwachting is dat de verschaling van de spanning in de laatste 0,5 t van de plaat, welke voor de toetsing van de wortel gebruikt wordt is, meer gerelateerd is aan de nominale spanning dan aan de hotspot spanning.

Getoetst is op detailcategorie DC = 40, op basis van de methode van TNO, zoals beschreven bij detail A1. Uit de toetsing met de gecorrigeerde invloedslijn volgen de volgende schadegetallen.

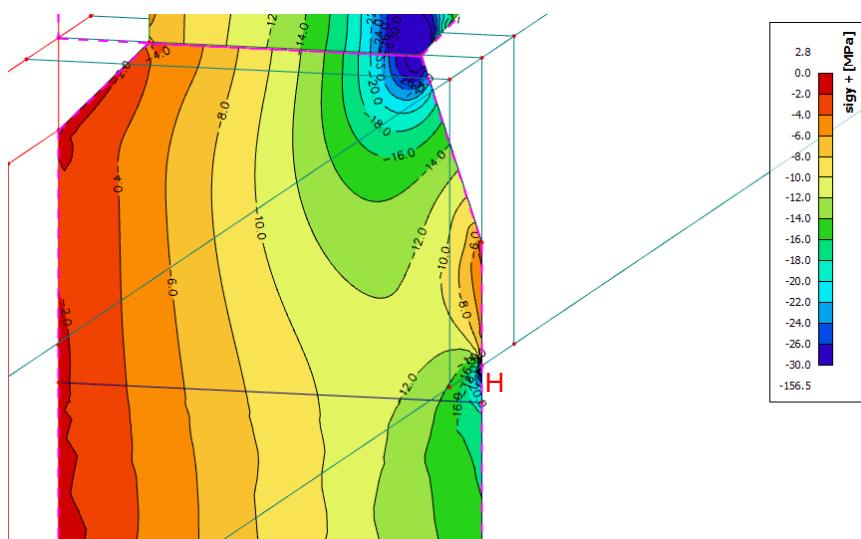
Type 1 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,3	0,9	0,1	0,1	0,3	0,6	0,0	0,0
1,15	0,1	0,4	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0
1,00	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0

Tabel 74 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie G1 – wortel van de las (DC = 40)

De schuifspanningen zijn in beide gevallen zeer laag en zullen niet in additionele schade resulteren. Ook hier geldt dat er nog enig conservatisme in de berekening zit.

5.20.10 Detail H – Aansluiting lijf dwarsverstijver – verticale flens langsverstijver

Detail H bevindt zich bij de aansluiting tussen het lijf van de dwarsverstijver en de verticale flens van de langsverstijver. Ter plaatse van het einde van de lasverbinding tussen de verticale flens van de langsverstijver en het lijf van de dwarsverstijver treedt een spanningsconcentratie op. Er zijn voor dit detail geen metingen uitgevoerd. Er is daarom uitgegaan van de berekende hotspotspanning voor de vermoeiingstoetsing.



Figuur 186 – Spanningen ter plaatse van aansluiting lijf dwarsverstijver – verticale flens langsverstijver, DD-zK, Detail H

De toetsing van de teen van de las van dit detail is uitgevoerd op basis van de hotspotspanning die bepaald is door een niet-lineaire extrapolatie van de resultaten op 4 mm, 8 mm en 12 mm vanaf de teen van de las (type b extrapolatie conform IIW). Hierbij is uitgegaan van een detailcategorie DC = 100, conform tabel 3.3, detail 6 van IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components” [10].

8	$L \leq 100 \text{ mm}$ 	Type "b" joint with short attachment	Fillet or full penetration weld, as welded	100
---	-----------------------------	--------------------------------------	--	-----

Figuur 187 – Detailcategorie voor detail H – teen van de las [10]

Uit de vermoeiingsanalyse volgen de volgende schadegetallen.

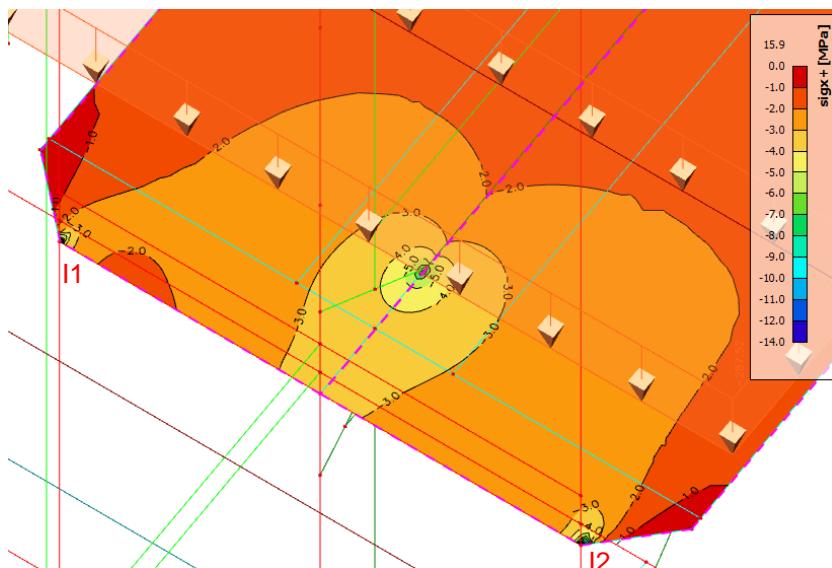
γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	7,9	21,1	5,9	11,2	6,9	13,5	2,7	5,3
1,15	4,5	12,1	3,3	6,2	3,9	7,7	1,5	2,9
1	2,6	7,0	1,8	3,5	2,3	4,5	0,8	1,6

Tabel 75 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie H – teen van de las (DC = 100)

5.20.11 Detail I – Aansluiting onderflens dwarsdrager – kopschot

Detail I – Teen van de las

In de onderflens is een versmalling aangebracht bij de aansluiting op de kopplaat van 250 mm naar 200 mm. Hier treden ook spanningspieken op, hoewel deze aanzienlijk lager zijn als de voorgaande pieken.



Figuur 188 – Spanning σ_x in de onderflens (spanning langsrichting) ter plaatse van detail I1 en I2.

Maatgevend voor de toetsing is detail I2. De teen van de hoeklas is op basis van de hotspotspanning getoetst op vermoeiing, uitgaande van detailcategorie 90, vergelijkbaar als voor detail A1. Hieruit volgen de volgende resultaten.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 76 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie I2 – teen van de las (DC = 90)

Detail I – Wortel van de las

De wortel is op vergelijkbare wijze als voor detail A1 getoetst. De spanning in de las is bepaald door de kracht te bepalen in de buitenste $12/2 = 6$ mm van de onderflens en deze te verdelen over de doorsnede van de hoeklas, inclusief kopse zijde. De toets is conservatief uitgevoerd op klasse 40, met het knippunt bij 10^7 , zonder rekening te houden met de aanwezige drukspanning. Uit de berekening volgt dat de lasverbinding voldoet.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 77 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie I2 – wortel van de las (DC = 40)

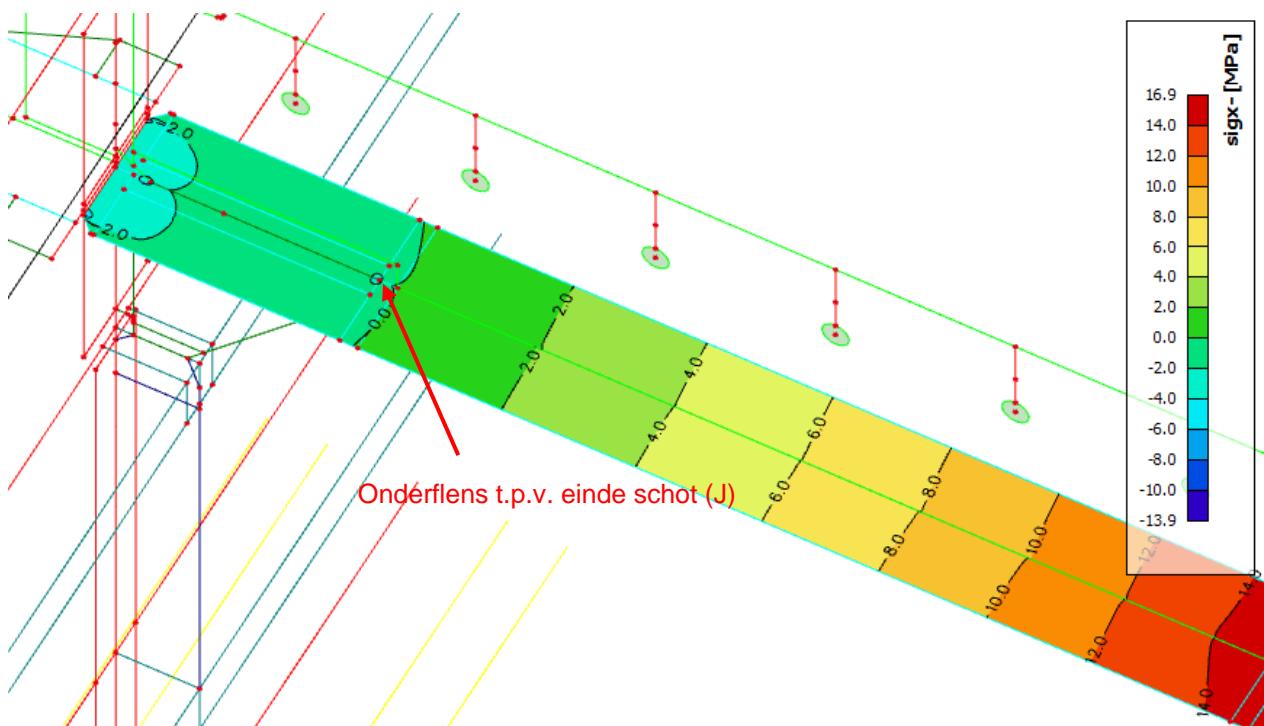
5.20.12 Detail J – Onderflens dwarsdrager t.p.v. einde schot

Voor de onderflens van de dwarsdrager geldt dat deze getoetst moet worden op detailcategorie 56, conform NEN -EN 1993-1-9 Tabel 8.4 Detail 1 ($L > 100$ mm), op basis van de nominale spanning in de onderflens.

Detail-categorie	Constructiedetail		Beschrijving	Eisen
80	$L \leq 50$ mm	 	<u>Aangelaste platen in de lengterichting:</u> 1) De detailcategorie varieert afhankelijk van de lengte L van de aangelaste plaat	De dikte van de aangelaste plaat moet kleiner zijn dan de hoogte ervan. Indien dit niet het geval is, volgens tabel 8.5, details 5 of 6.
71	$50 < L \leq 80$ mm			
63	$80 < L \leq 100$ mm			
56	$L > 100$ mm			

Figuur 189 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding DD-zK, detail J

Uit de berekening volgt dat de nominale langsspanningen in de onderflens ter plaatse van de aansluiting nagenoeg nul zijn.

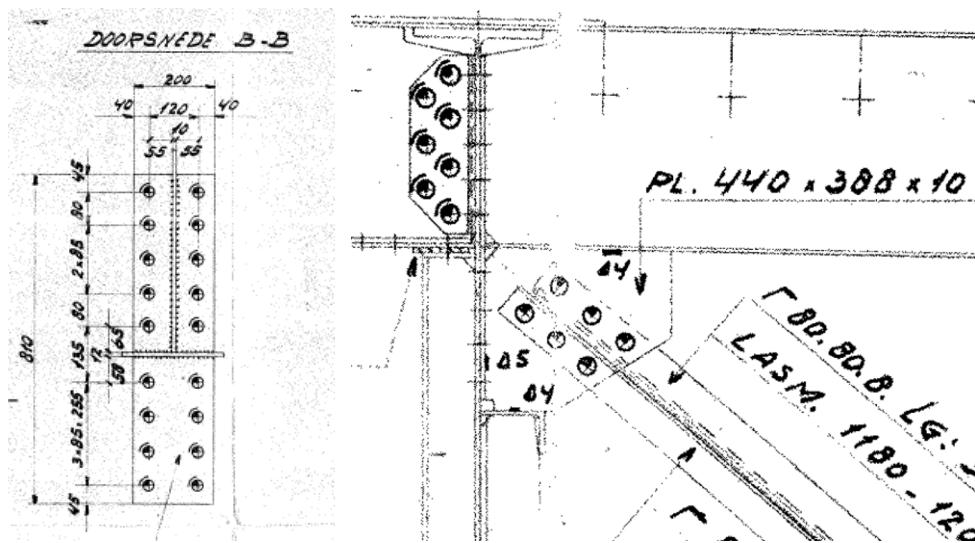


Figuur 190 – Spanning in onderflens t.g.v. eenheidslast op de tussendwarsdrager

De spanningswisseling is dermate laag dat hier geen schade op zal treden. Deze snede is daarom niet verder getoetst.

5.21 Type DD-K30: Verbinding hoofdlijker - dwarsdrager met K-verband met 1/2 INP30 dwarsverstijver

De dwarsdragers met K-verbanden zijn met het lijf en de onderflens verbonden met het lijf van de hoofdlijkers door middel van een kopplaat met klinknagels en een schot onder de onderflens. De bovenflens van de dwarsdrager (=dekplaat) is verbonden met de bovenflens van de hoofdlijker en het uitkragende deel van het dek buiten de hoofdlijkers door middel van een klinknagelverbinding. De dekplaat is namelijk onderbroken ter plaatse van de hoofdlijker.

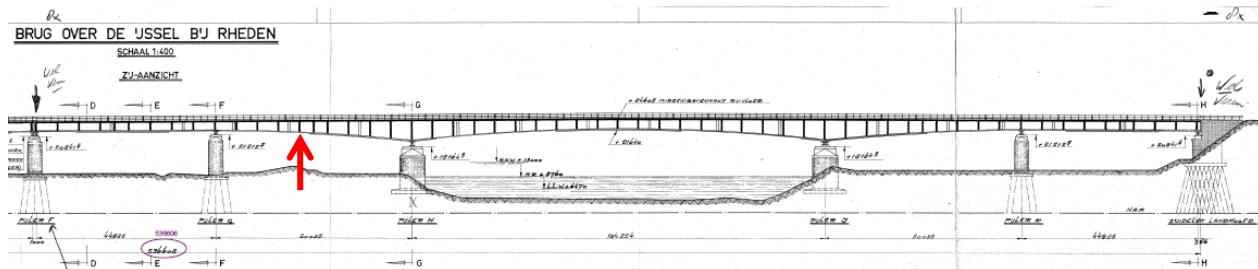


Figuur 191 – Overzicht van de verbinding Type DD-K30

In dit hoofdstuk wordt de toetsing van de dwarsdrager met K-verband ter plaatse van de dwarsverstijvers met een $\frac{1}{2}$ INP30 dwarsverstijver getoetst. De dwarsdragers met $\frac{1}{2}$ INP24 dwarsverstijvers wordt in hoofdstuk 5.22 getoetst.

5.21.1 Locatie getoetste dwarsdrager

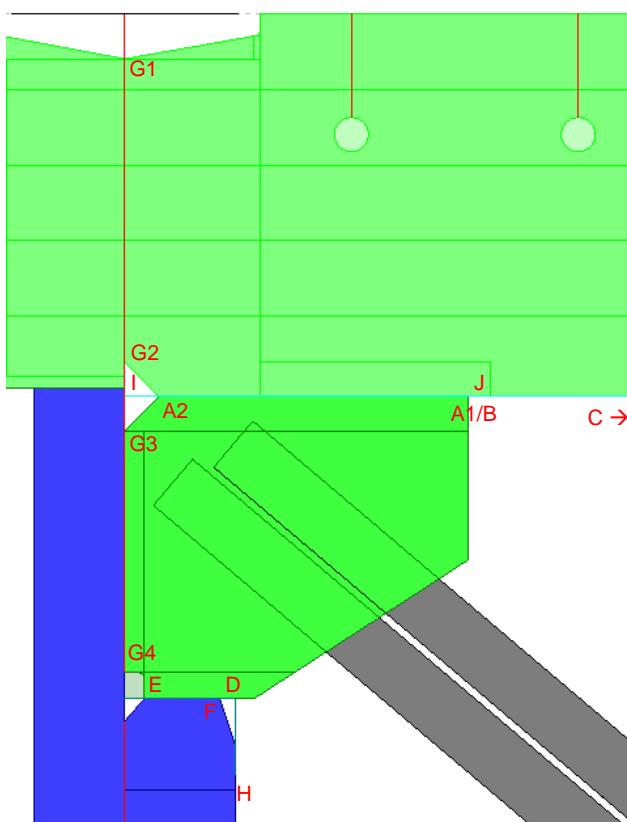
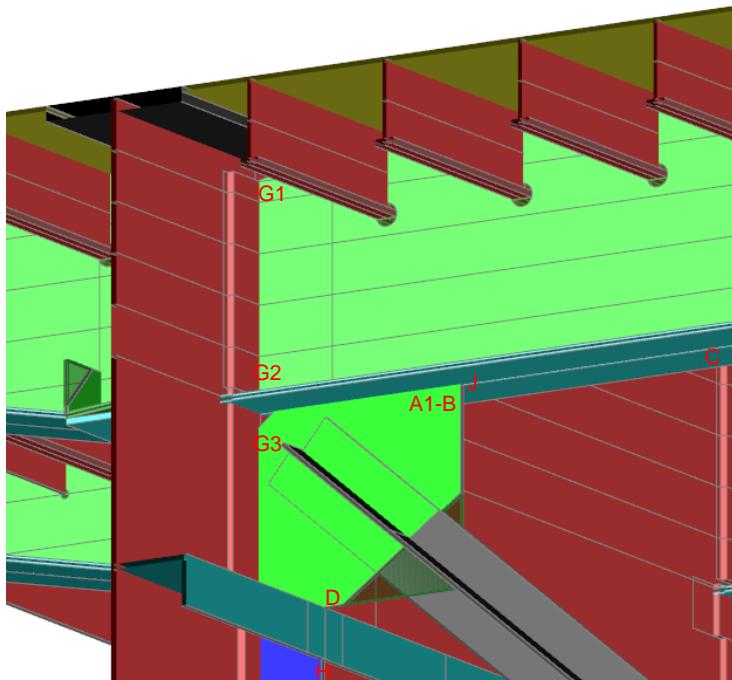
De getoetste en gemeten dwarsdrager komt overeen met de 2e dwarsdrager na de 2^e geklonken sectiedeling in het 2^e veld (as 12 op de oorspronkelijke ontwerptekeningen). De spanningswisselingen in de verbinding zijn bepaald met het hybride model D, waarin over een lengte van 4 k-verbanden (dwarsdrager 11 t/m 14 op de oorspronkelijke ontwerptekeningen) het rekenmodel is opgebouwd met plaat elementen. Ter plaatse van deze dwarsdrager wordt het lijf van de hoofdlijker met $\frac{1}{2}$ INP30 dwarsverstijvers gesteund.



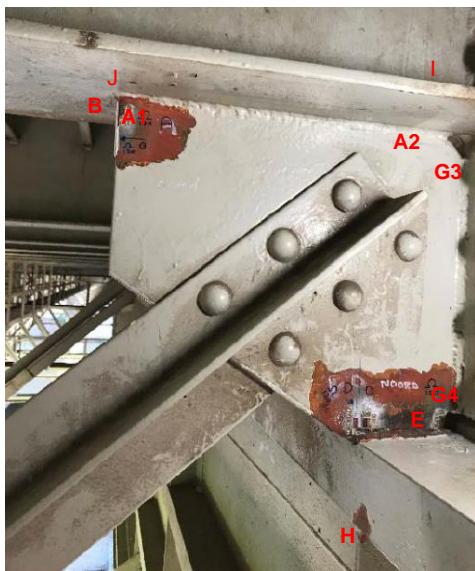
Figuur 192 – Locatie getoetste dwarsdrager met K verband, DD-K30.

5.21.2 Getoetste details

In de aansluiting tussen dwarsdrager en hoofdligger zijn verschillende details aanwezig die kritisch zijn ten aanzien van vermoeiing. Per onderdeel zal worden toegelicht hoe de toets-spanning is bepaald, waar de maatgevende snede zit en welke detailcategorie van toepassing is.



Figuur 193 – Getoetste details verbinding dwarsdrager (Type DD-K30)



Noordzijde



Zuidzijde

Figuur 194 – Overzicht details in schot dwarsdrager DD-K30

De volgende tabel geeft een beschrijving van de details die zijn getoetst en/of waar een meting is uitgevoerd.

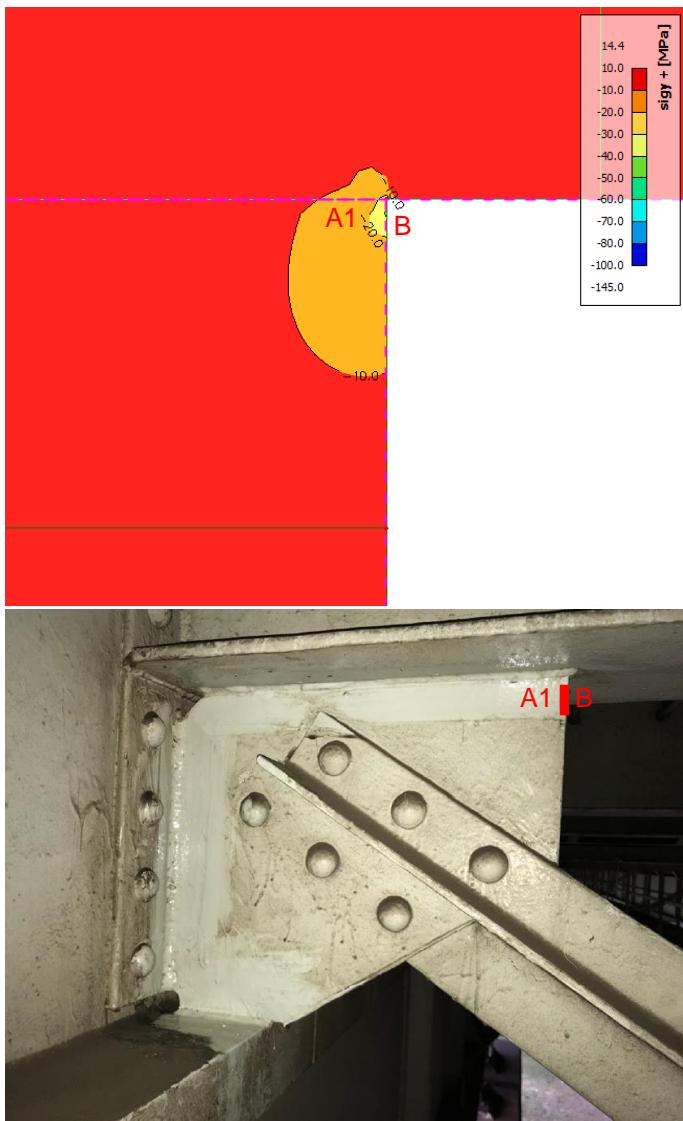
Detail	Beschrijving	Vermoeiingstoets	Gemeten
A1	Hoeklas schot – onderflens (type a)	x	x
A2	Hoeklas schot – onderflens (type a)	x	
B	Hoeklas schot – onderflens (type b)	x	x
C	Nominale spanning onderflens		x
D	Hoeklas schot – horizontale flens langsverstijver	x	x
E	Hoeklas schot – horizontale flens langsverstijver	x	x
F	Hoeklas lijf dwarsverstijver – horizontale flens langsverstijver	x	x
G1/G2	Hoeklas lijf dwarsverstijver – kopschot	x	x
G3/G4	Hoeklas schot – kopschot	x	x
H	Las lijf dwarsverstijver – verticale flens langsverstijver	x	x
I	Onderflens dwarsdrager – kopschot	x	
J	Onderflens dwarsdrager t.p.v. schot	x	

Tabel 78 – Overzicht toets- en meetlocaties dwarsdrager met K-verband (DD-K30)

Voor de verbinding in de bovenflens van de dwarsdrager geldt dat deze direct bereden wordt door een wielprint. Uit de spanningswisselingen uit het lokale model volgt dat lokale buiging van het dek/bovenflens hoofdlijger in de richting haaks op het lijf van de hoofdlijger bepalend is voor de spanningswisseling en dus de vermoeiingsberekening. Toetsing van de dekconstructie valt echter buiten de scope van de opdracht en is daarom hier nu niet verder getoetst. De vermoeiingsberekeningen zijn weergegeven in Bijlage E12.

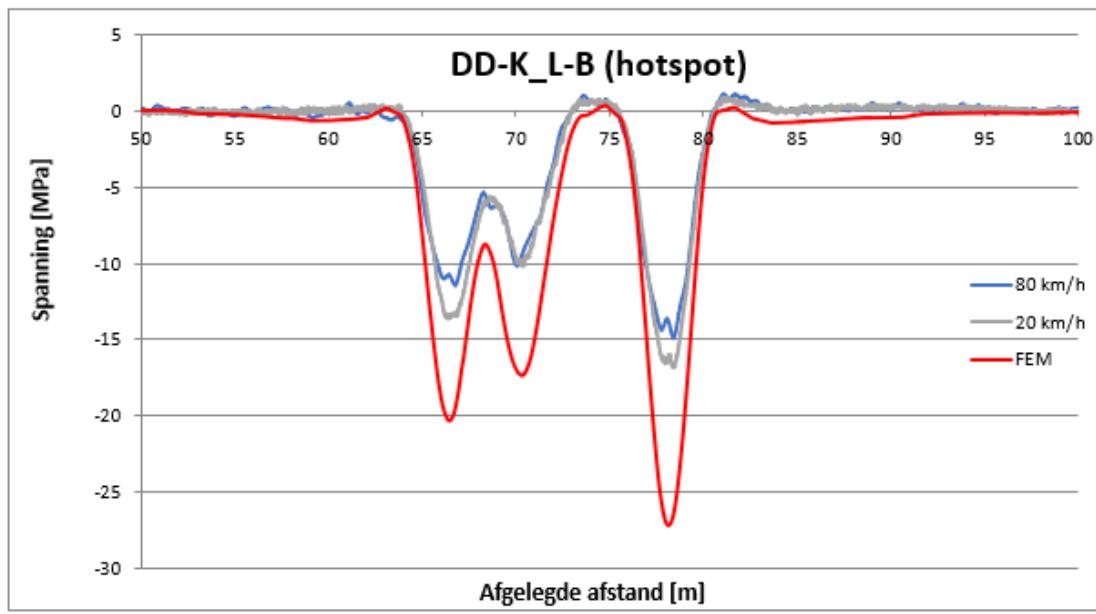
5.21.3 Detail A1/B - Aansluiting schot – onderflens dwarsdrager

Detail A1/B betreft de aansluiting aan de bovenzijde, aan het einde van het schot met de onderflens van de dwarsdrager. Op deze locatie is een spanningsconcentratie aanwezig. Metingen zijn uitgevoerd aan de voor en achterzijde (detail A1) en aan de kopse zijde (detail B).



Figuur 195 – Spanningen ter plaatse van detail A1/B schot – onderflens dwarsdrager

In Bijlage G is de vergelijking van de gemeten spanningen en de berekende spanningen gegeven voor detail A1 (noord- en zuidzijde) en detail B. De hoogste gemiddelde gemeten hotspot spanningswisseling treedt op in detail B.

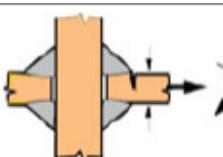


meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	1,1 N/mm ²		0,8 N/mm ²	0,5 N/mm ²
min	-14,8 N/mm ²		-16,7 N/mm ²	-27,2 N/mm ²
range	15,9 N/mm ²		17,5 N/mm ²	27,6 N/mm ²
modelfac.	58%	modelfac.	64%	

Figuur 196 – Spanningswisseling hotspotspanningen DD-K detail B

Detail A1/B – Teen van de las

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald (64%). Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (detail B). De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening van de teen van de las vermenigvuldigd met deze modelfactor, waarna een vermoeiingsberekening is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van een hotspot-analyse met een detailcategorie DC = 90, conform tabel 3.3, detail 6 van IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components” [10].

No.	Structural detail	Description	Requirements	FAT Steel	FAT Alu.
6		Cruciform joints with load-carrying fillet welds	Fillet welds, as welded	90	36

Figuur 197 – Detailcategorie voor detail A1 – teen van de las [10]

Uit deze berekening volgt de volgende schadegetallen ter plaatse van de detail A1.

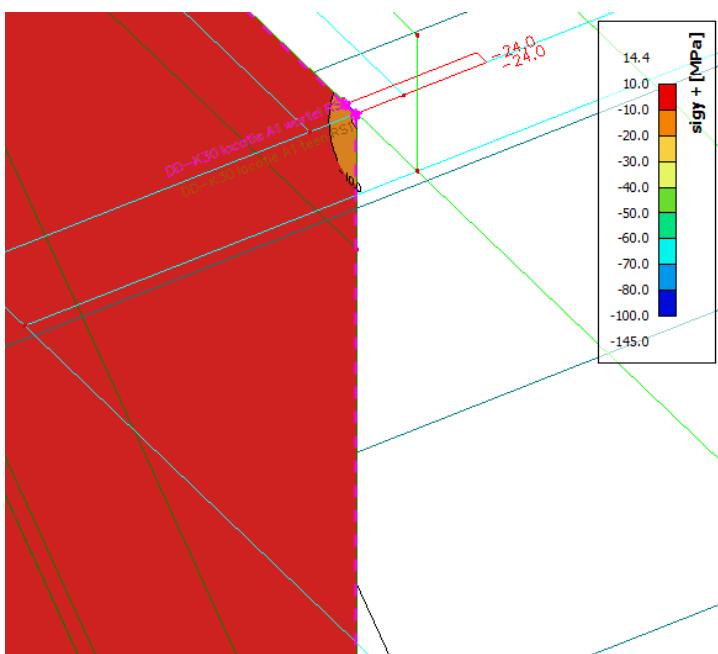
γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,2	0,6	0,1	0,3	0,2	0,4	0,0	0,1
1,15	0,1	0,3	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0
1,00	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 79 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail A1 – teen van de las

Detail A1/B – wortel van de las

Omdat er een sterke spanningsgradiënt aanwezig is bij het uiteinde van het schot, is de spanningswisseling bepaald conform “IIW Guideline for the Assessment of Weld Root Fatigue” [10] paragraaf 3.3.2. De toepassing van deze methode wordt beschreven in het hoofdstuk 5.20.3.

De gemiddelde spanning is bepaald met behulp van SCIA door over de laatste 5 mm de gemiddelde spanning in de schotplaat met de dikte van 10 mm op te vragen.



Figuur 198 – Gemiddelde spanning in de laatste 5 mm van de knieschot (σ_{y+}) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN).

Voor de toetsing dient de spanningswisseling in de las bepaald te worden. Conform de bovengenoemde methode kan de (maximale) normaalspanning in de las ($a = 4 \text{ mm}$) ten gevolge van de eenheidslast (2x50 kN) als volgt bepaald worden. Het bepalen van de spanningen in de las wordt in het hoofdstuk 5.20.3 verder uitgewerkt daarom wordt het hier niet nog een keer behandeld.

Conform TNO Notitie 100315818/ALL [2] mag de verbinding uitgerekend worden met detailcategorie 40, waarbij rekening wordt gehouden met de aanwezige drukspanning en de restspanningen t.g.v. de las proces. Dit is dus iets gunstiger als detailcategorie 36* conform de Eurocode.

$$\Delta\sigma_{eff} = \begin{cases} \alpha * \Delta\sigma & \text{if } \sigma_{max,i} \leq 0 \\ \Delta\sigma & \text{if } \sigma_{min,i} \geq 0 \\ \sigma_{max,i} - \alpha * \sigma_{min,i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

waarin:

$$\sigma_{max,i} = \frac{\Delta\sigma}{1-R} + \sigma_{res} \quad (6)$$

$$\sigma_{min,i} = \sigma_{max,i} - \Delta\sigma \quad (7)$$

	σ_{res} [N/mm ²]	α [-]	representatief voor
type 1	28.53	0.00	contact tussen platen
type 2	13.12	0.63	geen contact tussen platen

Zowel voor type 1 als type 2 geldt bij deze effectieve spanningsrange een karakteristieke vermoeiingsterkte bij $2 \cdot 10^6$ wisselingen van $\Delta\sigma_c = 40 \text{ N/mm}^2$, een kniepunt bij 10^7 wisselingen en een afkapwaarde bij 10^8 wisselingen, met hellingsparameters $m_1 = 3$ en $m_2 = 5$. Zie Figuur 11 en Figuur 12.

Figuur 199 – Methode voor toetsing hoek- en kruislassen conform [2]

In afwijking van de methode conform IIW [11], waarbij een vergelijkspanning wordt gehanteerd, moet nu onderscheid gemaakt worden tussen de normaalspanning en de schuifspanningen. De normaalspanning loodrecht op de lengteas van de las ($\sigma_{\perp,w,loc}$) wordt getoetst op detailcategorie 40, rekening houdend met de aanwezige (druk)spanning, conform bovenstaande methode van TNO, de schuifspanning evenwijdig aan de lengteas van de las ($\tau_{II,w,loc}$) wordt getoetst op detailcategorie 80 met helling $m = 5$, conform NEN-1993-1-9. De schade van de beide berekeningen dient bij elkaar opgeteld te worden.

In onderstaande tabellen zijn de toetsresultaten weergegeven voor de normaalspanning, waarbij getoetst is volgens de methode uit de notitie van TNO, zowel voor type 1 (wel contact tussen de platen) als type 2 (geen contact tussen de platen). De maatgevende van de twee toetsingen dient aangehouden te worden en opgeteld bij de schade door de schuifspanning evenwijdig aan de lengteas van de las.

Type 1	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018
1,35	2,4	6,3	1,9	3,8	1,9	3,9	1,0	1,9
1,15	1,1	3,1	0,8	1,8	0,9	1,9	0,4	0,9
1	0,5	1,4	0,4	0,8	0,4	0,8	0,2	0,4

Tabel 80 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail A1 – wortel van de las ($DC = 40$, type 1)

Type 2	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018
1,35	0,7	2,0	0,5	0,9	0,6	1,2	0,2	0,4
1,15	0,2	0,8	0,2	0,4	0,2	0,5	0,1	0,1
1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0

Tabel 81 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail A1 – wortel van de las ($DC = 40$, type 2)

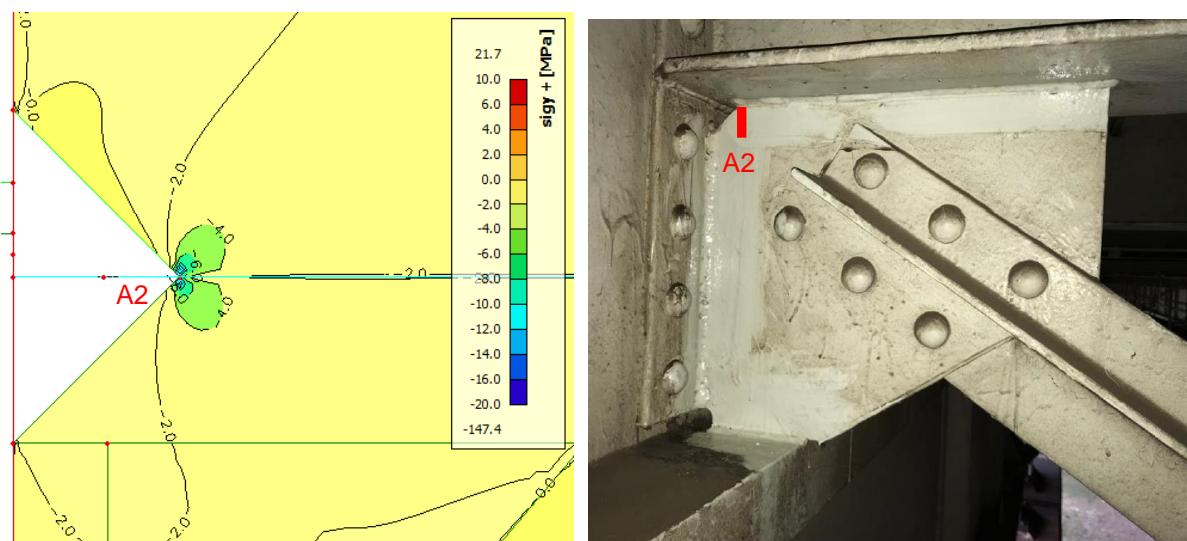
Gezien de overschrijding is de schade door de schuifspanning niet meer bepaald, aangezien de verbinding nu al niet voldoet. De schade door de schuifspanning moet eigenlijk nog opgeteld worden bij bovengenoemde schade

5.21.4 Detail A2 – Aansluiting schot – onderflens dwarsdrager

Detail A2 bevindt zich bij het laspoortje dicht bij de hoofdligger, in de aansluiting schot met de onderflens van de dwarsdrager. Dit detail is vergelijkbaar met detail A1 en is op vergelijkbare wijze getoetst.

Detail A2 – teen van de las

Door het laspoortje treedt een piekspanning ter plaatse van de locatie A2 op. Daarom wordt de vermoeiingsberekening voor deze locatie ook uitgevoerd.



Figuur 200 – Spanningen ter plaatse van locatie A2, aansluiting schot – onderflens dwarsdrager

De detail categorie is gelijk aan locatie A1 aangehouden als DC = 90, op basis van een hotspot analyse.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 82 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie A2 – teen van de las

Locatie A2 – wortel van de las

De schadeberekening van de wortel van de las is op dezelfde wijze als voor locatie A1 uitgevoerd. Ook hier is de schuifspanningswisseling dermate laag dat daar geen schade uit zal ontstaan.

Type 1	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost		
	γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

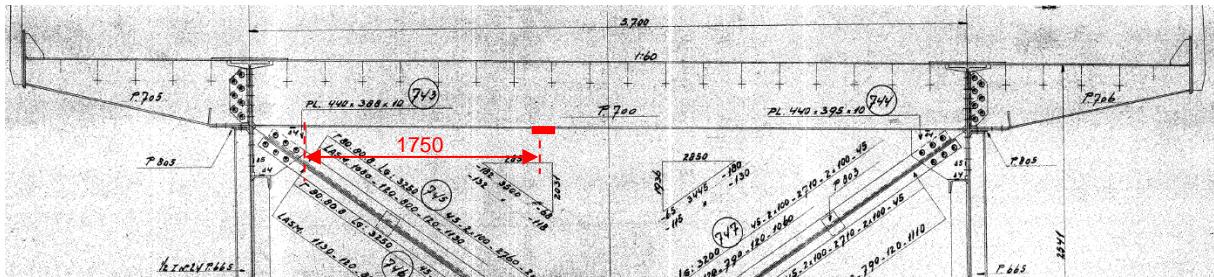
Tabel 83 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie A2 – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 2	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost		
	γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

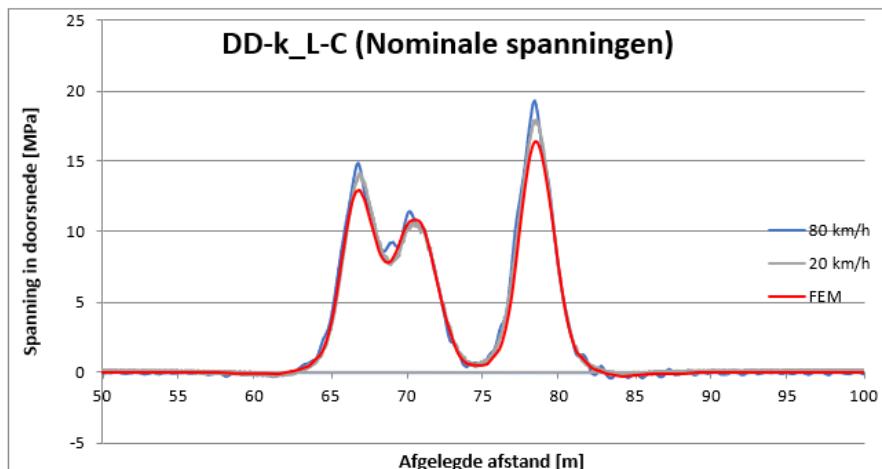
Tabel 84 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie A2 – wortel van de las (DC = 40, type 2)

5.21.5 Detail C – Onderflens dwarsdrager (nominaal)

Ter plaatse van locatie C is een meting uitgevoerd om een vergelijking tussen de nominale spanningen uit het rekenmodel en de metingen uit te kunnen voeren. Hiervoor is gemeten op 1,75 m uit de rand van het schot.



Figuur 201 – Overzicht DD-K30 locatie C



meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	19,2 N/mm ²		17,8 N/mm ²	16,4 N/mm ²
min	-0,4 N/mm ²		-0,1 N/mm ²	-0,3 N/mm ²
range	19,6 N/mm ²		17,9 N/mm ²	16,7 N/mm ²
modelfac.	118%	modelfac.	108%	

Figuur 202 – Spanningswisseling (nominaal) DD-zK locatie C

De spanningen komen goed overeen tussen model en meting. Omdat locatie C een nominale spanning betreft en niet een vermoeiingsgevoelig detail is er voor deze locatie geen vermoeiingsberekening uitgevoerd.

5.21.6 Detail D – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver

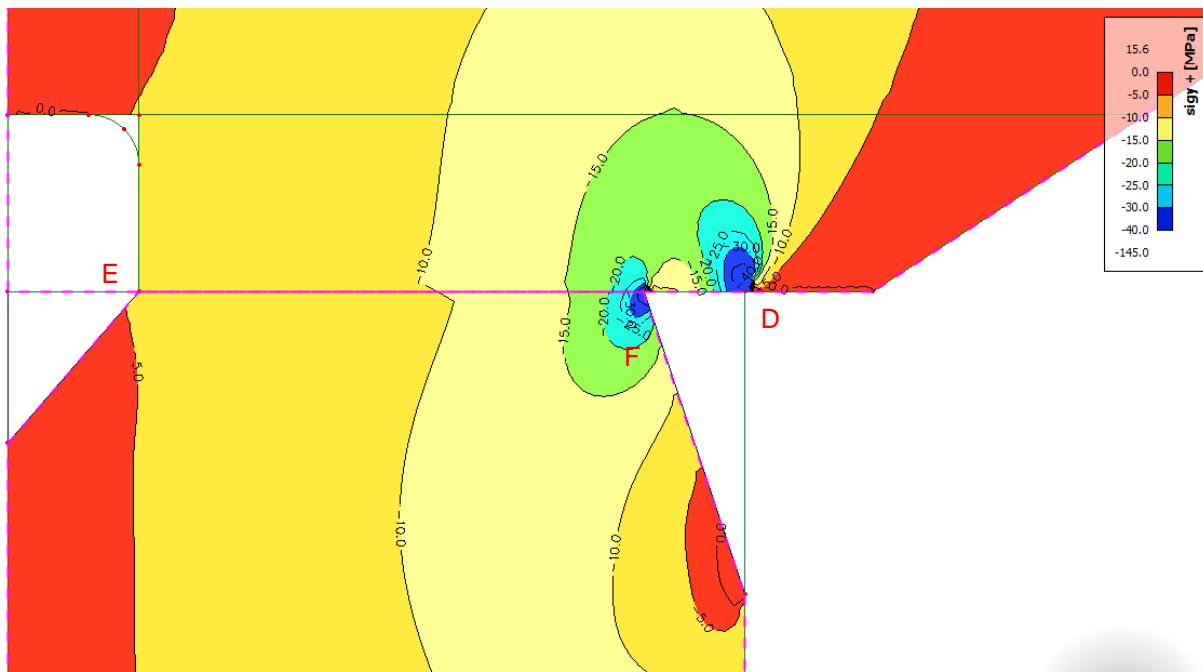
Detail D bevindt zich aan de onderzijde van het knieschot, bij de aansluiting met de horizontale flens van de langsverstijver. Voor dit detail zijn metingen op twee plekken uitgevoerd, D1 is zo veel mogelijk op de hoek, D2 op 10 mm naar binnen.



Figuur 203 – Detailfoto's DD-K30 detail D1 en D2 south en north.

Detail D – teen van de las

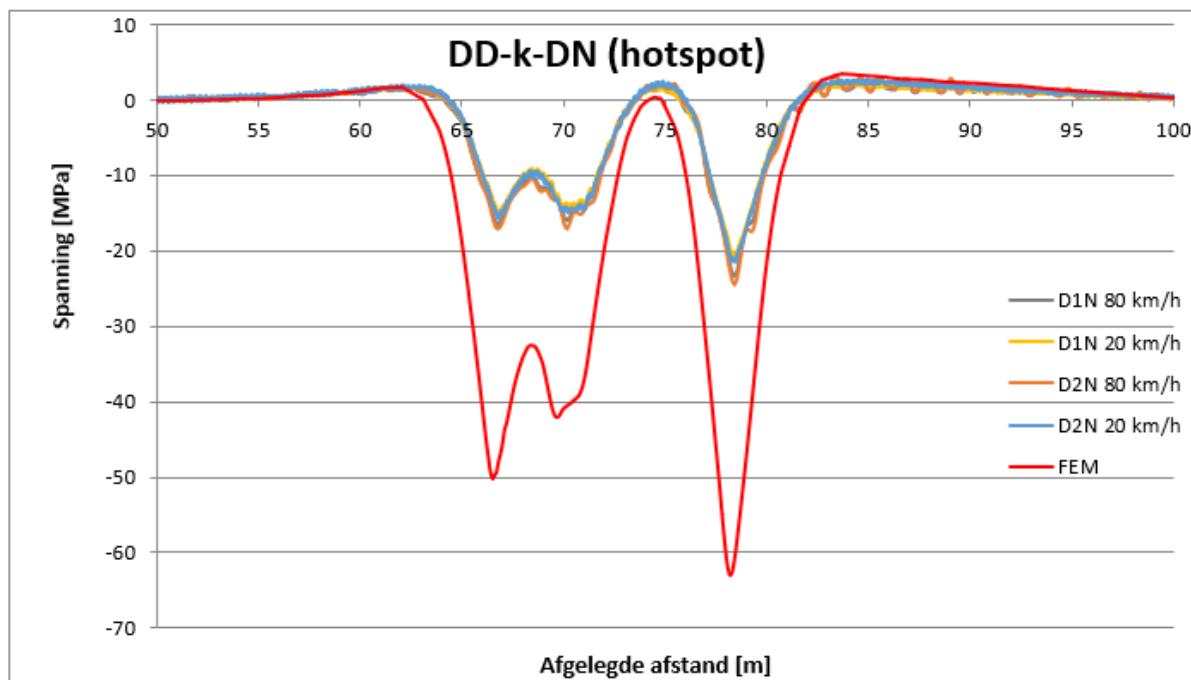
De spanning ter plaatse van de teen van de las is bepaald door de hotspotspanning te bepalen ter plaatse van de spanningspiek aan het einde van het schot, door een extrapolatie van de spanningen op 0,4t en 1,0t.



Figuur 204 – Spanning ter plaatse van de aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver (σ_{y+}) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN)

In Bijlage G is een vergelijking gemaakt van de berekende hotspotspanning en de gemeten hotspotspanningen ter plaatse van D1 en D2, zowel voor de noord- als de zuidzijde.

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald. Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (van DD-K30 detail D2, noordzijde) en is gelijk aan 36%.



	meting 80 km/h	meting 20 km/h	model
max	2,5 N/mm ²	2,0 N/mm ²	3,4 N/mm ²
min	-23,3 N/mm ²	-20,5 N/mm ²	-63,0 N/mm ²
range	25,8 N/mm ²	22,5 N/mm ²	66,5 N/mm ²
modelfac.	39%	modelfac.	34%

	meting 80 km/h	meting 20 km/h	model
max	3,2 N/mm ²	2,5 N/mm ²	3,4 N/mm ²
min	-24,4 N/mm ²	-21,3 N/mm ²	-63,0 N/mm ²
range	27,6 N/mm ²	23,8 N/mm ²	66,5 N/mm ²
modelfac.	42%	modelfac.	36%

Figuur 205 – Hotspotspanning DD-K30 detail D, noordzijde

De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening vermenigvuldigd met deze modelfactor (36%), waarna een vermoeiingsberekening van de teen van de las is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van Detailcategorie $\Delta\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2$, o.b.v. IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components” [10], tabel 3.3, detail 6, vergelijkbaar voor detail A1.

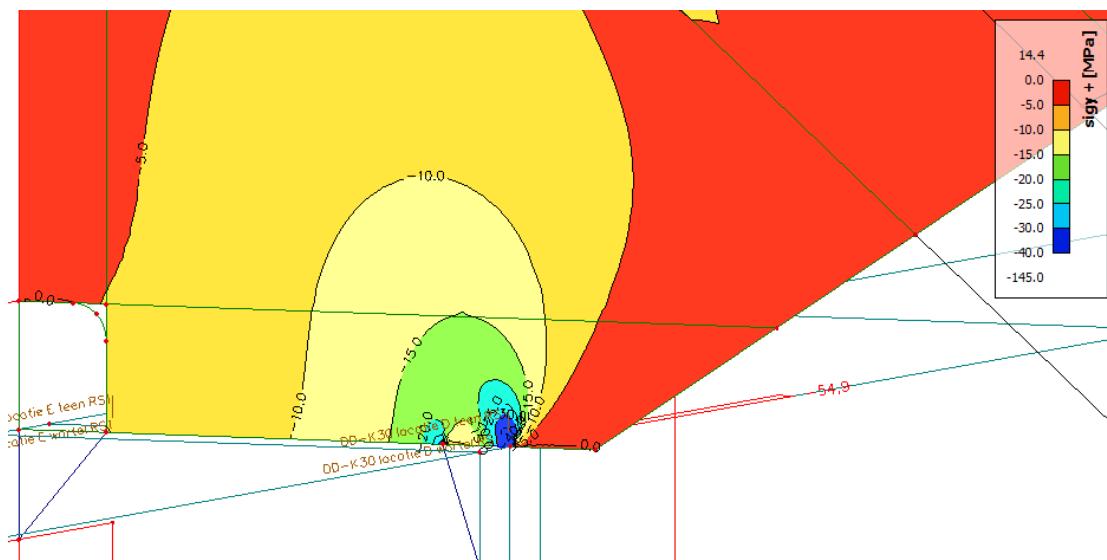
De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald eind 2018 en eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	1,2	3,4	0,8	1,4	1,1	2,2	0,3	0,6
1,15	0,5	1,6	0,4	0,6	0,5	1,0	0,1	0,3
1	0,2	0,7	0,1	0,3	0,2	0,4	0,0	0,1

Tabel 85 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor DD-K30 detail D.

Detail D – Wortel van de las

De wortel is op gelijke wijze als voor detail A1 en A2 getoetst. Hiervoor is de gemiddelde spanning in de laatste t/2 = 5 mm uitgelezen en vertaald naar een spanning in de las.



Figuur 206 – Gemiddelde spanning in de laatste 5 mm van de plaat (σ_y) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN) t.p.v. detail D

Onderstaand is het resultaat van de schadeberekening weergegeven voor de normaalspanning in de las ($\sigma_{\perp,w,loc}$), waarbij is getoetst op detailcategorie 40, rekening houdend met de aanwezige (druk)spanning door het eigen gewicht (zie detail A1 voor de beschrijving van deze methode). Er is geen rekening gehouden met de lagere gemeten spanning, omdat het voor de wortel lastig is om eenduidig de reductie te bepalen en er toch al overschrijdingen zijn gevonden voor de teen van de las.

Type 1	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost		
	γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35		0,2	0,5	0,2	0,6	0,1	0,3	0,1	0,3
1,15		0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
1		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 86 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail D – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 1	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost		
	γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35		12,1	31,1	9,5	17,7	10,2	19,7	4,3	8,4
1,15		7,2	18,6	5,6	10,5	6,1	11,8	2,5	5,0
1		4,5	11,6	3,5	6,5	3,8	7,4	1,5	3,0

Tabel 87 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail D – wortel van de las (DC = 40, type 2)

Te zien is dat bij type 1, waar wordt uitgegaan van contact tussen de platen, er geen schade optreedt. Dit komt doordat er een relatief hoge spanning door de permanente belasting optreedt, die de eigenspanningen grotendeels compenseert. Hierdoor is nauwelijks de gehele wisseling in druk, die bij methode 1 vermenigvuldigd moet worden met $\alpha = 0,00$. Bij type 2 wordt er wel een (grootte) schade gevonden, omdat hier de spanningswisseling in druk wel meegenomen moet worden met $\alpha = 0,63$.



Gezien de overschrijding is de schade door de schuifspanning niet meer bepaald, aangezien de verbinding nu al niet voldoet. De schade door de schuifspanning moet eigenlijk nog opgeteld worden bij bovengenoemde schade.

Geconcludeerd wordt dat bij locatie D zowel de teen als de wortel van de las niet voldoet.

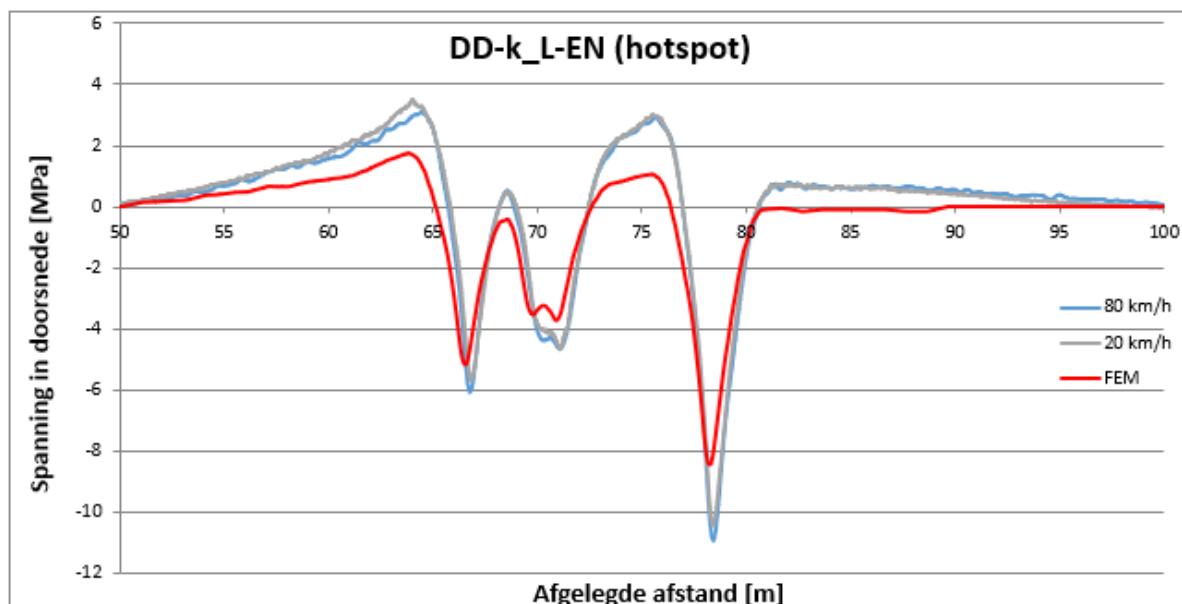
5.21.7 Detail E – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver

Detail E bevindt zich aan de onderzijde van het schot, bij de aansluiting met de horizontale flens van de langsverstijver, aan de zijde dicht bij het lijf van de hoofdlijger. Hier bevindt zich een laspoortje.



Figuur 207 – Detailfoto DD-K30 detail E

In het model werden hier relatief lage spanningen gevonden. Tijdens de meting bleek dat de gemeten spanningen aanzienlijk hoger uitvielen. Bijlage G geeft de vergelijking tussen de metingen en de berekende hotspotspanningen. De hoogste spanningen werden gevonden aan de noordzijde, waar de verhouding meting ten opzichte van berekende hotspotspanningswisseling gelijk is aan 141%.



meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	2,9 N/mm ²		3,0 N/mm ²	1,1 N/mm ²
min	-10,9 N/mm ²		-10,4 N/mm ²	-8,4 N/mm ²
range	13,8 N/mm ²		13,4 N/mm ²	9,5 N/mm ²
modelfac.	146%	modelfac.	141%	

Figuur 208 – Hotspotspanning DD-K30 detail E, noordzijde

Detail E – Teen van de las

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald. Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (van DD-k-L, detail E, noordzijde) en is gelijk aan 141%. De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening vermenigvuldigd met deze modelfactor, waarna een vermoeiingsberekening van de teen van de las is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van Detailcategorie $\Delta\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2$, o.b.v. IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components” [10], tabel 3.3, detail 6.

De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiale veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald eind 2018 en eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 88 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor DD-K30 detail E

Detail E – Wortel van de las

De wortel van de las ter plaatse van locatie E is vooralsnog niet verder getoetst, gezien de overschrijdingen bij locatie D en in de teen van de las. Uitgangspunt is dat er een versterking moet komen voor de gehele lasverbinding (detail D en E).

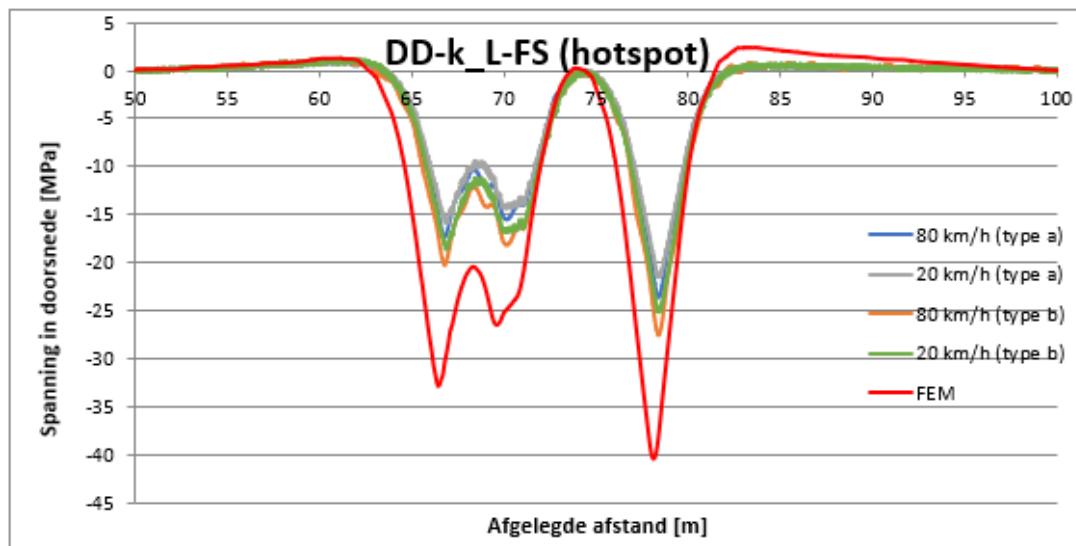
5.21.8 Detail F – Aansluiting horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver

Detail F bevindt zich op het lijf van de dwarsverstijver, net onder de horizontale flens van de langsverstijver, aan de zijde dicht bij de verticale flens van de langsverstijver. Hier bevindt zich een laspoortje.



Figuur 209 – Detailfoto DD-K30 detail F

Bijlage G geeft de vergelijking tussen de metingen en de berekende hotspotspanningen. De hoogste spanningen werden gevonden aan de zuidzijde, waar de verhouding meting ten opzichte van berekende hotspotspanningswisseling gelijk is aan 51%.



meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	0,6 N/mm ²		0,5 N/mm ²	2,4 N/mm ²
min	-23,5 N/mm ²		-21,4 N/mm ²	-40,4 N/mm ²
range	24,2 N/mm ²		21,9 N/mm ²	42,8 N/mm ²
modelfac	56%	modelfac	51% modelfac.	

Figuur 210 – Hotspotspanning DD-K30 detail F, zuidzijde

Detail F – Teen van de las

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald. Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (van DD-k30, detail F, zuidzijde). Er is daarbij uitgegaan van een type a extrapolatie. De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening vermenigvuldigd met deze modelfactor, waarna een vermoeiingsberekening van de teen van de las is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van Detailcategorie $\Delta\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2$, o.b.v. IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components” [10], tabel 3.3, detail 6.

De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald eind 2018 en eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,8	2,3	0,5	0,9	0,7	1,5	0,2	0,3
1,15	0,3	1,0	0,2	0,4	0,3	0,6	0,1	0,1
1	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0

Tabel 89 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor DD-K30 detail F

Detail F – Wortel van de las

De wortel ter plaatse van detail F is op gelijke wijze als voor detail D getoetst. Hiervoor is de gemiddelde spanning in de laatste $t/2 = 5,4$ mm uitgelezen en vertaald naar een spanning in de las.

Onderstaand is het resultaat van de schadeberekening weergegeven voor de normaalspanning in de las ($\sigma_{\perp,w,loc}$), waarbij is getoetst op detailcategorie 40, rekening houdend met de aanwezige (druk)spanning door het eigen gewicht (zie detail A1 voor de beschrijving van deze methode). Er is geen rekening gehouden met de lagere gemeten spanning, omdat het voor de wortel lastig is om eenduidig de reductie te bepalen en er toch al grote overschrijdingen zijn gevonden voor de teen van de las.

Type 1	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018
1,35		1,9	5,0	1,5	3,4	1,5	3,0	0,8
1,15		0,8	2,1	0,6	1,4	0,6	1,3	0,4
1		0,2	0,9	0,2	0,6	0,2	0,5	0,1

Tabel 90 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail F – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 2	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018
1,35		5,2	14,1	3,9	7,0	4,6	9,1	1,6
1,15		3,0	8,1	2,2	3,9	2,6	5,2	0,9
1		1,7	4,8	1,3	2,3	1,6	3,1	0,4

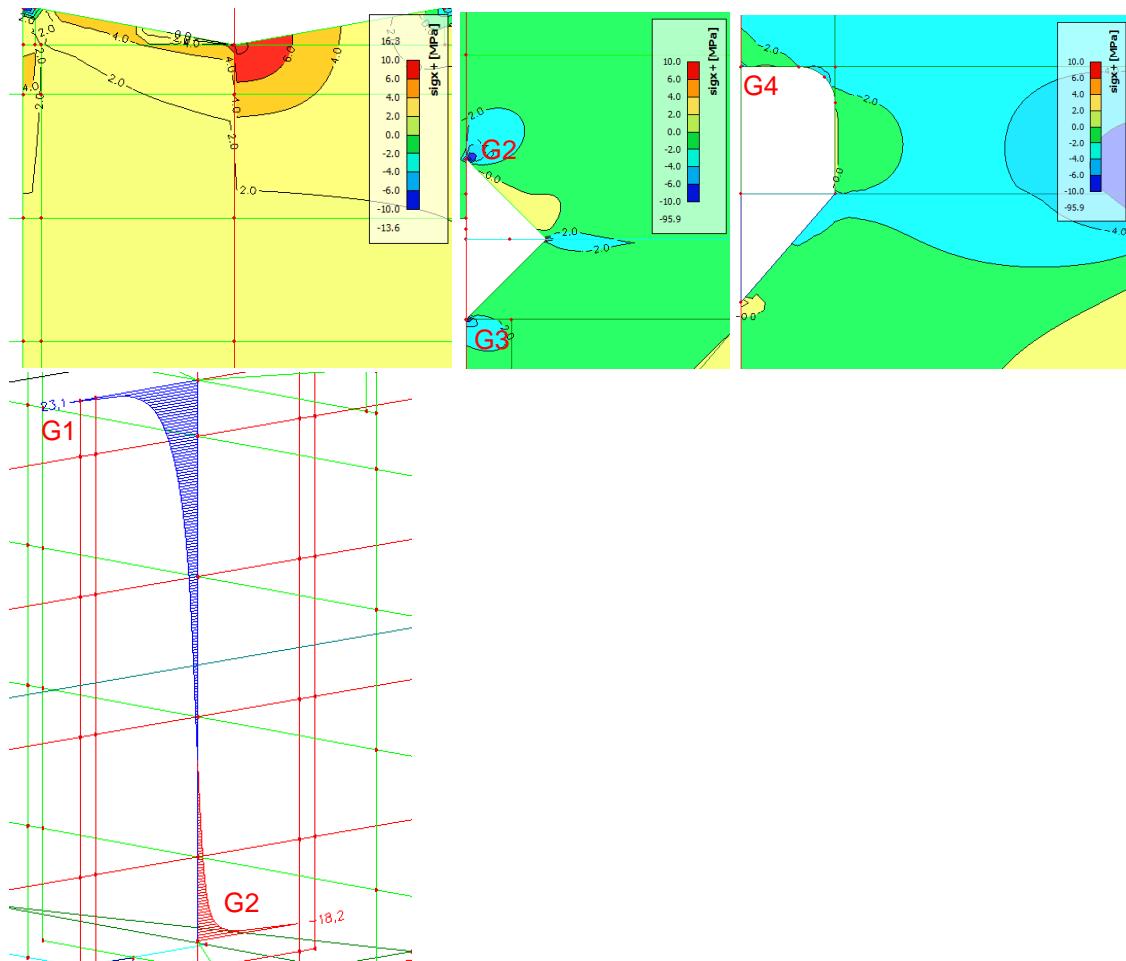
Tabel 91 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail F – wortel van de las (DC = 40, type 2)

Maatgevend is de berekening type 2, waarbij er uitgegaan wordt van geen contact tussen de platen. Gezien de overschrijding is de schade door de schuifspanning niet meer bepaald, aangezien de verbinding nu al niet voldoet. De schade door de schuifspanning moet eigenlijk nog opgeteld worden bij bovengenoemde schade.

Geconcludeerd wordt dat bij locatie F zowel de teen als de wortel van de las niet voldoet.

5.21.9 Detail G – Aansluiting lijf/schot dwarsdrager – kopschot op lijf hoofdlijker

De spanningen ter plaatse van de lasverbinding tussen het lijf van de dwarsdrager en het kopschot en tussen het schot onder de dwarsdrager en het kopschot is in onderstaande figuren weergegeven. Het kopschot is op zijn beurt weer verbonden met het lijf van de hoofdlijker met klinknagels. Met name bij de laspoortjes treden spanningss concentraties op.



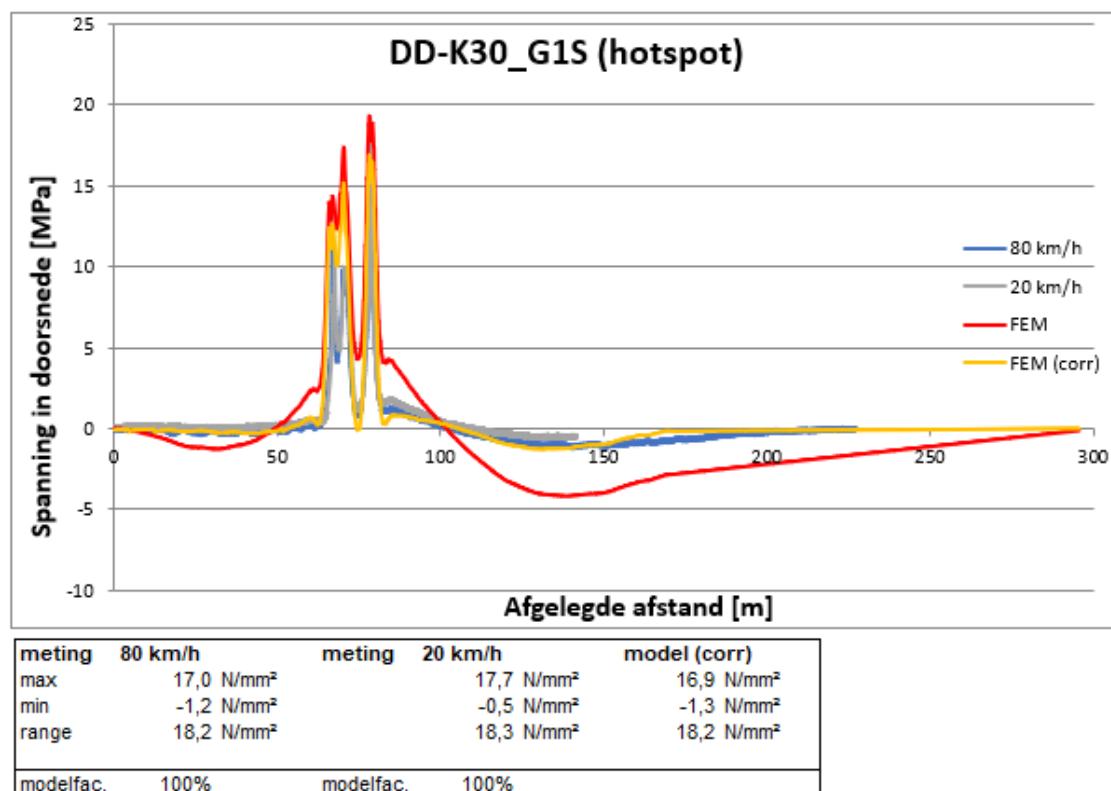
Figuur 211 – Spanningen ter plaatse van aansluiting lijf dwarsdrager/schot – kopschot op lijf hoofdlijker, DD-K30, Detail G.

Bij de meting kwam naar voren dat het laspoortje ter plaatse van G2 niet aanwezig blijkt te zijn. Er is daarom besloten om metingen uit te voeren bij G1 en G3. Er is alleen aan de zuidzijde gemeten. Bijlage G geeft de vergelijking tussen de metingen en de berekende hotspotspanningen.



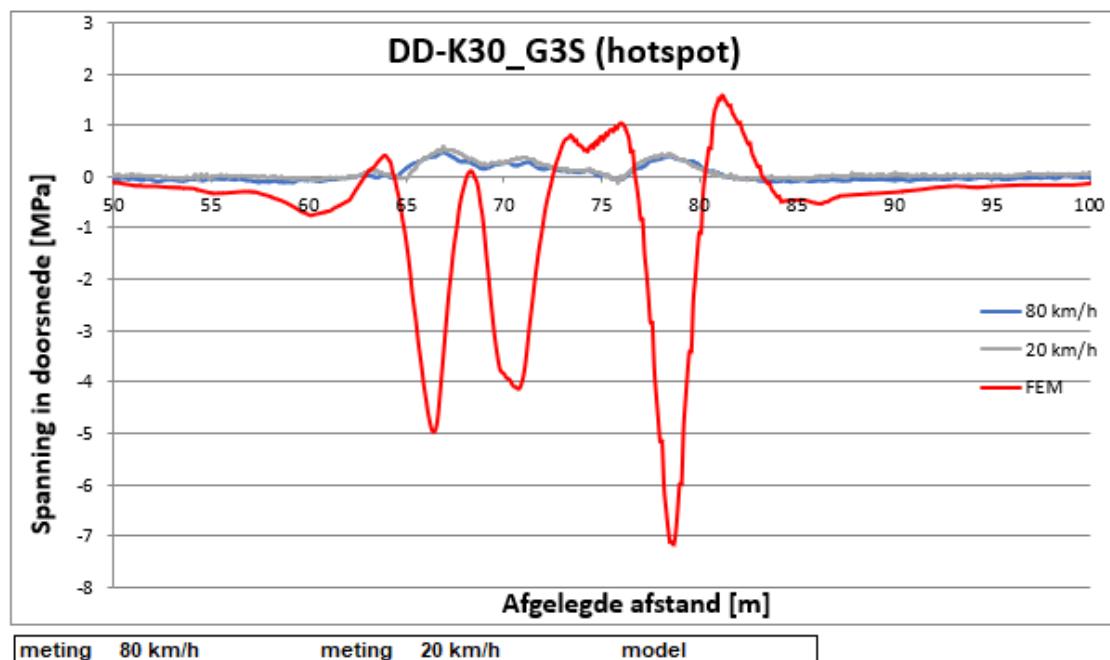
Figuur 212 – Detailfoto's DD-K30 locatie G1 en G3

Voor locatie G1 bleek het niet mogelijk te zijn om één factor te bepalen voor de verhouding tussen meting (grijs weergegeven) en FEM berekening (rood weergegeven). Daarom is onderscheid gemaakt tussen een verschaling voor het globale gedrag en een andere factor voor de verschaling voor het lokale gedrag. Dit is verder toegelicht in Bijlage G. Wanneer met deze gecorrigeerde invloedslijn wordt gerekend, komt de berekende gecorrigeerde spanningswisseling (geel weergegeven) goed overeen met de gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (grijs weergegeven).



Figuur 213 – Hotspotspanning DD-K30 detail G1, zuidzijde

Voor locatie G3 is te zien dat de spanningswisseling nagenoeg nul is en zelfs tegengesteld van teken. Dit komt doordat G3 nagenoeg in de neutrale lijn van de aansluiting dwarsdrager – hoofdlijger ligt. Uit de meting blijkt dus dat G3 nog aan de trekzijde van de neutrale lijn ligt, in de berekening ligt G3 aan de drukzijde. Dit verschil kan verklaard worden doordat de gemodelleerde stijfheden af zullen wijken van de werkelijke stijfheden, bijvoorbeeld door de speling in klinknagels. Zowel de berekende spanning als de gemeten spanningen zijn zeer laag.



Figuur 214 – Hotspotspanning DD-K30 detail G3, zuidzijde

Detail G – Teen van de las

De hoogste spanningswisseling treedt op ter plaatse van detail G1. De toetsing van de teen van de las is daarom uitgevoerd voor detail G1. Hierbij is gerekend met de gecorrigeerde invloedslijn van de hotspotspanning. De schade blijkt net niet te voldoen bij $\gamma_{Mf} = 1,35$.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,4	1,3	0,2	0,2	0,4	0,8	0,0	0,0
1,15	0,2	0,5	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0
1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0

Tabel 92 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie G1 – teen van de las

Detail G – Wortel van de las

De wortel ter plaatse van detail G1 is op gelijke wijze als voor detail F getoetst. Omdat detail G1 op trek wordt belast is er geen verschil tussen de toetsing op type 1 en type 2. Ook hier is gebruik gemaakt van een gecorrigeerde invloedslijn, maar nu op basis van het verschil in invloedslijnen tussen meting en berekening op 1,0t (zie Bijlage G). Er is gekozen voor deze locatie omdat dit beter overeen komt met de nominale spanning. De verwachting is dat de verschaling van de spanning in de laatste 0,5 t van de plaat, welke voor de toetsing van de wortel benodigd is, meer gerelateerd is aan de nominale spanning dan aan de hotspot spanning.

Uit de toetsing met de gecorrigeerde invloedslijn volgen de volgende schadegetallen.

Type 1	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	1,2	3,7	0,6	0,8	1,2	2,4	0,1	0,1
1,15	0,6	2,0	0,3	0,4	0,6	1,3	0,0	0,1
1	0,3	1,1	0,1	0,2	0,3	0,7	0,0	0,0

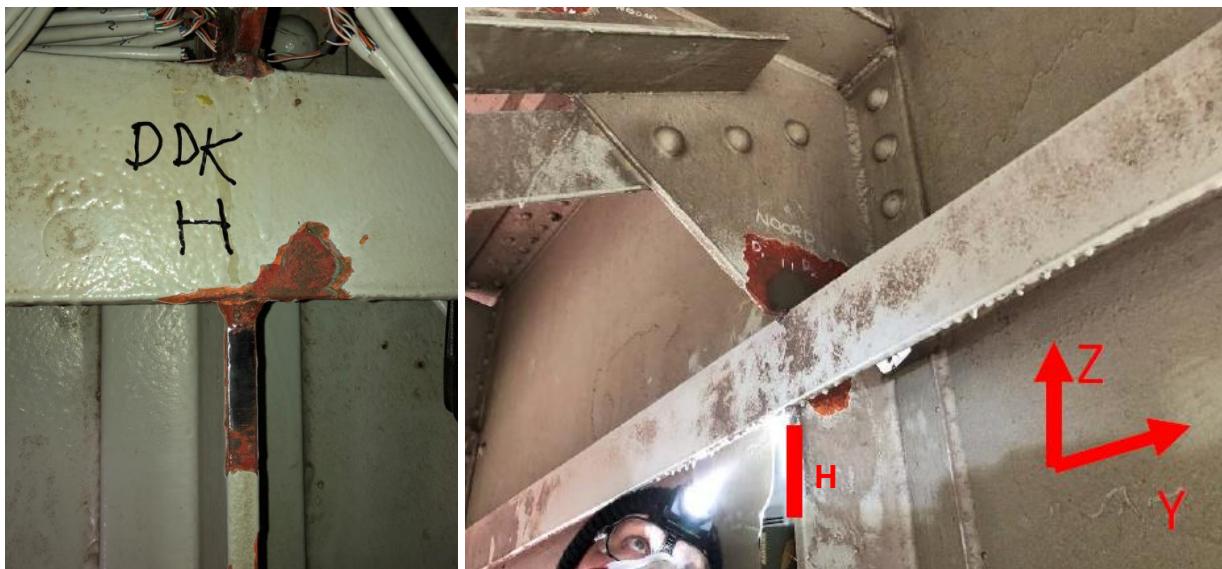
Tabel 93 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie G1 – wortel van de las (DC = 40)

De schuifspanningen zijn in beide gevallen zeer laag en zullen niet in additionele schade resulteren.

Geconcludeerd wordt dat de toetsing van de wortel niet voldoet.

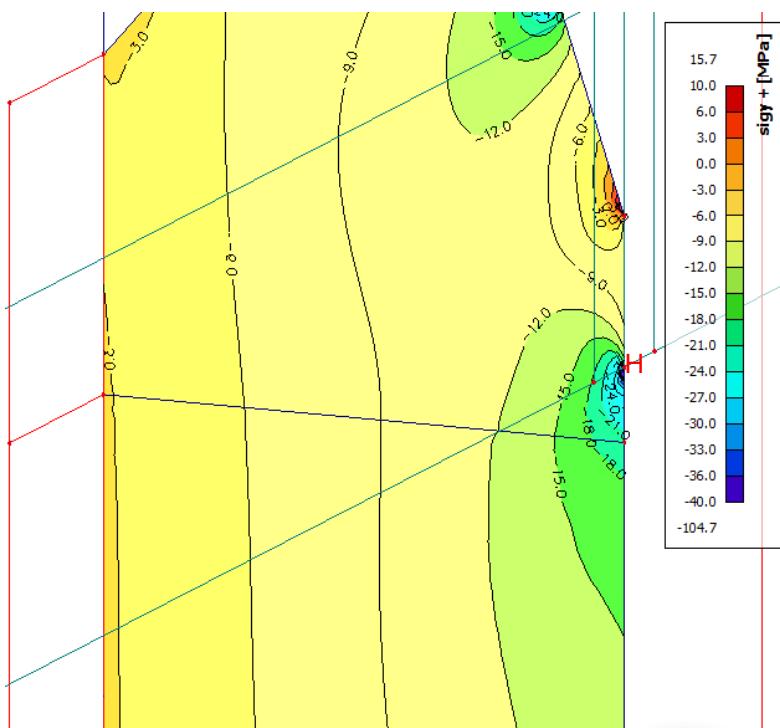
5.21.10 Detail H – Aansluiting lijf dwarsverstijver – verticale flens langsverstijver

Detail H bevindt zich bij de aansluiting tussen het lijf van de dwarsverstijver en de verticale flens van de langsverstijver.



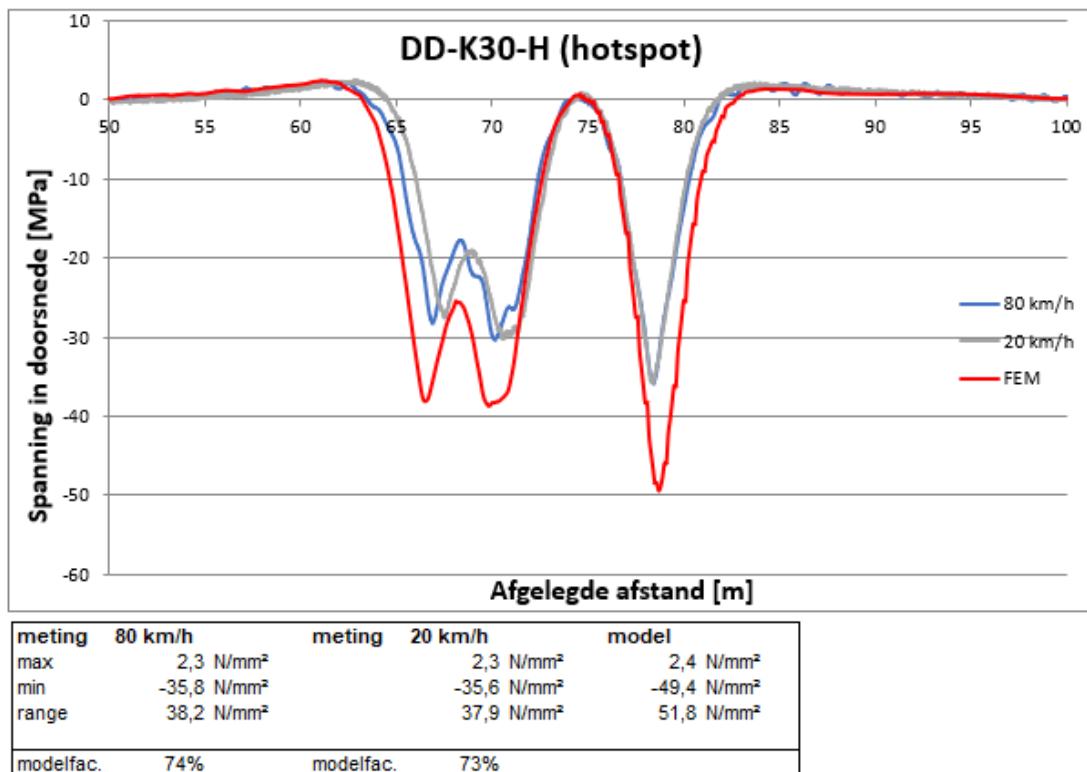
Figuur 215 – Detailfoto DD-K30 detail H

Ter plaatse van het einde van de lasverbinding tussen de verticale flens van de langsverstijver en het lijf van de dwarsverstijver treedt een spanningsconcentratie op.



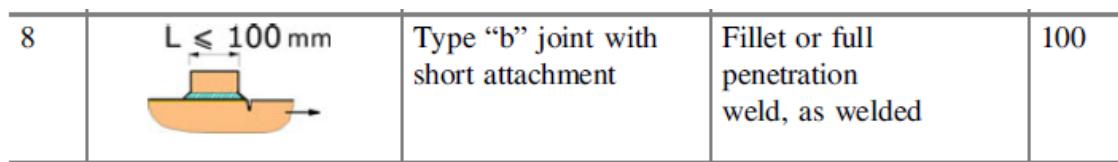
Figuur 216 – Spanningen ter plaatse van aansluiting lijf dwarsverstijver – verticale flens langsverstijver, DD-K30, Detail H

Voor deze locatie zijn ook rekmetingen uitgevoerd, zie Bijlage G. Zowel in de meting als in de berekening is de hotspotspanning bepaald door een niet-lineaire extrapolatie van de resultaten op 4 mm, 8 mm en 12 mm vanaf de teen van de las (type b extrapolatie conform IIW).



Figuur 217 – Hotspotspanning DD-K30 detail H

Uit de vergelijking tussen meting en berekening volgt dat de gemeten hotspotspanningswisseling bij 20 km/h 73% van de berekende hotspotspanningswisseling is. Voor de toetsing op vermoeiing is de berekende invloedlijn daarom met deze factor verstaalt. Hierbij is uitgegaan van een detailcategorie DC = 100, conform tabel 3.3, detail 8 van IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components” [10].



Figuur 218 – Detailcategorie voor detail H – teen van de las [10]

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	4,8	12,9	3,6	6,4	4,2	8,3	1,4	2,9
1,15	4,4	12,6	1,9	3,4	2,3	4,5	0,7	1,5
1	1,4	4,1	1,0	1,7	1,3	2,6	0,3	0,7

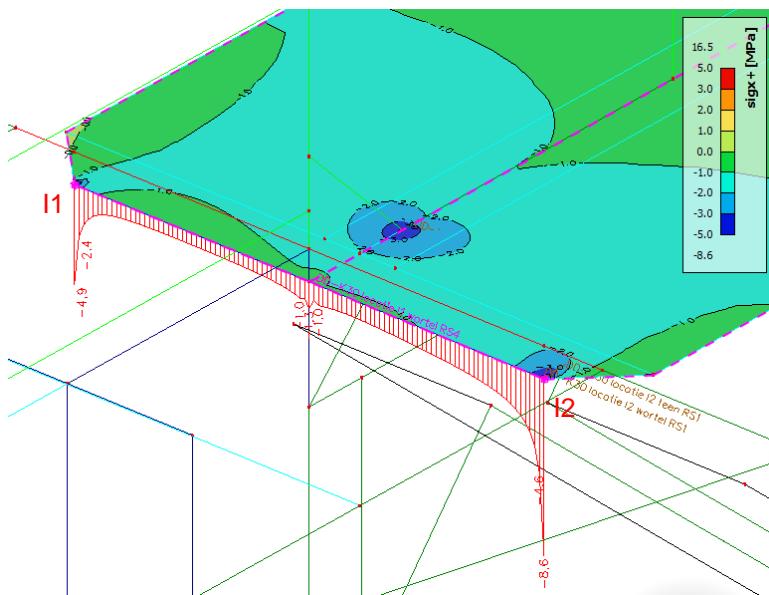
Tabel 94 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie H – teen van de las (DC = 100)

Geconcludeerd wordt dat de lasverbinding niet voldoet.

5.21.11 Detail I – Aansluiting onderflens dwarsdrager – kopschot

Detail I – Teen van de las

In de onderflens is een versmalling aangebracht bij de aansluiting op de kopplaat van 250 mm naar 200 mm. Hier treden ook spanningspieken op, hoewel deze aanzienlijk lager zijn als de voorgaande pieken.



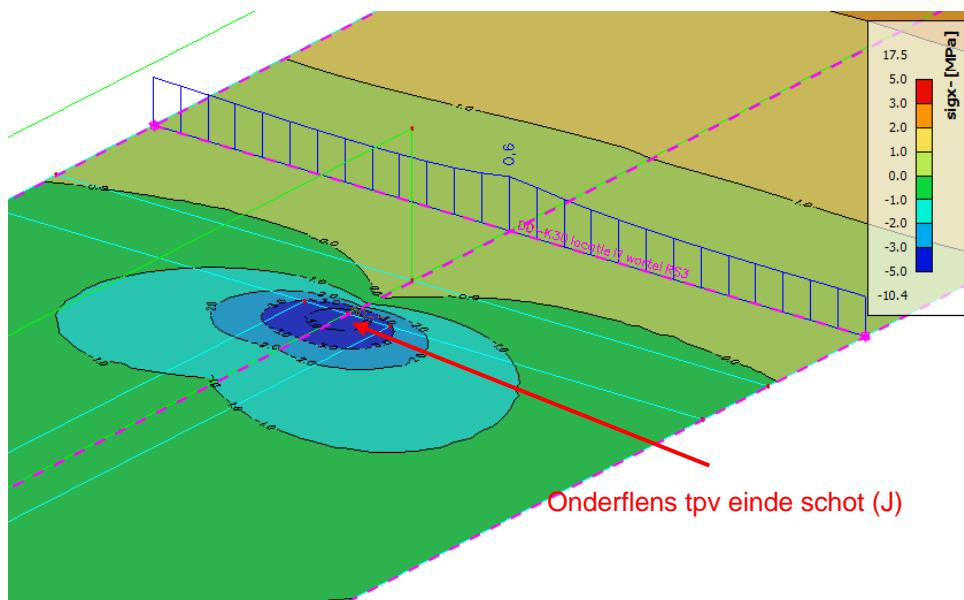
5.21.12 Detail J – Onderflens dwarsdrager t.p.v. einde schot

Voor de onderflens van de dwarsdrager geldt dat deze getoetst moet worden op detailcategorie 56, conform NEN -EN 1993-1-9 Tabel 8.4 Detail 1 ($L > 100$ mm), op basis van de nominale spanning in de onderflens.

Detail-categorie	Constructiedetail		Beschrijving	Eisen
80	$L \leq 50$ mm		<p>Aangelaste platen in de lengterichting:</p> <p>1) De detailcategorie varieert afhankelijk van de lengte L van de aangelaste plaat</p>	<p>De dikte van de aangelaste plaat moet kleiner zijn dan de hoogte ervan. Indien dit niet het geval is, volgens tabel 8.5, details 5 of 6.</p>
71	$50 < L \leq 80$ mm			
63	$80 < L \leq 100$ mm			
56	$L > 100$ mm			

Figuur 220 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding DD-zK, detail J

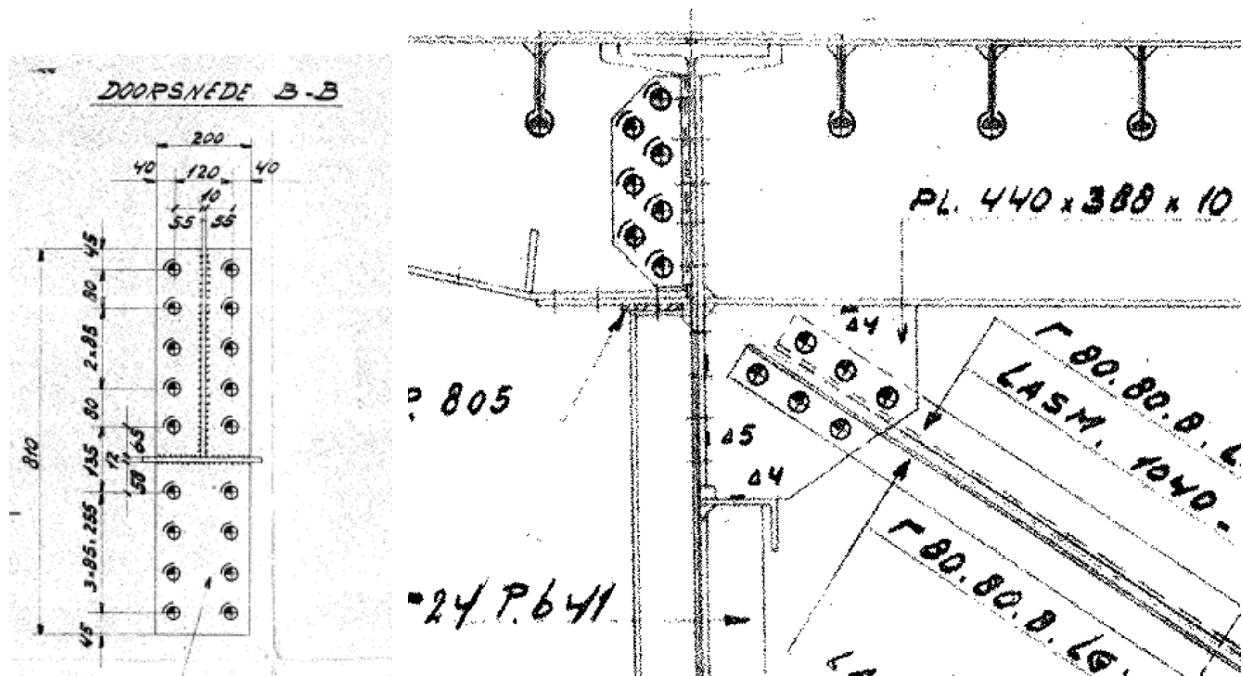
De piekspanningen treden ter plaatse van de aansluiting knieschot met de onderflens van de dwarsdrager. De nominale spanningen zijn echter dusdanig laag dat hier geen schade door zal optreden.



Figuur 221 – Spanning in onderflens t.g.v. eenheidslast op de dwarsdrager met K-verband

5.22 Type DD-K24: Verbinding hoofdlijker - dwarsdrager met K-verband met 1/2 INP24 dwarsverstijver

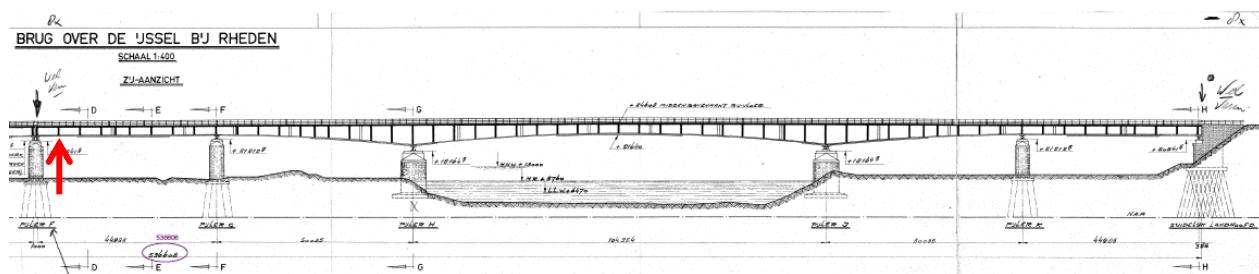
De dwarsdragers met K-verbanden ter plaatse van de $\frac{1}{2}$ INP24 dwarsverstijvers zijn op vergelijkbare wijze met de hoofdlijger verbonden als ter plaatse van de $\frac{1}{2}$ INP 30 dwarsverstijvers. Belangrijkste verschil tussen beide aansluitingen is de verbinding van de langsverstijver met de dwarsverstijver. Zo is het lijf van de $\frac{1}{2}$ INP24 dwarsverstijvers niet verbonden met de verticale flens van de langsverstijver, terwijl dit bij de $\frac{1}{2}$ INP30 dwarsverstijvers wel zo is.



Figuur 222 – Overzicht van de verbinding Type DD-K24

5.22.1 Locatie getoetste dwarsdrager

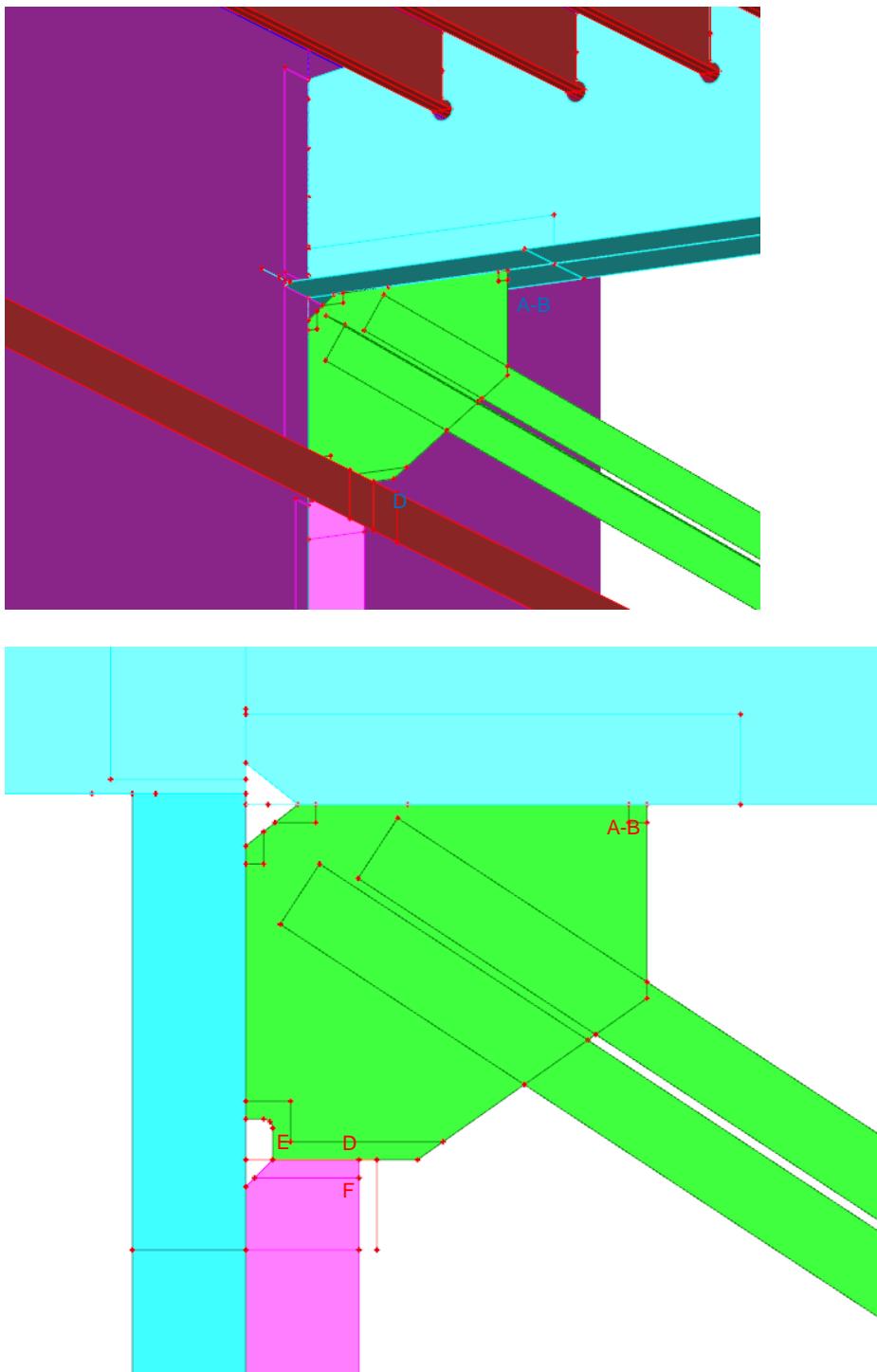
De getoetste en gemeten dwarsdrager komt overeen met de 1e dwarsdrager met k-verband in het 1^e veld. De spanningswisselingen in de verbinding zijn bepaald met het hybride model A, waarin over een lengte van de dwarsdrager 1 t/m 3 het rekenmodel is opgebouwd met plaatelementen. Ter plaatse van deze dwarsdrager is het lijf van de hoofdlijger met een ½ INP24 dwarsverstijver verstijfd.



Figuur 223 – Locatie getoetste dwarsdrager met K-verband, DD-K24.

5.22.2 Getoetste details

In de aansluiting tussen dwarsdrager en hoofdligger zijn verschillende details aanwezig die kritisch zijn ten aanzien van vermoeiing. Per onderdeel zal worden toegelicht hoe de toets-spanning is bepaald, waar de maatgevende snede zit en welke detailcategorie van toepassing is.



Figuur 224 – Getoetste details verbinding dwarsdrager (Type DD-K24)



Noordzijde



Zuidzijde

Figuur 225 – Overzicht details in schot dwarsdrager DD-K24

Gezien de overeenkomsten en verschillen met DD-K30 is alleen voor detail D, E en F een vermoeiingsberekening uitgevoerd. Voor de overige details wordt aangenomen dat hier een vergelijkbare spanning, en dus schade, optreedt als bij DD-K30. Voor detail A1/B is een vergelijking gemaakt tussen de beide locaties om dit te controleren. De volgende tabel geeft een beschrijving van de details die zijn getoetst en/of waar een meting is uitgevoerd. De vermoeiingsberekeningen zijn weergegeven in Bijlage E13.

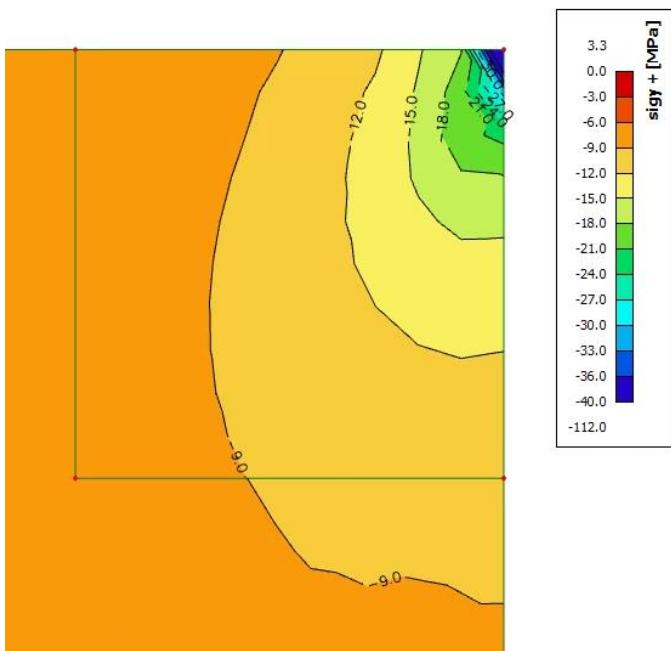
Detail	Beschrijving	Vermoeiingstoets	Gemeten
A1	Hoeklas schot – onderflens (type a)	**	
A2	Hoeklas schot – onderflens (type a)	**	
B	Hoeklas schot – onderflens (type b)	**	
C	Nominale spanning onderflens	**	
D	Hoeklas schot – horizontale flens langsverstijver	x	x
E	Hoeklas schot – horizontale flens langsverstijver	x	x
F	Hoeklas lijf dwarsverstijver – horizontale flens langsverstijver	x	x
G1/G2	Hoeklas lijf dwarsverstijver – kopschot	**	
G3/G4	Hoeklas schot – kopschot	**	
H	Las lijf dwarsverstijver – verticale flens langsverstijver	**	
I	Onderflens dwarsdrager – kopschot	**	
J	Onderflens dwarsdrager t.p.v. schot	**	

** Geometrie en spanningen komen overeen met K30 (zie paragraaf 5.22.3). Voor de toetsing van deze locatie wordt verwezen paragraaf 5.21

Tabel 97 – Overzicht toets- en meetlocaties dwarsdrager met K verband (DD-K24)

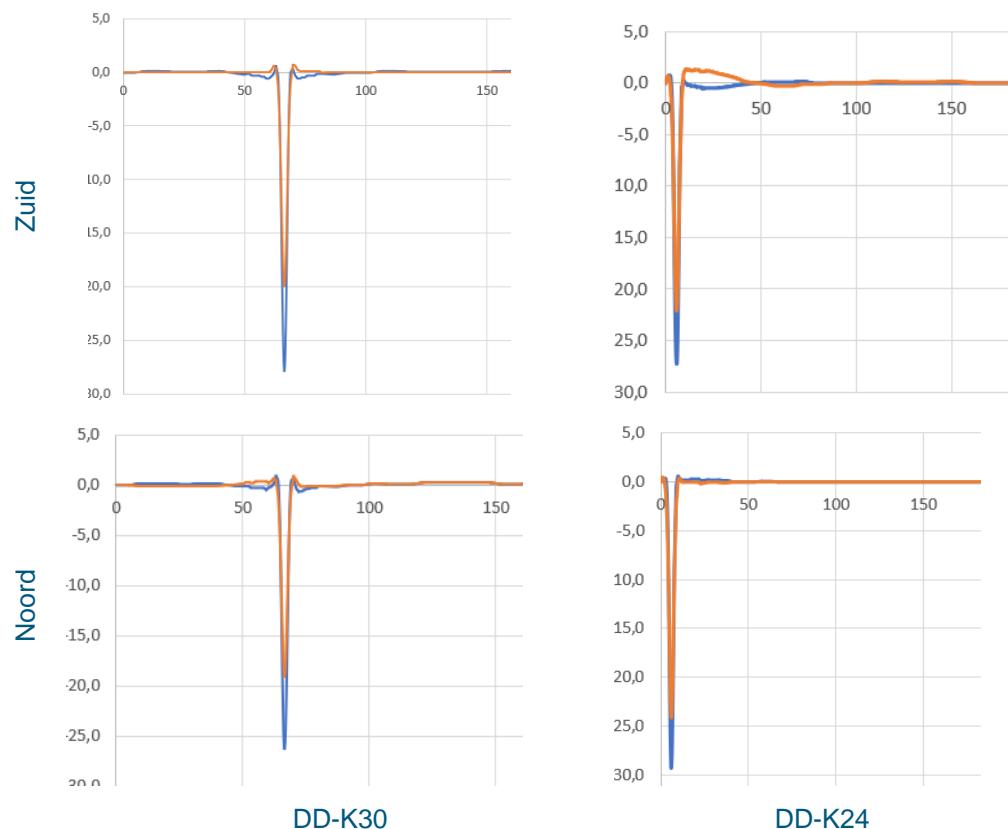
5.22.3 Detail A1/B - Aansluiting schot – onderflens dwarsdrager

Detail A1/B betreft de aansluiting aan de bovenzijde, aan het einde van het schot met de onderflens van de dwarsdrager. Op deze locatie is een spanningsconcentratie aanwezig. Er zijn geen metingen uitgevoerd op deze locatie.



Figuur 226 – Spanningen ter plaatse van detail A1/B schot – onderflens dwarsdrager

De geometrie, belastingen en detailcategorie van locatie A en B bij DD-K24 komt overeen met DD-K30. In onderstaand figuur zijn de invloedslijnen zonder reductie van DD-K30 en DD-K24 weergegeven. Zoals verwacht komen de spanningen redelijk goed overeen, voor DD-K24 worden ca. 10% hogere spanningen gevonden. Gezien het geringe verschil kan voor locatie A dan ook worden aangenomen dat de vermoeiingsanalyse van DD-K30 ook representatief is voor DD-K24. Voor de meetgegevens en de vermoeiingsberekening van locatie A wordt dan ook verwezen naar paragraaf 5.21.



Figuur 227 – invloedslijnen eenheidslast zonder reductie (DD-K30 + DD-K24)

5.22.4 Detail D – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver

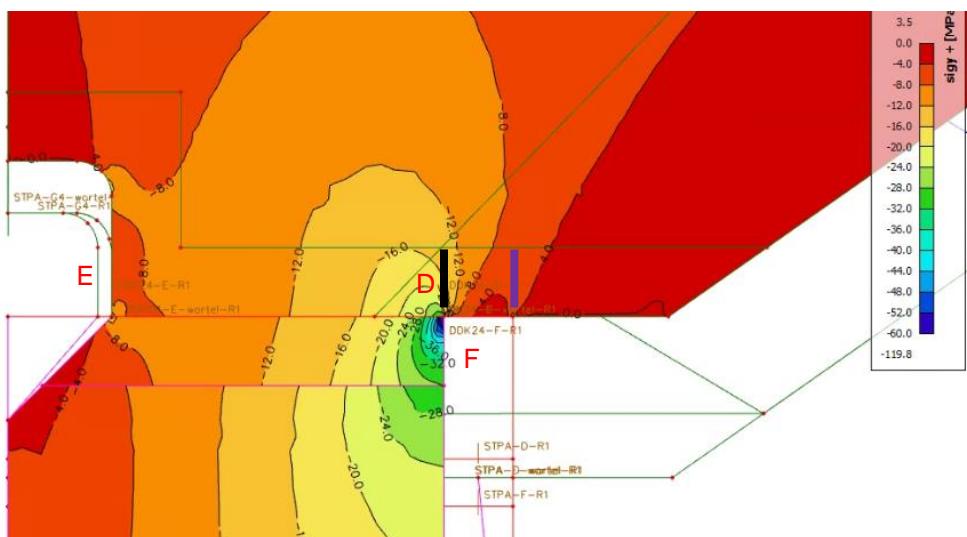
Detail D bevindt zich aan de onderzijde van het knieschot, bij de aansluiting met de horizontale flens van de langsverstijver. Voor dit detail zijn metingen op twee plekken uitgevoerd. In het meetplan was oorspronkelijk aangegeven om te meten in het verlengde van het einde van het lijf van de dwarsverstijver. Abusievelijk is echter gemeten in het verlengde van de buitenzijde van de verticale flens van de langsverstijver (D1) en op 10 mm naar binnen, in het verlengde van de binnenzijde van de verticale flens van de langsverstijver (D2).



Figuur 228 – Detailfoto's DD-K24 detail D1 en D2 south en north.

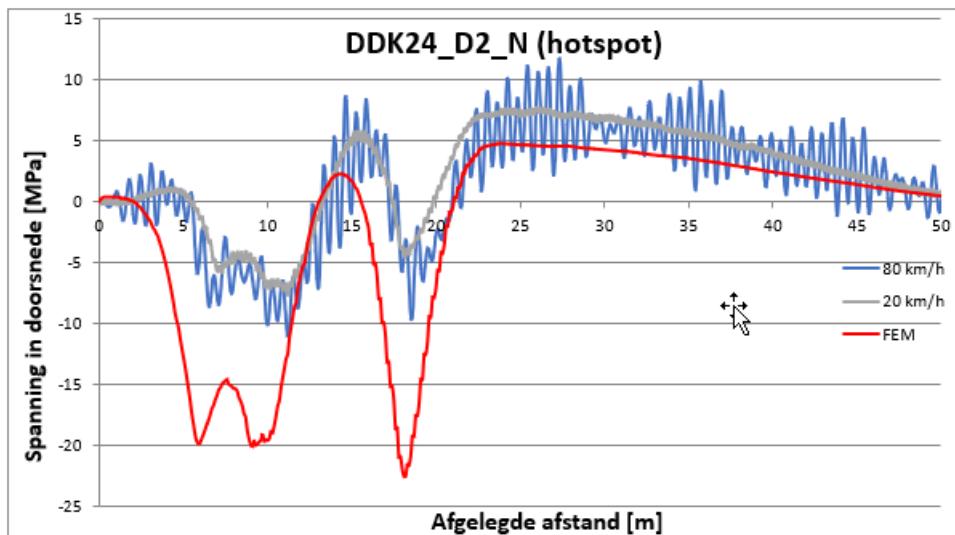
Detail D – teen van de las

De spanning ter plaatse van de teen van de las is in het model bepaald door de hotspotspanning te bepalen ter plaatse van de spanningspiek in het verlengde van het lijf van de dwarsverstijver (zie zwarte lijn), door een extrapolatie van de spanningen op 0,4t en 1,0t. Dit wijkt dus af van de locatie van de meting (paarse lijn).



Figuur 229 – Spanning ter plaatse van de aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver (σ_{y+}) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN)

In Bijlage G is een vergelijking gemaakt van de berekende hotspotspanning en de gemeten hotspot spanningen ter plaatse van D1 en D2, zowel voor de noord- als de zuidzijde. Omdat de meting op de verkeerde plek is uitgevoerd, is deze vergelijking dus niet van dezelfde locatie en waarschijnlijk dus ook niet de locatie met de maximale spanning geweest. De vergelijking is in dit geval dus maar beperkt van nut. De vorm van de invloedslijn komt wel overeen. De hoogste spanning treedt op op locatie D2_noord.



Figuur 230 – Hotspotspanning DD-K24 detail D2-noord

De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening niet vermenigvuldigd met een modelfactor aangezien de locatie van de rekstroken niet overeenkomt met de locatie waar de maximale spanningen optreden. De vermoeiingstoets is daarom gebaseerd op de berekende invloedslijn. In de toets wordt uitgegaan van Detailcategorie $\Delta\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2$, o.b.v. IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components”, tabel 3.3, detail 6, vergelijkbaar voor detail A1.

De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald eind 2018 en eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

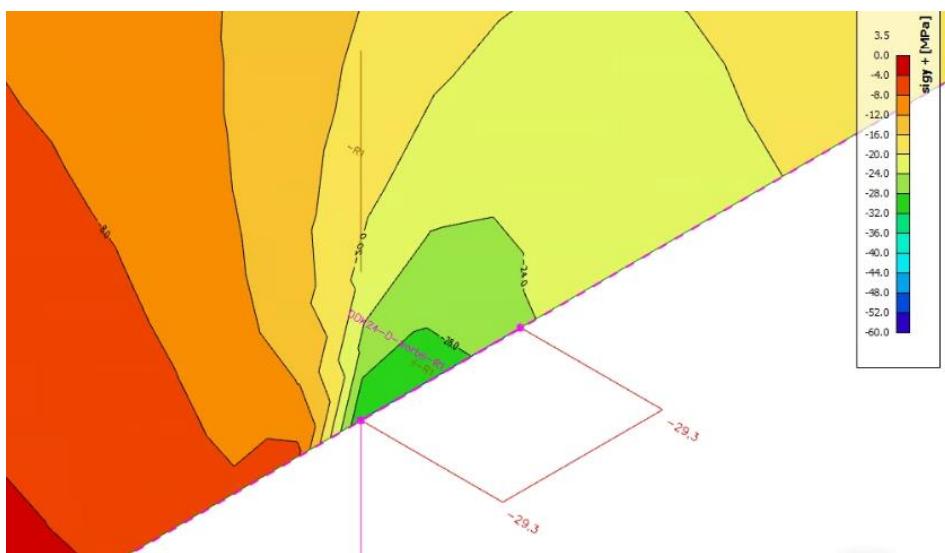
γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	4,1	11,0	4,0	7,7	3,4	6,9	1,9	3,8
1,15	2,2	6,0	2,1	4,2	1,9	3,7	1,0	2,0
1	1,2	3,4	1,2	2,3	1,0	2,1	0,5	1,1

Tabel 98 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor DD-K24 detail D North.

Detail D – Wortel van de las

Omdat er een sterke spanningsgradiënt aanwezig is bij het uiteinde van het schot, is de spanningswisseling bepaald conform “IIW Guideline for the Assessment of Weld Root Fatigue” [11] paragraaf 3.3.2. De toepassing van deze methode wordt beschreven in het hoofdstuk 5.20.3.

De gemiddelde spanning is bepaald met behulp van SCIA door over de laatste 5 mm de gemiddelde spanning in de schotplaat met de dikte van 10 mm op te vragen.



Figuur 231 – Gemiddelde spanning in de laatste 5 mm van de plaat (σ_y) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN) t.p.v. detail D

Voor de toetsing dient de spanningswisseling in de las bepaald te worden. Conform de bovengenoemde methode kan de (maximale) normaalspanning in de las ($a = 4 \text{ mm}$) ten gevolge van de eenheidslast (2x50 kN) als volgt bepaald worden. Het bepalen van de spanningen in de las wordt in het hoofdstuk 5.20.3 verder uitgewerkt daarom wordt het hier niet nog een keer behandeld.

Conform TNO Notitie 100315818/ALL mag de verbinding uitgerekend worden met detailcategorie 40, waarbij rekening wordt gehouden met de aanwezige drukspanning en de restspanningen t.g.v. de las proces. Dit is dus iets gunstiger als detailcategorie 36* conform de Eurocode.

$$\Delta\sigma_{eff} = \begin{cases} \alpha * \Delta\sigma & \text{if } \sigma_{max,i} \leq 0 \\ \Delta\sigma & \text{if } \sigma_{min,i} \geq 0 \\ \sigma_{max,i} - \alpha * \sigma_{min,i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

waarin:

$$\sigma_{max,i} = \frac{\Delta\sigma}{1-R} + \sigma_{res} \quad (6)$$

$$\sigma_{min,i} = \sigma_{max,i} - \Delta\sigma \quad (7)$$

	σ_{res} [N/mm ²]	α [-]	representatief voor
type 1	28.53	0.00	contact tussen platen
type 2	13.12	0.63	geen contact tussen platen

Zowel voor type 1 als type 2 geldt bij deze effectieve spanningsrange een karakteristieke vermoeiingssterkte bij $2 \cdot 10^6$ wisselingen van $\Delta\sigma = 40 \text{ N/mm}^2$, een kniepunt bij 10^7 wisselingen en een afkapwaarde bij 10^8 wisselingen, met hellingsparameters $m_1 = 3$ en $m_2 = 5$. Zie Figuur 11 en Figuur 12.

In afwijking van de methode conform IIW, waarbij een vergelijksspanning wordt gehanteerd, moet nu onderscheid gemaakt worden tussen de normaalspanning en de schuifspanningen. De normaalspanning loodrecht op de lengteas van de las ($\sigma_{\perp,w,loc}$) wordt getoetst op detailcategorie 40, rekening houdend met de aanwezige (druk)spanning, conform bovenstaande methode van TNO, de schuifspanning evenwijdig aan de lengteas van de las ($\tau_{II,w,loc}$) wordt getoetst op detailcategorie 80 met heling $m = -5$, conform NEN-EN 1993-1-9. De schade van de beide berekeningen dient bij elkaar opgeteld te worden.

In onderstaande tabellen zijn de toetsresultaten weergegeven voor de normaalspanning, waarbij getoetst is volgens de methode uit de notitie van TNO, zowel voor type 1 (wel contact tussen de platen) als type 2 (geen contact tussen de platen). De maatgevende van de twee toetsingen dient aangehouden te worden en opgeteld bij de schade door de schuifspanning evenwijdig aan de lengteas van de las.

Type 1 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	8,3	21,4	6,9	13,2	7,0	13,5	3,4	6,6
1,15	4,9	12,7	4,0	7,8	4,1	8,0	2,0	3,9
1	2,9	7,7	2,4	4,8	2,4	4,8	1,2	2,4

Tabel 99 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail D – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 1 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	5,6	14,7	4,8	8,9	4,8	9,3	2,2	4,3
1,15	3,1	8,5	2,7	5,0	2,6	5,3	1,2	2,4
1	1,8	4,9	1,6	2,9	1,5	3,1	0,7	1,4

Tabel 100 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail D – wortel van de las (DC = 40, type 2)

Gezien de overschrijding is de schade door de schuifspanning niet meer bepaald, aangezien de verbinding nu al niet voldoet. De schade door de schuifspanning moet eigenlijk nog opgeteld worden bij bovengenoemde schade

Geconcludeerd wordt dat bij locatie D zowel de teen als de wortel van de las niet voldoet.

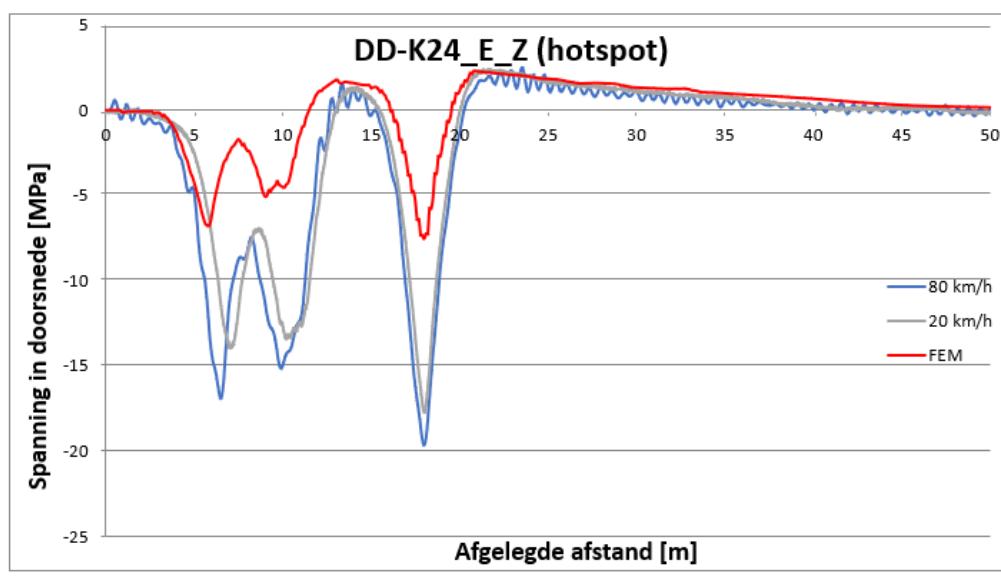
5.22.5 Detail E – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver

Detail E bevindt zich aan de onderzijde van het schot, bij de aansluiting met de horizontale flens van de langsverstijver, aan de zijde dicht bij het lijf van de hoofdligger. Hier bevindt zich een laspoortje.



Figuur 232 – Detailfoto DD-K24 detail E

In het model werden hier relatief lage spanningen gevonden. Tijdens de meting bleek dat de gemeten spanningen aanzienlijk hoger uitvielen. Bijlage G geeft de vergelijking tussen de metingen en de berekende hotspotspanningen. De hoogste spanningen werden gevonden aan de zuidzijde, waar de verhouding meting ten opzichte van berekende hotspotspanningswisseling gelijk is aan 203%.



meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	2,5 N/mm ²		2,3 N/mm ²	2,3 N/mm ²
min	-19,6 N/mm ²		-17,7 N/mm ²	-7,5 N/mm ²
range	22,1 N/mm ²		20,0 N/mm ²	9,8 N/mm ²
modelfac.	225%	modelfac.	203%	

Figuur 233 – Hotspotspanning DD-K24 detail E, zuidzijde

Detail E – Teen van de las

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald. Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (van DD-k24, detail E, zuidzijde) en is gelijk aan 203%. De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening vermenigvuldigd met deze modelfactor, waarna een vermoeiingsberekening van de teen van de las is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van Detailcategorie $\Delta\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2$, o.b.v. IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components” [10], tabel 3.3, detail 6.

De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiale veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald eind 2018 en eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,5	1,6	0,3	0,5	0,4	1,0	0,0	0,1
1,15	0,2	0,6	0,1	0,2	0,1	0,4	0,0	0,0
1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0

Tabel 101 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor DD-K24 detail E

Detail E – Wortel van de las

De wortel is op gelijke wijze als voor detail D getoetst. Hiervoor is de gemiddelde spanning in de laatste $t/2 = 5 \text{ mm}$ uitgelezen en vertaald naar een spanning in de las.

Onderstaand is het resultaat van de schadeberekening weergegeven voor de normaalspanning in de las ($\sigma_{\perp,w,loc}$), waarbij is getoetst op detailcategorie 40, rekening houdend met de aanwezige (druk)spanning door het eigen gewicht (zie detail E voor de beschrijving van deze methode). Er is geen rekening gehouden met de hogere gemeten spanning, omdat het voor de wortel lastig is om eenduidig de reductie / toeslag te bepalen.

Type 1	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,1	0,3	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0
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 102 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail E – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 1	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 103 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail D – wortel van de las (DC = 40, type 2)

De maximale schade bedraagt 0,3. De schade door de schuifspanning moet hier nog bij opgeteld worden. Bovengenoemde schades zijn echter zo klein dat het aannemelijk is dat de totale schade niet boven de 1,0 uit zal komen.

Geconcludeerd wordt dat bij locatie E alleen de teen van de las op één locatie niet voldoet. Omdat locatie D ook niet voldoet wordt aanbevolen om toch de gehele las tussen D en E te vervangen.

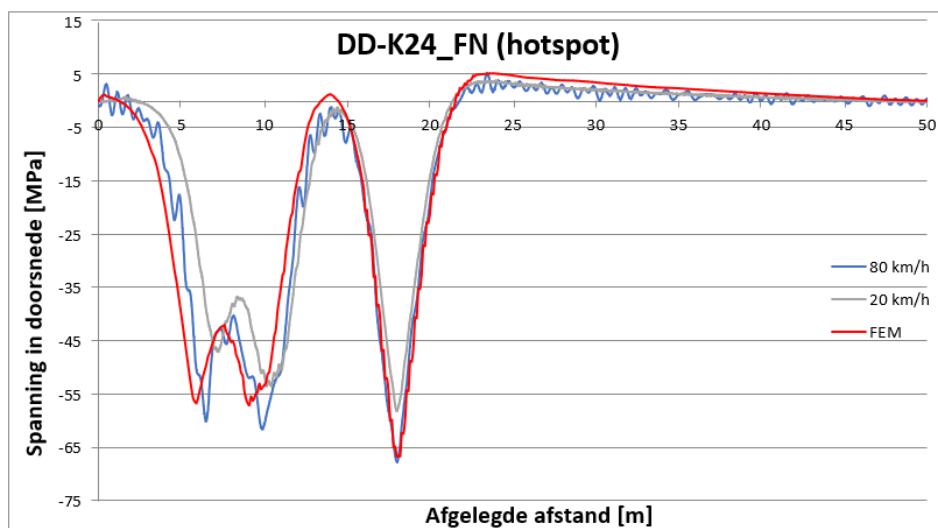
5.22.6 Detail F – Aansluiting horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver

Detail F bevindt zich op het lijf van de dwarsverstijver, net onder de horizontale flens van de langsverstijver, aan de zijde dicht bij de verticale flens van de langsverstijver.



Figuur 234 – Detailfoto DD-K24 detail F

Bijlage G geeft de vergelijking tussen de metingen en de berekende hotspotspanningen. De hoogste spanningen inclusief reductie treden op aan de noordzijde. De verhouding tussen de meting en de berekende hotspotspanningswisseling bedraagt hierbij 86%.



meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	5,3 N/mm ²		3,8 N/mm ²	5,3 N/mm ²
min	-67,7 N/mm ²		-58,0 N/mm ²	-66,7 N/mm ²
range	73,0 N/mm ²		61,8 N/mm ²	72,0 N/mm ²
modelfac.	101%	modelfac.	86%	

Figuur 235 – Hotspotspanning DD-K24 detail F, zuidzijde

Detail F – Teen van de las

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald. Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (van DD-k24, detail F, zuidzijde). Er is daarbij uitgegaan van een type a extrapolatie. De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening vermenigvuldigd met deze modelfactor, waarna een vermoeiingsberekening van de teen van de las is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van Detailcategorie $\Delta\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2$, o.b.v. IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components” [10], tabel 3.3, detail 6.

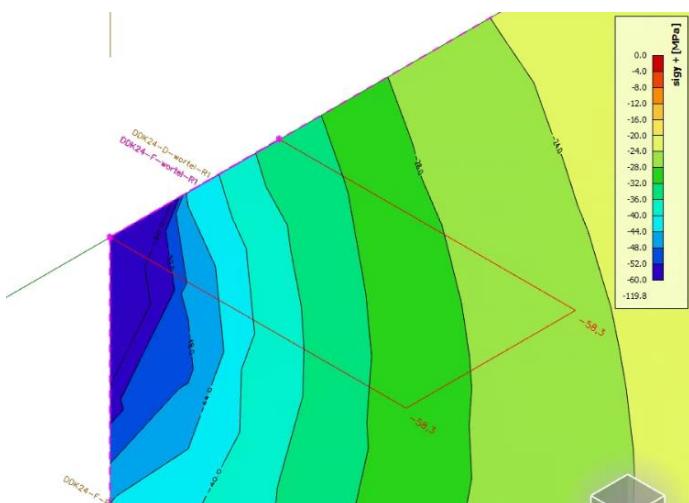
De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald eind 2018 en eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	61,7	158,2	49,6	90,9	52,2	100,5	22,1	42,8
1,15	37,6	96,9	30,1	55,3	31,8	61,4	13,3	25,9
1	24,2	62,5	19,3	35,5	20,4	39,6	8,5	16,6

Tabel 104 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor DD-K24 detail F

Detail F – Wortel van de las

De wortel ter plaatse van detail F is op gelijke wijze als voor detail D getoetst. Hiervoor is de gemiddelde spanning in de laatste $t/2 = 4,35 \text{ mm}$ uitgelezen en vertaald naar een spanning in de las.



Figuur 236 – Gemiddelde spanning in de laatste 5 mm van de plaat (σ_y) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN) t.p.v. detail F

Onderstaand is het resultaat van de schadeberekening weergegeven voor de normaalspanning in de las ($\sigma_{\perp,w,loc}$), waarbij is getoetst op detailcategorie 40, rekening houdend met de aanwezige (druk)spanning door het eigen gewicht (zie detail D voor de beschrijving van deze methode). Er is geen rekening gehouden met de lagere gemeten spanning, omdat het voor de wortel lastig is om eenduidig de reductie te bepalen en er toch al grote overschrijdingen zijn gevonden voor de teen van de las.

Type 1	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	15,8	38,5	13,7	28,0	12,6	23,9	7,7	14,8
1,15	9,6	23,4	8,2	16,7	7,6	14,5	4,5	8,8
1	5,9	14,6	5,0	10,3	4,7	9,0	2,8	5,4

Tabel 105 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail F – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 2	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	20,6	52,4	16,7	31,4	17,2	33,1	7,8	15,1
1,15	12,3	31,6	10,0	18,8	10,3	19,9	4,6	9,1
1	7,8	20,1	6,3	11,9	6,5	12,7	2,9	5,7

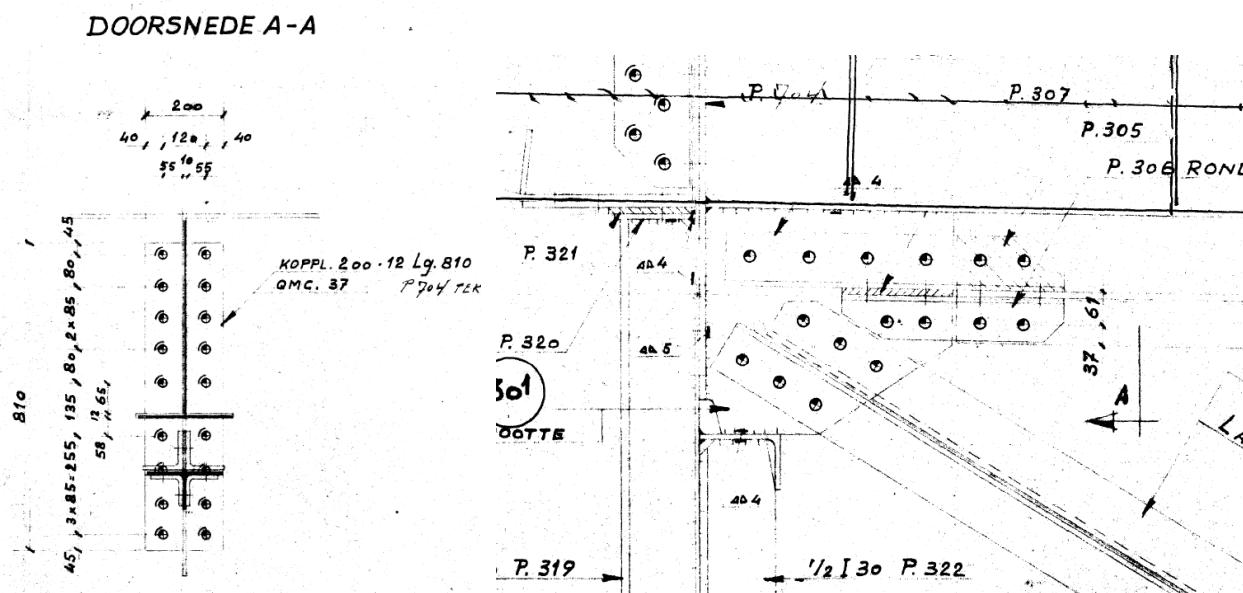
Tabel 106 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail F – wortel van de las (DC = 40, type 2)

Gezien de overschrijding is de schade door de schuifspanning niet meer bepaald, aangezien de verbinding nu al niet voldoet. De schade door de schuifspanning moet eigenlijk nog opgeteld worden bij bovengenoemde schade.

Geconcludeerd wordt dat bij locatie F zowel de teen als de wortel van de las niet voldoet.

5.23 Type DD-STPA: Verbinding hoofdlijger - dwarsdragers portaal A

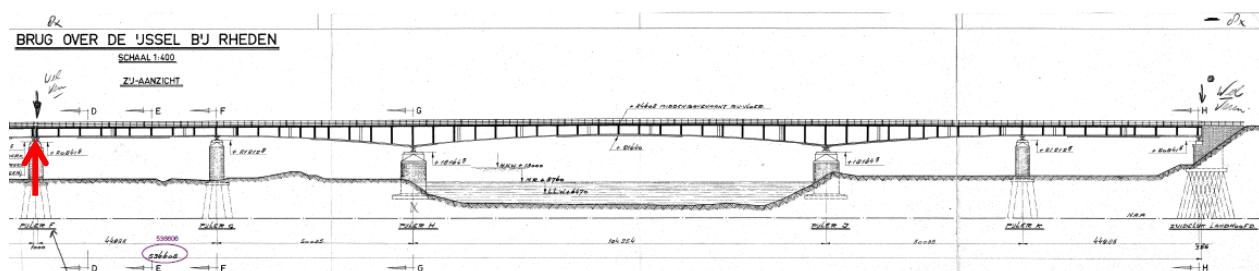
Bij de portalen spelen naast het lokale effect van een aslast boven de dwarsdrager ook globale effecten als de afdracht van de belasting op de hoofdlijger naar het steunpunt. Hierdoor kunnen de spanningen in de verschillende details afwijken van de normale dwarsdragers. De geometrie van de aansluiting tussen de dwarsdrager bij portaal A en de hoofdlijger is op hoofdlijnen vergelijkbaar met de normale dwarsdragers met k-verbanden. Wel is er een extra horizontale bovenregel aanwezig die aansluit op het schot, waardoor het schot wat breder is dan bij de andere dwarsdragers.



Figuur 237 – Overzicht van de verbinding Type STPA

5.23.1 Locatie getoetste dwarsdrager

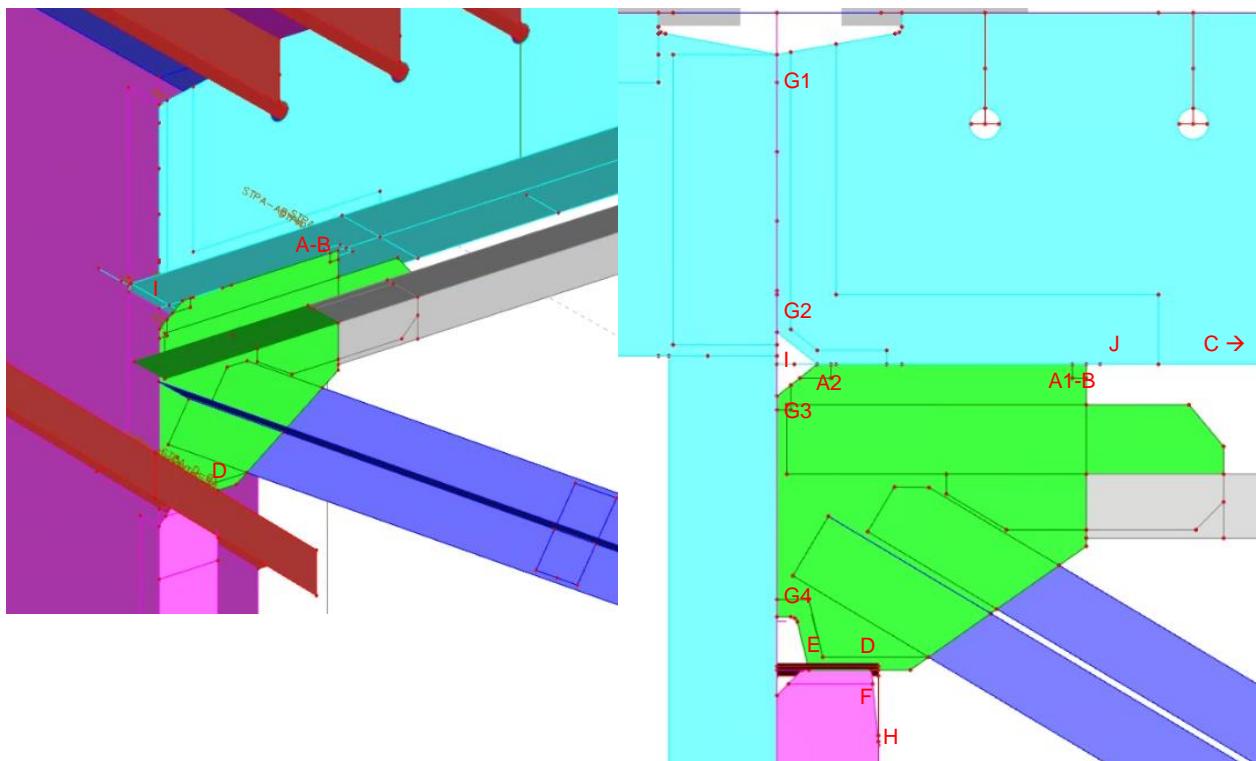
De getoetste en gemeten dwarsdrager komt overeen met de 1e dwarsdrager van de hoofdbrug aan de noordzijde. De spanningswisselingen in de verbinding zijn bepaald met het hybride model A, waarin over een lengte van de dwarsdrager 1 t/m 3 het rekenmodel is opgebouwd met plaatelementen. Ter plaatse van deze dwarsdrager wordt het lijf van de hoofdlijger met $\frac{1}{2}$ INP30 in de dwarsrichting versterkt. Daarnaast zijn beide knieschotten met elkaar verbonden door een horizontale bovenregel, bestaande uit een samengesteld t-profiel.



Figuur 238 – Locatie getoetste dwarsdrager portaal A, DD-STPA

5.23.2 Getoetste details

In de aansluiting tussen dwarsdrager en hoofdligger zijn verschillende details aanwezig die kritisch zijn ten aanzien van vermoeiing. Per onderdeel zal worden toegelicht hoe de toets-spanning is bepaald, waar de maatgevende snede zit en welke detailcategorie van toepassing is.



Figuur 239 – Getoetste details verbinding dwarsdrager (Type STPA)

De volgende tabel geeft een beschrijving van de details die zijn getoetst en/of waar een meting is uitgevoerd.

Detail	Beschrijving	Vermoeiingstoets	Gemeten
A1	Hoeklas schot – onderflens (type a)	x	x
A1	Hoeklas schot – onderflens (type a)	x	
B	Hoeklas schot – onderflens (type b)		x
C	Nominale spanning onderflens	x	x
D	Hoeklas schot – horizontale flens langsverstijver	x	x
E	Hoeklas schot – horizontale flens langsverstijver	x	x
F	Hoeklas lijf dwarsverstijver – horizontale flens langsverstijver	x	x
G1/G2	Hoeklas lijf dwarsverstijver – kopschot	x	x
G3/G4	Hoeklas schot – kopschot	x	x
H	Las lijf dwarsverstijver – verticale flens langsverstijver		
I	Onderflens dwarsdrager – kopschot	x	
J	Onderflens dwarsdrager t.p.v. schot	x	

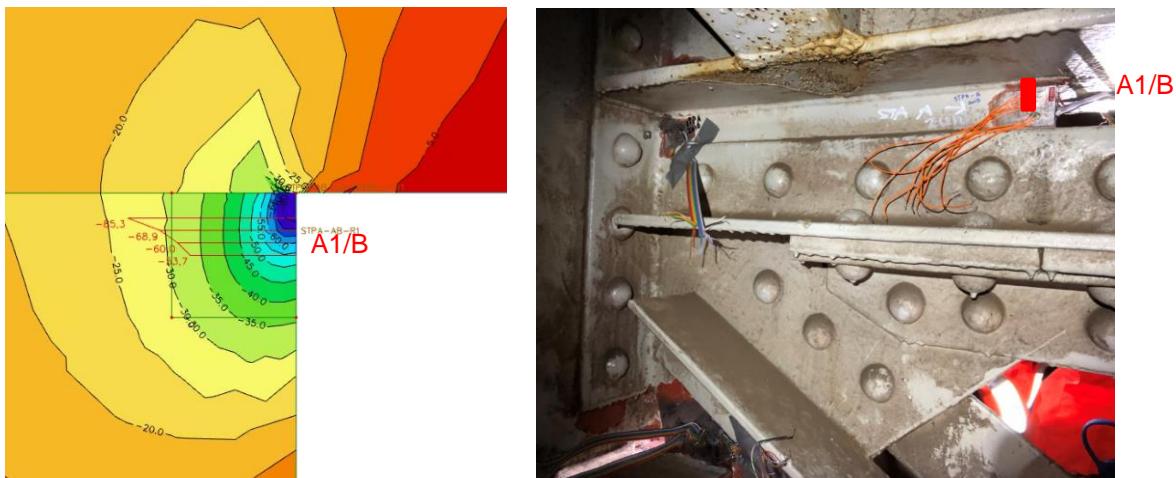
Tabel 107 – Overzicht toets- en meetlocaties dwarsdrager met K verband (DD-K24)

Voor de verbinding in de bovenflens van de dwarsdrager geldt dat deze direct berekend wordt door een wielprint. Uit de spanningswisselingen uit het lokale model volgt dat lokale buiging van het dek/bovenflens hoofdlijker in de richting haaks op het lijf van de hoofdlijker bepalend is voor de spanningswisseling en dus de vermoeiingsberekening. Toetsing van de dekconstructie valt echter buiten de scope van de opdracht en is daarom hier nu niet verder getoetst. De vermoeiingsberekeningen zijn weergegeven in Bijlage E21.

Verder wordt opgemerkt dat de las tussen de verticale flens van de langsverstijver en het lijf van de dwarsverstijver niet aanwezig bleek te zijn. Hierdoor ontstaan er nagenoeg geen spanningen t.p.v. locatie H en is deze locatie dan ook niet getoetst, zie ook paragraaf 5.23.5. De spanningen t.p.v. locatie F zullen daarentegen hoger zijn. In het model is de verbinding tussen verticale flens langsverstijver en lijf dwarsverstijver dan ook aangepast en niet verbonden.

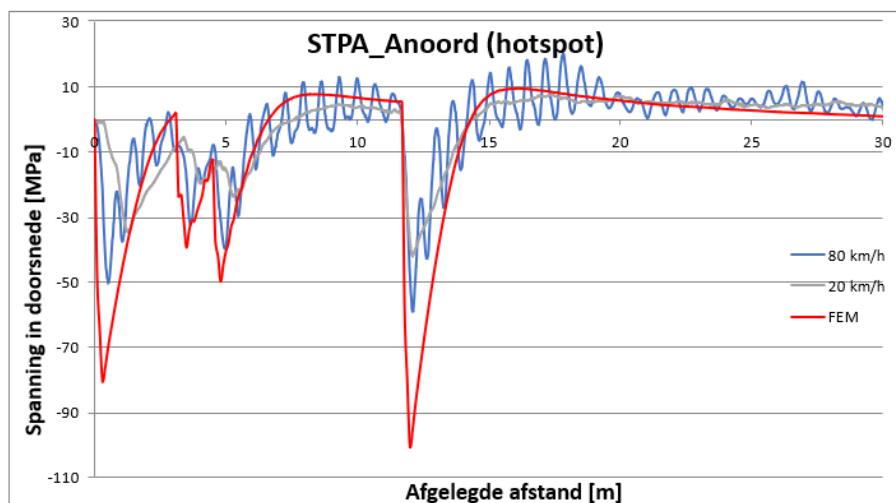
5.23.3 Detail A1/B - Aansluiting schot – onderflens dwarsdrager

Aan het einde van het schot, bij de aansluiting op de onderflens van de dwarsdrager van portaal B is een spanningsconcentratie aanwezig. Metingen zijn uitgevoerd aan de voor en achterzijde (detail A1) en aan de kopse zijde (detail B).



Figuur 240 – Spanningen σ_y ter plaatse van detail A/B schot – onderflens dwarsdrager

In Bijlage G is de vergelijking van de gemeten spanningen en de berekende spanningen gegeven voor detail A1 (noord en zuid zijde) en detail B. De hoogste gemiddelde gemeten hotspot spanningswisseling treedt op in detail A1 (noord).



meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	20,2 N/mm ²		7,5 N/mm ²	9,5 N/mm ²
min	-58,9 N/mm ²		-41,8 N/mm ²	-100,2 N/mm ²
range	79,1 N/mm ²		49,2 N/mm ²	109,7 N/mm ²
modelfac.	72%	modelfac.	45%	

Figuur 241 – Spanningswisseling hotspotspanningen DD-STPA detail A1 noord

Invloed dynamische effecten meetresultaten

Uit de metingen is gebleken dat er ter plaatse van detail A1/B een aanzienlijk dynamisch effect optreedt. De werkelijke dynamische stootfactor is daarmee hoger dan waarmee wordt gerekend in de vermoeiingstoetsen. TNO heeft een stootfactor van ca. 1.54 afgeleid voor locatie A1/B uit de meetresultaten van detail A1/B. De norm schrijft voor bestaande bouw met kwalitatief goed wegdek een factor van $1,1 * 1,15 = 1,27$ voor. Het verschil wordt voor deze locatie veroorzaakt door de defecte voegovergang. Voor de overige details is dit dynamisch effect minder groot en kan worden volstaan met de vergrotingsfactor conform de norm.

Voor detail A1/B is conform de afleiding van TNO gerekend met een verhoogde dynamische vergrotingsfactor van 1,54. Voor een eventuele versterking kan gerekend worden met de normale vergrotingsfactor, omdat de voegconstructie vervangen zal worden tijdens de renovatie.

Detail A1/B – Teen van de las

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald (45%). Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (detail A (noord)). De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening van de teen van de las vermenigvuldigd met deze modelfactor, waarna een vermoeiingsberekening is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van een hotspot-analyse met een detailcategorie DC = 90, conform tabel 3.3, detail 6 van IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components”.

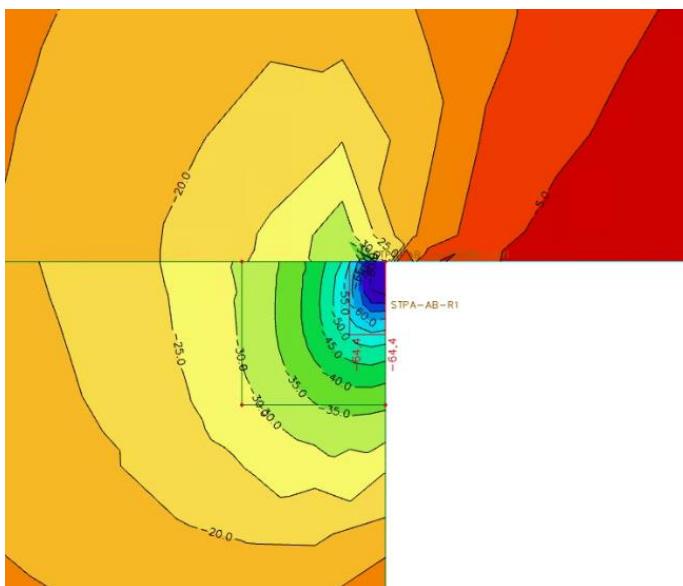
In onderstaande tabel zijn de schadegetallen weergegeven voor drie verschillende veiligheidsfactoren. De lasverbinding voldoet niet aan de schade-eis $D \leq 1,0$.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1.35	44,9	101,1	44,0	97,5	30,1	58,2	28,3	55,1
1.15	27,5	62,0	27,0	59,9	18,4	35,6	17,4	33,8
1.00	17,9	40,4	17,6	39,0	12,0	23,3	11,2	21,9

Tabel 108 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail A – teen van de las

Detail A1/B – wortel van de las

De toetsing van de wortel van de las is uitgevoerd conform "IIW Guideline for the Assessment of Weld Root Fatigue" paragraaf 3.3.2, waarbij de kracht in de laatste t/2 mm aan het einde van de plaat wordt verdeeld over de omliggende las. De gemiddelde spanning is bepaald met behulp van SCIA door over de laatste 5 mm de gemiddelde spanning in de plaat op te vragen.



Figuur 242 – Gemiddelde spanning in de laatste 5 mm van de plaat (σ_y) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN)

Voor de toetsing dient de spanningswisseling in de las bepaald te worden. Conform de bovengenoemde methode kan de (maximale) normaalspanning in de las ($a = 4 \text{ mm}$) ten gevolge van de eenheidslast (2x50 kN) als volgt bepaald worden.

$$\sigma_{\perp,w,loc} = \frac{F_y}{2a \cdot t + a^2} = \frac{\sigma_y \cdot 5\text{mm} \cdot 10\text{mm}}{2 \cdot 4\text{mm} \cdot 10\text{mm} + (4\text{mm})^2} = 0.52 \cdot \sigma_y$$

De (maximale) schuifspanning parallel aan de las kan op vergelijkbare wijze worden bepaald en is gelijk aan:

$$\tau_{\parallel,w,loc} = \frac{F_z}{2a \cdot t + a^2} = \frac{\tau_{xy} \cdot 5\text{mm} \cdot 10\text{mm}}{2 \cdot 4\text{mm} \cdot 10\text{mm} + (4\text{mm})^2} = 0.52 \cdot \tau_{xy}$$

In afwijking van de methode conform IIW, waarbij een vergelijkspanning wordt gehanteerd, moet nu onderscheid gemaakt worden tussen de normaalspanning en de schuifspanningen. De normaalspanning loodrecht op de lengteas van de las ($\sigma_{\perp,w,loc}$) wordt getoetst op detailcategorie 40, rekening houdend met de aanwezige (druk)spanning, conform TNO Notitie 100315818/ALL, de schuifspanning evenwijdig aan de lengteas van de las ($\tau_{\parallel,w,loc}$) wordt getoetst op detailcategorie 80, conform NEN-1993-1-9. De schade van de beide berekeningen dient bij elkaar opgeteld te worden.

In onderstaande tabellen zijn de toetsresultaten weergegeven voor de normaalspanning, waarbij getoetst is volgens de methode uit de notitie van TNO, zowel voor type 1 (wel contact tussen de platen) als type 2 (geen contact tussen de platen). De maatgevende van de twee toetsingen dient aangehouden te worden en opgeteld bij de schade door de schuifspanning evenwijdig aan de lengteas van de las.

Type 1	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1.35	44,9	101,1	44,0	97,5	30,1	58,2	28,3	55,1
1.15	27,5	62,0	27,0	59,9	18,4	35,6	17,4	33,8
1.00	17,9	40,4	17,6	39,0	12,0	23,3	11,2	21,9

Tabel 109 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail A – wortel van de las ($DC = 40$, type 1)

Type 2	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1.35	74,6	175,7	70,0	150,1	53,6	104,1	42,1	82,2
1.15	45,7	107,8	42,8	91,8	32,9	63,9	25,6	50,2
1.00	29,5	69,9	27,6	59,3	21,2	41,4	16,5	32,3

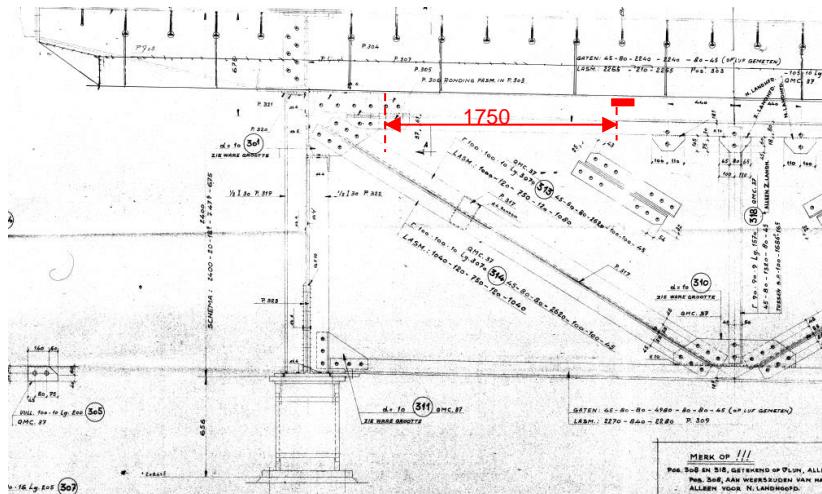
Tabel 110 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail A – wortel van de las ($DC = 40$, type 2)

Gezien de overschrijding is de schade door de schuifspanning niet meer bepaald, aangezien de verbinding nu al niet voldoet.

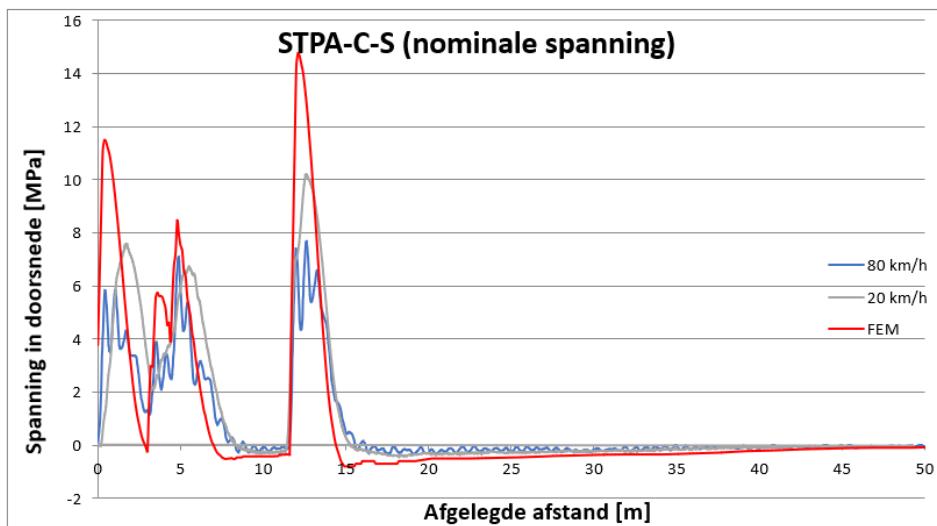
Geconcludeerd wordt dat bij locatie A1 zowel de teen als de wortel niet voldoen.

5.23.4 Detail C – Onderflens dwarsdrager (nominaal)

Ter plaatse van locatie C is een meting uitgevoerd om een vergelijking tussen de nominale spanningen uit het rekenmodel en de metingen uit te kunnen voeren. Hiervoor is gemeten op 1,75 m uit de rand van het schot.



Figuur 243 – Overzicht DD-STPA locatie C



meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	7,7 N/mm ²		10,2 N/mm ²	14,7 N/mm ²
min	-0,3 N/mm ²		-0,4 N/mm ²	-0,8 N/mm ²
range	8,0 N/mm ²		10,6 N/mm ²	15,5 N/mm ²
modelfac.	52%	modelfac.	68%	

Figuur 244 – Spanningswisseling (nominaal) DD-STPA locatie C

De vorm van de spanningen komen goed overeen tussen model en meting. Wel zijn de gemeten spanningen wat lager als berekend (68%), vermoedelijk om dat de voegconstructie een deel van de spanningen op zal vangen. Omdat locatie C een nominale spanning betreft en niet een vermoeiingsgevoelig detail is er voor deze locatie geen vermoeiingsberekening uitgevoerd.

5.23.5 Detail D – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver

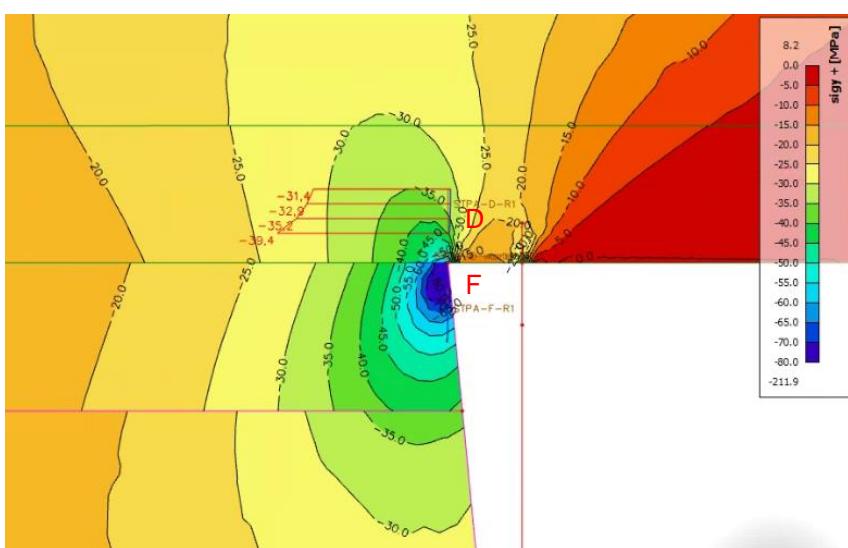
Detail D bevindt zich aan de onderzijde van het knieschot, bij de aansluiting met de horizontale flens van de langsverstijver. Voor dit detail zijn metingen op twee plekken uitgevoerd, D1 in het verlengde van de binnenzijde van het laspoortje onder de langsverstijver, D2 op 10 mm naar binnen. Er is niet op de hoek, in het verlengde van de verticale flens van de langsverstijver gemeten, omdat er tijdens de inspectie is gebleken dat er geen verbinding is tussen de verticale flens van de langsverstijver en het lijf van de dwarsverstijver.



Figuur 245 – Detailfoto DD-STPA locatie D1 North en D2 North

Detail D – teen van de las

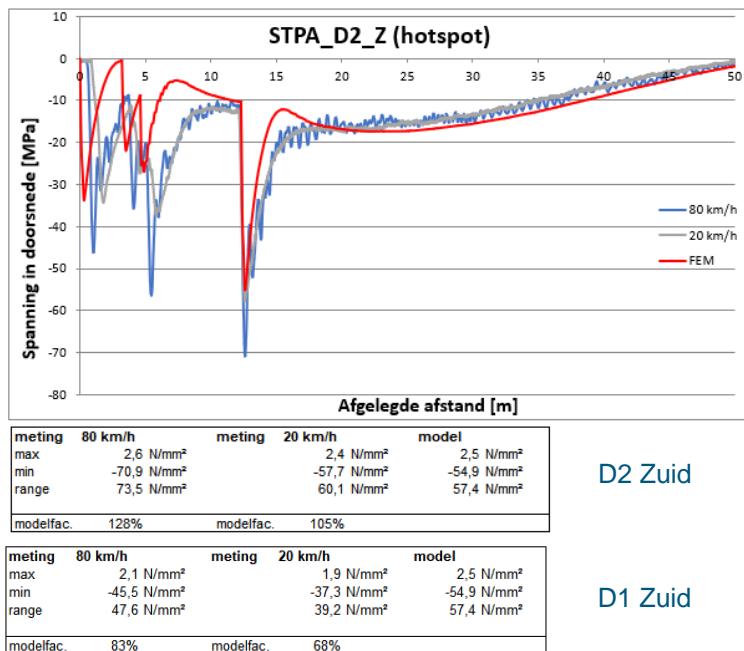
De spanning ter plaatse van de teen van de las is bepaald door de hotspot spanning te bepalen ter plaatse van de spanningspiek aan het einde van het schot, door een extrapolatie van de spanningen op 0,4t en 1,0t.



Figuur 246 – Spanning ter plaatse van de aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver (σ_{y+}) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN)

In Bijlage G is een vergelijking gemaakt van de berekende hotspotspanning en de gemeten hotspotspanningen ter plaatse van D1 en D2, zowel voor de noord- als de zuidzijde.

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald. Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (van DD-STPB detail D2, zuidzijde) en is gelijk aan 39%.



Figuur 247 – Hotspotspanning DD-STPA detail D, zuidzijde

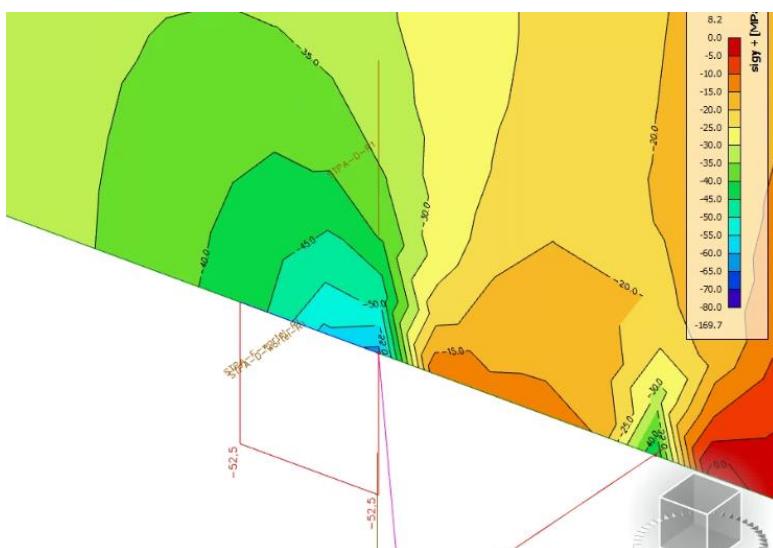
De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald eind 2018 en eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

γ_{MF}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	19,2	51,3	14,9	26,8	16,4	32,4	5,7	11,7
1,15	10,8	29,4	8,3	14,9	9,2	18,5	3,0	6,3
1	6,3	17,5	4,8	8,6	5,4	10,9	1,7	3,6

Tabel 111 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail DD-STPA-D2.

Detail D – Wortel van de las

De wortel is op gelijke wijze als voor detail A getoetst. Hiervoor is de gemiddelde spanning in de laatste t/2 = 5 mm uitgelezen en vertaald naar een spanning in de las.



Figuur 248 – Gemiddelde spanning in de laatste 5 mm van de plaat (σ_y) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN) t.p.v. detail E

Onderstaand is het resultaat van de schadeberekening weergegeven voor de normaalspanning in de las ($\sigma_{\perp,w,loc}$), waarbij is getoetst op detailcategorie 40, rekening houdend met de aanwezige (druk)spanning door het eigen gewicht. Er is geen rekening gehouden met de gemeten spanning, omdat het voor de wortel lastig is om eenduidig de reductie te bepalen en er toch al grote overschrijdingen zijn gevonden voor de teen van de las.

Type 1 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	11,2	24,1	11,0	27,9	6,9	13,4	8,5	16,9
1,15	5,9	13,0	6,0	15,7	3,4	6,9	4,8	9,6
1	3,1	6,6	3,3	9,2	1,6	3,3	2,8	5,7

Tabel 112 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail D – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 2 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	13,0	32,9	10,7	21,3	10,3	20,2	5,2	10,5
1,15	7,4	19,0	6,0	12,1	5,8	11,6	2,8	5,9
1	4,4	11,4	3,5	7,1	3,4	6,9	1,6	3,4

Tabel 113 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail D – wortel van de las (DC = 40, type 2)

Gezien de overschrijding is de schade door de schuifspanning niet meer bepaald, aangezien de verbinding nu al niet voldoet.

Geconcludeerd wordt dat bij locatie D zowel de teen als de wortel van de las niet voldoet.

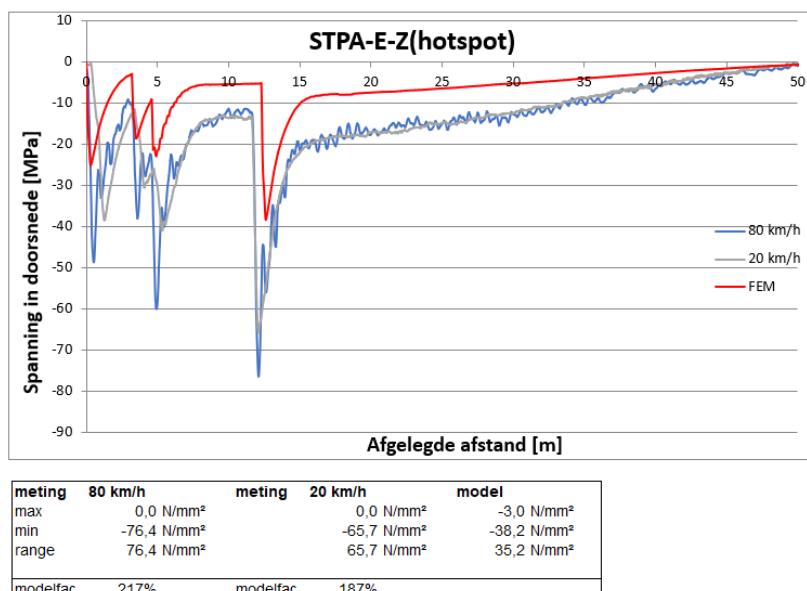
5.23.6 Detail E – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver

Detail E bevindt zich aan de onderzijde van het schot, bij de aansluiting met de horizontale flens van de langsverstijver, aan de zijde dicht bij het lijf van de hoofdlijger. Hier bevindt zich een laspoortje.

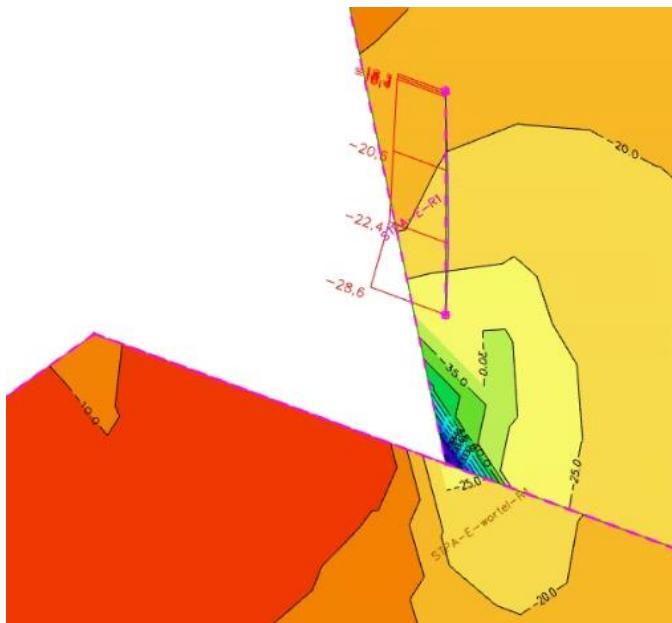


Figuur 249 – Detailfoto DD-STPA detail E North

Bijlage G geeft de vergelijking tussen de metingen en de berekende hotspotspanningen. De hoogste spanningen werden gevonden aan de zuidzijde, waar de verhouding meting ten opzichte van berekende hotspotspanningswisseling gelijk is aan 187%.



Figuur 250 – Hotspotspanning DD-STPA detail E, zuidzijde

Detail E – Teen van de las


Figuur 251 – Spanning ter plaatse van de aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver (σ_y) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN)

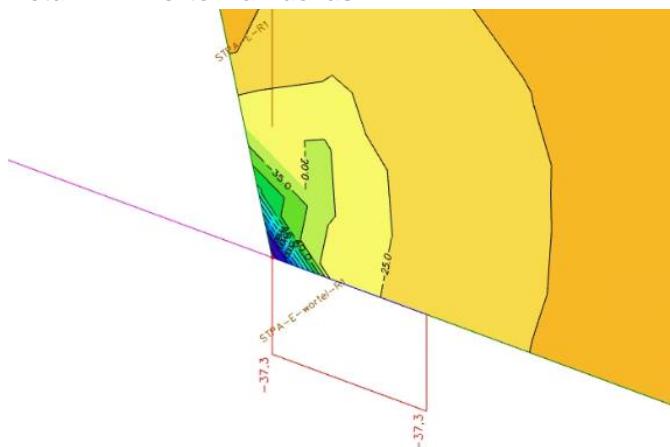
Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald. Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (van DD-STPA, detail E, zuidzijde) en is gelijk aan 187%. De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening vermenigvuldigd met deze modelfactor, waarna een vermoeiingsberekening van de teen van de las is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van Detailcategorie $\Delta\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2$, o.b.v. IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components”, tabel 3.3, detail 6.

De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald eind 2018 en eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	40,7	113,9	28,1	41,7	38,4	75,1	6,9	13,7
1,15	24,0	67,8	16,4	24,1	22,7	44,6	3,8	7,7
1	15,0	42,6	10,0	14,6	14,2	28,1	2,2	4,5

Tabel 114 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor DD-STPA detail E

Detail E – Wortel van de las



Figuur 252 – Gemiddelde spanning in de laatste 5 mm van de plaat (σ_y) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN) t.p.v. detail E

De wortel ter plaatse van detail E is op gelijke wijze als voor detail D getoetst. Hiervoor is de gemiddelde spanning in de laatste $t/2 = 5$ mm uitgelezen en vertaald naar een spanning in de las.

Onderstaand is het resultaat van de schadeberekening weergegeven voor de normaalspanning in de las ($\sigma_{\perp,w,loc}$), waarbij is getoetst op detailcategorie 40, rekening houdend met de aanwezige (druk)spanning door het eigen gewicht. Er is geen rekening gehouden met de lagere gemeten spanning, omdat het voor de wortel lastig is om eenduidig de reductie te bepalen.

Type 1	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 115 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail E – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 2	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018
1,35	3,0	8,9	1,8	2,4	2,9	5,9	0,3	0,6
1,15	1,6	4,9	0,9	1,2	1,6	3,2	0,1	0,2
1	0,9	2,7	0,5	0,6	0,9	1,8	0,0	0,1

Tabel 116 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail E – wortel van de las (DC = 40, type 2)

Gezien de overschrijding is de schade door de schuifspanning niet meer bepaald, aangezien de verbinding nu al niet voldoet.

Geconcludeerd wordt dat bij locatie E zowel de teen als de wortel van de las niet voldoet.

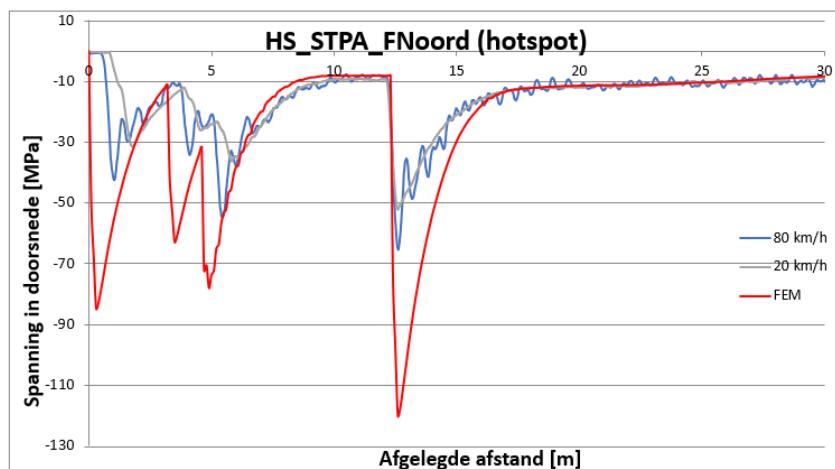
5.23.7 Detail F – Aansluiting horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver

Detail F bevindt zich op het lijf van de dwarsverstijver, net onder de horizontale flens van de langsverstijver, aan de zijde dicht bij de verticale flens van de langsverstijver. Hier bevindt zich een laspoortje.

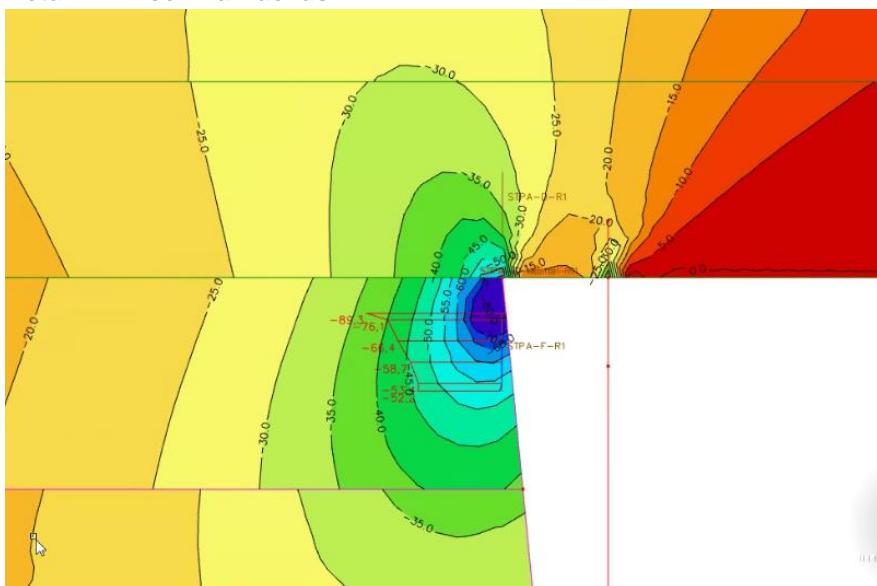


Figuur 253 – Detailfoto DD-STPA detail F

Bijlage G geeft de vergelijking tussen de metingen en de berekende hotspotspanningen. De hoogste spanningen werden gevonden aan de noordzijde, waar de verhouding meting ten opzichte van berekende hotspotspanningswisseling gelijk is aan 44%.



Figuur 254 – Hotspotspanning DD-STPA detail F, noordzijde

Detail F – Teen van de las


Figuur 255 – Spanning ter plaatse van de aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver (σ_{y+}) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN)

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald. Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (van DD-STPA, detail F, noordzijde). Er is daarbij uitgegaan van een type a extrapolatie. De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening vermenigvuldigd met deze modelfactor, waarna een vermoeiingsberekening van de teen van de las is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van Detailcategorie $\Delta\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2$, o.b.v. IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components”, tabel 3.3, detail 6.

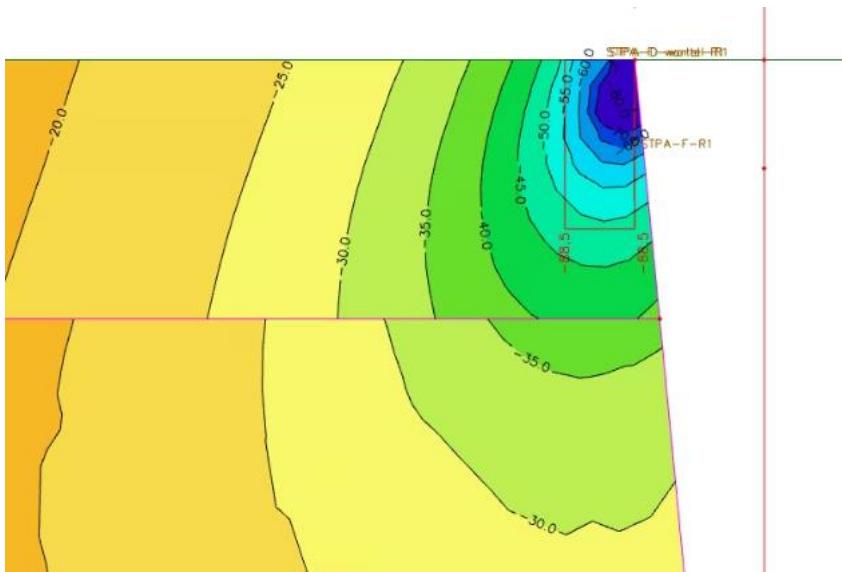
De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald eind 2018 en eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	21,1	59,2	14,5	22,4	19,7	38,8	3,9	7,9
1,15	12,2	34,7	8,2	12,5	11,4	22,7	2,1	4,2
1	7,3	21,1	4,8	7,1	6,9	13,8	1,1	2,3

Tabel 117 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor DD-STPA detail F

Detail F – Wortel van de las

De wortel ter plaatse van detail F is op gelijke wijze als voor detail D getoetst. Hiervoor is de gemiddelde spanning in de laatste $t/2 = 5,4$ mm uitgelezen en vertaald naar een spanning in de las.



Figuur 256 – Gemiddelde spanning in de laatste 5 mm van de plaat (σ_{y+}) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN) t.p.v. detail F

Onderstaand is het resultaat van de schadeberekening weergegeven voor de normaalspanning in de las ($\sigma_{\perp,w,loc}$), waarbij is getoetst op detailcategorie 40, rekening houdend met de aanwezige (druk)spanning door het eigen gewicht (zie detail A1 voor de beschrijving van deze methode). Er is geen rekening gehouden met de lagere gemeten spanning, omdat het voor de wortel lastig is om eenduidig de reductie te bepalen en er toch al grootte overschrijdingen zijn gevonden voor de teen van de las.

Type 1 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 118 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail F – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 2 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	51,6	140,3	37,2	60,7	47,2	91,5	12,2	23,9
1,15	31,3	85,7	22,5	36,5	28,7	55,9	7,2	14,2
1	20,0	55,2	14,4	23,1	18,4	35,9	4,5	8,9

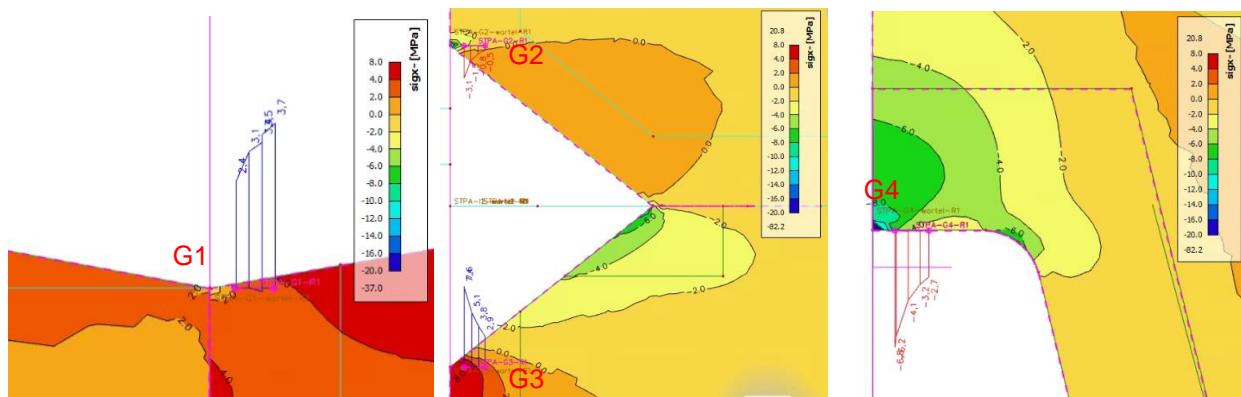
Tabel 119 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail F – wortel van de las (DC = 40, type 2)

Gezien de overschrijding is de schade door de schuifspanning niet meer bepaald, aangezien de verbinding nu al niet voldoet.

Geconcludeerd wordt dat bij locatie F zowel de teen als de wortel van de las niet voldoet.

5.23.8 Detail G – Aansluiting lijf/schot dwarsdrager – kopschot op lijf hoofdlijker

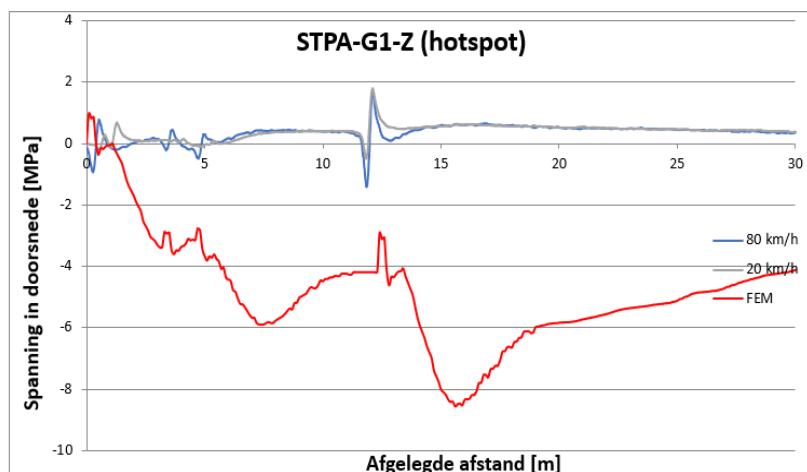
De spanningen ter plaatse van de lasverbinding tussen het lijf van de dwarsdrager en het kopschot en tussen het schot onder de dwarsdrager en het kopschot is in onderstaande figuren weergegeven. Het kopschot is op zijn beurt weer verbonden met het lijf van de hoofdlijker met klinknagels. Met name bij de laspoortjes treden spanningsconcentraties op.



Figuur 257 – Spanningen ter plaatse van aansluiting lijf dwarsdrager/schot – kopschot op lijf hoofdlijker, DD-STPA, Detail G

Bij de meting kwam naar voren dat het laspoortje ter plaatse van G2 niet aanwezig blijkt te zijn. Er is daarom besloten om metingen uit te voeren bij G1 en G3. Er is alleen aan de zuidzijde gemeten. Bijlage G geeft de vergelijking tussen de metingen en de berekende hotspotspanningen.

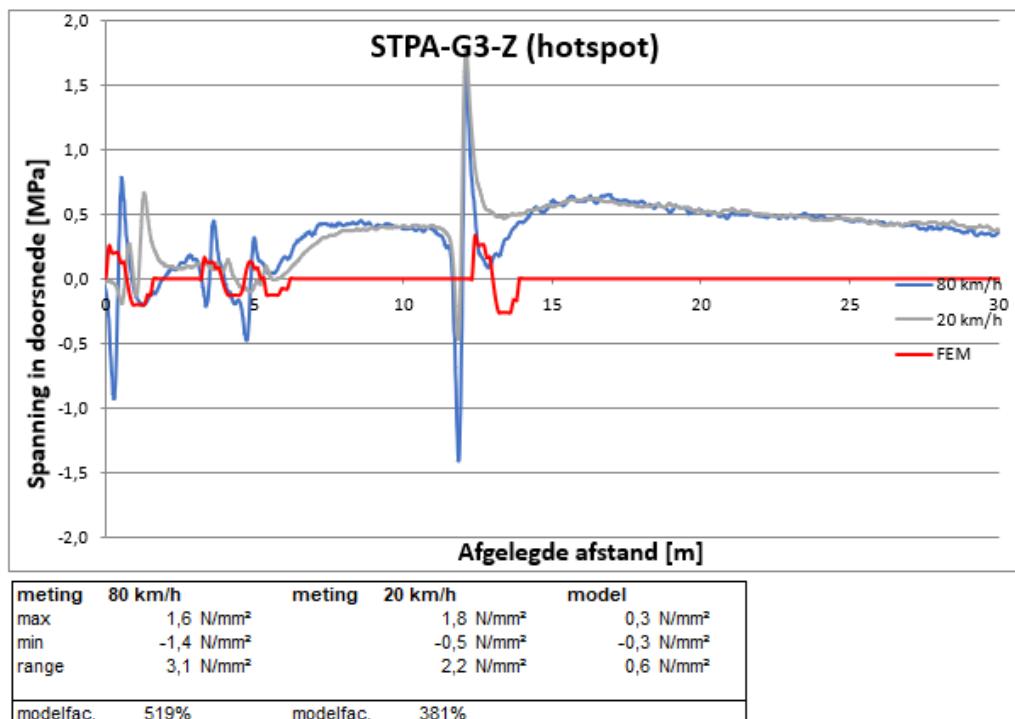
Voor locatie G1 bleek het niet mogelijk te zijn om één factor te bepalen voor de verhouding tussen meting en berekening. De berekende spanningen laten een globaal belastingeffect zien wat niet naar voren komt in de metingen, wellicht door vervorming van de T-verbinding met de klinknagels op trek. Deze afwijking is ook waargenomen bij locatie G1 van DD-K30 en DD-zK. Omdat de gemeten spanningswisseling zeer klein is (ca 2 à 3 MPa) is het aannemelijk dat zowel de teen als de wortel van de las zal voldoen op vermoeiing.



meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	1,6 N/mm ²		1,8 N/mm ²	1,0 N/mm ²
min	-1,4 N/mm ²		-0,5 N/mm ²	-8,6 N/mm ²
range	3,1 N/mm ²		2,2 N/mm ²	9,5 N/mm ²
modelfac.	32%	modelfac.	24%	

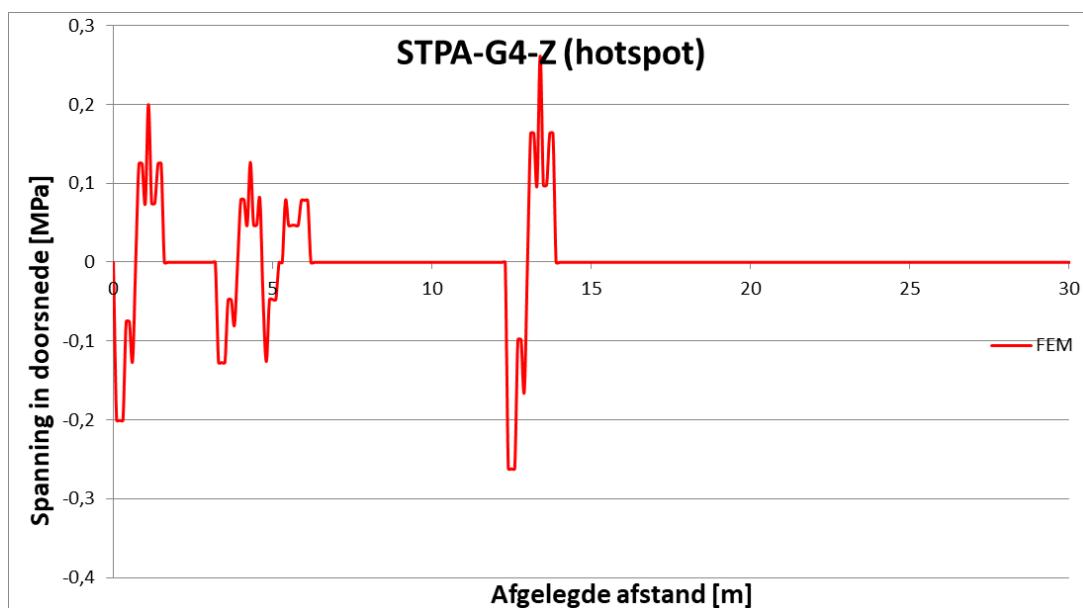
Figuur 258 – Hotspotspanning DD-STPA detail G1, zuidzijde

De berekende en gemeten spanningen bij locatie G3 zijn ook erg laag. De maximale gemeten hotspotspanning bedraagt slechts 1,8 MPa. Het is aannemelijk dat de teen en wortel van de las bij locatie G3 voldoet op vermoeiing. De vermoeiingstoets is daarom achterwege gelaten.



Figuur 259 – Hotspotspanning DD-STPA detail G3, zuidzijde

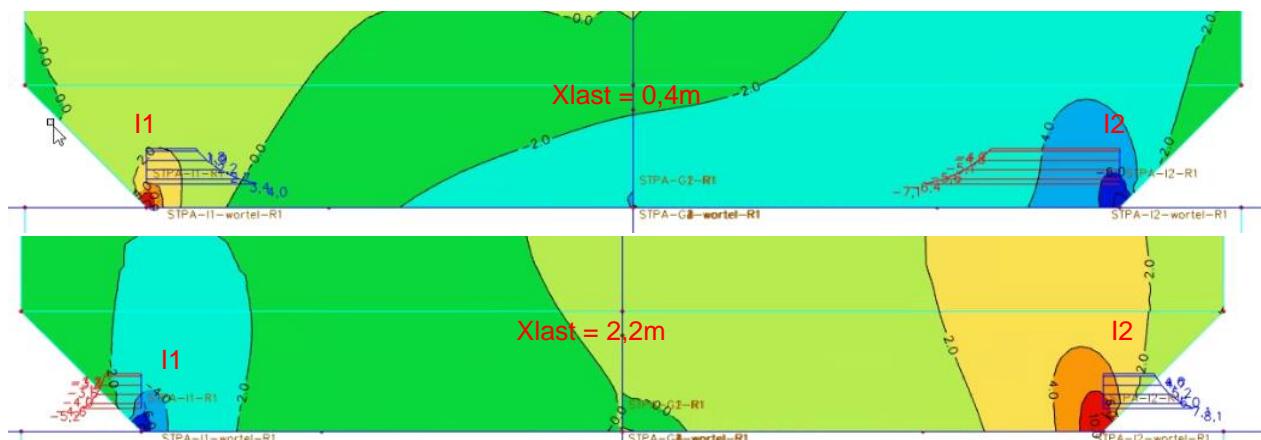
De berekenden spanningen bij locatie G4 zijn erg laag. De maximale berekende hotspotspanning bedraagt slechts 0,3 MPa. Het is aannemelijk dat de teen en wortel van de las bij locatie G4 voldoet op vermoeiing. De vermoeiingstoets is daarom achterwege gelaten.



Figuur 260 – Hotspotspanning DD-STPA detail G4, zuidzijde

5.23.9 Detail I – Aansluiting onderflens dwarsdrager – kopschot

In de onderflens is een versmalling aangebracht bij de aansluiting op de kopplaat van 250 mm naar 200 mm. Hier treden ook spanningspieken op, hoewel deze aanzienlijk lager zijn als de voorgaande pieken.



Figuur 261 – Spanning σ_{x+} in de onderflens (spanning langsrichting) ter plaatse van detail I1 en I2.

De teen van de hoeklas is op basis van de hotspotspanning getoetst op vermoeiing, uitgaande van detailcategorie 90, vergelijkbaar als voor detail A1. Hieruit volgen de volgende resultaten.

Detail I1

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,2	0,8	0,1	0,1	0,2	0,5	0,0	0,0
1,15	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0

Tabel 120 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie I1 – teen van de las (DC = 90)

Detail I2

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	1,9	5,7	0,9	1,5	1,9	3,8	0,3	0,6
1,15	1,0	3,0	0,4	0,6	0,9	2,0	0,1	0,3
1	0,5	1,5	0,2	0,3	0,5	1,0	0,0	0,1

Tabel 121 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie I2 – teen van de las (DC = 90)

Detail I – Wortel van de las

Maatgevend voor de toetsing is detail I2. De wortel is op vergelijkbare wijze als voor detail A1 getoetst. De spanning in de las is bepaald door de kracht te bepalen in de buitenste $12/2 = 6$ mm van de onderflens en deze te verdelen over de doorsnede van de hoeklas, inclusief kopse zijde. De toets is uitgevoerd op detailcategorie 40, met het knikpunt bij 10^7 . Gezien de aanwezige trekspanning door permanente belastingen zal type 1 en type 2 dezelfde schade geven. De trekspanning t.g.v. permanente belastingen ontstaat doordat de dwarsdrager zal willen roteren, doordat er maar aan één zijde een veld aanwezig is bij de einddwarsdrager. Hierdoor ontstaat uit buiging in de onderflens haaks op de dwarsdrager, met aan de zijde van I2 trek tot gevolg bij de inklemming in de hoofdlijger.

Detail I1

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 122 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie I1 – wortel van de las (DC = 40 type 1)

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,3	0,9	0,1	0,1	0,2	0,6	0,0	0,0
1,15	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0

Tabel 123 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie I1 – wortel van de las (DC = 40 type 2)

Detail I2

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	6,5	18,7	3,6	5,8	6,4	12,5	1,1	2,2
1,15	3,8	11,1	1,9	3,2	3,7	7,4	0,6	1,2
1	2,3	6,8	1,1	1,8	2,3	4,5	0,3	0,7

Tabel 124 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie I2 – wortel van de las (DC = 40 type 1)

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	6,5	18,7	3,6	5,8	6,4	12,5	1,1	2,2
1,15	3,8	11,1	1,9	3,2	3,7	7,4	0,6	1,2
1	2,3	6,8	1,1	1,8	2,3	4,5	0,3	0,7

Tabel 125 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie I2 – wortel van de las (DC = 40 type 2)

Gezien de overschrijding is de schade door de schuifspanning niet meer bepaald, aangezien de verbinding nu al niet voldoet.

Geconcludeerd wordt dat bij locatie I zowel de teen als de wortel van de las niet voldoet.

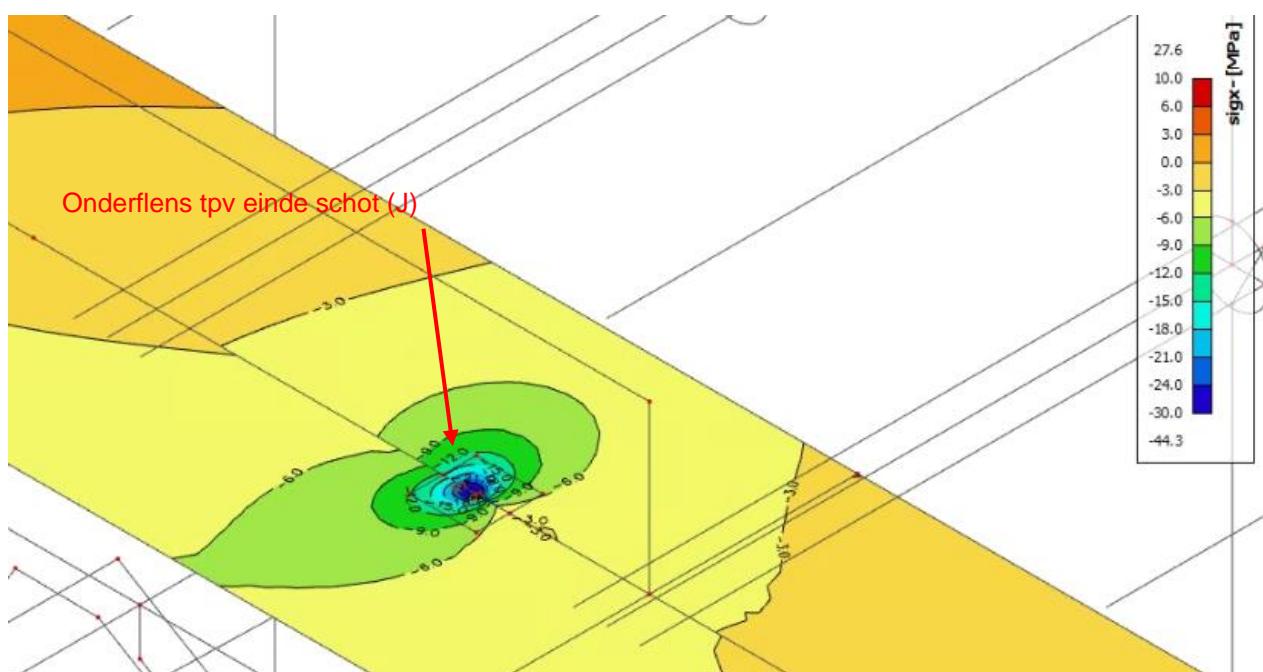
5.23.10 Detail J – Onderflens dwarsdrager t.p.v. einde schot

Voor de onderflens van de dwarsdrager geldt dat deze getoetst moet worden op detailcategorie 56, conform NEN -EN 1993-1-9 Tabel 8.4 Detail 1 ($L > 100$ mm), op basis van de nominale spanning in de onderflens.

Detail-categorie	Constructiedetail		Beschrijving	Eisen
80	$L \leq 50$ mm	 	<u>Aangelaste platen in de lengterichting:</u> 1) De detailcategorie varieert afhankelijk van de lengte L van de aangelaste plaat	De dikte van de aangelaste plaat moet kleiner zijn dan de hoogte ervan. Indien dit niet het geval is, volgens tabel 8.5, details 5 of 6.
71	$50 < L \leq 80$ mm			
63	$80 < L \leq 100$ mm			
56	$L > 100$ mm			

Figuur 262 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding DD-STPA, detail J

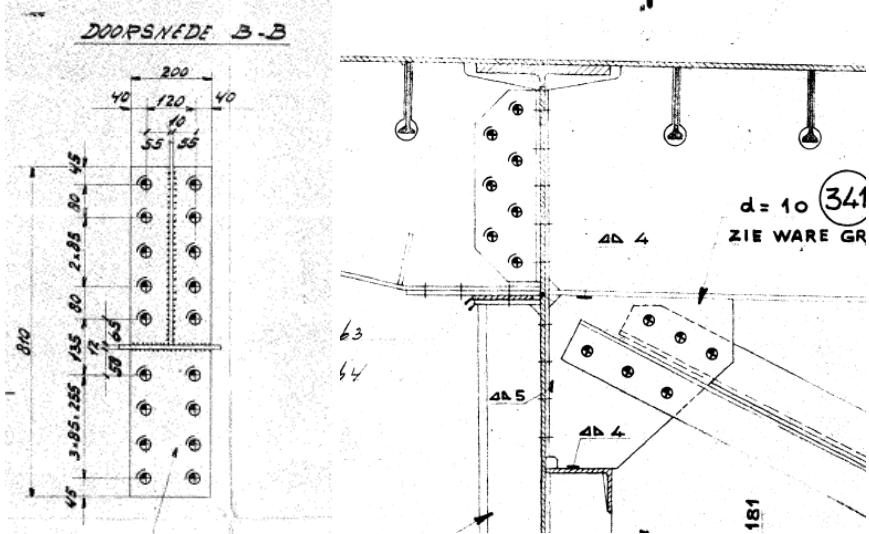
Uit de berekening volgt dat de nominale langsspanningen in de onderflens ter plaatse van de aansluiting ca. -3 N/mm 2 zijn. De spanningswisseling is dermate laag dat hier geen schade op zal treden. Deze snede is daarom niet verder getoetst.



Figuur 263 – Spanning in onderflens t.g.v. eenheidslast op de tussendwarsdrager

5.24 Type DD-STPB: Verbinding hoofdlijker - dwarsdragers portaal B

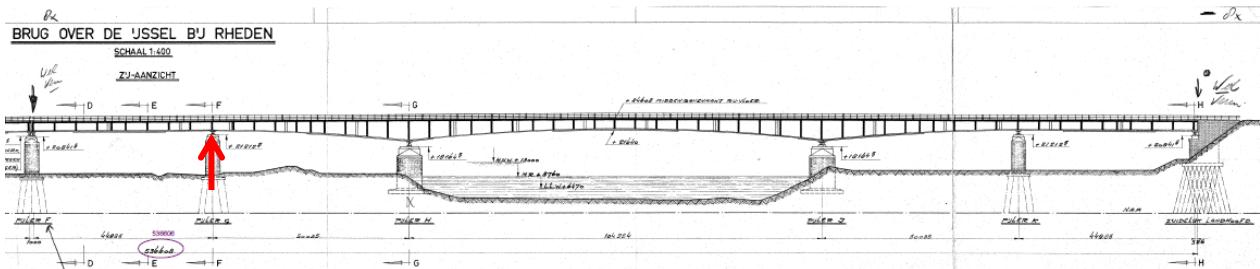
Vergelijkbaar met portaal A is ook de dwarsdrager bij portaal B onderzocht. Portaal B heeft geen horizontale bovenrand, zoals portaal A. De geometrie van de aansluiting tussen de dwarsdrager is vergelijkbaar met de normale dwarsdragers met k-verbanden. Door de oplegging zullen er echter ook globale spanningen afgedragen moeten worden, waardoor de spanningen in de verschillende details kunnen afwijken.



Figuur 264 – Overzicht van de verbinding type DD-STPB (portaal B)

5.24.1 Locatie getoetste dwarsdrager

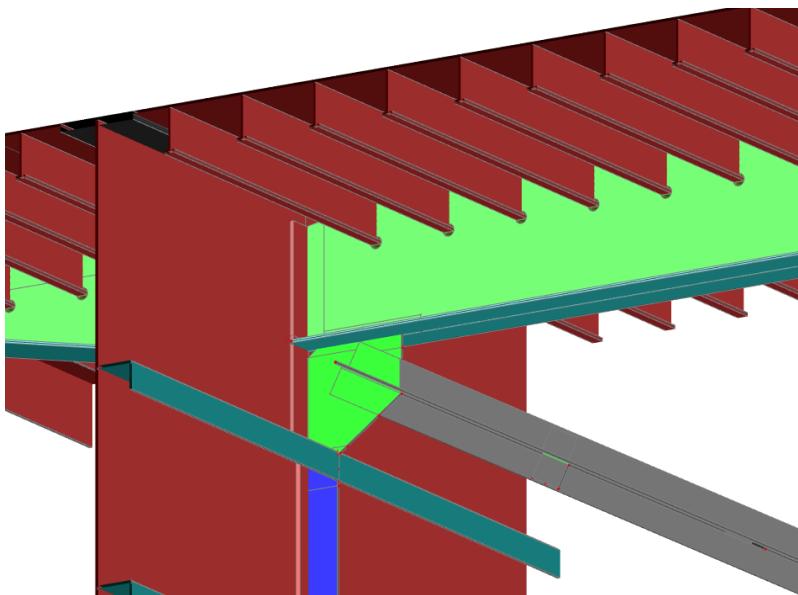
De getoetste en gemeten dwarsdrager komt overeen met de dwarsdrager ter plaatse van Pijler G. De spanningswisselingen in de kritieke punten zijn bepaald met het hybride model B wat ook gebruikt is voor de vermoeiingstoetsing van de tussendwarsdrager DD-zK. In dit model is over een lengte van twee K-verbanden voor en na portaal B het rekenmodel opgebouwd met plaat elementen, het overige deel van de brug is als plaat met excentrische balkelementen gemodelleerd.



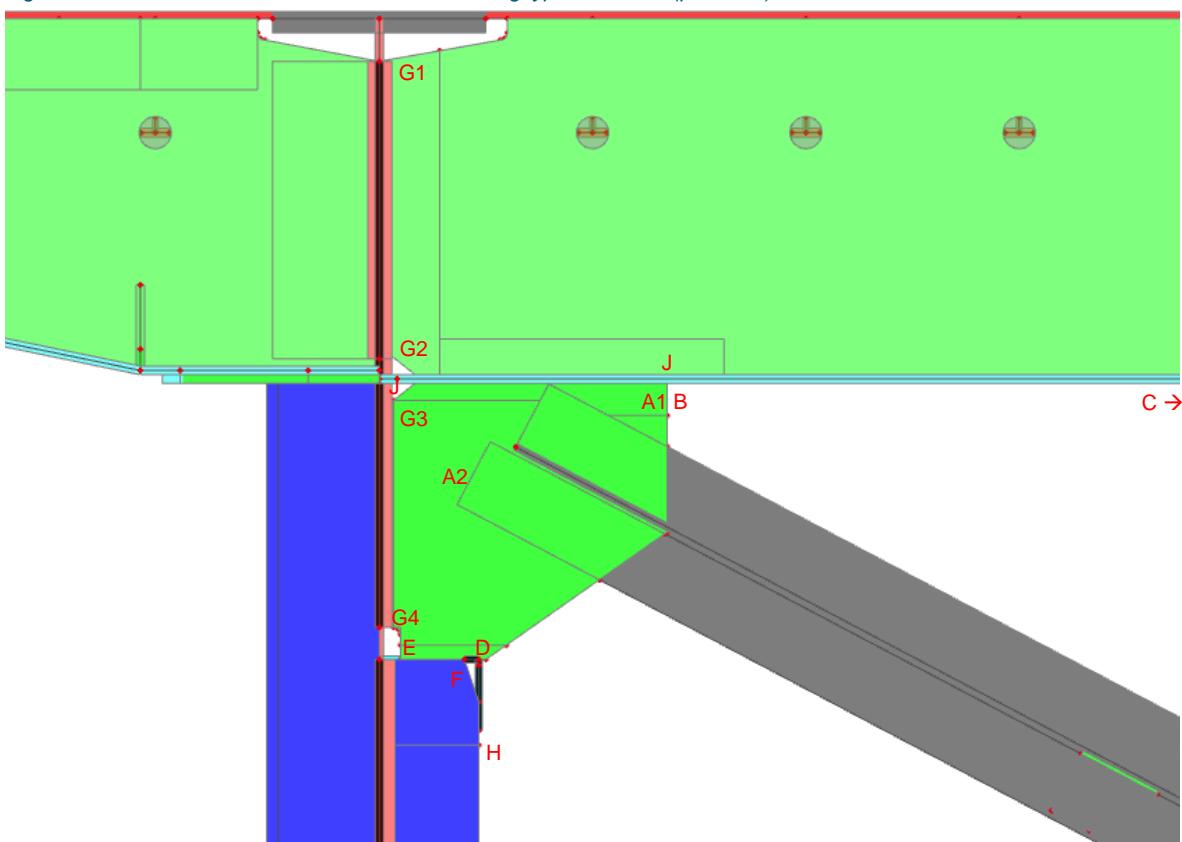
Figuur 265 – Locatie getoetste dwarsdrager portaal B, DD-STPB

5.24.2 Getoetste details

In de aansluiting tussen dwarsdrager en hoofdlijger zijn verschillende details aanwezig die kritisch zijn ten aanzien van vermoeiing. Per onderdeel zal worden toegelicht hoe de toets-spanning is bepaald, waar de maatgevende snede zit en welke detailcategorie van toepassing is. De getoetste details zijn verder gelijk aan die voor de dwarsdragers met K-verband.



Figuur 266 – Detail van het FEM model van verbinding type DD-STPB (portaal B)



Figuur 267 – Getoetste sneden verbinding dwarsdrager DD-STPB bij portaal B

De volgende tabel geeft een beschrijving van de details die zijn getoetst en/of waar een meting is uitgevoerd.

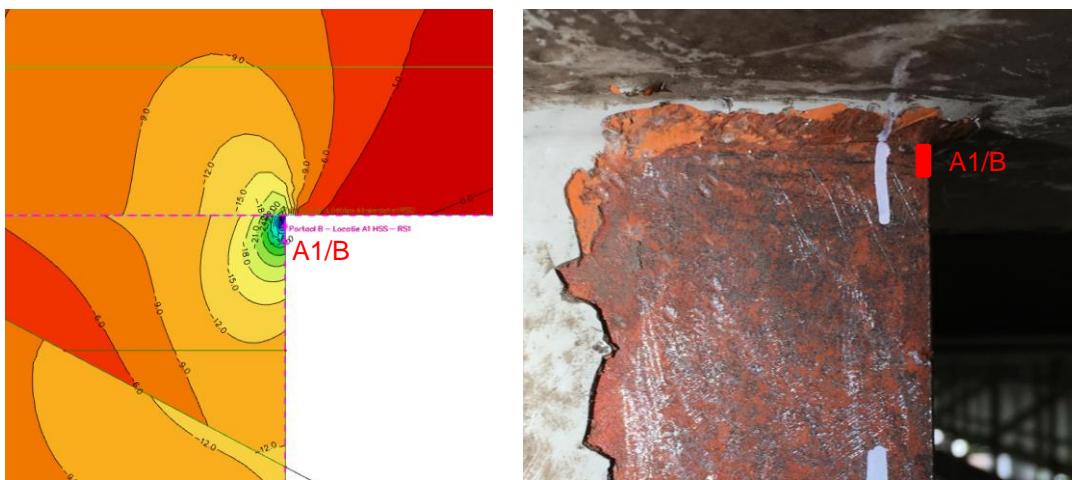
Detail	Beschrijving	Vermoeiingstoets	Gemeten
A1	Hoeklas schot – onderflens (type a)	x	x
A2	Hoeklas schot – onderflens (type a)	x	
B	Hoeklas schot – onderflens (type b)	x	x
C	Nominale spanning onderflens		x
D	Hoeklas schot – horizontale flens langsverstijver	x	x
E	Hoeklas schot – horizontale flens langsverstijver	x	x
F	Hoeklas lijf dwarsverstijver – horizontale flens langsverstijver	x	x
G1/G2	Hoeklas lijf dwarsverstijver – kopschot	x	
G3/G4	Hoeklas schot – kopschot	x	
H	Las lijf dwarsverstijver – verticale flens langsverstijver	x	
I	Onderflens dwarsdrager – kopschot	x	
J	Onderflens dwarsdrager t.p.v. schot	x	

Tabel 126 – Overzicht toets- en meetlocaties dwarsdrager met K-verband (DD-STPB)

De vermoeiingsberekeningen zijn weergegeven in Bijlage E22.

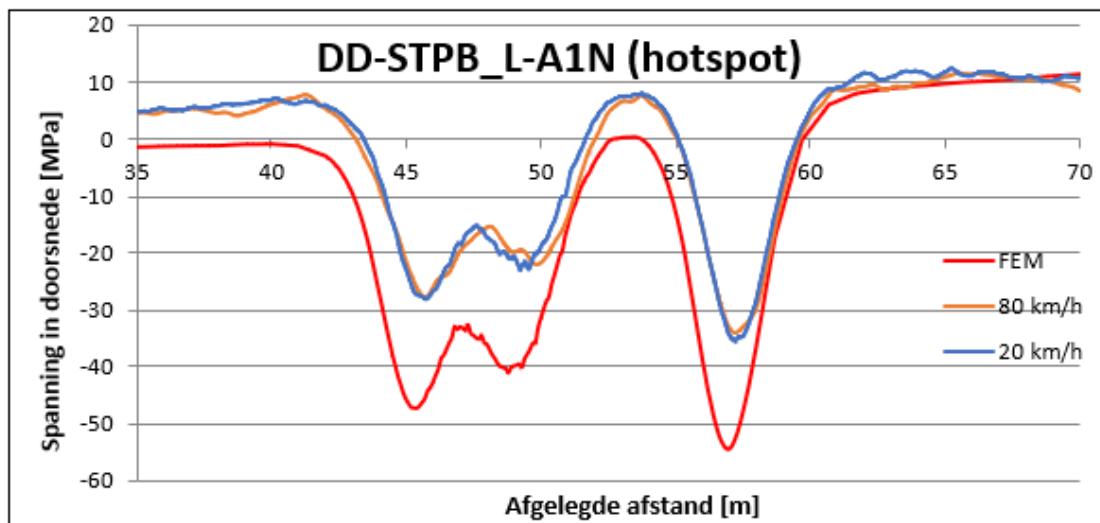
5.24.3 Detail A1/B - Aansluiting schot – onderflens dwarsdrager

Detail A1/B betreft de aansluiting aan de bovenzijde, aan het einde van het schot met de onderflens van de dwarsdrager. Op deze locatie is een spanningsconcentratie aanwezig. Metingen zijn uitgevoerd aan de voor en achterzijde (detail A1) en aan de kopse zijde (detail B).



Figuur 268 – Spanningen ter plaatse van detail A1/B schot – onderflens dwarsdrager

In Bijlage G is de vergelijking van de gemeten spanningen en de berekende spanningen gegeven voor detail A1 (noord en zuid zijde) en detail B. De hoogste gemiddelde gemeten hotspot spanningswisseling treedt op in detail A1 (noord).



meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	10,8 N/mm ²		11,9 N/mm ²	9,6 N/mm ²
min	-34,1 N/mm ²		-35,5 N/mm ²	-54,5 N/mm ²
range	44,9 N/mm ²		47,4 N/mm ²	64,1 N/mm ²
modelfac.	70%	modelfac.	74%	

Figuur 269 – Spanningswisseling hotspotspanningen DD-STPB detail A1 noord

Detail A1/B – Teen van de las

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald (74%). Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (detail A1 (noord)). De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening van de teen van de las vermenigvuldigd met deze modelfactor, waarna een vermoeiingsberekening is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van een hotspot-analyse met een detailcategorie DC = 90, conform tabel 3.3, detail 6 van IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components” [10].

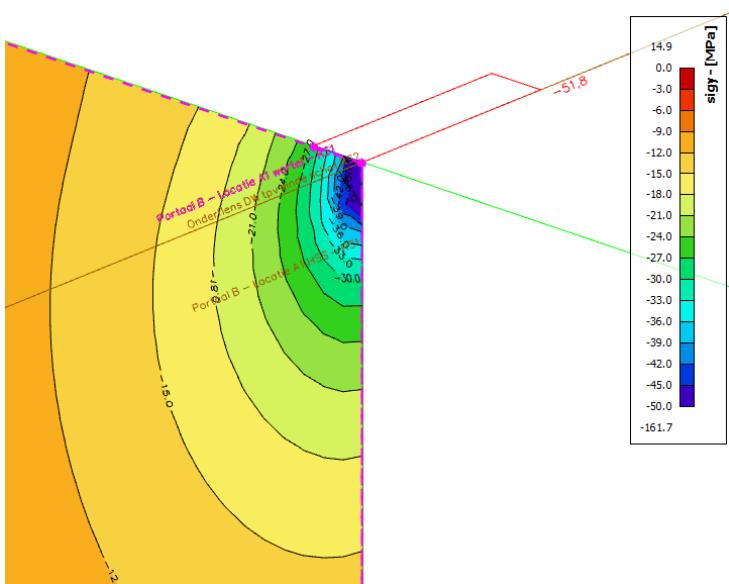
In onderstaande tabel zijn de schadegetallen weergegeven voor drie verschillende veiligheidsfactoren. De lasverbinding voldoet niet aan de schade-eis D ≤ 1,0.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1.35	22,4	56,3	21,7	44,8	17,7	34,7	12,2	23,8
1.15	13,3	33,8	12,9	26,8	10,5	20,7	7,2	14,2
1.00	8,3	21,2	8,1	16,9	6,6	13,0	4,6	8,9

Tabel 127 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail A1 – teen van de las

Detail A1/B – wortel van de las

De toetsing van de wortel van de las is uitgevoerd conform "IIW Guideline for the Assessment of Weld Root Fatigue" [11] paragraaf 3.3.2, waarbij de kracht in de laatste t/2 mm aan het einde van de plaat wordt verdeeld over de omliggende las. De gemiddelde spanning is bepaald met behulp van SCIA door over de laatste 5 mm de gemiddelde spanning in de plaat op te vragen.



Figuur 270 – Gemiddelde spanning in de laatste 5 mm van de plaat (σ_y) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN)

Voor de toetsing dient de spanningswisseling in de las bepaald te worden. Conform de bovengenoemde methode kan de (maximale) normaalspanning in de las ($a = 4 \text{ mm}$) ten gevolge van de eenheidslast (2x50 kN) als volgt bepaald worden.

$$\sigma_{\perp,w,loc} = \frac{F_y}{2a \cdot t + a^2} = \frac{\sigma_y \cdot 5\text{mm} \cdot 10\text{mm}}{2 \cdot 4\text{mm} \cdot 10\text{mm} + (4\text{mm})^2} = 0.52 \cdot \sigma_y$$

De (maximale) schuifspanning parallel aan de las kan op vergelijkbare wijze worden bepaald en is gelijk aan:

$$\tau_{\parallel,w,loc} = \frac{F_z}{2a \cdot t + a^2} = \frac{\tau_{xy} \cdot 5\text{mm} \cdot 10\text{mm}}{2 \cdot 4\text{mm} \cdot 10\text{mm} + (4\text{mm})^2} = 0.52 \cdot \tau_{xy}$$

In afwijking van de methode conform IIW, waarbij een vergelijkspanning wordt gehanteerd, moet nu onderscheid gemaakt worden tussen de normaalspanning en de schuifspanningen. De normaalspanning loodrecht op de lengte-as van de las ($\sigma_{\perp,w,loc}$) wordt getoetst op detailcategorie 40, rekening houdend met de aanwezige (druk)spanning, conform TNO Notitie 100315818/ALL [2], de schuifspanning evenwijdig aan de lengte-as van de las ($\tau_{\parallel,w,loc}$) wordt getoetst op detailcategorie 80, conform NEN-1993-1-9. De schade van de beide berekeningen dient bij elkaar opgeteld te worden.

In onderstaande tabellen zijn de toetsresultaten weergegeven voor de normaalspanning, waarbij getoetst is volgens de methode uit de notitie van TNO, zowel voor type 1 (wel contact tussen de platen) als type 2 (geen contact tussen de platen). De maatgevende van de twee toetsingen dient aangehouden te worden en opgeteld bij de schade door de schuifspanning evenwijdig aan de lengte-as van de las.

Type 1	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1.35	2,5	5,8	2,7	6,8	1,5	3,1	2,0	4,0
1.15	1,2	2,8	1,3	3,5	0,7	1,5	1,0	2,1
1.00	0,5	1,2	0,6	1,7	0,2	0,6	0,4	1,0

Tabel 128 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail A1 – wortel van de las ($DC = 40$, type 1)

Type 2	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1.35	15,2	37,8	14,2	29,6	11,8	23,1	8,0	15,7
1.15	9,1	22,8	8,5	17,7	7,1	13,9	4,8	9,4
1.00	5,7	14,4	5,4	11,3	4,4	8,8	3,1	6,0

Tabel 129 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail A1 – wortel van de las ($DC = 40$, type 2)

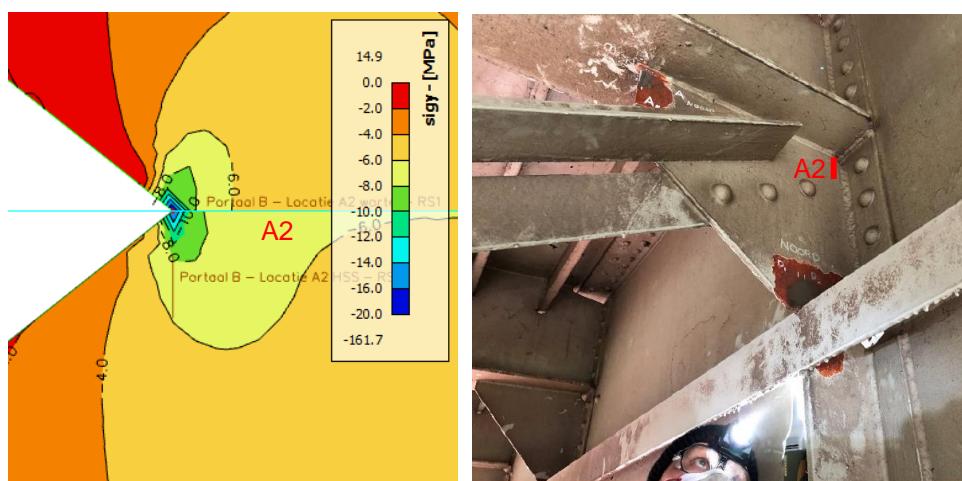
De schuifspanningswisseling is dermate laag dat hier geen schade door ontstaat. De toetsing van de wortel van de las voldoet niet aan de schade-eis $D \leq 1,0$.

5.24.4 Detail A2 – Aansluiting schot – onderflens dwarsdrager

Detail A2 bevindt zich bij het laspoortje dicht bij de hoofdlijger, in de aansluiting schot met de onderflens van de dwarsdrager. Dit detail is vergelijkbaar met detail A1 en is op vergelijkbare wijze getoetst.

Detail A2 – teen van de las

Voor detail A2 geldt dat de berekende hotspotspanning lager is dan bij detail A1. Omdat A1 niet voldoet is de schadeberekening voor locatie A2 ook uitgevoerd.



Figuur 271 – Spanningen ter plaatse van locatie A2, aansluiting schot – onderflens dwarsdrager

De schadecategorie is gelijk aan locatie A1 aangehouden als DC = 90, op basis van een hotspot analyse.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1.35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1.15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1.00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 130 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie A2

Locatie A2 – wortel van de las

De schadeberekening van de wortel van de las is op dezelfde wijze als voor locatie A1 uitgevoerd. Ook hier is de schuifspanningswisseling dermate laag dat daar geen schade uit zal ontstaan.

Type 1 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1.35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1.15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1.00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

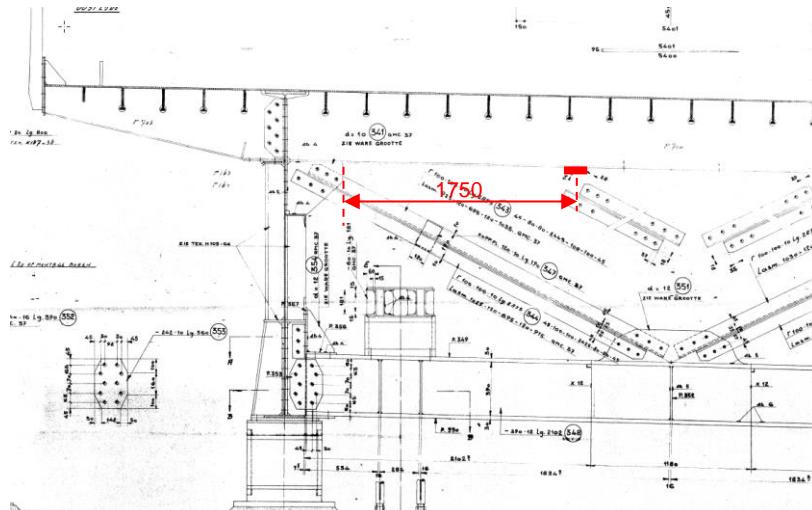
Tabel 131 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie A2 – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 2 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1.35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1.15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1.00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

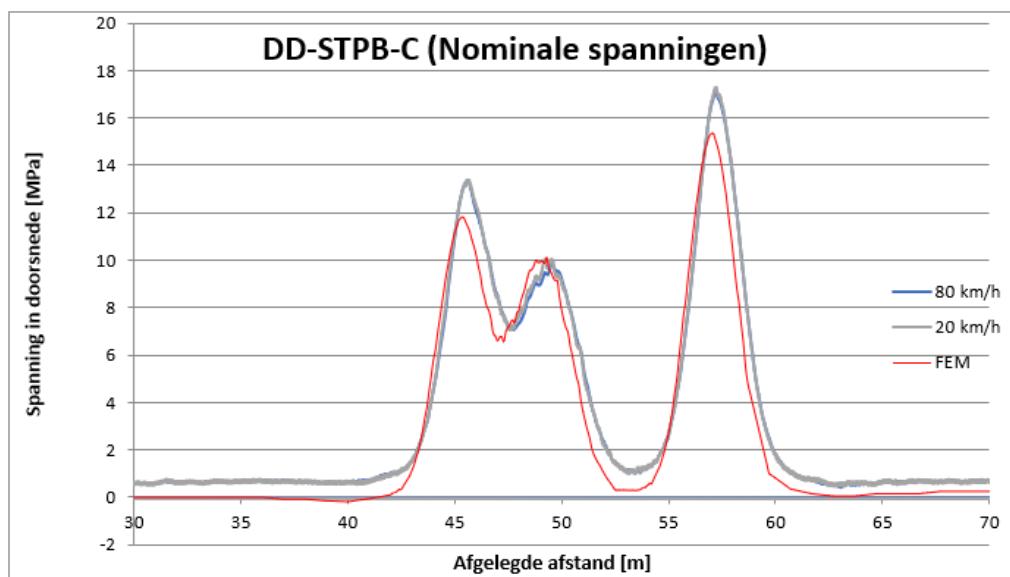
Tabel 132 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie A2 – wortel van de las (DC = 40, type 2)

5.24.5 Detail C – Onderflens dwarsdrager (nominaal)

Ter plaatse van locatie C is een meting uitgevoerd om een vergelijking tussen de nominale spanningen uit het rekenmodel en de metingen uit te kunnen voeren. Hiervoor is gemeten op 1,75 m uit de rand van het schot.



Figuur 272 – Overzicht DD-STPB locatie C



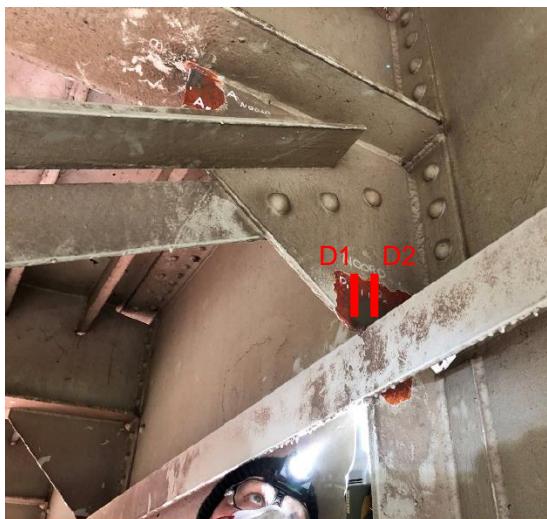
meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	17,1 N/mm ²		17,3 N/mm ²	15,3 N/mm ²
min	-0,5 N/mm ²		-0,6 N/mm ²	0,1 N/mm ²
range	17,6 N/mm ²		17,9 N/mm ²	15,3 N/mm ²
modelfac.	115%	modelfac.	117%	

Figuur 273 – Spanningswisseling (nominaal) DD-STPB locatie C

De spanningen komen goed overeen tussen model en meting. Omdat locatie C een nominale spanning betreft en niet een vermoeiingsgevoelig detail is er voor deze locatie geen vermoeiingsberekening uitgevoerd.

5.24.6 Detail D – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver

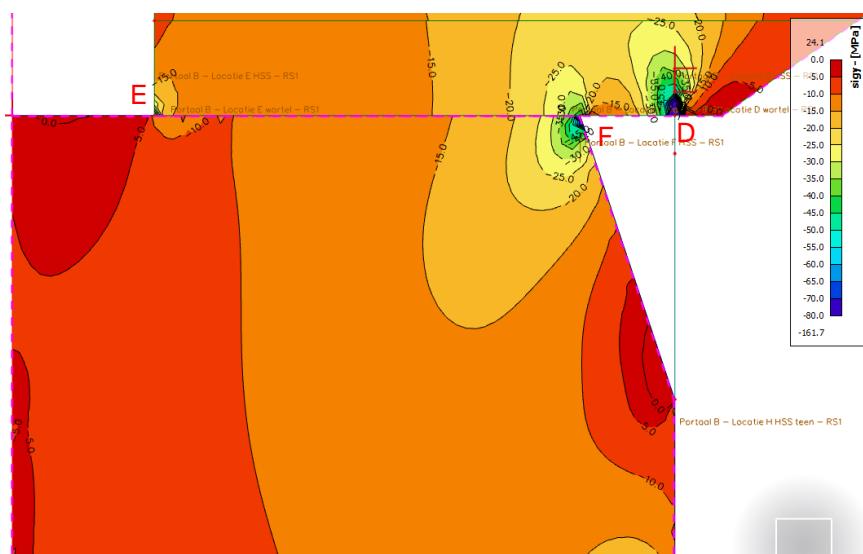
De las ter plaatse van positie D heeft geen noemenswaardige randinkartelling of andere imperfecties. De plaat is 10,0 mm dik. Voor dit detail zijn metingen op twee plekken uitgevoerd, D1 is zo veel mogelijk op de hoek, D2 op 10 mm naar binnen.



Figuur 274 – Detailfoto DD-STPB locatie D1 North en D2 North

Detail D – teen van de las

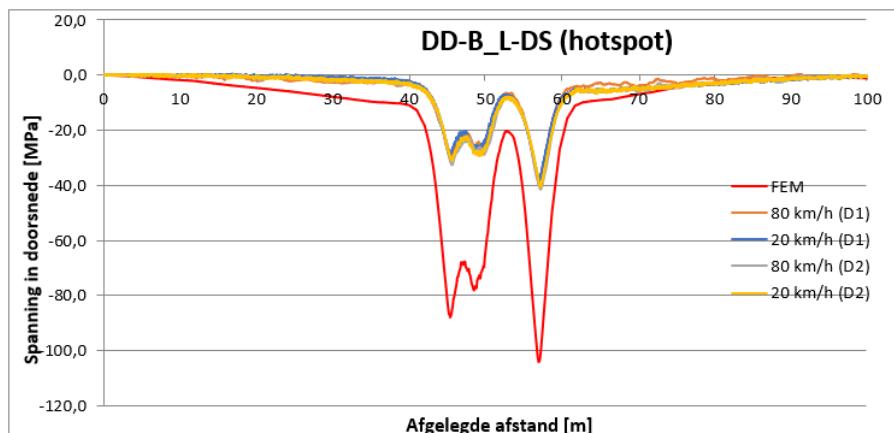
De spanning ter plaatse van de teen van de las is bepaald door de hotspot spanning te bepalen ter plaatse van de spanningspiek aan het einde van het schot, door een extrapolatie van de spanningen op 0,4t en 1,0t.



Figuur 275 – Spanning ter plaatse van de aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver (σ_{y+}) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN)

In Bijlage G is een vergelijking gemaakt van de berekende hotspotspanning en de gemeten hotspotspanningen ter plaatse van D1 en D2, zowel voor de noord- als de zuidzijde.

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald. Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (van DD-STPB detail D2, zuidzijde) en is gelijk aan 39%.



	D1S	meting 80 km/h	meting 20 km/h	model
max		0,0 N/mm ²	0,0 N/mm ²	0,0 N/mm ²
min		-37,9 N/mm ²	-37,9 N/mm ²	-104,1 N/mm ²
range		37,9 N/mm ²	37,9 N/mm ²	104,1 N/mm ²
modelfac.		36%	modelfac.	36%

	D2S	meting 80 km/h	meting 20 km/h	model
max		0,0 N/mm ²	0,0 N/mm ²	0,0 N/mm ²
min		-41,4 N/mm ²	-40,2 N/mm ²	-104,1 N/mm ²
range		41,4 N/mm ²	40,2 N/mm ²	104,1 N/mm ²
modelfac.		40%	modelfac.	39%

Figuur 276 – Hotspotspanning DD-STPB detail D, zuidzijde

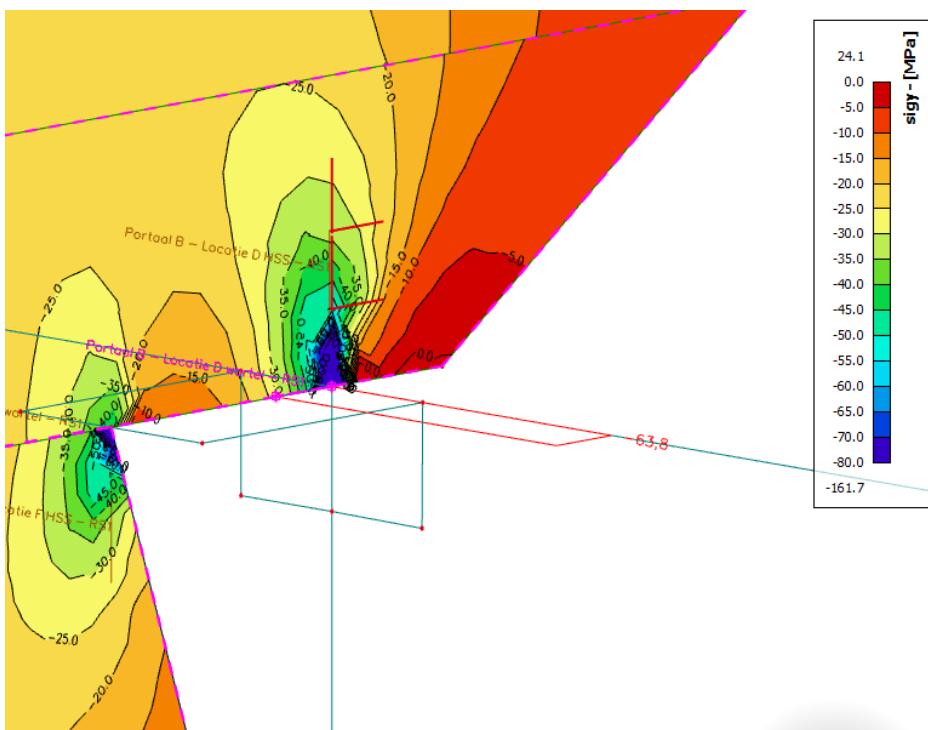
De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald eind 2018 en eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	9,5	25,2	7,1	13,2	8,1	16,0	3,0	6,0
1,15	5,5	14,7	4,1	7,5	4,7	9,4	1,7	3,4
1	3,3	9,0	2,4	4,4	2,8	5,7	0,9	1,9

Tabel 133 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail DD-STPB-D.

Detail D – Wortel van de las

De wortel is op gelijke wijze als voor detail A1 en A2 getoetst. Hiervoor is de gemiddelde spanning in de laatste $t/2 = 5$ mm uitgelezen en vertaald naar een spanning in de las.



Figuur 277 – Gemiddelde spanning in de laatste 5 mm van de plaat (σ_y) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN) t.p.v. detail D

Onderstaand is het resultaat van de schadeberekening weergegeven voor de normaalspanning in de las ($\sigma_{\perp,w,loc}$), waarbij is getoetst op detailcategorie 40, rekening houdend met de aanwezige (druk)spanning door het eigen gewicht. Er is geen rekening gehouden met de lagere gemeten spanning, omdat het voor de wortel lastig is om eenduidig de reductie te bepalen en er toch al grote overschrijdingen zijn gevonden voor de teen van de las.

Type 1	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost		
	γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 134 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail D – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 2	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost		
	γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35		24,7	63,5	18,6	35,3	20,5	39,9	8,6	16,9
1,15		15,0	38,5	11,2	21,3	12,5	24,2	5,1	10,2
1		9,6	24,8	7,2	13,6	8,0	15,6	3,3	6,5

Tabel 135 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail D – wortel van de las (DC = 40, type 2)



Te zien is dat bij type 1, waar wordt uitgegaan van contact tussen de platen, er geen schade optreedt. Dit komt doordat er een relatief hoge spanning door de permanente belasting optreedt, die de eigenspanningen grotendeels compenseert. Hierdoor is nagenoeg de gehele wisseling in druk, die bij methode 1 vermenigvuldigd moet worden met $\alpha = 0,00$. Bij type 2 wordt er wel een (grootte) schade gevonden, omdat hier de spanningswisseling in druk wel meegenomen moet worden met $\alpha = 0,63$. Gezien de overschrijding is de schade door de schuifspanning niet meer bepaald, aangezien de verbinding nu al niet voldoet. De schade door de schuifspanning moet eigenlijk nog opgeteld worden bij bovengenoemde schade.

Geconcludeerd wordt dat bij locatie D zowel de teen als de wortel van de las niet voldoet.

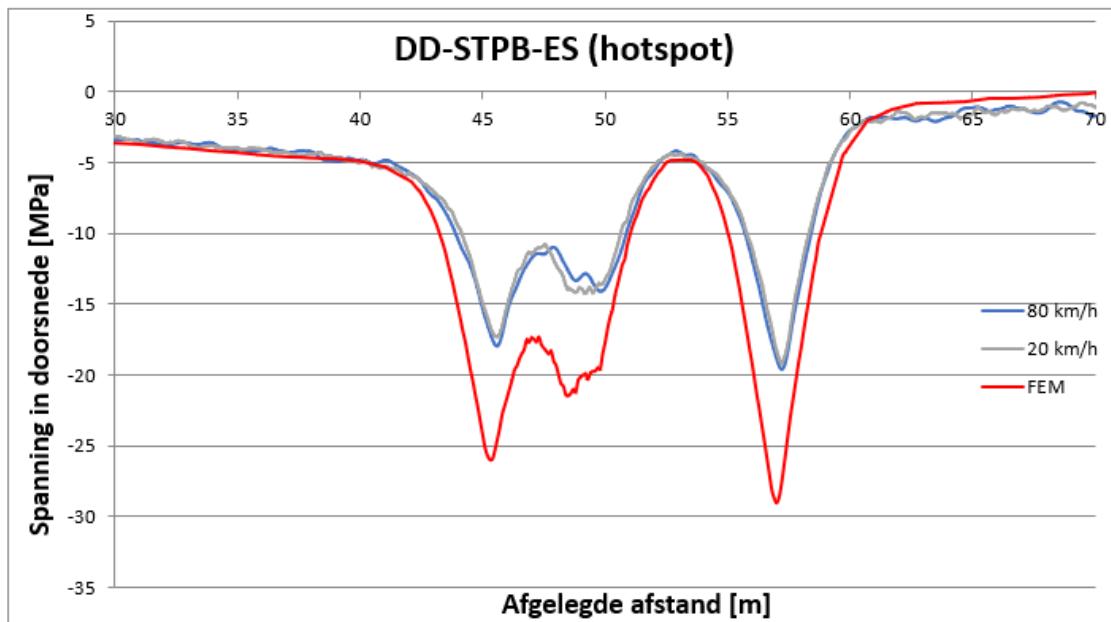
5.24.7 Detail E – Aansluiting schot – horizontale flens langsverstijver

Detail E bevindt zich aan de onderzijde van het schot, bij de aansluiting met de horizontale flens van de langsverstijver, aan de zijde dicht bij het lijf van de hoofdlijger. Hier bevindt zich een laspoortje.



Figuur 278 – Detailfoto DD-STPB detail E

Bijlage G geeft de vergelijking tussen de metingen en de berekende hotspotspanningen. De hoogste spanningen werden gevonden aan de zuidzijde, waar de verhouding meting ten opzichte van berekende hotspotspanningswisseling gelijk is aan 63%.



meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	-0,7 N/mm ²		-0,8 N/mm ²	-0,1 N/mm ²
min	-19,6 N/mm ²		-19,1 N/mm ²	-29,0 N/mm ²
range	18,9 N/mm ²		18,3 N/mm ²	28,9 N/mm ²
modelfac.	65%	modelfac.	63%	

Figuur 279 – Hotspotspanning DD-STPB detail E, zuidzijde

Detail E – Teen van de las

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald. Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (van DD-STPB, detail E, zuidzijde) en is gelijk aan 63%. De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening vermenigvuldigd met deze modelfactor, waarna een vermoeiingsberekening van de teen van de las is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van Detailcategorie $\Delta\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2$, o.b.v. IIW rapport "Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components" [10], tabel 3.3, detail 6.

De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald eind 2018 en eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,3	1,0	0,2	0,4	0,3	0,6	0,1	0,1
1,15	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0
1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0

Tabel 136 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor DD-STPB detail E

Detail E – Wortel van de las

De wortel ter plaatse van detail E is op gelijke wijze als voor detail D getoetst. Hiervoor is de gemiddelde spanning in de laatste $t/2 = 5$ mm uitgelezen en vertaald naar een spanning in de las.

Onderstaand is het resultaat van de schadeberekening weergegeven voor de normaalspanning in de las ($\sigma_{\perp,w,loc}$), waarbij is getoetst op detailcategorie 40, rekening houdend met de aanwezige (druk)spanning door het eigen gewicht. Er is geen rekening gehouden met de lagere gemeten spanning, omdat het voor de wortel lastig is om eenduidig de reductie te bepalen.

Type 1	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018
1,35		1,0	2,7	0,9	2,1	0,7	1,6	0,5
1,15		0,4	1,1	0,4	0,9	0,3	0,7	0,2
1		0,2	0,5	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1
								0,2

Tabel 137 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail E – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 2	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018
1,35		0,4	1,1	0,3	0,5	0,3	0,7	0,1
1,15		0,1	0,5	0,1	0,2	0,1	0,3	0,0
1		0,1	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0
								0,0

Tabel 138 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail E – wortel van de las (DC = 40, type 2)

Maatgevend is de berekening type 1, waarbij er uitgegaan wordt van wel contact is tussen de platen. De schuifspanning is dermate laag dat deze niet tot additionele schade zal leiden.

Geconcludeerd wordt dat bij locatie E de wortel van de las niet voldoet. Opgemerkt wordt dat het aannemelijk is dat de werkelijke spanning lager is, zoals uit de meting van de hotspotspanningen is gebleken.

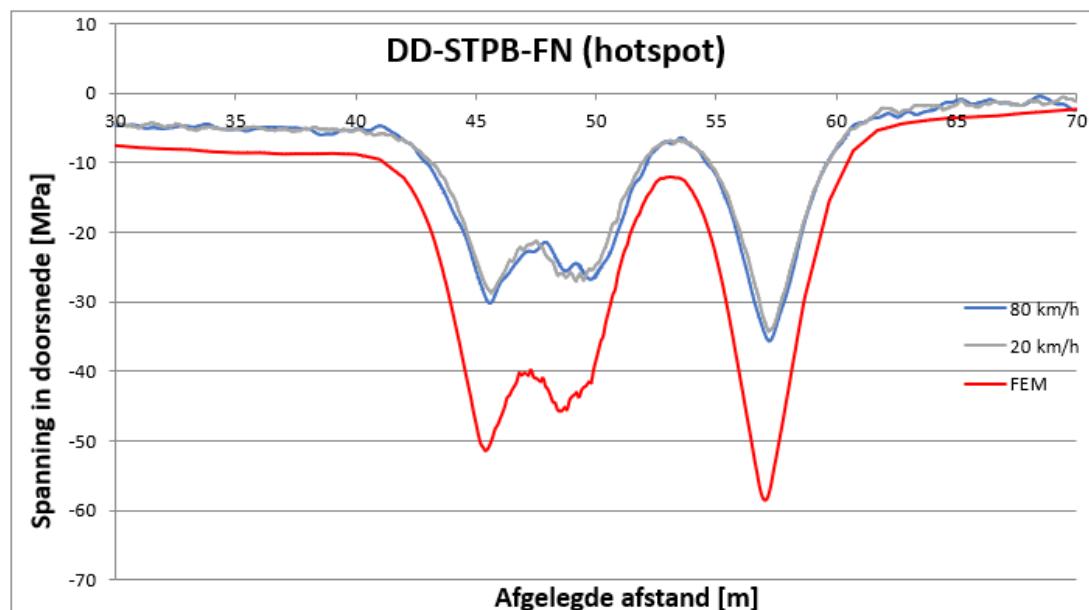
5.24.8 Detail F – Aansluiting horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver

Detail F bevindt zich op het lijf van de dwarsverstijver, net onder de horizontale flens van de langsverstijver, aan de zijde dicht bij de verticale flens van de langsverstijver. Hier bevindt zich een laspoortje.



Figuur 280 – Detailfoto DD-STPB detail F

Bijlage G geeft de vergelijking tussen de metingen en de berekende hotspotspanningen. De hoogste spanningen werden gevonden aan de noordzijde, waar de verhouding meting ten opzichte van berekende hotspotspanningswisseling gelijk is aan 60%.



meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	-0,5 N/mm ²		-0,6 N/mm ²	-2,3 N/mm ²
min	-35,6 N/mm ²		-34,2 N/mm ²	-58,5 N/mm ²
range	35,2 N/mm ²		33,6 N/mm ²	56,1 N/mm ²
modelfac.	63%	modelfac.	60%	

Figuur 281 – Hotspotspanning DD-STPB detail F, zuidzijde

Detail F – Teen van de las

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald. Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (van DD-STPB, detail F, zuidzijde). Er is daarbij uitgegaan van een type a extrapolatie. De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening vermenigvuldigd met deze modelfactor, waarna een vermoeiingsberekening van de teen van de las is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van Detailcategorie $\Delta\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2$, o.b.v. IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components” [10], tabel 3.3, detail 6.

De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald eind 2018 en eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	6,4	17,1	5,5	10,5	5,4	10,8	2,5	5,1
1,15	3,6	9,8	3,0	5,9	3,0	6,1	1,4	2,8
1	2,1	5,8	1,8	3,4	1,8	3,6	0,8	1,6

Tabel 139 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor DD-STPB detail F

Detail F – Wortel van de las

De wortel ter plaatse van detail F is op gelijke wijze als voor detail D getoetst. Hiervoor is de gemiddelde spanning in de laatste $t/2 = 5,4$ mm uitgelezen en vertaald naar een spanning in de las.

Onderstaand is het resultaat van de schadeberekening weergegeven voor de normaalspanning in de las ($\sigma_{\perp,w,loc}$), waarbij is getoetst op detailcategorie 40, rekening houdend met de aanwezige (druk)spanning door het eigen gewicht (zie detail A1 voor de beschrijving van deze methode). Er is geen rekening gehouden met de lagere gemeten spanning, omdat het voor de wortel lastig is om eenduidig de reductie te bepalen en er toch al grote overschrijdingen zijn gevonden voor de teen van de las.

Type 1 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 140 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail F – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 2 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	19,6	50,9	16,1	30,7	16,4	32,1	7,5	14,8
1,15	11,9	30,8	9,7	18,5	9,9	19,4	4,5	8,9
1	7,6	19,8	6,2	11,8	6,3	12,4	2,9	5,8

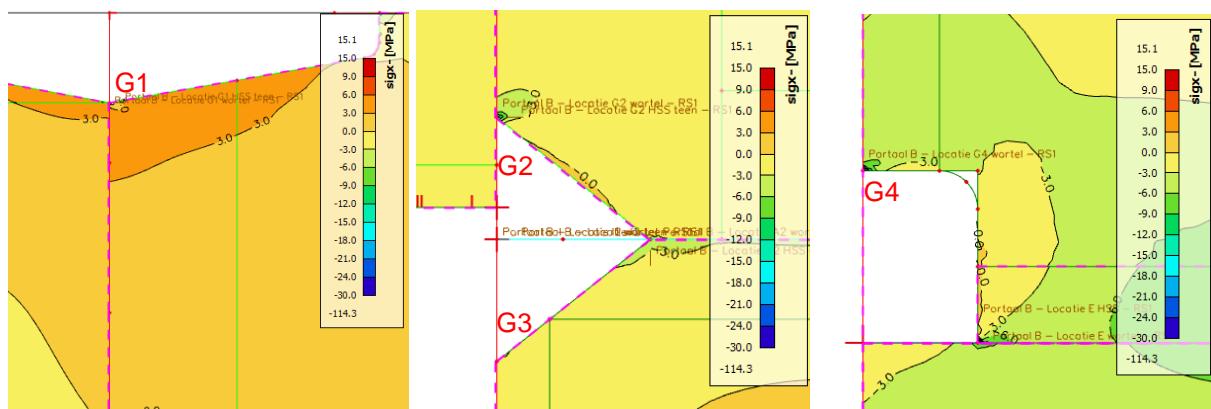
Tabel 141 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail F – wortel van de las (DC = 40, type 2)

Maatgevend is de berekening type 2, waarbij er uitgegaan wordt van geen contact tussen de platen. Gezien de overschrijding is de schade door de schuifspanning niet meer bepaald, aangezien de verbinding nu al niet voldoet. De schade door de schuifspanning moet eigenlijk nog opgeteld worden bij bovengenoemde schade.

Geconcludeerd wordt dat bij locatie F zowel de teen als de wortel van de las niet voldoet.

5.24.9 Detail G – Aansluiting lijf/schot dwarsdrager – kopschot op lijf hoofdlijker

De spanningen ter plaatse van de lasverbinding tussen het lijf van de dwarsdrager en het kopschot en tussen het schot onder de dwarsdrager en het kopschot is in onderstaande figuren weergegeven. Het kopschot is op zijn beurt weer verbonden met het lijf van de hoofdlijker met klinknagels. Met name bij de laspoortjes treden spanningss concentraties op. Er zijn voor deze locatie geen metingen uitgevoerd. Voor de vergelijkbare DD-K30 volgt uit de metingen dat de optredende spanningen lager waren dan de gemeten spanningen.



Figuur 282 – Spanningen ter plaatse van aansluiting lijf dwarsdrager/schot – kopschot op lijf hoofdlijker, DD-zK, Detail G

Detail G – Teen van de las

De hoogste spanningswisselingen treden op ter plaatse van detail G1 en G2. De toetsing van de teen van de las is daarom uitgevoerd voor detail G1 en G2 op basis van een hotspot-analyse op basis van de berekende spanningen. Getoetst is op detailcategorie DC = 90, vergelijkbaar met detail A1.

	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 142 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie G1 – teen van de las

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 143 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie G2 – teen van de las

Detail G – Wortel van de las

Voor de toetsing van de wortel kan niet op voorhand gezegd worden welk detail maatgevend is. Detail G2 heeft de grootste wisseling, maar is geheel op druk. Detail G1 heeft een kleinere wisseling, maar is deels op trek belast. De toetsing is daarom voor beide details uitgevoerd. Getoetst is op detailcategorie DC = 40, op basis van de methode van TNO, zoals beschreven bij detail A1.

Detail G1

Type 1 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 144 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie G1 – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 2 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 145 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie G1 – wortel van de las (DC = 40, type 2)

Detail G2

Type 1 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 146 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie G2 – wortel van de las (DC = 40, type 1)

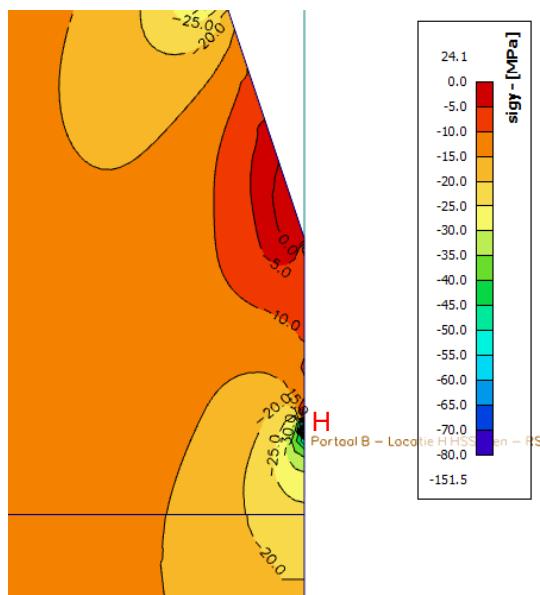
Type 2 γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 147 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie G2 – wortel van de las (DC = 40, type 2)

De schuifspanningen zijn in beide gevallen zeer laag en zullen niet in additionele schade resulteren.

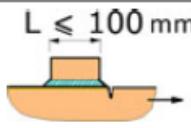
5.24.10 Detail H – Aansluiting lijf dwarsverstijver – verticale flens langsverstijver

Detail H bevindt zich bij de aansluiting tussen het lijf van de dwarsverstijver en de verticale flens van de langsverstijver. Ter plaatse van het einde van de lasverbinding tussen de verticale flens van de langsverstijver en het lijf van de dwarsverstijver treedt een spanningsconcentratie op. Er zijn geen metingen uitgevoerd op deze locatie.



Figuur 283 – Spanningen ter plaatse van aansluiting lijf dwarsverstijver – verticale flens langsverstijver, DD-STPB, Detail H

De toetsing van de teen van de las van dit detail is uitgevoerd op basis van de hotspotspanning die bepaald is door een niet-lineaire extrapolatie van de resultaten op 4 mm, 8 mm en 12 mm vanaf de teen van de las (type b extrapolatie conform IIW). Hierbij is uitgegaan van een detailcategorie DC = 100, conform tabel 3.3, detail 6 van IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components” [10].

8		Type “b” joint with short attachment	Fillet or full penetration weld, as welded	100
---	---	--------------------------------------	--	-----

Figuur 284 – Detailcategorie voor detail H – teen van de las [10]

Uit de vermoeiingsanalyse volgen de volgende schadegetallen

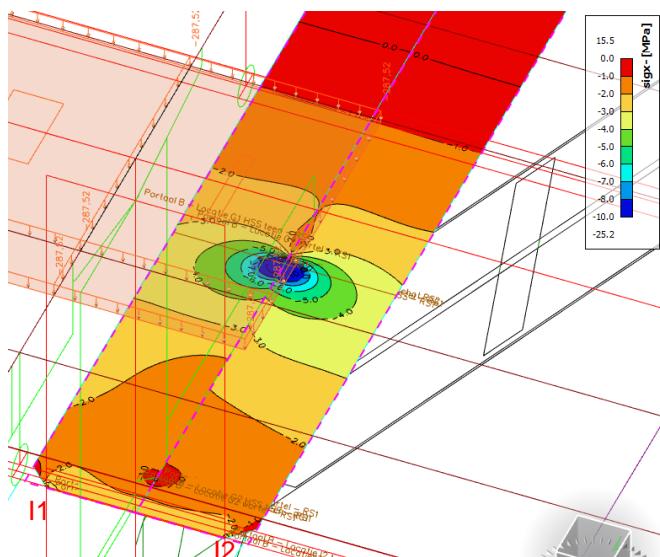
γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	54,8	144,6	44,1	79,9	47,1	92,0	18,7	36,6
1,15	33,2	88,2	26,7	48,6	28,5	56,0	11,3	22,2
1	21,4	56,9	17,1	31,2	18,4	36,1	7,2	14,2

Tabel 148 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie H – teen van de las (DC = 100)

5.24.11 Detail I – Aansluiting onderflens dwarsdrager – kopschot

Detail I – Teen van de las

In de onderflens is een versmalling aangebracht bij de aansluiting op de kopplaat van 250 mm naar 200 mm. Hier treden ook spanningspieken op, hoewel deze aanzienlijk lager zijn als de voorgaande pieken.



Figuur 285 – Spanning σ_x in de onderflens (spanning langsrichting) ter plaatse van detail I1 en I2.

Maatgevend voor de toetsing is detail I2. De teen van de hoeklas is op basis van de hotspotspanning getoetst op vermoeiing, uitgaande van detailcategorie 90, vergelijkbaar als voor detail A1. Hieruit volgen de volgende resultaten.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 149 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie I2 – teen van de las (DC = 90)

Detail I – Wortel van de las

De wortel is op vergelijkbare wijze als voor detail A1 getoetst. De spanning in de las is bepaald door de kracht te bepalen in de buitenste $12/2 = 6$ mm van de onderflens en deze te verdelen over de doorsnede van de hoeklas, inclusief kopse zijde. De toets is conservatief uitgevoerd op klasse 40, met het knippunt bij 10^7 , zonder rekening te houden met de aanwezige drukspanning. Uit de berekening volgt dat de lasverbinding voldoet.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 150 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie I2 – wortel van de las (DC = 40)

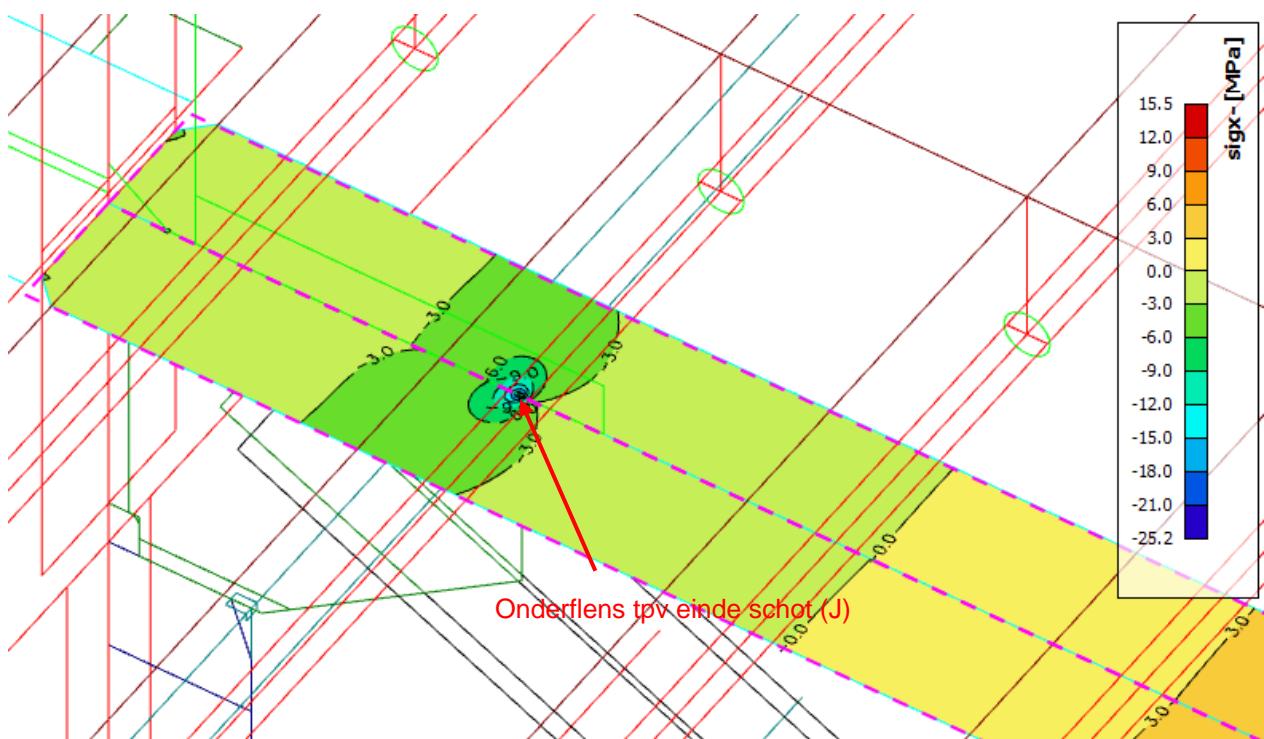
5.24.12 Detail J – Onderflens dwarsdrager t.p.v. einde schot

Voor de onderflens van de dwarsdrager geldt dat deze getoetst moet worden op detailcategorie 56, conform NEN -EN 1993-1-9 Tabel 8.4 Detail 1 ($L > 100$ mm), op basis van de nominale spanning in de onderflens.

Detail-categorie	Constructiedetail		Beschrijving	Eisen
80	$L \leq 50$ mm	 	<u>Aangelaste platen in de lengterichting:</u> 1) De detailcategorie varieert afhankelijk van de lengte L van de aangelaste plaat	De dikte van de aangelaste plaat moet kleiner zijn dan de hoogte ervan. Indien dit niet het geval is, volgens tabel 8.5, details 5 of 6.
71	$50 < L \leq 80$ mm			
63	$80 < L \leq 100$ mm			
56	$L > 100$ mm			

Figuur 286 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding DD-zK, detail J

Uit de berekening volgt dat de nominale langsspanningen in de onderflens ter plaatse van de aansluiting ca. -3 N/mm 2 zijn.

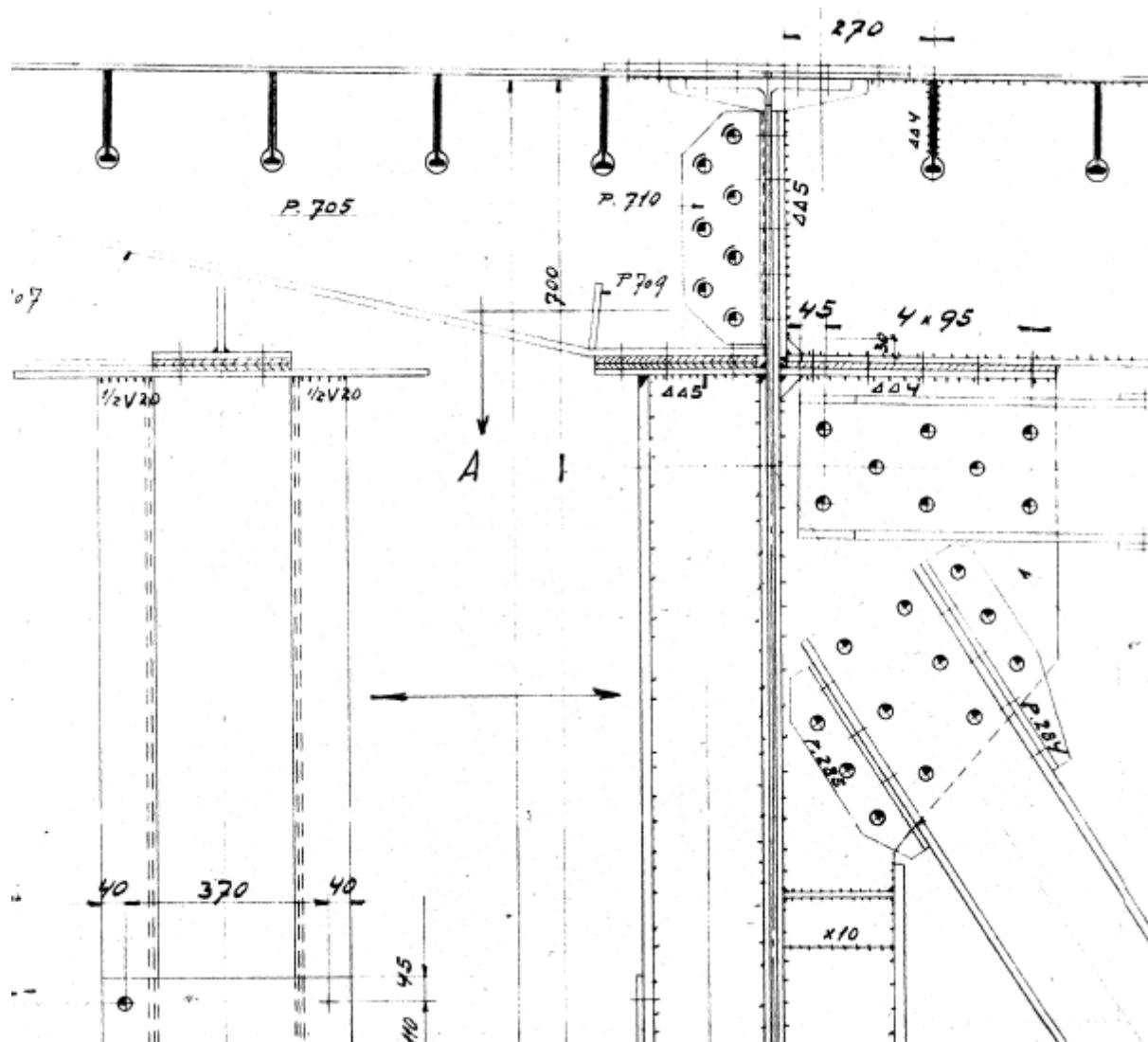


Figuur 287 – Spanning in onderflens t.g.v. eenheidslast op de tussendwarsdrager

De spanningswisseling is dermate laag dat hier geen schade op zal treden. Deze snede is daarom niet verder getoetst.

5.25 Type DD-STPC: Verbinding hoofdlijker - dwarsdragers portaal C

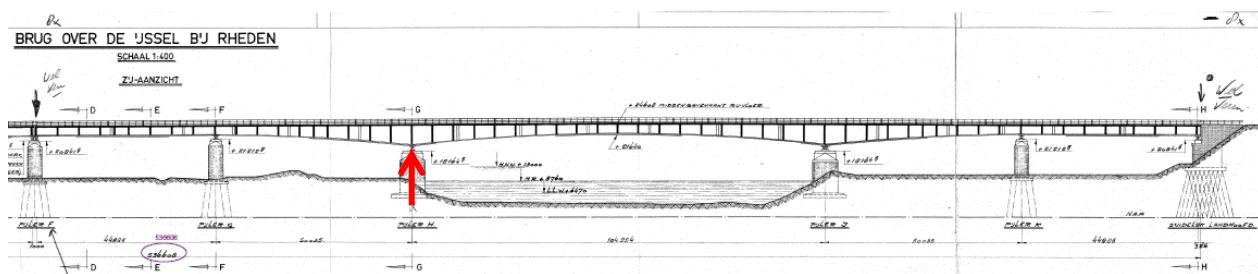
Vergelijkbaar met portaal A en B is ook de dwarsdrager bij portaal C onderzocht. Portaal C is wat anders uitgevoerd als de andere portalen en K-verbanden. Zo is de dwarsverstijver, het schot, de diagonalen en de bovenrand dubbel uitgevoerd. De dwarsdrager zelf is wel hetzelfde als de overige dwarsdragers. Daarnaast is het portaal aanzienlijk hoger als bij portaal A en B, waardoor de diagonalen een andere, steilere hoek hebben. Daarnaast is de aansluiting aan de onderzijde van de knieschotten anders uitgevoerd, zonder laspoortjes.



Figuur 288 – Overzicht van de verbinding type DD-STPC (portaal C)

5.25.1 Locatie getoetste dwarsdrager

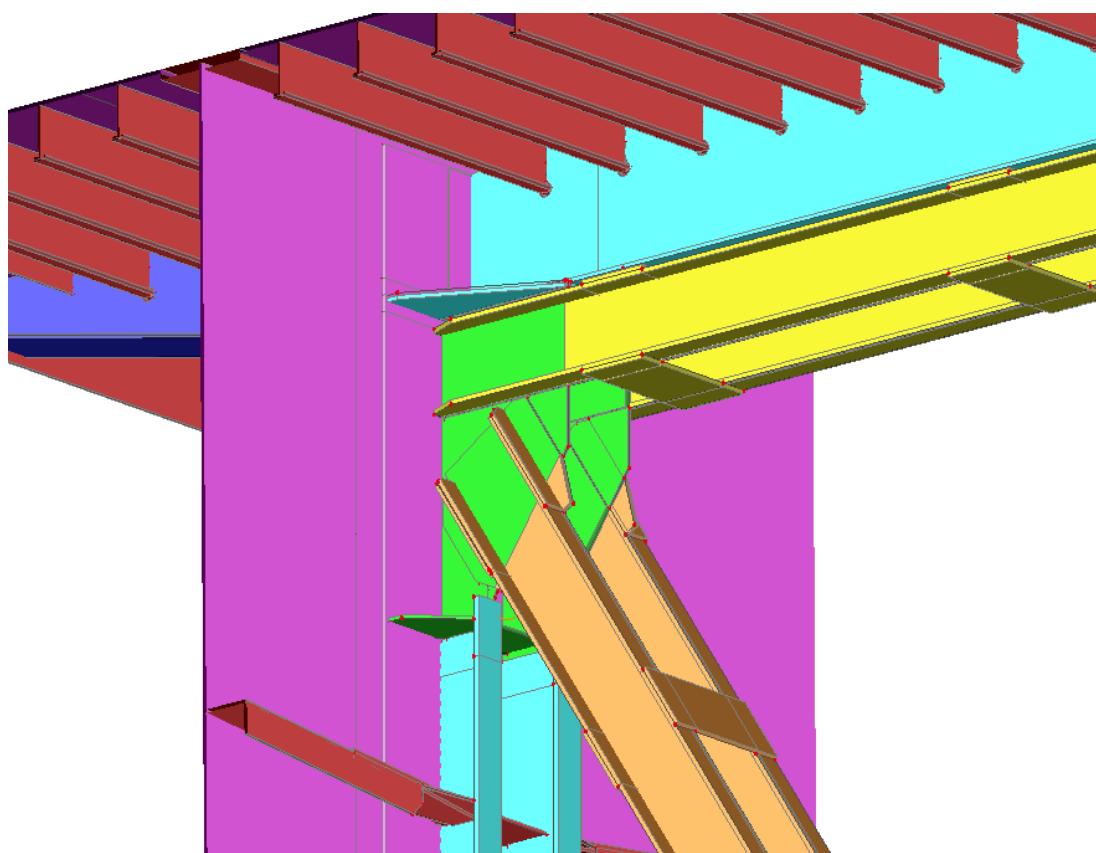
De getoetste en gemeten dwarsdrager komt overeen met de dwarsdrager ter plaatse van Pijler H. De spanningswisselingen in de kritieke punten zijn bepaald met het hybride model. In dit model is over een lengte van één K-verband voor en na portaal C het rekenmodel opgebouwd met plaatelementen, het overige deel van de brug is als plaat met excentrische balkelementen gemodelleerd.



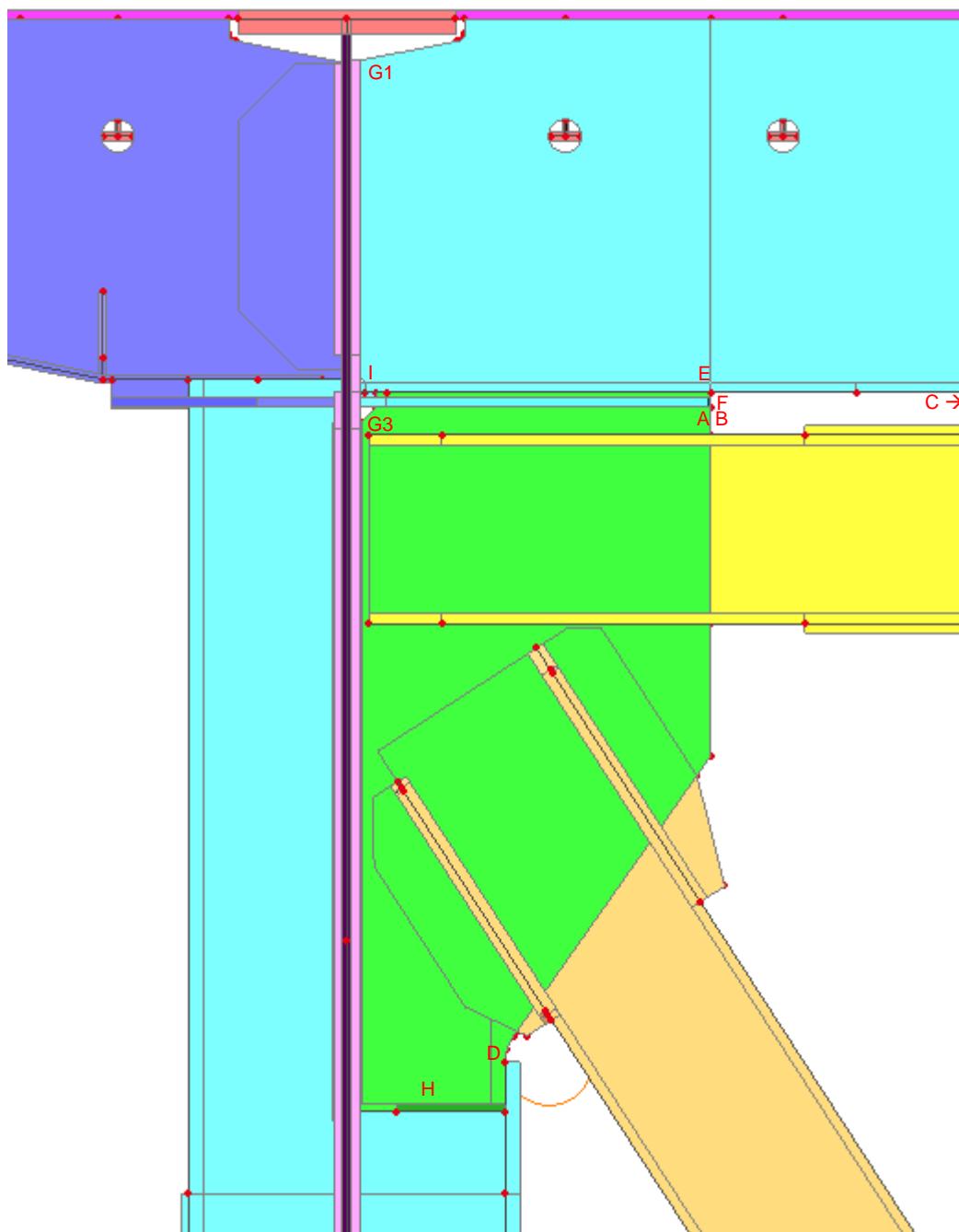
Figuur 289 – Locatie getoetste dwarsdrager portaal B, DD-STPC

5.25.2 Getoetste details

In de aansluiting tussen dwarsdrager en hoofdlijger zijn verschillende details aanwezig die kritisch zijn ten aanzien van vermoeiing. Per onderdeel zal worden toegelicht hoe de toets-spanning is bepaald, waar de maatgevende snede zit en welke detailcategorie van toepassing is. De getoetste details zijn verder gelijk aan die voor de dwarsdragers met K-verband.

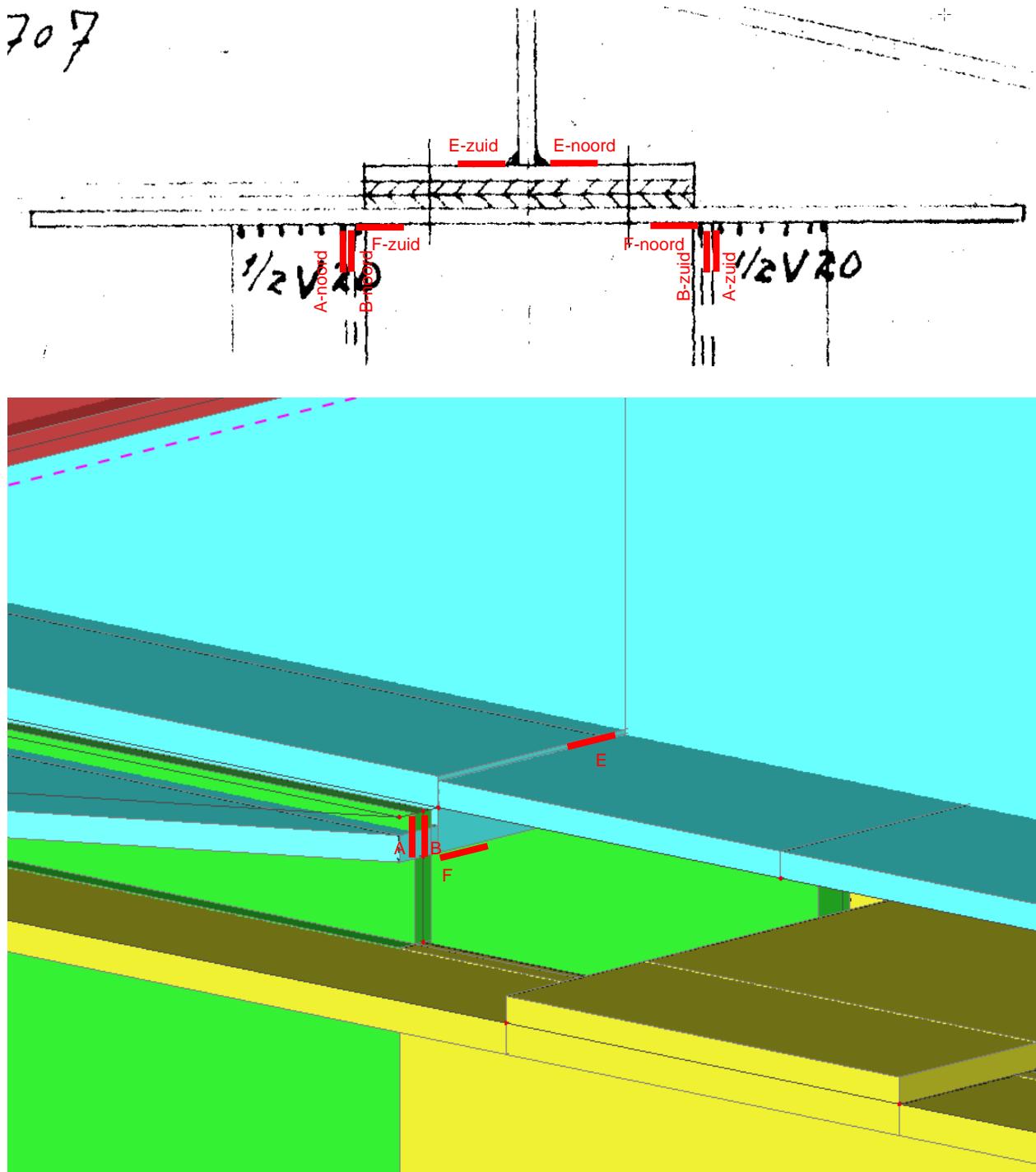


Figuur 290 – Detail van het FEM model van verbinding type DD-STPC (portaal C)



Figuur 291 – Getoetste sneden verbinding dwarsdrager DD-STPC bij portaal C

Opgemerkt wordt dat er een diktesprong in de horizontale plaat onder de dwarsdrager tussen de schotten zit, omdat hier onder de onderflens van de dwarsdrager een vulplaat en een (bredere) schuine plaat aanwezig zijn. In het plaatmodel krijg je hierdoor een diktesprong en excentrische platen die een verstoring van de (lokale) spanningen geven, met name t.p.v. locatie A, B en F. Verwacht wordt dat de resultaten van het FEM model hier niet tot zinvolle resultaten zullen leiden. Hier zijn dan ook metingen uitgevoerd.



Figuur 292 – Getoetste sneden verbinding dwarsdrager DD-STPC bij portaal C (detail schot – horizontale plaat – onderflens dwarsdrager)

De volgende tabel geeft een beschrijving van de details die zijn getoetst en/of waar een meting is uitgevoerd.

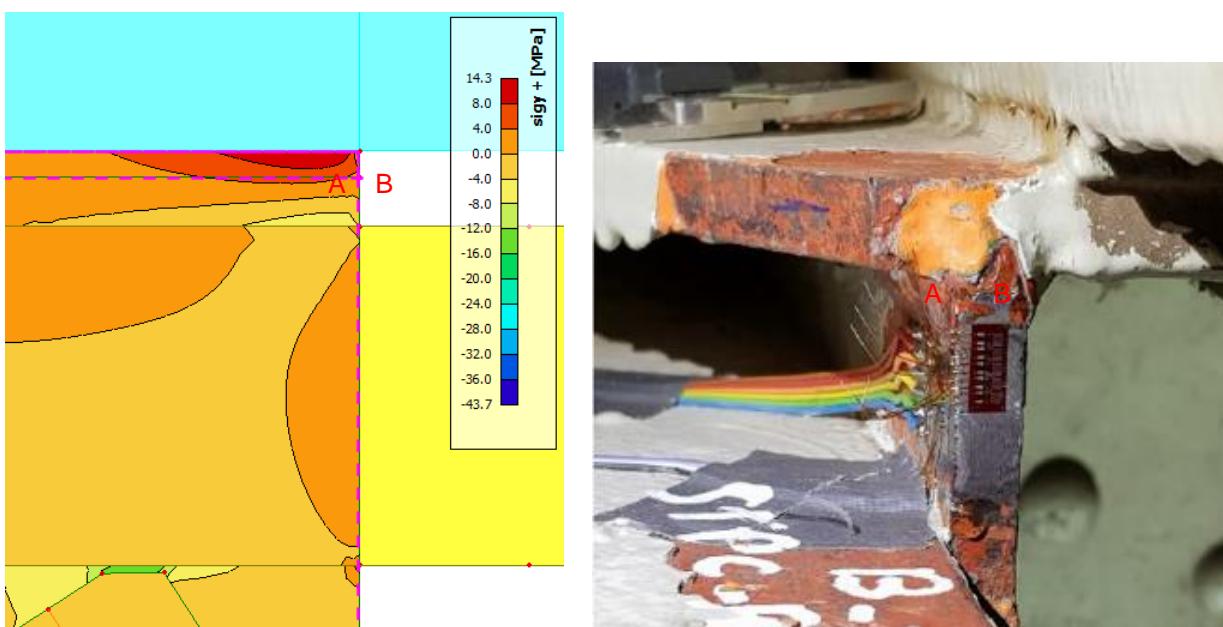
Detail	Beschrijving	Vermoeiings-toets	Gemeten
A	Hoeklas knieschot – horizontale plaat onder onderflens dwarsdrager (type a)	x	x
B	Hoeklas knieschot – horizontale plaat onder onderflens dwarsdrager (type b)	x	x
C	Nominale spanning onderflens		x
D	Las schot – einde verticale flens dwarsverstijver	x	x
E	Las onderflens dwarsdrager – lijf dwarsdrager (spanning dwarsrichting)	x	x
F	Las plaat onder onderflens dwarsdrager – schot (spanning dwarsrichting)	x	x
G1	Hoeklas lijf dwarsverstijver – kopschot	x	
G3	Hoeklas schot – kopschot	x	
H	Las onderzijde schotten – horizontale flens langsverstijver – lijf dwarsverstijver	x	
I	Onderflens dwarsdrager – kopschot	x	

Tabel 151 – Overzicht toets- en meetlocaties dwarsdrager met K-verband (DD-STPC)

De vermoeiingsberekeningen zijn weergegeven in Bijlage E23.

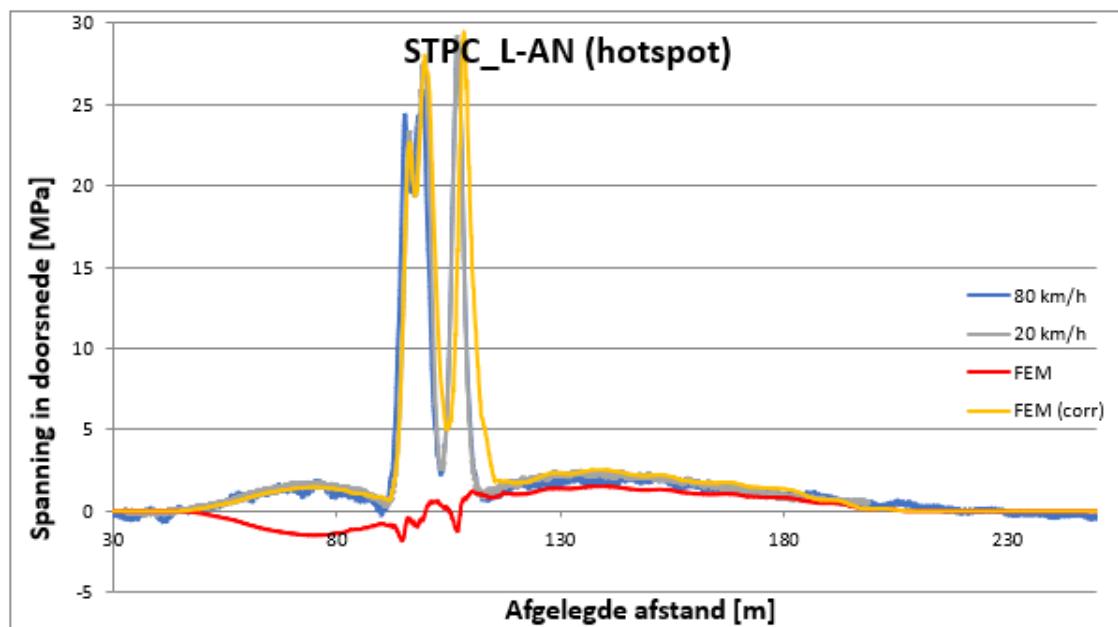
5.25.3 Detail A/B - Aansluiting schot – horizontale plaat onder onderflens dwarsdrager

Detail A/B betreft de aansluiting aan de bovenzijde van de schotten met de horizontale plaat die onder de onderflens van de dwarsdrager aanwezig is. Op deze locatie is een spanningsconcentratie aanwezig. Omdat er een diktesprong aanwezig is in de horizontale plaat ontstaan er in het plaatmodel lokaal verstoringen van de spanning, die waarschijnlijk doorwerken in het schot ter plaatse van detail A/B. Er is daarom besloten om ook metingen uit te voeren op deze locatie. Tijdens de inspectie voorafgaand aan het aanbrengen van de rekstrookjes is gebleken dat het niet mogelijk was om aan de binnenzijde van de platen rekstrookjes te plakken, daarom zijn deze alleen op de buitenzijde (Detail A) en op de kopse zijde (Detail B) geplakt.



Figuur 293 – Spanningen ter plaatse van detail A/B schot – horizontale plaat onder onderflens dwarsdrager

In Bijlage G is de vergelijking van de gemeten spanningen en de berekende spanningen gegeven voor detail A (noordzijde van de noordelijke plaat en zuidzijde van de zuidelijke plaat) en detail B (kopse kant, noordelijke en zuidelijke plaat). De hoogste gemiddelde gemeten hotspot spanningswisseling treedt op in detail A (noord).



Figuur 294 – Spanningswisseling hotspotspanningen DD-STPC detail A noord

Voor locatie A is het niet goed mogelijk om een verhouding te bepalen tussen metingen en berekening. Dit komt omdat er in het rekenmodel een verstoring zit door een diktesprong in de horizontale plaat tussen de schotten. Hierdoor ontstaan lokaal onjuiste resultaten, welke door zullen werken in het schot ter plaatse van locatie A. Om toch een verschaling te kunnen maken, is de volgende aanpak gehanteerd voor het verschalen van de invloedslijn:

Er is handmatig een invloedslijn t.g.v. een eenheidslast bepaald die bij het passeren van een vrachtwagen dezelfde invloedslijn geeft. De berekende spanningswisseling met deze gecorrigeerde invloedslijn is in het geel weergegeven in bovenstaand figuur. De verhouding tussen meting en (gecorrigeerde) berekening is daardoor per definitie gelijk aan 100%, omdat hier de correctie al in zit.

Detail A1/B – Teen van de las

Op basis van de aangepaste invloedslijn is de vermoeiingsberekening uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van een hotspot-analyse met een detailcategorie DC = 90, conform tabel 3.3, detail 6 van IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components” [10].

In onderstaande tabel zijn de schadegetallen weergegeven voor drie verschillende veiligheidsfactoren. De lasverbinding voldoet op de meeste locaties niet aan de schade-eis $D \leq 1,0$.

γ_{MF}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1.35	3,3	9,4	2,2	4,0	3,0	6,1	0,8	1,7
1.15	1,8	5,1	1,1	1,9	1,6	3,3	0,4	0,8
1.00	1,0	3,0	0,6	1,0	0,9	1,9	0,2	0,4

Tabel 152 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail A noord – teen van de las

Detail A/B – wortel van de las

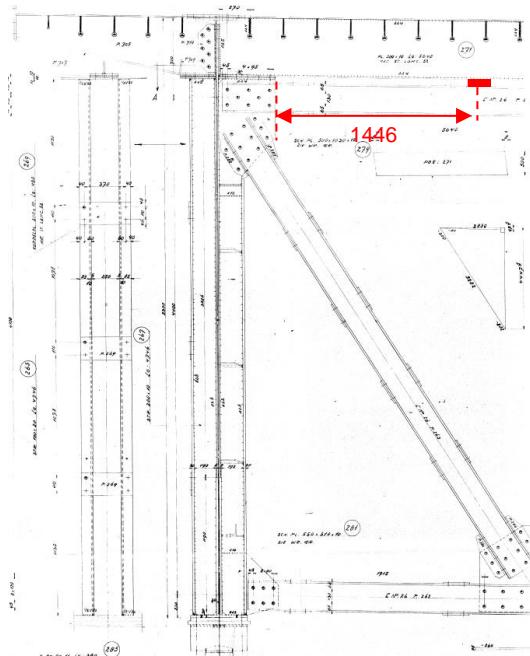
Voor de toetsing van de wortel van de las werd normaliter de kracht in de laatste t/2 mm bepaald en omgerekend naar een spanning in de las. Omdat het model onbetrouwbare resultaten geeft is dit voor portaal C niet mogelijk. Ook de metingen zijn niet geschikt om de gemiddelde spanning in de laatste t/2 mm te bepalen, omdat dit een meting van de hotspotspanning betreft. Het is daardoor niet goed mogelijk om een toets van de wortel uit te voeren.

Gezien de grootte van de hotspotspanning kan worden aangenomen dat de wortel van de las ook niet zal voldoen op de toetsing van vermoeling.

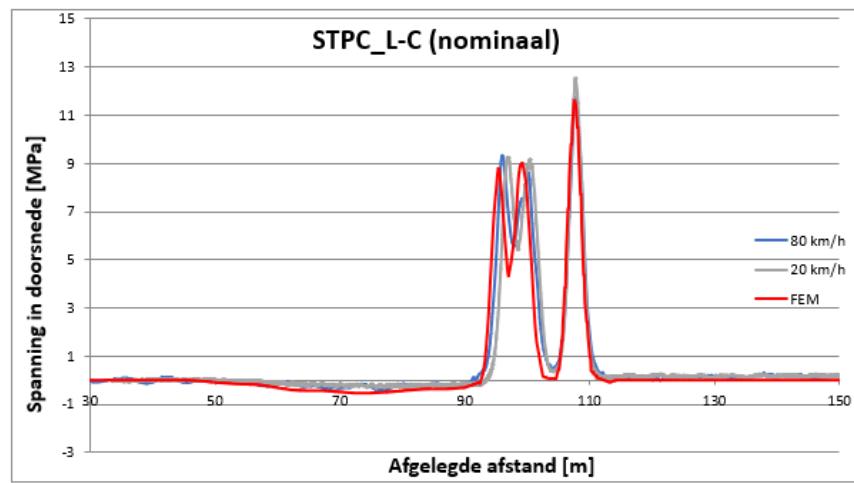
Omdat de teen toch al grote overschrijdingen geeft zal er een versterking moeten worden uitgevoerd. Aangenomen wordt dat de las daarbij vervangen zal moeten worden. Uitgangspunt is dat bij een eventuele versterking er geen k-las meer zal worden aangebracht en de toetsing van de wortel dan ook verder niet meer relevant zal zijn. De toetsing van de wortel is daarom dan ook niet meer verder uitgevoerd.

5.25.4 Detail C – Onderflens dwarsdrager (nominaal)

Ter plaatse van locatie C is een meting uitgevoerd om een vergelijking tussen de nominale spanningen uit het rekenmodel en de metingen uit te kunnen voeren. Hiervoor is gemeten op 1,446 m uit de rand van het schot.



Figuur 295 – Overzicht DD-STPC locatie C



Figuur 296 – Spanningswisseling (nominaal) DD-STPC locatie C

De spanningen komen goed overeen tussen model en meting. Omdat locatie C een nominale spanning betreft en niet een vermoedingsgevoelig detail is er voor deze locatie geen vermoedingsberekening uitgevoerd.

5.25.5 Detail D – Aansluiting schot – verticale flens dwarsverstijver

Locatie D ligt aan het einde van de afronding van het schot, aan het einde van de las tussen flens en lijf van de dwarsverstijver. Het was niet mogelijk om een rekstrookje op de kopse zijde te plakken door de oneffenheden. Er is daarom besloten om de rekmeting op de vlakke kant van de plaat uit te voeren. Dit is zowel op de noordelijke als de zuidelijke plaat gedaan, waarbij in beide gevallen aan de buitenzijde is gemeten (zuidkant van de zuidelijke plaat, noordkant van de noordelijke plaat). De plaat is 10,0 mm dik. Detailfoto's van de locatie zijn gegeven in onderstaande figuren.



Figuur 297 – Detailfoto DD-STPC locatie D North en D South

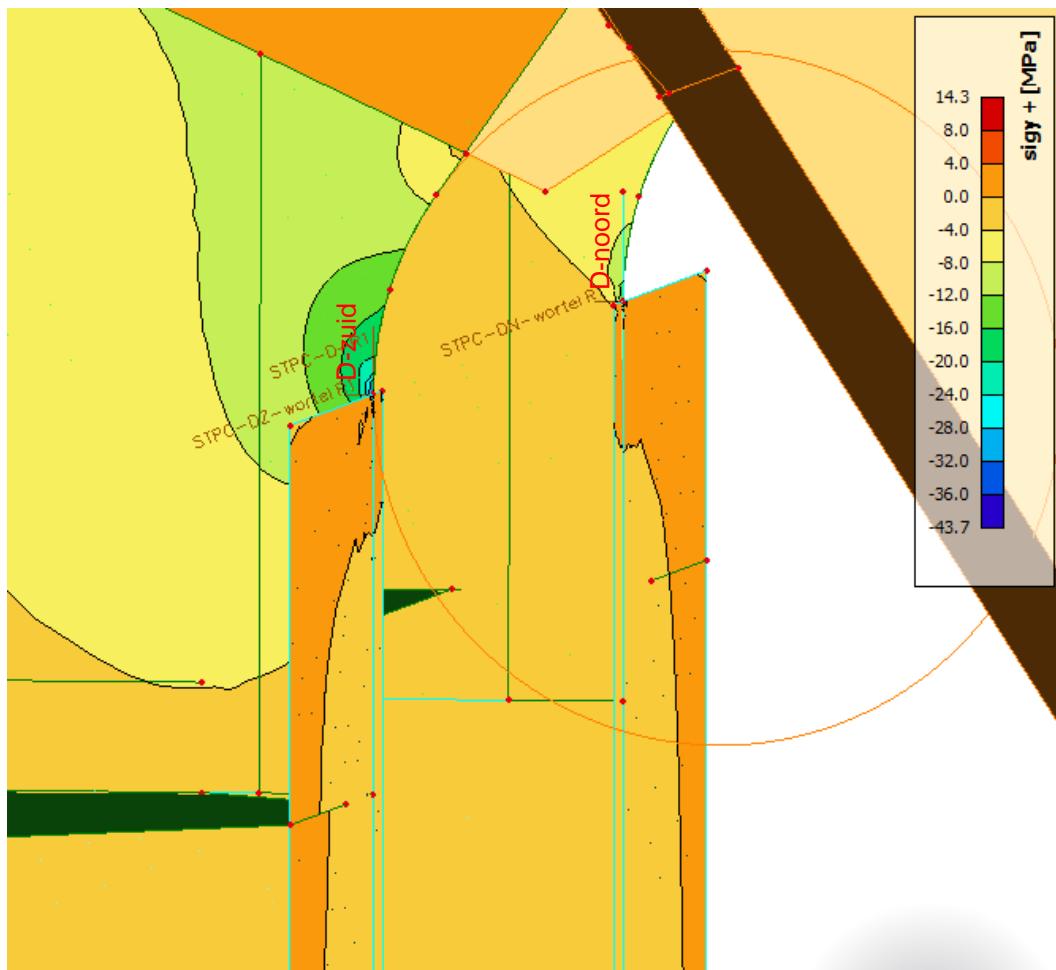
Aan de noordkant is de afronding niet mooi rond afgewerkt, maar is er een sprong zichtbaar bij het tweede rekstrookje. Aan de zuidzijde is de afronding wel netjes afgerond.



Figuur 298 – Detailfoto rekstrookjes DD-STPC locatie D North + D South

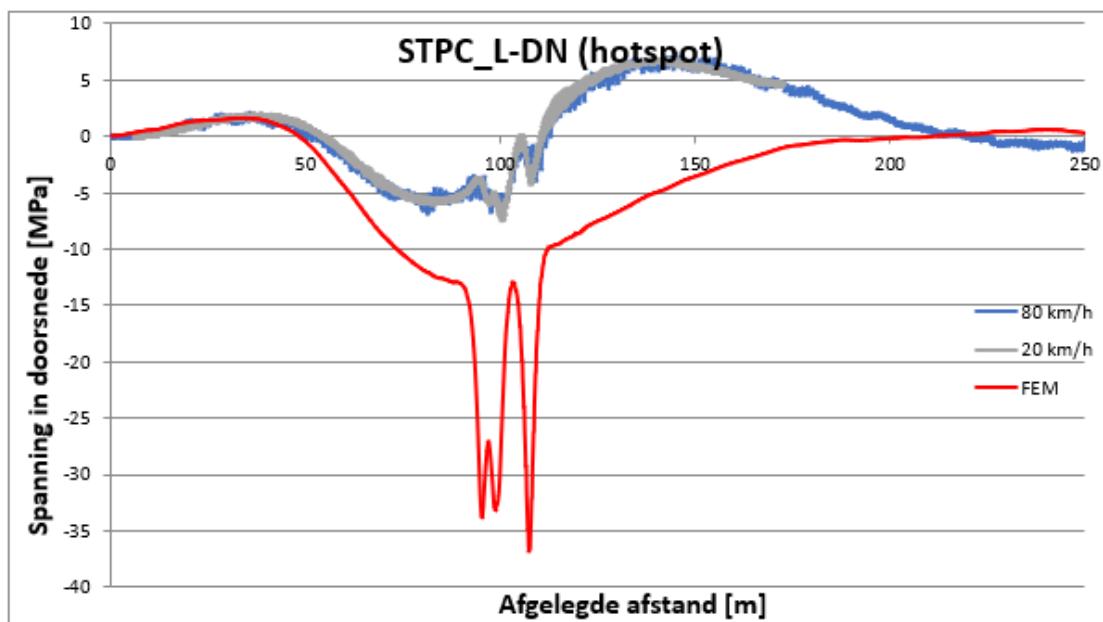
Detail D – teen van de las

De spanning ter plaatse van de teen van de las is bepaald door de hotspot spanning te bepalen ter plaatse van de spanningspiek aan het einde van de verticale flens van de dwarsverstijver. De maximale spanningen treden op aan de buitenzijden, dus aan de noordelijke kant van de noordelijke plaat en aan de zuidelijke kant van de zuidelijke plaat. Omdat op de vlakke kant van de plaat is gemeten is een type a extrapolatie uitgevoerd, door een extrapolatie van de spanningen op 0,4t en 1,0t. Dit is ook voor de berekening gedaan

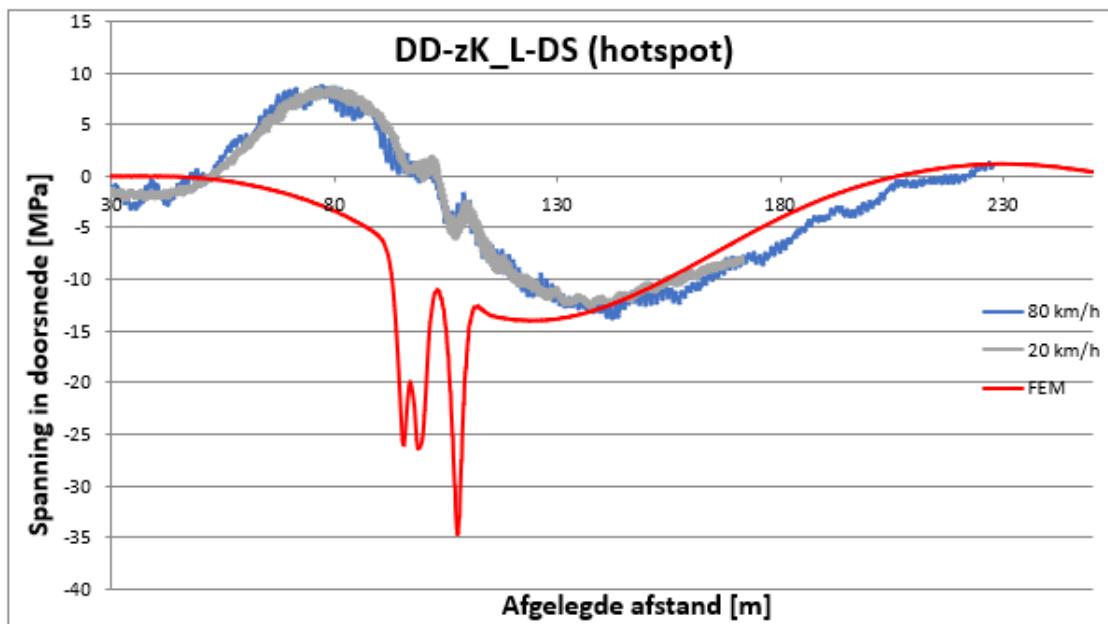


Figuur 299 – Spanning ter plaatse van de aansluiting schot – einde flens dwarsverstijver (σ_{y+}) t.g.v. de eenheidslast (2x50 kN)

In Bijlage G is een vergelijking gemaakt van de berekende hotspotspanning en de gemeten hotspot spanningen ter plaatse van detail D voor zowel voor de noordzijde van de noordelijke plaat als de zuidzijde van de zuidelijke plaat. De grootste (gemeten) spanningswisseling treedt op aan de zuidzijde.



meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	7,3 N/mm ²		6,9 N/mm ²	1,6 N/mm ²
min	-6,8 N/mm ²		-7,5 N/mm ²	-36,8 N/mm ²
range	14,1 N/mm ²		14,4 N/mm ²	38,4 N/mm ²
modelfac.	37%	modelfac.	37%	

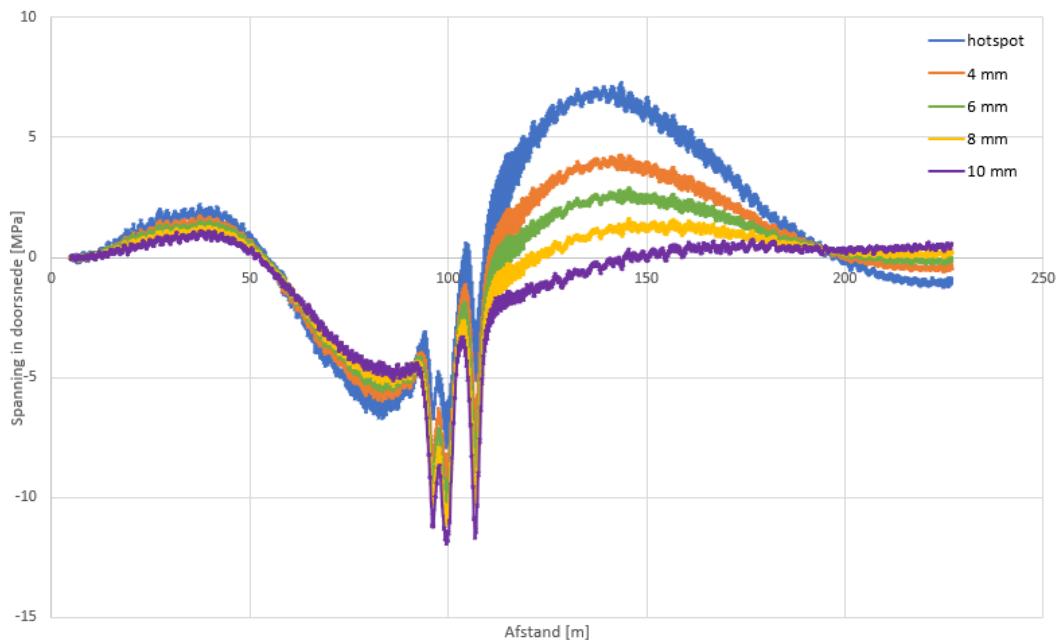


meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	8,6 N/mm ²		8,6 N/mm ²	1,2 N/mm ²
min	-13,7 N/mm ²		-12,6 N/mm ²	-34,7 N/mm ²
range	22,2 N/mm ²		21,2 N/mm ²	35,9 N/mm ²
modelfac.	62%	modelfac.	59%	

Figuur 300 – Hotspotspanning DD-STPC detail D, noord- en zuidzijde

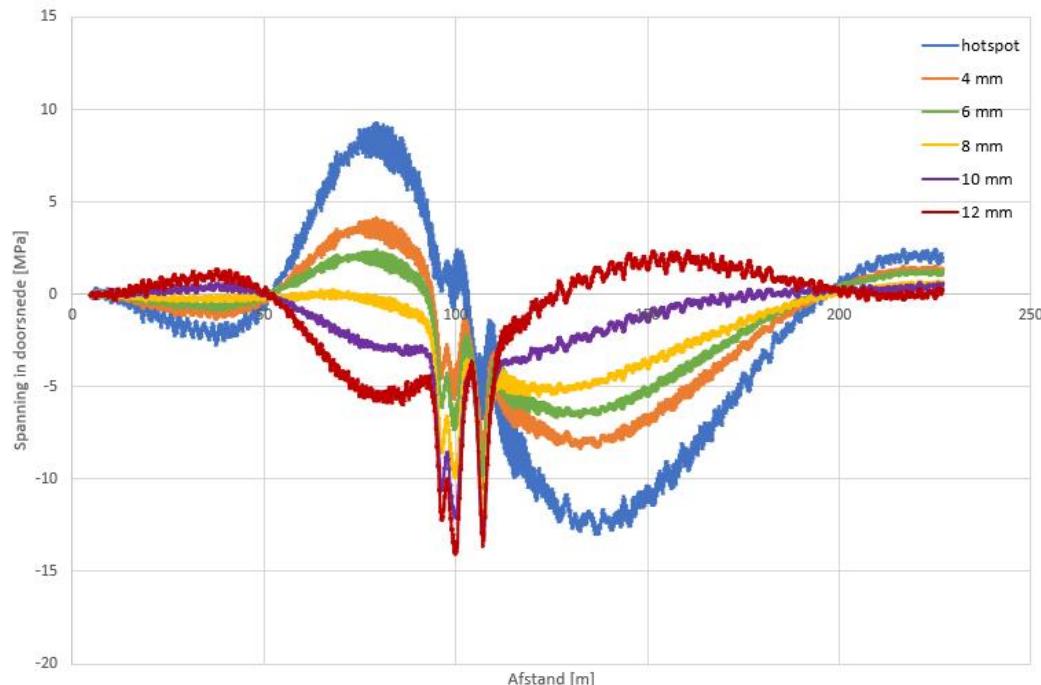
Wat opvalt is dat de lokale effecten in de hotspot invloedslijnen beperkt zijn, terwijl het globale effect juist relatief groot is. Bovendien wordt er een trekbelasting gevonden in de meting wanneer het voertuig in het veld voor (zuidzijde) of na (noordzijde) rijdt. Nadere analyse van de verschillende rekstrookjes laat zien dat het lokale effect weggedrukt wordt door de hotspot-extrapolatie. Hoe verder weg van de lasteen, hoe nadrukkelijker het lokale effect weer zichtbaar wordt en hoe kleiner het globale effect wordt.

Meting noordzijde



NB. Meting noordzijde op 10 mm is een geextrapoleerde waarde

Meting zuidzijde



Figuur 301 – Gemeten spanningen DD-STPC detail D, noord- en zuidzijde

Aan de zuidzijde is te zien dat over een lengte van 12 mm het teken van de spanningswisseling door het globale gedrag van teken omwisselt. Er is niet een duidelijke verklaring waarom er zo veel variantie in spanningen optreedt over een relatief korte afstand, juist wanneer de vrachtwagen relatief ver weg van de betreffende gemeten dwarsdrager staat. Mogelijk dat hier toch een verstoring optreedt door lokale afwijkingen in de constructie.

Omdat de resultaten van de meting afwijken van de verwachting, kan niet zondermeer worden aangenomen dat de meting representatief is voor de overige portalen. Wel kan worden aangenomen dat de berekende spanningswisseling, ondanks de afwijkende vorm t.o.v. de meting, conservatief is voor de vermoedingsanalyse. Er is daarom, in overleg met Rijkswaterstaat, besloten om voor de vermoedingsanalyse uit te gaan van de berekende spanningswisseling. De maatgevende berekende spanningswisseling treedt op aan de noordzijde, zie Figuur 300. Voor de vermoedingsanalyse is uitgegaan van detailcategorie DC = 90, conform tabel 3.3, detail 9 van IIW rapport "Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components" [10]. Afwijkend van deze tabel is uitgegaan van een type a extrapolatie i.p.v. een type b extrapolatie, omdat er ook buiging in het vlak optreedt. De spanningen zijn daarom op de hoek van de plaat bepaald, en niet op de kopse kant.

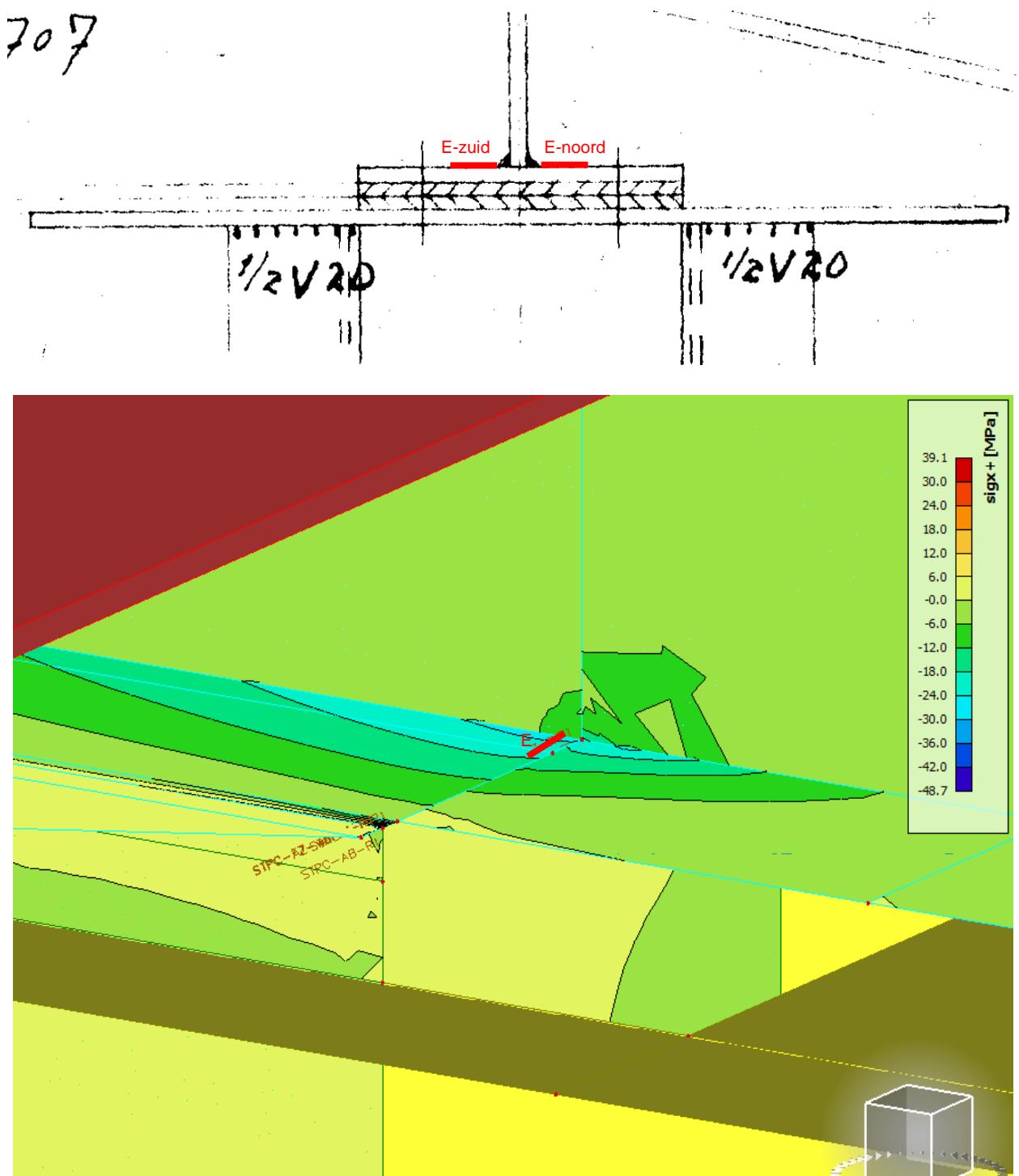
In onderstaande tabel zijn de schadegetallen weergegeven voor drie verschillende veiligheidsfactoren. De lasverbinding voldoet op de meeste locaties niet aan de schade-eis $D \leq 1,0$.

γ_{MF}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	5,5	16,7	3,3	4,1	5,5	11,1	0,3	0,7
1,15	3,1	9,6	1,9	2,3	3,1	6,4	0,1	0,3
1	1,8	5,8	1,1	1,3	1,8	3,8	0,1	0,1

Tabel 153 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor detail DD-STPC-D.

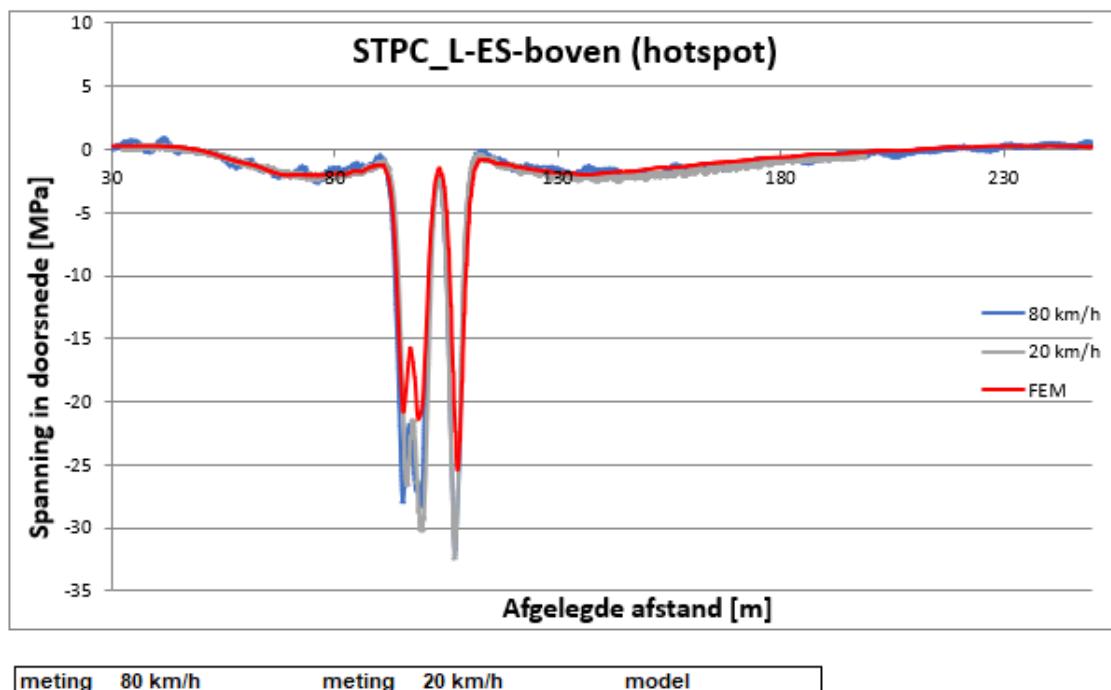
5.25.6 Detail E – Onderflens dwarsdrager t.p.v. lijn dwarsdrager

Detail E bevindt zich aan de bovenzijde van de onderflens van de dwarsdrager, haaks op de overspanningsrichting van de dwarsdrager, precies op de lijn van het einde van de verbindingsplaat onder de dwarsdrager tussen de schotten. Er zijn geen foto's beschikbaar van de meetlocatie.



Figuur 302 – Locatie detail DD-STPC detail E

Bijlage G geeft de vergelijking tussen de metingen en de berekende hotspotspanningen. De hoogste spanningen werden gevonden aan de zuidzijde, waar de verhouding meting ten opzichte van berekende hotspotspanningswisseling gelijk is aan 128%.



Figuur 303 – Hotspotspanning DD-STPC detail E, zuidzijde

Detail E – Teen van de las

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald. Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (van DD-STPC, detail E, zuidzijde) en is gelijk aan 128%. De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening vermenigvuldigd met deze modelfactor, waarna een vermoeiingsberekening van de teen van de las is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van Detailcategorie $\Delta\sigma_c = 100 \text{ N/mm}^2$, o.b.v. IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components” [10], tabel 3.3, detail 3.

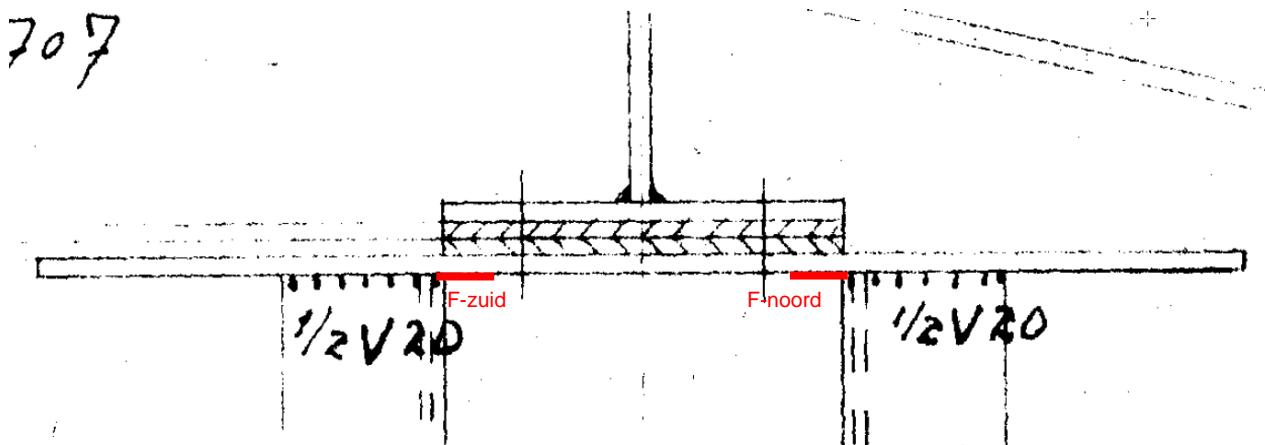
De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiële veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald eind 2018 en eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
γ_{Mf}	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	3,0	8,4	2,2	3,8	2,7	5,5	0,7	1,5
1,15	1,6	4,6	1,1	1,8	1,4	3,0	0,3	0,7
1	0,9	2,6	0,6	0,9	0,8	1,6	0,2	0,3

Tabel 154 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor DD-STPC detail E

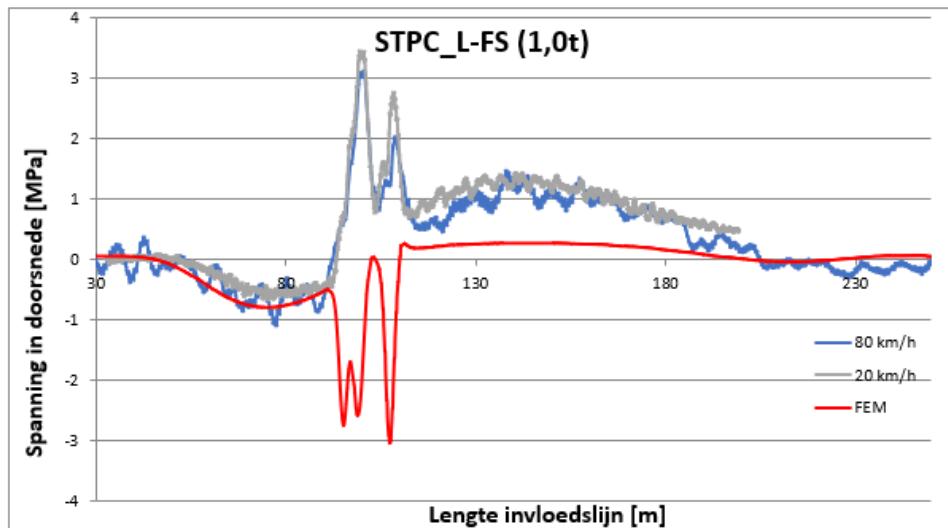
5.25.7 Detail F – Horizontale plaat onder dwarsdrager t.p.v. verticale schotten

Detail F bevindt zich aan de onderzijde van de horizontale plaat onder de onderflens van de dwarsdrager, in dwarsrichting van de dwarsdrager, ter plaatse van het einde van de schotten.

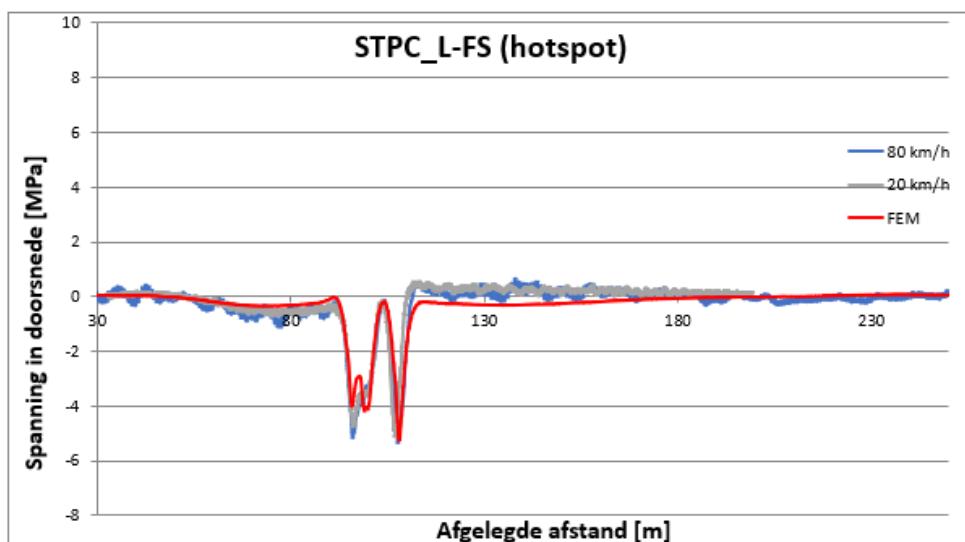


Figuur 304 – Detailfoto DD-STPC locatie F

Bijlage G geeft de vergelijking tussen de metingen en de berekende hotspotspanningen en de spanning op 1,0t. De hoogste spanningen werden gevonden aan de zuidzijde, waar de verhouding meting ten opzichte van berekende hotspotspanningswisseling gelijk is aan 106%. In de meting worden wat onverwachte resultaten gevonden, zo wordt op 10 mm (1,0t) een trekspanning gevonden, terwijl ter plaatse van de hotspot een drukspanning wordt gevonden.



meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	3,1 N/mm²		3,4 N/mm²	0,3 N/mm²
min	-1,1 N/mm²		-0,7 N/mm²	-3,0 N/mm²
range	4,2 N/mm²		4,1 N/mm²	3,3 N/mm²
modelfac.	127%	modelfac.	124%	



meting	80 km/h	meting	20 km/h	model
max	0,6 N/mm²		0,5 N/mm²	0,1 N/mm²
min	-5,3 N/mm²		-5,1 N/mm²	-5,3 N/mm²
range	5,9 N/mm²		5,6 N/mm²	5,3 N/mm²
modelfac.	112%	modelfac.	106%	

Figuur 305 – Spanning op 1,0 t en hotspotspanning DD-STPC detail F, zuidzijde

Detail F – Teen van de las

Op basis van de verhouding van de spanningsrange uit de metingen en uit het model bij de passage van de zwaarste as is een modelfactor bepaald. Deze is gebaseerd op de grootste gemeten spanningswisseling bij 20 km/h (van DD-STPC, detail F, zuidzijde). Er is daarbij uitgegaan van een type a extrapolatie. De spanningen t.g.v. de eenheidslast zijn voor de vermoeiingsberekening vermenigvuldigd met deze modelfactor, waarna een vermoeiingsberekening van de teen van de las is uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van Detailcategorie $\Delta\sigma_c = 100 \text{ N/mm}^2$, o.b.v. IIW rapport “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components” [10], tabel 3.3, detail 3.

De vermoeiingsanalyse voor de teen van de las is uitgevoerd voor drie partiele veiligheidsfactoren, waarbij de schade is bepaald eind 2018 en eind 2050. De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

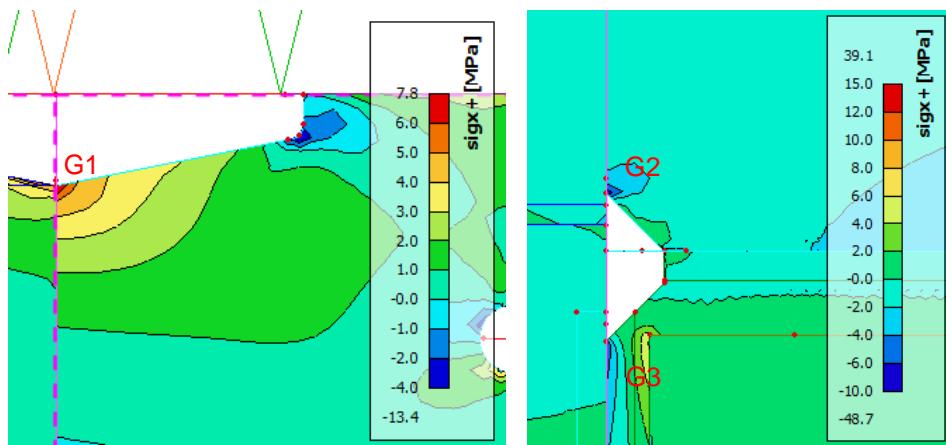
γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 155 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor DD-STPC detail F

Geconcludeerd wordt dat bij locatie F de teen van de las voldoet.

5.25.8 Detail G – Aansluiting lijf/schot dwarsdrager – kopschot op lijf hoofdlijker

De spanningen ter plaatse van de lasverbinding tussen het lijf van de dwarsdrager en het kopschot en tussen de schotten onder de dwarsdrager en de opdikplaat op het lijf van de hoofdlijker is in onderstaande figuren weergegeven. Het kopschot en opdikplaat zijn op hun beurt weer verbonden met het lijf van de hoofdlijker met klinknagels. Met name bij de laspoortjes treden spanningsconcentraties op. Er zijn voor deze locatie geen metingen uitgevoerd.



Figuur 306 – Spanningen ter plaatse van aansluiting lijf dwarsdrager/schot – kopschot op lijf hoofdlijker, DD-STPC, Detail G

Er worden met name aan de binnenzijde van de schotten bij G3 wat hogere trekspanningen gevonden, door buiging van de schotten. Dit treedt met name bij verkeer op rijstrook 2 op, bij verkeer op rijstrook 1 wordt dit gecompenseerd door de druk uit de wiellast die recht boven het betreffende detail staat. De hoogste schades worden dan ook in de oostelijke liggers gevonden.

Detail G – Teen van de las

De hoogste spanningswisselingen treden op ter plaatse van detail G1 en G3. De toetsing van de teen van de las is daarom uitgevoerd voor detail G1 en G3 op basis van een hotspot-analyse op basis van de berekende spanningen. Getoetst is op detailcategorie DC = 90, vergelijkbaar met detail A.

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 156 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie G1 – teen van de las

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,3	0,6	0,5	1,5	0,1	0,3	0,4	0,9
1,15	0,1	0,2	0,2	0,6	0,0	0,1	0,2	0,4
1	0,0	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2

Tabel 157 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie G3 (noordelijke plaat) – teen van de las

γ_{Mf}	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,4	0,9	0,7	1,9	0,2	0,5	0,5	1,1
1,15	0,2	0,4	0,3	0,8	0,1	0,2	0,2	0,5
1	0,1	0,2	0,1	0,3	0,0	0,1	0,1	0,2

Tabel 158 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie G3 (zuidelijke plaat) – teen van de las

Detail G – Wortel van de las

Voor de toetsing van de wortel is detail G1 en G3 getoetst. Getoetst is op detailcategorie DC = 40, op basis van de methode van TNO, zoals beschreven bij detail A1. Gezien de lage spanning treedt er in geen van de details schade op.

Detail G1

Type 1	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 159 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie G1 – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 2	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 160 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie G1 – wortel van de las (DC = 40, type 2)

Detail G2

Type 1	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 161 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie G3 – wortel van de las (DC = 40, type 1)

Type 2	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 162 – Schadegetallen voor eind 2018 en eind 2050 voor locatie G3 – wortel van de las (DC = 40, type 2)

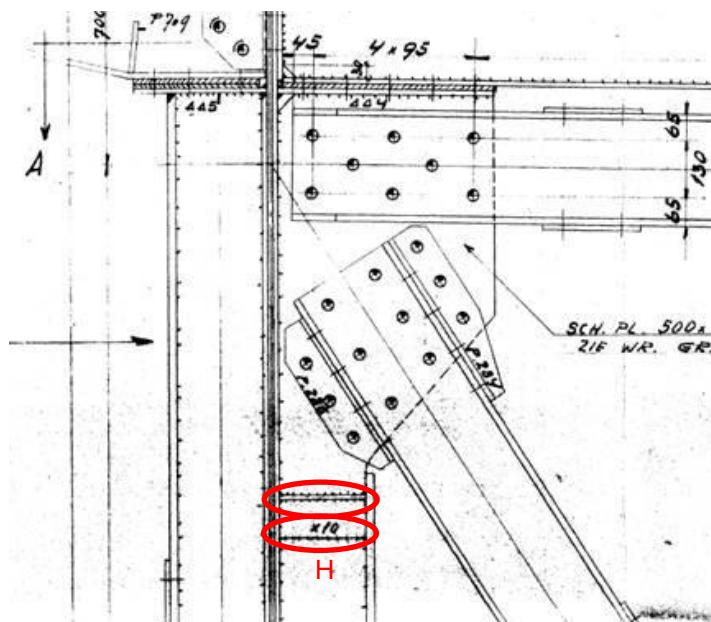
De schuifspanningen zijn in beide gevallen zeer laag en zullen niet in additionele schade resulteren.



Geconcludeerd wordt dat er ter plaatse van locatie G3 een kleine overschrijding gevonden wordt op basis van de berekende spanningen. De metingen bij locaties G3 bij dwarsdrager DD-zK, DD-K30 en DD-STPA gaven echter allemaal aan dat de werkelijke spanningswisseling aanzienlijk lager is, ca. 2 a 3 N/mm². Aangenomen kan worden dat dit hier ook het geval zal zijn. Gezien de beperkte overschrijding en het feit dat bij andere, vergelijkbare locaties aanzienlijk lagere spanningen zijn gemeten als berekend, kan worden aangenomen dat detail G3 voldoet.

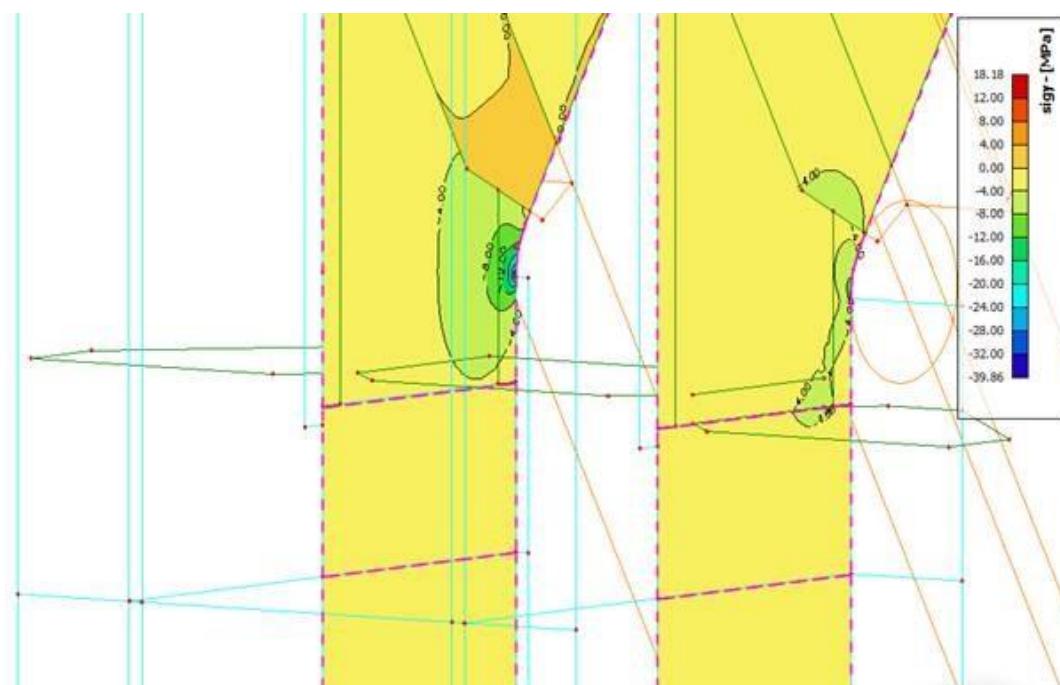
5.25.9 Detail H – Aansluiting onderzijde knieschot – lijf dwarsverstijvers

De knieschotten zijn aan het lijf van de dwarsdrager gelast met een X-las van 10 mm. Daarnaast is er iets hoger ook een schot aan het knieschot gelast.



Figuur 307 – Detail DD-STPC locatie H

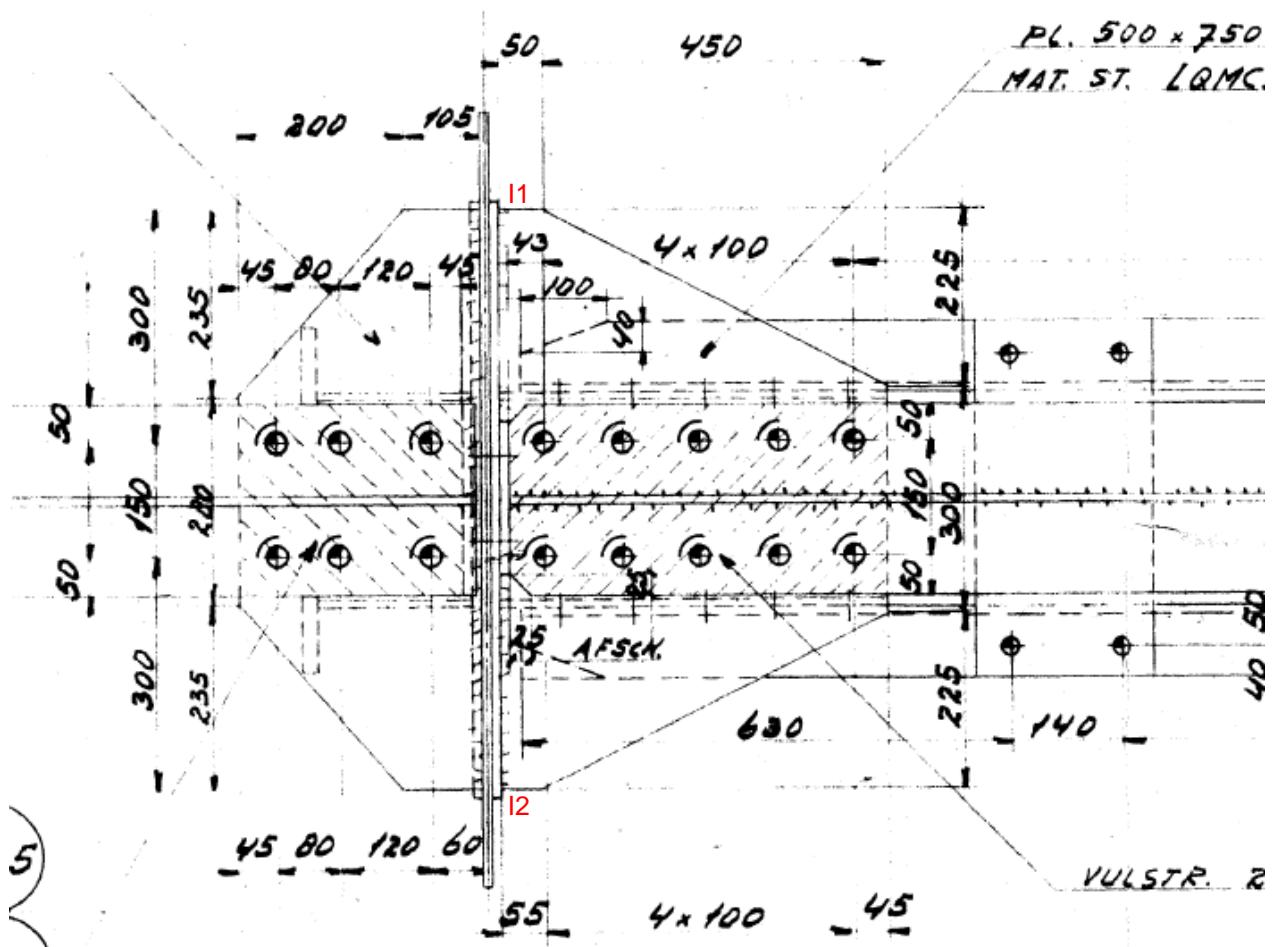
Deze plaat moet voor deze locaties getoetst worden op vermoeiing op basis van de spanningen in de verticale richting. Uit de berekening volgt dat de spanningen op deze locaties zeer klein zijn en er ook geen grote spanningsconcentraties aanwezig zijn. Voor deze details zijn daarom geen verdere vermoeiingsberekeningen uitgevoerd. Aangenomen kan worden dat deze details voldoen.



Figuur 308 – Spanningen ter plaatse van aansluiting knieschot – lijf dwarsverstijver, DD-STPC, Detail H

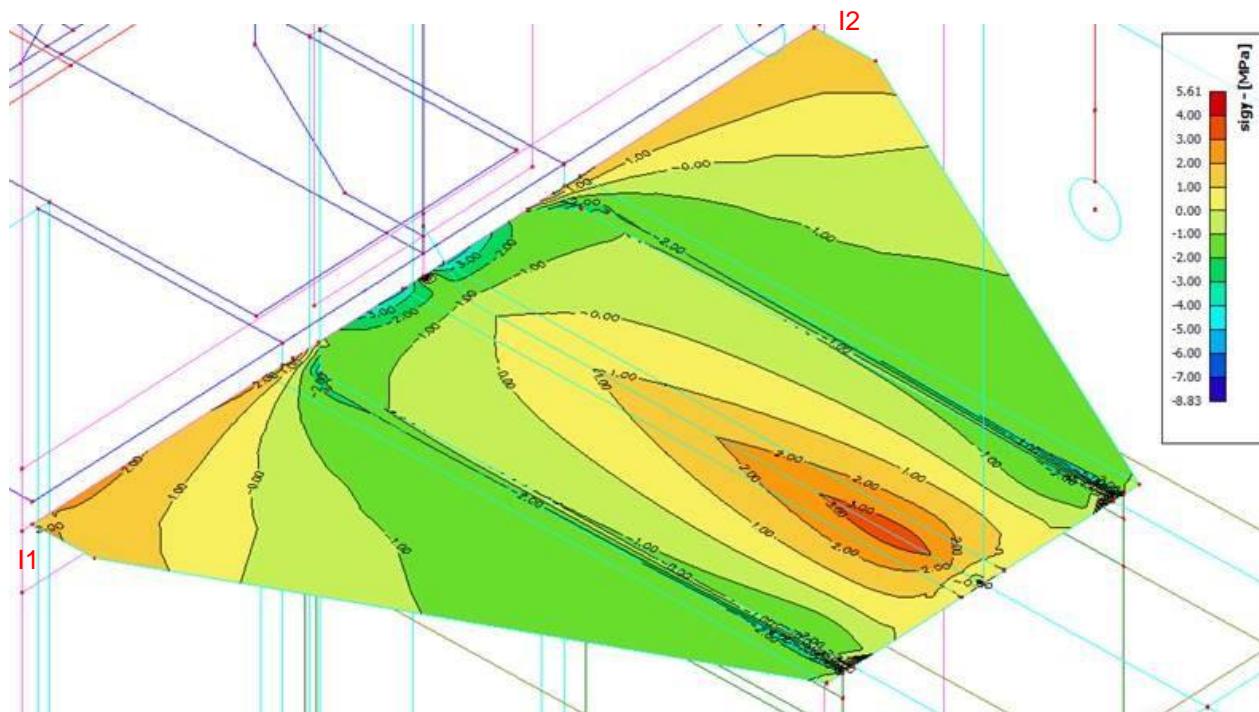
5.25.10 Detail I – Aansluiting onderflens dwarsdrager – kopschot

Locatie I betreft de aansluiting van de onderflens van de dwarsdrager met het kopschot. Bij portaal C is, afwijkend van de overige portalen, een verbredingsplaat onder de onderflens aangebracht, waardoor de spanningen over een aanzienlijk bredere plaat overgebracht worden naar de hoofdlijger, via het kopschot.



Figuur 309 – Detail DD-STPC locatie I

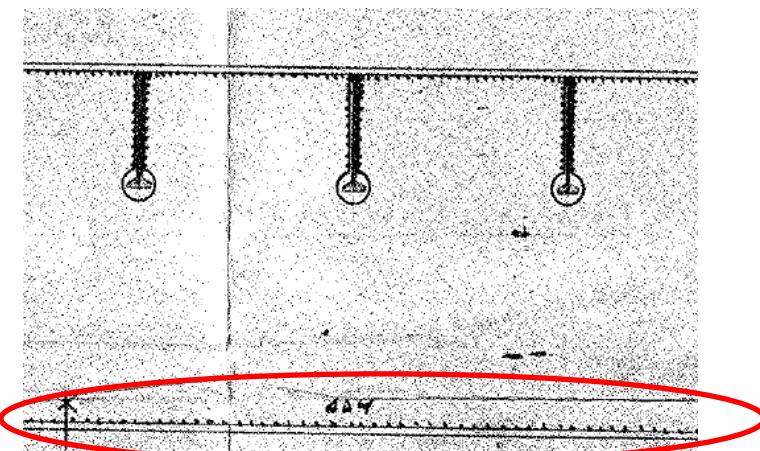
Gezien de hoogte van de spanningen kan zonder berekening worden aangenomen dat deze voldoet op vermoeiing. Hieraan is dan ook niet verder gerekend.



Figuur 310 – Spanningen ter plaatse van aansluiting horizontale plaat onder onderflens – kopschot op lijf hoofdlijker, DD-STPC, Detail I

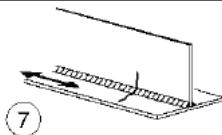
5.26 Type DD-Of: Langslas onderflens-lijf dwarsdrager

In de dwarsdrager is een langslas aanwezig tussen het lijf en de flensen. De lasverbinding tussen het lijf en de onderflens is in deze paragraaf getoetst. Voor de verbinding in de bovenflens geldt dat deze onderdeel is van de dekconstructie en dat deze direct bereeden wordt door een wielprint. Toetsing van de dekconstructie valt buiten de scope van de opdracht en is daarom niet verder getoetst.



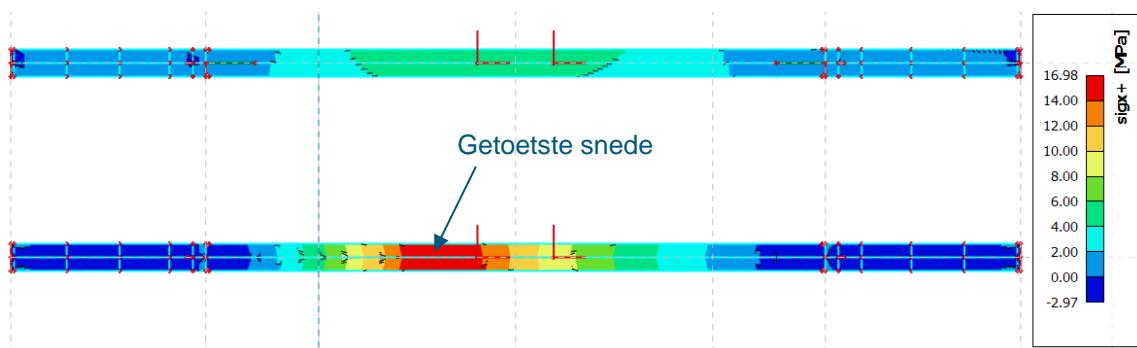
Figuur 311 – Detail lasverbinding lijf en flens dwarsdrager [Bron: A.85378]

De detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van deze verbinding is aangehouden als $\Delta\sigma_c = 100 \text{ N/mm}^2$ conform NEN-EN 1993-1-9 Tabel 8.2 Detail 7.

100		7) Herstelde automatisch of volledig gemechaniseerd of handmatig uitgevoerde hoeklassen of stompe lassen voor categorieën 1) tot 6).	7) Verbetering door slijpen door een specialist om alle visuele sporen te verwijderen en een degelijke controle kan leiden tot terugkeer naar de oorspronkelijke categorie.
-----	---	--	---

Figuur 312 – Detailcategorie voor de vermoeiingsberekening van de verbinding type DD-Of (hoofdbrug).

De spanningswisseling ter plaatse van de aansluiting lijf-onderflens is bepaald met behulp van het lokale model. Hiervoor is uitgegaan van de snede met de maximale spanning t.g.v. een aslast op rijstrook 1, wanneer de as precies boven de dwarsdrager staat. De dwarsdrager op as 13 gaf hierbij de grootste spanning, hoewel de verschillen klein zijn. Deze dwarsdrager is gebruikt voor de bepaling van de vermoeiingschade.



Figuur 313 – Locatie van de bepaling van de spanning voor de toetsing van vermoeiing van de dwarsdrager (type DD-Of) (hoofdbrug)

De berekening is voor 3 verschillende veiligheidsfactoren $\gamma_{MF} = 1.35, 1.15$ en 1.00 uitgevoerd. Hierbij is uitgegaan van de spanning aan de bovenzijde van de onderflens, bij de aansluiting op het lijf. Omdat de positie van rijstrook 1 voor de hoofdrijbaan is gewisseld, is de schade zowel net aan de westelijke zijde van het midden als net aan de oostelijke zijde bepaald. Overeenkomstig met de vorige berekeningen wordt dit aangeduid als hoofdrijbaan-west (HRB west), hoofdrijbaan-oost (HRB oost), parallelrijbaan-west (PRB west) en parallelrijbaan-oost (PRB oost).

Tabel 163 geeft de resultaten weer voor $\gamma_{MF} = 1.35$. De toetsresultaten met de andere veiligheidsfactoren zijn in Bijlage E17 weergegeven.

$\gamma_{MF} = 1,35$	HRB west		HRB oost		PRB west		PRB oost	
	2018	2050	2018	2050	2018	2050	2018	2050
DD-Of	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0

Tabel 163 – Schadegetallen van verbinding type DD-Of voor eind 2018 en eind 2050 ($\gamma_{MF} = 1.35$)

De lasverbinding voldoet aan de schade-eis. Gezien de marge tussen de schadegetallen en de schade-eis is het niet nodig om eventuele kleine variaties in de momenten tussen de verschillende dwarsdragers verder te onderzoeken. Geconcludeerd kan worden dat de verbinding voor alle dwarsdragers voldoet.

De nominale gemeten spanning komt in de dd komt goed overeen met de meting. De hot-spot spanning vertoont echter op enkele locaties zeer grote verschillen (positief en negatief). Hebben we hiervoor een verklaring? (achtergrond: de krachten moeten toch overgedragen worden).

Zijn de (K-) verbanden en portalen zelf ook getoetst op vermoeiing?

6 Vervormingen

6.1 Voegvervormingen

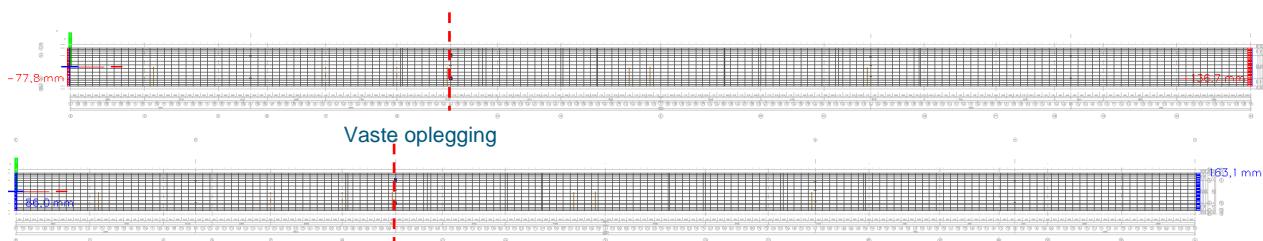
De voegbewegingen zijn bepaald op basis van de eisen aan voegovergangen conform ROK v1.4 Bijlage A. De voegbewegingen zijn bepaald op basis van de karakteristieke belastingcombinaties, zoals in Tabel 164 weergegeven.

	Karakteristieke belastingcombinaties voegovergangen							
	1a/c	1b/d	1e/f	2a/c	2b/c	2e/f	3a/c	3b/d
TS (LM1)	0,8	0,64	0	0,8	0,64	0	1	0,8
UDL (LM1)	0,8	0,64	0	0,8	0,64	0	1	0,8
Enkele as (LM2)	0,8	0,64	0	0,8	0,64	0	1	0,8
Horizontale belasting	0,64	0,8	0	0,64	0,8	0	0,8	1
Wind ^b F _{wk}	0	0	0,8 ^b	0	0	1 ^b	0	0
F _w *	0,8	0,8	0	1	1	0	0,8	0,8
Temperatuur ^a	1	1	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

^a Het hogere temperatuurbereik voor voegovergangen is in rekening gebracht door de belastingfactor te vermenigvuldigen met 45°C/35°C = 1,29.
^b Waar verkeersbelasting op (delen van) de brug aanwezig is, mag zijn gerekend met F_w* in plaats van F_{wk}. Voor de combinaties met $\psi_0 * F_{wk}$ wordt uitgegaan van de windbelasting F_w* met een belastingfactor $1,0 * \psi_0 * F_{wk} / F_{w*} = 1,0 * 0,8 * 1,056 = 0,85$ en $1,0 * 1,0 * 1,056 = 1,06$.

Tabel 164 – Belastingcombinaties voor de vervormingen van voegovergangen [ROK 1.4]

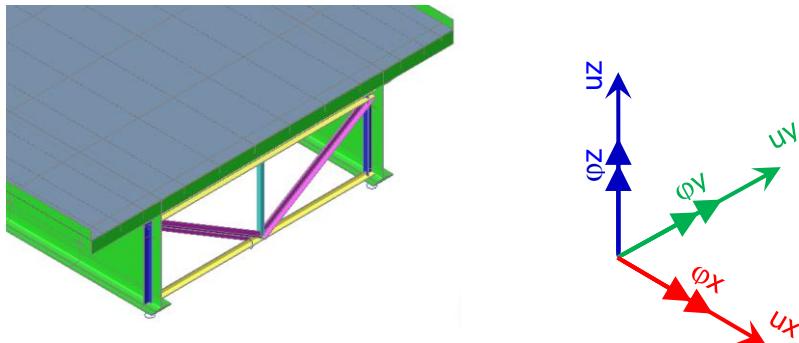
Figuur 314 toont de minimum en maximum voegovergang beweging in x-richting (lengterichting van de brug). De overige maximale voegbewegingen en -rotaties zijn weergegeven in Tabel 165. Voor een volledig overzicht van de voegvervormingen wordt verwezen naar Bijlage F1.



Figuur 314 – Minimum en maximum vervorming van de voegovergang in de x-richting.

	U _x [mm]	U _y [mm]	U _z [mm]	φ _x [mrad]	φ _y [mrad]	φ _z [mrad]
Minimum (Pijler F)	-78,8	-4,5	-10,7	-4,3	--4,3	-1,1
Maximum (Pijler F)	87,8	4,1	6,3	4,4	13,2	2,3
Minimum (landhoofd zuid))	-137,8	-4,5	-1,9	-0,8	-9,0	-1,6
Maximum (landhoofd zuid)	165,0	4,1	2,1	0,9	3,5	0,7

Tabel 165 – Totale vervormingen aan het begin en einde van de hoofdbrug (SLS)



Figuur 315 – Assenstelsel model

De gevonden verplaatsingen verschillen per zijde, doordat de vaste oplegging niet in het midden ligt. Opgemerkt wordt dat de tandemstelsels alleen op het linkerdeel van de brug zijn geplaatst in het model. Rotaties t.p.v. pijler F dienen dan ook toegepast te worden voor de voegovergang ter plaatse van landhoofd zuid.

Ter plaatse van Pijler F en het zuidelijk landhoofd zijn MAURER D-180 voegovergangen toegepast met een voegbereik van 180 mm (+90 mm / -90 mm), zie tekening [A.105058]. De berekende voegbeweging van de voegovergang van het zuidelijk landhoofd is -138 mm / +165 mm, waarmee het beschikbare voegbereik onvoldoende is. Ter plaatse van Pijler F is de voegbeweging van de hoofdbrug -79 mm / +88 mm, de voegbeweging van de aanbrug is -71 mm / +51 mm (zie berekening aanbruggen), waarmee de totale voegbeweging -150 mm / +139 mm is. Ook dit is meer dan het beschikbare voegbereik (+90 mm / -90 mm).

De voegvervormingen zijn verder opgesplitst per type belasting in onderstaande tabel. Zoals te verwachten is de grootste bijdrage aan de vervorming de temperatuursbelasting. De vervormingen t.g.v. temperatuur zijn weergegeven voor +45°C/-46°C, wat dus overeenkomt met het temperatuurbereik conform RTD 1007-2. Dit ligt +/-10°C hoger als het temperatuurbereik conform de Eurocode.

		U_x [mm]	U_y [mm]	U_z [mm]	φ_x [mrad]	φ_y [mrad]	φ_z [mrad]
Windbelasting	Minimum (Pijler F)	-4,9	-0,8	-0,5	-0,3	-1,2	-0,4
	Maximum (Pijler F)	4,9	0,8	0,6	0,3	1,2	0,4
	Minimum (landhoofd zuid))	-6,3	-0,9	-0,7	-0,3	-1,3	-0,5
	Maximum (landhoofd zuid)	6,3	0,9	0,7	0,3	1,3	0,5
Temperatuur belasting	Minimum (Pijler F)	-61,7	-3,3	-1,3	-0,5	-1,5	-0,2
	Maximum (Pijler F)	56,3	3,3	1,2	0,5	0,5	0,2
	Minimum (landhoofd zuid))	-117,8	-3,3	-1,3	-0,5	-0,5	-0,2
	Maximum (landhoofd zuid)	129,4	3,3	1,2	0,5	1,5	0,2
Verkeer belasting- Verticaal	Minimum (Pijler F)	-7,8	-0,5	-4,9	-2,1	-1,1	-0,4
	Maximum (Pijler F)	17,6	0,3	2,5	2,0	5,6	0,8
	Minimum (landhoofd zuid))	-8,8	-0,3	-0,1	-0,1	-3,6	-0,5
	Maximum (landhoofd zuid)	19,5	0,1	0,5	0,2	0,7	0,1
Verkeer belasting- Horizontaal	Minimum (Pijler F)	-1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Maximum (Pijler F)	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Minimum (landhoofd zuid))	-2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Maximum (landhoofd zuid)	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 166 – Vervorming voegovergang per belastingtype

6.2 Vervormingen opleggingen

Voor de vervormingen ter plaatse van de oplegpunten van pijler F, G, H, J, K en landhoofd zuid is gebruik gemaakt van dezelfde aanpak als voor de voegvervormingen; zie Hoofdstuk 6.1. In onderstaande tabellen zijn de belangrijkste resultaten per oplegging gepresenteerd. Voor een totaal overzicht en de uitsplitsing per belastinggroep wordt verwezen naar Bijlage F2. Opgemerkt wordt dat gebruik is gemaakt van de combinaties voor de voegvervormingen, dus inclusief toeslag op de temperatuurbelasting.

	U_x [mm]	U_y [mm]	U_z [mm]	φ_x [mrad]	φ_y [mrad]	φ_z [mrad]
Pijler F min.	-75.6	0	0	0	-3.7	-1.5
Pijler F max.	78.5	0	0	0	10.6	0.5
Pijler G min.	-54.6	0	0	0	-8.7	-0.6
Pijler G max.	68	0	0	0	5.8	0.9
Pijler H min.	0	0	0	-4.0	-4.4	-0.1
Pijler H max.	0	0	0	4.1	8.3	0.1
Pijler J min.	-89.4	-0.9	0	-1.3	-9.5	-1.4
Pijler J max.	130.3	0.9	0	1.4	3.5	3.2
Pijler K min.	-110.6	0	0	0	-3.9	-1.0
Pijler K max.	132.7	0	0	0	7.7	0.6
landhoofd zuid min.	-136.9	0	0	0	-7.3	-0.6
landhoofd zuid max.	171.0	0	0	0	3.0	1.3

Tabel 167 – Maximale knoopverplaatsingen opleggingen (SLS)

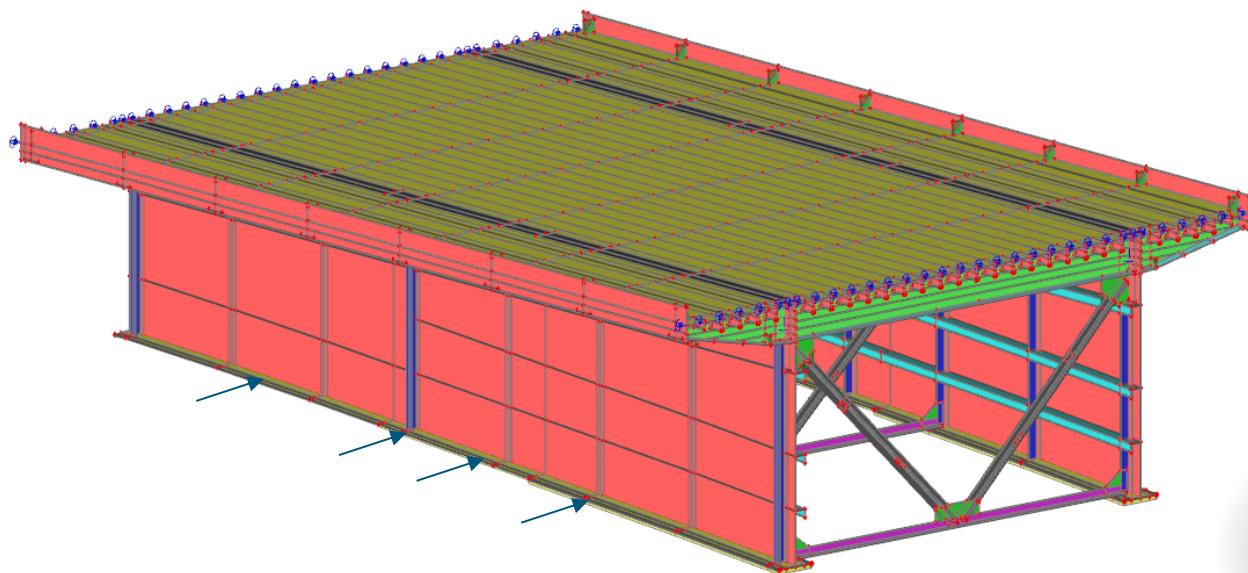
7 Aanvaring op de constructie

Ter plaatse van de rivieroverspanning kan de brug aangevaren worden. In de sterkteberekeningen in hoofdstuk 5 en 6 is geen rekening gehouden met de aanvaarbelasting. Vanwege het rechtsens verkregen niveau is het niet verplicht om een bestaande constructie te laten voldoen aan een bijzondere belasting(combinatie) als deze niet gold ten tijde van het verlenen van de oorspronkelijke bouwvergunning. Toch is door Rijkswaterstaat gevraagd om te kijken in hoeverre de brug in staat is om een aanvaarbelasting op te kunnen nemen conform de huidige normen.

7.1 Aanpak

Voor de berekening wordt aangenomen dat de aanvaarbelasting aangrijpt op de onderrand van de hoofdligger. Via de onderflens zal de belasting worden afgedragen naar de K-verbanden en vervolgens naar het dek. Omdat er in het globale model met excentrische liggers onder het dek geen koppeling is van de onderflens met de K-verbanden is gekozen om de analyse uit te voeren op het lokale plaatmodel. Hoewel dit gemodelleerde deel in werkelijkheid niet in de rivieroverspanning ligt, geeft een aanvaarbelasting op dit model wel een redelijk beeld van de belastingafdracht via de onderflens naar de K-verbanden en de spanningen die daarbij ontstaan.

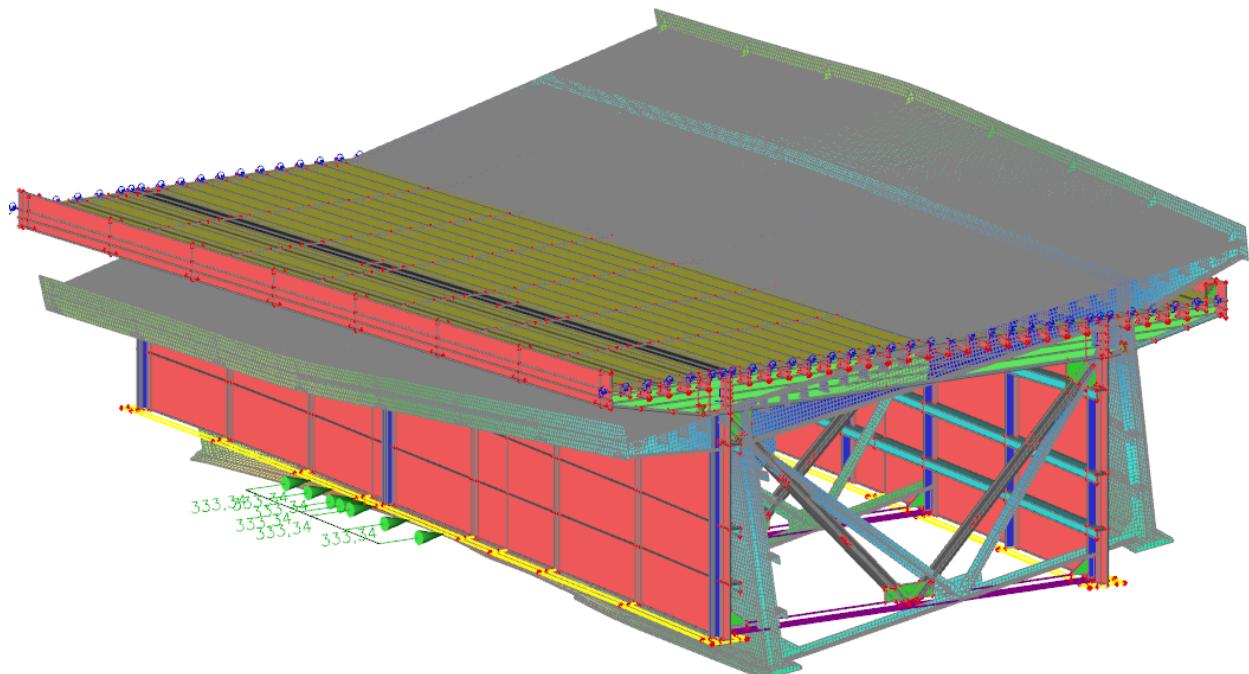
De aanvaarbelasting, 1MN, wordt als een lijnlast verdeeld over 3 m op de onderflens van de hoofdligger. Om alle mogelijke scenario's in beeld te brengen, wordt de aanvaarbelasting op 4 verschillende locaties toegepast, zowel ter plaatse van de k-verbanden als precies ertussenin (zie Figuur 316).



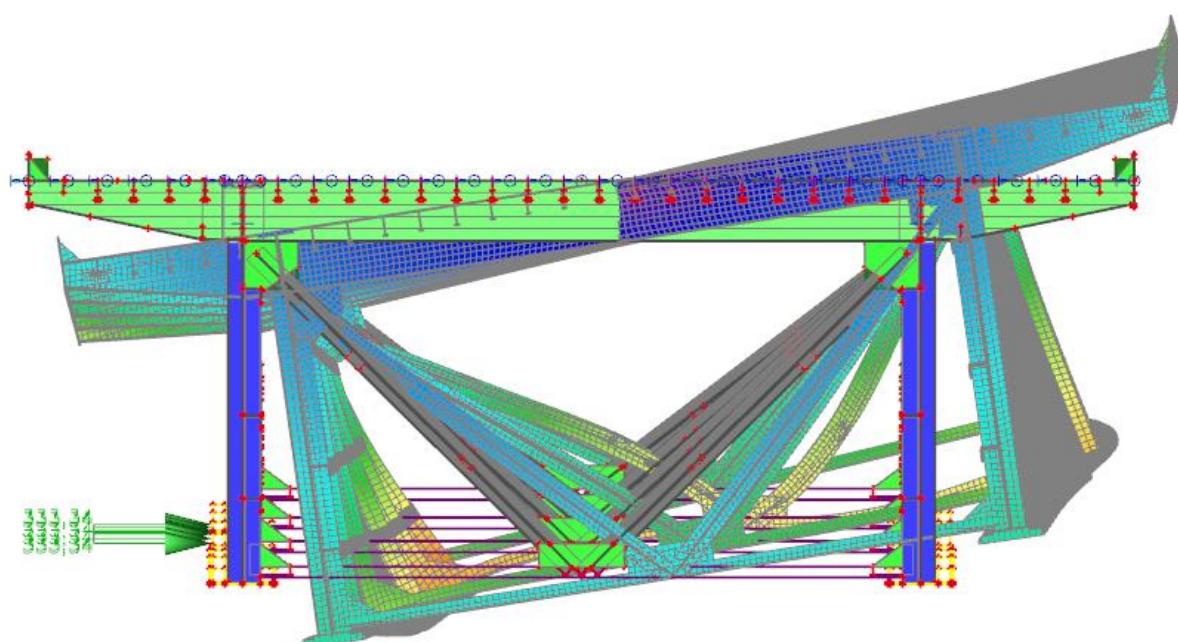
Figuur 316 – De locaties van de aanvaarbelasting (nb. belasting is ingevoerd als lijnlast over 3 m)

7.2 Vervormingen

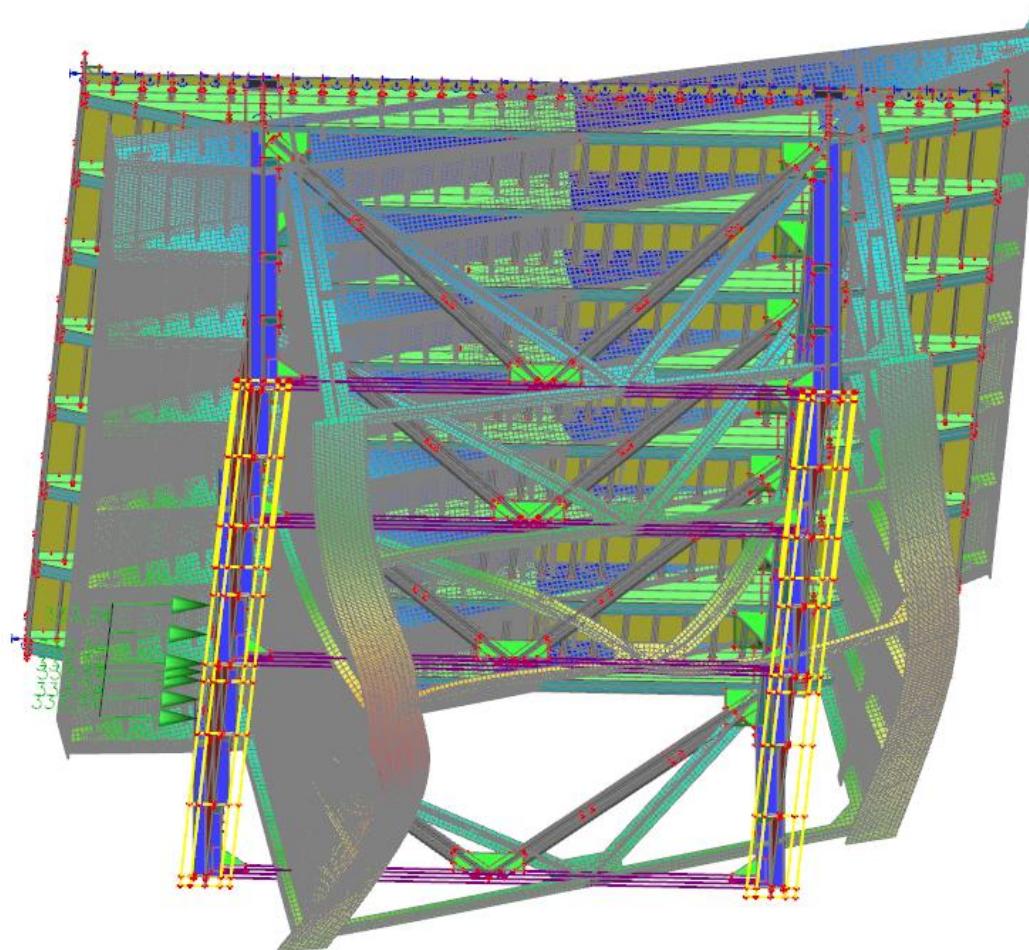
Op basis van de vervorming van de constructie is gecontroleerd of het model zich gedraagt zoals te verwachten is bij een aanvaring. In Figuur 317 en Figuur 318 is te zien dat door de aanvaarbelasting de onderflens in dwarsrichting doorbuigt en de brug als geheel laat roteren. Dit komt overeen met de verwachting.



Figuur 317 – 3D vervorming van de constructie door de aanvaarbelasting



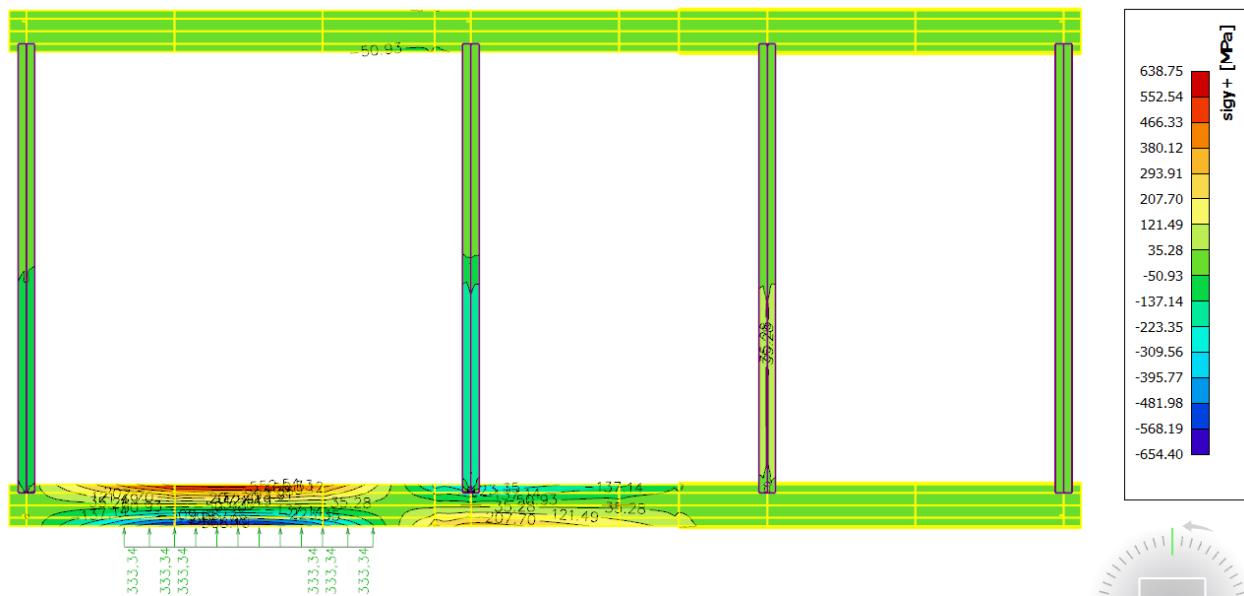
Figuur 318 – 3D vervorming van de constructie door de aanvaarbelasting (doorsnede)



Figuur 319 – 3D vervorming van de constructie door de aanvaarbelasting (onderflens van hoofdligger)

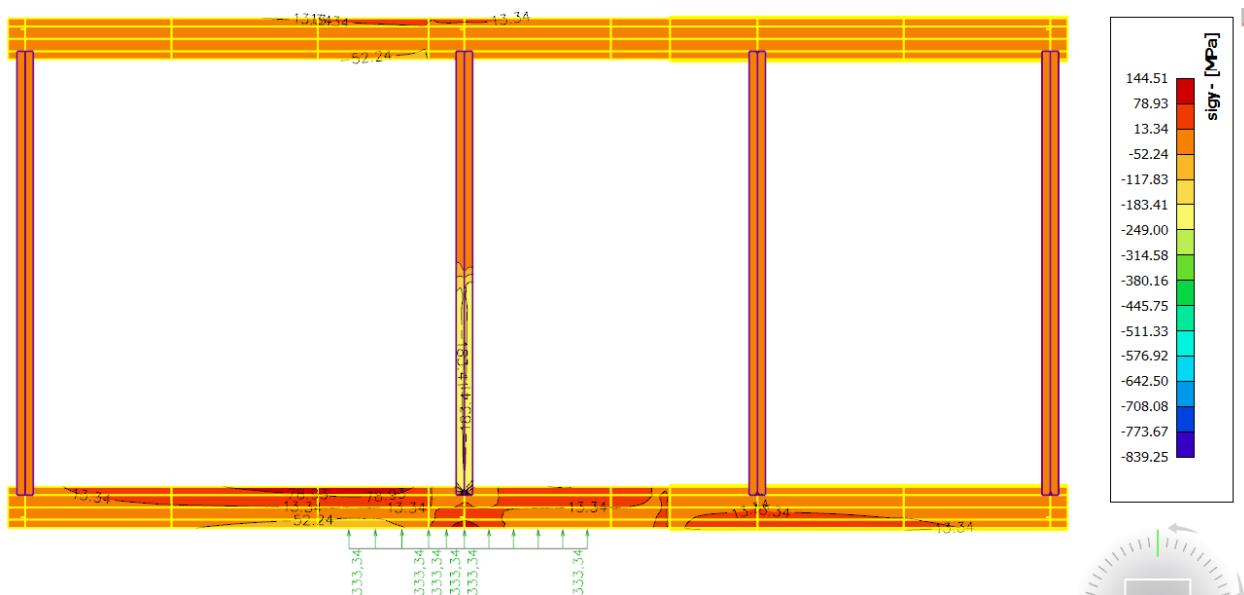
7.3 Spanningen

De grootste spanningen zullen ontstaan in de onderdelen die direct belast worden, zoals de onderflens en de diagonalen en onderrand van de K-verbanden. Figuur 320 toont de maximale spanning in de onderflens van de hoofdligger en de onderranden van K verbanden t.g.v. de aanvaarbelasting (NB. Dit is dus nog zonder de overige belastingen). In de onderflens treedt bij een aanvaring tussen de K-verbanden een buigspanning van ca 650 N/mm² op, ver boven de toelaatbare spanning van 350 N/mm². Dit betekent dat er grote plastische vervormingen zullen ontstaan van de onderflens.



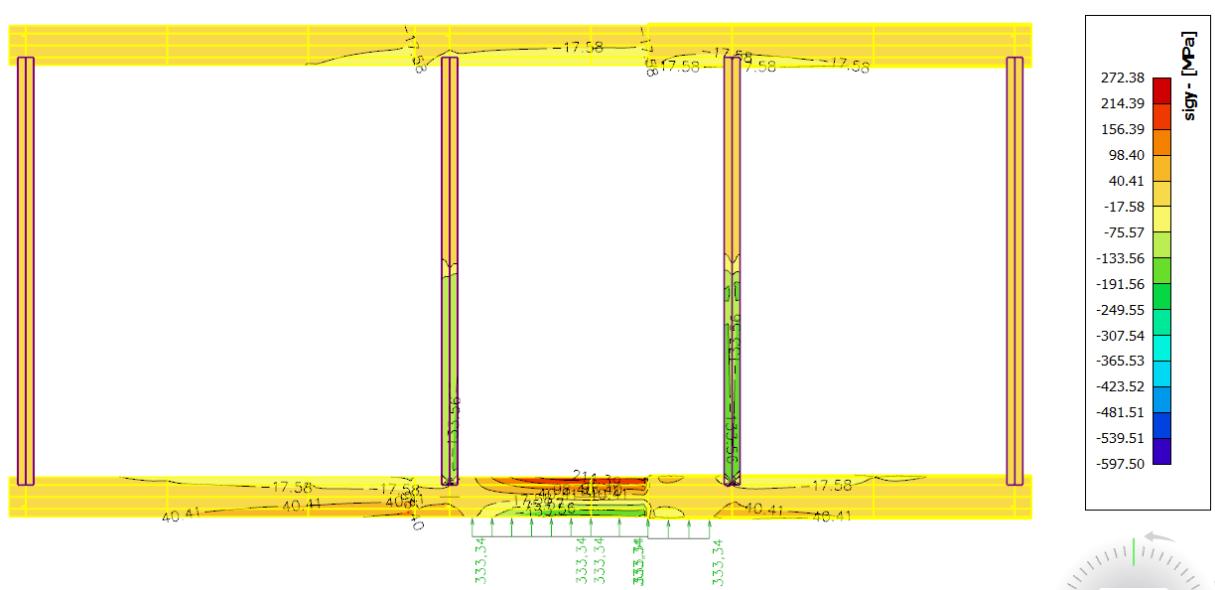
Figuur 320 – Spanning in de onderflens van de hoofdligger en K-verbanden door een aanvaarbelasting in het eerste veld

Bij een aanvaring op de onderflens in het verlengde van het K-verband treedt lokaal een drukspanning van 839 MPa op (zie Figuur 321). De maximale drukspanning ontstaat bij de verbinding van de onderrand met de onderflens van de hoofdligger. De verbinding zal hier dan ook bezwijken

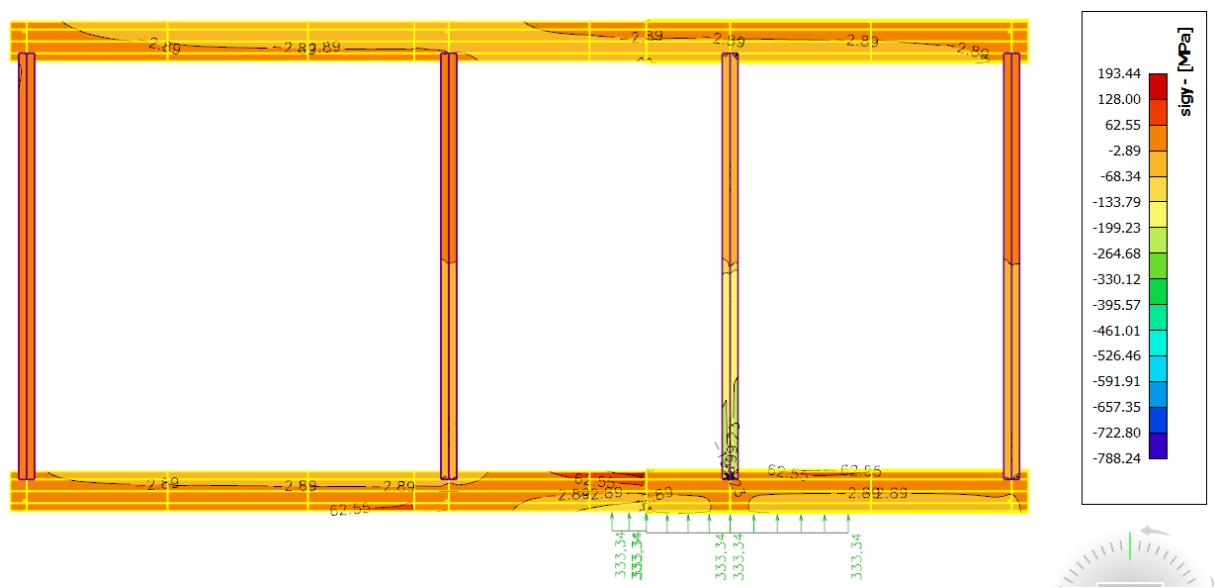


Figuur 321 – Spanning in de onderflens van de hoofdligger en K-verbanden door een aanvaarbelasting op het tweede K-verband

Voor de overige twee locaties gelden vergelijkbare hoge spanningen, die, zeker in combinatie met de overige veranderlijke belastingen, zullen resulteren in het vloeien van de onderflens en de onderrand van het K-verband.



Figuur 322 – Spanning in de onderflens van de hoofdligger en K-verbanden door een aanvaarbelasting in het tweede veld



Figuur 323 – Spanning in de onderflens van de hoofdligger en K-verbanden door een aanvaarbelasting op het derde K-verband

7.4 Conclusie

Zoals eerder benoemd hoeft een bestaande constructie vanwege het rechtens verkregen niveau niet te voldoen aan de huidige eisen ten aanzien van aanvaarbelastingen. Het versterken van de brug om te voldoen aan de huidige eisen zal zeer kostbaar zijn en lijkt niet op te wegen tegen het risico wat hiermee weggenomen wordt.

Bovendien is de doorvaarthoogte van de nabij gelegen bruggen in de aanzienlijk lager als de IJsselbrug. Zo is volgens Rijkswaterstaat de onderdoorvaarthoogte (ODVH) van de IJsselbrug bij maatgevend hoog water (MHW) 8,22 m. De verkeersbrug Doesburg heeft een ODVH van 6,27 m bij MHW, de spoorbrug in Westervoort heeft een ODVH van 6,41 m bij MHW. Hiermee is de kans op aanvaring zeer klein.

8 Conclusies

In deze rapportage zijn de resultaten gegeven van de constructieve herberekening van hoofdbruggen van de IJsselbrug. Hierbij zijn de bruggen getoetst op constructieve sterkte en stabiliteit van de hoofddraagconstructie en de verbindingen, alsmede vermoeiing van de hoofddraagconstructie.

8.1 Sterkte en stabiliteit

Op sterkte blijken de langsverstijvers niet te voldoen in het gebied tussen de rivierpijler en de eerst volgende sectiedeling in de rivieroverspanning. Aanbevolen wordt om deze te vervangen, ofwel de spanning te verlagen door het versterken van de onderflens van de hoofdligger.

De verticalen van portaal B voldoen niet op sterkte. Met behulp van een plaatmodel is aangetoond dat alleen de snede ter plaatse van de onderzijde van het schot tussen de dwarsdrager en de dwarsverstijver niet voldoet op sterkte.

De overige onderdelen voldoen op sterkte en stabiliteit.

8.2 Verbindingen

De verbinding van de onderrand van portaal C ter plaatse van de rivierpijlers voldoen niet op sterkte. De klinknagelverbinding voldoet niet bij zowel de vaste opleggingen als de rolopleggingen, de netto doorsnede van de verbindingssplaats voldoet alleen bij de vaste opleggingen niet. Aanbevolen wordt deze verbinding te versterken door het vervangen van de klinknagels voor een boutverbinding en de flenzen te verbinden met de verbindingssplaats. Daarnaast voldoen een aantal verbindingen van de langsverstijvers ter plaatse van de sectiedelingen en portaal C niet. Bovendien zijn bij deze verbindingen kraakgeluiden geconstateerd. In overleg met Rijkswaterstaat is besloten dat alle koppelstukken van de langsverstijvers ter plaatse van de sectiedelingen en de onderste koppelstukken ter plaatse van portaal C vervangen moeten worden.

De verbindingen van de consoles van de inspectiepaden vertonen aanzienlijke corrosie. Hiervoor wordt verwezen naar de inspectierapportage. Aanbevolen wordt de mate van corrosie te (laten) bepalen en te kijken in hoeverre deze nog behouden kunnen blijven.

8.3 Vermoeiing

De meeste vermoeiingsdetails van de hoofdliggers en de dwarsdragers voldoen niet aan de eis $D < 1,0$ bij $\gamma_{MF} = 1,35$. Ook op dit moment (eind 2018) voldoen een groot aantal verbindingen niet aan de gestelde eis. Aanbevolen wordt om het huidige inspectieregime, dat is ingevoerd naar aanleiding van de resultaten van eerdere (voorlopige) analyses van de vermoeiingsproblematiek door TNO, te updaten op basis van de nieuwe resultaten en het inspectieregime te handhaven totdat de herstelmaatregelen zijn uitgevoerd.

De schades op vermoeiing zijn dusdanig hoog dat er naast "eenvoudige" herstelmaatregelen als burr-grinding of het uitboren van klinknagelgaten ook spanningsverlaging nodig zal zijn. Deze spanningsverlaging zal nodig zijn over grote lengtes. De herstelmaatregelen zullen worden uitgewerkt in een separate rapportage.

aanbevolen wordt om het inspectieregime te updaten. In hoeverre is deze aanbeveling doorgevoerd door RWS? (Niet aangegeven of inspectie ook na herstel nog noodzakelijk is)

8.4 Vervormingen

De optredende voegvervormingen zijn volgens de berekening groter dan het voegbereik van de huidige voegen. In de praktijk lijkt er echter geen schade te zijn aan de voegovergangen die gerelateerd is aan excessieve vervormingen of aanliggende voegen. Wel zijn er aanzienlijke corrosie van de voegovergangen, vuil in de voegovergangen en gescheurde rubbers geconstateerd tijdens de inspectie. Aanbevolen wordt om bij het vervangen van de voegovergangen rekening te houden met de in deze rapportage berekende voegvervormingen en niet met de voegcapaciteit van de huidige voegovergangen.

8.5 Aanvaring

Naast de sterkte- en vermoeiingsberekeningen is ook gekeken naar de gevolgen van een eventuele aanvaring tegen de brug. Uit de analyse blijkt dat bij een aanvaring de spanning ruim over de toelaatbare sterkte heen gaan. Vanwege het rechtens verkregen niveau hoeft een bestaande brug niet te voldoen aan de huidige eisen ten aanzien van aanvaarbelastingen. Het versterken van de brug om te voldoen aan de huidige eisen zal zeer kostbaar zijn en lijkt niet op te wegen tegen het risico wat hiermee weggenomen wordt. Bovendien is de doorvaarthoogte van de nabij gelegen bruggen in de IJssel (Spoorbrug in Westervoort en de verkeersbrug Doesburg) aanzienlijk lager als de IJsselbrug, waarmee de kans op aanvaring zeer klein is.



Bijlage A

Belastingen

IJsselbrug



Bijlage A1

Blijvende belastingen

IJsselbrug



Bijlage A2

Verkeersbelastingen

IJsselbrug



Bijlage A3

Windbelasting

IJsselbrug



Bijlage A4

Temperatuurbelasting

IJsselbrug



Bijlage A5

Overige belastingen

IJsselbrug



Bijlage B

Modellering

IJsselbrug



Bijlage B1

Belastinginvoer SCIA Engineer – globale model

IJsselbrug



Bijlage B2

Belastinginvoer SCIA Engineer – lokale model

IJsselbrug

Bijlage B3

Validatie belastinginvoer – globale model

IJsselbrug

Bijlage B4

Validatie belastinginvoer – lokale model

IJsselbrug



Bijlage C

Toetsing sterkte en stabiliteit

IJsselbrug



Bijlage C1

Toetsing hoofdlijger

IJsselbrug



Bijlage C2

Toetsing dwarsdragers

IJsselbrug



Bijlage C3

Toetsing K-verbanden en portalen

IJsselbrug



Bijlage C4

Toetsing rijdek

IJsselbrug



Bijlage C5

Toetsing inspectiepad

IJsselbrug



Bijlage D

Toetsing verbindingen

IJsselbrug



Bijlage D1

Detail type A – Las einde opdikplaat

IJsselbrug



Bijlage D2

Detail type B en C – Geklonken verbindingen brugsecties

IJsselbrug



Bijlage D3

Detail type K – Klinkverbinding flenspakket

IJsselbrug

Bijlage D4

**Detail Type DD-zK – Verbinding
tussen hoofdlijger en
console/dwarsdrager**

IJsselbrug



Bijlage D5

Detail type P – Verbindingen diagonalen

IJsselbrug



Bijlage D6

**Detail type Q – Verbindingen
horizontalen onder- en bovenrand K-
verbanden**

IJsselbrug

Bijlage D7

Bijlage H3 Detail type R – Verbindingen dekconstructie

Detail type S – Verbinding langsverstijvers bij sectiedeling

IJsselbrug



Bijlage E

Toetsing vermoeiing

IJsselbrug



Bijlage E1

Detail type A – Las einde opdikplaat

IJsselbrug

Bijlage E2

Detail type B – Flensverbreders ter hoogte van klinklas bij sectiedeling

IJsselbrug



Bijlage E3

Detail type C – Geklonken verbindingen brugsecties

IJsselbrug



Bijlage E4

**Detail type D – Verticale
plooiverstijvers binnenzijde - las met
onderflens**

IJsselbrug

Bijlage E5

**Detail type E – Verticale
plooiverstijvers binnenzijde - las met
lijf hoofdlijger**

IJsselbrug



Bijlage E6

**Detail type F – Verticale
plooiverstijver buitenzijde - las met
onderflens**

IJsselbrug

Bijlage E7

Detail type G – X-naad in onderflens hoofdlijger

IJsselbrug



Bijlage E8

Detail type H – Flensverbreder ter hoogte van opleggingen

IJsselbrug



Bijlage E9

Detail type I – Verticale plooiverstijver buitenzijde - las met lijf dwarsdrager

IJsselbrug



Bijlage E10

Detail type J – Langslas lijf

IJsselbrug



Bijlage E11

Detail type K – Klinkverbinding flenspakket

IJsselbrug



Bijlage E12

Detail Type DD-K30 – Verbindingen tussen hoofligger en dwarsdrager

IJsselbrug



Bijlage E13

**Detail Type DD-K24 – Verbindingen
tussen hoofligger en dwarsdrager met
K-verband ½ INP30**

IJsselbrug

Bijlage E14

Detail type N – Langslas tussen opdikplaat en onderflens

IJsselbrug



Bijlage E15

Detail type O – X-las ½ DIN profielen

IJsselbrug

Bijlage E16

Detail type P – X-las in lijfplaat hoofdlijgger

IJsselbrug

Bijlage E17

Detail type DD-Of – Langslas lijf-onderflens dwarsdrager

IJsselbrug

Bijlage E18

**Detail type S – Koppeling
langsverstijvers ter plaatse van
portaal C**

IJsselbrug



Bijlage E19

Detail type T – Lasverbinding vijzelpunten

IJsselbrug



Bijlage E20

Detail Type DD-zK – Verbindingen tussen hoofligger en tussendwarsdragers

IJsselbrug



Bijlage E21

Detail Type DD-STPA – Verbindingen tussen hoofligger en dwarsdrager portaal A

IJsselbrug



Bijlage E22

**Detail Type DD-STPB – Verbindingen
tussen hoofligger en dwarsdrager
portaal B**

IJsselbrug

Bijlage E23

Detail Type DD-STPC – Verbindingen tussen hoofligger en dwarsdrager portaal C

IJsselbrug



Bijlage F

Vervormingen

IJsselbrug



Bijlage F1

Voegvervorming SCIA uitvoer

IJsselbrug



Bijlage F2

Vervorming t.p.v. opleggingen SCIA uitvoer

IJsselbrug

Bijlage G

Vergelijking rekmetingen – FEM dwarsdragers hoofdbrug

IJsselbrug



Bijlage G1

Vergelijking rekmetingen – FEM dwarsdragers hoofdbrug

IJsselbrug



Bijlage H

Analyse undercut

IJsselbrug



Bijlage H1

DIANA Analyse undercut las

IJsselbrug