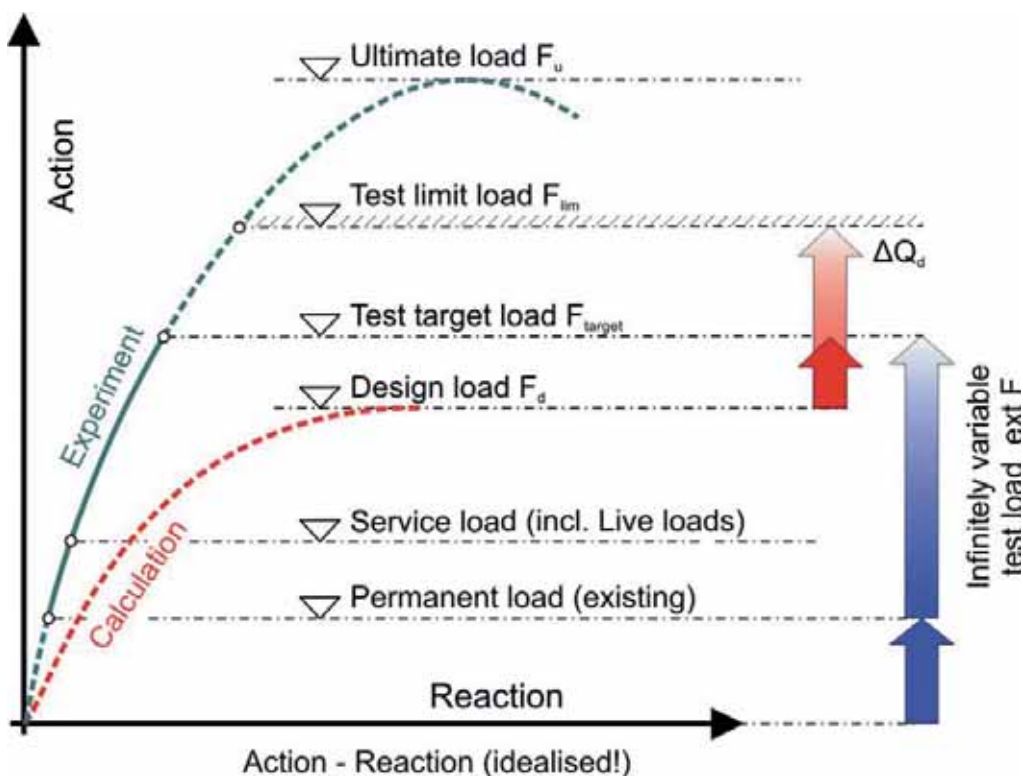


EXPERIMENTELE VEILIGHEIDSEVALUATIE VAN BETONNEN EN GEMETSELDE BRUGGEN

dr. A. Romeijn, TU Delft

De inhoud van dit artikel is grotendeels gehaald uit het rapport "Experimental safety evaluation of concrete and masonry bridges" opgesteld door M. Gutermann, H.-U. Knaack en K. Steffens [6] en gepubliceerd bij ICEM12-12th International Conference on Experimental Mechanics 29 aug. – 2 sept., 2004 Politecnico di Bari, Italië.



1. Veiligheidsconcept bij experimenteel belasten van een constructie.

Toelichting op afb. 1.

Permanent load:

gebruikswaarde van eigengewicht + nuttige belasting Een deel van de permanente belastingen treedt al op voordat met de belastingsproef wordt begonnen. Deze belasting, waarvan het grootste gedeelte uit het eigen gewicht van de constructie voortkomt, hoeft bij het experiment niet te worden gesimuleerd.

Service load:

gebruikswaarde van eigengewicht + nuttige belasting + verkeersbelasting

Design load F_d :

rekenwaarde van eigengewicht + nuttige belasting + verkeersbelasting

Test target load F_{target} :

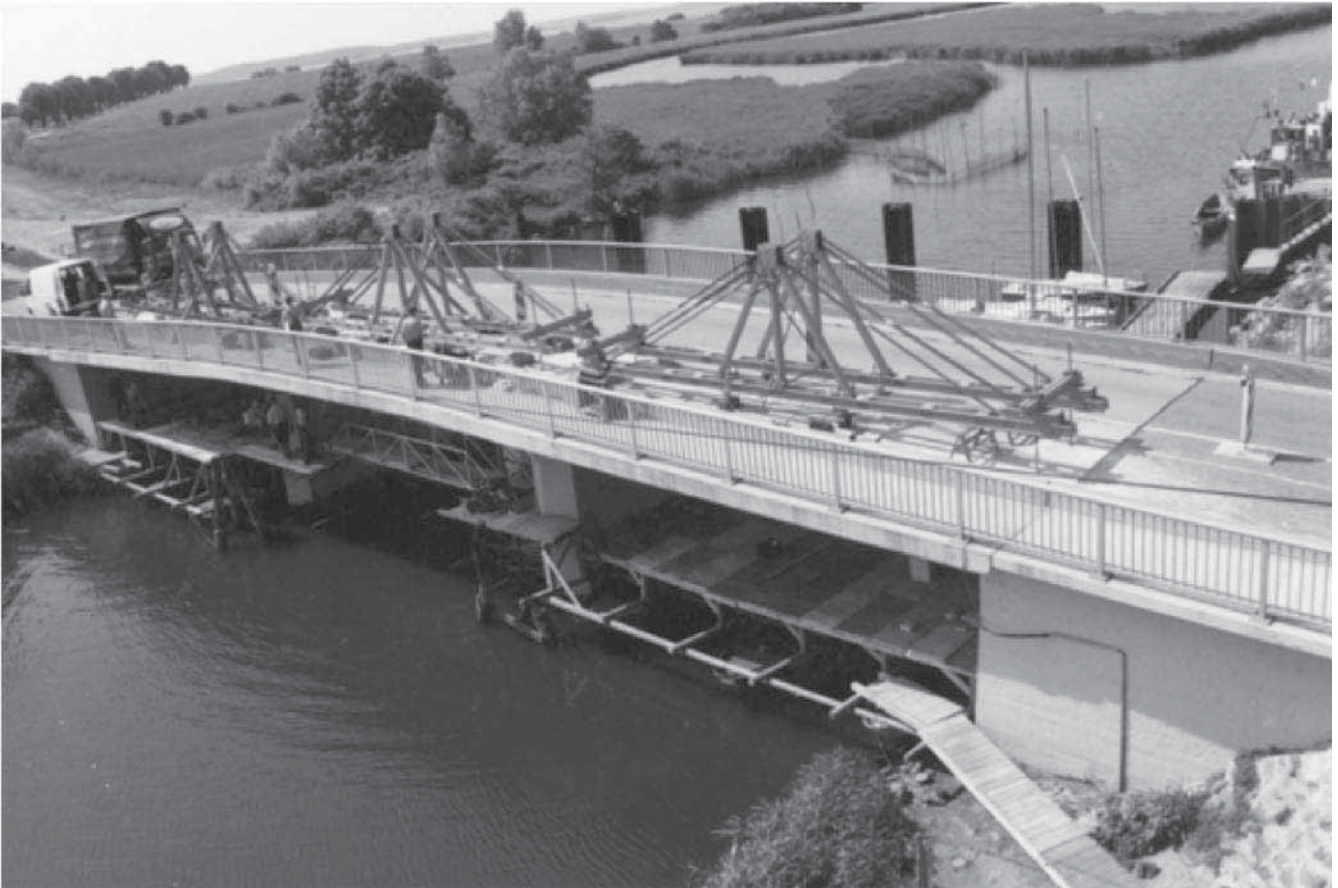
experimentele streefbelasting

Test limit load F_{lim} :

Tijdens de beproeving wordt onder toenamen van de belasting het gedrag van de constructie alsmede het kritische belastingsniveau vastgesteld, wat het begin van het ontstaan van onomkeerbare schade markeert (duurzaamheid en/of sterkte). Dit belastingsniveau wordt de experimentele grensbelasting genoemd. Indien deze belasting lager is dan de experimentele streefbelasting, wordt de experimentele veiligheidsevaluatie als niet afdoende beschouwd. In het andere geval zal de experimentele grensbelasting bij het experiment niet worden bereikt en wordt aangetoond dat de structurele veiligheid voldoende is.

Ultimate load F_u :

Veel constructies kenmerken zich door in zekere mate bezitten van een 'reserve' capaciteit. Na bezwijken van een constructieonderdeel kan vaak een herverdeling gaan optreden, etc. (we zouden dit een tweede draagwegsysteem kunnen noemen)



2. Proefopstelling met stalen frames, waarbij een betonnen brug wordt belast om de bruikbaarheid en sterkte te beoordelen.

Inleiding

Als gevolg van de toename van de verkeersintensiteit, de toename van zwaarte van het verkeer en “veroudering” van een kunstwerk zal vooral in de nabije toekomst steeds vaker de vraag worden gesteld of een brug de belasting nog aankan. Dit artikel laat zien hoe men in Duitsland omgaat met dergelijke problematiek. Met financiële ondersteuning van het Bundesministerium is een onderzoeksteam samengesteld bestaande uit Hochschule Bremen, Technische Universiteit Dresden, Hochschule voor Techniek, Wirtschaft en Kultur Leipzig en Bauhaus Universiteit Weimar. Dit team heeft in samenwerking met Eggers Fahrzeugbau GmbH Brinkum en WEMO-Montagetechnik Werner GmbH & Co KG Eichenzell een tweetal lastwagencombinaties ontwikkeld, waarmee de belasting voor bruggen (autoverkeer + spoorverkeer) conform de normering zoals toegepast bij het brugontwerp op een eenvoudige wijze kan worden nagebootst. Door deze werkwijze kan de technische staat van een kunstwerk worden vastgesteld zonder dat daarbij sprake is van noemenswaardige verkeersstremming. Door het gebruik van recent ontwikkelde specifieke meetapparatuur heeft het onderzoeksteam de veiligheid en bruikbaarheid van ongeveer 300 constructies, waaronder 30 bruggen, op succesvolle wijze kunnen evalueren, en heeft men kunnen vaststellen in hoeverre een bepaald belastingniveau acceptabel is daarmee antwoord gekregen op vragen of het gehele kunstwerk in de nabije toekomst moet worden vervangen of kan worden volstaan met locale versterkingen.

Gegevens voor een experimentele veiligheidsevaluatie

Voor de analyse van een constructie ten behoeve van een veiligheidsevaluatie zijn gegevens nodig over onder andere het mechanisch gedrag inclusief verbindings-eigenschappen en oplegcondities, doorsnede grootheden en materiaaleigenschappen. Aan deze voorwaarden kan niet altijd worden voldaan, vooral niet als het om een bestaande constructie gaat. Mogelijke redenen kunnen onder meer zijn: documentatie die niet compleet is, onduidelijkheid in mechanisch gedrag, onzekerheid over oplegcondities. In veel gevallen kunnen aanvullende gegevens worden verkregen door materiaalbeproevingen en door het inmeten van de exacte geometrie. Als de vereiste kennis voor beoordeling van de veiligheid van een constructie niet in voldoende mate is te verkrijgen kan het voor bepaalde gevallen de moeite waard zijn om de veiligheid experimenteel vast te stellen door het uitvoeren van belastingstesten ter plaatse. Dit dient echter te worden uitgevoerd zonder schade toe te brengen die de veiligheid of duurzaamheid van de constructie in gevaar brengt. Een algemeen aanvaarde werkwijze is het toepassen van beproevingsbelastingen op de constructie en het tegelijkertijd monitoren van de wijze van belastingafdracht, optredende vervormingen en bij constructies uitgevoerd in beton en metselwerk voor de kritische locaties monitoren van micro-scheurvorming. Op basis van de gedane metingen kan een kritisch belastingniveau worden bepaald, dat gekenmerkt wordt door het begin van het ontstaan van een (beschadigings)proces



3. Belastingsvoertuig gereed voor vertrek.

waarmee de bruikbaarheidsgrenstoestand (bijvoorbeeld de duurzaamheid met betrekking tot de scheurwijdte of vervorming) of de uiterste grenstoestand (statische sterkte of vermoeiingssterkte) niet langer voldoet aan datgene wat een norm als criterium oplegt. Dit kritische belastingsniveau dient in de belastingsproef niet te worden overschreden. Om schade aan de constructie te voorkomen zijn adequate meetinstrumenten alsmede ervaren personeel noodzakelijk. Het maximale beproevingsniveau dat bij de experimenten werd bereikt, wordt als limiet beschouwd, dat - rekening houdend met een bepaalde veiligheidsmarge - tot de toelaatbare gebruiksbelasting voor de desbetreffende constructie leidt (afb. 1).

Er zijn twee belangrijke technische voorwaarden voor een experimentele veiligheidsevaluatie waarbij geen schade wordt toegebracht:

- De toepassing van de beproevingsbelastingen moet zodanig worden gedaan dat, zelfs in geval van onverwacht optredende schade, een plotseling falen van de constructie wordt vermeden.
- Gedurende de belastingsproef dient het gedrag van de constructie continu te worden gecontroleerd en onmiddellijk te worden geëvalueerd. Op deze wijze worden kritische belastingsniveaus vastgesteld en het belastingsprogramma kan worden bijgesteld om schade aan de constructie te voorkomen.

Door een experimentele veiligheidsevaluatie blijkt vaak dat een constructie extra draagkrachtcapaciteit kent, die niet met gangbare rekenanalyses kan worden aangetoond. Dit is in het bijzonder het geval bij betonnen of gemetselde constructies. Dit wordt veroorzaakt door de variatie aan materiaaleigenschappen en een minder eenduidig herkenbaar hoofddraagsysteem (de wijze waarop belasting wordt afgevoerd) anders dan bij staalconstructies, evenals door oplegcondities waarvan het gedrag vaak moeilijk is te modelleren. In talloze gevallen kan de kostbare en tijdrovende vervanging van constructies worden voorkomen door de veiligheid voor beide grenstoestanden (bruikbaarheidstoestand en uiterste grenstoestand) experimenteel te

4. Procedure bij testen van een brug.
(Rechter pagina)
(A) Aankomst van voertuig
(B) Verlengen van het voertuig
(C) Belasten van de brug



beproeven. Op basis van de experimentele uitkomsten kunnen bovendien maatregelen voor onderhoud en versterking efficiënter worden gepland en uitgevoerd. Van 1992 tot en met 2001 heeft een onderzoeksteam van de Hochschule Bremen, University of Applied Sciences, de Technische Universität Dresden, de University of Applied Sciences (HTWK) in Leipzig en de Bauhaus Universität Weimar zich met experimentele veiligheidsevaluaties bezig gehouden [1]. Werkwijzen en meetapparatuur zijn in de loop van de uitvoering van deze werkzaamheden belangrijk verbeterd. Verder heeft het team zijn bijdrage geleverd aan het opzetten van een technische richtlijn voor belastingsproeven, die in 2000 is gepubliceerd [2]. De richtlijn bevat het veiligheidsconcept voor belastingsproeven, evenals criteria voor kritische belastingsniveaus. Volgens de richtlijn dient de experimentele veiligheidsevaluatie door belastingsproeven te worden beperkt tot gevallen waar een analytische benadering niet van toepassing bleek voor het vaststellen van een aanvaardbaar veiligheidsniveau.

Afbeelding 1 toont het veiligheidsconcept bij experimenteel belasten van een constructie. De grafiek geeft gewoonlijk een situatie weer, waaruit blijkt dat de stijfheid van een constructie vaak groter is dan de stijfheid volgens een ontwerpberekening. Voordat de belastingsproef wordt uitgevoerd wordt een experimentele streefbelasting berekend, die de rekenwaarde voor belasting veroorzaakt door eigengewicht en verkeer afdekt. Er kunnen voor de diverse belastingssoorten verschillende veiligheidsfactoren worden gebruikt. Een

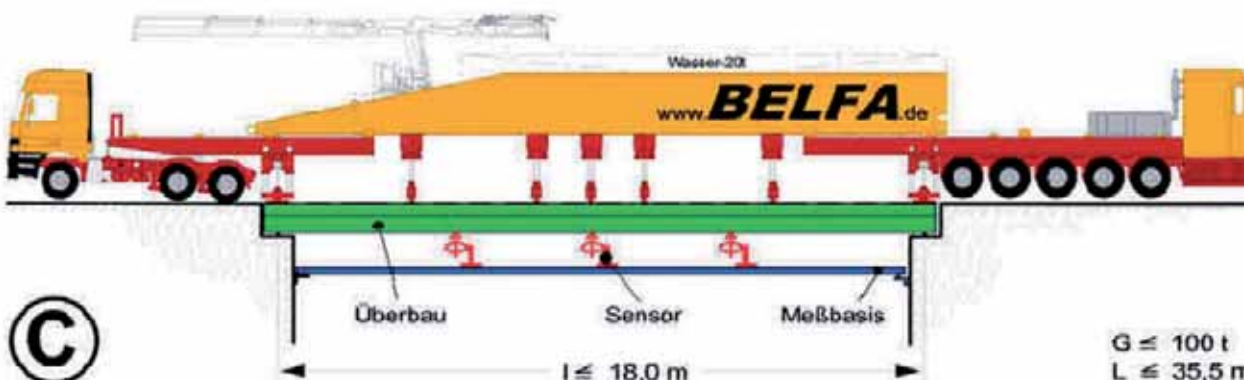
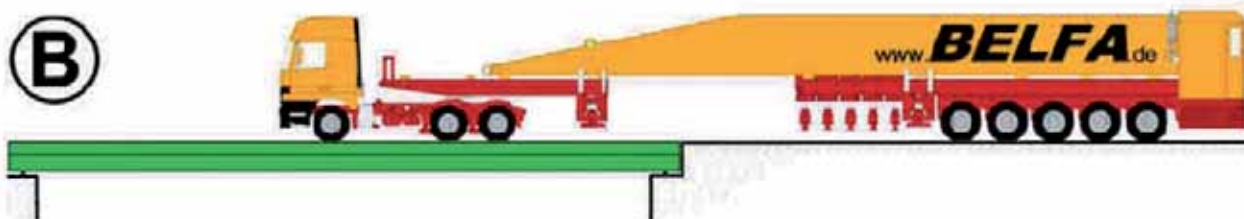
BELFA

(A)



G = 80 t
L = 22,5 m

(B)



(C)

G ≤ 100 t
L ≤ 35,5 m

veiligheidsfactor bestaat uit zowel een belastingfactor als een materiaalfactor.

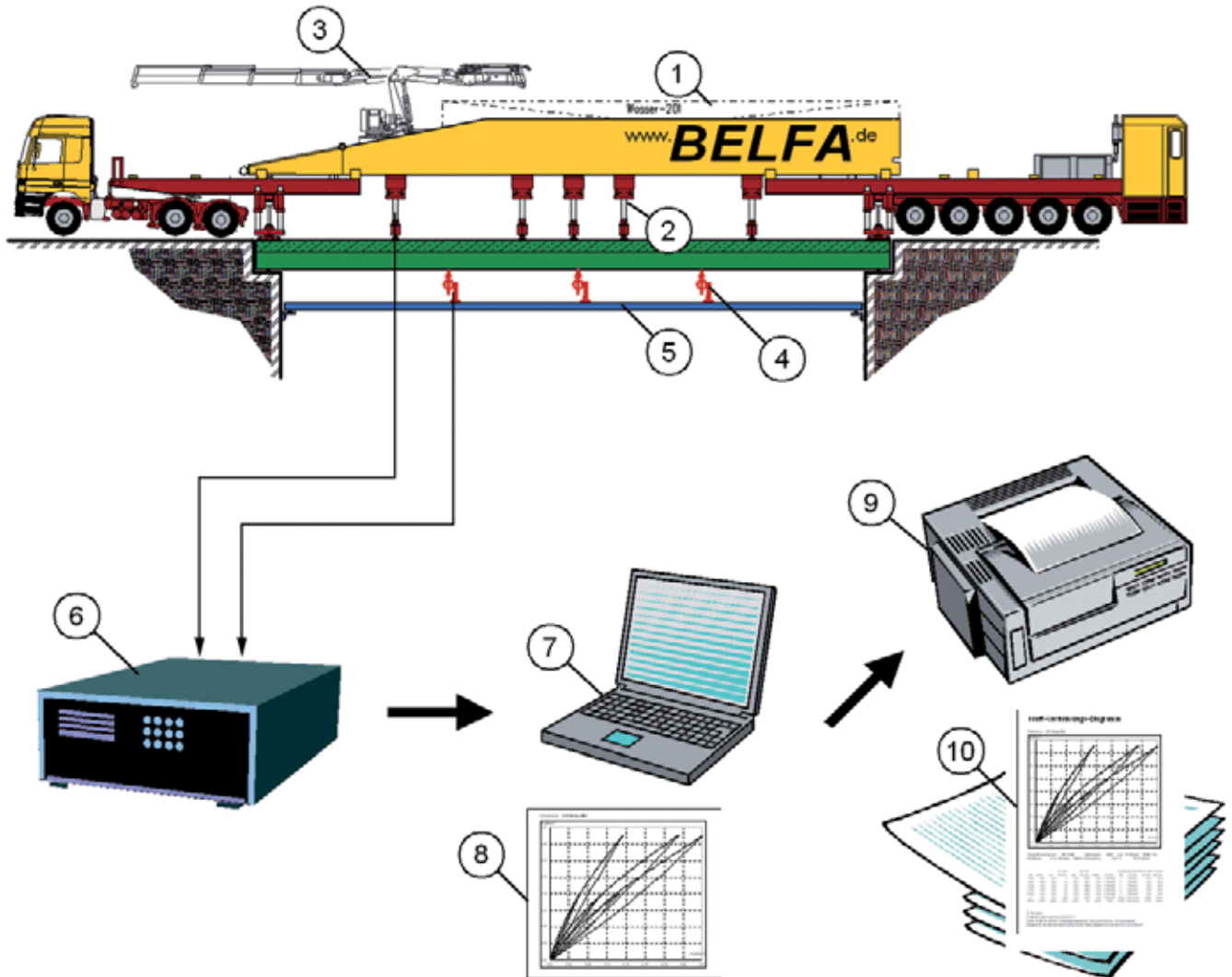
Om de veiligheid van de constructie evenals die van apparatuur en personeel veilig te stellen, dient de beproevingsbelasting zodanig te zijn toegepast dat plotseling falen wordt voorkomen. Met andere woorden een 'permanent' aanwezige extra belasting verkregen door toename van een massa (zwaartekracht) is als beproevingsinstrument ontoelaatbaar. Indien er echter hydraulische vijzels worden gebruikt en als er een stalen frame is voor het overbrengen van reactiekrachten naar de opleggingen van de constructie (afb. 2) voorziet het belastingssysteem in zijn eigen veiligheid. In geval van onverwachte schade zal de stijfheid van de constructie afnemen, hetgeen een afname van de beproevingsbelasting tot gevolg heeft. Deze uitleg is te vergelijken met het uitvoeren van een experiment in een laboratorium waarbij het proefstuk 'verplaatsing gestuurd' in plaats van 'belasting gestuurd' wordt beproefd. Bij 'verplaatsing gestuurd' is de belasting dus afhankelijk van de weerstand die wordt ondervonden. Als de weerstand wegvalt komt daarmee ook de kracht (belasting) te vervallen.

Afb. 2 toont een stalen frame dat op een betonnen brug is geplaatst. Het frame is verankerd aan de opleggingen en tussen de constructie en het stalen frame bevinden zich de hydraulische vijzels. Deze manier van belasten was de voorloper op de thans gebruikte methode waarbij een lastwagencombinatie wordt ingezet.

De constructie zoals toegelicht in afb. 2 is duur en tijdrovend. Met name de langdurige verkeersstremming en vaak optredende beschadiging van de slijtlaag werd in de tijd gezien een steeds groter probleem. Voor het doelmatiger verrichten van belastingsproeven bij verkeersbruggen is daarom een speciaal voertuig, BELFA, ontworpen en gebouwd, dat het mogelijk maakt deze experimenten zonder de dure en tijdrovende constructie van stalen frames [3] te doen. [www.belga.de].

Belastingsvoertuig BELFA voor het testen van verkeersbruggen.

Het nieuwe belastingsvoertuig BELFA is als een speciaal voertuig geregistreerd (gepatenteerd) en mag zich op de openbare weg bevinden. Afb. 3 toont de BELFA tijdens transport.



5. Opstelling van het voertuig tijdens belasten van de brug.

(1) de belasting

(2) hydraulisch gekoppelde vijzel

(3) kraan voor aanvullende regelballast

(4) verplaatsingsmeter

overigen: dataverwerking

Wanneer de BELFA bij de werkzaamheden wordt ingezet, dient deze als een reactie frame, (afb. 4 en 5). Daartoe wordt het voertuig verlengd en omhoog gevijzeld, twee vijzels voor en twee achter. De maximale afstand tussen deze vijzelpunten is 18 m. Dit beperkt de overspanning van de bruggen die kunnen worden getest tot deze lengte. Door het optillen van het gehele voertuig kan het volledige eigen gewicht hydraulisch worden geactiveerd als reactiekracht voor de proefbelastingen die worden voortgebracht door ten hoogste vijf hydraulische cilinders. Positie en omvang van de krachten is per vijzel variabel. Op deze manier kunnen verschillende in werkelijkheid optredende belastingsopstellingen worden gesimuleerd in overeenstemming met de geldende ontwerpcodes. De maximum totale proefbelasting bedraagt 1500 kN.

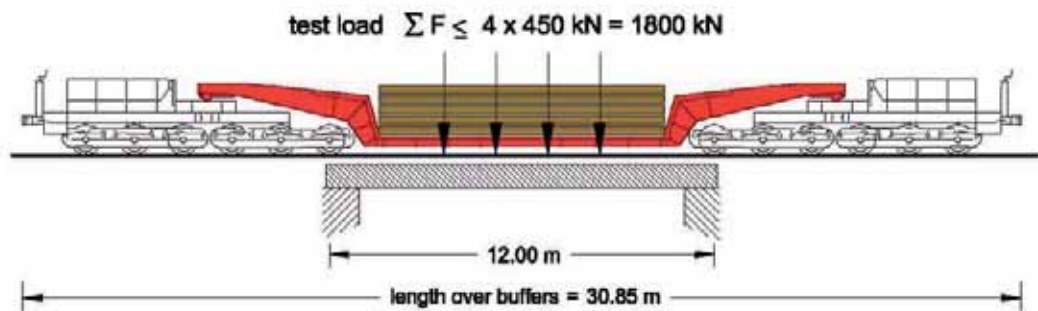
Het beproeven van een brug met één overspanning duurt niet langer dan ongeveer een dag. Daardoor wordt de tijd dat de weg moet worden afgesloten aanzienlijk bekort. Het installeren van de sensoren voor het meten van de reacties van de constructie vergt extra tijd, maar de verkeersstroom op de brug wordt



6. Belastingsvoertuig in operationeel stadium.

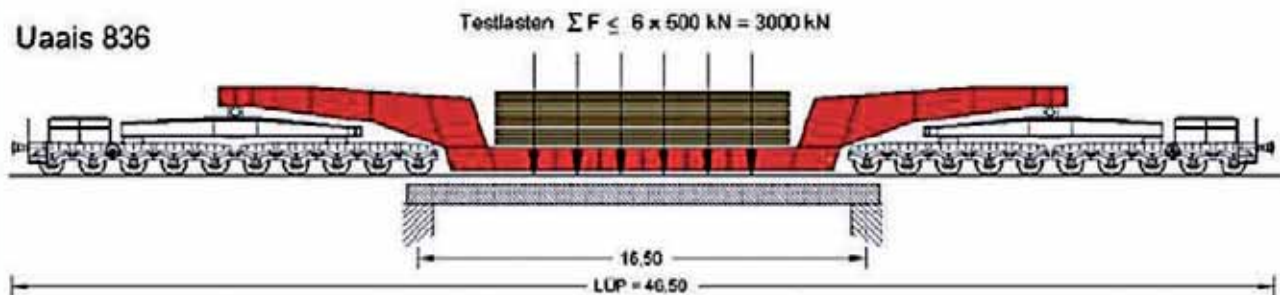
daar niet door gehinderd. Aan de achterzijde van het voertuig bevindt zich de controlecabine (afb. 5). In deze cabine is de meetapparatuur geïnstalleerd, van waaruit twee experts het experiment controleren. De BELFA heeft een eigen gewicht van circa 700 kN. Indien deze belasting niet voldoende is om de proefbelasting te compenseren, is er extra ballast nodig. Daartoe kan een aan boord aanwezige waterzak worden gevuld met maximaal 20 ton water. Als de reactiekracht dan nog te laag is, kan de BELFA met hogesterkte ankers aan de brugopleggingen worden verankerd. De BELFA is sinds 2001 met succes gebruikt voor het testen van circa 20 bruggen. Afb. 6 toont de BELFA op een voorgespannen betonnen brug in de buurt van Bremerhaven, Noord Duitsland. Een gedeelte van de brug belast op buiging vertoonde verscheidene beschadigingen

Uaais 819



7. Belastingvoertuig voor het beproeven van spoorbruggen.

Uaais 836



8. Belastingvoertuig voor het beproeven van spoorbruggen (in ontwikkeling).

en er waren al reparaties aan verricht. Tevens moest de rijstrook worden verbreed. Een rekenkundige analyse bleek niet succesvol. De tests werden echter wel met succes uitgevoerd en de weg behoefde slechts een dag te worden afgesloten. Aangetoond kon worden dat de constructie de vereiste belasting zelfs onder nieuwe omstandigheden kon weerstaan. Niettemin werd het plaatsen van de BELFA op de brug evenals de belastingstest zelf nauwkeurig gecontroleerd door het gebruik van veel spanningsmeters en verplaatsings-sensoren.

Als een aanvullende methode voor het controleren van het structurele gedrag onder beproevingsbelastingen heeft de akoestische emissie-analyse bewezen waardevolle informatie te kunnen verschaffen. Speciaal bij betonnen constructies geeft deze methode een heel precieze scheurdetectie in vergelijking met vervormingsmetingen.

BELFA-DB voertuig voor belastingsproeven van spoorbruggen

Ervaringen met het belastingsvoertuig BELFA, ontworpen voor het testen van verkeersbruggen [4], leidden tot het inzetten van deze technologie voor betonnen en gemetselde spoorbruggen. Een onderzoeksteam van de Hochschule Bremen en de HTWK Leipzig, in samenwerking met de Deutsche Bahn AG, heeft een prototype ontwikkeld van een spoorweg belastingsvoertuig, de BELFA-DB, voor het beproeven van spoorbrugconstructies [5]. [www.belga-db.de].

De BELFA-DB bestaat uit een standaard treinwagon, beladen met stalen platen (afb. 7). Vanwege het grote aantal assen, 12 assen aan weerszijden, zijn de assen onderhevig aan een gangbare aslast van 21 tf, wat verplaatsing van het voertuig via het bestaande railstelsel mogelijk maakt. Indien nodig kan het laadgewicht van

de wagon worden verlaagd door (een gedeelte van de) belading te verwijderen. Zoals het geval is bij de BELFA voor verkeersbruggen, gedraagt het eigen gewicht van het voertuig zich als een contragewicht voor de testbelastingen. Deze worden aangebracht met acht hydraulische vijzels, vier aan elke kant van het spoor (afb. 7). Om schade aan de rails te voorkomen, gebruikt men stalen balken voor het afdragen van de belasting. Daar de buigstijfheid van de hoofdbalken van de wagon onvoldoende is voor het afdragen van reactiekrachten, worden de stalen ballastplaten gebruikt voor het versterken van de dwarsdoorsnede. Met het oog daarop worden de platen met stalen stangen bijeen gehouden zodat een deukwerking ontstaat en daarmee intern schuifkrachten kunnen worden overgebracht. Het prototype van de BELFA-DB dat momenteel wordt gebruikt kan worden toegepast bij bruggen met een overspanning tot circa 16 m. Hieronder valt ongeveer 80% van alle betonnen en gemetselde bruggen. Het ontwerp van een nieuw belastingsvoertuig voor een aanzienlijk grotere overspanning zal waarschijnlijk niet efficiënt zijn.

Meestal werkt de proefbelasting op vier gesimuleerde assen met een onderlinge afstand van 1,6 m (afb. 7), zulks in overeenstemming met de standaard spoorbelasting set UIC 71. De totale maximum belasting die door het huidige prototype kan worden verkregen bedraagt 1800 kN, maar niet in alle gevallen. Een op stapel staand nieuw belastingsvoertuig moet proefbelastingen van maximaal 3000 kN kunnen doorstaan om de experimentele streefbelasting voor de meeste bruggen binnen de desbetreffende range van overspanningen te bereiken (afb. 8).

Sinds 2001 is het prototype BELFA-DB voor het testen van 10 spoorbruggen gebruikt [5]. Al deze projecten werden als succesvol beschouwd. Voor enkele bruggen was een integrale benadering aan de orde,



9. BELFA in test positie (op een kwart van de overspanning; zwakste schakel van de boogconstructie).

waarbij een combinatie van numerieke simulaties en belastingstesten werd gebruikt met het oog op de systeemidentificatie en veiligheidsevaluatie. Het laatste experiment met het prototype vond plaats op een viaduct met vier overspanningen die de Rhema vallei overspant (afb. 9). Uit numerieke berekeningsresultaten bleek een ontoereikende veiligheid en daarom was de spoorweg vanaf november 1999 afgesloten. De schade en de resultaten van de numerieke berekeningen wezen in de richting van een noodzakelijke restauratie. Voor het evalueren van de huidige staat van de constructie en voor het meten van de effectiviteit van de reparatiewerkzaamheden, bleken belastingproeven met de BELFA-DB om de volgende redenen bijzonder nuttig:

- Geen oponthoud van het verkeer
 - Verplaatsingsgestuurde belasting
 - Instelbare beproevingsbelastingen boven het niveau van de gebruiksbelasting
 - Beoordeling van schades aan de bogen en kolommen.
- Voorafgaand aan de belastingproeven op de brug

werden er diverse voertuigbewegingen van de locomotief en de locomotief set met de BELFA-DB uitgevoerd. De positie van het voertuig werd op afstand met behulp van een laser apparaat gemeten en de belastingafdracht werd gecontroleerd. Voor de systeemidentificatie werd de BELFA-DB in het midden van de overspanning geplaatst en vervolgens op de kwartpunten. Met behulp van geïnstalleerde meetapparatuur konden er last-verplaatsingscurves worden verkregen. Van hetzelfde principe gebruik makend, werd een pijler tot maximaal $F = 1800$ kN getest en reacties werden gecontroleerd.

De experimentele bevindingen werden gebruikt voor het kalibreren van een eindige elementenmodel (numerieke analyse) naar het concept van integrale modellering. De tests op het spoorviaduct bij Rhema hebben tot een veilige systeemidentificatie geleid, hetgeen een nauwkeurige beoordeling van de staat van de brug mogelijk maakte. Verder kunnen de experimentele resultaten als basis dienen voor toekomstige metingen voor het vaststellen van de doeltreffendheid van restauraties. Afb. 10 geeft een overzicht van locaties waarbij spoorbruggen zijn beproefd met de BELFA-DB.

Einsatzort, Datum	Bauwerksdaten	Baustoff, Rechnerische Einstufung	Versuchszielstellung	Experimentelle Einstufung
<u>Berod, Westerwald</u> Juni 2001	Bj. 1908, L = 5,4 m	Walzträger in Beton (WIB), < UIC 71	Kippnachweis Widerlager UIC 71	UIC 71
<u>Meudt, Westerwald</u> Juni 2001	Bj. 1908, L = 7,5 m	WIB-Brücke, < UIC 71	Kippnachweis Widerlager UIC 71	UIC 71
<u>Wolfsholz, Westerwald</u> Juni 2001	Bj. 1908, L = 4,8 m	WIB-Brücke, < UIC 71	Kippnachweis Widerlager UIC 71	UIC 71
<u>Niederahr, Westerwald</u> Juni 2001	Bj. 1908, L = 6,6 m	WIB-Brücke, < UIC 71	Kippnachweis Widerlager UIC 71	UIC 71
<u>Goldhausen, Westerwald</u> Juni 2001	Bj. 1927, L = 6,2 m	WIB-Brücke, < UIC 71	Kippnachweis Widerlager UIC 71	UIC 71
<u>Hadamar, Westerwald</u> Juni 2001	Bj. 1886, L = 6,8-7,0 m	Mauerwerksbogenbrücke, < UIC 71	Systemidentifikation UIC 71	UIC 71
<u>Oberhausen, NRW</u> September 2002	Bj. 1959, L = 15,4 m	Walzträger in Beton (WIB), < UIC 71	Systemidentifikation UIC 71/Schwerlastverkehr	UIC 71
<u>Wabern (Kassel), Hessen</u> September 2002	Bj. 1849, L = 4,8 m	Mauerwerksbogenbrücke, < UIC 71	Systemidentifikation einschl. Widerlager/Flügelmauem UIC 71	UIC 71
<u>Lüneburg, Niedersachsen</u> September 2002	Bj. 1874/1953, L = 17,0 m	Mauerwerksbogenbrücke, < UIC 71	Systemidentifikation UIC 71/Schwerlastverkehr	UIC 71
<u>Hamburg</u> Dezember 2002	Bj. 1970, L = 22,7 m	Spannbeton, < UIC 71	UIC 71	UIC 71
<u>Uelzen/Langwedel, Niedersachsen</u> Dezember 2002	Bahndamm	Feinsande, < UIC 71	Systemidentifikation / UIC 71	System identifiziert
<u>Rhena, Hessen</u> Juli 2003	Bj. 1914/15, L = 4 x 19,0 m	Mauerwerksviadukt Vollsperrung	Systemidentifikation / UIC 71	System identifiziert
<u>Auel, N.-W.</u> Dezember 2004	Bj. ca. 1870, Lw = 15,70 m	Mauerwerksgewölbe ca. < UIC 71	Systemidentifikation / UIC 71	System identifiziert
<u>Bülgenauel, N.-W.</u> Dezember 2004	Bj. ca. 1870, Lw = 15,70 m	Mauerwerksgewölbe ca. < UIC 71	Systemidentifikation / UIC 71	System identifiziert
<u>Merten, N.-W.</u> Dezember 2004	Bj. ca. 1870, Lw = 15,70 m	Mauerwerksgewölbe ca. < UIC 71	Systemidentifikation / UIC 71	System identifiziert
<u>Pleinfeld, Bayern</u> April 2005	Bj. 1895 / 1953, 3 x Lw = 7,30 m	Mauerwerksgewölbe ca. < UIC 71	Systemidentifikation / UIC 71	UIC 71

10. Toepassing van de BELFA-DB bij spoorbruggen in Duitsland.

Referenties

- [1] Steffens, K.; Experimentelle Tragsicherheitsbewertung von Bauwerken, Ernst & Sohn Berlin 2002. ISBN 3-433-01748-4.
- [2] Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton, Belastungsversuche an Betonbauwerken, September 2000.
- [3] Knaack, H. U.; Schröder, C.; Slowik, V.; Steffens, K.: Belastungsversuche an Eisenbahnbrücken mit dem Belastungsfahrzeug BELFA-DB, Bautechnik 80 (2003) 1, 1-8.
- [4] Slovik, V.; Sommer, R.; Guterman, M.: Experimentelle Tragsicherheitsbewertung von Straßenbrücken mit Hilfe des Belastungsfahrzeuges BELFA, Beton- und Stahlbetonbau 97 (2002) 10, 544-549.
- [5] Steffens, K.; Opitz, H.; Quade, J.; Schwesinger, P.: Das Belastungsfahrzeug BELFA für die experimentelle Tragsicherheitsbewertung von Massivbrücken und Abwasserkanälen, Bautechnik 78 (2001) 6, 391-397.
- [6] Guterman, M.; Slowik, V.; Steffens, K.: Experimental safety evaluation of concrete and masonry bridges. International Symposium NDT-CE, 16.-10.09.03. DGZFP, BB 85-CD.

