

## RENOVATIE SPOORBRUG (2)

Tweede publicatie met onderzoeksresultaten van ProLife (Prolonging Life time of old steel and steel-concrete bridges). Deze keer met twee case studies over het al dan niet versterken van stalen bruggen met stalen deksecties. Dit artikel is het vervolg op de herberekening en spanningsmetingen aan de spoorbrug Dr. W. Hupkesbrug (Zaltbommel), waarvan de conclusies zijn gepresenteerd in het artikel 'Spoorbrug versterken met stalen deksecties', *Bouwen met Staal* 257 (2017), p. 36-42.



1. Case study 1: brug over de Waal bij Zaltbommel (l). De 'Bommelse brug' (m) is gesloopt in 2008. Daarvoor in de plaats kwam de Martinus Nijhoffbrug (r).

# Versterken of voorkomen

**Vermoeiing is de bepalende factor voor het vaststellen van de resterende levensduur van een brug. De invloed van het versterken met stalen deksecties hierop, wordt omschreven met een case study voor de brug over de Waal bij Zaltbommel. Daarnaast is ook onderzocht of de noodzaak voor het versterken van bestaande bruggen kan worden voorkomen via gegevens van de spoorbrug over de Maas bij Buggenum.**

ir. M.J.M. van der Burg RC en ir. A. Steenbrink RC

Mark van der Burg en Arjen Steenbrink zijn beide constructief adviseur bij advies- en ingenieursbureau Movares in Utrecht.

Het onderzoeksprogramma ProLife (Prolonging Life time of old steel and steel-concrete bridges) heeft als hoofddoel het bepalen en vergelijken van levensduurverlengende maatregelen voor bruggen. Al eerder publiceerde *Bouwen met Staal* over de onderzoeksresultaten.

Ter inleiding de achtergrond van dit onderzoek.

### Casus 1: versterking

In het netwerk van de Europese vervoersinfrastructuur (weg en spoor) is er een grote

verscheidenheid aan verschillende soorten stalen en staal-beton bruggen. Het merendeel van deze bruggen is 50 jaar of ouder. De effecten van de verhoging van de verkeersbelasting (gewicht en intensiteit) en verzwaaring van normeringen zijn grote opgaven om de vereiste structurele veiligheid, goede onderhoudsstaat en duurzaamheid van deze bruggen te waarborgen. Tevens zijn veel van deze oude bruggen *landmarks* en derhalve historische en cultureel belangrijke objecten. Vervanging van deze bruggen is veelal niet wenselijk gezien de grote impact op de omgeving, milieubelasting en investeringskosten.

Er zijn daarom passende concepten voor

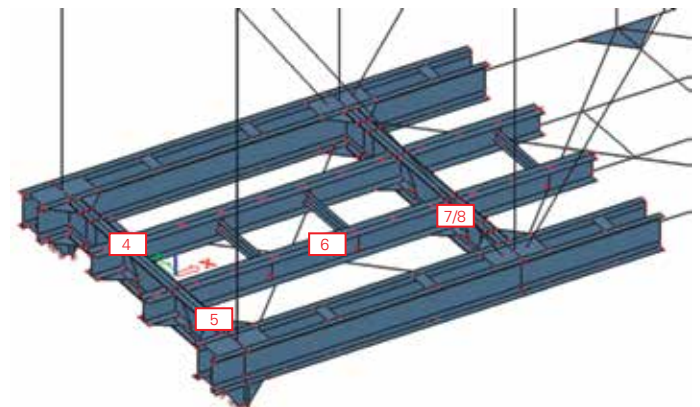
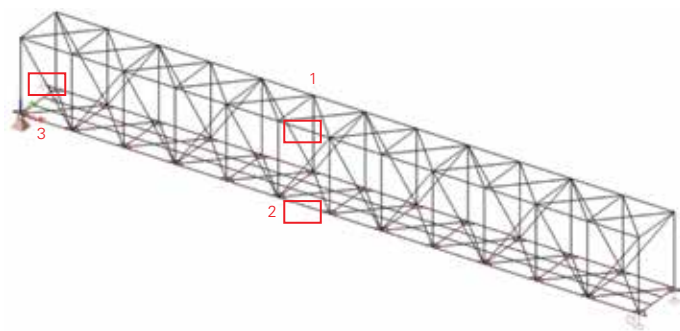
Samen met zes Europese partners voert Movares Nederland een onderzoeksopdracht uit voor de Europese Commissie, ondersteund door het Research Fund for Coal and Steel Program onder subsidie nummer RFSR-CT-2015-00025. De partners zijn: Luleå tekniska universitet, Zweden; Universidade de Coimbra, Portugal; ArcelorMittal Belval & Differdange SA, Luxemburg, Ramboll Sverige AB, Zweden; Schimetta Consult Ziviltchniker GmbH, Oostenrijk en Alessio Pipinato & Partners Architectural Engineering SRL, Italië. Het onderzoeksprogramma heeft als titel 'ProLife, Prolonging Life time of old steel and steel-concrete bridges' en heeft als hoofddoel het bepalen en vergelijken van levensduurverlengende maatregelen voor bruggen.

Tabel 1. Locaties (afb. 2 en 3).

nr.	element
1	bovenrand; maatgevende locatie
2	onderrand; maatgevende locatie
3	diagonaal; maatgevende locatie
4	dwarsdrager; midden
5	dwarsdrager; einddoorsnede (zwakke buiging zoals gemeten in [1])
6	langsligger; veldmoment
7	langsligger; steunpuntsmoment
8	langsligger; afschuifverbinding

Tabel 2. Vermoeiingsresultaten.

nr.	element	$\gamma_{M1}$ (-)	$\Delta\sigma_c$ (-) <sup>[6]</sup>	$D_{2017}$ (-)	$D_{2047}$ (-)	RFL (jaren)
1	bovenrand; maatgevende locatie	1,35	71; m = 5	0,10	0,13	> 100
2	onderrand; maatgevende locatie	1,35	71; m = 5	0,05	0,07	> 100
3	diagonaal; maatgevende locatie	1,35	71; m = 5	0,88	1,22	10,8
4	dwarsdrager; midden	1,15	85; m = 5	0,23	0,31	> 100
5	dwarsdrager; einddoorsnede (zwakke buiging zoals gemeten in [1])	1,15	71; m = 5	0,18	0,25	> 100
6	langsligger; veldmoment	1,15	90; m = 3	3,47	4,79	< 0
7	langsligger; steunpuntsmoment	1,15	71; m = 5	2,89	3,99	< 0
8	langsligger; afschuifverbinding	1,15	140; m = 5	2,84	3,91	< 0



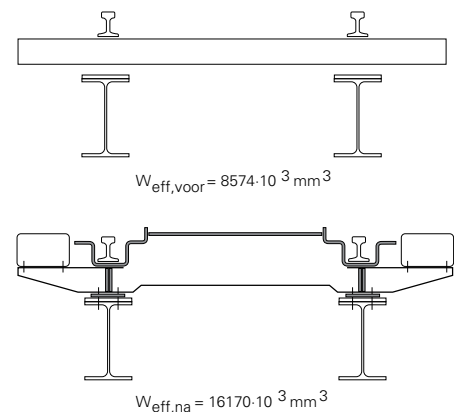
2. Locaties (deel 1), zie tabel 1.

3. Locaties (deel 2), zie tabel 1.

reparatie en versterking vereist. Andere partners zijn bezig met bijvoorbeeld staal-beton bruggen en het aanbrengen van composietwerking door achteraf verdeuvelen, het versterken van vakwerken door knopen in te storten in UHPC, het versterken van spoorbruggen met een betonnen vloer, wrijvingsverhogende maatregelen voor voorspan-verbindingen, enzovoort. Voor dit project bestaat het werk van advies- en ingenieursbureau Movares uit twee case studies. Casus 1, een beschouwing van de spoorbrug bij Zaltbommel als case study voor het versterken van een stalen spoorbrug met stalen deksecties. Casus 2, een studie naar de spoorbrug bij Buggenum met als doel om versterkingen te voorkomen. In dit artikel hanteren de auteurs dezelfde case study als in [1], de brug over de Waal bij Zaltbommel. Als eerste een samenvatting van de vermoeiingsresultaten: pré-versterking.

### Vermoeiingslevensduur

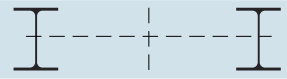

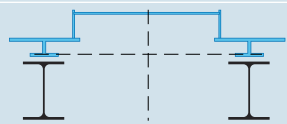
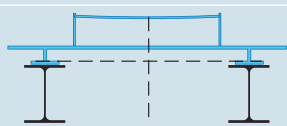
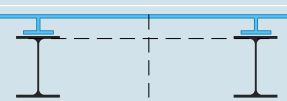
Zoals gezegd is vermoeiing de bepalende factor voor het bepalen van de resterende levensduur van een brug. De vermoeiingslevensduur wordt berekend op de locaties aangegeven in tabel 1 en de afbeeldingen 2 en 3. Detailclassificaties voor geklonken constructies zijn overgenomen uit [4]. In tabel 2 wordt een overzicht gegeven van de vermoeiingslevensduur van verschillende onderdelen van de brug. De standaardperiode in Nederland voor de herberekening van een brug is 30 jaar, dus de cumulatieve vermoeiingsschade wordt gegeven in 2017 (jaar van berekening) en 2047 (einde dienst). Aangenomen dat het gewenste einde van de levensduur 2047 is, heeft de brug een totale levensduur van 109 jaar. De restlevensduur voor vermoeiing (RFL), die begint in 2017, wordt ook gegeven. Hoewel de langsliggers op vermoeiing theore-



4. Voor en na versterken.

tische reeds einde levensduur zijn, is er geen schade aan de brug te zien. Dit komt omdat de belasting op de brug zoals aangenomen in NEN-EN 1991-2 tabel D.2 veel hoger is dan de werkelijke belasting. Ook de vermoeiingsclassi-

Tabel 3. Verschillende verstevigingsopties.

	standaard oplossing zonder 'remvoorziening'	A <sub>totaal</sub> (mm <sup>2</sup> )	W <sub>el</sub> (mm <sup>3</sup> )
1		46.329 (100%)	7.487·10 <sup>6</sup> (100%)
2		116.960 (252%)	17.116·10 <sup>6</sup> (229%)
3		117.550 (254%)	16.387·10 <sup>6</sup> (219%)
4		134.360 (290%)	15.242·10 <sup>6</sup> (204%)
5		110.910 (239%)	11.355·10 <sup>6</sup> (152%)



5. Voorbeeld deksectie.

Tabel 4. Toename ULS-krachten rond 2% (op basis van LM71 met  $\alpha = 1,21$ ).

Deze toename van krachten is geen probleem voor de hoofdliggers.

bruggewicht (inclusief spoor en permanente belasting)	50,2 kN/m'
versterkingsmaatregelen 'standaard' deksectie	5,1 kN/m' (10,1%)
versterkingsmaatregelen 'breed' deksectie	6,9 kN/m' (13,7%)
aantal M22-bouten (pas/injectie/voorgespannen)	13,3 kN/m' (2x4 elke 60 cm)
verwijderen dwarsliggers	-1,6 kN/m'
<b>bruggewicht na versterken</b>	<b>53,7 kN/m' (107,0 %)</b>

Tabel 5. Resultaten vermoeiing.

	huidige vermoeiings-schade (-)	jaarlijkse verhoging van de schade (-)	restlevensduur (jaren)
<b>1. bovenregel</b>	$D_{RY} = 0,5$	$D_{\text{jaarlijks, origineel}} = 0,00121$ $D_{\text{jaarlijks, standaard}} = 0,00118$ $D_{\text{jaarlijks, breed}} = 0,00125$	$RFL_{\text{origineel}} = 412$ $RFL_{\text{standaard}} = 423$ $RFL_{\text{breed}} = 402$
<b>2. onderregel</b>	$D_{RY} = 0,5$	$D_{\text{jaarlijks, origineel}} = 0,00061$ $D_{\text{jaarlijks, standaard}} = 0,00063$ $D_{\text{jaarlijks, breed}} = 0,00025$	$RFL_{\text{origineel}} = 814$ $RFL_{\text{standaard}} = 787$ $RFL_{\text{breed}} = 2006$
<b>3. diagonaal</b>	$D_{RY} = 0,5$	$D_{\text{jaarlijks, origineel}} = 0,01115$ $D_{\text{jaarlijks, standaard}} = 0,01149$ $D_{\text{jaarlijks, breed}} = 0,01230$	$RFL_{\text{origineel}} = 45$ $RFL_{\text{standaard}} = 44$ $RFL_{\text{breed}} = 41$
<b>4. dwarsdrager (midden)</b>	$D_{RY} = 0,5$	$D_{\text{jaarlijks, origineel}} = 0,00285$ $D_{\text{jaarlijks, standaard}} = 0,00263$ $D_{\text{jaarlijks, breed}} = 0,00164$	$RFL_{\text{origineel}} = 175$ $RFL_{\text{standaard}} = 190$ $RFL_{\text{breed}} = 304$
<b>5. dwarsdrager (nabij hoofdligger)</b>	$D_{RY} = 0,5$	$D_{\text{jaarlijks, origineel}} = 0,00570$ $D_{\text{jaarlijks, standaard}} = 0,00303$ $D_{\text{jaarlijks, breed}} = 0,00004$	$RFL_{\text{origineel}} = 88$ $RFL_{\text{standaard}} = 165$ $RFL_{\text{breed}} = \text{inf}$
<b>6. langsligger (veldmoment)</b>	$D_{RY} = 0,5$	$D_{\text{jaarlijks, origineel}} = 0,04398$ $D_{\text{jaarlijks, standaard}} = 0,01178$ $D_{\text{jaarlijks, breed}} = 0,01138$	$RFL_{\text{origineel}} = 11$ $RFL_{\text{standaard}} = 42$ $RFL_{\text{breed}} = 44$
<b>7. langsligger (steunpuntsmoment)</b>	$D_{RY} = 0,5$	$D_{\text{jaarlijks, origineel}} = 0,03663$ $D_{\text{jaarlijks, standaard}} = 0,00000$ $D_{\text{jaarlijks, breed}} = 0,00005$	$RFL_{\text{origineel}} = 14$ $RFL_{\text{standaard}} = \text{inf}$ $RFL_{\text{breed}} = \text{inf}$
<b>8. verbinding dwarsdrager-langsligger (klinknagels in lijf)</b>	$D_{RY} = 0,5$	$D_{\text{jaarlijks, origineel}} = 0,03591$ $D_{\text{jaarlijks, standaard}} = 0,00875$ $D_{\text{jaarlijks, breed}} = 0,00875$	$RFL_{\text{origineel}} = 14$ $RFL_{\text{standaard}} = 57$ $RFL_{\text{breed}} = 57$

periode	gemiddelde jaartonnage (mln. ton)
1916-2006	13
2006-2016	18

Tabel 6. Gereduceerd jaartonnage (ingeschat door ProRail).

Tabel 7. Resultaten van de vermoeingsberekening ( $m$  = helling van de Wolherlijn uit de Eurocode).

locatie	detail	categorie (-)	eurocode verkeer (-)	gereduceerd verkeer (-)	actueel verkeer (-)
1	klinknagels in de trekplaat, trek	50 (tabel 8.1-14)	4,20	2,30	0,58
	klinknagels in de trekplaat, afschuiving	140 ( $m = 5$ ) <sup>[4]</sup>	0,80	0,43	0,04
	normaalkracht in de trekplaat	71 ( $m = 5$ ) <sup>[4]</sup>	2,20	1,20	0,10
2	klinknagels op afschuiving	140 ( $m = 5$ ) <sup>[4]</sup>	2,40	1,31	0,19
	directe spanning in lijf langsligger	90 ( $m = 5$ ) <sup>[4]</sup>	0	0	0
3	klinknagels op afschuiving	140 ( $m = 5$ ) <sup>[4]</sup>	3,50	1,89	0,35
	directe spanning in hoekprofiel	80 ( $m = 5$ ) <sup>[4]</sup>	0,60	0,33	0,01
4	klinknagels op afschuiving	140 ( $m = 5$ ) <sup>[4]</sup>	0	0	0
	normaalkracht in drukplaat	71 ( $m = 5$ ) <sup>[4]</sup>	0	0	0
5	klinknagels op afschuiving	140 ( $m = 5$ ) <sup>[4]</sup>	0,046	0,025	0
6	klinknagels op trek	50 (tabel 8.1-14)	0,14	0,08	0,01
7	cope in langsligger	125 (tabel 8.1-5)	6,5	3,48	0,87

ficaties zijn de ondergrens van de testresultaten, wat betekent dat een echte restlevensduur altijd langer zal zijn dan de theoretisch berekende.

### Versterkingsmethoden

In basis zullen we ons concentreren op het versterken van de brug met stalen deksecties boven op de langsliggers. Dit is een effectieve manier om de brug te versterken, omdat de deksecties een relatief laag gewicht hebben en direct aan de bestaande liggers kunnen worden bevestigd. Een alternatief systeem dat de langsliggers volledig zou vervangen is ook mogelijk, maar is veel gecompliceerder om uit te voeren in een kort tijdsbestek. Aangezien de meeste spoorlijnen slechts voor een korte periode per keer kunnen worden stilgelegd, moet snel een versterkingsmethode kunnen worden geplaatst. Het hergebruiken van de langsliggers bespaart niet alleen materiaalkosten, maar ook bouwtijd. Constructief moeten de langsliggers en de deksecties samenwerken als één integrale balk, die een volledige verbinding tussen het oude en nieuwe staal vereist. In afbeeldingen 4 en 5 wordt het algemene idee geïllustreerd. Met deze deksecties kunnen de weerstandsmomenten eenvoudig worden verdubbeld, wat op zijn beurt de spanning in de liggers halveert. Uitgaande van een S-N-curve met een derde macht, is de resterende vermoeingslevensduur ongeveer  $2^3 = 8$  maal toegenomen.

### Ontwerptopties

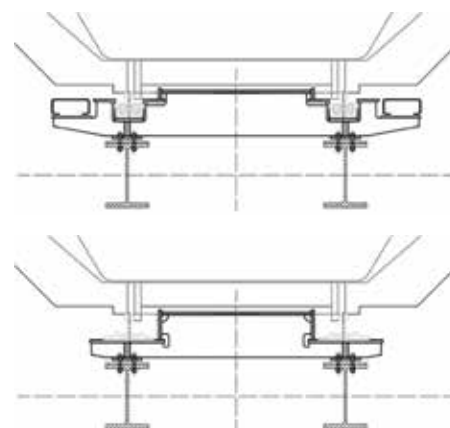
Binnen deze oplossing van stalen deksecties worden verschillende opties onderscheiden.

- Ingegoten spoor of directe bevestiging.
- Pasbouten, geïnjecteerde of voorgespannen bouten.
- Met of zonder doorgaande verbinding over de dwarsdragers.
- Met of zonder verbinding met de hoofdligger (om de remkracht over te dragen).

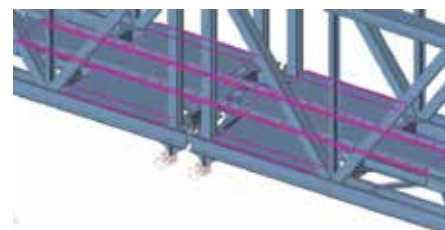
Verschillende van de varianten zijn al in Nederland gebruikt. De opties/ontwerpkeuzes die moeten worden overwogen, worden hierna uitgewerkt.

### Ingegoten spoor of directe bevestiging

Constructief is er weinig verschil tussen een ingegoten spoor of directe bevestiging, wanneer men naar de dwarsdragers en langsliggers kijkt. Onlangs hebben zich in enkele met ingegoten deksecties aangebrachte bruggen problemen met de las van de doorlopende spoorstaaf voorgedaan. Het bleek zeer arbeidsintensief te zijn om deze las te repareren, omdat de toegankelijkheid beperkt werd door het ingegoten spoor. Daarom is de voorkeursmethode tegenwoordig het gebruik van rechtstreeks bevestigde rails, hoewel een correct geplaatste ingegoten rail vele voordelen kan hebben



6. Voorbeeld ingegoten spoor (b) en directe bevestiging (a).



7. Verbinding langsligger-hoofdligger.

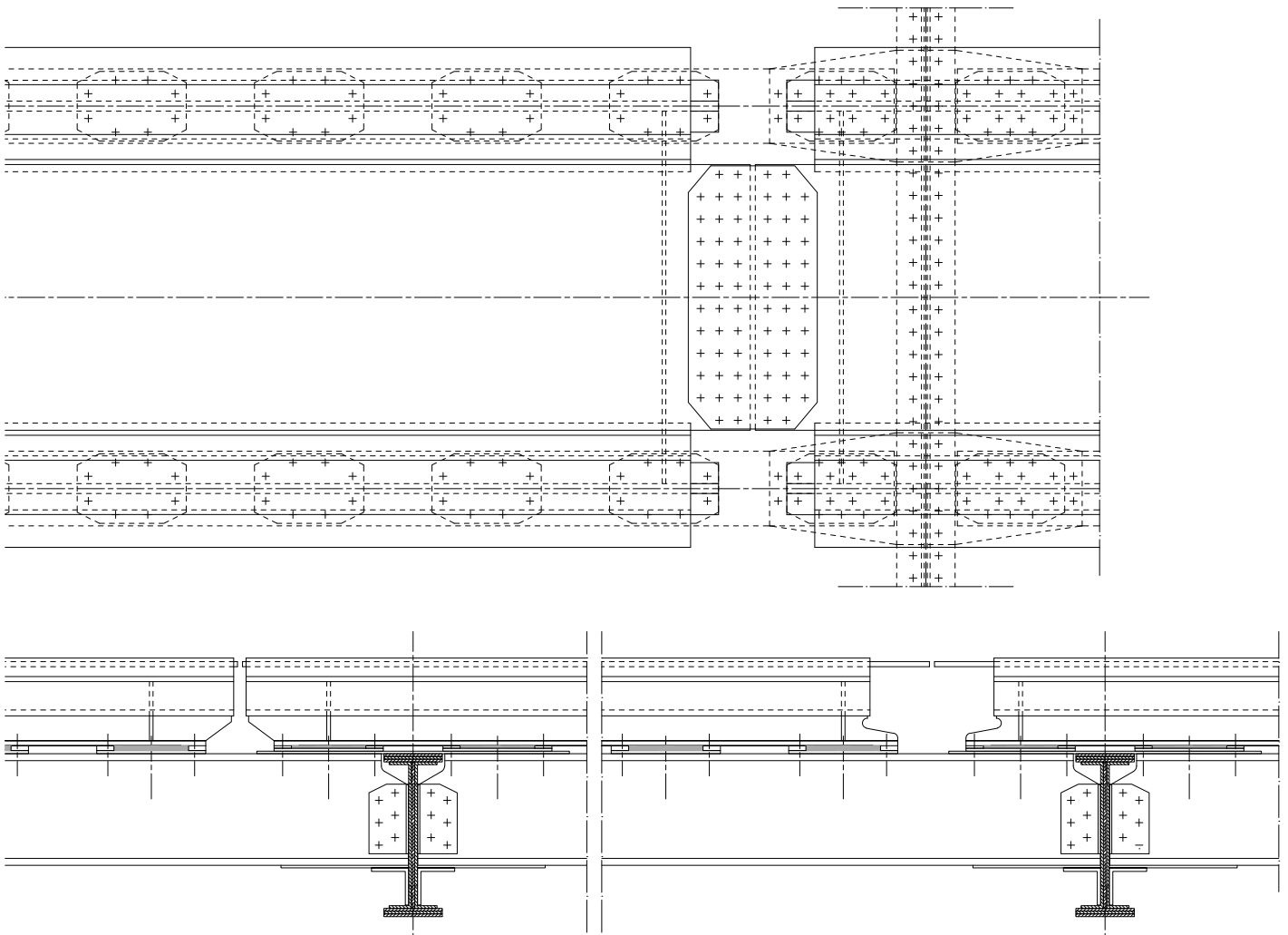
(levensduur, geluid, minder onderhoud, enz.). In afbeelding 6 worden enkele voorbeelden van ingegoten en direct bevestigde rails getoond.

### Bouttype

Een volledige constructieve verbinding is nodig om de spanning in de langsliggers te verminderen. Dit kan worden verkregen door pasbouten, geïnjecteerde of voorgespannen bouten. Aangezien op sommige punten de bouten klinknagels zullen vervangen, zal het gebruik van voorgespannen bouten met injectie het oorspronkelijke gedrag het best nabootsen. Alle mogelijkheden kunnen worden beschouwd in een Definitief Ontwerp voor een versterkingsproject, bijvoorbeeld afhankelijk van de voorkeur van de aannemer.

### Met of zonder verbinding over dwarsdragers

Afhankelijk van de exacte geometrie van de te versterken constructie, kunnen de deksecties worden uitgerust met of zonder een volledige verbinding over de dwarsdragers. Normaal gesproken zijn de deksecties uitgerust met deze verbinding (afb. 8), om een ononderbroken constructie over de brug te krijgen en tevens het steunpuntsmoment in de langsligger te versterken. Op deze manier zal de versterking het meest effectief zijn.



8. Bovenaanzicht (b) en zijaanzicht (o) van deksectie bij dwarsdrager.

9. Sparing (500 mm) voor thermietlas.

### Met of zonder verbinding met de hoofdligger

Door buiging in de zwakke richting van de dwarsdragers (voornamelijk de eerste en laatste dwarsdrager) kunnen grote spanningen optreden. Om dit te voorkomen is het handig om de langsliggers aan beide uiteinden van de brug aan de hoofdligger te koppelen.

Het is alleen nodig om deze verbinding toe te voegen tussen de laatste en de voorlaatste dwarsdrager (afb. 7).

### Onderhoudsvoorzieningen

Voor een ingegoten spoor zal goed nagedacht moeten worden over onderhoud,

eenmaal ingegoten kun je de rail niet bereiken. Omdat de rail een kortere levensduur heeft in vergelijking met het deksecties, is de mogelijkheid voor vervanging noodzakelijk. Voor de ingegoten spoorstaaf kan dit worden gedaan door enkele openingen in het ontwerp van de deksecties toe te voegen.

Deze openingen moeten minimaal 500 mm (afb. 9) breed zijn om een goed bereik te krijgen (in combinatie met een verbinding over de dwarsbalk, zie *Met of zonder verbinding over dwarsdragers*).

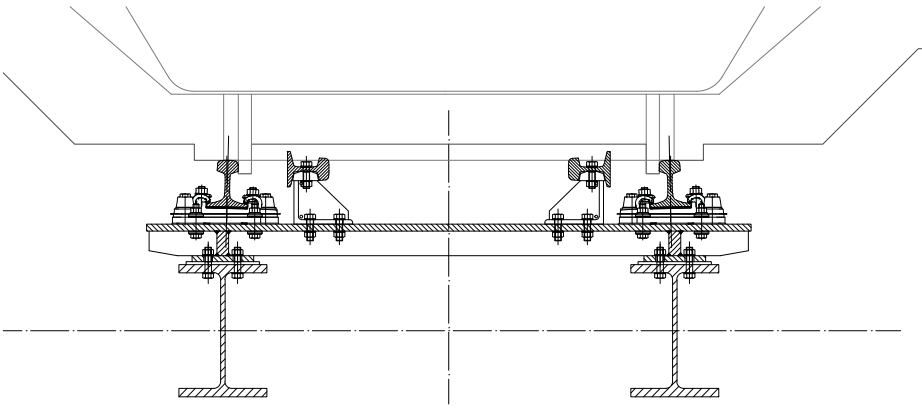
In deze ruimte kan een thermietlas worden gemaakt. Daarnaast is het ook aan te raden om ruimte te hebben voor een uitzettingsvoeg. Dit is eenvoudig voor elkaar te krijgen

door de goot te verbreden.

Voor het direct bevestigde railonderhoud is het een stuk eenvoudiger, omdat men alle delen kan bereiken en de spoorstaven eenvoudig kunnen worden vervangen.

### Aanbevelingen ontwerp en bouw

- Verwijder altijd de roestplaat (plaat onder de houten dwarsligger) en plaats de deksecties direct op de langsligger. Dit zorgt ervoor dat het oppervlak vlak is en er een goede verbinding ontstaat tussen het deksecties en de draagbalk.
- Voor direct bevestigd spoor: gebruik *state-of-the-art* dubbel geïsoleerde, verstelbare, directe railbevestigingsmiddelen (d.w.z.



10. Optie 5 (uit tabel 3) uitgewerkt.

Vossloh DFF 300 of vergelijkbaar).

- Gebruik vervangbare ontsporingsbeschermingen (indien constructief mogelijk, dit resulteert in minder constructiehoogte) zie tabel 3 voor enkele opties.
- Volledig vlakke bovenplaat is handig in geval van ontsporing/beschadiging. Een traditioneel gedeelte met houten dwarsliggers kan er tijdelijk bovenop worden geplaatst om brug snel te kunnen heropenen, terwijl nieuwe secties worden gebouwd. Het enige nadeel is de hogere positie van de rail (en dus de verbinding met de aangrenzende baan) en tijdens deze tijdelijke fase moet de toegestane snelheid van de treinen worden verlaagd.
- Gebruik alleen ingegoten spoor wanneer geluidsvermindering belangrijk is (vanwege moeilijker en tijdrovend onderhoud).
- Voor ingegoten spoor: maak een opening van 500 mm tussen de secties om een goede thermietlas in de rail te maken (zie *Onderhoudsvoorzieningen*).
- Zichtbaarheid van het spoor van onderaf wordt verminderd, indien constructief mogelijk inspectiegaten in de bovenplaat opnemen.
- Voeg de remvoorziening (zie *Met of zonder verbinding met de hoofdligger*) in het ontwerp toe om de einddwarsdrager beter bestand te maken tegen het horizontale moment.

### Definitief Ontwerp

Zoals eerder beschreven, moet een ingegoten spoor alleen worden gekozen als geluidsreductie nodig is. Daarom zullen we ons concentreren op een constructie met direct bevestigde spoorstaven. Bij alle opties nemen we een

ontsporingconstructie op, vast of vervangbaar. In de rest van deze case study zullen we ons richten op de meest gewenste oplossing: optie 5 (afb. 10). We zullen twee situaties overwegen: 'standaard' zoals getoond en 'breed' (met verbinding met de hoofdligger, afb. 8).

### Herbeoordeling bestaande hoofdligger

Door het versterken van de brug met deksecties zal het eigengewicht van de brug toenemen, daarom moet de bestaande hoofdligger worden gecontroleerd. Zoals in tabel 4 getoond, is de toename van spanningen in de hoofdligger echter verwaarloosbaar.

### Invloed van versterking op resterende levensduur

Dit is een case study waarbij we vooral geïnteresseerd zijn in het effect van de versterking. Om deze effecten te vergelijken, gaan we ervan uit dat alle schade door vermoeiing in het referentiejaar (RY) gelijk is aan 0,5. De resterende vermoeiingslevensduur (RFL, zie ook tabel 5) kan worden bepaald door:

$$RFL = (1 - D_{RY}) / D_{\text{Year}}$$

Het probleem met bestaande constructies is dat wanneer bij een berekening de schade al boven 1 uitkomt, dit niet betekent dat de constructie al schade heeft. Het eerste dat men in dit geval kan doen, is het gebruik van daadwerkelijk verkeer in plaats van verkeer volgens de Eurocode. In de meeste gevallen is het werkelijke verkeer minder dan het ontwerpverkeer. Als



11. Casus 2: spoorbrug over de Maas bij Buggenum.

deze berekening een schade van minder dan 1 oplevert, kan men de versterking gebruiken om het zo te houden (met toekomstig ontwerpverkeer). Als de schade nog steeds boven 1 wordt berekend, moet de versterking alle krachten op kunnen nemen (stel je voor dat de oorspronkelijke constructie al gebroken is), omdat je nooit zeker weet dat er geen defecten zijn (detectie-apparatuur toont niet alle initiaties).

### Resultaten

- De hoofdelementen zijn niet gevoelig voor vermoeiing, ook de versterkingen zullen niet veel effect hebben op deze items.
- Dwarsdragers. Groot effect, door het elimineren van zwakke buigmomenten.
- Langsliggers (veldmoment). Toename van 4x restlevensduur.
- Langsliggers (steunpuntsmoment). Groot effect, trekplaat bevindt zich na versterken in de neutrale lijn.
- Dwarsdrager-langsligger (verbinding). Toename van 4x restlevensduur.

Conclusie: Voor de meest kritieke items in de brug is er minstens een 4x toename van de resterende vermoeiingslevensduur.

### Casus 2: voorkomen versterking

Voor een andere brug, de spoorbrug over de rivier de Maas bij Buggenum (afb. 11), is onderzocht of versterking kon worden voorkomen door geavanceerde herberekening. Dit betekent een berekening die verder kijkt dan de Eurocode zoals beschreven in [2]. Hierna volgt een kort overzicht van de resultaten.

## Vermoeiing

Voor deze brug analyseerden we de vermoeiingslevensduur van de verbinding tussen de langsligger en dwarsdrager in verschillende situaties en op alle maatgevende locaties. In afbeelding 12 worden de locaties van de vermoeiingscontroles gegeven. Op elke locatie wordt driemaal de vermoeiingscontrole uitgevoerd (allemaal voor 100 jaar, 1916-2016):

- Verkeer volgens de Eurocode (25 mln. ton/jaar).
- Gereduceerd jaartonnage volgens een (conservatieve) schatting door ProRail, zie tabel 6.
- Op basis van het daadwerkelijke verkeer.

## Actueel verkeer

Voor het daadwerkelijke verkeer gebruikten we de gegevens van het weeg in beweging systeem Quo Vadis<sup>[3]</sup>. Vanuit dit systeem wordt elke passerende trein geregistreerd en wordt de werkelijke asbelasting en -afstand nauwkeurig gemeten. We hebben de gegevens van tien normatieve weken in het jaar 2016 gebruikt. In dit jaar 2016 bedroeg het jaarlijkse tonnage 11 miljoen ton. Dit is lager dan de schatting en tevens met lagere aslasten. Ook de asbelastingen en afstanden van deze meting zullen worden gebruikt. We nemen voor de case study aan dat dit verkeer voor de gehele periode van 100 jaar hetzelfde is geweest. Meer informatie over deze gemeten gegevens is te vinden in [2]. Zie tabel 7 voor de resultaten van de vermoeiingsberekening.

## Resumé model kalibreren

Met de case study en de metingen bij de brug over de Waal<sup>[1]</sup> bleek dat het belangrijk was om een FEM-model te verfijnen om correcte spanningen te krijgen in lokale details. Verfijning van het model is gedaan met de volgende acties.

- Gebruik van schaalementen voor het eerste deel van de brug.
- Een tweede brug toevoegen en de bijbehorende koppeling via de rails.
- Verfijning van ondersteuningscondities en rotatiestijfheid.

Nauwkeurig evalueren van spanningen in de constructie, met een verfijnd model, is van belang voor de gedetailleerde analyse die nodig is bij het versterken van een bestaande

constructie. Met een eenvoudig FEM-model kunnen sommige effecten over- of onderschat worden, vooral wanneer stijfheid van verbindingen de krachtverdeling dicteert. Metingen ter plaatse en het daarmee bijwerken van het eindige-elementenmodel is een goed hulpmiddel om een nauwkeurig eindige-elementenmodel te krijgen om een brug zinvol te versterken. Meestal is een nauwkeurig schaalmodel alleen nodig voor een klein deel van de elementen. Het inbedden van het schaalmodel in een globaal staafmodel is een goede manier om het FEM-model werkbaar te houden, terwijl het nog steeds accuraat is in de onderdelen die belangrijk zijn.

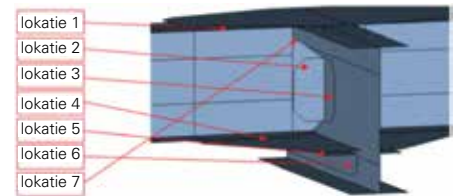
## Resumé versterking

Na contact met de ProRail hebben we geconstateerd dat de direct bevestigde rail de meest gewenste oplossing is vanwege onderhoudsoverwegingen. Dit is ook de meest eenvoudige en een goedkope bouwmethode. Gecombineerd met een vervangbare ontsporingseleider wordt de beste versterkingsoplossing gevonden voor deze case study. Deze oplossing resulteert in de gewenste effecten.

- De hoofdelementen zijn niet gevoelig voor vermoeiing, ook de versterkingen zullen niet veel effect hebben op deze items. Voor deze elementen zullen zich geen problemen voordoen.
- Voor de dwarsdraggers zal de versterking een groot effect hebben, vanwege het elimineren van zwakke buigmomenten.
- Voor het veldmoment van de langsliggers leidt de versterking tot toename van de resterende vermoeiingslevensduur met een factor 4.
- Voor het steunpuntmoment van de langsliggers zal de versterking een groot effect hebben, aangezien de trekplaat zich nu in de buurt van de neutrale lijn bevindt.
- Voor de verbinding tussen de dwarsdraggers en de langsligger, leidt de versterking tot een vier keer zo grote resterende vermoeiingslevensduur.

## Resumé voorkomen van versterking

In de tweede case study was het doel om versterking te voorkomen door geavanceerdere berekeningen. Vermoeiing is het grootste probleem waar we ons op concentreerden.



12. Locaties voor vermoeiingscontrole.

Dit resulteerde in de volgende conclusies.

- Eurocode-verkeer voor bestaande spoorbruggen is zeer conservatief. De bestaande constructie is ontworpen met andere richtlijnen, waarbij meestal geen rekening wordt gehouden met deze vermoeiingseffecten.
- Het gebruik van minder verkeer (bijvoorbeeld de jaarlijkse tonnage) op basis van een voorzichtige schatting (door de spoorwegautoriteit) kan de schade verminderen tot waarden die meer aan de werkelijkheid zullen voldoen.
- Het gebruik van werkelijk verkeer (indien bekend) geeft een goede beoordeling van de vermoeiingsschade tot nu toe (tot het moment van berekening).
- Voor de resterende levensduur (komende verscheidene jaren) moet een voorzichtige schatting van de jaarlijkse hoeveelheid worden gebruikt. •

## Literatuur

1. M. van der Burg en A. Steenbrink, 'Spoorbrug versterken met stalen deksecties', *Bouwen met Staal* 257 (2017), p. 36-42.
2. S. Alphen, 'Recalculation of the Railway Bridge Buggenum', *40th IABSE Symposium*, Nantes (Fr) 2018.
3. G. den Burman en A. Zoeteman, 'Quo Vadis: Review of the Contribution of a Weigh-in-Motion System to Optimising Railway Performance', *ProRail Inframanagement, Proc. 7th World Congr. Railway Res.*, Montréal (QC)(CA) 2006.
4. A. Teras en R. Greiner 'Development and Application of a Fatigue Class Catalogue for Riveted Bridge Components', *Structural Engineering International* 20 (1) (2010), p. 91-103.