

Van Mourik Broekmanweg 6
2628 XE Delft
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 30 00
F +31 88 866 30 10

TNO-rapport

TNO 2017 R10405

Detailcategorieën voor vermoeiing van klinknagelverbindingen en van orthotrope rijdekken met open verstijvers

Datum	28 maart 2017
Auteur(s)	prof.dr.ir. J. Maljaars
Exemplaarnummer	0100304490
Oplage	
Aantal pagina's	36 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	5
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat ir. F.J. van Dooren Postbus 2232 3500 GE Utrecht
Projectnaam	Ondersteuning Vervanging en Renovatie
Projectnummer	060.10046

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

© 2017 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Tabel met detailcategorieën voor klinknagelverbindingen	4
3	Verantwoording en toelichting voor klinknagelverbindingen	8
4	Tabel met detailcategorieën voor orthotrope rijdekken met open verstijvers	11
5	Verantwoording en toelichting voor orthotrope dekken met open verstijvers	19
6	Referenties	24
7	Ondertekening	25

Bijlage(n)

- A Dekplaatscheur bij bulbprofiel of dwarsdrager
- B Op druk belaste hoeklassen
- C Op buiging belaste hoeklassen
- D Artikel "Development and application of a fatigue class catalogue for riveted bridge components"
- E Artikel "Versuche an genieteten Brückenlängsträgern Statisches Verhalten"

1 Inleiding

Ten behoeve van de richtlijn beoordeling kunstwerken (RBK, [8]) is door TNO een tabel aangedragen met de detailcategorieën van klinknagelverbindingen in staalconstructies op basis van onderzoek aan de TU Graz (Oostenrijk) ref. [1] - [4]. Bij de vertaling van deze tabel zijn enkele onduidelijkheden geconstateerd en gecorrigeerd.

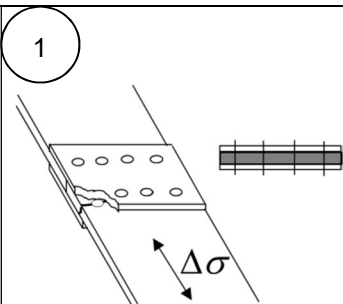
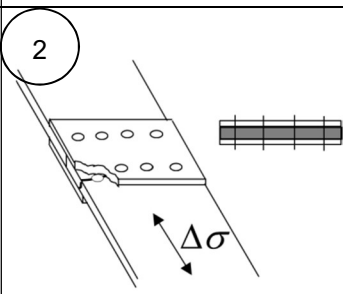
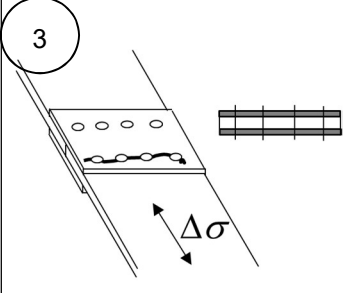
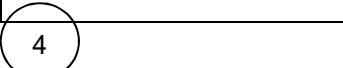
Daarnaast heeft Rijkswaterstaat aan TNO gevraagd om een tabel op te stellen met detailcategorieën voor orthotrope rijdekken met open verstijvers. Daarbij is onder andere gebruik gemaakt van onderzoek in het kader van de herbeoordeling van de dubbele boogbrug in de A27 over de Merwede, ref. [5], [6].

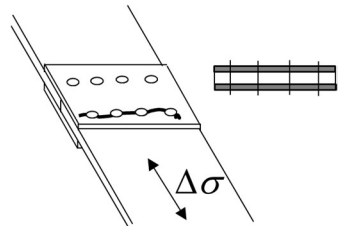
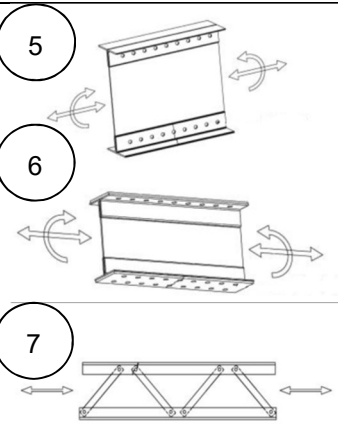
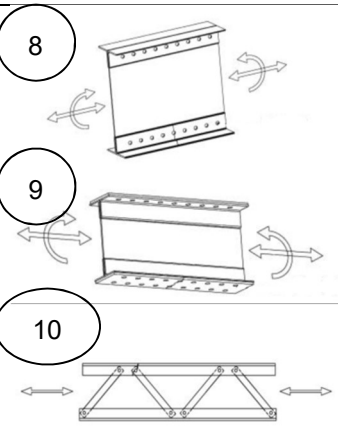
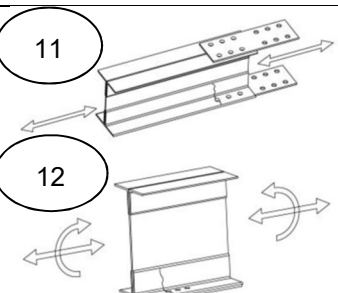
Dit rapport bevat de uiteindelijke detailcategorieën en de verantwoording daarvan. Hoofdstuk 2 geeft de tabel met detailcategorieën van klinknagelverbindingen in staalconstructies. Hoofdstuk 3 geeft de verantwoording daarvan. Hoofdstuk 4 geeft de tabel met detailcategorieën van orthotrope rijdekken met open verstijvers. Hoofdstuk 5 geeft de verantwoording daarvan.

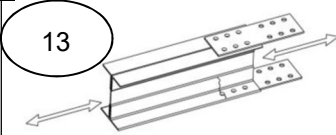
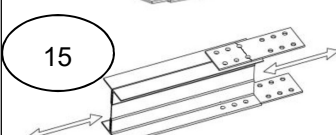
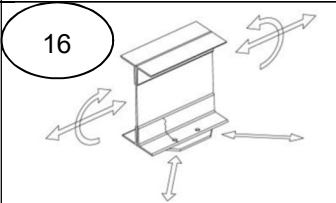
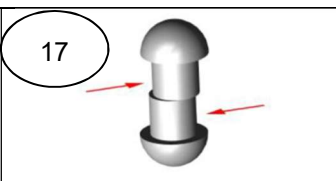
2 Tabel met detailcategorieën voor klinknagelverbindingen

Tabel 1 geeft een tabel met detailcategorieën van klinknagelverbindingen die opgenomen kan worden in de Richtlijn Beoordeling Kunstwerken (RBK, [8]) van Rijkswaterstaat. De geel gearceerde verwijzingen moeten aangepast worden aan de nummering in de RBK. Enkele begrippen in deze tabel staan reeds toegelicht in de RBK, zoals de definitie f_{ur} = de treksterkte van het materiaal van de klinknagel. Deze begrippen zijn niet toegelicht in de tabel. Voorts geldt dat de nominale detailcategorie dezelfde definitie heeft als die in NEN-EN 1993-1-9 [7], dus dit betreft de karakteristieke vermoeiingssterkte bij $2 \cdot 10^6$ wisselingen. Een toelichting op de detailcategorieën en de randvoorwaarden zijn gegeven in hoofdstuk 3 van dit rapport.

Tabel 1. Nominale detailcategorieën voor klinknagelverbindingen

Detail-categorie	Constructiedetail	Beschrijving	Eisen
<u>Symmetrische verbinding met stuikplaten</u>			
90 $m = 5$		1) Middelste platen	- Zie noot ^{a)} - Spanning in de middelste plaat. - De verhouding stuikspanning t.o.v. netto spanning is kleiner dan 2: $\sigma_{stuik}/\sigma_{netto} < 2$. - Klinknagels met $f_{ur} \leq 400$ N/mm², of - Klinknagels met $f_{ur} > 400$ N/mm² waarbij geen corrosiebeschermende coating of menie op de contactoppervlakken is aangebracht, zie noot ^{b)}
80 $m = 5$		2) Middelste platen	- 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	- 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 $f_{ur} \leq 400$ N/mm², of - Klinknagels met $f_{ur} > 400$ N/mm² waarbij geen corrosiebeschermende coating of menie op de contactoppervlakken is aangebracht, zie noot ^{b)}
71		4) Stuikplaten	- Zie noot ^{a)}

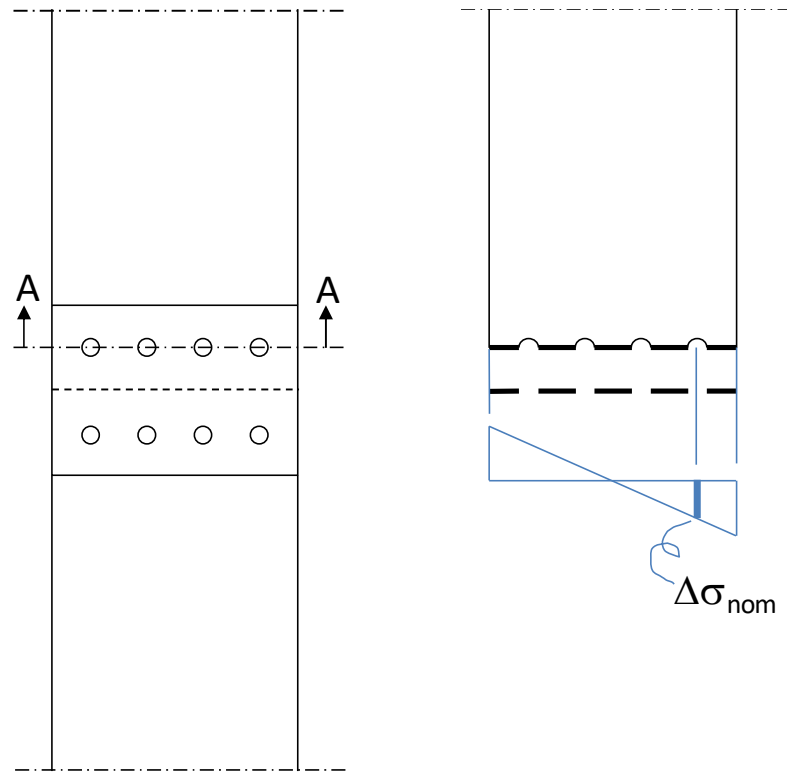
$m = 5$			- Spanning in de stuikplaat. - Als aan één of meer eisen van detail 3) niet is voldaan, zie noot ^{b)}
<u>Samengestelde liggers</u>			
85 $m = 5$		5) Doorgaande verbinding tussen hoekstalen en lijf 6) Doorgaande verbinding tussen hoekstalen en flensplaten 7) Vakwerkligger	Details 5) tot 7) - Zie noot ^{a)} - De schuifkracht per klinknagel-afschuifvlak in de bruikbaarheidsgrenstoestand is kleiner dan de minimum waarde van de slipweerstand volgens Tabel 2, zie noot ^{c)}
71 $m = 5$		8) Doorgaande verbinding tussen hoekstalen en lijf 9) Doorgaande verbinding tussen hoekstalen en flensplaten 10) Vakwerkligger	Details 8) tot 10) - Zie noot ^{a)} - Als aan de eis van details 5) tot 7) niet is voldaan.
<u>Enkelzijdige verbindingen</u>			
85 $m = 5$		11) Verbinding met stuikplaten, flens 12) Eerste klinknagelrij van een opdikplaat	Details 11) tot 12) - Zie noot ^{a)} - Spanning in de flens - De schuifkracht per klinknagel-afschuifvlak in de bruikbaarheidsgrenstoestand is kleiner dan de minimum waarde van de slipweerstand volgens Tabel 2, zie noot ^{c)}

71 $m = 5$	  	13) Verbinding met stuikplaten, flens 14) Eerste klinknagelrij van een opdikplaat 15) Verbinding met stuikplaten, stuikplaat	Details 13) tot 14) - Zie noot ^{a)} - Als aan de eis van details 11) tot 12) niet is voldaan. Detail 15) - Zie noot ^{a)} - Spanning in de stuikplaat.
71 $m = 5$		16) Verbindingsvlak van een dwarsverband aan de flens van een ligger	- Zie noot ^{a)} - Spanning in de flens van de ligger.
<u>Klinknagel belast op afschuiving</u>			
140 $m = 5$		17) Klinknagel belast op afschuiving	Toetsing gebaseerd op de schuifspanningsrange $\Delta \tau$ berekend als $\Delta F/A$, met ΔF is de range van de schuifkracht per klinknagel en per afschuifvlak en A is de doorsnede van de klinknagel.
^{a)} Details 1 – 16: - Gebruik de nominale spanning in de netto doorsnede ter plaatse van de klinknagel. Als voorbeeld, bij buiging in het vlak, gebruik de nominale spanning in de netto doorsnede ter plaatse van de zwaarst belaste klinknagel, zie Figuur 1 . - Geldig voor zowel trek-trek, trek-druk en druk-druk belastingsituaties. - Er mag geen gebruik gemaakt worden van de correctie op de vermoedingssterkte voor niet-gelaste details deels op druk belast volgens paragraaf 7.2.1 van EN 1993-1-9. ^{b)} Details 1 – 4: De klemkracht van klinknagels met $f_{ur} > 400 \text{ N/mm}^2$ is geringer dan van klinknagels met $f_{ur} < 400 \text{ N/mm}^2$. In combinatie met menie betekent dit dat de krachtsoverdracht door wrijving van klinknagels met $f_{ur} > 400 \text{ N/mm}^2$ relatief gering is. Klinknagelverbindingen in constructies van Rijkswaterstaat werden normaliter voorzien van menie tussen de contactoppervlakken. Tenzij er bewijs is dat dit niet is gebeurd, moet er daarom vanuit gegaan zijn dat er menie is aangebracht op de contactvlakken. ^{c)} Details 5 – 7, 11 en 12: Met krachten in de bruikbaarheidsgrenstoestand wordt in deze tabel bedoeld de kracht ten gevolge van de combinatie van permanente en veranderlijke belastingen met partiële factoren gelijk aan 1.			

Tabel 2. Minimum waarden van de slipweerstand per klinknagel-afschuifvlak.

Toegepaste klinktechniek en aantal klinknagels, n ^{a)}	Minimum waarde van de slipweerstand per klinknagel-afschuifvlak	
	Klinknagels van ijzer of staal met $f_{ur} \leq 400 \text{ N/mm}^2$	Klinknagels van staal met $f_{ur} > 400 \text{ N/mm}^2$
Techniek niet bekend of handmatig aangebracht	12 kN	8 kN
Met pneumatische hamer aangebracht en $n \leq 15$	12 kN	8 kN
Met pneumatische hamer aangebracht en $n > 15$	15 kN	10 kN

a) Voor details 5, 6, 8 en 9 is n gelijk aan 1; voor details 7, 10 en 16 is n het aantal klinknagels per verbinding tussen twee staven; voor details 1-4 en 11-15 is n het aantal klinknagels waarmee de kracht ingeleid wordt in de stuik- of opdikplaat.



Figuur 1. Voorbeeld van de berekening van de nominale spanning bij buiging in het vlak.

3 Verantwoording en toelichting voor klinknagelverbindingen

Basis van de detailcategorieën voor klinknagelverbindingen is het onderzoek uitgevoerd aan TU Graz. Het oorspronkelijke onderzoeksrapport is:

- [1] Rapport F-5-15-2007. A. Taras, R. Greiner. Statische Festigkeit und Ermüdungsfestigkeit genieteter Bauteile - Auswertung der Versuchsdaten und Bemessungsvorschläge.

Wetenschappelijke publicaties hierover betreffen:

- [2] A. Taras, R. Greiner. Development and application of a fatigue class catalogue for riveted bridge components. Structural engineering international 1 (2010) 91-103.
- [3] A. Taras, R. Greiner. Versuche an genieteten Brückenlängsträgern Statisches Verhalten, Ermüdungsfestigkeit und Rissausbreitung. Stahlbau 77 (2008) 507-514.

Deze publicaties [2] en [3] zijn opgenomen in respectievelijk bijlagen D en E van dit rapport. Het laatste document van genoemde auteurs over dit onderwerp is een voorstel dat is uitgewerkt om te kunnen opnemen in het volgende rapport:

- [4] B. Kühn et al. ECCS rapport 'Recommendation for existing structures'.

Dit laatste voorstel kent enkele kleine wijzigingen ten opzichte van de eerste versie – na overleg met andere experts in ECCS-TC6 – en is hieronder overgenomen als Tabel 3.

Tabel 3. Detailcategorieën van klinknagelverbindingen voor opname in [4].

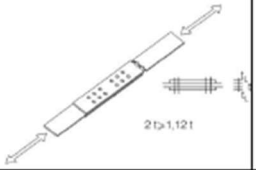
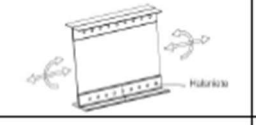
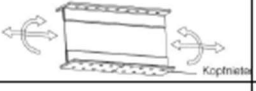
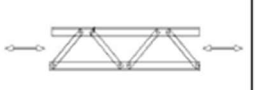
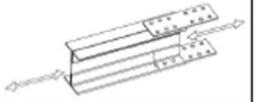
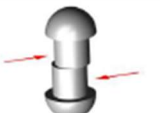
fatigue strength [MPa]	constructional detail	description and examples	remarks
$\Delta\sigma_c$ 90 (80) $m=5$		<u>symmetrical joint with splice plates</u> - middle plates in two-shear connections are to be verified with $\Delta\sigma_c=90$ - $\Delta\sigma_c=80$ applies for the splice plates themselves, so no verification is required when $2t_L > 1,12 t$.	the ratio $\sigma_{bearing}$ to σ_{net} must be smaller than 2. When rivets of steel grade St44 or higher were employed no corrosion protection coating must have been applied to the contact surfaces. If one of these conditions is not kept, $\Delta\sigma_c=80$ applies (70 for the splice plates)
$\Delta\sigma_c$ 85 $m=5$		<u>continuous connection of flange angles and web plates in built-up girders</u> $\Delta\sigma_c$ at the centre of the rivet	if the calculated shear force per rivet and shearing area exceeds the minimum value of slip resistance as indicated in Table 3-7
		<u>continuous connection between cover plates and flange angles in built-up girders</u>	
		<u>lattice members under tension or compression loads</u>	
$\Delta\sigma_c$ 71 $m=5$		<u>one-shear joint with gusset plates</u>	if the calculated shear force in the rivets is lower than the minimum value of slip resistance, $\Delta\sigma_c=85$ can be used
		<u>area of the connection of a lateral bracing element to the tension flange of a girder</u>	if the restraining effect of the lateral bracing element is considered during the calculation of the applied stress range $\Delta\sigma_c=85$ can be used
		<u>onset of a cover plate</u>	if the calculated shear force in the rivets is lower than the minimum value of slip resistance, $\Delta\sigma_c=85$ can be used
$\Delta\tau_c$ 140 $m=5$		<u>rivets in shear</u>	-

Table 3-6: Classification of constructional details and corresponding S/N curves

riveting technique and number of rivets in the connection	minimum value of slip resistance per rivet shear plane	
	rivets made of wrought iron or mild steel with $f_{y,nom} < 275$ MPa	rivets made of steel with $f_{y,nom} > 275$ MPa
unknown technique, riveting by hand or by pneumatic hammer with $n \leq 15$ rivets	12 kN	8 kN
riveting by pneumatic hammer with $n > 15$ rivets	15 kN	10 kN
riveting with bent lever	25 kN	17 kN

Table 3-7: Minimum value of slip resistance per rivet shear plane.

De tabel voor opname in de RBK (hoofdstuk 2) is op een aantal punten aangepast ten opzichte van de bovengenoemde, Engelstalige tabellen 3-6 en 3-7. Deze punten zijn:

- De detailcategorieën zijn anders gegroepeerd om verwarring te voorkomen en om beter aan te sluiten bij het formaat in EN 1993-1-9.
- In een aantal gevallen is onderscheid gemaakt in steel grades, ofwel St44 ofwel $f_{y,nom} = 275$ MPa. Na overleg met de auteur blijkt dit verschil samen te hangen met hoge sterkte klinknagels toegepast in S355 en lagere sterkte nagels toegepast in S235. Volgens de RBK komt dit overeen met klinknagels $f_{ur} = 400$ MPa en $f_{ur} = 600$ MPa. Dit onderscheid is aangebracht in de Nederlandstalige tabel voor de RBK.
- Voor detail 4 is de oorspronkelijke detailcategorie 70 gewijzigd in 71, omdat dit aansluit bij de detailcategorieën verder in de tabel en in NEN-EN 1993-1-9 [7].
- In de voorwaarde bij details 5-7 ontbrak een deel van de zin, die wel opgenomen bleek in het Duitstalige document, waarin aangegeven is dat er in dit geval gebruik gemaakt moet worden van detailcategorie 71. Dit is toegepast in de Nederlandstalige tabel.
- De zinsnede “De schuifkracht per klinknagel-afschuifvlak is kleiner dan de minimum waarde van de slipweerstand” is omgeschreven naar “De schuifkracht per klinknagel-afschuifvlak in de bruikbaarheidsgrenstoestand is kleiner dan de minimum waarde van de slipweerstand”.
- Voor detail 15 in de Nederlandstalige tabel bestaat in de oorspronkelijke Engelstalige tabel ook een equivalent in detailcategorie 85. Deze strookt echter niet met de detailcategorie van een coverplate in een symmetrische verbinding (maximale detailcategorie 80) en is om deze reden weggelaten.
- Voor detail 16 in de Nederlandstalige tabel bestaat in de oorspronkelijke Engelstalige tabel ook een equivalent in detailcategorie 85. De bijbehorende voorwaarde “if the restraining effect of the lateral bracing element is considered in the calculation of the applied stress range” is echter onduidelijk: op welke methode moet dit effect berekend worden? Daarom is dit achterwege gelaten.
- In Nederland is enkel gebruik gemaakt van handmatig of pneumatisch aangebrachte klinknagels, dus enkel deze regels uit tabel 3-7 zijn overgenomen.

Belangrijk.

In publicaties [1] t/m [3] is aangegeven dat de S-N curves gelden voor spanningsverhouding $R = 0$ (dus $\sigma_{min} = 0$). In geval van lager R-waarden (trek-druk of druk-druk belast) wordt de S-N curve verhoogd en in geval van hogere R-waarden ($\sigma_{min} > 0$) wordt de S-N curve gereduceerd. Dit is komen te vervallen in het uiteindelijke voorstel in [4] (conform tabel 3-6). Uit overleg met de auteur blijkt echter dat er wel een R-waarde afhankelijkheid is, en dat de vermoeiingssterkte bij een permanente spanning gelijk aan ca. de helft van de vloeispanning lager zal zijn dan de detailcategorieën in de tabellen. Hoeveel lager is echter niet bekend. Dit is om deze reden niet opgenomen in de tabellen, die hiermee te ongunstig kunnen zijn voor $\sigma_{min} < 0$ en te gunstig kunnen zijn voor $\sigma_{min} > 0$. Nader onderzoek op dit gebied is wenselijk.

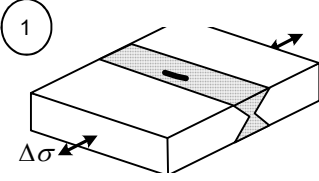
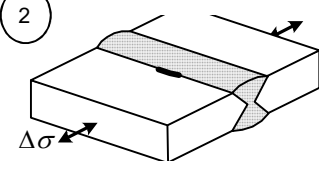
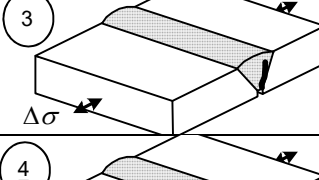
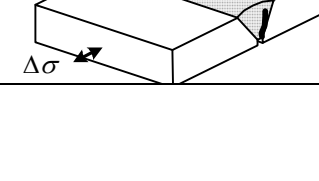
4 Tabel met detailcategorieën voor orthotrope rijdekken met open verstijvers

Tabel 1 geeft een tabel met detailcategorieën voor orthotrope rijdekken met open verstijvers die opgenomen kan worden in de Richtlijn Beoordeling Kunstwerken (RBK, [8]) van Rijkswaterstaat. De geel gearceerde verwijzingen moeten aangepast worden aan de nummering in de RBK. De nominale detailcategorie heeft dezelfde definitie als die in NEN-EN 1993-1-9 [7], dus dit betreft de karakteristieke vermoeiingssterkte bij $2 \cdot 10^6$ wisselingen en tenzij vermeld geldt dat de parameter voor de helling gelijk is aan $m = 3$. Een toelichting op de detailcategorieën en de randvoorwaarden zijn gegeven in hoofdstuk 5 van dit rapport.

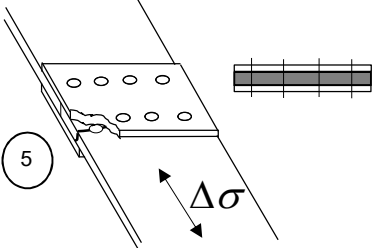
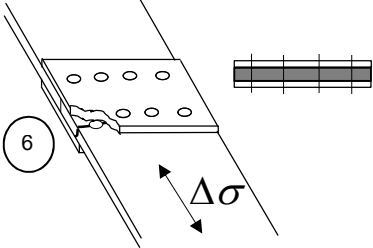
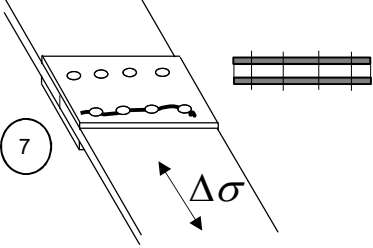
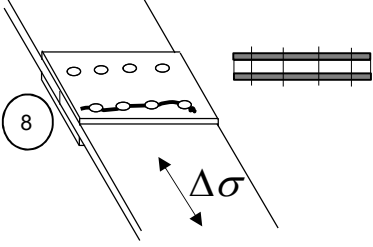
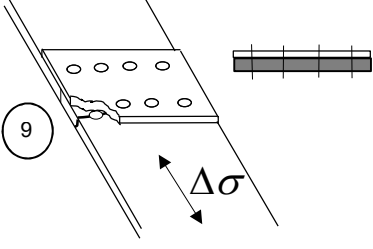
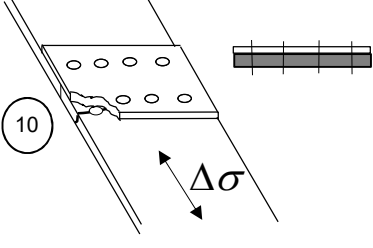
Uitgangspunten bij de tabel zijn:

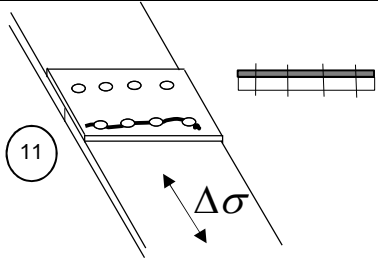
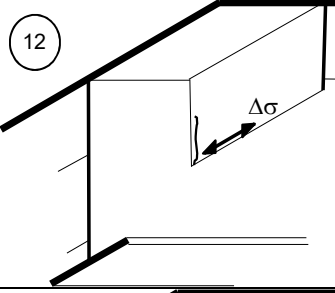
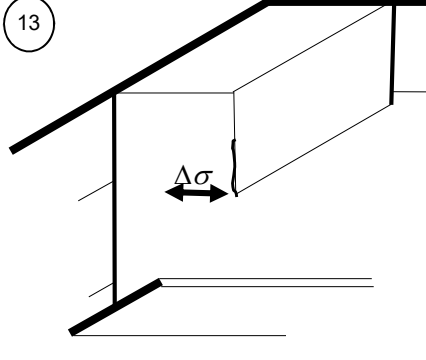
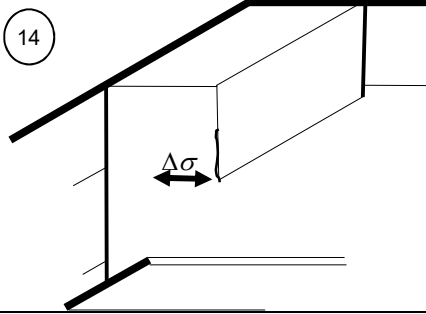
- Doorgestoken verstijvers met stuiknaden.
- Lassen verstijver-dekplaat zijn tweezijdige hoeklassen.
- Geëvalueerd met FEM model opgebouwd uit schaalementen.

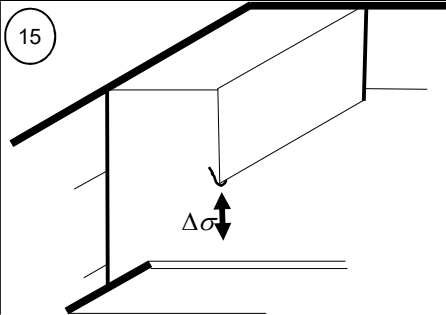
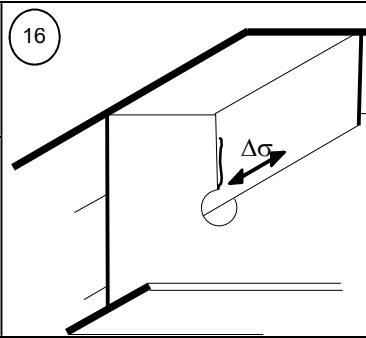
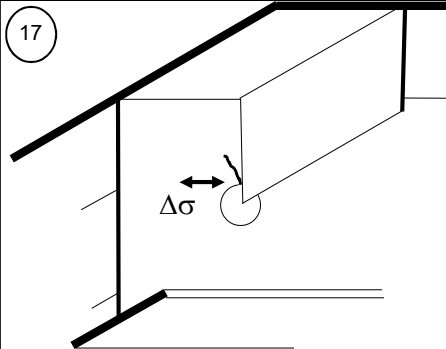
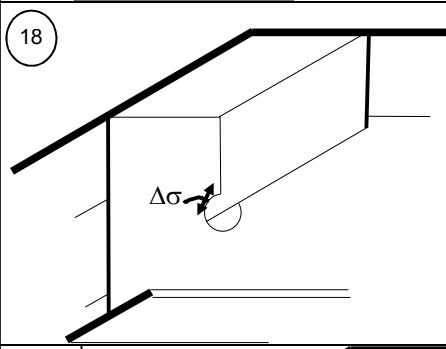
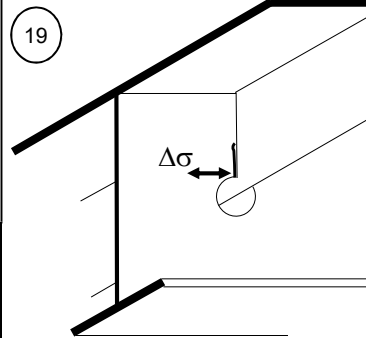
Tabel 4. Detailcategorieën voor orthotrope rijdekken met open verstijvers.

Detail-categorie	Constructiedetail	Beschrijving	Eisen
<u>Gelaste stuikverbindingen</u>			
112 · (1 + 0.40b ²)		1) Stui klassen in de dekplaat of in open langsverstijvers, gelast en vlakgeslepen aan beide zijden. <i>b</i> is het aandeel in de spanningsrange veroorzaakt door wisselende buiging over de dikte van de plaat ($0 \leq b \leq 1$).	- Toetsing gebaseerd op normaalspanning in de uiterste vezel loodrecht op de las, ter plaatse van de las. - Gelast aan beide zijden, volledige doorlassing gecontroleerd door NDO. - Aan beide zijden vlakgeslepen tot het plaatoppervlak evenwijdig aan de richting van de pijl.
95 · (1 + 0.25b ²)		2) Stui klassen in de dekplaat of in open langsverstijvers, gelast aan beide zijden. <i>b</i> is het aandeel in de spanningsrange veroorzaakt door wisselende buiging over de dikte van de plaat ($0 \leq b \leq 1$).	- Toetsing gebaseerd op normaalspanning in de uiterste vezel loodrecht op de las, ter plaatse van de las. - Gelast aan beide zijden, volledige doorlassing gecontroleerd door NDO.
71		3) Stui klassen in de dekplaat, gelast van één zijde, met volledige doorlassing	- Toetsing gebaseerd op normaalspanning in de uiterste vezel loodrecht op de las, ter plaatse van de las. - Volledige doorlassing, gecontroleerd door NDO.
36		4) Stui klassen in de dekplaat, gelast van één zijde, met onvolledige doorlassing	- Toetsing gebaseerd op normaalspanning in de uiterste vezel loodrecht op de las, ter plaatse van de las. - Onvolledige doorlassing.

Geklonken stuikverbindingen

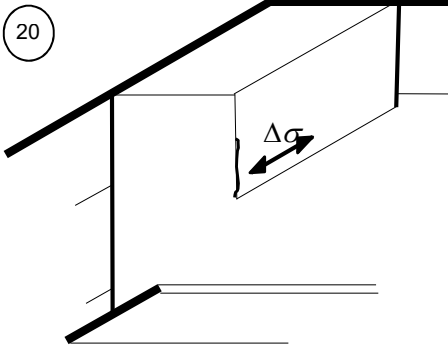
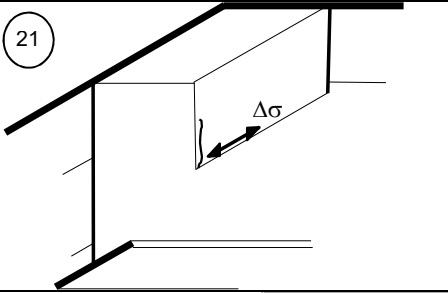
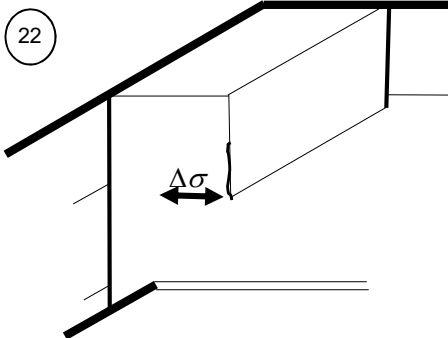
90 $m = 5$		5) Dekplaat of open verstijver in een symmetrische verbinding met dubbelzijdige stuikplaten	- Zie noot ^{a)} - Spanning in de middelste plaat. - De verhouding stuikspanning t.o.v. netto spanning is kleiner dan 2: $\sigma_{\text{stuik}}/\sigma_{\text{netto}} < 2$. - Klinknagels met $f_{ur} \leq 400 \text{ N/mm}^2$, of - Klinknagels met $f_{ur} > 400 \text{ N/mm}^2$ waarbij geen corrosiebeschermende coating of menie op de contactoppervlakken is aangebracht, zie noot ^{b)}
80 $m = 5$		6) Dekplaat of open verstijver in een symmetrische verbinding met dubbelzijdige stuikplaten	- Zie noot ^{a)} - Spanning in de middelste plaat. - Als aan één of meer eisen van detail 5) niet is voldaan, zie noot ^{b)}
80 $m = 5$		7) Stuikplaat in een symmetrische verbinding met dubbelzijdige stuikplaten met de dekplaat of de open verstijver	- Zie noot ^{a)} - Spanning in de stuikplaat. - De verhouding stuikspanning t.o.v. netto spanning is kleiner dan 2: $\sigma_{\text{stuik}}/\sigma_{\text{netto}} < 2$. - 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)}
71 $m = 5$		8) Stuikplaat in een symmetrische verbinding met dubbelzijdige stuikplaten met de dekplaat of de open verstijver	- Zie noot ^{a)} - Spanning in de stuikplaat. - Als aan één of meer eisen van detail 7) niet is voldaan, zie noot ^{b)}
85 $m = 5$		9) Door verstijvers gesteunde dekplaat in een verbinding met een enkelzijdige stuikplaat	- Zie noot ^{a)} - Spanning in de dekplaat. - De schuifkracht per klinknagel-afschuifvlak in de bruikbaarheidsgrenstoestand is kleiner dan de minimum waarde van de slipweerstand volgens Tabel 5, zie noot ^{c)}
71 $m = 5$		10) Door verstijvers gesteunde dekplaat in een verbinding met een enkelzijdige stuikplaat	- Zie noot ^{a)} - Spanning in de dekplaat. - Als aan de eis van detail (9) niet is voldaan.

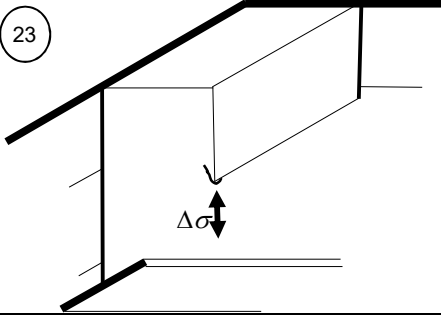
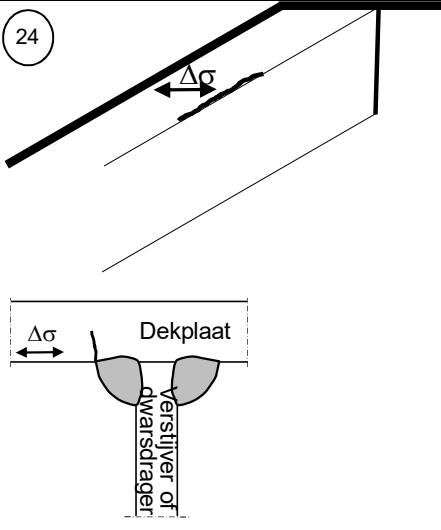
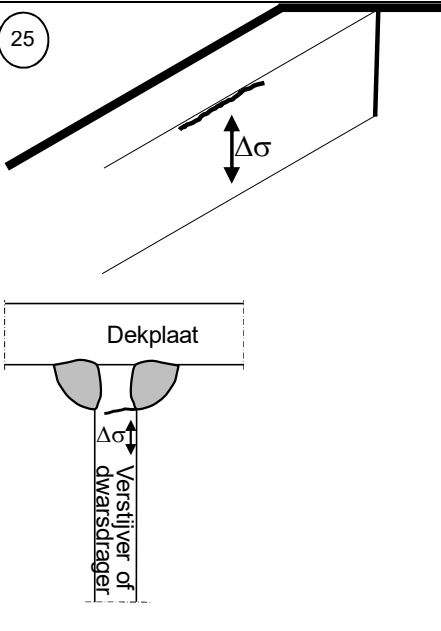
71			11) Strijkplaat in een enkelzijdige verbinding met een door verstijvers gesteunde dekplaat	- Zie noot ^{a)} - Spanning in de strijkplaat.
<u>Verbinding tussen doorgaande open verstijver en dwarsdrager, rondom gelast</u>				
80	$t \leq 12$		12) Scheur in de verstijver. Parameter t is de lijfdikte van de dwarsdrager in (mm).	Toetsing gebaseerd op het normaalspanningsinterval $\Delta\sigma$ aan het oppervlak van de verstijver loodrecht op de las op een afstand van 10 mm vanaf de intersectie tussen verstijver en dwarsdrager.
71	$t > 12$			
36*			13) Scheur in de las	- Toetsing gebaseerd op het normaalspanningsinterval $\Delta\sigma_{wf}$ in de wortel van de las volgens 5 (6) van EN 1993-1-9, waarbij $\sigma_{\perp f} = \frac{N}{2a} + \frac{M}{a(a+t)}$ met N is normaalkracht en M is buigend moment in de dwarsdrager op een afstand van 10 mm van de intersectie met de verstijver. - Toetsing ter plaatse van zowel de kopse kant als de zijkant van de las. - Indien de berekende schade $D > 1$ en de spanningsverhouding $\sigma_{min}/\sigma_{max} \leq -1$ (trek-druk), of indien de berekende schade $D > 1$ en de spanningsverhouding $\sigma_{min}/\sigma_{max} > 1$ (druk-druk), dan moet de vermoeiingsschade ook berekend worden op basis van detailcategorie 80. Indien de vermoeiingsschade berekend met detailcategorie 80 lager is dan 1, dan mag aangenomen zijn dat het detail voldoet aan de vermoeiingseisen mits het detail visueel geïnspecteerd wordt met een inspectie-interval van maximaal 6 jaar, zie noot ^{d)}. Gevonden defecten moeten gerepareerd worden.
80			14) Scheur in de dwarsdrager vanuit de las.	Toetsing gebaseerd op het normaalspanningsinterval $\Delta\sigma$ aan het oppervlak van de dwarsdrager loodrecht op de las op een afstand van 10 mm vanaf de intersectie tussen verstijver en dwarsdrager.

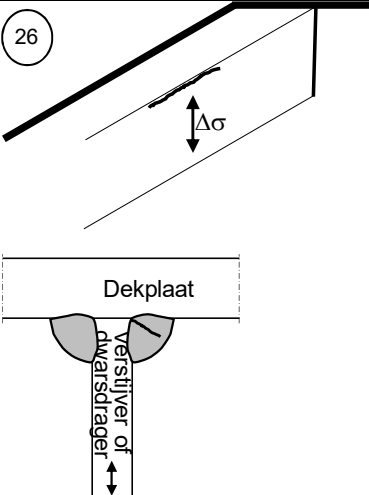
100			15) Scheur in de dwarsdrager vanuit de kopse kant van de las.	- Toetsing gebaseerd op het geometrische (hot-spot) normaalspanningsinterval $\Delta\sigma$ aan het oppervlak van de dwarsdrager loodrecht op de kopse kant van de las. - Spanning bepaald op $0,5 t$ en $1,5 t$ afstand vanaf de onderzijde van de verstijver, lineair geëxtrapoleerd naar die onderzijde, waarbij t is de dikte van de dwarsdrager.
<u>Verbinding tussen doorgaande open verstijver en dwarsdrager, met uitsparing in de dwarsdrager</u>				
80	$t \leq 12$		16) Scheur in de verstijver langs de las. Parameter t is de lijfdikte van de dwarsdrager in (mm).	Toetsing gebaseerd op het normaalspanningsinterval $\Delta\sigma$ aan het oppervlak van de verstijver loodrecht op de las op een afstand van 10 mm vanaf de intersectie tussen verstijver en dwarsdrager.
71	$t > 12$			
71			17) Scheur in de dwarsdrager vanuit de las.	- Toetsing gebaseerd op het geometrische (hot-spot) normaalspanningsinterval $\Delta\sigma$ aan het oppervlak van de dwarsdrager loodrecht op de las. - Spanning bepaald op $0,5 t$ en $1,5 t$ afstand van de intersectie van de platen, lineair geëxtrapoleerd naar de intersectie, waarbij t is de dikte van de dwarsdrager.
125			18) Scheur vanuit de vrije rand van de uitsparing.	- Toetsing gebaseerd op het normaalspanningsinterval $\Delta\sigma$ aan het oppervlak van de dwarsdrager en de rand van het gat, loodrecht op de gatrand. - De positie met het grootste normaalspanningsinterval moet beschouwd zijn.
36*	$\Delta\sigma_w$		19) Scheur in de las	- Voor detail-categorie 36*, toetsing gebaseerd op het normaalspanningsinterval $\Delta\sigma_{wf}$ in de wortel van de las volgens 5 (6) van EN 1993-1-9, waarbij $\sigma_{lf} = \frac{N}{2a} + \frac{M}{a(a+t)}$ met N is normaalkracht en M is buigend moment in de dwarsdrager op een afstand van 10 mm van de intersectie met de verstijver. - Voor detail-categorie 80, toetsing gebaseerd op het schuifspanningsinterval $\Delta\tau_{wf}$ in de wortel van de las volgens 5 (6) van EN 1993-1-9, waarbij $\tau_{lf} = \frac{V}{2a}$ met V is schuifkracht in de dwarsdrager op een
80 $m=5$	$\Delta\tau_w$			

				afstand van 10 mm van de intersectie met de verstijver. - Schades categorie 36* en 80 bij elkaar optellen. - Indien de berekende schade $D > 1$ en de spanningsverhouding $\sigma_{min}/\sigma_{max} \leq -1$ (trek-druk), of indien de berekende schade $D > 1$ en de spanningsverhouding $\sigma_{min}/\sigma_{max} > 1$ (druk-druk), dan moet de vermoeiingsschade voor normaalspanningsintervallen ook berekend worden op basis van detailcategorie 80. Indien de vermoeiingsschade berekend met detailcategorie 80 lager is dan 1, dan mag aangenomen zijn dat het detail voldoet aan de vermoeiingseisen mits het detail visueel geïnspecteerd wordt met een inspectie-interval van maximaal 6 jaar, zie noot d). Gevonden defecten moeten gerepareerd worden.
--	--	--	--	---

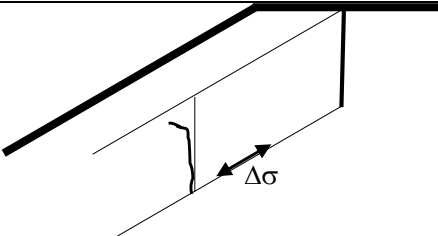
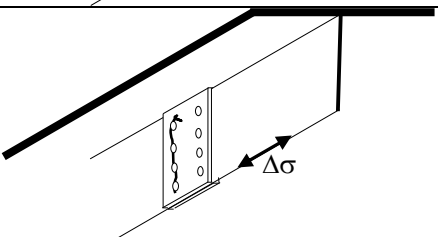
Verbinding tussen tussengelaste open verstijver en dwarsdrager

36*		20) Hoeklassen tussen verstijver en dwarsdrager. Scheur in de las.	- Toetsing gebaseerd op het normaalspanningsinterval $\Delta\sigma_{wf}$ in de wortel van de las volgens 5 (6) van EN 1993-1-9, waarbij $\sigma_{\perp f} = \frac{N}{2a} + \frac{M}{a(a+t)}$ met N is normaalkracht en M is buigend moment in de verstijver op een afstand van 10 mm van de intersectie met de dwarsdrager. - Indien de berekende schade $D > 1$ en de spanningsverhouding $\sigma_{min}/\sigma_{max} \leq -1$ (trek-druk), of indien de berekende schade $D > 1$ en de spanningsverhouding $\sigma_{min}/\sigma_{max} > 1$ (druk-druk), dan moet de vermoeiingsschade ook berekend worden op basis van detailcategorie 80. Indien de vermoeiingsschade berekend met detailcategorie 80 lager is dan 1, dan mag aangenomen zijn dat het detail voldoet aan de vermoeiingseisen mits het detail visueel geïnspecteerd wordt met een inspectie-interval van maximaal 6 jaar, zie noot d). Gevonden defecten moeten gerepareerd worden.
80		21) Lassen met volledige doorlassing tussen verstijver en dwarsdrager. Scheur in de verstijver.	Toetsing gebaseerd op het normaalspanningsinterval $\Delta\sigma$ aan het oppervlak van de verstijver loodrecht op de las op een afstand van 10 mm vanaf de intersectie tussen verstijver en dwarsdrager.
80		22) Hoeklassen of lassen met volledige doorlassing tussen verstijver en dwarsdrager. Scheur in het dwarsdragerlijf	Toetsing gebaseerd op het normaalspanningsinterval $\Delta\sigma$ aan het oppervlak van de dwarsdrager loodrecht op de las op een afstand van 10 mm vanaf de intersectie tussen verstijver en dwarsdrager.

100		23) Hoeklassen of lassen met volledige doorlassing tussen verstijver en dwarsdrager. Scheur in de dwarsdrager vanuit de kopse kant van de las.	- Toetsing gebaseerd op het geometrische (hot-spot) normaalspanningsinterval $\Delta\sigma$ aan het oppervlak van de dwarsdrager loodrecht op de kopse kant van de las. - Spanning bepaald op $0,5 t$ en $1,5 t$ afstand vanaf de onderzijde van de verstijver, lineair geëxtrapoleerd naar die onderzijde, waarbij t is de dikte van de dwarsdrager.
Verbinding tussen de dekplaat en de verstijver of de dwarsdrager			
125		24) Scheur in de dekplaat	- Toetsing gebaseerd op het geometrische (hot-spot) normaalspanningsinterval $\Delta\sigma$ aan het oppervlak van de dekplaat. - Spanning bepaald op $0,4 t$ en $1,0 t$ afstand van de intersectie van de platen, lineair geëxtrapoleerd naar de intersectie, waarbij t is de dikte van de dekplaat. - Indien de berekende vermoeiingsschade groter is dan 1, dan moet de vermoeiingsschade ook berekend worden op basis van geometrische (hot-spot) detailcategorie 165. Indien de vermoeiingsschade berekend met detailcategorie 165 lager is dan 1, dan mag aangenomen zijn dat het detail voldoet aan de vermoeiingseisen mits het detail visueel geïnspecteerd wordt met een inspectie-interval van maximaal 6 jaar, zie noot ^{d)}. Gevonden defecten moeten gerepareerd worden.
80 · (1 + 0.35b ²)		25) Scheur in de verstijver b is het aandeel in de spanningsrange veroorzaakt door wisselende buiging van over de dikte van de verstijver of dwarsdrager ($0 \leq b \leq 1$).	Toetsing gebaseerd op het normaalspanningsinterval $\Delta\sigma$ aan het oppervlak van de verstijver of dwarsdrager loodrecht op de las op een afstand van 10 mm vanaf de intersectie tussen verstijver en dwarsdrager.

36*	$\Delta\sigma_w$		26) Scheur in de las	- Voor detail-categorie 36*, toetsing gebaseerd op het normaalspanningsinterval $\Delta\sigma_{wf}$ in de wortel van de las volgens 5 (6) van EN 1993-1-9, waarbij $\sigma_{lf} = \frac{N}{2a} + \frac{M}{a(a+t)}$ met N is normaalkracht en M is buigend moment in de verstijver of dwarsdrager op een afstand van 10 mm van de intersectie met de dekplaat. - Voor detail-categorie 80, toetsing gebaseerd op het schuifspanningsinterval $\Delta\tau_{wf}$ in de wortel van de las volgens 5 (6) van EN 1993-1-9, waarbij $\tau_{lf} = \frac{V}{2a}$ met V is schuifkracht in de verstijver of dwarsdrager op een afstand van 10 mm van de intersectie met de dekplaat. - Schades categorie 36* en 80 bij elkaar optellen. - Indien de berekende schade $D > 1$ en de spanningsverhouding $\sigma_{min}/\sigma_{max} \leq -1$ (trek-druk), of indien de berekende schade $D > 1$ en de spanningsverhouding $\sigma_{min}/\sigma_{max} > 1$ (druk-druk), dan moet de vermoeiingsschade voor normaalspanningsintervallen ook berekend worden op basis van detailcategorie 80. Indien de vermoeiingsschade berekend met detailcategorie 80 lager is dan 1, dan mag aangenomen zijn dat het detail voldoet aan de vermoeiingseisen mits het detail visueel geïnspecteerd wordt met een inspectie-interval van maximaal 6 jaar, zie noot ^{d)}. Gevonden defecten moeten gerepareerd worden.
80 $m=5$	$\Delta\tau_w$			

Stuikverbinding in de verstijver

Zie details 1) en 2)		Gelaste stuikverbinding in de verstijver.	Zie details 1) en 2)
Zie details 5) tot 8)		Geklonken stuikverbinding in de verstijver.	- Zie details 5) tot 8). - Op basis van de spanning volgend uit het eindige-elementenmodel met doorgaande verstijvers, het buigend moment in het vlak en het buigend moment uit het vlak bepaald. Deze momenten zijn vervolgens vertaald naar de nominale spanning ter plaatse van de zwaarst belaste klinknagel in de verbinding volgens noot ^{a)}.

^{a)} Details 5 – 11:

- Gebruik de nominale spanning in de uiterste vezel (plaatoppervlak) van de netto doorsnede ter plaatse van de klinknagel. Als voorbeeld, bij buiging in het vlak, gebruik de nominale spanning in de netto doorsnede ter plaatse van de zwaarst belaste klinknagel, zie **Figuur 2**.
- Bij buiging uit het vlak moet het weerstandsmoment bepaald zijn van het totale platenpakket.
- Geldig voor zowel op trek-trek, trek-druk en druk-druk belastingsituaties.
- Er mag geen gebruik gemaakt worden van de correctie op de vermoeiingssterkte voor niet-gelaste details deels op druk belast volgens paragraaf 7.2.1 van EN 1993-1-9.

^{b)} Details 5 – 8: De klemkracht van klinknagels met $f_{ur} > 400 \text{ N/mm}^2$ is geringer dan van klinknagels met $f_{ur} < 400 \text{ N/mm}^2$. In combinatie met menie betekent dit dat de krachtsoverdracht door wrijving van klinknagels met $f_{ur} > 400 \text{ N/mm}^2$ relatief gering is. Klinknagelverbindingen in constructies van Rijkswaterstaat werden normaliter voorzien van menie tussen de contactoppervlakken. Tenzij er bewijs is dat dit niet is gebeurd, moet er daarom vanuit gegaan zijn dat er menie is aangebracht op de contactvlakken.

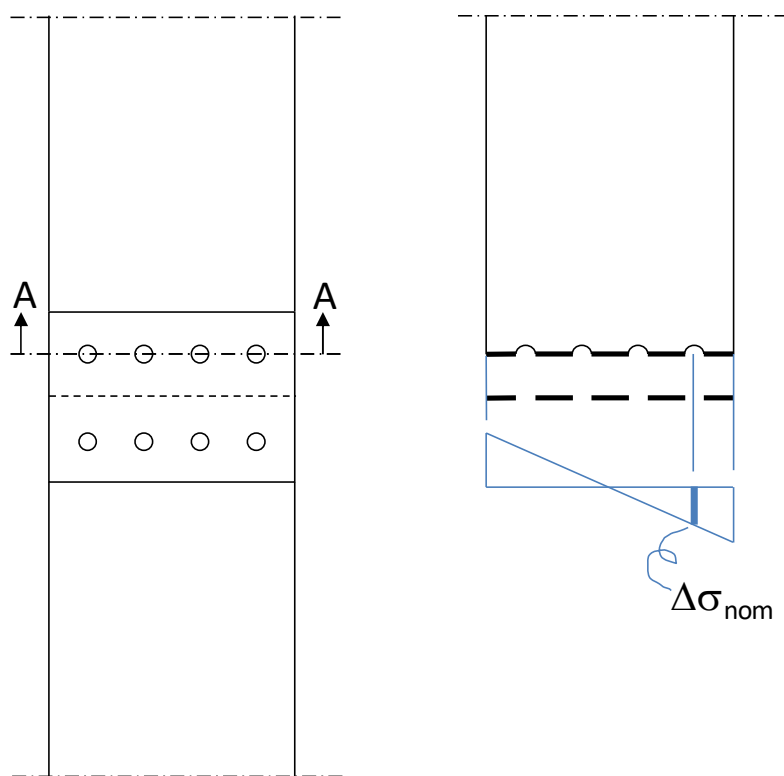
^{c)} Detail 9: Met krachten in de bruikbaarheidsgrenstoestand wordt in deze tabel bedoeld de kracht ten gevolge van de combinatie van permanente en veranderlijke belastingen met partiële factoren gelijk aan 1.

^{d)} Voor een aantal typen details geldt dat proeven hebben uitgewezen dat de levensduur bij belasting (gedeeltelijk) op druk significant hoger is dan bij belasting volledig op trek en dat daarnaast de vermoeiingsscheurgroeijsnelheid bij belasting (gedeeltelijk) op druk relatief laag ligt. Wanneer de gevolgen van bezwijken ook nog eens gering zijn, is voor deze details een verhoogde detailcategorie gegeven die geldig is in combinatie met een periodieke inspectie van eens per 6 jaar.

Tabel 5. Minimum waarden van de slipweerstand per klinknagel-afschuifvlak.

Toegepaste klinktechniek en aantal klinknagels, n ^{a)}	Minimum waarde van de slipweerstand per klinknagel-afschuifvlak	
	Klinknagels van ijzer of staal met $f_{ur} \leq 400 \text{ N/mm}^2$	Klinknagels van staal met $f_{ur} > 400 \text{ N/mm}^2$
Techniek niet bekend of handmatig aangebracht	12 kN	8 kN
Met pneumatische hamer aangebracht en $n \leq 15$	12 kN	8 kN
Met pneumatische hamer aangebracht en $n > 15$	15 kN	10 kN

^{a)} n is het aantal klinknagels waarmee de kracht ingeleid wordt in de stui- of opdikplaat.



Figuur 2. Voorbeeld van de berekening van de nominale spanning bij buiging in het vlak.

5 Verantwoording en toelichting voor orthotrope dekken met open verstijvers

Per (groep van) details in de tabel van hoofdstuk 2 is hieronder een toelichting gegeven voor de toegepaste detailcategorie.

1) 'Standaard' detailcategorie voor een vlakgeslepen stuiklas is 112. Dit detail is beschouwd met het breukmechanicamodel van TNO. Uitgangspunten van dit model zijn de 'standaard' waarden die veelal toegepast worden:

- initieel defect voor een 'as welded' detail is een semi-elliptische scheur met hoogte $a_i = 0.15$ mm en lengte $2c_i = 0.30$ mm
- faalcriterium is het bereiken van een door-de-wandscheur.
- spanningsintensiteitsfactoren voor semi-elliptische scheur volgens BS 7910:2013+A1:2015, [9].
- scheurgroeiparameters volgens de 'simplified relation' in [9].

Met een kleine excentriciteit in de aansluiting ter grootte van 5% van de plaatdikte ontstaat een redelijk gelijke detailcategorie. Vervolgens is nagegaan wat de detailcategorie zou zijn in geval van buiging. Omdat er geen geometrie-overgang (anders dan de excentriciteit) aanwezig is, is er geen dikte-effect in het geval van zuivere normaalkracht. Bij buiging is dit er wel enige invloed van de plaatdikte. De plaatdikte toegepast in de analyse is daarom gelijk gesteld aan 12 mm, hetgeen bij buiging licht conservatief is ten opzichte van een 10 mm dikke plaat.

Tabel 6. Breukmechanica-berekeningen t.b.v. detail 1).

Plaatdikte [mm]	Normaalkracht en / of buiging	Detailcategorie
25	100% normaalkracht	117
12	100 % normaalkracht	115
12	100 % buiging	158
12	50 % normaalkracht, 50 % buiging	129

Uitgangspunt voor de detailcategorie is een dekplaatdikte van 12 mm. Op basis van de bovenstaande tabel is de aangehouden classificatie gelijk aan 112 ($1 + 0.40 b^2$), waarin b is het aandeel buiging in de spanningsrange ($b = 0$ voor zuiver wisselende normaalkracht, $b = 1$ voor zuiver wisselende buiging). Uitwerking van deze vergelijking levert:

- 100% normaalkracht: detailcategorie is 112 (dicht bij 117 in bovenstaande tabel)
- 50% normaalkracht, 50% buiging: detailcategorie is 123 (dicht bij 129 in bovenstaande tabel)
- 100% buiging: detailcategorie is 157 (dicht bij 158 in bovenstaande tabel)

2) 'Standaard' detailcategorie voor een stuiklas met overdikte is 80. (Voor dunne platen is de overhoogte van de las immers meestal groter dan 10% van de plaatdikte, aldus resulterend in detailcategorie 80 volgens [7]). De detailcategorie 80 is echter afgeleid voor een referentie-plaatdikte van 25 mm belast op trek. In [10], pagina 316, is één proef met een scheur in de stuiklas van een dekplaat beschreven. Deze proef zit ruim boven detail categorie 80, maar één proef zegt niets. Op dezelfde pagina is aangegeven 'Other work on butt welds (Gurney, 1992) suggests that joints in thin plates loaded in bending have higher fatigue strengths

than the fatigue classifications, which are based on axial loading'. Bron Gurney 1992 niet kunnen achterhalen, maar deze experimentele observatie komt overeen met de theorie van breukmechanica. Met het breukmechanicamodel van TNO (zelfde uitgangspunten als hierboven, maar dan inclusief de correctiefactor M_k voor lasdetails in de SIF volgens [9]) zijn de volgende classificaties afgeschat:

Tabel 7. Breukmechanica-berekeningen t.b.v. detail 2).

Plaatdikte [mm]	Normaalkracht en / of buiging	Detailcategorie
25	100% normaalkracht	81
12	100 % normaalkracht	94
12	100 % buiging	120
12	50 % normaalkracht, 50 % buiging	102
10	100 % buiging	125

Als uitgangspunt voor de detailcategorie is een dekplaatdikte van 12 mm genomen (iets conservatief voor een dekplaatdikte van 10 mm). Op basis van de bovenstaande tabel is de aangehouden classificatie gelijk aan 95 ($1 + 0.25 b^2$), waarin b is het aandeel buiging in de spanningsrange ($b = 0$ voor zuiver wisselende normaalkracht, $b = 1$ voor zuiver wisselende buiging). Uitwerking van deze vergelijking levert:

- 100% normaalkracht: detailcategorie is 95 (dicht bij 94 in bovenstaande tabel)
- 50% normaalkracht, 50% buiging: detailcategorie is 101 (dicht bij 102)
- 100% buiging: detailcategorie is 119 (dicht bij 120)

1) t/m 4) Kunnen ook toegepast worden voor stuikverbindingen in dekplaten verstijfd met trogverstijvers.

5) t/m 11) Vertaling van de resultaten van TU Graz, en identiek aan de tabel voor klinknagelverbindingen elders in de RBK. Er is voor gekozen om deze details hier te herhalen zodat een compleet overzicht van alle te toetsen details in een orthotroop rijdek met open verstijvers in één tabel ontstaat.

12) en 16) De detailcategorieën zijn rechtstreeks overgenomen uit EN 1993-1-9. Het punt waar de spanningen uitgelezen moeten worden – 10 mm vanaf de intersectie – is zodanig gekozen dat verwacht wordt dat buiging over de plaat veroorzaakt door de globale geometrie meegenomen wordt terwijl de spanningsconcentratie ten gevolge van de las niet meegenomen wordt. Dit is naar verwachting een goede – enigszins conservatieve – benadering van de nominale spanning.

13) De detailcategorie is rechtstreeks overgenomen uit EN 1993-1-9. Zie bijlage C voor de spanning ten gevolge van buiging en zie de beschrijving van details 12) en 16) (hierboven) voor de locatie van de spanningsbepaling.

12) t/m 16), 19) t/m 23), 25) en 26) De locatie voor de bepaling van de nominale spanning afkomstig uit een eindige-elementenmodel van een rijvloer is niet eenduidig. In [10] zijn de detailcategorieën meestal afgeleid op basis van gemeten rekken. In veel gevallen zijn de rekstroken geplakt op een afstand van 15 mm van de wortel van de las. Uitgaande van een las met keelmaat $a = 4$ en een lashoek van 45° betekent dit dat de spanning op 9,3 mm vanaf de lasteen bepaald is. In een plaalementenmodel kan een afstand van 15 mm van de intersectie van de platen

kunnen leiden tot een onderschatting van de spanning, omdat het verstijvende effect van de las niet in het plaalementenmodel verdisconteerd is. Daarom is uitgegaan van de afstand 9,3 mm, afgerond naar 10 mm.

13), 19), 20) en 26) De vertaling van een buigend moment in de plaat naar een nominale spanning in de las is gebaseerd op eindige-elementenanalyses in bijlage C. Voor hoeklassen overwegend belast op druk bij de laswortel, locatie scheur in de las, is in het onderzoek voor de Merwedeburg een hogere detailcategorie afgeleid van 80, zie bijlage B bij dit rapport. Omdat de hogere detailcategorie enigszins onzeker is, is gekozen voor een standaarddetailcategorie van 36*, en enkel als dit onvoldoende blijkt over te gaan op 80 onder de voorwaarde dat ééns per zes jaar visueel geïnspecteerd wordt. NB deze detailcategorie geldt enkel voor een enkele lasrups omdat de restspanningen bij meer lasrupsen kunnen afwijken en de detailcategorie dan minder afhankelijk kan zijn van de spanningsverhouding. In bestaande brugdekken zijn de aansluitingen dwarsdrager-dekplaat-verstijver inderdaad gelast met een enkele lasrups.

13), 19) en 20) Bij detail 19) wordt een berekening gevraagd met de nominale normaalspanning en de nominale schuifspanning in het detail. Bij de vergelijkbare details 13) en 20) is dit niet gevraagd. De reden is dat de nominale schuifspanning in details 13) en 20) (rondom gelast) zeer laag zal zijn, terwijl dat niet per definitie het geval is in detail 19) (opening in de dwarsdrager).

15) en 23) De hot-spot spanningsmethode lijkt het meest geschikt voor deze details. Detailcategorieën gekozen overeenkomstig bijlage B van NEN-EN 1993-1-9, [7].

20) Volgende opmerkingen:

- De detailcategorie volgens [10] voor trogverstijvers (Fig. 5.81, tabel 5.4) is 40. De lokale spanning met trogverstijvers kan anders zijn dan met bulbverstijvers (denk aan aandeel buiging in de spanningswisseling) is deze detailcategorie genomen bij gebrek aan proeven op beter gelijkende geometrieën.
- Normaliter moet de spanning voor een scheur in de las worden beschouwd over de keeldoorsnede. Echter in de regressie-analyse in [10] is dat niet gedaan.
- De verschillende proevenseries laten een zeer grote spreiding zien. Dit wordt mogelijk veroorzaakt doordat de verhouding plaatdikte/keelmaat verschilt per proevenserie en daarmee geen rekening gehouden is in de regressieanalyse. Een andere mogelijke oorzaak is verschillende mate van excentriciteiten in de kruisverbinding.
- Om de bovengenoemde redenen is geen gebruik gemaakt van de detailcategorie 40, maar van de nominale detailcategorie 36* met spanningen bepaald over de keeldoorsnede.

14), 22) In [10] wordt een classificatie van 56 aangehouden voor zowel een scheur in de trog als in het dwarsdragerlief bij een doorgelast detail (plaatje detail 1b, Tabel 9.3, pag. 330). Deze lage detailcategorie lijkt niet vreemd voor de scheur in de trog, omdat hier (waarschijnlijk) geen sprake is van een volledige doorlassing en vanwege excentriciteit in de stuikverbinding. Voor het dwarsdragerlief lijkt deze detailcategorie echter te laag. In het proefschrift is verder ook niet aangegeven waar de scheuren geconstateerd zijn in de proevenseries in fig. 5.81. Een nominale

detailcategorie van 80 conform een 'normale' kruisverbinding voor de niet-onderbroken plaat c.q. welded transverse attachment lijkt hier op zijn plaats.

21) De detailcategorie is rechtstreeks overgenomen uit [7]. Voor de locatie van de spanningsbepaling, zie de beschrijving voor details 12) en 16).

24) Hot-spot detailcategorie voor dekplaatscheuren in eerste instantie identiek aangehouden als in [10]. Echter de geometrieovergang van een tweezijdig gelast detail is iets minder scherp dan in het referentiedetail van [10] (scheur vanuit de lasteen i.p.v. de laswortel). Daarnaast is in [10] al geconstateerd dat detailcategorie 125 conservatief is t.o.v. de proefresultaten. Voor de Merwedeburg is op basis van alternatieve proeven een hogere hot-spot detailcategorie van 165 afgeleid. Deze afleiding is weergegeven in bijlage A bij dit rapport. Het aantal proefresultaten en proefseries die de basis vormen van detailcategorie 165 is echter gering en de sterkte zal afhangen van de geometrie van de las (lashoek en afronding van de lasteen). Daarom is gekozen voor een standaarddetailcategorie van 125, en enkel als dit onvoldoende blijkt over te gaan op 165 onder de voorwaarde dat ééns per vijf jaar visueel geïnspecteerd wordt.

NB1 Wanneer er veel reparatielassen aanwezig zijn kunnen de restspanningen hoog zijn en kan de detailcategorie dalen. Hiermee is geen rekening gehouden in detailcategorie 165, aangezien er (nog) geen dekken bekend zijn met dekplaatscheuren in geval van open verstijvers.

NB2 Momenteel loopt er een onderzoek in opdracht van Rijkswaterstaat waarbij een breukmechanicamodel voor de dekplaatscheur bij rijdekken met trogprofielen wordt afgeleid op basis van eindige-elementenmodellen. Op basis van de uitkomsten van dit model wordt de detailcategorie mogelijk aangepast.

25) 'Standaard' detailcategorie is 80. Met een kleine excentriciteit in de aansluiting (5% van de plaatdikte) ontstaat een redelijk gelijke detailcategorie. Omdat er geen geometrie-overgang (anders dan de excentriciteit) aanwezig is, is er geen dikte-effect in het geval van zuivere normaalkracht. Bij buiging is dit er wel enige invloed van de plaatdikte. De plaatdikte toegepast in de analyse is daarom gelijk gesteld aan 12 mm, hetgeen bij buiging licht conservatief is ten opzichte van een 10 mm dikke plaat.

Tabel 8. Breukmechanica-berekeningen t.b.v. detail 25).

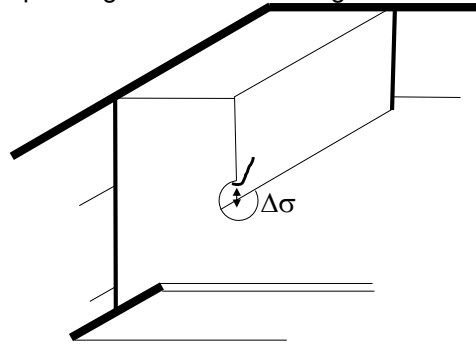
Plaatdikte [mm]	Normaalkracht en / of buiging	Detailcategorie
25	100% normaalkracht	75
12	100 % normaalkracht	74
12	100 % buiging	109
12	50 % normaalkracht, 50 % buiging	87
10	100 % normaalkracht	74

Uitgangspunt voor de detailcategorie is een plaatdikte van 12 mm (lijf dwarsdrager, trog is dunner). Op basis van de bovenstaande tabel is de aangehouden classificatie gelijk aan 80 ($1 + 0.35 b^2$), waarin b is het aandeel buiging in de spanningsrange ($b = 0$ voor zuiver wisselende normaalkracht, $b = 1$ voor zuiver wisselende buiging). Uitwerking van deze vergelijking levert:

- 100% normaalkracht: detailcategorie is 80
- 50% normaalkracht, 50% buiging: detailcategorie is 87
- 100% buiging: detailcategorie is 108

Algemeen

De scheurlocatie in de trog vanuit de kopse zijde van de las, in de figuur hieronder 'vertaald' naar een rijdek met bulbprofielen, komt voor in orthotrope rijdekken met trogprofielen, door vervorming van de trog. Voor bulbprofielen valt hier echter geen spanning in verticale richting te verwachten. Daarom is dit detail niet meegenomen.



6 Referenties

- [1] Rapport F-5-15-2007. A. Taras, R. Greiner. Statische Festigkeit und Ermüdungsfestigkeit genieteter Bauteile - Auswertung der Versuchsdaten und Bemessungsvorschläge.
- [2] A. Taras, R. Greiner. Development and application of a fatigue class catalogue for riveted bridge components. Structural engineering international 1 (2010) 91-103.
- [3] A. Taras, R. Greiner. Versuche an genieteten Brückenlängsträgern Statisches Verhalten, Ermüdungsfestigkeit und Rissausbreitung. Stahlbau 77 (2008) 507-514.
- [4] B. Kühn et al. ECCS rapport 'Recommendation for existing structures'.
- [5] Movares. A27 beoordelen 3 stalen brugconstructies. Eindrapportage Merwedebrug Rekenrapportage vermoeiing Versie 3.0, 15 november 2016.
- [6] TNO 2016 R11519 Verbreding A27 – Diverse adviezen i.v.m. vermoeiing van de boogbrug over de Merwede, 31 januari 2017.
- [7] NEN-EN 1993-1-9+C2:2012 Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-9: Vermoeiing. NEN/CEN, 2012.
- [8] Rijkswaterstaat RTD 1006:2013. Richtlijn Beoordeling Kunstwerken Versie 1.1 Definitief, 27 mei 2013.
- [9] BS 7910:2013+A1:2015. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. BSI, 2015.
- [10] M.H. Kolstein. Fatigue classification of welded joints in orthotropic steel bridge decks. Dissertatie TU Delft, 2004.

7 Ondertekening

Delft, <datum>

TNO

dr.ir. A.H.J.M. Vervuurt
Afdelingshoofd

prof.dr.ir. J. Maljaars
Auteur

dr.ir. R.J.M. Pijpers
2^e lezer

A Dekplaatscheur bij bulbprofiel of dwarsdrager

Hieronder volgt een uittreksel van TNO rapport TNO 2016 R11519 “Verbreding A27 – Diverse adviezen i.v.m. vermoeiing van de boogbrug over de Merwede”.

De dekplaatscheur, ter plaatse van de las met een bulbverstijver en ter plaatse van de las met een dwarsdrager, is een detail dat veelvuldig voorkomt in het orthotrope rijdek van de brug bij Gorinchem. Voor dit detail heeft Movares onvoldoende restlevensduur berekend.

In de berekening door Movares is voor de dekplaatscheur een detailcategorie van 125 aangehouden ($\Delta\sigma_C$ bij $2 \cdot 10^6$ wisselingen is 125 MPa), conform [10] en de Nationale Bijlage bij EN 1993-2. In dit hoofdstuk wordt nagegaan in hoeverre deze detailcategorie conservatief is. Daarnaast wordt nagegaan in hoeverre de spanningsberekening door Movares voor dit detail conservatief is.

A.1 Evaluatie detailcategorie

In vrijwel alle in de literatuur te vinden proevenseries is een trekbelasting aangebracht op de beproefde geometrie. Op druk belaste proeven – relevant voor de dekplaatscheur – zijn veel schaarser. In hoofdstuk 7.3.2 van [10] staan drie relevante proevenseries, allen uitgevoerd door The Welding Institute (TWI). De geometrie is overeenkomstig figuur 5.1. De voor deze proevenseries berekende karakteristieke vermoeiingssterkte (5% onderschrijdingskans) is:

- $2a = 92$ mm, met spleet bij de lasteen. $\Delta\sigma_C = 139$ MPa
- $2a = 920$ mm, met spleet bij de lasteen. $\Delta\sigma_C = 160$ MPa
- $2a = 100$ mm, zonder spleet bij de lasteen. $\Delta\sigma_C = 146$ MPa.

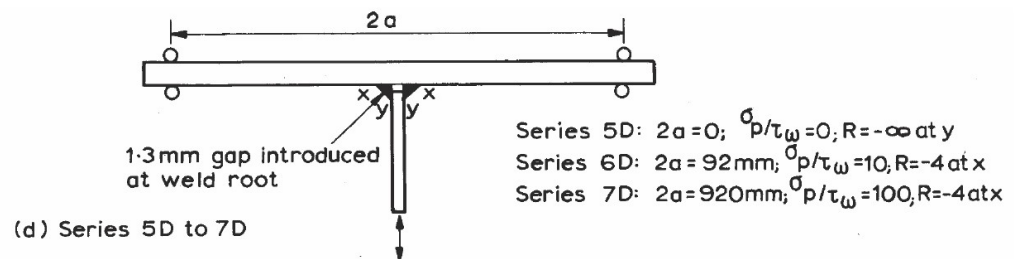


Fig. 7.1 Geometrie proevenseries die relevant zijn voor dekplaatscheuren.

In alle gevallen is de vermoeiingssterkte gebaseerd op rekken gemeten 15 mm vanaf de rand van de bulb of het dwarsdragerlijf en volgens het proefschrift is de lasbeenlengte ca. 9 mm. De afstand tussen rekstrook en lasteen bedraagt dus 6 mm.

De detailcategorie 125 is op basis van de bovengenoemde proevenseries in [10] afgeleid via regressie van alle proefstukken. Echter, er zijn verschillende geometrieën gebruikt, dus de spreiding wordt op deze wijze kunstmatig groot. In

een gesprek met de heer Kolstein heeft hij aangegeven dat dit is doorgevoerd wegens het geringe aantal proeven per serie.

De scheurlocatie is ter plaatse van de lasteen. In het kader van het huidige onderzoek naar de Merwedeburg is voor alle proevenseries de nominale spanning berekend aan de lasteen op basis van lineaire extrapolatie. Daarbij resulteren de volgende karakteristieke vermoeiingssterktes:

- $2a = 92 \text{ mm}$, met spleet bij de lasteen. Kar. vermoeiingssterkte $139 \text{ MPa} \times 46 / (46-6.5) = 162 \text{ MPa}$
- $2a = 920 \text{ mm}$, met spleet bij de lasteen. Kar. vermoeiingssterkte $160 \text{ MPa} \times 460 / (460-6.5) = 162 \text{ MPa}$
- $2a = 100 \text{ mm}$, zonder spleet bij de lasteen. Kar. vermoeiingssterkte is $146 \text{ MPa} \times 50 / (50-5.5) = 164 \text{ MPa}$

Het resultaat voor de drie proevenseries is vrijwel identiek. Daarom is het verantwoord om uit te gaan van één groep, met een detailcategorie gelijk aan ca. 160, voor spanning aan de lasteen.

De bovengenoemde detailcategorie is erg hoog. In de praktijk is de vermoeiingssterkte in hoge mate afhankelijk van de uitvoering. Om deze reden hebben M.H. Kolstein en de auteur van dit rapport een aantal inspectiefoto's van de onderzijde van het rijdek bekeken. Daaruit is geconcludeerd dat het laswerk er in het algemeen mooi regelmatig uitziet. Om deze reden is in de volgende paragrafen uitgegaan van de hoge detailcategorie van 160.

A.2 Evaluatie spanningsberekening

De analyse van Movares is gebaseerd op een schaalementenmodel, waarbij de spanning is uitgelezen in de knoop tussen bulb en dekplaat. Dit model geeft een benadering van de werkelijke geometrie, waarbij het op voorhand niet is te beredeneren of deze gunstiger of ongunstiger is dan de werkelijke geometrie. Om deze reden is een aantal eenvoudige eindige-elementenanalyses uitgevoerd van de geometrie.

Als eerste is de hot-spot spanning bepaald voor de proefstukken van TWI met behulp van plane strain eindige-elementenmodellen. De hot-spot spanning is conform de internationale standaard bepaald als extrapolatie naar de lasteen van spanningen op $0.4T$ en $1T$ afstand verwijderd van die lasteen, waarin T = de plaatdikte. Het resultaat van die analyse is weergegeven in figuur 5.2.

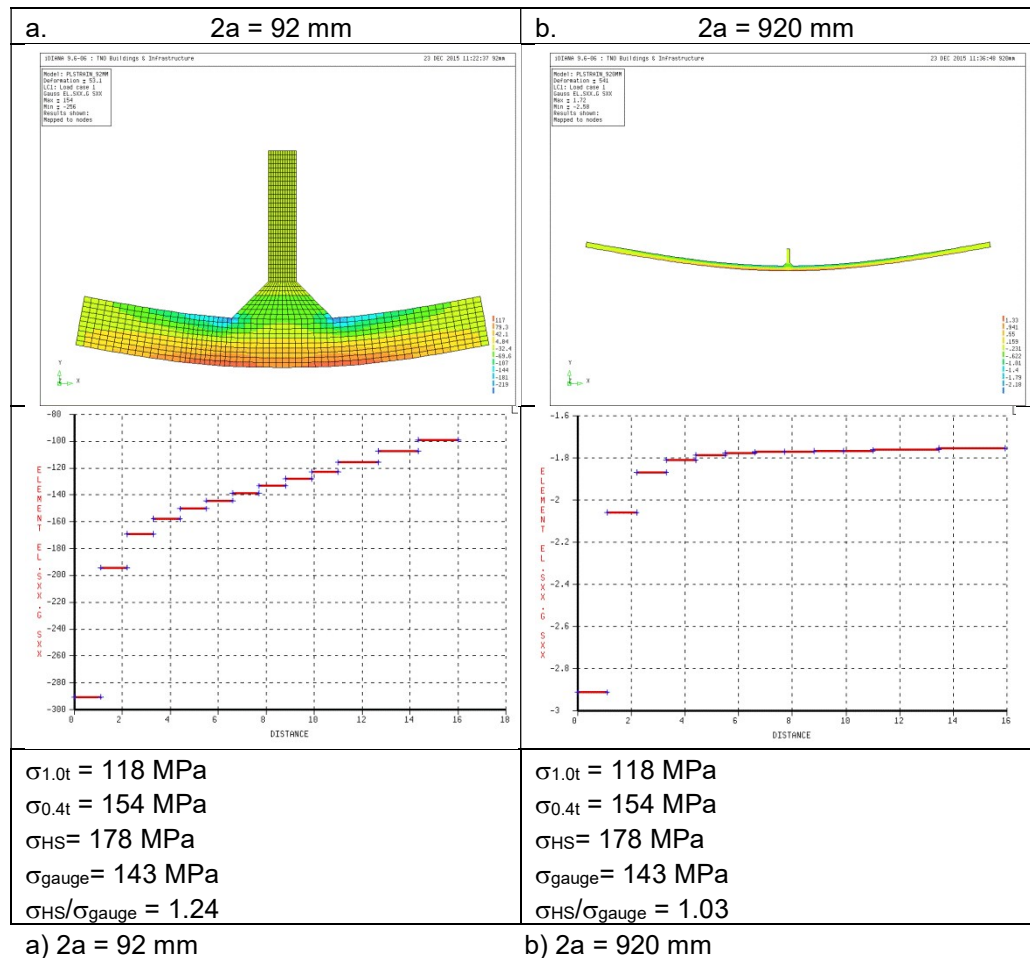


Fig. 7.2 Eindige-elementenmodellen ter bepaling van de hot-spot spanning in de proevenseries van TWI

Voor de 92 mm geometrie geldt een hot-spot spanning van $\sigma_{HS} = 178 \text{ MPa}$. Op de positie van de rekstrook geldt een spanning van $\sigma_{gauge} = 143 \text{ MPa}$. De verhouding $\sigma_{HS} / \sigma_{gauge} = 1.24$. De karakteristieke detailcategorie van $\Delta\sigma_{C,gauge} = 139 \text{ MPa}$ op basis van σ_{gauge} resulteert derhalve in een hot-spot detailcategorie van $\Delta\sigma_{C,HS} = 139 \times 1.24 = 172 \text{ MPa}$.

Voor de 920 mm geometrie geldt een verhouding $\sigma_{HS} / \sigma_{gauge} = 1.03$. De karakteristieke detailcategorie van $\Delta\sigma_{C,gauge} = 160 \text{ MPa}$ op basis van σ_{gauge} resulteert derhalve in een hot-spot detailcategorie van $160 \times 1.03 = 165 \text{ MPa}$.

A.3 Voorbehoud

Opgemerkt wordt dat deze detailcategorie zeer hoog is. Ter vergelijking: in EN 1993-1-9 komt enkel moedermateriaal hierbij in de buurt, met een detailcategorie 140 à 160 MPa. Verklaringen voor de hoge vermoeiingssterkte zijn de gunstige belastingsituatie (buiging, waarbij de initiatieelocatie onder druk komt) en de conservatieve bepaling van de spanningswisselingen. Voor ontwerpberekeningen

wordt een dergelijke detailcategorie als te hoog ervaren. Het gaat hier echter om een bestaande brug. Een vermoeiingsschadeberekening met deze detailcategorie kan ondersteuning bieden aan de vraag of het dek versterkt zou moeten worden met een hoge-sterktebeton overlaging. Het geeft geen garantie dat er geen enkele dekplaatscheur tijdens de restlevensduur zal optreden.

Vanwege de hoge detailcategorie wordt aanbevolen om het rijdek periodiek te (blijven) inspecteren op vermoeiingsscheuren, tezamen met de algemene periodieke inspectie die één maal per vijf jaar plaatsvindt.

B Op druk belaste hoeklassen

Hieronder volgt een uittreksel van TNO rapport TNO 2016 R11519 “Verbreiding A27 – Diverse adviezen i.v.m. vermoeiing van de boogbrug over de Merwede”.

De aansluiting tussen het dwarsdragerlijf en de bulb is gerealiseerd door middel van hoeklassen. Movares heeft deze details gecontroleerd op basis van detailcategorie 36* volgens EN 1993-1-9. Voor deze detailcategorie geldt: $\Delta\sigma_c = 40$ MPa, $m_1 = 3$, knikpunt $1 \cdot 10^7$ wisselingen en afkapwaarde bij 10^8 wisselingen. Op basis van de literatuur is er geen reden om af te wijken van deze detailcategorie voor op trek belaste verbindingen, zie rapport TNO 2016 R11519.

De details in de brug worden echter overwegend op druk en op buiging belast. Bij de laswortel zijn de restspanningen in het algemeen minder hoog dan bij de lasteen, zeker voor lassen bestaande uit een enkele lasrups. Daardoor kan de spanningsverhouding invloed hebben op de detailcategorie. In veel details in [10], waarbij de laswortel overwegend op druk en deels op buiging werden belast, traden falen telkens op bij de lasteen. Op basis hiervan kan een ondergrens van de detailcategorie voor laswortels van overwegend op druk belaste lassen worden afgeschat. Uitgaande van een (gangbare) detailcategorie van 80 voor een lasteen, een plaatafmeting van $t = 10$ mm en een keelmaat van de las van $a = 5$ mm, resulteert een detailcategorie 80 voor laswortels van overwegend op druk belaste lassen.

$$\Delta\sigma_{C,wortel,druk} = \frac{t}{2a} \Delta\sigma_{C,teen}$$

De ingeschatte ondergrens detailcategorie 80 is veel hoger dan de detailcategorie 36* voor op trek belaste laswortels. Het is waarschijnlijk dat er wel scheurinitiatie optreedt, maar dat de scheur vervolgens niet doorgroeit aangezien er drukspanningen aanwezig zijn.

De hierboven ingeschatte ondergrens detailcategorie 80 is onzeker. Daarom verdient het aanbeveling om deze lassen, ook als deze wel zouden voldoen bij een analyse op basis van detailcategorie 80, mee te nemen in de periodieke algemene inspectie. Dit betekent eens per vijf jaar visueel onderzoeken. Deze inspectie is niet afgeleid, maar ingeschat rekening houdend met het volgende:

- Dit type scheuren groeit zeer langzaam. Zelfs op trek belaste hoeklassen vertonen een langzame scheurgroei (ref. persoonlijke correspondentie met Gunnar Solland, DNV-GL).
- De gevolgen van falen van dit type detail zijn relatief gering. Enkel bij extreem grote scheuren in de aansluiting dwarsdrager – hoofdligger kunnen potentieel gevaarlijke verkeerssituaties ontstaan. Bezijken van de hoofdconstructie door dit type scheur is erg onwaarschijnlijk.

C Op buiging belaste hoeklassen

Vermoeiingsproeven op hoeklassen zijn voornamelijk uitgevoerd met een trekbelasting. De detailcategorie is daarbij gebaseerd op de spanningsbepaling volgens $\sigma = F / 2a$, waarbij F is de kracht op de verbinding en a is de keelmaat van de las. De vraag is nu hoe de spanning te bepalen bij een op buiging belast detail. In figuur C.1 zijn drie mogelijke varianten weergegeven. De bijbehorende nominale spanningen zijn als volgt:

Model a

Het secundaire oppervlaktemoment is gelijk aan:

$$I = \frac{1}{12} \cdot (2a + t)^3 - \frac{1}{12} t^3$$

$$I = \frac{1}{12} \cdot (8a^3 + 12a^2t + 6at^2 + t^3 - t^3)$$

$$I = \frac{1}{12} \cdot (8a^3 + 12a^2t + 6at^2)$$

$$I = \frac{a}{6} \cdot (4a^2 + 6at + 3t^2)$$

Het weerstandsmoment op locatie t/2 vanaf de neutrale lijn is gelijk aan:

$$W_{t/2} = \frac{I}{t/2} = \frac{a}{3t} \cdot (4a^2 + 6at + 3t^2)$$

De nominale spanning is gelijk aan:

$$\sigma_{nom} = \frac{3Mt}{a(3t^2 + 6at + 4a^2)} \quad (a)$$

Model b

De nominale spanning is gelijk aan:

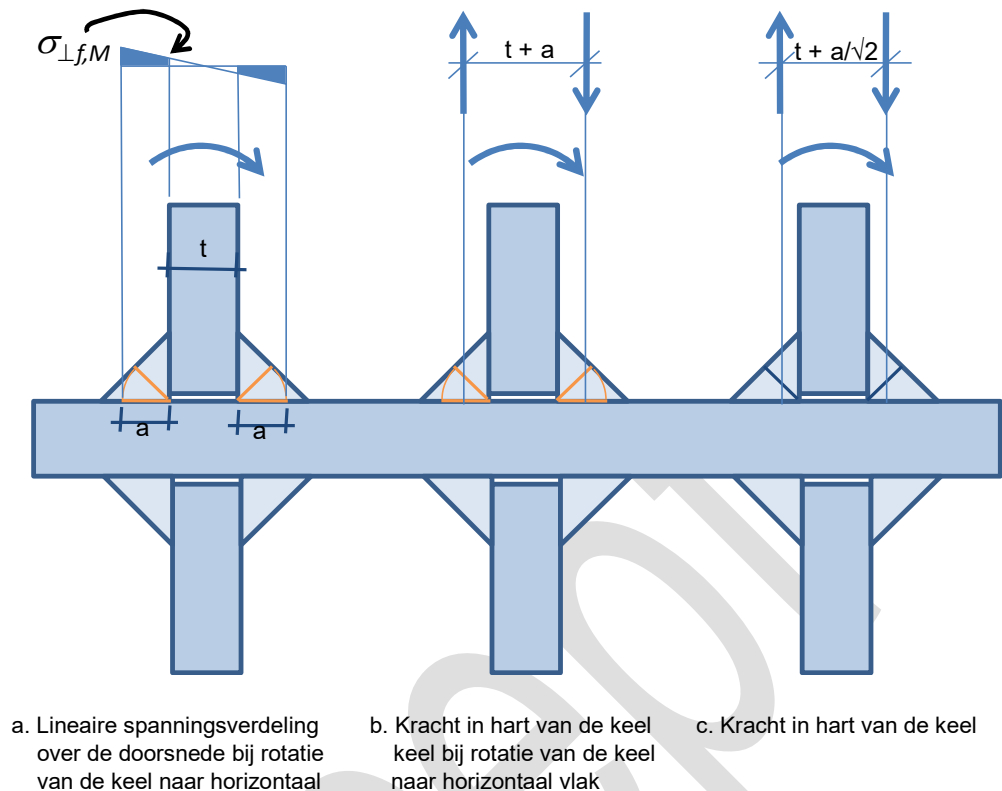
$$\sigma_{nom} = \frac{M}{a(a+t)} \quad (b)$$

Model c

De nominale spanning is gelijk aan:

$$\sigma_{nom} = \frac{M}{a(a/\sqrt{2} + t)} \quad (c)$$

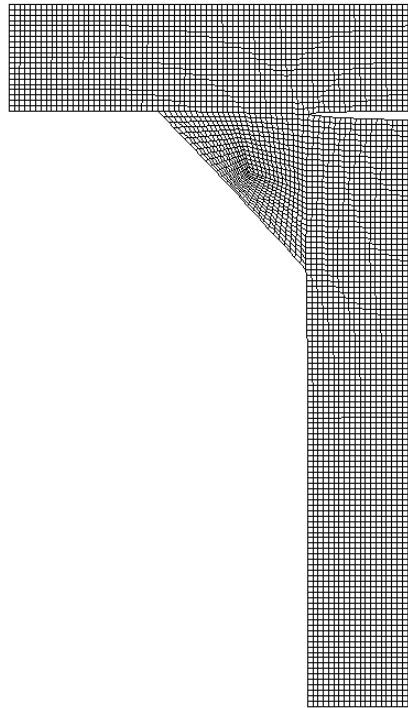
Alle modellen geven een vereenvoudiging van de werkelijke, complexe spanningsverdeling, zoals dat ook is toegepast voor de nominale spanning bij op normaalkracht belaste hoeklassen.



Figuur C.1. Varianten om de nominale spanning in de las te bepalen in geval van buiging.

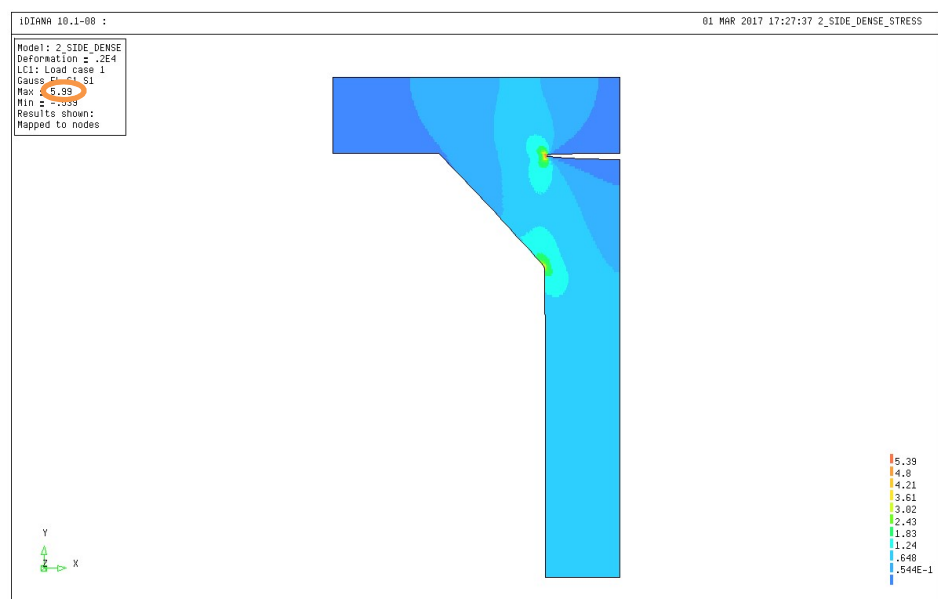
Om na te gaan welk model de werkelijkheid het beste beschrijft, is een eindig-elementenmodel opgesteld waarbij de spanning ter plaatse van de laswortel is vergeleken tussen belasting van de verbinding op normaalkracht en belasting op buiging. De toegepaste plaatdikte is $t = 10$ mm en de keelmaat is $a = 5$ mm. Er is gebruik gemaakt van symmetrie, resulterend in een model bestaande uit $\frac{1}{4}$ en $\frac{1}{2}$ van de werkelijke geometrie voor respectievelijk belasting door normaalkracht en belasting door buiging.

Er is gebruik gemaakt van 4-knoops plane strain elementen. Vanwege optredende singulariteit is de spanning afhankelijk van de meshfijnheid. Om dit te ondervangen is exact dezelfde mesh toegepast voor de case met normaalkracht als voor de case met buiging, en is niet de absolute spanning maar de spanningsverhouding tussen normaalkracht en buiging beschouwd. Om te controleren of dit inderdaad resulteert in de gewenste meshonafhankelijkheid is een relatief grove en een relatief fijne mesh beschouwd. De grove mesh is weergegeven in figuur C.2. De fijne mesh heeft 4 x zo veel elementen.

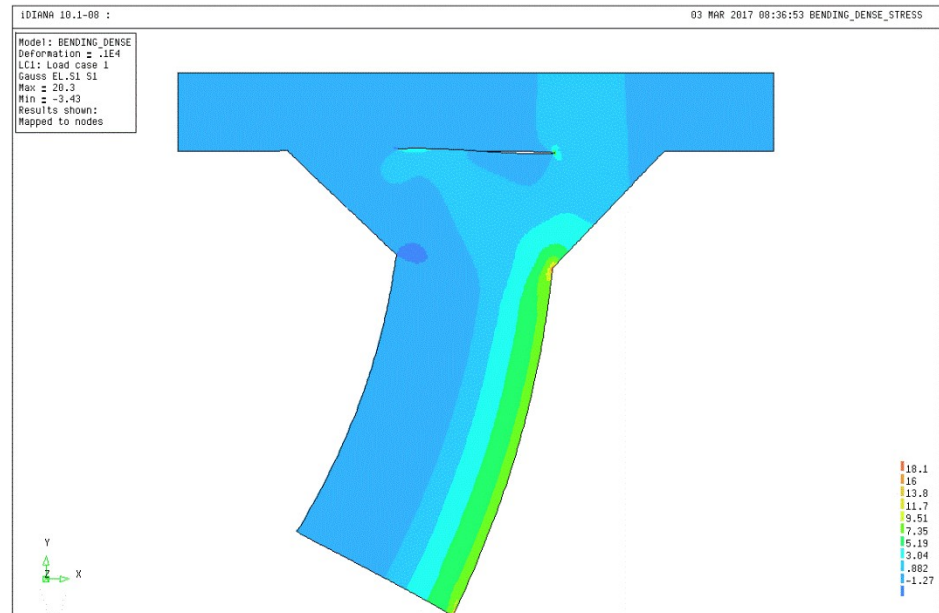


Figuur C.2 Vervormde mesh van de hoeklasverbinding belast op trek, grove mesh (vervormingen geschaald met factor 2000).

De kracht toegepast op het model belast op normaalkracht bedraagt $F = 10$ N/mm. Het moment toegepast op het model belast op moment bedraagt 138,4 Nmm/mm. De beschouwde spanning is de eerste hoofdspinning (hoofdtrekspanning) in het integratiepunt dat het dichtst bij de wortel van de las ligt.



Figuur C.3 Eerste hoofdspanning in de integratiepunten voor het model met fijne mesh belast op normaalkracht (Nominale spanning in de las bedraagt 1 N/mm². Vervormingen geschaald met factor 2000).



Figuur C.4 Eerste hoofdspanning in de integratiepunten voor het model met fijne mesh belast op buiging (Nominale spanning in de las bedraagt 8,304 N/mm². Vervormingen geschaald met factor 1000).

De trekhoofdspanning in het integratiepunt nabij de wortel bedraagt 5,99 N/mm² bij belasting door normaalkracht en 9,8 N/mm² bij belasting door buiging, beide voor de fijne mesh. Dit resulteert in een verhouding $9,8/5,99 = 1,64$ voor de fijne mesh. Voor de grove mesh is deze verhouding gelijk aan 1,60. Gebruik makend van vergelijkingen (a) t/m (c) voor buiging en vergelijking (d) voor normaalkracht volgt een verhouding voor de nominale spanning gelijk aan 1,19; 1,85 en 2,05 voor respectievelijk model a, b en c. Het resultaat van de eindig-elementenberekening geeft aan dat model a niet conservatief is, dat model b conservatief is en model c zeer conservatief is. In de tabellen voor de RBK is daarom model b toegepast.

D Artikel “Development and application of a fatigue class catalogue for riveted bridge components”

Hieronder volgt het artikel:

A. Taras, R. Greiner. Development and application of a fatigue class catalogue for riveted bridge components. Structural engineering international 1 (2010) 91-103.

Concept

E Artikel “Versuche an genieteten Brückenlängsträgern Statisches Verhalten”

Hieronder volgt het artikel:

A. Taras, R. Greiner. Versuche an genieteten Brückenlängsträgern Statisches Verhalten, Ermüdungsfestigkeit und Rissausbreitung. Stahlbau 77 (2008) 507-514

Concept