

# Spoorbrug versterken met stalen deksecties



1. Brug over de Waal. Het rood gemarkeerd deel is case study voor het versterken van een stalen spoorbrug met stalen deksecties.

**Met een case study en metingen aan de brug over de Waal bij Zaltbommel kan worden geconstateerd dat verfijnd modelleren en indien mogelijk kalibreren, een nauwkeurige uitvoer oplevert en de werkelijkheid beter benadert. Daarmee kan worden voorkomen dat de constructie wordt onder- of overschat, wat met een eenvoudig EEM-model kan gebeuren. Toelichting op onderzoek en metingen die onderdeel zijn van een Europees samenwerkingsverband.**

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

Mark van der Burg en Arjen Steenbrink zijn beiden senior constructeur bij advies- en ingenieursbureau Movares in Utrecht.

In de Europese vervoersinfrastructuur (weg en spoor) bestaat een grote verscheidenheid aan soorten stalen en staal-beton bruggen waarvan het merendeel 50 jaar of ouder. De effecten van de verhoging van de verkeersbe-

lasting (gewicht en intensiteit) en verzwaring van normeringen is de nieuwe opgave voor de structurele veiligheid, goede onderhoudsstaat en duurzaamheid van deze bruggen. Tevens zijn veel van deze oude bruggen landmarks en daarmee historische en cultureel belangrijke objecten. Vervanging is veelal niet wenselijk gezien de impact op de omgeving, milieubelasting en investeringskosten. Er zijn daarom passende concepten voor

reparatie en versterking vereist. Het Europese project 'Prolonging Life time of old steel and steel-concrete bridges', kortweg ProLife, heeft dan ook als hoofddoel het bepalen en vergelijken van levensduurverlengende maatregelen voor bruggen. Binnen het project zijn partners (zie *kader boven*) bezig met bijvoorbeeld staal-beton bruggen en het aanbrengen van composietwerking door achteraf verdeuvelen, het versterken van vakwerken door knopen in te storten in ultrahogesterktebeton, het versterken van spoorbruggen met een betonnen vloer, wrijvingsverhogende maatregelen voor voorspanverbindingen enzovoort. Movares beschouwt de spoorbrug bij Zaltbommel als case study voor het versterken van een stalen spoorbrug met stalen deksecties.

## ProLife

ProLife wordt uitgevoerd in opdracht van de Europese Commissie en ondersteund door het Research Fund for Coal and Steel Program onder subsidienummer RFSR-CT-2015-00025. De partners: Luleå tekniska universitet, Zweden; Universidade de Coimbra, Portugal; ArcelorMittal Belval & Differdange, Luxemburg; Ramboll Sverige, Zweden; Schimetta Consult Ziviltchniker, Oostenrijk; Alessio Pipinato & Partners Architectural Engineering, Italië en Movares Nederland, Nederland.



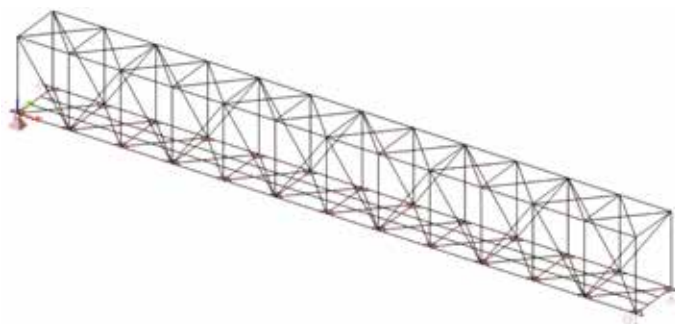
2. 1945.



3. Verbinding vakwerkligger.



4. Verbinding langsligger-dwarsdrager.



5. 3D-aanzicht van het EEM-model.

## Geschiedenis

Bij Zaltbommel kruist de spoorlijn Den Bosch-Utrecht de Waal met twee parallelle enkelsporige overbruggingen. Elke overbrugging heeft elf overspanningen: drie hoofdoverspanningen en acht overspanningen in de uiterwaarden. De totale lengte van de overbrugging komt daarmee op 863 m. Deze studie concentreert zich op de 3<sup>e</sup> overspanning (afb. 1).

De brug heeft meerdere wijzigingen ondergaan, mede door herstel van oorlogsschade. De eerste enkelsporige brug is gebouwd in 1869. De fundering was reeds voorbereid op een tweede spoor. In 1932 is de brug voor dit tweede spoor geopend, echter aan het eind van WO II was de brug vrijwel volledig

beschadigd (afb. 2). Door hergebruik en herstel kon in 1947 weer één spoorlijn open. In 1951 werd ook het tweede spoor geopend, hiervoor zijn deels nieuwe bruggen gebouwd. De overspanning voor deze case study dateert van 1932.

## Schematisering

De beschouwde brug is een vakwerkbrug met een enkele overspanning van 59,6m. Het vakwerk is 7,5 m hoog en de dwarsdragers liggen h.o.h. 4,97 m. De brug is volledig geklonken en grotendeels uit platen opgebouwd. Alleen de langsliggers zijn walsprofielen (DIN 45).

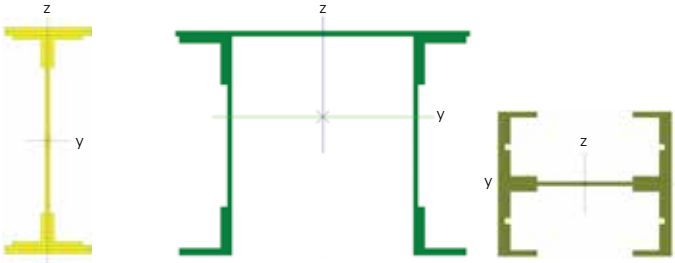
## Eerste versie rekenmodel

Als eerste is een staafmodel (afb. 5) opgesteld

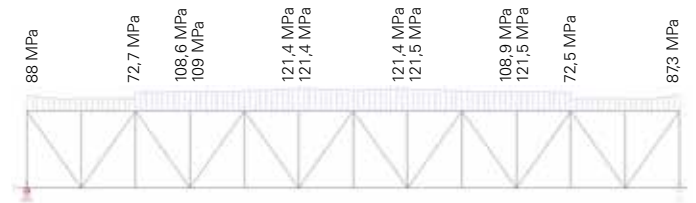
waarbij alle staven met de juiste doorsnede en excentriciteiten zijn gemodelleerd. Het onderwindverband is daarbij niet verbonden aan de langsliggers, zoals deze in werkelijkheid ook langs deze ligger gaan. Met dit model kan een eerste analyse van de brug worden uitgevoerd om de zwakke plekken van de constructie te bepalen. Hoewel dit model naar huidige maatstaven eenvoudig is, is het al geavanceerder dan de originele berekening waarin de secundaire en 3D-effecten niet volledig werden meegenomen.

## Belastingen

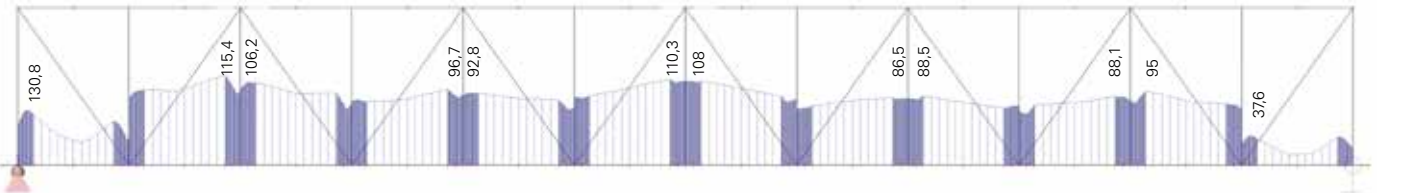
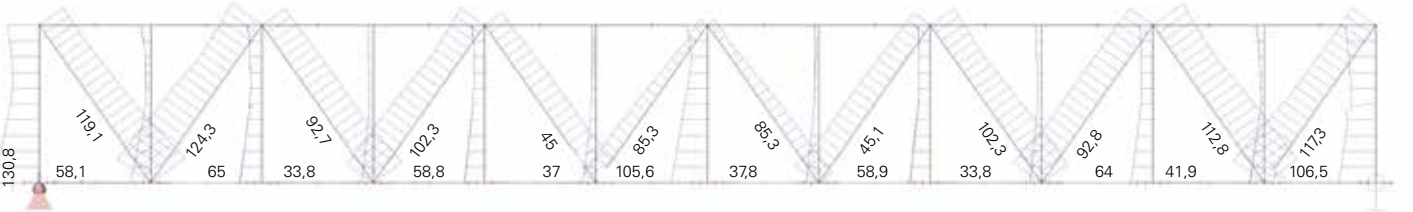
In het model worden de gebruikelijke belastingen met bijbehorende partiële veiligheidsfactoren geplaatst volgens NEN-EN 1991-2:



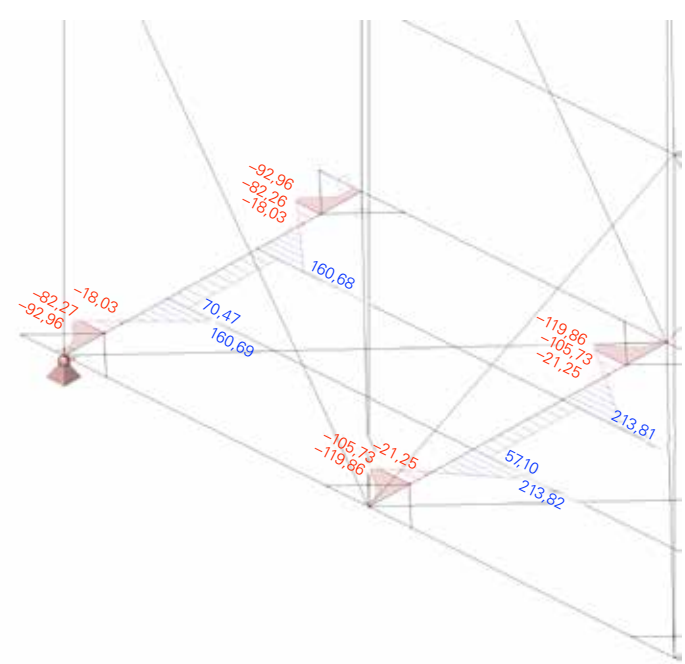
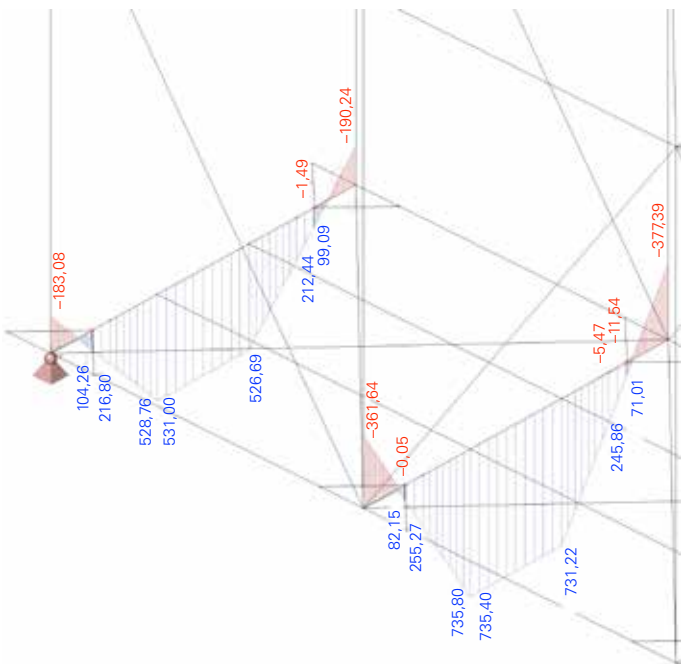
6. Enkele doorsneden van de brug (dwarsdrager, bovenregel en diagonaal).



7. Von Mises-spanningen in de bovenregel van de hoofdligger.



8. Von Mises-spanningen in onderregel van de hoofdligger en de diagonalen.



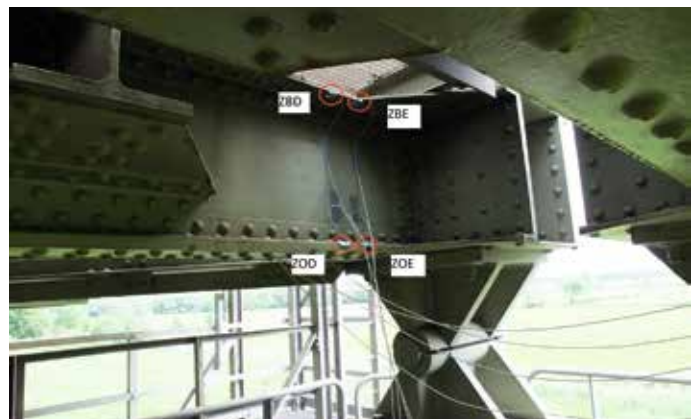
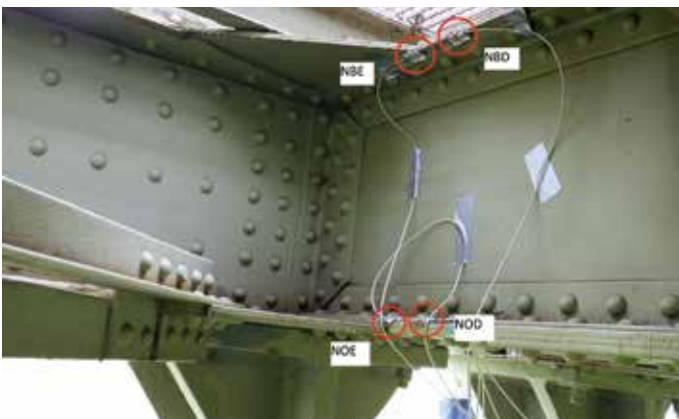
9. Buigende momenten in de dwarsdrager. Verticale momenten links en horizontale momenten rechts.



10. Vervormde constructie van de brug onder belasting van spoorverkeer (zij aanzicht en bovenaanzicht).



11. Locatie van de metingen. Profiel achter is de cross beam, rechts de main girder. Foto rechts: close up onderflens cross beam.



12. Overzicht meetlocaties met coderingen.

- eigen gewicht;
- verticale verkeersbelasting ( $\alpha = 1,21$ );
- remkracht;
- zijdelingse stoot.

De gebruikte belastingen zijn hoger dan de huidige gebruiksbelasting. Voor het project ProLife wordt de maximale ontwerpbelasting (nieuwbouw) aangehouden, om te kijken of de oude bruggen met beperkte maatregelen ook voor het zwaarste verkeer geschikt gemaakt kunnen worden. De ontwerpbelasting is volgens de Eurocode toegepast, deze is hoger dan de vrijgegeven gebruiksbelasting door ProRail

### Resultaten eerste versie rekenmodel

Eén van de belangrijke aannames is dat de hoofddraagconstructie van dit type brug nog voldoende sterk is om de huidige belastingen te kunnen dragen. De problemen zullen optreden in de direct bereden delen (met name de langsliggers en dwarsdragers). Als eerste is deze aanname gecontroleerd met een eenvoudig staafmodel.

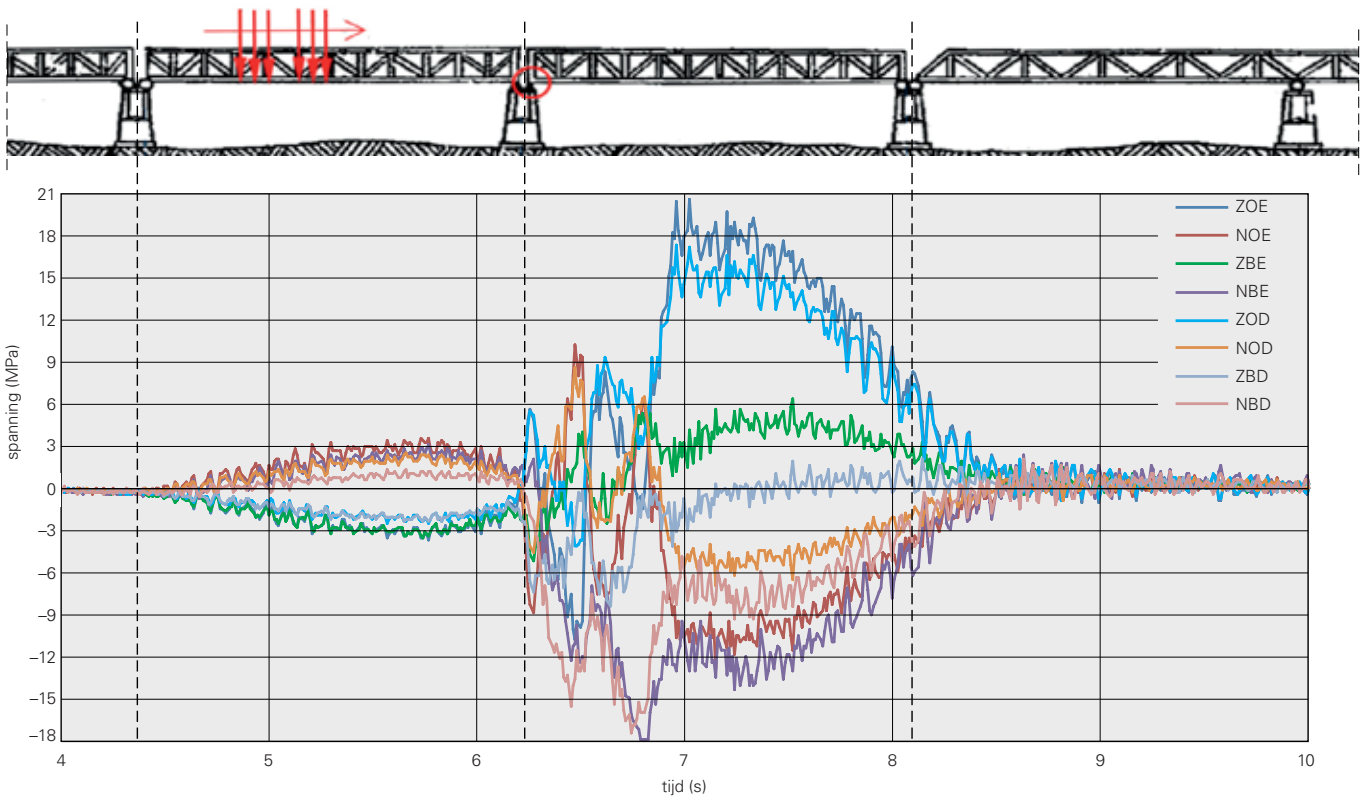
In afbeelding 7 is te zien dat de maximale spanning in de bovenrand aanwezig is. Deze

Von Mises-spanning is 121,5 MPa en resulteert in een uc van  $121,5/210 = 0,58$ . Uiteraard moet hier nog een stabiliteitscontrole over worden toegepast. Door het bovenwindverband is de bovenrand effectief gesteund tegen knikken. Hierbij is een kniklengte van 5 m (afstand tussen de verticalen) aanwezig. Zo ontstaat een reductiefactor  $\chi = 0,95$  en conservatief bekeken een sterkte- en stabiliteitstoets met een uc van  $121,5/(0,95 \cdot 210) = 0,61$ . De hoofddraagconstructie voldoet daarmee. In de spoordragende elementen zijn de optredende spanningen een stuk hoger. In de einddwarsdrager is de spanning in het model gelijk aan 396,0 MPa (uc = 1,26). Deze hoge spanning wordt vooral veroorzaakt door buiging in zwakke richting van de dwarsdrager (afb. 9) Dit secundaire effect is in de originele berekening niet beschouwd waardoor hier ook niet op ontworpen is. Het effect ontstaat door belasting van de brug waardoor de hoofdligger (vakwerkligger) gaat doorbuigen. Deze doorbuiging zorgt voor verlenging van de onderrand. Via de dwarsdragers wordt deze normaalkracht doorgegeven aan de langsliggers (afb. 10). Door deze hoge spanningen neemt ook de

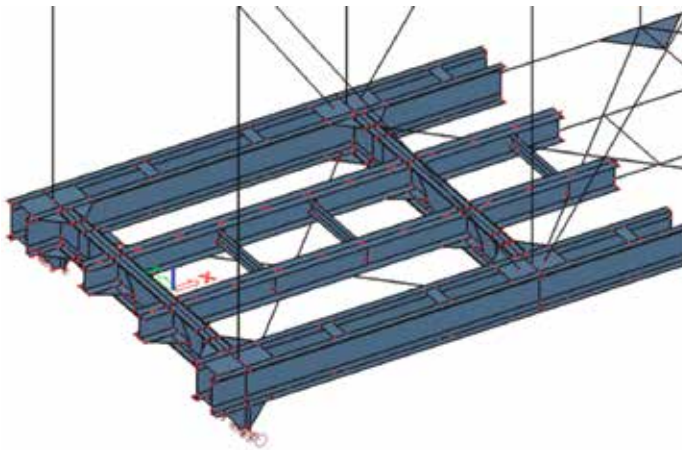
vermoeiingslevensduur af, zeker voor deze lokale onderdelen die iedere as als een wisseling ondergaan, terwijl de globale onderdelen zoals de vakwerkligger geen afzonderlijke assen voelen, maar alleen hele treinen. Uit deze eerste analyse kan worden geconcludeerd dat de dwarsdragers en de langsligger maatgevend zijn voor de vermoeiingslevensduur van de hele brug. Daarnaast is de conclusie dat deze brug zich uitstekend leent voor een studie naar levensduurverlengende maatregelen door het versterken van de brug met deksecties.

### Spanningsmetingen

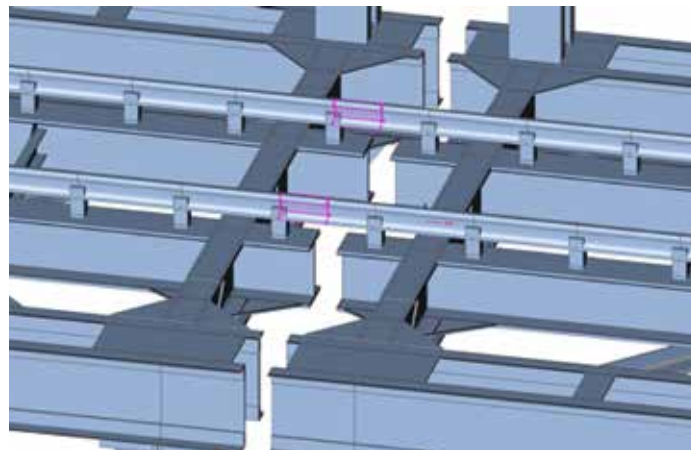
De maatgevende locatie is nu bekend. Er komen op deze locatie momenten in zowel de sterke richting als de zwakke richting van het profiel voor. Het is lastig om de exacte waarde van deze momenten te berekenen, omdat deze momenten grotendeels afhankelijk zijn van lokale stijfheid van onder andere de verbindingen. Daarom is besloten tot metingen aan de brug. Aan de hand van de meetresultaten kan dan het model worden gekalibreerd zodat het goed overeenkomt met de werkelijkheid.



13. Gemeten spanningen bij passage van loc NS1200.



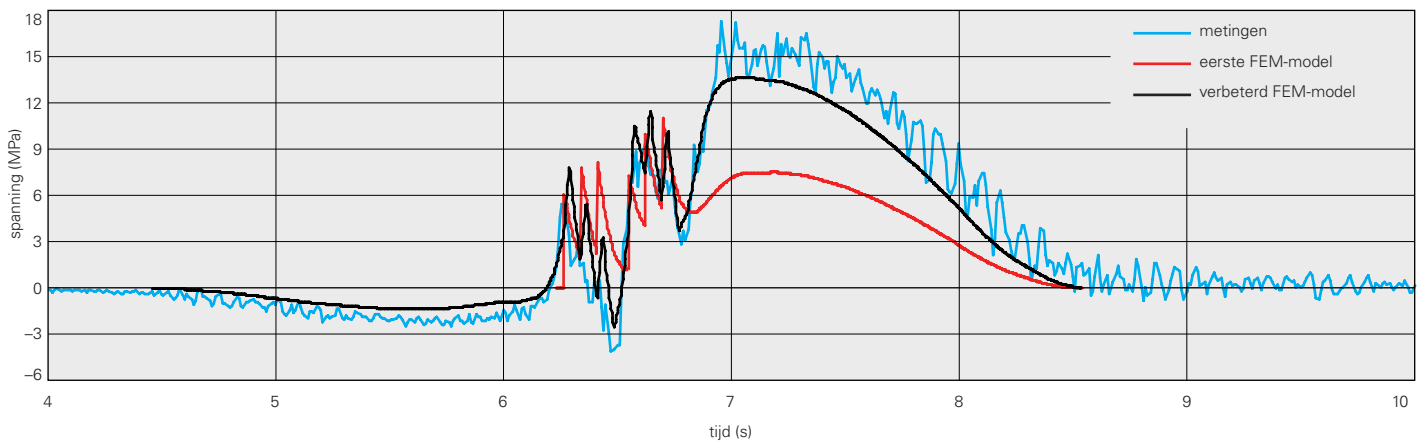
14. Plaatellemen ingebed in het model.



15. EEM-model met de tweede brug en de rail gemodelleerd.



16. Enkele loc NS1200 (gebouwd in 1951).



17. Resultaat van het verfijnde model.

De metingen zijn uitgevoerd met rekstrookjes op twee locaties op de dwarsdragers. De eerste locatie heeft een enkele flensplaat, de tweede locatie heeft twee flensplaten (afb. 11). Op beide sneden zijn de rekstrookjes op de vier hoeken van de I-vormige doorsnede aangebracht (afb. 12). Op al deze plaatsen worden gelijktijdig de spanningen gemeten bij iedere treinpassage (gedurende de meetperiode van 12 uur). De afkortingen in afbeelding 12 staan voor Noord/Zuid, Boven/Onder en Enkel/Dubbel. ZOE is dus geplaatst aan de zuidzijde van de dwarsdrager op de onderflens en in de doorsnede met een enkele flensplaat.

Ook de belastingen worden gemeten. Hiervoor wordt het in Nederland beschikbare Weigh in motion-systeem<sup>[1]</sup> gebruikt. Vanuit dit systeem wordt op vele locaties in Nederland vastgelegd welke trein er passeert, hoeveel iedere as weegt en wat de asafstanden zijn. Dit systeem is zo nauwkeurig dat zelfs verschillen in het aantal passagiers tussen twee meetpunten zichtbaar zijn. De resultaten worden gecombineerd met de metingen van de rekstrookjes.

Een passage betrof een enkele locomotief. Deze belasting is erg geschikt voor een vergelijk tussen meting en berekening, zie afbeeldingen 13 en 16.

### Vergelijk 1e EEM-model en metingen

Opvallend is dat sommige resultaten van rekstrookjes aardig overeen komen terwijl andere afwijken. Ook valt op dat aan de hand van de spanningen in drie punten in de doorsnede de vierde niet berekend kan

worden indien de lineaire spanningsverdeling wordt aangehouden. Dat betekent dat vlakke doorsneden niet vlak blijven zoals de theorie van de klassieke Euler-Bernoulli-balk. In afbeelding 13 zijn de gemeten (blauw) en berekende spanningsverlopen (rood) gegeven voor locatie ZOD en loc NS1200. Drie soorten constructief gedrag worden onderscheiden.

1. Het effect van de voorliggende brug dat via het spoor wordt overgedragen.
2. Verticaal buigend moment.
3. Horizontaal buigend moment.

In alle drie deze gebieden zijn modelverfijningen noodzakelijk. Omdat er één overspanning is gemodelleerd, is de doorgifte van spanningen vanuit de naastgelegen brug (effect 1) niet aanwezig. De verticale buiging geeft in het EEM-model (locatie ZOD) alleen trek terwijl de metingen ook drukspanningen registreren. De oorzaak: excentriciteit van de oplegging in dwarsrichting van de brug die in het staafmodel niet aanwezig is. Hierdoor ontbreekt het kopmoment op de einddwarsdrager. De horizontale buigstijfheid is niet correct en kan worden verbeterd door een juiste modellering van de stijfheid van de verbindingen.

### Gekalibreerd eindige-elementen-model

De eerste verbetering van het model is het vervangen van de staafelementen door plaat-elementen over de eerste 7,5 m van de langsliggers, dwarsdragers en de onderrand van de

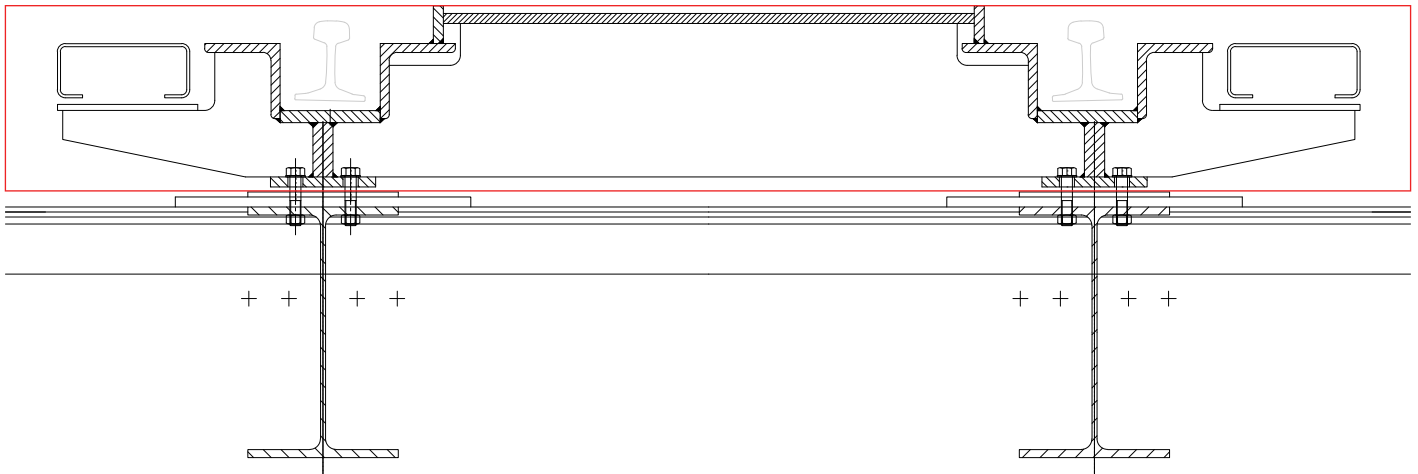
vakwerklijgger. Hierdoor kan de spanningsverdeling in een doorsnede verlopen zoals in de metingen was geconstateerd. Tevens worden de buigstijfheden in zwakke richting van de dwarsdrager beter benaderd, doordat de stijfheden van de verbindingen ook meer accuraat worden meegenomen. Deze verbeterde modellering van de stijfheid van de verbindingen zorgt voor een betere afdracht van de trekspanningen vanuit de onderrand van de vakwerklijggers naar de langsliggers. Zie afbeelding 14 voor het ingebedde plaatmodel.

### Oplegcondities

De tweede verbetering in het model kon worden gevonden in de oplegcondities. Uit de metingen bleek dat als een puntlast halverwege de overspanning was de einddwarsdrager nog steeds verticaal buigende momenten te voorduren kreeg. Omdat de dwarsdrager op dat moment niet belast wordt, ontstaan deze buigende momenten door de excentriciteit van de oplegging.

### Naastliggende brug

Met afbeelding 15 wordt duidelijk dat de verbinding tussen twee (in het verlengde liggende) bruggen door de doorgaande spoorstaaf interactie hebben. Hierdoor ontstaat met name buiging in de zwakke richting van de dwarsdrager op dezelfde wijze als in afbeelding 10. Zoals in afbeelding 17 is weergegeven, is de tweede brug toegevoegd waarbij ook de spoorstaven en de verbinding van de spoorstaaf aan de brug is meegemodelleerd. Voor deze verbinding is een veerstijfheid



18. Voorstel versterkingsmaatregelen (in het rode kader).

aangehouden van 11 kN/m en is de verbinding gelijk aan de dwarsliggerafstand iedere 715 mm aanwezig. De veerstijfheid is daarbij gekalibreerd aan de hand van de metingen. Daarnaast is er op de brug rekening gehouden met het effect dat als één brug wordt belast de rotatie aan het eind van de overspanning op de tweede brug kan leiden tot trekspanningen in de spoorstaafbevestiging. Om dit op te kunnen nemen, zijn op de eind van de bruggen anti-wipbevestigingen gemonteerd. Deze bevestigingen zijn ook meegenomen in het model.

### Resultaten

Nadat alle verbeteringen in het model zijn doorgevoerd, konden de spanningen in het model opnieuw vergeleken worden met de spanningen uit de metingen (afb. 17). De verfijningen en verbeteringen zorgen er voor dat de resultaten van het model goed overeenkomen met de metingen. Duidelijk is dat alle optredende effecten uit de metingen ook in het model zijn terug te vinden. Het model is nu geschikt voor verdere analyse.

### Conclusies

Met deze case study en de metingen aan de brug over de Waal bij Zaltbommel kan worden geconstateerd dat het belangrijk is om een dergelijke oude brug voldoende te verfijnen en indien mogelijk te kalibreren. In dit model zijn de volgende verfijningen aangebracht. 1. Plaatelmente in het 1e deel van de brug,

2. Toevoegen van de in het verlengde liggende brug en de spoorstaven doorkoppelen.
3. Verfijnen van oplegcondities en rotatiestijfheid.

Op de werkelijkheid gebaseerde en verfijnde modellen, zorgen voor een nauwkeurige uitvoer. Dit is erg belangrijk om te voorkomen dat de constructie wordt onder- of overschat, wat met een eenvoudig EEM-model zou kunnen gebeuren. Hierbij zijn vooral de stijfheden van de verbindingen en hun invloed op de krachtsverdeling van belang. Het uitvoeren van metingen om daarmee het model te kunnen kalibreren is een goede manier om het model de werkelijkheid nog beter te laten benaderen en de constructie niet ten onrechte goed of af te keuren.

### Vervolgonderzoek

In de vervolgfase wordt gekeken of en welke versterkingsmaatregelen nodig zijn. Hierbij wordt allereerst gekeken naar het toepassen van deksecties op de bestaande langsliggers, wat bij enkele spoorbruggen in Nederland al met succes toegepast is. *Afbeelding 18* is een voorbeeld hiervan. Deksecties kunnen ook met andere typen spoorstaafconstructies worden vormgegeven. Door het verbinden van deze twee onderdelen met pasbouten of injectiebouten gaat de nieuwe constructie volledig samenwerken. Hierdoor zal de spanning verlagen en dus de vermoeingslevensduur (restlevensduur) verhogen. In de ver-

volgfase zullen voor meerdere versterkingsopties en alternatieve deksectie-ontwerpen gemaakt worden en de effecten op de vermoeingslevensduur worden beschouwd, rekening houdend met praktijkervaringen die nu al opgedaan zijn voor dit type versterkingsmaatregelen. Aan het eind van het project kan een aanbeveling worden gegeven over de meest economische oplossing. •

### Literatuur

1. G. den Burman en A. Zoeteman, *Quo Vadis: Review of the Contribution of a Weigh-in-Motion System to Optimising Railway Performance*, ProRail Inframanagement, Proceedings from 7th World Congress Railway Research, Montréal (CA) 2006.