

Inspectie-interval is geen toeval – vermoeding van bruggen (2) : bepalingmethode voor stalen brugdekken

Citation for published version (APA):

Maljaars, J., & Giezen, C. (2015). Inspectie-interval is geen toeval – vermoeding van bruggen (2) : bepalingmethode voor stalen brugdekken. *Bouwen met Staal*, 242, 52-59.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2015

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

prof.dr.ir. J. Maljaars en ir. C. Giezen

Johan Maljaars is werkzaam bij TNO in Delft als expert op het gebied van mechanica en vermoeiing van metaalconstructies. Hij is tevens hoogleraar aan de TU Eindhoven voor de leerstoel aluminiumconstructies.

Cecile Giezen werkt ook bij TNO in Delft als onderzoeker en projectleider binnen de infrastructuur.

Met dank aan Rijkswaterstaat voor de ondersteuning bij dit artikel.

Inspectie-interval is geen toeval

Het verstrijken van de vermoeiingslevensduur van stalen verkeersbruggen stelt beheerders ervan voor een aantal dilemma's. Wanneer moet ik de eerste inspectie laten plaatsvinden en bij welke details? Wat is het inspectie-interval voor voldoende veiligheidsniveau? Als er een scheur gevonden wordt, hoeveel tijd heb ik om een reparatie uit te voeren? Welke inspectiemethode moet ik toepassen? Dit artikel geeft een (berekings)methode om een gefundeerd antwoord te kunnen geven op deze vragen.

Een aantal bestaande stalen verkeersbruggen heeft vermoeiingsproblemen. Door de wisselende belasting door vrachtwagens ontstaan scheuren vanuit initiële lasdefecten. De scheuren groeien en kunnen uiteindelijk resulteren in falen van de constructie. De veel voorkomende scheuren in brugdekken en de reparatiemethoden daarvan zijn beschreven in [1] en [2]. Tot nog toe hebben vermoeiingsproblemen zich voornamelijk gemanifesteerd in de brugdekken van verkeersbruggen in het rijkswegennet. Berekeningen wijzen uit dat brugdekken in het onderliggende wegennet ook met deze problematiek te maken krijgen; de eerste scheuren zijn al gedetecteerd. In de toekomst kunnen ook de hoofddragconstructies van bruggen te maken krijgen met vermoeiingsproblemen. De werkelijke levensduur van een brug is in veel gevallen nog niet verstreken, wanneer de berekening aangeeft dat het einde van de ontwerp levensduur bereikt is. Dit verschil komt doordat de berekende levensduur is gebaseerd op een zekere, voorgeschreven overlevingskans en de vermoeiingslevensduur een grote spreiding kent. Daarnaast is vermoeiing een degradatiemechanisme dat voortschrijdt in de tijd. Een bestaande brug waarvoor een berekening uitwijst dat de rekenkundige vermoeiingslevensduur verstreken is, kan worden geïnspecteerd. Indien een scheurtje gedetec-

teerd is, is er nog tijd om deze te repareren en de brug kan veilig gebruikt worden tot de volgende inspectie. Dat stelt beheerders van bruggen voor een aantal vragen.

1. Wanneer moet ik de eerste vermoeiingsinspectie laten plaatsvinden?
2. Welke details moet ik laten inspecteren?
3. Wat is het benodigde inspectie-interval voor een voldoende veiligheidsniveau?
4. Als er een scheur gevonden wordt, hoeveel tijd heb ik ter beschikking om een reparatie uit te voeren?
5. Welke inspectiemethode moet ik toepassen?

Aan de basis van de beantwoording van deze vragen liggen restlevensduurvoorspellingsmodellen, waaronder scheurgroei modellen. Inmiddels zijn deze modellen voldoende gevalideerd met proeven en is de procedure voldoende uitgewerkt in normen zoals BS 7910^[3] om deze in de praktijk te kunnen toepassen. Toch zijn er slechts enkele (gespecialiseerde) ingenieursbureaus die dergelijke modellen in huis hebben, afgezien van universiteiten en onderzoeksinstellingen waar deze modellen al langere tijd worden gebruikt. Dit wordt mede veroorzaakt door geen of slechts beperkte aandacht voor deze modellen in de opleiding en door het ontbreken van een Europese norm voor scheurgroei modellen. Het is de overtuiging van de schrijvers van dit artikel dat het mogelijk is en loont om scheurgroei modellen breder toe te passen in de praktijk, bijvoorbeeld door ingenieursbureaus die werken voor beheerders van bestaande bruggen. In dit artikel worden de levensduurvoorspellingsmodellen en de bepaling van de inspectie-intervallen met deze modellen toegelicht. De toepassing van deze modellen wordt gedemonstreerd met een aantal voorbeelden.

Dit artikel is opgesteld in het kader van het Project Renovatie stalen Bruggen (PRB) van Rijkswaterstaat. De bovengenoemde modellen zijn toegepast om de restlevensduur en het inspectie-interval van een aantal details in het orthotrope rijdek vast te stellen. Dit geldt voor rijdekken waarop een overlaging van zeer-hogesterktebeton is aangebracht.

Berekenen totale levensduur

De vermoeiingslevensduur van bruggen wordt normaliter bepaald met normen zoals NEN-EN 1991-2 of NEN 8701 (vermoeiingsbelastingen) en EN 1993-1-9 of de Nationale Bijlage bij NEN-EN 1993-2 (vermoeiingsweerstand). De vermoeiingsweerstand is beschreven door een S-N-curve, die het logaritmische verband weergeeft tussen de spanningsrange en het aantal wisselingen tot bezwijken, (afb. 1). Deze methode is geschikt voor het ontwerp van nieuwe bruggen. De methode kan ook gebruikt worden voor bestaande bruggen om na te gaan welke details kritisch zijn en wanneer er voor het eerst geïnspecteerd moet worden. Dit zijn de details en het tijdstip waarbij de berekende vermoeiingsschade gelijk is aan 1. Als langer wordt gewacht met inspecteren, dan kan het zijn dat niet langer voldaan is aan de wettelijk vereiste betrouwbaarheid. Dit betekent dat de vragen (1) en (2) uit de inleiding (wanneer voor het eerst inspecteren, en welke details inspecteren) beantwoord kunnen worden met de methode op basis van S-N-curven. Alhoewel de methode met S-N-curven redelijk recht-toe-recht-aan is, is het vrij bewerkelijk in uitvoering. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de spanningsanalyse. Voor bepaalde typen scheuren, zoals de dekplaat-scheur, is een eenvoudige methode beschikbaar in de NB bij EN 1993-2. Voor andere scheuren, zoals scheuren in de aansluiting tussen de trog en de dwarsdrager, is een eenvoudig model niet voorhanden. Voor een goed eindige-elementenmodel zie [4]. Voor vermoeiing is een minder bewerkelijke 'globale' aanpak of een aanpak van grof naar fijn vrijwel niet mogelijk. Dit komt enerzijds doordat vermoeiing gaat om lokale details en anderzijds doordat een klein verschil in spanningsrange een grote invloed heeft op de levensduur. Heeft men de spanningsanalyse eenmaal uitgevoerd, dan is de berekening van de ontwerp levensduur op basis van S-N-curven eenvoudig. De vragen (3), (4), en (5) (inspectie-interval, inspectiemethode, en de tijd tot reparatie)

a_{i-1}	$a_i = 1,01a_{i-1}$	ΔK_i (vgl. 1)	$(da/dN)_i$ (afb. 3)	$\Delta N_i = (a_i - a_{i-1}) / (da/dN)_i$	$N = \sum_i N_i$
0,2500	0,2525	88,8	$3,65 \cdot 10^{-7}$	$6,84 \cdot 10^3$	$6,84 \cdot 10^3$
0,2525	0,2550	89,3	$3,71 \cdot 10^{-7}$	$6,81 \cdot 10^3$	$1,37 \cdot 10^4$
0,2550	0,2576	89,7	$3,76 \cdot 10^{-7}$	$6,77 \cdot 10^3$	$2,04 \cdot 10^4$
...
5,977	6,036	434	$4,27 \cdot 10^{-5}$	$1,40 \cdot 10^3$	$1,10 \cdot 10^8$

Tabel 1. Numerieke oplossing vergelijkingen 1 en 2 (kader p. 47) voor $Y = 1$ en $\Delta\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$ (N en mm).

inspectietechniek	conventioneel ultrasoon	Phased array	TOFD ^{a)}	ACFM ^{b)}
scheur aan de toegankelijke zijde	3	1,5	5	2
scheur aan de andere zijde	3	1,5	2	niet mogelijk

^{a)} TOFD = Time of Flight Diffraction

^{b)} ACFM = Alternating Current Field Measurement

Tabel 2. Scheurdiepte (mm) die met hoge betrouwbaarheid kan worden gedetecteerd volgens BS 7910.

variabele	beschrijving	verdeling	$\mu^{a)}$	$s^{a)}$	$X_d^{a)}$	$\rho^{a)}$
m_1	hellingswaarde 1 ^{b)}	deterministisch	5,10	-	5,10	-
m_2	hellingswaarde 2 ^{b)}	deterministisch	2,88	-	2,88	-
$\log_{10}(A_1)$	scheurgroeiwaarde 1 ^{b)}	normaal	-17,32	0,32	-16,68	0,64
$\log_{10}(A_2)$	scheurgroeiwaarde 2 ^{b)}	normaal	-12,23	0,17	-11,89	0,45
ΔK_0	drempelwaarde ΔK	lognormaal	140	56	63	0,75
VA	variatie scheurgroeiwaarde gedurende scheurgroei	normaal	1,0	0,1	1,0	0
a_0	initiële scheurdiepte	lognormaal	0,15	0,10	0,15	0
a_0/c_0	initiële scheurverhouding	lognormaal	0,62	0,25	0,62	0
a_d	detecteerbare scheurafmeting	Weibull ^{c)}				
T	plaatdikte	uniform	μ	$0,03\mu$	μ	0
L	lasafmeting	uniform	μ	$0,15\mu$	μ	0
$\Delta\sigma$	spanningsranges ^{c)}	deterministisch	meting of bijlage A van NEN 7801			
δ	dynamische stootfactor ^{c)}	normaal	1,0	0,1	1,1	0
C	modelonzekerheid ^{c)}	lognormaal	1,0	0,27	1,0	0,85

^{a)} μ = gemiddelde, s = standaardafwijking, X_d = ontwerpwaarde, ρ = ruimtelijke correlatiecoëfficiënt

^{b)} de scheurgroeiwet is: $(da/dN) = \min(A1\Delta K^{m_1}, A2\Delta K^{m_2})$ als $\Delta K > \Delta K_0$ en $da/dN = 0$ als $\Delta K \leq \Delta K_0$

^{c)} de spanningsintensiteitsrange is $\Delta K = Y\delta C\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$

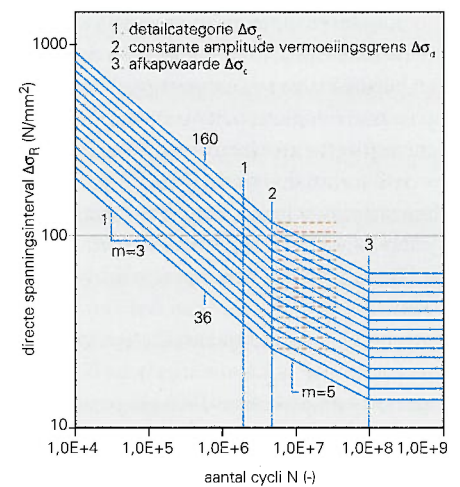
^{d)} de cumulatieve verdelingsfunctie (gelijk aan de Probability of Detection, PoD) is gegeven in onderstaande vergelijking, met parameters volgens tabel 4

$$PoD = 1 - \exp\left[-\left(\frac{a_d - a^*}{\lambda - a^*}\right)^\alpha\right]$$

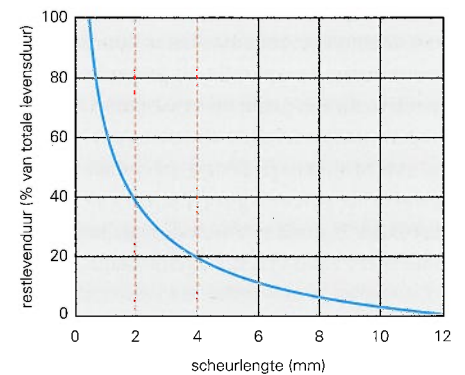
Tabel 3. Verdelingsfuncties van de variabelen (mm en N)^{b)}

techniek	α	λ (mm)	a^* (mm)
visueel	0,5	40	20
ACFM	0,8	1,12	0,8

Tabel 4. Inschatting parameters $PoD^{[2]}$.



1. S-N-curve zoals opgenomen in EN 1993-1-9. De toe te passen curve hangt af van het (las)detail.



2. Verband tussen de restlevensduur en de scheurlengte voor de geometrie van afbeelding 4 (dus niet universeel geldig).

kunnen niet bepaald worden met een berekening met S-N-curven. Met betrekking tot vraag (3) komt het in de praktijk wel voor dat de tijd tussen inspecties even lang gekozen wordt als de tijd tussen ingebruikname van de brug en de eerste inspectie, wanneer tijdens de inspecties geen scheuren worden gevonden. Dit is echter onveilig, omdat kleine scheurtjes niet gevonden kunnen worden in inspecties. Een groot deel van de vermoeingslevensduur zit in de groei van deze kleine scheurtjes. In *afbeelding 2* is dit voor een bepaald type scheur weergegeven, met op de horizontale as een maat voor de scheurgrootte¹ en op de verticale as de restlevensduur. In dit voorbeeld is de restlevensduur van een scheur met lengte 2 mm nog slechts 35% van de totale levensduur, terwijl de scheurlengte bij bezwijken in dit voorbeeld 12 mm bedraagt. Wanneer een inspectietechniek wordt toegepast die een scheur met een lengte van 2 mm met hoge betrouwbaarheid kan detecteren, kan gekozen worden voor een interval tussen inspecties gelijk aan 35% van het interval tussen ingebruikname van de brug en de eerste inspectie (*afb. 3*), bij een gelijk blijvend aantal vrachtwagens per jaar. Stel dat een scheur gevonden wordt met een lengte van 4 mm. Uit *afbeelding 2* volgt¹ een restlevensduur van 20% van de totale levensduur. Dit is dus de tijd waarbinnen de reparatie uitgevoerd moet worden, bij een gelijk blijvend aantal vrachtwagens per jaar. In het algemeen zal het aantal vrachtwagens in de tijd toenemen. In dat geval is het percentage op de verticale as van de *afbeeldingen 2* en *3* niet de tijdsduur, maar het aantal vrachtwagenpassages.

Berekenen levensduur na inspectie

Op basis van curves (*afb. 2*) kunnen de vragen (3) en (4) worden beantwoord (inspectie-interval en tijd tot reparatie). De vraag is hoe het verband in *afbeelding 2* tot stand komt. Hiervoor zijn levensduurvoorspellingsmodellen ter beschikking. De basis van deze modellen is beschreven in *kader 1*. Voor een aantal veel voorkomende typen scheuren in orthotrope rijdekken en voor

een potentiële scheur in de hoofdtraagconstructie is een conservatieve waarde voor de restlevensduur als functie van de scheurgrootte berekend op de wijze zoals beschreven in *kader 1*. De waarden staan in de *afbeeldingen 8 t/m 10* en kunnen als conservatieve ondergrens worden gebruikt. De details en verantwoording van de onderliggende berekeningen zijn weergegeven in *kader 2*. *Afbeelding 8* geeft de ontwikkeling van de scheur in de dekplaat bij de aansluiting met de trog en de dwarsdrager. *Afbeelding 9* geeft de scheurontwikkeling van de scheur door de las tussen de dekplaat en de trog, die tussen de dwarsdragers optreedt. Beide scheuren komen voor in een orthotroop rijdek met trogvormige verstijvers. Zoals te zien groeit een dekplaatscheur veel progressiever dan de langlasscheur. Dit komt onder andere doordat de belasting bij de langlasscheur voornamelijk een opgelegde verplaatsing betreft. Wanneer deze scheur groeit, neemt de drijvende kracht af. *Afbeelding 10* geeft de scheurontwikkeling bij een stuiklas in een onderflens van een plaatligger. Deze scheur groeit sneller dan de twee eerder genoemde scheuren. Dit wordt onder andere veroorzaakt doordat er geen tweede draagweg is of een herverdeling van krachten kan plaatsvinden. *Afbeeldingen 8 t/m 10* kunnen gebruikt worden voor een conservatieve bepaling van het inspectie-interval. Daarvoor dient eerst de totale levensduur berekend te worden op basis van een S-N-curve (inclusief partiële factor). Mocht de berekende levensduur korter zijn dan de beoogde levensduur, dan kan een eerste inspectie uitgevoerd worden op het tijdstip van de berekende levensduur. De tijdsintervallen voor de volgende inspecties volgen door het percentage op de verticale as (*afb. 8 t/m 10*) af te lezen bij de ScheurGrootte die met een Hoge Betrouwbaarheid (SGHB) gedetecteerd kan worden en deze te vermenigvuldigen met de berekende levensduur. Omdat de SGHB altijd groter is dan het initiële defect, is de benodigde periode tussen inspecties altijd korter dan met de S-N-curve berekende levensduur (*afb. 3*). Een voorbeeld: voor een brug met dekplaatdikte 12 mm wijst berekening met S-N-curve uit dat de veilige levensduur van de dek-

plaatscheur gelijk is aan 50 jaar. Na 50 jaar wordt een inspectie uitgevoerd met TOFD (Time of Flight Diffraction). De SGHB met TOFD voor de dekplaat bedraagt naar verwachting rond de 1 mm (zie volgende paragraaf). Een scheurdiepte van 1 mm komt overeen met $1/12 \text{ mm} = 8\%$ van de dekplaatdikte. In dit eenvoudige voorbeeld gaan we uit van een constant aantal vrachtwagenpassages per jaar. Uit *afbeelding 7* blijkt voor een scheur van 8% van de dekplaatdikte een conservatieve inschatting van de restlevensduur van 10% van 50 jaar = 5 jaar. Een veilige benadering is dus om een dergelijke inspectie iedere 5 jaar uit te voeren. Wanneer de beheerder dit interval te kort vindt (wat meestal zo zal zijn), kan een optimaler interval bepaald worden met een nauwkeurigere analyse. Dit kan worden gedaan door het nauwkeuriger bepalen van de belastingen of door gebruik te maken van de kennis uit inspecties. Hierover later meer.

Detectiegrenzen inspectiemethoden

Met de bovenstaande technieken kunnen we dus vragen (1) t/m (4) uit de inleiding beantwoorden. De vraag die overblijft (5) is de keuze van de inspectiemethode. Voor deze keuze is het allereerst belangrijk dat de methode geschikt is voor de detectie van het betreffende type scheur. Zo bestaan methoden die geschikt zijn voor het detecteren van oppervlaktescheuren in vlakke platen, van oppervlaktescheuren bij las-tenen of van door-de-wand-scheuren. Er blijft dan nog een aantal mogelijke inspectietechnieken over. De keuze van de techniek kan dan plaatsvinden op economische gronden, waarbij de volgende aspecten van belang zijn:

- kosten;
- hinder;
- aantal inspecties of inspectie-interval.

Het laatstgenoemde aspect kan met *afbeeldingen 8 t/m 10* bepaald worden. De daarvoor benodigde informatie is de scheurgrootte die met hoge betrouwbaarheid gedetecteerd kan worden. Opgemerkt wordt dat dit niet gelijk is aan de detectielimiet, want dat is de grootte van de scheur waarbij detectie überhaupt mogelijk is. Bij die scheurgrootte is de betrouwbaarheid van

1) De scheurgrootte kan zowel de scheurdiepte als lengte zijn.

Kader 1

Een geschikt model om de restlevensduur voor vermoeiing te kunnen voorspellen van een (las)-detail met een initieel scheurtje is het breukmechanicamodel. De basis daarvan wordt gevormd door de spanningsintensiteitsfactor K , die een maat is voor de lineair elastische spanning in de buurt van een scheurtip. Voor de range, ΔK , kunnen we schrijven:

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

waarin:

$\Delta \sigma$ = spanningsrange van het detail zonder scheur

a = scheurgrootte

Y = geometrische correctiefactor, welke later in dit kader wordt toegelicht.

Uit proeven blijkt een verband te bestaan tussen ΔK en de scheuruitbreiding per wisseling (d_w/d_N). In BS 7910^[9] wordt hiervoor (onder andere) een bilineaire curve gegeven (afb. 4). Bij een grote spanningsrange volgt een grote waarde voor ΔK en dus een grote scheuruitbreiding per wisseling. Evenzo geldt dat een grote scheur resulteert in een grote waarde voor ΔK en dus een grote scheuruitbreiding: grote scheuren groeien sneller dan kleine scheuren. Uit afbeelding 4 volgt een drempelwaarde voor de spanningsintensiteitsrange van $63 \text{ N/mm}^{3/2}$. Bij lagere spanningsintensiteitsranges treedt geen scheurgroei op. We kunnen nu het aantal wisselingen bepalen voor de uitbreiding van een initiële scheur met grootte a_0 tot een eindscheur met grootte a , via de volgende integraal (in N en mm):

$$N = \begin{cases} \int_{a_0}^a \frac{1}{5,21 \cdot 10^{-13} K^3} da & \text{als } \Delta K > 63 \\ \infty & \text{als } \Delta K \leq 63 \end{cases} \quad (2)$$

De constanten en coëfficiënten in vergelijking 2 en afbeelding 4 ($63; 3; 5,21 \cdot 10^{-13}$) zijn overgenomen uit BS 7910^[9] en vormen karakteristieke waarden voor de scheurgroeisnelheid zoals deze is gemeten in proeven.

Een voorbeeld. Gegeven een oneindig grote plaat van elastisch materiaal met een door-de-wand-scheur (afb. 5). Voor deze geometrie is a gelijk aan de halve scheurlengte en Y gelijk aan 1. We

gaan uit van een initiële scheur met een totale lengte van $0,5 \text{ mm}$ ($a_0 = 0,25 \text{ mm}$). De plaat wordt belast door een spanningswisseling van 100 N/mm^2 . Gezocht wordt naar het aantal wisselingen N waarbij de scheur is gegroeid tot een lengte van 12 mm ($a_f = 6 \text{ mm}$). Het antwoord vindt men via integratie van vergelijking 2.

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{5,21 \cdot 10^{-13} (Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a})^3} da =$$

$$\frac{1}{5,21 \cdot 10^{-13} (\Delta \sigma \sqrt{\pi})^3} \int_{a_0}^{a_f} Y^{-3} a^{-\frac{3}{2}} da = \quad (3)$$

$$\frac{1}{5,21 \cdot 10^{-13} (100 \sqrt{\pi})^3} \left[-2a^{-\frac{1}{2}} \right]_{0,25}^6 = 1,10 \cdot 10^6$$

Vergelijking 2 kan ook numeriek opgelost worden. Een eenvoudige numerieke benadering volgt wanneer we de scheur telkens laten uitbreiden met 1% van de bestaande scheurgrootte en het benodigd aantal wisselingen bepalen voor deze scheuruitbreiding. De procedure is gegeven in tabel 1 en het resultaat in afbeelding 6 die eenvoudig kan worden omgewerkt tot afbeelding 2 en vormt daarvan dan ook de basis. Bij een variabele-amplitude-belasting bestaande uit blokken met voor ieder blok i een spanningsrange $\Delta \sigma_i$ en een aantal optredende wisselingen n_i kan de scheurgroeisnelheid $(da/dN)_i = 5,21 \cdot 10^{-13} (\Delta K)_i^3$ bepaald worden voor iedere spanningsrange $\Delta \sigma_i$. De scheuruitbreiding kan vervolgens bepaald worden op basis van het naar het aantal wisselingen n_i gewogen gemiddelde van de berekende $(da/dN)_i$ -waarden. Dit moet worden herhaald voor iedere scheuruitbreiding.

Resteert de geometrische correctiefactor Y . Tot nu toe is het eenvoudige geval beschouwd van een centrale scheur waarvoor geldt $Y = 1$. Een scheurtje aan een las-teen wordt beschouwd volgens afbeelding 7 en gekarakteriseerd als half-ellipsvormige met diepte a en halve lengte c . In dit geval wordt niet alleen de scheuruitbreiding in diepgerichting, da , bepaald maar ook in lengterichting, dc . Voor beide richtingen wordt ΔK berekend en vervolgens de scheuruitbreiding met afbeelding 3. De geometrische correctiefac-

tor Y is nu niet langer een constante, maar een factor die afhankelijk is van de plaat- en lasafmetingen, van de wijze van belasten (normaalkracht of buiging) en van de scheurgrootte uitgedrukt in c en a . Omdat Y afhankelijk is van zowel c als a ontstaat een steisel van twee gekoppelde vergelijkingen, die numeriek opgelost kunnen worden op een vergelijkbare wijze als beschreven in tabel 1. De waarden voor Y zijn bepaald met eindige-elementenmodellen van details inclusief scheur, vervolgens gefit en opgenomen in normen zoals BS 7910. Het gaat om paginalange vergelijkingen waardoor de opzet van het model nogal tijdrovend is. Maar dit hoeft slechts éénmalig ingevoerd te worden in bijvoorbeeld een spreadsheetprogramma en het principe is even eenvoudig als hierboven gegeven voor de door-de-plaatscheur in een oneindig grote plaat. Daarnaast is er commerciële software beschikbaar waarin deze vergelijkingen en de numerieke integratie reeds zijn ingevoerd.

In BS 7910 worden enkel eenvoudige lasdetails beschouwd. Voor veel van de details in een orthotroop rijdek is de geometrie gecompliceerder. Voor die gevallen moet een correctie worden uitgevoerd op de vergelijkingen voor Y in BS 7910. Benaderingen voor de correcties voor orthotrope rijdekken zijn gegeven in:

- de scheur in de dekplaat bij de aansluiting tussen dekplaat, trog en dwarsdrager^[7,8];
- de scheur in de las tussen de dekplaat en de trog^[9];
- drie typen scheuren in de aansluiting van een doorgevoerde trog op de dwarsdrager met een uitsparing^[10].

De laatste stap is het bepalen van de afmetingen van het einddefect a_f (of c_f). Dit einddefect kan zijn de grootte van de scheur waarbij instabiel doorscheuren optreedt, of de grootte van de scheur waarbij een verkeersongeluk kan optreden. De scheurgrootte bij instabiel bezwijken hangt af van de geometrie, de spanning in de uiterste grenstoestand, de vloeispanning en de breuktaaiheid. In civiele toepassingen is vaak de kerfslagwaarde van het materiaal bekend. Hiermee kan een schatting worden gemaakt van de breuktaaiheid. In dit artikel wordt niet verder ingegaan op de procedure voor de bepaling van de scheurgrootte bij instabiel bezwijken. De procedure staat in BS 7910.

Kader 2

De waarden voor ΔK die zijn gebruikt voor afbeeldingen 8 t/m 10 zijn gebaseerd op vereenvoudigen van de werkelijke, complexe geometrieën. De resulterende levensduur komt goed overeen met die volgens proeven en/of geconstateerde scheurvorming. De restlevensduur is gepresenteerd als percentage van de levensduur volgens de S-N-curve – door de totale levensduur volgens de in kader 1 beschreven methode te delen door de levensduur volgens de S-N-curve. Zo kan het inspectie-interval worden afgeleid op basis van de figuren en een eenvoudige berekening op basis van S-N-curven. De scheurgroeiontwikkeling blijkt afhankelijk van de vorm van het spanningsspectrum. Voor ieder detail zijn ten minste zes realistische spanningspectra beschouwd en de snelste van deze zes scheurgroeiontwikkelingen staan in de afbeeldingen. Dit betekent dat de curves conservatief kunnen zijn voor specifieke situaties. Een nauwkeurige berekening kan dus lonend zijn als het inspectie-interval volgend uit de figuren te kort wordt geacht.

Dekplaatscheur

In de berekening is uitgegaan van door het dwarsdragerlijf doorgaande troggen en een dekplaatdikte van 12 mm. De afbeeldingen kunnen ook gebruikt worden voor een dekplaatdikte van 10 mm en zijn daarvoor iets conservatief. De detailcategorie van de S-N-curve die toegepast moet worden voor de berekening van de 100% levensduur is $\Delta\sigma_c = 125 \text{ N/mm}^2$, in overeenstemming met detail NB 7.2 van NB bij NEN-EN 1993-2. In dezelfde Nationale

Bijlage is een model gegeven voor de spanningen voor dit detail. Uit dit model volgt dat de spanningen veroorzaakt worden door buiging van de dekplaat tussen de trogbenen. Echter, omdat de dekplaat tevens fungeert als bovenflens van de dwarsdrager zal er ook een (geringe) normaalspanning in de dekplaat aanwezig zijn. In de berekening is ervan uitgegaan dat de normaalspanning ongeveer 10% bedraagt van de totale spanning. Als einddefect is beschouwd een scheur met lengte aan de onderzijde van 400 mm. Deze keuze is enigszins arbitrair en gebaseerd op de praktijkervaring dat dekplaatscheuren met dergelijke lengte nog niet voor problemen zorgen. Resultaten voor de totale levensduur volgend uit de procedure zijn vergeleken met de constante-amplitudeproeven in [11]. Daaruit bleek een goede overeenkomst.

Langlasscheur

In de berekening is uitgegaan van een trogwanddikte van 6 mm en een onvolledige doorlassing met een keelmaat van 4 à 4,5 mm. Dit is representatief voor de meeste bestaande bruggen gebouwd tussen 1960 en 2000. De detailcategorie van de S-N-curve die toegepast moet worden voor de berekening van de 100% levensduur is $\Delta\sigma_c = 50 \text{ N/mm}^2$, in overeenstemming met detail 8.8.8 in NEN-EN 1993-1-9. De spanningswisselingen waarop getoetst moeten worden, betreffen de wisselingen in het trogbeen. In de berekening is ervan uitgegaan dat de normaalspanning ongeveer 30% bedraagt van de totale spanning, overeenkomstig de berekeningen in [4]. Als einddefect is beschouwd een scheur

met lengte van 1000 mm. Opnieuw is deze keuze enigszins arbitrair en gebaseerd op praktijkervaring. Resultaten voor de totale levensduur volgend uit de procedure zijn vergeleken met metingen van de scheurgroei in enkele bruggen⁹. Daaruit blijkt eveneens een goede overeenkomst.

Stuiklas onderflens

In de berekening is uitgegaan van een flensdikte van 25 mm. Voor een dikte van 40 mm is de afbeelding voor de scheurdiepte representatief en die voor de scheurlengte enigszins conservatief. De detailcategorie van de S-N-curve die toegepast moet worden voor de berekening van de 100%-levensduur is $\Delta\sigma_c = 80 \text{ N/mm}^2$ met correctie voor de dikte zoals beschreven voor detail 8.3.9 in NEN-EN 1993-1-9. Uitgegaan is van zuivere normaalspanning. In dit geval is het einddefect gelijk aan het defect waarbij instabiel scheuren kan optreden. Dit zogenaamde kritische defect is afhankelijk van de materiaaltaaiheid en de trekspanning in de uiterste grenstoestand. Uitgaande van zeer taai materiaal en van een optredende spanning bij de referentietemperatuur gelijk aan 75% van de vloeispanning – overeenkomstig het uitgangspunt van tabel 2.1 van NEN-EN 1993-1-10 – is het kritische defect ongeveer gelijk aan een scheur die juist door de plaat groeit. Dit is als einddefect aangehouden in de berekening. Resultaten voor de totale levensduur volgend uit de procedure zijn vergeleken met proeven in het achtergronddocument van NEN-EN 1993-1-9. Daaruit bleek ook hier een goede overeenkomst.

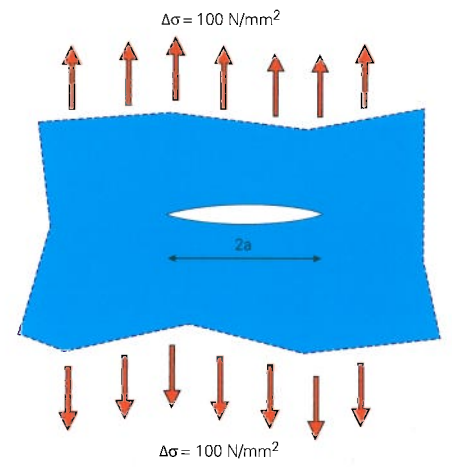
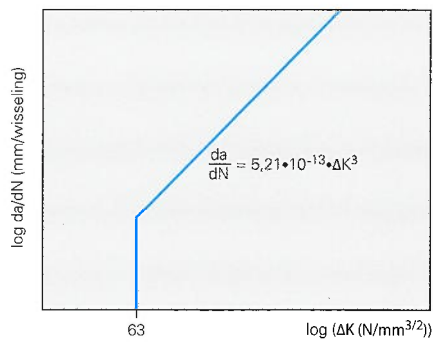
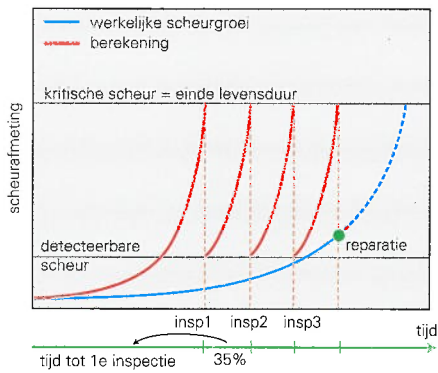
detectie in het algemeen nog laag. De scheurgrootte met hoge detectiebetrouwbaarheid (SGHB) is dus in het algemeen groter dan de detectielimiet.

Er hebben verschillende onderzoeken plaatsgevonden om de SGHB per inspectiemethode te bepalen – met uiteenlopende resultaten. Dit wordt onder andere veroorzaakt doordat het resultaat afhangt van de kunde en ervaring van de inspecteur, van de toegankelijkheid, van de lokale geometrie en van de oriëntatie van de scheur. In BS 7910 is de informatie verzameld en zijn op basis daarvan generieke waarden gegeven van de SGHB voor verschillende technieken. Tabel 2 geeft voor een aantal technieken de SGHB van oppervlaktischeuren. Voor oppervlak-

tescheuren kan ook MPI (magnetisch onderzoek) of PT (penetrantonderzoek) worden toegepast. Voor deze technieken geeft BS 7910 een scheurlengte-met-hoge-detectiebetrouwbaarheid tussen 5 mm voor een scheur in een vlakke plaat en 20 mm voor een scheur bij bijvoorbeeld een las-teen. Scheuren zichtbaar aan de onderkant van een brugdek – zoals de scheur in de langlas tussen trog en dekplaat – worden vaak visueel onderzocht zonder MPI of PT. De betrouwbaarheid hangt in dit geval zozeer af van de kwaliteiten van de inspecteur dat hiervoor geen algemeen criterium beschikbaar is⁵. Voor visuele inspectie van moeilijk toegankelijke locaties van vliegtuigen wordt in [6] aangegeven dat een door-de-wand-

scheur met lengte 150 mm met 80% betrouwbaarheid gedetecteerd kan worden. Dit kan dienen als een eerste inschatting, maar moet goed geverifieerd worden bij de betreffende inspecteur.

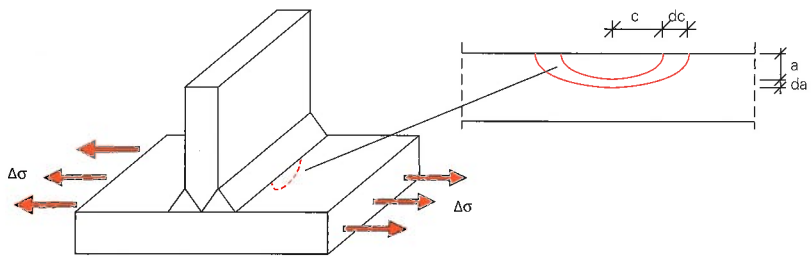
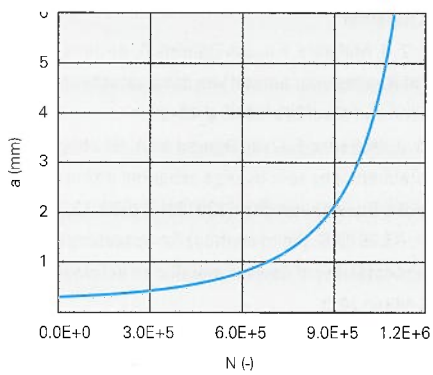
Voor het opsporen van scheuren in de dekplaat wordt in Nederland ook gebruik gemaakt van de wervelstroomtechniek Crack-PEC. Hiermee kunnen scheuren gedetecteerd worden die volledig door de dekplaat gegroeid zijn, zonder dat de slijtlaag daarvoor verwijderd hoeft te worden. Per brug wordt voor Crack-PEC een meetgrid bepaald. Dit is afhankelijk van de soort constructie, de intensiteit van het vrachtverkeer en het schadepatroon. Crack-PEC kan scheuren detecteren vanaf 100 mm lengte



3. Inspectie-intervallen tussen de eerste inspectie en de daarop volgende inspectiemomenten.

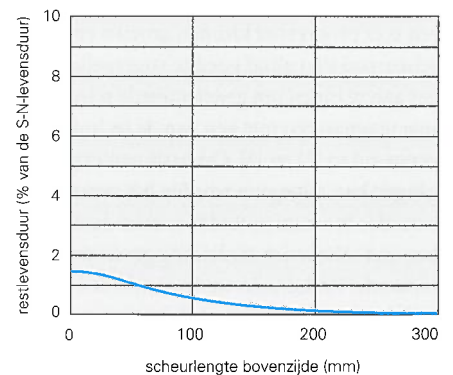
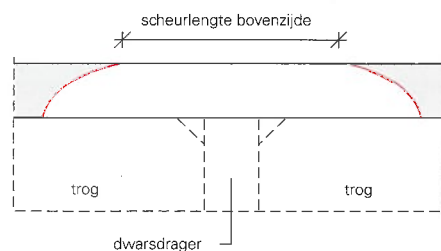
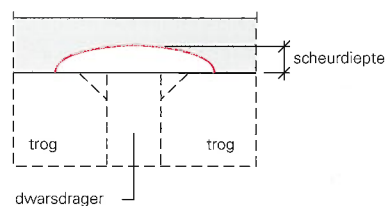
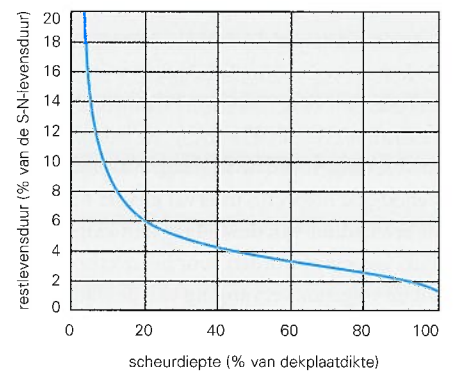
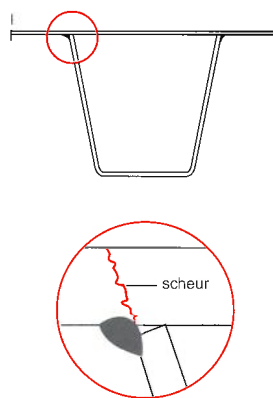
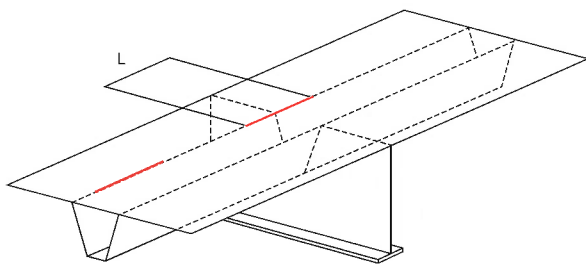
4. Eenvoudige scheurgroeiwet met 97,5%-overschrijdingskans voor staal in lucht volgens BS 7910.

5. Door-de-plaatscheur in een oneindig grote plaat.



6. Verband tussen de scheurgrootte (a) en het aantal spanningsswisselingen (N).

7. Geometrie van een las met een half-elliptische scheur.



8. Restlevensduur voor scheur in de dekplaat bij trog-dwarsdrager.

door-en-door, mits de sensor precies op de scheur staat. Kleinere scheuren kunnen niet worden waargenomen, omdat de sensor een diameter heeft van 100 mm.

Een voorbeeld. Voor de dekplaatscheur kunnen we onder andere gebruik maken van Crack-PEC en van TOFD. Om TOFD toe te passen moet de slijtlaag verwijderd worden. Om deze reden komt de techniek enkel in aanmerking bij onderhoud zoals bij de vervanging van de slijtlaag. *Tabel 2* laat een scheurdiepte van 2 mm voor de niet-toegankelijke zijde in geval van TOFD zien. Met de techniek zijn ook kleinere scheuren met hoge betrouwbaarheid te detecteren, maar bijvoorbeeld bij een scheur vanuit de laswortel is het dan lastig om onderscheid te maken tussen de onvolledige doorlassing en een (vermoedings) scheur. Vandaar de scheurdiepte van 2 mm. Voor de dekplaatscheur geldt deze beperking echter niet. Bij een ervaren inspecteur is het naar verwachting mogelijk om scheuren vanaf een diepte van 1 mm met hoge betrouwbaarheid te detecteren. De TOFD-inspectie is tijdrovender dan Crack-PEC, maar uit de detectielimieten en *afbeelding 8* blijkt dat het inspectie-interval bij TOFD ook veel groter is. Er kan nu een optimale inspectiestrategie gekozen worden. Deze kan bijvoorbeeld bestaan uit een TOFD-inspectie iedere keer bij het vervangen van de slijtlaag. Wanneer het benodigde inspectie-interval kleiner blijkt dan de levensduur van de slijtlaag dan kan Crack-PEC toegepast worden voor het overbruggen tot de volgende vervanging van de slijtlaag. Het inschatten van de scheurgrootte gaat bij veel inspectietechnieken gepaard met grote onzekerheid. Om deze reden en omdat scheuren zeer progressief kunnen groeien en het scheurpad niet altijd goed te voorspellen is, is het aan te raden om gedetecteerde scheuren snel te repareren met één van de technieken genoemd in [2] en [3]. Op basis van expertmeningen kan nagegaan worden het verantwoord is te wachten totdat er meerdere locaties met scheurtjes aanleiding geven tot reparatie. Zo kunnen werkzaamheden worden gebundeld en vermindert de hinder.

Optimaal inspectie-interval

Afbeeldingen 8 t/m 10 geven een conservatieve inschatting van het interval. Indien

gewenst bestaan er mogelijkheden voor een optimaler – minder conservatief – inspectie-interval, maar dit vergt een berekening van de betreffende brug. Een belangrijke bijdrage kan geleverd worden door een nauwkeurige bepaling van de belasting, bijvoorbeeld door het tellen van het aantal en type van passerende vrachtwagens voor de betreffende brug. Daarnaast kan gebruik gemaakt worden van de resultaten van de reeds uitgevoerde inspecties bij het vaststellen van het interval tot de volgende inspectie. Wanneer bijvoorbeeld geen scheur gevonden is bij voorgaande inspecties, dan is de scheurgroeisnelheid kennelijk niet heel hoog, het initiële defect niet heel groot en/of de stoot bij de voegovergang niet heel hoog (*afb. 11*) Om rekening te houden met deze historie kunnen Monte Carlo-simulaties worden uitgevoerd. In iedere simulatie wordt een waarde getrokken uit de verdelingsfunctie voor alle van belang zijnde variabelen, en daarmee wordt een berekening uitgevoerd zoals beschreven in *kader 1*. Enkel die simulaties die overeenkomen met de resultaten van de inspecties – bijvoorbeeld geen scheur – worden geselecteerd en de betrouwbaarheidsindex wordt berekend op basis van de geselecteerde simulaties. De verdelingsfuncties van alle variabelen zijn gegeven in *tabel 3* en de uitvoering van de analyse is beschreven in [12]. Afhankelijk van de situatie kan dit een aanzienlijke vergroting van het inspectie-interval opleveren. Zo werd in het kader van het Project Renovatie stalen Bruggen een berekening uitgevoerd voor de scheur in de trog bij de aansluiting met de dwarsdrager voor een van de bruggen in het PRB-programma (*afb. 12*). Zonder gebruik van de historie is een inspectie-interval gevonden van 5 jaar. Bij het uitvoeren van de analyse met Monte Carlo-simulaties kon dit inspectie-interval vergroot worden naar 30 jaar.

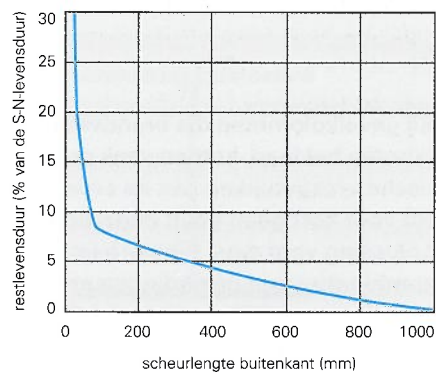
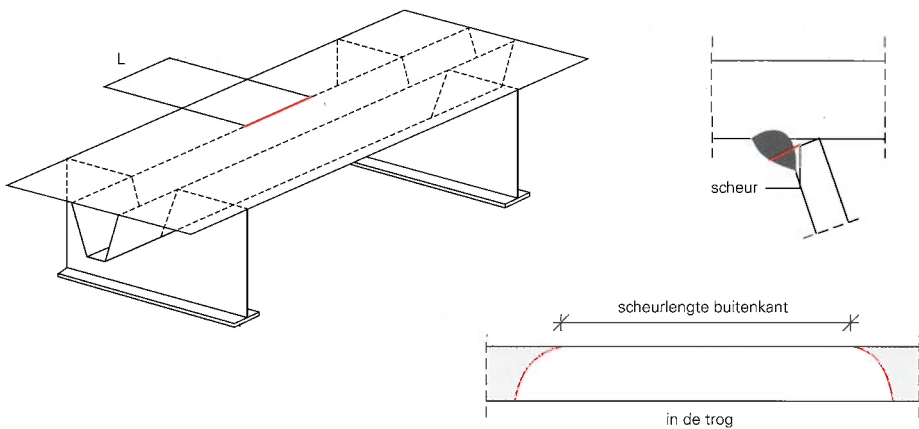
Conclusies

De vragen van beheerders van bruggen over vermoeiingsinspecties kunnen goed beantwoord worden op basis van de methode gepresenteerd in dit artikel. Vermoeiings-scheuren groeien progressief – hoe groter ze zijn, hoe sneller ze scheuren. De scheurgroeisnelheid is sterk afhankelijk van het type

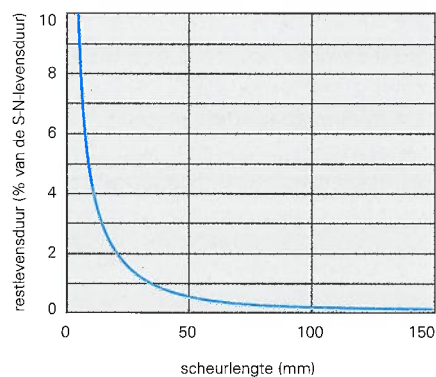
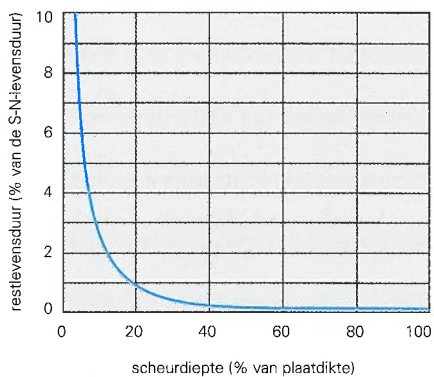
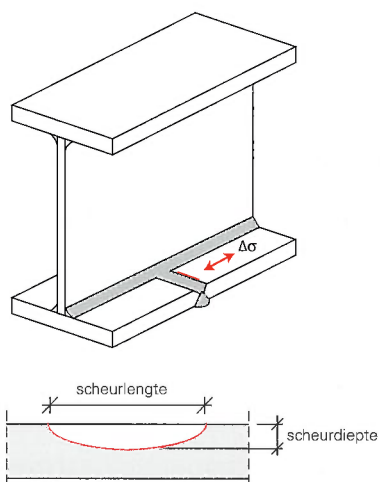
detail. Er is een goede methode beschikbaar voor het bepalen restlevensduur en het verantwoord kiezen van het inspectie-interval. Het inspectie-interval hangt af van het type scheur en de inspectiemethode: hoe kleiner de scheur die gevonden kan worden bij de inspectie, hoe langer het inspectie-interval. •

Literatuur

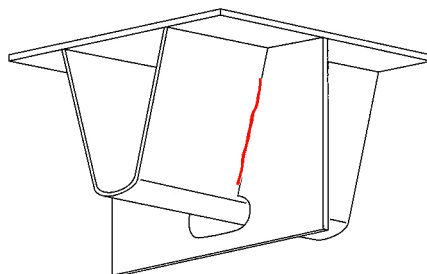
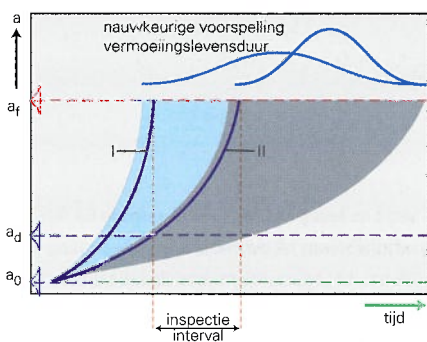
- 1/2. J. Maljaars, F.J. van Dooren, A. de Jong, 'Methodes voor herstel van dekplaatscheuren', *Bouwen met Staal* 229 (2012) p. 88-93.
3. J. Maljaars, F.J. van Dooren en A. de Jong, 'Herstelmethodes voor overige scheuren orthotroop rijk', *Bouwen met Staal* 230 (2012) p. 38-43.
4. BS 7910 (Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures), BSI, London 2013.
5. F. van Dooren, D. Gratton, S. den Blanken, G. Nagtegaal, D. Ashurst en P. Kunst, 'Orthotropic deck fatigue: Renovation of 8 bridges in the Netherlands', *Structural Faults & Repair*, Juni 2010.
6. FHWA *Reliability of visual inspection for highway bridges. Volume I*, Final report, FHWA Report No. FHWA-RD-010020. Washington DC: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation 2001.
7. E. Knorr, 'Reliability of the detection of flaws and of the determination of flaw size', *AGARDograph* 176 (1974), p. 398-412.
8. J. Maljaars, F.J. van Dooren en M.H. Kolstein, 'Fatigue assessment for deck plates in orthotropic bridge decks', *Steel Construction* 5-2 (2012), p. 93-100.
9. J. Maljaars, O.D. Dijkstra en M.H. Kolstein, 'Leidraad restlevensduur voor bestaande bruggen', *Bouwen met Staal* 216 (2010), p. 44-50.
10. J. Maljaars, D. Gratton, E. Vonk en F.J. van Dooren, *Crack growth prediction of deck plate-stiffener joints in orthotropic steel bridge decks*, IABSE conference, mei 6-8, Rotterdam 2013.
11. J. Maljaars en R. Pijpers, *Stress intensity factors for fatigue loaded details between crossbeams and trapezoidal stringers*, 3rd Orthotropic Bridge Conference, juni 26-28, 2013 Sacramento, California, USA.
12. M.H. Kolstein, *Fatigue classification of welded joints in orthotropic steel bridge decks*, Dissertatie Technische Universiteit Delft 2007.
13. J. Maljaars en A.C.W.M. Vrouwenvelder, 'Probabilistic fatigue life updating accounting for inspections of multiple critical locations', *International Journal of Fatigue*, in press.



9. Restlevensduur voor de langglas trog-dekplaat.



10. Restlevensduur voor de stuikglas in de onderflens.



11. Principe van een probabilistische berekening met informatie uit de inspecties.

12. Scheur in de trog bij de aansluiting met de dwarsdrager.