

Stieltjesweg 1  
2628 CK Delft  
Postbus 155  
2600 AD Delft

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 20 00  
F +31 88 866 06 30

## TNO-rapport

| concept

# Analyse kraakgeluid IJsselbrug A12

Datum	11 september 2018
Auteur(s)	Sjors van Es Casper Bosschaart Johan Maljaars
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	31 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat t.a.v. Sjoerd Wille Postbus 2232 3500 GE Utrecht
Projectnaam	Rheden breuktaaiheid
Projectnummer	060.31758/01.01

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.

© 2018 TNO

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Geluidsmeting 5-6 september 2018 .....</b>	<b>5</b>
2.1	Opzet van de meting.....	5
2.2	Hoorbaar geluid .....	7
2.3	Meetgegevens en interpretatie .....	7
<b>3</b>	<b>Constructieve aanpassing.....</b>	<b>11</b>
3.1	Conceptoplossing .....	11
3.2	Dimensionering.....	11
<b>4</b>	<b>Geluids- en rekmeting 7-8 september 2018 .....</b>	<b>15</b>
4.1	Opzet van de meting.....	15
4.2	Hoorbaar geluid .....	18
4.3	Meetgegevens en interpretatie geluidsmetingen.....	18
4.4	Meetgegevens van de rekmeting .....	18
4.5	Interpretatie van de rekmeting.....	27
<b>5</b>	<b>Conclusies.....</b>	<b>30</b>
<b>6</b>	<b>Ondertekening .....</b>	<b>31</b>

# 1 Inleiding

In opdracht van Rijkswaterstaat worden door Infralnspect sinds 2017 vermoeiingsinspecties uitgevoerd aan details in de IJsselbrug in de A12 nabij Rheden. Op 3 september 2018 heeft de inspecteur Rijkswaterstaat gewaarschuwd dat bij passage van zware vrachtwagens een krakend geluid hoorbaar was in de buurt van een verbinding in een zijoverspanning van de stalen hoofdbrug van de parallelrijbaan, in de hoofdligger die zich het dichtst bij de rechter (d.w.z. zwaar belaste) rijstrook bevindt. Naar aanleiding van deze melding hebben experts van Rijkswaterstaat op dezelfde dag een bezoek aan de brug gebracht. Zij hebben het genoemde geluid ook gehoord en hebben geconstateerd dat de symmetrisch gespiegelde verbinding aan de andere oever hetzelfde type geluid maar met grotere geluidsterkte te horen gaf. Rijkswaterstaat heeft daarop besloten dat de rechter rijstrook van de parallelrijbaan afgesloten moest worden voor verkeer. De voornaamste reden voor deze verkeersbeperkende maatregel was dat het geluid mogelijk (direct of indirect) het gevolg was van een groeiende scheur, hetgeen uiteindelijk kan resulteren in bezwijken van de brugconstructie.

Ten tijde van de melding werd onderhoud uitgevoerd aan de brug door aannemer Hollandia. In de buurt van de betreffende verbindingen werden klinknagels vervangen door voorspaninjectiebouten. Omdat het kraakgeluid mogelijk een oorzaak had in deze werkzaamheden, is besloten om de werkzaamheden eerst (met spoed) af te ronden, hetgeen gebeurd is op 4 en 5 september. In de nacht van 5 op 6 september heeft een meting op de brug plaatsgevonden, waarbij Rijkswaterstaat aan TNO gevraagd heeft om de bron van het geluid – indien het geval deze na afronding van de werkzaamheden nog aanwezig was – te identificeren. Het geluid werd waargenomen en de bron werd geïdentificeerd. Aan de hand daarvan heeft TNO op 6 september een constructieve aanpassing aan de brug uitgewerkt, die op 6 en 7 september door aannemer Hollandia aangebracht is in de brug. In de nacht van 7 op 8 september heeft een tweede meting op de brug plaatsgevonden, waarbij geconstateerd is dat het geluid niet meer aanwezig was en dat de brug naar behoren functioneert. Aan de hand daarvan is in gezamenlijk overleg het advies gegeven om de verkeersbeperking op te heffen, Tabel 1.

Tabel 1 Opsomming activiteiten in chronologische volgorde

Datum	Activiteit	betrokkenen
3-9-2018	Constatering kraakgeluid	Infralnspect / RWS
3-9-2018	Instellen verkeersmaatregel	RWS
4/5-9-2018	Afronden klinknagelvervanging bij de betreffende locaties	Hollandia
5/6-9-2018	1 <sup>e</sup> meting: identificatie geluidsbron	TNO / RWS
6-9-2018	Uitwerking constructieve aanpassing	TNO
6/7-9-2018	Aanbrengen constructieve aanpassing	Hollandia
7/8-9-2018	2 <sup>e</sup> meting: controle geluid & functioneren van de brug	TNO / RWS
8-9-2018	Advies opheffen verkeersmaatregel	RWS / TNO

Dit rapport geeft een beschrijving van de werkzaamheden en analyses uitgevoerd door TNO binnen het hierboven geschetste kader. Hoofdstuk 2 beschrijft de eerste meting en het resultaat van die meting. De constructieve aanpassing aan de brug is

beschreven in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 beschrijft de tweede meting en het resultaat van die meting. Conclusies en aanbevelingen zijn gegeven in hoofdstuk 5.

## 2 Geluidsmeting 5-6 september 2018

### 2.1 Opzet van de meting

#### *Doel van de meting*

In de nacht van 5-6 september is akoestisch onderzoek uitgevoerd met als doel het lokaliseren van de bronpositie van het krakende geluid in de gemonitorde secties van de brug.

Het onderzoek is beperkt tot twee globale locaties aan beide zijden van de rivier op de zuidelijke hoofdligger onder de parallelbaan van de IJsselbrug (rijrichting Arnhem-Westervoort). De motivatie voor deze afbakening komt enerzijds voort uit de waarneming van het krakende geluid op de genoemde locaties tijdens werkzaamheden aan de brug en anderzijds door praktische overwegingen als de hoeveelheid beschikbare sensoren en tijd.

Beide globale locaties zijn uitgerust met accelerometers. Deze sensoren registreren trillingen in de stalen bruggdelen. Door de signalen van alle sensoren gelijktijdig op te nemen, kan voor een krakend geluid geanalyseerd worden welke sensor het geluid als eerste registreert. De positie van die sensor is indicatief voor de bronpositie van het geluid.

#### *Locaties van de sensoren*

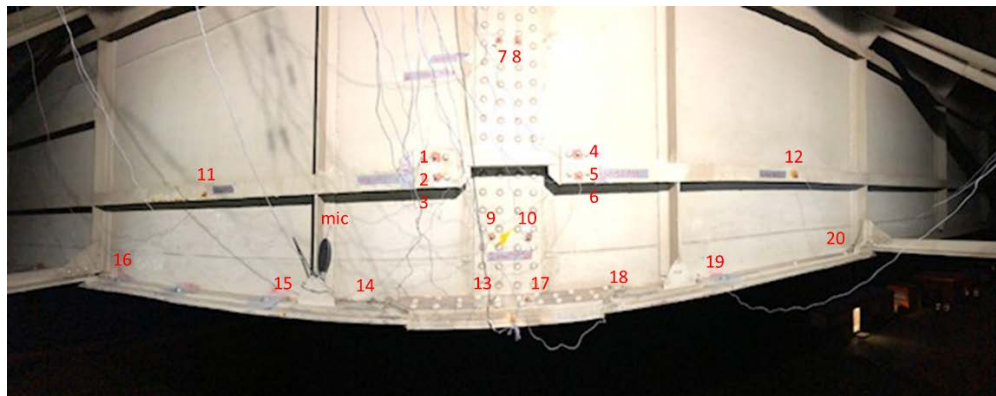
Aan de Arnhemzijde van de brug zijn 20 accelerometers geïnstalleerd. De sensorposities zijn zo gekozen dat in detail gekeken kan worden naar trillingen die mogelijk ontstaan in

- De flens van de hoofdligger
- De lagere langsverstijver op de hoofdligger of klinknagelverbindingen op deze locatie
- De koppelplaat over de twee lijven van de hoofdligger of klinknagelverbindingen op deze locatie

Verder zijn er sensorposities aan de randen van het globale gebied gekozen, om een scenario uit te sluiten waarin het krakende geluid buiten het globale gebied ontstaat. Tot slot is er een microfoon geplaatst om het hoorbare geluid op te nemen.

Aan de Westervortzijde van de brug zijn 4 accelerometers in een beperktere configuratie opgenomen om de twee posities te kunnen vergelijken. Tevens is aan de Westervortzijde een microfoon geplaatst.

Een overzicht van de sensoren aan de Arnhemzijde van de brug is weergegeven in Figuur 2.1 en Tabel 2.1. Van de Westervortzijde is geen overzichtsfoto beschikbaar. De bouw van de brug is echter identiek. Aan de Westervortzijde zijn sensoren geplaatst op posities, 1,4,14 en 18 zoals weergegeven in onderstaande afbeelding en tabel. De microfoon staat aan de Westervortzijde op dezelfde positie.



Figuur 2.1 Overzicht van de sensorposities aan de Arnhemzijde van de brug.

Tabel 2.1 Overzicht nummering accelerometers.

Accelerometer	Positie
1,4	Nabij klinknagelverbinding van het profiel dat de langsverstijvers over de koppelplaat verbind, aan beide zijden van de verbinding tussen de twee lijven.
2,5	Nabij klinknagelverbinding die dit profiel aan de langsverstijver verbind, aan beide zijden van de verbinding tussen de twee lijven.
3,6	Onderzijde horizontale deel van de langsverstijver, aan beide zijden van de doorkoppeling in het lijf.
7,8	Afbakening bovenzijde globaal gebied op de koppelplaat tussen de twee lijven van de hoofdligger aan beide zijden van de verbinding.
9,10	Koppelplaat tussen de lijven van de hoofdligger aan beide zijden van de verbinding.
11,12	Afbakening van het globale gebied op de langsverstijvers.
13,17	Op de koppelplaat aan de bovenzijde van de flens van de hoofdligger aan beide zijden van de verbinding tussen de twee flenzen.
14,18	Op de flens van de hoofdligger, vlak voor de koppelplaten, aan beide zijden van de verbinding tussen de twee flenzen.
15,19	Op de flens van de hoofdligger, nabij de las van de dwarsverstijver, aan beide zijden van de verbinding tussen de twee lijven.
16,20	Afbakening van het globaal gebied op de flens, aan beide zijden van de verbinding tussen de twee lijven.

Op alle posities zijn B&K accelerometers met een gevoeligheid van 1 mV/(m/s<sup>2</sup>) gebruikt.

Voor het bevestigen van de versnellingsopnemers is de conserveringslaag van de stalen bruggdelen verwijderd. De sensor zijn op verlijmde sensorvoetjes geschroefd om in een zo breed mogelijk frequentiegebied de trillingen in de brug te kunnen meten.

Alle sensoren zijn aangesloten op B&K LANXy Frontend (A/D conversie) modules. De signalen zijn met een samplefrequentie van 131072 Hz opgenomen om op sampleniveau onderscheid te kunnen maken voor de kleine looptijdverschillen voor sensoren die dicht bij elkaar gepositioneerd zijn.

Na het aanbrengen van de sensoren is de volledige parallelrijbaan afgesloten voor verkeer en is de brug gecontroleerd belast met in een ballasttest. Voor de

ballasttest is gebruik gemaakt van twee vrachtwagens beladen met zand met een totaalgewicht van ongeveer 50 ton. Met deze twee vrachtwagens is de parallelrijbaan bereden in verschillende configuraties:

- Eén vrachtwagen op de rechterrijstrook of linkerrijstrook
- Twee vrachtwagens parallel of direct achter elkaar op de rechterrijstrook
- Passages bij lage snelheid ( $\pm 20$  km/u) en hoge snelheid ( $\pm 80$  km/u)

## 2.2 Hoorbaar geluid

Tijdens de passage van de vrachtwagens is vanuit hoogwerkers nagegaan of het kraakgeluid dat op 3 september geconstateerd werd, nog steeds aanwezig was. Dit is uitgevoerd door dezelfde experts van Rijkswaterstaat die het geluid op 3 september hadden waargenomen, met in aanvulling daarop een medewerker van TNO. Tijdens de meting werd bij beide verbindingen hetzelfde kraakgeluid waargenomen als op 3 september. Daarnaast is bij passage van een vrachtwagen op de linker rijstrook geconstateerd dat het geluid ook aanwezig was – zij het minder hard – in de verbinding in de ligger die zich het dichtst bij de linker rijstrook bevindt (de lichtst belaste ligger). Tenslotte is geconstateerd dat het geluid ook aanwezig was bij verbindingen elders in de hoofdligger.

Uit deze geluidswaarnemingen kon de conclusie getrokken worden dat het geluid – direct of indirect – *niet* veroorzaakt kon worden door een groeiende vermoeiingsscheur, hetgeen een groot risico voor de veiligheid van de brug zou betekenen. Deze conclusie is gebaseerd op de volgende feiten:

- Het type geluid past niet bij dat van een groeiende vermoeiingsscheur; het leek op zogenaamd ‘slip-stick’ geluid van over elkaar bewegende platen. Het geluid kan dus niet direct veroorzaakt zijn door een vermoeiingsscheur;
- De kans dat meerdere verbindingen op hetzelfde tijdstip een vermoeiingsscheur met zodanige grootte ontwikkelen dat dit indirect zorgt voor het geconstateerde geluid is zeer klein, derhalve praktisch uitgesloten.
- De hoofdligger nabij de linker rijstrook heeft historisch een veel lichtere wisselende belasting opgelegd gekregen dan de hoofdligger nabij de rechter rijstrook. Het is praktisch uitgesloten dat vermoeiingsscheuren zich op hetzelfde tijdstip in de linker- en rechterhoofdligger ontwikkelen.

De locaties waar het bovengenoemde geluid geconstateerd is, krijgen allen bij passage van een vrachtwagen zowel een verplaatsing naar beneden als naar boven. Dit past bij het vermoeden dat het geluid te maken heeft met ‘slip-stick’.

## 2.3 Meetgegevens en interpretatie

Tijdens de vrachtwagenpassages is voor elke passage op zowel de globale locatie aan de Arnhemzijde als de Westervoortzijde van de brug een krakend geluid geobserveerd. Voor sommige passages was daarnaast ook een bonkend geluid waarneembaar. De analyse beperkt zich echter tot het krakende geluid, omdat dit geluid de aanleiding voor de zorg over de brug en de afsluiting van de parallelbaan is geweest.

Om de sensor die het krakende geluid als eerste registreert te identificeren, is de kruiscorrelatie tussen de sensorsignalen voor fragmenten uit de opnamen waarin het geluid optreedt berekend. De kruiscorrelatie is een maat voor de gelijkheid

tussen twee signalen, als functie van een onderlinge verschuiving in de tijd. De kruiscorrelatie heeft een maximum wanneer de onderlinge tijdverschuiving tussen twee signalen overeenkomt met het daadwerkelijke (loop)tijdverschil.

Deze methode is zeer geschikt voor het bepalen van de looptijdverschillen tussen sensoren die een geluid registreren dat vanuit één plek ontstaat. Om aan die voorwaarde te voldoen is steeds een kort fragment met het krakende geluid uit de opnamen geselecteerd voor deze analyse.

Tijdens de meting op 5 en 6 september zijn voor iedere passage steeds de bovengenoemde kruiscorrelaties tussen de sensoren bij het optreden van het krakende geluid berekend. Uit de gevonden looptijdverschillen komt een consistent beeld naar voren waarin het krakende geluid voor iedere passage ontstaat rondom sensoren 1-3, en zich vanuit daar uitbreid naar de omliggende sensoren. Voor een geluid dat op deze positie ontstaat is het aannemelijk dat de oorzaak ligt bij één of meerdere klinknagels waarbij een geringe verschuiving plaatsvindt.

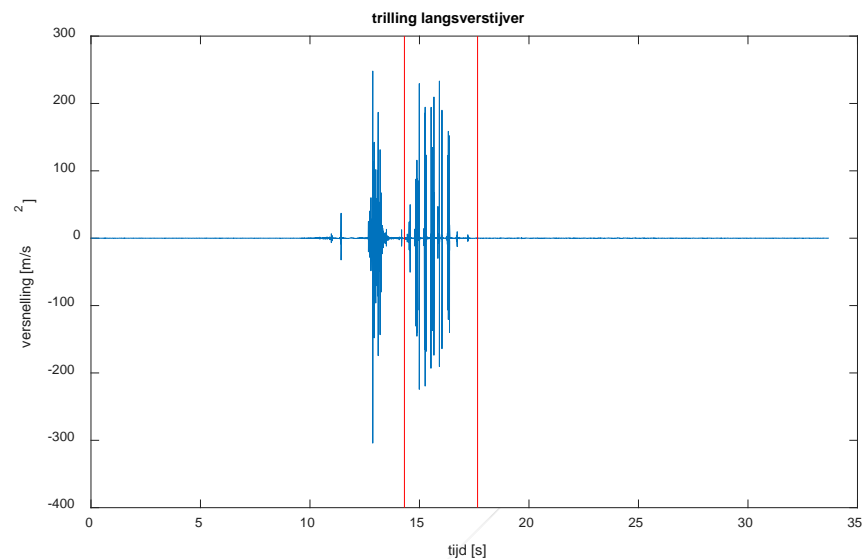
Analyse van de sensorgroep aan de Westervoortzijde van de brug laat eveneens zien dat de meeste kraken ontstaan bij de sensoren die op de langsverstijver bevestigd zijn.

Dit rapport heeft niet als doel om een uitputtende reeks analyses van iedere opgenomen kraak weer te geven, maar om de methode verder toe te lichten is hieronder een voorbeeld van een typische kraak weergegeven.

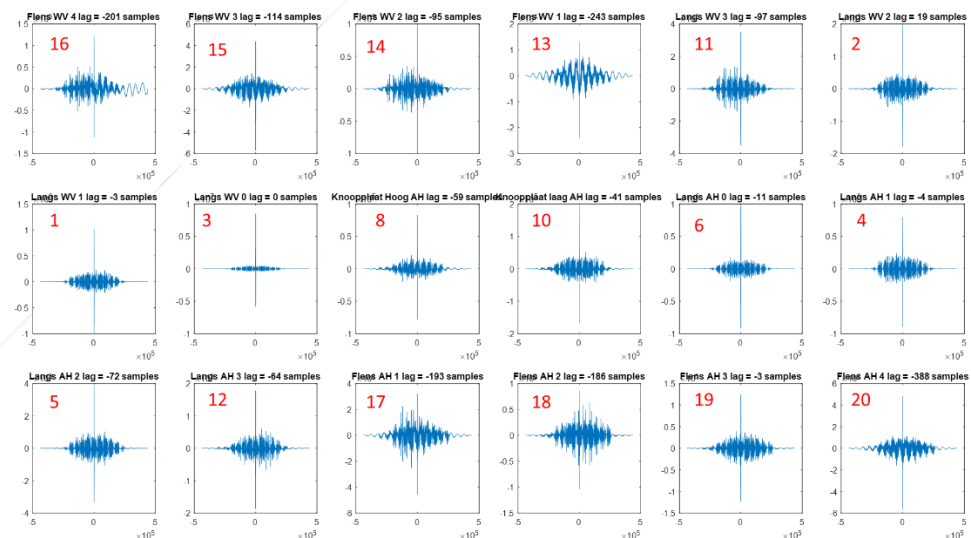
In Figuur 2.2 is voor een passage van één vrachtwagen de grafiek van de amplitude van de versnelling (trilling) als functie van de tijd weergegeven voor sensor 3. Deze sensor is gepositioneerd tegen het horizontale deel van de langsverstijver, dicht bij de doorkoppeling van de lijven van de hoofdlijger.

In de opname zijn twee geluidsevents waarneembaar. Het eerste event in ongeveer de 13<sup>e</sup> seconde laat zich het best omschrijven als een bonk, het tweede event tussen 14 en 17 seconden klinkt als een krakend geluid. Het fragment tussen de rode lijnen omvat dus de kraak, en is nader geanalyseerd door middel van een vergelijking van de kruiscorrelatiefuncties voor alle accelerometersignalen.





Figuur 2.2 Tijd-amplitude grafiek van de versnelling, gemeten op sensor 3 op het lijf van de langsverstijver. Er is een bonk en daarna gekraak gemeten.



Figuur 2.3 Analyse van de kruiscorrelatiefuncties voor alle accelerometers voor het kraakfragment tussen de rode lijnen uit Figuur 2.2. De rode getallen corresponderen met de sensornummers uit Tabel 2.1.

In de kruiscorrelatie analyse zijn de sensorsignalen vergeleken met het signaal van sensor 3. In Figuur 2.3 is voor elke sensor aan de Arnhemzijde van de brug een grafiek van de kruiscorrelatie tussen die sensor en sensor 3 weergegeven. De grafiek van sensor 3 zelf, betreft dus een autocorrelatie.

De grafieken van de kruiscorrelatiefuncties laten een beeld zien dat verwacht mag worden voor het uitbreiden van een geluidsevent vanuit één locatie zonder noemenswaardige verstoring door andere geluiden. De kruiscorrelaties tonen

duidelijke en unieke maxima voor een onderlinge tijdverschuiving die past bij de fysische vertraging als gevolg van de looptijd van het geluid tussen de sensoren.

De looptijden worden geduid aan de hand van het verschil in samples (discrete stappen in het tijddomein). Het aantal samples  $n$  is gerelateerd aan een tijdverschil  $\Delta t$  door de samplefrequentie  $F_s$ :

$$\Delta t = n / F_s$$

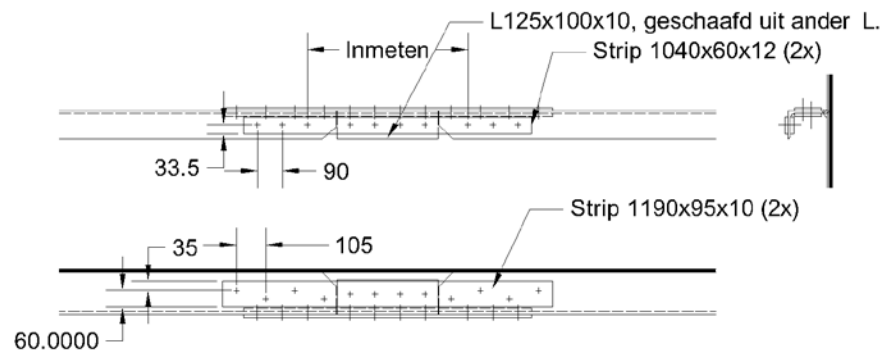
Bij elke grafiek staat de positie van het maximum van de kruiscorrelatiefunctie van dat signaal met het signaal van sensor 3 weergegeven in termen van het aantal samples verschuiving ten opzichte van het nulpunt gevonden uit de autocorrelatie van signaal 3. Een negatief aantal samples duidt op een positieve vertraging voor de betreffende sensor. Dat wil zeggen dat het krakende geluid op die sensor *later* wordt waargenomen dan op sensor 3. Voor een positief verschil in samples wordt het krakende geluid juist *eerder* waargenomen dan op sensor 3. Zoals blijkt uit bovenstaande vergelijking is het aantal samples ook een maat voor de grootte van de vertraging. Een groter verschil duidt dus op een groter tijdverschil.

Figuur 2.3 laat zien dat sensoren 1,2 en 3 als cluster zeer dicht bij de bron van het geluid liggen, en dat alle andere sensoren in toenemende mate verder van de bron verwijderd zijn.

### 3 Constructieve aanpassing

#### 3.1 Conceptoplossing

De locatie van het geluid bij de doorkoppeling van de langsverstijver, de geometrie van de verbinding en de aard van het geluid dat wees op slip-stick, maakt het aannemelijk dat het geluid veroorzaakt is door platen in de doorkoppeling die over elkaar bewegen. Vanuit constructief oogpunt was de aanwezige verbinding niet optimaal vanwege de onzekerheid in de voorspankracht in de klinknagels en de excentriciteit van aansluiting. Een alternatieve verbinding is bedacht, waarbij koppelplaten worden aangebracht om de huidige, hoekvormige verstijver. De koppelplaten kunnen met voorspaninjectionebouten vastgezet worden aan de verstijver. Ter plaatse van de koppelplaat in het lijf van de ligger wordt een hoekprofiel tussen de koppelplaten van de verstijver aangebracht, om uitknikken van de koppelplaten te voorkomen. Figuur 3.1 geeft de geometrie van de nieuwe doorkoppeling.



Figuur 3.1 (Concept)oplossing doorkoppeling verstijver.

Op 6 en 7 september heeft aannemer Hollandia de oorspronkelijke doorkoppeling van de verstijver verwijderd en de nieuwe doorkoppeling aangebracht op de locatie waar het geluid het beste hoorbaar was.

#### 3.2 Dimensionering

Bij het dimensioneren van de conceptoplossing zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Afmetingen bestaande constructie volgens tekeningen A85.364 en A85.369, map 4C, bundel 1904.
- Staalsoort langsverstijvers S235 (afgeleid uit renvooistaat, map 4B, bundel 1904).
- Dimensionering op basis van volledig aansluiten horizontale verstijvers op zowel trek als druk.

$$\text{Kracht in lange been hoekstaal: } F_{Ed,lb} = A_{L150x100x10} \cdot \frac{150}{250} \cdot 235 \cdot 10^{-3} = 341 \text{ kN}$$

$$\text{Kracht in korte been hoekstaal: } F_{Ed,kb} = A_{L150x100x10} \cdot \frac{100}{250} \cdot 235 \cdot 10^{-3} = 227 \text{ kN}$$

- De bestaande boutgaten in de verstijvers worden hergebruikt.

- Voorspaninjectiebouten, categorie C. Worden uitgerekend als voorspanbouten categorie C (weerstand van injectiehars wordt verwaarloosd).  
Wrijvingscoëfficiënt van de oppervlakten:  $\mu=0,4$ .
- Toepassing van M20 10.9 bouten in ruime gaten ( $d_0=22$  mm).

Weerstand van de individuele verbindingsmiddelen:

- Afschuiving bout:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 1000 \cdot 245}{1,25} = 98,0 \text{ kN}$$

- Stuk:

Lange been hoekstaal, eindbout:

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0\right) = \min\left(\frac{45}{3 \cdot 22}; \frac{1000}{360}; 1,0\right) = 0,682$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,68 \cdot 360 \cdot 20 \cdot 10}{1,25} = 98,2 \text{ kN}$$

Lange been hoekstaal, binnenste bout:

$$\alpha_b = \min\left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0\right) = \min\left(\frac{210}{3 \cdot 22} - \frac{1}{4}; \frac{1000}{360}; 1,0\right) = 1,00$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,00 \cdot 360 \cdot 20 \cdot 10}{1,25} = 144 \text{ kN}$$

Korte been hoekstaal, eindbout:

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0\right) = \min\left(\frac{55^*}{3 \cdot 22}; \frac{1000}{360}; 1,0\right) = 0,833$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,83 \cdot 360 \cdot 20 \cdot 10}{1,25} = 120 \text{ kN}$$

\* Eindafstand  $e_1=55$  mm is conservatief

Korte been hoekstaal, binnenste bout:

$$\alpha_b = \min\left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0\right) = \min\left(\frac{90}{3 \cdot 22} - \frac{1}{4}; \frac{1000}{360}; 1,0\right) = 1,00$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,00 \cdot 360 \cdot 20 \cdot 10}{1,25} = 144 \text{ kN}$$

- Glijweerstand:

$$F_{p,C} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s = 0,7 \cdot 1000 \cdot 245 = 172 \text{ kN}$$

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3}} \cdot F_{p,C} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 0,4}{1,25} \cdot 171,5 = 110 \text{ kN}$$

Weerstand van de groep verbindingsmiddelen:

- Lange been hoekstaal

Afschuifweerstand:  $4 \cdot F_{v,Rd} = 4 \cdot 98,0 = 392 \text{ kN}$

Stukweerstand:  $4 \cdot \beta_{Lf} \cdot F_{b,Rd,min} = 4 \cdot 0,996 \cdot 97,9 = 391 \text{ kN}$

$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_f - 15d}{200d} = 1 - \frac{315 - 15 \cdot 20}{200 \cdot 20} = 0,996$$

Glijweerstand  $4 \cdot F_{s,Rd} = 4 \cdot 110 = 439 \text{ kN}$

- Korte been hoekstaal

Afschuifweerstand:  $4 \cdot F_{v,Rd} = 4 \cdot 98,0 = 392 \text{ kN}$

Stukweerstand:  $4 \cdot \beta_{Lf} \cdot F_{b,Rd,min} = 4 \cdot 120 = 480 \text{ kN}$

Glijweerstand  $4 \cdot F_{s,Rd} = 4 \cdot 109,8 = 439 \text{ kN}$

- Netto doorsnede koppelstrips:

Toetsing netto doorsnede volgens NEN-EN 1993-1-1 6.2.3 (4) maatgevend.

- Strips op lange been hoekstaal ( $t=10$  mm):

$$A_{net} = A - d_0 \cdot t = 95 \cdot 10 - 22 \cdot 10 = 730 \text{ mm}^2$$

$$N_{net,Rd} = 2 \cdot \frac{730 \cdot 235 \cdot 10^{-3}}{1,0} = 343 \text{ kN}$$

- Strips op korte been hoekstaal ( $t=12 \text{ mm}$ ):

$$A_{net} = A - d_0 \cdot t = 60 \cdot 12 - 22 \cdot 12 = 456 \text{ mm}^2$$

$$N_{net,Rd} = 2 \cdot \frac{456 \cdot 235 \cdot 10^{-3}}{1,0} = 214 \text{ kN}$$

#### Knik van de koppelstrips:

- Strips op lange been hoekstaal ( $t=10 \text{ mm}$ ):

Kniklengte  $L_{cr}$ :  $0,6 \cdot$  grootste h.o.h. afstand bouten (inklemming bij bout)

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{93,9i} = \frac{63,0}{93,9 \cdot 2,89} = 0,232$$

$$\chi = 0,96$$

- Strips op kort been hoekstaal ( $t=12 \text{ mm}$ ):

Kniklengte  $L_{cr}$ :  $0,6 \cdot$  grootste h.o.h. afstand bouten (inklemming bij bout)

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{93,9i} = \frac{93,0}{93,9 \cdot 3,46} = 0,286$$

$$\chi = 0,98$$

Spanning in bruto doorsnede maximaal  $A_{net}/A \cdot f_y$ . Verhouding  $A_{net}/A < 0,96$  dus knik treedt niet op.

#### Verificatie:

- Lange been hoekstaal met koppelplaten  $95 \cdot 10 \text{ mm}^2$  (weerstand onder trek maatgevend):

Weerstand groep verbindingmiddelen: 392 kN

Weerstand nettodoorsnede klasse C koppelstrips: 343 kN

$$UC = \frac{F_{Ed,lb}}{F_{Rd,lb}} = \frac{341}{343} = 0,99$$

- Korte been hoekstaal met koppelplaten  $60 \cdot 12 \text{ mm}^2$  (weerstand onder trek maatgevend):

Weerstand groep verbindingmiddelen: 392 kN

Weerstand nettodoorsnede klasse C koppelstrips: 214 kN

$$UC = \frac{F_{Ed,lb}}{F_{Rd,lb}} = \frac{227}{214} = 1,06$$

Dit betreft een geringe overschrijding in geval van trekbelasting. Indien NEN-EN 1993-2 NB 8.1.7.1 (2) wordt toegepast voldoet de doorsnede.

#### Opmerkingen:

De uitvoering van de conceptoplossing op 6 en 7 september 2018 wijkt in enige mate van de hierboven beschreven dimensionering. Voor zover bekend betreft dit:

- De dikte van alle koppelplaten is gelijk gesteld aan 12 mm. Als gevolg hiervan is de verbinding van de lange benen stijver dan van de korte benen. De hierboven beschreven diktes van 10 en 12 mm hebben de voorkeur.
- Het nieuw aan te brengen hoekprofiel is verder afgeschaafd dan aangegeven in Figuur 3.1 om voldoende ruimte voor aanwezige klinknagelkoppen te bewerkstelligen.

Verder wordt opgemerkt dat:

- de geschetste conceptoplossing een aanwezige vrije lengte van de langsverstijver vereist van 595 mm gerekend vanaf de deling in de hoofdliggers.

Deze ruimte is niet bij alle details in de brug aanwezig. In sommige gevallen kruist de langsverstijver een dwarsverstijver op kortere afstand. Indien het detail op deze locaties ook aangepast dient te worden is een aanpassing van de conceptoplossing noodzakelijk.

- In veel gevallen de twee te verbinden langsverstijvers niet exact in elkaars verlengde liggen. Dit is in de huidige detaillering opgevangen door een knik aan te brengen in het hoekprofiel. De voorgestelde conceptoplossing bevat geen knik. Een beter resultaat wordt verkregen als deze knik waar nodig wel wordt aangebracht. De benodigde knik dient te worden ingemeten in de constructie.
- De aangenomen kracht in de langsverstijver ( $f_y \cdot A$ ) resulteert in een hogere spanning in de netto doorsnede van de langsverstijver. De aanname van volledig aansluiten conflicteert dus met NEN-EN 1993-1-1 6.2.3 (4).

## 4 Geluids- en rekmeting 7-8 september 2018

### 4.1 Opzet van de meting

#### 4.1.1 Akoestische meting

Het doel van het akoestisch onderzoek in de nacht van 7-8 september is het vaststellen of er een kraakgeluid wordt waargenomen na het aanpassen van de verbinding tussen de langsverstijvers. Indien er een geluid wordt waargenomen is het doel om vast te stellen waar het geluid ontstaat en een vergelijking te maken met de eerder waargenomen geluiden.

De opzet van de geluidsmeting is vrijwel identiek aan de meting in de nacht van 5-6 september, zie sectie 2.1.

Na het aanpassen van de verbinding tussen de langsverstijvers over de koppelplaat die de lijfdelen van de hoofdligger verbindt is de configuratie van de sensoren lokaal aangepast. De verstijver is aan weerszijden van de verbinding tussen de lijfdelen van de hoofdligger met een tweetal sensoren uitgerust, namelijk een sensor op het lijf van de verstijver, en een sensor op de flens. Dit betekent dat sensor 1 en 4 uit Figuur 2.1 en Tabel 2.1 vervallen. Posities 2,3,5 en 6 blijven gehandhaafd. De verdere sensorconfiguratie aan de Arnhemzijde van de brug is ongewijzigd.

De sensoren aan de Westervoortzijde van de brug zijn voor deze meting niet aangebracht.

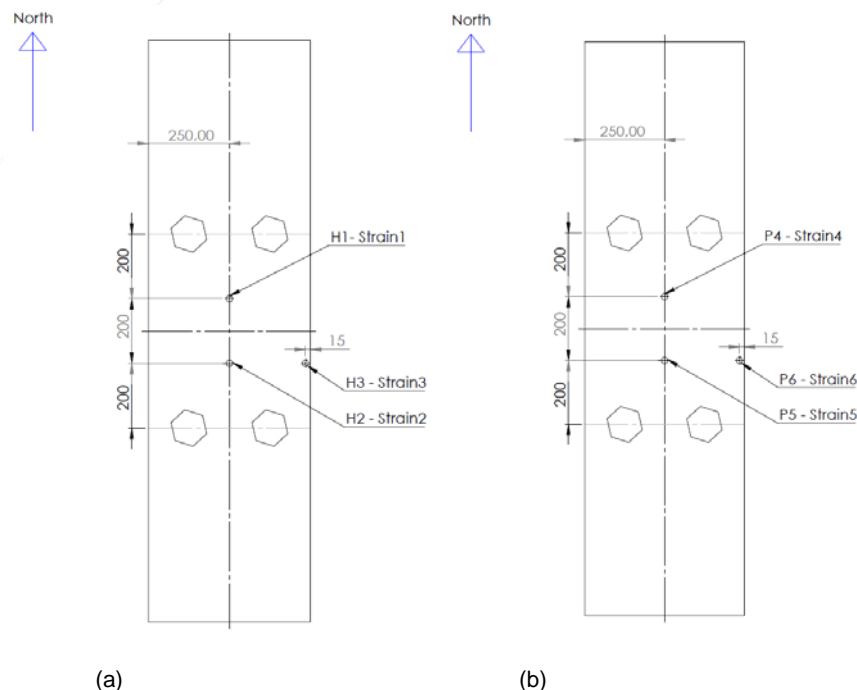


Figuur 4.1 Aangepaste verbinding van de langsverstijvers en lokaal aangepaste configuratie van de accelerometers. De sensornummers corresponderen met de posities in Tabel 2.1.

#### 4.1.2 Rekstrookmeting

Het geluid is waargenomen in de brug van de parallelrijbaan (PRB), maar niet – of in mindere mate – in de brug van de hoofdrijbaan (HRB). Dit kan een toevallige of een constructieve oorzaak hebben. Om na te gaan of het constructief gedrag van de twee bruggen verschilt zijn voorafgaand aan de ballasttesten rekstroken aangebracht op een hoofdligger van de PRB brug en op een hoofdligger van de HRB brug. Wanneer de rekstroken bij de ballasttesten met dezelfde ballastwagen eenzelfde rekuitslag geven is, is er geen verschil in constructieve werking tussen de bruggen. De rekmeting heeft een tweede doel, namelijk het valideren van een constructief model van de brug, opgesteld door ingenieurbureau Royal HaskoningDHV (RHDHV). Ten behoeve van deze validatie heeft RHDHV de invloedslijn van een puntlast op de linker- en rechter rijstrook aangeleverd.

De rekstroken zijn aangebracht aan de onderzijde van de onderflens van de hoofdligger die zich het dichtst bij de rechter rijstrook bevindt, iets ten zuiden van de verbinding waar het kraakgeluid werd waargenomen. Op deze locatie zijn drie rekstroken aangebracht, namelijk twee achter elkaar in het hart van de flens (op een afstand vanaf het begin van de hoofdbrug van 65,17 m voor stroken H1 en P4 en 65,37 m voor stroken H2 en P5) en één aan de rand van de flens (buitenzijde van de brug, stroken H3 en P6), Figuur 4.2. De rekstroken achter elkaar dienen ter controle: deze moeten een (nagenoeg) identieke rek geven. De rekstrook aan de rand van de flens dient om eventuele dwarsbuiging van de flens (ten gevolge van vervorming van de flens uit het vlak van de hoofdligger) te kwantificeren. De posities van de rekstroken is opgemeten en de afwijking ten opzichte van het plan (Figuur 4.2) bedroeg ca. 1 mm, zowel in dwarsrichting als in lengterichting (dat laatste ten opzichte van de voorspanbouten in de flens), zie Figuur 4.3.



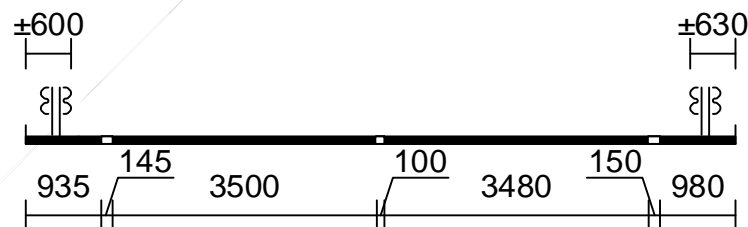
Figuur 4.2 Locaties van de rekstroken t.o.v. de voorspanbouten in de brug (dimensies in mm): (a) stroken H1 t/m H3 op de HRB brug; (b) stroken P4 t/m P6 op de PRB brug.





Figuur 4.3 Nameten van de locaties van de stroken.

De rijstrookindeling van de PRB brug is opgemeten ter plaatse van de verbinding waar het kraakgeluid is waargenomen, zie Figuur 4.4. Deze indeling komt goed overeen met de aangehouden indeling door RHDHV (hart van de rijstroken op 3,625 m / 2 = 1,8125 m uit het hart van de brug). De indeling van de hoofdrijbaan is niet gemeten. De wagens hebben zo veel als praktisch mogelijk in het midden van de rijstroken gereden, echter op inschatting van de chauffeur en zonder nameting.



Figuur 4.4 Gemeten rijstrookindeling (dimensies in mm).

Na het aanbrengen van de sensoren en rekstroken is de volledige parallelrijbaan afgesloten voor verkeer en is de brug gecontroleerd belast met in een ballasttest. Voor de ballasttest is gebruik gemaakt van twee vrachtwagens beladen met zand met een totaalgewicht van ongeveer 50 ton (zie tabel 4.1 en 4.2). Met deze twee vrachtwagens is de parallelrijbaan bereden in verschillende configuraties:

- Eén vrachtwagen op de rechterrijstrook of linkerrijstrook
- Twee vrachtwagens parallel
- Passages bij zijn uitgevoerd bij een snelheid van ongeveer 50 km/u

Na afronding van de passages op de parallelrijbaan is de parallelrijbaan opgesteld voor verkeer en is de hoofdrijbaan afgesloten. Vervolgens zijn op de hoofdrijbaan dezelfde passages uitgevoerd als op de parallelrijbaan, met uitzondering van de passage waarbij twee vrachtwagens naast elkaar rijden.

Eén van de twee wagens reed over de rechter rijstrook, de andere over de linker rijstrook. De massa's van de wagens zijn gemeten met een weegbrug, Tabel 4.1. Tabel 4.2 geeft de afstanden tussen de assen van beide wagens. De verdeling van de massa over de assen of wielen is niet bekend. Ten behoeve van de vergelijking

tussen de metingen en het model is aangenomen dat de vooras 12 % van de totale massa draagt en de overige assen 22 %. Vanwege de lengte van de invloedslijn is de invloed van de aanname op de verwachte rek gering.

Tabel 4.1 Massa's ballastwagens.

	Massa wagen	Massa 2 personen (schatting)	Totale massa
rechter strook	48720 kg	140 kg	48860 kg
linker strook	49860 kg	140 kg	50000 kg

Tabel 4.2 Asafstanden ballastwagens.

	vooras – as 2	as 2 – as 3	as 3 – as 4	as 4 – as 5
rechter strook	1,94 m	2,09 m	1,345 m	1,25 m
linker strook	2,00 m	1,82 m	1,82 m	1,82 m

## 4.2 Hoorbaar geluid

Op de locatie waar het kraakgeluid op 3 en op 5/6 september hoorbaar was en waarvan de doorkoppeling vervangen is, is in de nacht van 7 op 8 september door dezelfde experts van Rijkswaterstaat die het geluid eerder hoorden opnieuw vanuit een hoogwerker geluisterd naar de brug. Het kraakgeluid was niet langer waarneembaar. Dit gold voor alle vrachtwagenpassages.

## 4.3 Meetgegevens en interpretatie geluidsmetingen

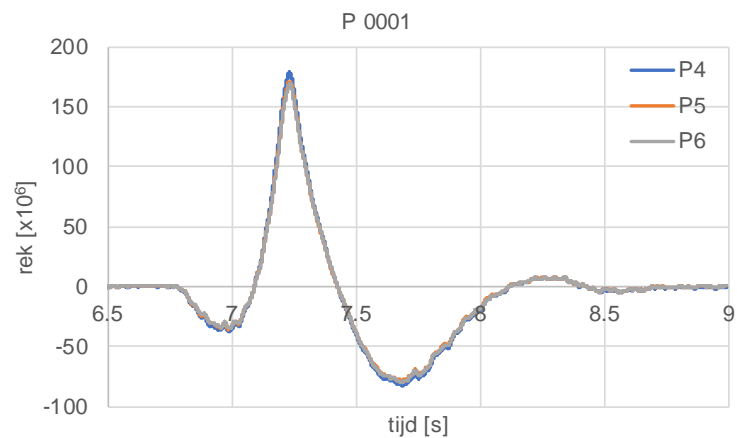
Op het gehoor lijkt het krakende geluid verdwenen te zijn. Door het signaal van de microfoon te versterken is nog net een krakend geluid waarneembaar.

De accelerometers laten ook een krakend geluid zien, zei het echter zeker een factor 40-50 minder sterk. De amplitude van de luidste kraakgeluiden die tijdens een passage optreden lag op 200-250 m/s<sup>2</sup> in de nacht van 5-6 september. Na het realiseren van de aanpassing worden amplitudes van ongeveer 5 m/s<sup>2</sup> gevonden.

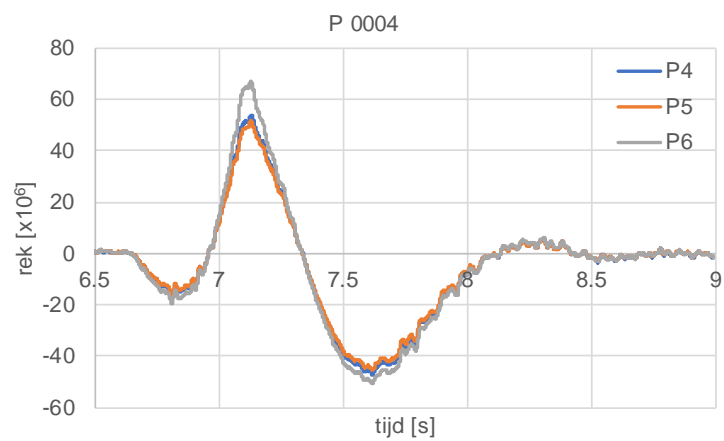
Een passende verklaring voor het waarnemen van een kraakgeluid dat zoveel minder luid is, is dat het geluid lokaal geëlimineerd is, en er een geluid dat elders in de brug ontstaat wordt opgepikt. Dit is aannemelijk omdat in elk geval aan de Westervoortzijde een krakend geluid is waargenomen (zie paragraaf 2.2). Een analyse van de kruiscorrelaties van kraaksignalen voor de verschillende sensoren laat zien dat er geen consistent beeld van een hotspot voor het ontstaan van het geluid meer optreedt. Dit resultaat is consistent met een bronpositie buiten het gemonitorde gebied.

## 4.4 Meetgegevens van de rekmeting

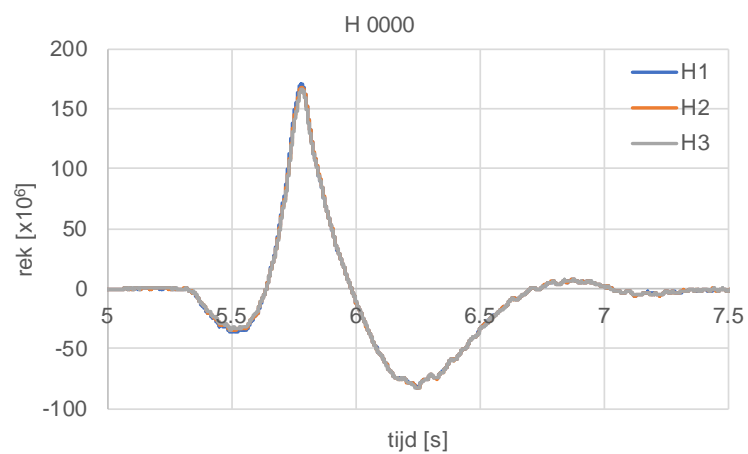
De passages van de wagens zijn geregistreerd met een samplefrequentie van 1000 Hz. Het signaal bevat een harmonische ruis met een frequentie van 50 Hz en een rekamplitude van ca 5.10<sup>-6</sup>. Deze ruis is effectief onderdrukt door na afloop van de meting een low pass filter van 30 Hz toe te passen. Ter illustratie geven Figuur 4.5 t/m Figuur 4.8 de meetresultaten van passages van de wagens op beide rijstroken van de parallel- en hoofdrijbaan.



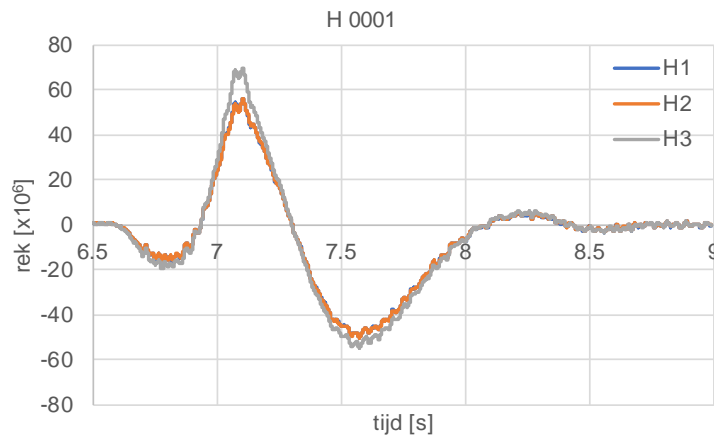
Figuur 4.5 Gemeten rekken bij passage P 0001 (parallelrijbaan rechter rijstrook).



Figuur 4.6 Gemeten rekken bij passage P 0004 (parallelrijbaan linker rijstrook).



Figuur 4.7 Gemeten rekken bij passage H 0000 (hoofdrijbaan rechter rijstrook).

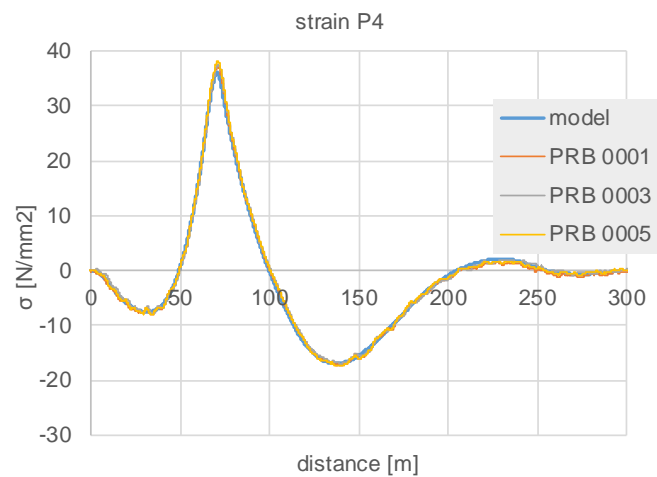


Figuur 4.8 Gemeten rekken bij passage H 0001 (hoofdrijbaan linker rijstrook).

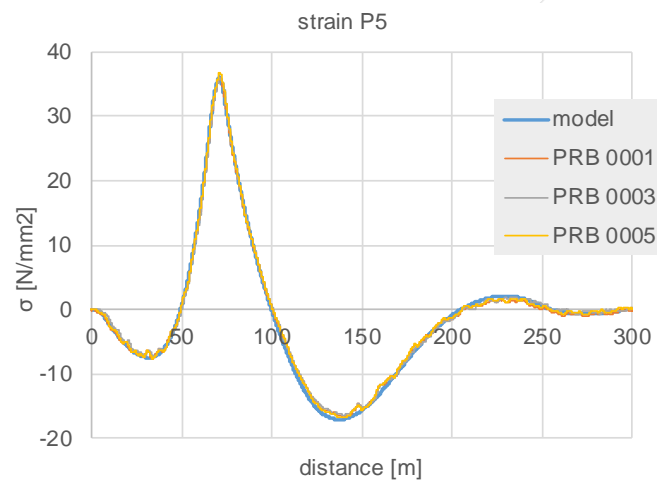
Figuur 4.9 t/m Figuur 4.23 geven de resultaten per rekstrook van alle herhalingsmetingen, waarbij de rekken zijn omgerekend naar spanningen uitgaande van een elasticiteitsmodulus van 210000 MPa. De horizontale as is uitgedrukt in afstand, waarbij de snelheid van de vrachtwagen zodanig gekalibreerd is dat de beste overeenkomst met de modelvoorspelling wordt gevonden. Deze gekalibreerde snelheden zijn weergegeven in Tabel 4.3. In Figuur 4.9 t/m Figuur 4.23 is ook de voorspelling weergegeven van een model op basis van de vrachtwagenconfiguraties en de invloedslijnen voor een puntlast afkomstig van RHDHV. De invloedslijnen zijn gegeven voor het hart van de flens, niet voor de rand. De metingen van rekstroken H3 en P6 kunnen dus niet vergeleken worden met het model. In de betreffende figuren is het model daarom met stippellijn weergegeven, die in dit geval enkel dient als referentie en niet ter vergelijking van exacte waarden.

Tabel 4.3 Gekalibreerde snelheden per passage.

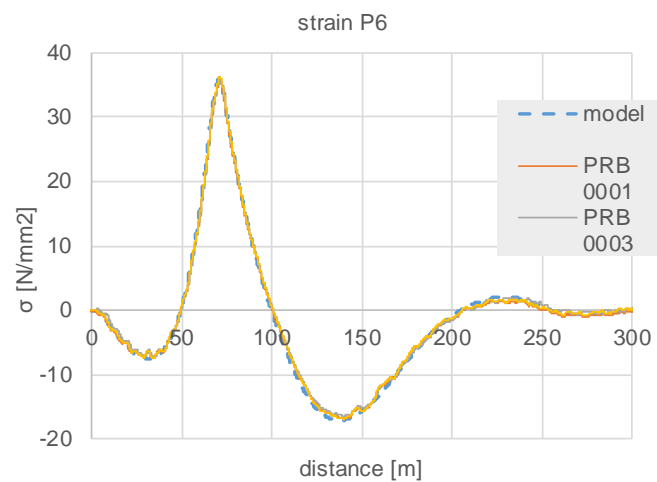
Nummer meting	Rijstrook wagen	Snelheid [km/u]
PRB 0001	PRB rechter rijstrook	55
PRB 0002	PRB linker rijstrook	51
PRB 0003	PRB rechter rijstrook	52
PRB 0004	PRB linker rijstrook	50
PRB 0005	PRB rechter rijstrook	55
PRB 0006	PRB linker rijstrook	50
PRB 0007	PRB dubbel	47
HRB 0000	HRB rechter rijstrook	53
HRB 0001	HRB linker rijstrook	50
HRB 0002	HRB rechter rijstrook	53
HRB 0003	HRB linker rijstrook	50



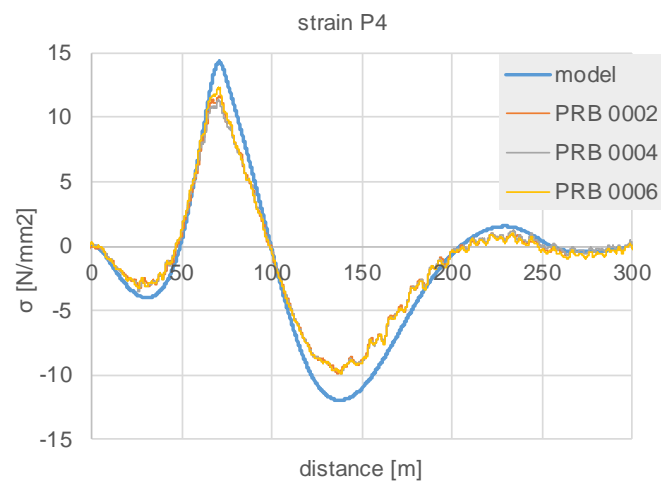
Figuur 4.9 Invloedslijnen rekstrookpositie P4 voor passage op de PRB rechter rijstrook.



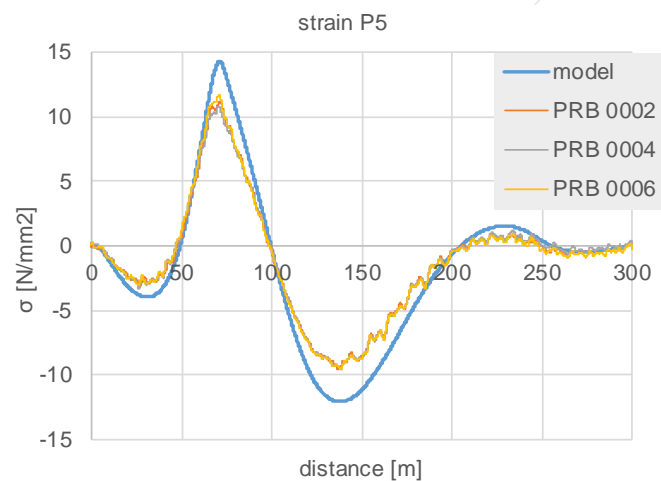
Figuur 4.10 Invloedslijnen rekstrookpositie P5 voor passage op de PRB rechter rijstrook.



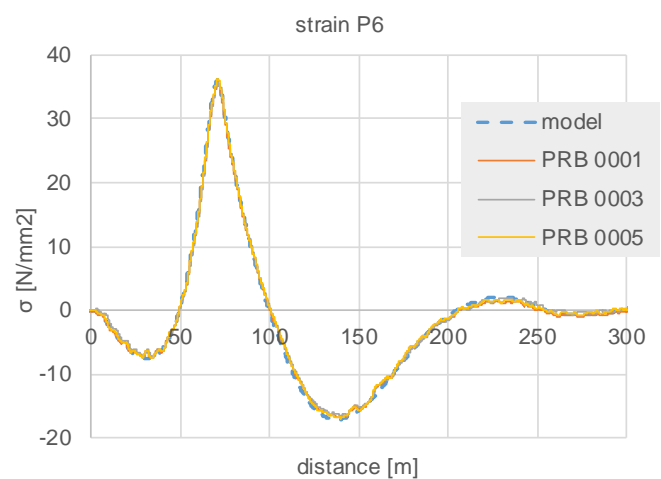
Figuur 4.11 Invloedslijnen rekstrookpositie P6 voor passage op de PRB rechter rijstrook.



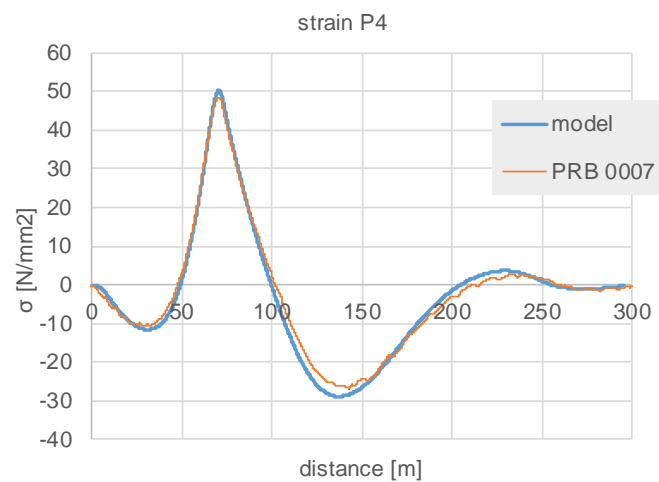
Figuur 4.12 Invloedslijnen rekstrookpositie P4 voor passage op de PRB linker rijstrook.



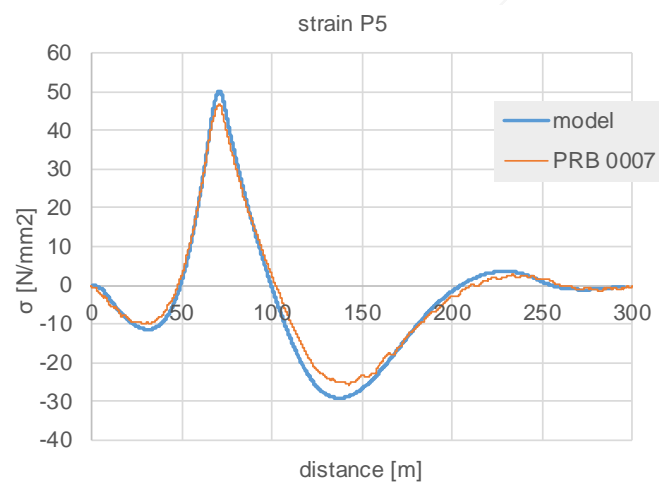
Figuur 4.13 Invloedslijnen rekstrookpositie P5 voor passage op de PRB linker rijstrook.



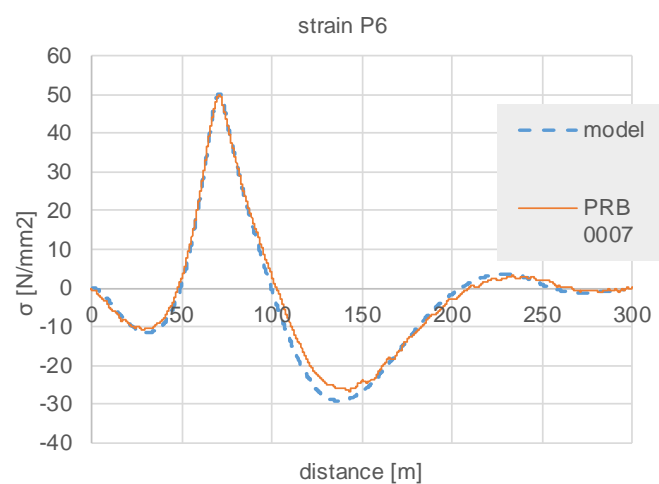
Figuur 4.14 Invloedslijnen rekstrookpositie P6 voor passage op de PRB linker rijstrook.



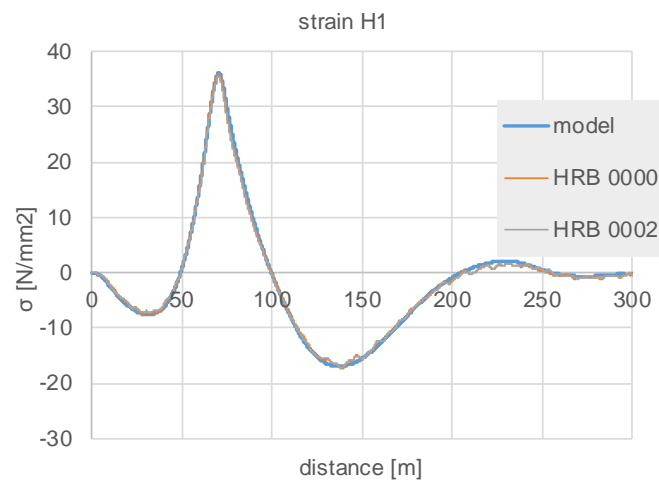
Figuur 4.15 Invloedslijnen rekstrookpositie P4 voor passage op de PRB beide rijstroken.



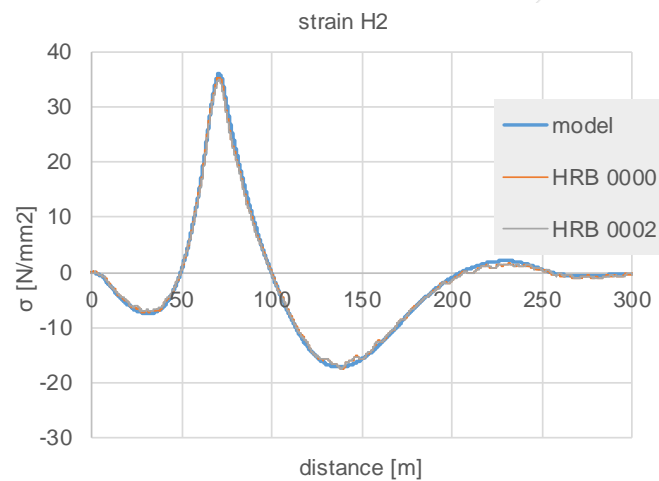
Figuur 4.16 Invloedslijnen rekstrookpositie P5 voor passage op de PRB beide rijstroken.



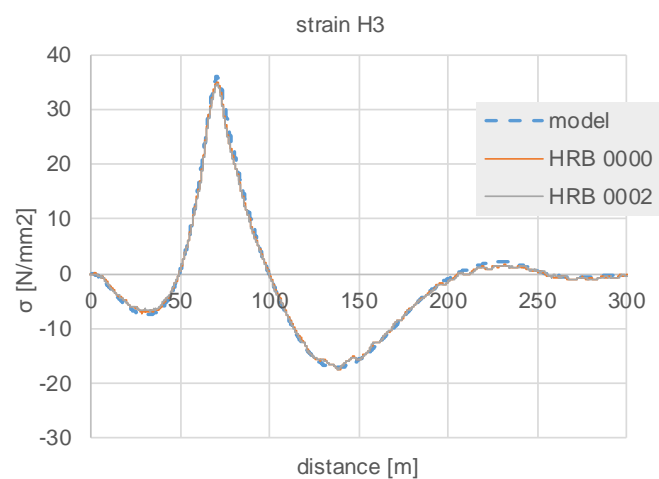
Figuur 4.17 Invloedslijnen rekstrookpositie P6 voor passage op de PRB beide rijstroken.



Figuur 4.18 Invloedslijnen rekstrookpositie H1 voor passage op de HRB rechter rijstrook.

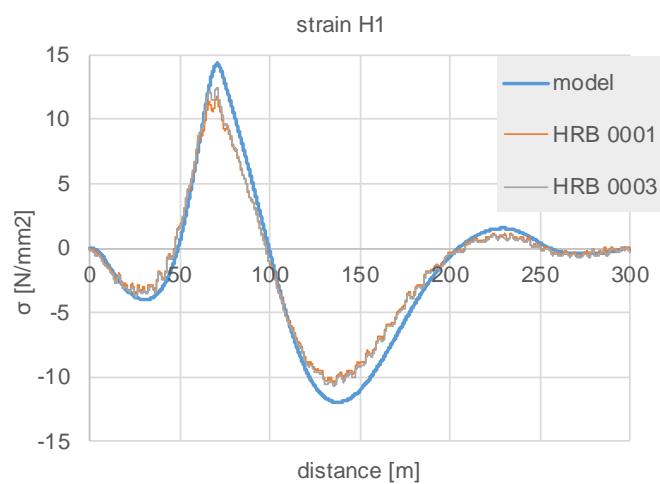


Figuur 4.19 Invloedslijnen rekstrookpositie H2 voor passage op de HRB rechter rijstrook.

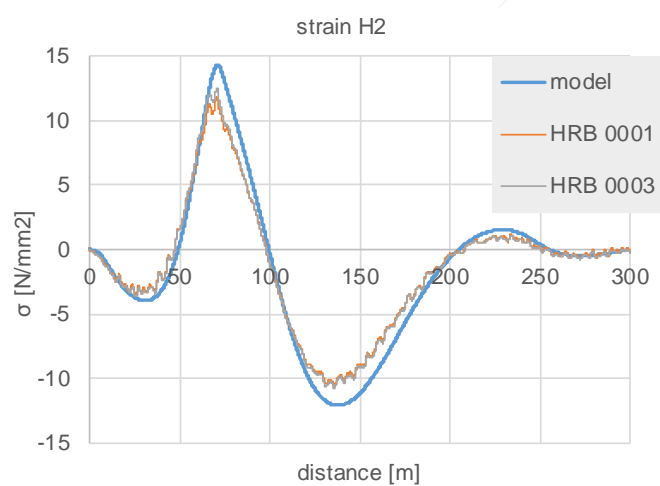


Figuur 4.20 Invloedslijnen rekstrookpositie H3 voor passage op de HRB rechter rijstrook.

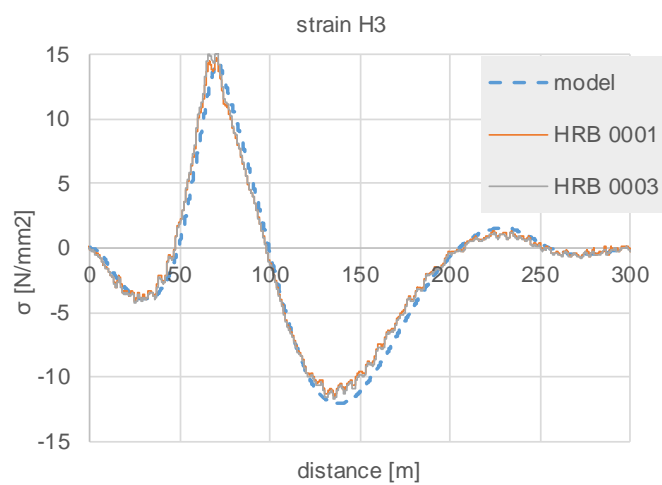




Figuur 4.21 Invloedslijnen rekstrookpositie H1 voor passage op de HRB linker rijstrook.



Figuur 4.22 Invloedslijnen rekstrookpositie H2 voor passage op de HRB linker rijstrook.



Figuur 4.23 Invloedslijnen rekstrookpositie H3 voor passage op de HRB linker rijstrook.

Tabel 4.4 geeft het resultaat van de metingen in termen van de maximum spanningsrange, de maximum waarde en de minimum waarde van de metingen per strook (kolommen 2 t/m 6) en het model (kolom 7). Kolom 8 geeft de verhouding tussen model en meting. Kolom 9 geeft de verhouding tussen de rekstroken P5 en P6 en tussen H2 en H3, hetgeen een beeld geeft van de invloed van 'dwarsbuiging' (buiging uit het vlak) van de liggerflens. Kolom 10 geeft de verhouding tussen de rekstroken P4 en P5 en tussen H1 en H2, hetgeen een beeld geeft van de invloed van de variatie in gemeten rekken over de 200 mm afstand tussen de rekstroken in lengterichting van de brug.

Tabel 4.4 Maximum ranges, maxima en minima van de spanningen in MPa volgens metingen en modellen bij de vrachtwagenpassages.

Range	individuele metingen			gem. meting $\mu$	var. meting $V$	model	model/ $\mu$ meting	dwars-buiging	lengte-variatie
<b>PRB rechts</b>	PRB 0001	PRB 0003	PRB 0005						
P4	54.8	54.6	55.7	55.1	0.010	53.0	0.96		
P5	52.5	52.4	53.4	52.8	0.011	53.0	1.00		1.04
P6	52.3	52.0	53.0	52.4	0.009			0.99	
<b>HRB rechts</b>	HRB 0000	HRB 0002							
H1	53.3	52.7		53.0	0.007	53.0	1.00		
H2	52.7	52.2		52.5	0.007	53.0	1.01		1.01
H3	52.5	52.1		52.3	0.005			1.00	
<b>PRB links</b>	PRB 0002	PRB 0003	PRB 0006						
P4	21.6	21.2	22.2	21.7	0.022	26.4	1.22		
P5	20.7	20.4	21.3	20.8	0.023	26.2	1.26		1.04
P6	25.0	24.7	25.5	25.1	0.015			1.21	
<b>HRB links</b>	HRB 0001	HRB 0003							
H1	22.4	23.2		22.8	0.026	26.4	1.16		
H2	22.4	23.3		22.8	0.028	26.2	1.15		1.00
H3	26.2	27.0		26.6	0.020			1.16	
Maximum	individuele metingen			gem. meting $\mu$	var. meting $V$	model	model/ $\mu$ meting	dwars-buiging	lengte-variatie
<b>PRB rechts</b>	PRB 0001	PRB 0003	PRB 0005						
P4	37.4	37.7	38.3	37.8	0.013	36.1	0.96		
P5	35.8	36.0	36.6	36.1	0.012	35.9	0.99		1.05
P6	35.3	35.6	36.1	35.7	0.011			0.99	
<b>HRB rechts</b>	HRB 0000	HRB 0002							
H1	35.9	35.5		35.7	0.008	36.1	1.01		
H2	35.3	34.9		35.1	0.008	35.9	1.02		1.02
H3	35.0	34.8		34.9	0.006			0.99	
<b>PRB Links</b>	PRB 0002	PRB 0003	PRB 0006						
P4	11.6	11.3	12.3	11.7	0.041	14.3	1.22		
P5	11.1	10.8	11.8	11.2	0.042	14.3	1.27		1.04
P6	14.3	14.1	14.8	14.4	0.024			1.28	
<b>HRB links</b>	HRB 0001	HRB 0003							
H1	11.8	12.5		12.1	0.039	14.3	1.18		
H2	11.8	12.5		12.2	0.045	14.3	1.18		1.00
H3	14.7	15.3		15.0	0.027			1.23	
Minimum	individuele metingen			gem. meting $\mu$	var. meting $V$	model	model/ $\mu$ meting	dwars-buiging	lengte-variatie
<b>PRB rechts</b>	PRB 0001	PRB 0003	PRB 0005						
P4	-17.4	-16.9	-17.4	-17.3	-0.016	-16.9	0.98		
P5	-16.7	-16.4	-16.8	-16.6	-0.013	-17.1	1.03		1.04
P6	-16.9	-16.4	-16.9	-16.7	-0.015			1.01	
<b>HRB rechts</b>									
H1	-17.4	-17.2		-17.3	-0.005	-16.9	0.98		
H2	-17.4	-17.3		-17.4	-0.004	-17.1	0.98		0.99
H3	-17.4	-17.3		-17.4	-0.004			1.00	
<b>PRB Links</b>									
P4	-10.0	-9.9	-9.9	-9.9	-0.002	-12.1	1.22		
P5	-9.6	-9.5	-9.6	-9.6	-0.002	-12.0	1.25		1.04
P6	-10.7	-10.6	-10.7	-10.7	-0.004			1.12	
<b>HRB links</b>									
H1	-10.6	-10.8		-10.7	-0.011	-12.1	1.13		
H2	-10.6	-10.7		-10.7	-0.010	-12.0	1.12		1.00
H3	-11.5	-11.7		-11.6	-0.012			1.09	

#### 4.5 Interpretatie van de rekmeting

De herhalingsmetingen gaven vrijwel identieke rekken weer bij soortgelijke ballasttesten, dus de metingen zijn goed reproduceerbaar. Uit de meting volgt dat de maximum ranges, de maxima en de minima van de gemeten rekken goed overeenkomen voor de hoofdrijbaan en de parallelrijbaan (verschil in de orde van 2 %). Er is dus geen verschil in constructieve werking tussen de bruggen.

De gemeten rekken laten een rimpeling zien met een frequentie van ca. 2 Hz en een amplitude van maximaal ca. 1 MPa over het totale verloop van de passage. Deze rimpeling is gelijk bij iedere passage. Deze rimpeling wordt toegeschreven aan het trillen van de brug in een eigenmode, welke aangestoten wordt door de passage van de wagen.

De metingen met een ballasttest op de rechter rijbaan komen goed overeen met het model (afwijking 2 à 4 %). Voor de linker rijbaan wordt een significant verschil gevonden tussen de metingen en het model, waarbij het model een 22 à 27 % hogere spanning voorspelt dan wat wordt gemeten.

Indien wordt verondersteld dat de afdracht naar de hoofdliggers proportioneel is met de afstand tot het hart van de rijstrook (dus zonder samenwerking tussen de liggers, overeenkomstig een tweedimensionaal model) volgt een verhouding in de spanning in de hoofdligger waarop de rekstroken zijn aangebracht tussen belasting op de linker strook en op de rechter strook van 0,25. Volgens de meting is deze verhouding ca. 0,39 en volgens het model 0,50. Dit betekent dat de liggers wel samenwerken. Door de aanwezigheid van het verband tussen de liggers worden beide hoofdliggers meegetrokken. Uitgaande van de meting, wordt de samenwerking in het model echter overschat. Een eerste verklaring hiervoor is dat de verbindingen met de brug mogelijk te stijf gemodelleerd zijn. Deze stijfheid kan invloed hebben op de verdeling tussen de hoofdliggers, de som van het belastingeffect van beide hoofdliggers wordt hierdoor naar verwachting niet significant beïnvloed. Als deze verklaring klopt zou hierdoor, bij modellering van minder stijve verbindingen, het belastingeffect op beide liggers dus iets overschat worden. Dit kan verklaard worden uit de schijfwerking van de vrij hoge liggers en de gekromde onderflens. Beide aspecten zijn niet in het model meegenomen.

Uit vergelijking van rekstroken P5 met P6 en van H2 met H3 volgt dat er geen dwarsbuigeffect is bij passage van de vrachtwagen over de rechter rijstrook: de spanning aan de rand van de flens is identiek aan die in het hart. Bij passage over de linker rijstrook is er wel een aanzienlijk dwarsbuigeffect gemeten. De spanningswisseling gemeten in de rekstrook nabij de rand van de flens is ca. 4 MPa ofwel 20 % hoger dan die in het hart. Bij de dubbele passage – met een wagen op de linker- en op de rechterstrook – is eenzelfde verhoging van de spanningswisseling nabij de rand t.o.v. het hart geconstateerd van 4 MPa (in dat geval bedraagt dit 5 % van de totale spanningswisseling). Omdat de rekstrook niet exact aan de rand, maar 15 mm daarvandaan aangebracht is, is het dwarsbuigeffect aan de rand van de flens een factor  $(250/(250-15) =) 1,06$  hoger dan gemeten.

De rekken van stroken P4 en P5 – beiden in het hart van de flens van de parallelrijbaan op een onderlinge afstand van 200 mm – verschilt ca. 4 %. Een dergelijk rekverschil wordt niet verwacht, wordt niet gevonden in het model van RHDHV en wordt ook niet gevonden tussen stroken H1 en H2 van de hoofdrijbaan. Dit doet vermoeden dat het om een meetonnauwkeurigheid gaat. De meetinstrumenten en het data-acquisitiesysteem hebben een veel grotere nauwkeurigheid en kunnen niet de bron zijn van dit verschil. Een mogelijke verklaring is dat strook 5 (en strook 6) niet exact in lengterichting is (/ zijn) aangebracht. De hoek  $\phi$  waarover de rekstrook gedraaid moet zijn ten opzichte van de lengterichting om het verschil in rek te kunnen verklaren, volgt uit:

$$\frac{\text{rekP5}}{\text{rekP4}} = \cos\varphi - \nu\sin\varphi \quad (4.1)$$

Voor een dwarscontractiecoëfficiënt  $\nu = 0,3$  en een rekverhouding van 0.96 volgt een hoek  $\varphi = 6$  graden. Het is voorstelbaar dat strook 5 (en strook 6) onder een dergelijke hoek ten opzichte van de lengterichting zijn aangebracht.

## 5 Conclusies

Op 3 september is Rijkswaterstaat gewaarschuwd door een inspecteur dat de IJsselbrug in de A12 een krakend geluid produceert ter plaatse van een verbinding in de brug van de parallelrijbaan, bij de passage van vrachtwagens. Nader onderzoek door Rijkswaterstaat wees uit dat het geluid bij ten minste een andere verbinding ook optrad. Uit voorzorg heeft Rijkswaterstaat een rijstrook van de brug afgesloten voor het verkeer.

In de buurt van de betreffende verbindingen werden klinknagels vervangen door voorspaninjectiebouten ten tijde van de observatie van het kraakgeluid. Omdat het kraakgeluid mogelijk een oorzaak had in deze werkzaamheden, is besloten om de werkzaamheden eerst (met spoed) af te ronden, hetgeen gebeurd is op 4 en 5 september.

Om na te gaan of het geluid nog steeds aanwezig was en zo ja, wat de bron daarvan was, heeft TNO op 5 september accelerometers en microfoons aangebracht op de brug in de buurt van de verbindingen waar het geluid was waargenomen. In de nacht van 5 op 6 september heeft een meting plaatsgevonden waarbij ballastwagens over een verder lege brug hebben gereden. Het geluid werd waargenomen en de bron werd geïdentificeerd met de accelerometers.

Het geluid bleek afkomstig uit de verbinding in de onderste langsverstijver ter plaatse van de doorkoppeling van het lijf. Aan de hand daarvan heeft TNO op 6 september een constructieve aanpassing aan deze langsverstijver uitgewerkt, die op 6 en 7 september door aannemer Hollandia aangebracht is.

Op 7 september heeft TNO opnieuw accelerometers en microfoons geplaatst en tevens rekstroken aangebracht op een hoofdligger van de brug van de parallelrijbaan en op dezelfde locatie van de brug van de hoofdrijbaan. In de nacht van 7 op 8 september heeft een tweede meting met ballastwagens op beide bruggen plaatsgevonden, waarbij op basis van de accelerometers is geconstateerd dat het geluid niet meer aanwezig was. Daarnaast is op basis van de rekstrookmetingen geconcludeerd dat er geen verschil optrad in rekken tussen de brug van de parallelrijbaan en die van de hoofdrijbaan. Aan de hand daarvan is in gezamenlijk overleg tussen RWS en TNO het advies gegeven om de verkeersbeperking op te heffen.

De rekstrookmetingen dienden, naast het nagaan of de bruggen eenzelfde constructief gedrag vertonen, ook om een rekenmodel van ingenieursbureau Royal HaskoningDHV te controleren. Bij passage van een wagen op de rijstrook die zich het dichtst bij de gemeten hoofdligger bevindt, is een goede overeenkomst gevonden tussen het rekenmodel en de meting (verschil circa 1 %). Voor de andere rijstrook geeft het model een circa 25 % hogere spanning dan de meting.

## 6 Ondertekening

Delft, oktober 2018

TNO

Dr. P.C. Rasker

Afdelingshoofd

Dr.ir. S.H.J. van Es  
Ir. C. Bosschaart  
Prof.dr.ir. J. Maljaars  
Auteur