

Beoordelen bestaande betonnen bruggen

Lantsoght, E.O.L.; Yang, Y.; Hendriks, M.A.N.

Publication date

2022

Document Version

Final published version

Published in

Cement: vakblad voor de betonwereld

Citation (APA)

Lantsoght, E. O. L., Yang, Y., & Hendriks, M. A. N. (2022). Beoordelen bestaande betonnen bruggen. *Cement: vakblad voor de betonwereld*, 8, 59-67.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable). Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights. We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository

'You share, we take care!' - Taverne project

<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.

Beoordelen bestaande betonnen bruggen

Van onderzoek tot toepassing in de praktijk



Om de vele bestaande betonnen bruggen – die de komende tijd het einde van hun beoogde levensduur bereiken – te beoordelen, is het belangrijk een aanpak met verschillende niveaus van beoordelen te gebruiken. Waar een handberekening niet volstaat, kunnen geavanceerde modellen, meetgegevens, belastingproeven, monitoren, inzichten van laboratoriumproeven, of een combinatie van deze technieken worden gebruikt. De keuze hiervoor hangt af van de openstaande vragen met betrekking tot het gedrag en/of de capaciteit van de brug, alsook van de kosten-batenanalyse van de beoordelingsmethode.

Vele bestaande betonnen bruggen in Nederland zijn gebouwd in de naoorlogse periode.

Sindsdien zijn de verkeersbelastingen en -intensiteit sterk toegenomen. Deze trend vertaalt zich in een hogere verkeersbelasting in de huidige Eurocode 1 ten opzichte van de gebruikte normen tijdens het ontwerp van deze bruggen. Bovendien bevat de huidige Eurocode 2 voorschriften die een lagere dwarskrachtcapaciteit kunnen geven dan de destijds gebruikte norm. Een herberekening van deze bruggen kan dus leiden tot de conclusie dat de brug niet voldoet aan de eisen van de huidige normen.

Het beoordelen van bestaande betonnen constructies (in combinatie met periodieke inspecties en onderhoud) is belangrijk om te zorgen voor de veiligheid van het nationale transportnetwerk en de reizigers op het netwerk. Op basis van een beoordeling kan worden gekeken of een brug voldoet aan de eisen van de norm, of dat er mogelijk een versteviging nodig is. Het is belangrijk dat de beoordeling rekening houdt met de staat van de brug en dat de invloed van corrosie, alkali-silicareactie en andere degradatiemechanismen op de capaciteit in rekening worden gebracht.

Herberekenen is vaak de eerste stap in het beoordelen van bestaande betonnen constructies. Wanneer één of meerdere doorsneden van de brug niet voldoen aan de *Unity Check*, betekent dit nog niet onmiddel-

auteurs



**DR. IR. EVA
LANTSOGHT**

Universitair Docent
TU Delft
Professor
Universidad San
Francisco de Quito



**DR. IR. YUGUANG
YANG**

Universitair Docent
TU Delft



**PROF. DR. IR. MAX
HENDRIKS**

Hoogleraar
TU Delft

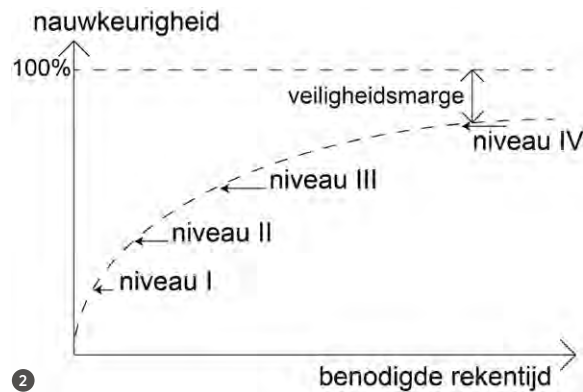
lijk dat de brug onveilig is. Er kunnen andere draagwegen optreden, die niet in de norm worden beschouwd. Verdere berekeningen en mogelijke metingen aan de brug zijn dan nodig om tot een conclusie over de constructieve veiligheid te komen.

fib Model Code-aanpak

De aanpak om eerst een snelle berekening uit te voeren op basis van een *Unity Check*, en dan indien nodig, meer tijd en middelen in te zetten voor de beoordeling, is ook terug te vinden in de *fib Model Code 2010*. In de *fib Model Code* worden voor de dwarskracht- en ponscapaciteit verschillende niveaus (I t/m IV) van benadering (*levels of approximation*) voorgeschreven, afhankelijk van het doel van de berekening. Een snelle inschatting met een vereenvoudigde formule voor de capaciteit kan voldoende zijn voor een voorontwerp, terwijl een nadere uitwerking mogelijk een nauwkeurigere, iteratieve aanpak vereist (fig. 2). In het hoogste niveau van benadering kunnen geavanceerde eindige-elementenmodellen worden ingezet. In de volksmond wordt deze iteratieve aanpak ook wel 'heel rekenen' genoemd.

Eenzelfde aanpak kan worden gebruikt voor het beoordelen van bestaande betonnen bruggen. Hierbij zijn voor bestaande bruggen in Nederland de vigerende normen de NEN 8700-serie en voor bruggen in het beheer van Rijkswaterstaat de Richtlijnen Beoordeling Kunstwerken RBK, die →

In de fib Model Code 2010 worden voor de dwarskracht- en ponscapaciteit verschillende niveaus (I t/m IV) van benadering voorgeschreven



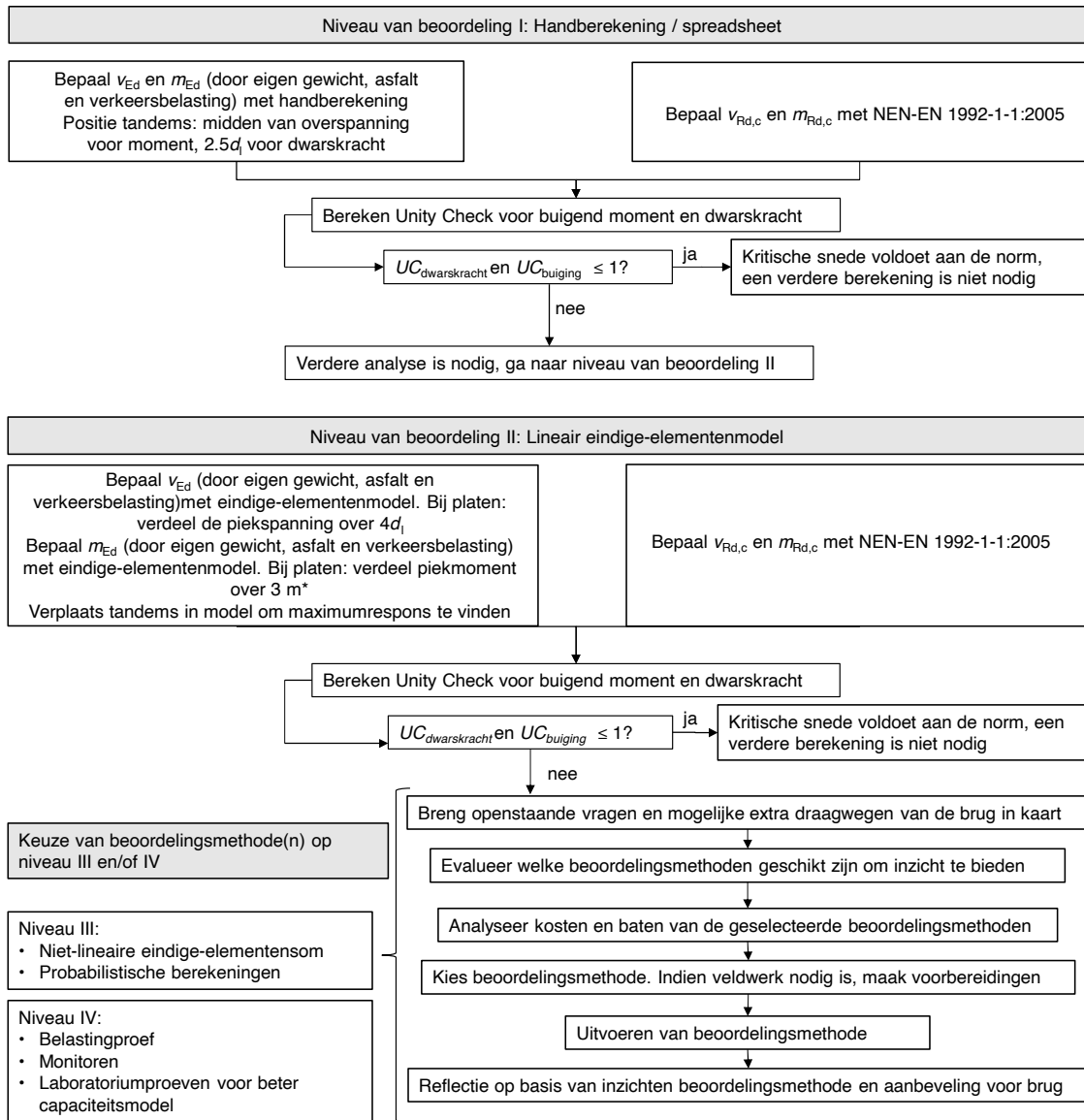
is gestoeld op de veiligheidsfilosofie van de NEN 8700-serie [1]. Een eerste niveau van beoordelen bestaat uit het bepalen van de *Unity Checks* met een handberekening of spreadsheet, waarbij het belastingeffect wordt berekend en wordt vergeleken met de capaciteit als voorgeschreven in de huidige norm. Wanneer met deze snelle berekening wordt gevonden dat alle doorsneden voldoen, zijn verdere acties niet nodig. Wanneer wordt gevonden dat de doorsnede niet voldoet, kan een volgende stap worden gemaakt. Een volgende stap bestaat vaak uit het gebruik van een lineair eindige-elementenmodel om het belastingeffect beter in te schatten. Voor de capaciteit wordt dan nog steeds de normformule gebruikt. Wanneer dan wordt gevonden dat alle doorsneden voldoen, zijn verdere acties niet nodig. Wanneer de doorsnede niet voldoet, zijn verdere stappen nodig op niveau III en/of niveau IV. De keuze voor het volgende niveau is afhankelijk van de beschikbare informatie en specifieke situatie van de brug. Deze stappen kunnen bestaan uit het gebruik van een gespecialiseerd capaciteitsmodel, het berekenen met behulp van niet-lineaire eindige-elementensommen, en/of het gebruik van meetgegevens van de brug. Hierbij kan veldwerk (niveau IV) ook worden gebruikt voor het updaten van de eindige-elementensommen (niveau II of III). De procedure is geïllustreerd in figuur 3.

Technieken voor het beoordelen van bruggen

In dit artikel ligt de nadruk op geavanceerdere methoden voor het beoordelen van

bruggen, voorbij de standaardrekenmethoden. Deze methoden zijn het gebruik van geavanceerde modellen (zowel voor de capaciteit als het gebruik van niet-lineaire eindige-elementenmodellen), het gebruik van gegevens van de brug (uitgebreide inspectiegegevens, monitoren, of belastingproeven) en de combinatie van deze methoden.

Om een uitspraak te doen over de methode (of combinatie van methoden) die het meest geschikt is voor het beoordelen van een bestaande brug, is vaak een voorstudie nodig. Deze voorstudie richt zich op het in kaart brengen van de openstaande vragen over de brug, de onzekerheden in de berekeningen, de mogelijke additionele draagmechanismen die optreden en het identificeren van de methoden die het meest geschikt zijn voor de beoordeling. Zo kan bijvoorbeeld de grootste vraag bij een vorgespannen liggerbrug zijn hoe de verdeling is van de belasting over de liggers. Een geschikte aanpak is dan het gebruik van een diagnostische belastingproef, waarbij met rekstrookjes de rekken in de verschillende liggers worden gemeten. Hiermee kunnen de dwarse verdeling en het belastingeffect op de liggers beter worden ingeschat. Anderzijds kan voor een brug met progressieve degradatie het continu monitoren nodig zijn. De voor- en nadelen van de verschillende methoden moeten dus voor de specifieke brug worden gewogen. Hierbij zijn de volgende zaken van belang: staat van de brug, type brug, beschikbare gegevens en locatie en bereikbaarheid van de brug (i.v.m. het mogelijke aanbrengen van sensoren).



* De spreidingsbreedte van 3 m voor buigend moment is een inschatting op basis van de breedte van de rijstrook. Deze inschatting is gestaafd met initieel onderzoek. Verder (toekomstig) onderzoek kan mogelijk een voorstel voor de spreidingsbreedte als functie van de nuttige hoogte d opleveren.

Geavanceerde modellen

Capaciteitsmodellen en proefresultaten Op basis van experimenteel onderzoek zijn de voorbije jaren verschillende nieuwe modellen ontwikkeld, die een nauwkeurigere inschatting geven van de capaciteit van een betonconstructie. Voorbeelden hiervan zijn de *Critical Shear Displacement Theory* voor dwarskracht en het plastische strokenmodel bij platen voor dwarskracht en buiging. Deze modellen kunnen worden gebruikt om

inzicht te krijgen in het verwachte gedrag van de brug. Het voordeel van deze aanpak is dat de beoordeling een theoretischere grondslag krijgt, maar het nadeel is dat deze rekenmethoden niet in de norm zijn opgenomen.

Een tweede type aanpak is het direct vertalen van inzichten van experimenteel onderzoek voor de beoordeling van bestaande bruggen. Voorbeelden hiervan zijn de huidige aanbevelingen voor de effectieve breedte en plaatfactor voor de dwars-

Om een betere inschatting van het gedrag en de capaciteit van een brug te krijgen, kunnen niet-lineaire eindige-elementenmodellen worden gebruikt

krachtcapaciteit van plaatbruggen [2], de bepaling van de ponscapaciteit van tussenstorts en de toets voor vermoeiing van de tussenstorts in liggerbruggen. Het voordeel van deze aanpak is dat een direct, proefondervindelijk antwoord kan worden gegeven op een vraag omtrent het gedrag of capaciteit van een bepaald type brug. Het nadeel is dat voor deze aanpak tijd en budget vereist zijn.

Aangezien deze twee methoden het onderwerp van huidig onderzoek zijn, zijn deze niet in de regelgeving opgenomen. Wel kunnen de principes van Eurocode 0 Annex D worden gebruikt. Daarin wordt volgens het principe *design assisted by testing* uitgelegd hoe je op basis van proeven een ontwerpwaarde kunt vinden van ofwel een enkele eigenschap ofwel een capaciteitsmodel.

Eindige-elementenmodellen Om een betere inschatting van het gedrag en de capaciteit van een brug te krijgen, kunnen niet-lineaire eindige-elementenmodellen worden gebruikt. Voor deze aanpak bestaan opnieuw verschillende niveaus van benadering. Deze benaderingen hebben te maken met de schaal van het model (van het modelleren van een enkele connectie of ligger tot het modelleren van de volledige brug), verschillende aanpakken voor de veiligheid en het omgaan met de onzekerheden [3] en verschillende aannamen met betrekking tot de modellering zelf. Het voordeel van deze aanpak is dat uitgebreide informatie over het gedrag onder oplopende belasting kan worden gewonnen en dat een inschatting van de capaciteit kan worden gegeven. Het nadeel is dat uitgebreide invoerinformatie nodig is met betrekking tot bijvoorbeeld de wapeningslayout en stijfheid van de opleggingen, en dat deze informatie soms niet beschikbaar is voor bestaande bruggen. Niet-lineaire eindige-elementenmodellen kunnen alleen voor het beoordelen van bestaande betonnen bruggen worden gebruikt, als de specifieke toepassing voldoende gevalideerd is. Dit kan door de methode te benchmarken met relevante experimentele resultaten. Voor bruggen in het beheer van Rijkswaterstaat zijn hier richtlijnen voor beschikbaar.

Gebruik van gegevens van de brug

Uitgebreide inspectiegegevens Wanneer de conditie van het beton en de wapening moeten worden ingeschat, kunnen bijkomende inspectietechnieken worden ingezet, die de visuele inspectie kunnen aanvullen. Afhankelijk van de onzekerheden over de conditie van de brug en de verwachte invloed op de beoordeling, kan een geschikte methode worden gekozen. Om schade aan de brug te vermijden, valt de keuze vaak op een niet-destructieve testmethode. Voorbeelden van niet-destructieve testmethoden zijn het gebruik van elektrische weerstand om wapeningscorrosie in te schatten, radar om wapening in het beton te identificeren, en infraroodthermografie om scheuren, delaminatie en desintegratie van het beton op te sporen. Vaak is een combinatie van meettechnieken nodig om een duidelijk beeld te krijgen van de conditie van het beton [4]. Het voordeel van deze aanpak is dat met niet-destructieve methoden als het ware in het beton kan worden gekeken. Het nadeel is dat de interpretatie van de meetgegevens soms niet eenduidig is en een gespecialiseerde opleiding vereist.

In sommige gevallen kan het nodig zijn de druksterkte van het beton te kwantificeren op basis van geboorde kernen. Deze invasievere methode kan geschikt zijn wanneer het bepalende bezwijkmechanisme uit de herberekening sterk afhankelijk is van de betonsterkte en wanneer een hogere betondruksterkte aanleiding kan geven tot een hogere inschatting van de capaciteit. Een voorbeeld is het bepalen van dwarskrachtcapaciteit, die gerelateerd is aan de derdemachtswortel van de betondruksterkte. Het voordeel van deze methode is dat het benodigde beproeven en meten aan de brug beperkt is, maar het nadeel is dat dit een destructieve methode is. De heersende regelgeving voor het boren van kernen uit bruggen in het beheer van Rijkswaterstaat is RTD 1018:2014.

Belastingproeven Om het gedrag van een brug te bepalen, kunnen belastingproeven uitkomst bieden. Er bestaan twee soorten



belastingproeven [5]. Een diagnostische belastingproef wordt uitgevoerd met een lage belasting (gebruikelijk is 60% van de gebruiksbelasting). Het doel van de proef is om het gedrag van de brug onder een bekende belasting te meten en deze inzichten te gebruiken om de numerieke modellen voor de beoordeling van de brug te verbeteren. Voorbeelden zijn het beter inschatten van de bijdrage van niet-constructieve elementen tot de algemene stijfheid van de brug, of het meten van rekken over de hoogte van een ligger om de neutrale lijn te bepalen en te bekijken of ligger en dek constructief samenwerken.

Daarnaast kun je ook een proefbelasting uitvoeren (foto 4). Deze wordt uitgevoerd met een belasting die representatief is voor de rekenwaarde van de verkeersbelasting of de belastingscombinatie die voor de uiterste grenstoestand maatgevend is. Als de brug deze belasting kan dragen zonder dat permanente schade optreedt, is proefondervindelijk aangetoond dat de brug de normbelasting kan dragen. Proefbelasten is vooral interessant wanneer de onzekerheden op het gedrag of de capaciteit erg groot zijn, waardoor de brug niet kan worden beoordeeld met een berekening. Het voordeel van een belastingproef is dat deze methode di-

rect inzicht geeft in het gedrag van de brug. Het nadeel is echter dat dergelijke proeven duur zijn, degelijke voorbereiding vereisen en mogelijk een tijdelijke sluiting van de brug vereisen. Een kosten-batenanalyse is dan ook altijd nodig wanneer de mogelijkheid voor een belastingproef wordt overwogen.

Huidig onderzoek aan de TU Delft richt zich op het veilig uitvoeren van proefbelastingen voor dwarskracht-kritische bruggen. Hierbij zijn stopcriteria van belang. Stopcriteria zijn limietwaarden aan de respons van de brug die kunnen worden gemeten, zoals rekken, scheurwijdte of doorbuigingen. Wanneer een stopcriterium wordt bereikt, is verder belasten niet toegestaan aangezien dit de constructieve veiligheid in het gedrang brengt. Een proef kan dan mogelijk worden gestopt voor de beoogde maximale proefbelasting is bereikt [7]. Het doel van het huidige onderzoek is om geschikte stopcriteria voor dwarskracht in betonnen plaatbruggen te formuleren op basis van plaatproeven in het lab (foto 5). Proefbelasten is ook direct gerelateerd aan de constructieve veiligheid, aangezien na de proef een uitspraak wordt gedaan over het wel of niet voldoen van de brug aan de eisen van de norm. Op dit moment wordt een →

Om het gedrag van een brug te bepalen, kunnen een diagnostische belastingproef en een proefbelasting uitkomst bieden

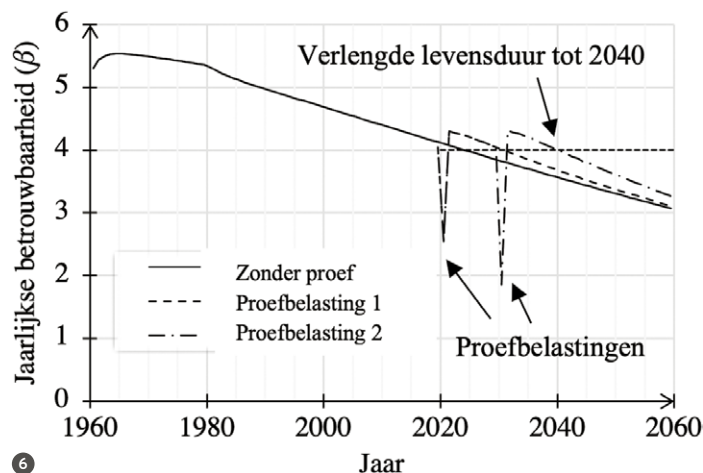


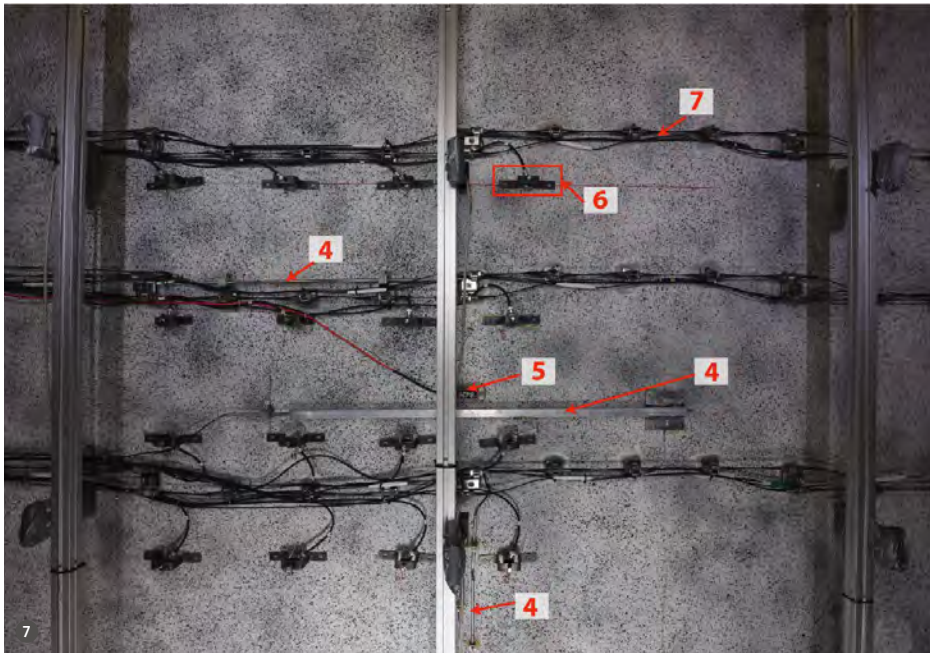
dergelijke uitspraak gedaan op basis van een equivalent moment of dwarskracht en de belastingsfactoren. Een directere aanpak is dit te doen op basis van de betrouwbaarheidsindex en de daarbij behorende belasting. Daarom is een probabilistische onderbouwing van de praktijk van het proefbelasten en onder meer het bepalen van de benodigde belasting nodig. Dit onderwerp vormt de basis voor een tweede huidig onderzoek naar proefbelasten (fig. 6).

Met de inzichten van dit onderzoek zal naar verwachting een richtlijn voor de Nederlandse praktijk worden opgesteld. Voor diag-

nostische proeven en proefbelasten voor het buigend moment kan worden verwezen naar een recente e-circular van de Transportation Research Board (TRB) [8], die de basis zal vormen voor wijzigingen in de Amerikaanse AASHTO-norm voor bestaande bruggen.

Monitoren Monitoren van bruggen bestaat uit het meten aan een brug over een langere tijdsperiode. Voor bestaande bruggen kan monitoren nodig zijn wanneer progressieve degradatie optreedt. Het gedrag van de brug wordt dan zo goed als continu in kaart ge-





bracht. In de praktijk betekent dit dat de meetgegevens om de zoveel tijd naar een centraal punt worden gestuurd en worden geanalyseerd om te kijken of het gedrag nog steeds binnen de veilige limieten valt. Het voordeel van deze methode is dat een kritiek onderdeel van een brug continu kan worden gevolgd. Het nadeel is dat deze aanpak één of meerdere sensoren en een data-acquisitiesysteem nodig heeft, wat kosten met zich meebrengt.

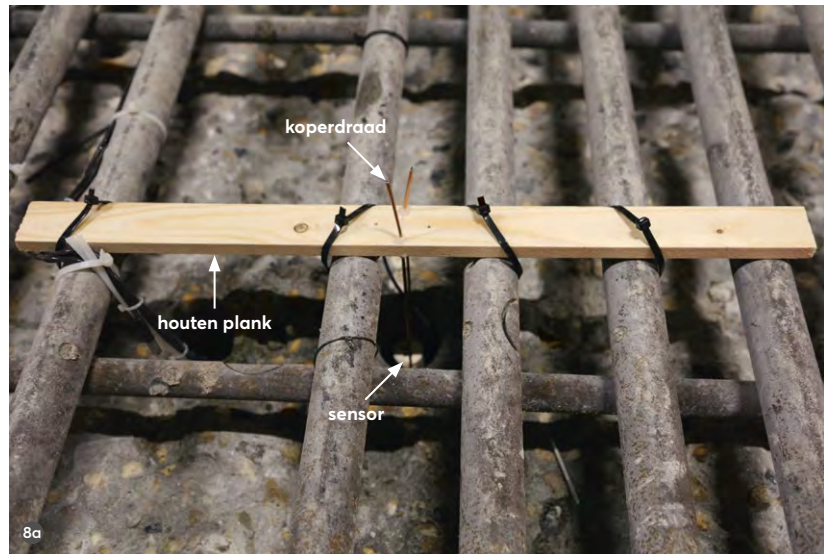
Verschillende meettechnieken zijn beschikbaar voor het monitoren. De optimale combinatie en toepassingen zijn onderwerp van huidig onderzoek aan de TU Delft (foto 7). Het huidig onderzoek richt zich vooral op het toepassen van meten op basis van akoestische emissies [9] en met *smart aggregates*. Aangezien het onderzoek nog loopt, zijn geen huidige richtlijnen beschikbaar. De eerste resultaten geven voor specifieke gevallen, bijvoorbeeld dwarskracht in gewapend beton, alvast indicatoren voor verschillende fasen in het gedrag van het element (van scheurvorming tot het mogelijke verlies van constructieve veiligheid). Voordat er aanbevelingen kunnen komen, is een vergelijking van de methoden belangrijk. Een eerste stap is gezet in de VS met een e-circular van de TRB, geschreven voor de praktijk [10].

Combinatie van methoden

Voor het beoordelen van bestaande bruggen worden vaak combinaties van methoden gebruikt. Zo kan bijvoorbeeld een capaciteitsmodel gebaseerd op experimenteel onderzoek worden gebruikt ter voorbereiding van een belastingproef. Hiermee is een betere inschatting van de verwachte capaciteit van de brug te maken ten opzichte van de aan te brengen belasting en/of voor het onderzoek of een bijkomende draagweg mogelijk kan optreden. Een andere combinatie van methoden is het gebruik van monitoren in combinatie met periodieke diagnostische belastingproeven. Hierbij worden dan zowel de gegevens van het continue monitoren van de brug onder de verkeersbelasting en de periodieke proeven onder een bekende belasting gebruikt om de brug te beoordelen. Ten slotte is de combinatie van niet-lineaire berekeningen en proefbelastingen een onderwerp van onderzoek.

Toepassingen in de praktijk

De verschillende methoden zijn in het verleden met succes toegepast op bestaande constructies. Zo werden *smart aggregates* met succes gebruikt bij de reparatie van de Maastunnel om de aanhechting tussen het oude beton en de reparatiemortel te →





monitoren (foto 8). Verder zijn een aantal pilotproefbelastingen uitgevoerd om ervaring op te doen met de techniek en om het proefbelasten van dwarskracht-kritische bruggen (met en zonder alkali-silicareactie) te verkennen (foto 9). De verwachting is dat het huidige onderzoek zal leiden tot richtlijnen die in de praktijk kunnen worden gebruikt.

Onderdeel gereedschapskoffer

Het beoordelen van bestaande bruggen wordt steeds belangrijker. Enerzijds worden we geconfronteerd met een arsenaal van bruggen die vele decennia geleden zijn ontworpen en gebouwd. Anderzijds willen we de gebruikslevensduur van deze bruggen zo groot mogelijk maken, om optimaal gebruik te maken van tijd en middelen. De basis is dat de constructieve veiligheid van de bestaande bruggen aan de eisen van de normen moet voldoen. Om dit te evalueren, zijn vaak bijkomende technieken nodig, gesteund op meetgegevens van de brug, belastingproeven, en/of geavanceerdere berekeningen. De ervaring leert dat deze methoden vaak een

antwoord kunnen geven op de openstaande vragen over de constructieve veiligheid van de brug, maar dat verder onderzoek nodig is om tot algemene richtlijnen voor een aantal aspecten te komen. De verwachting is dat deze methoden in de toekomst meer kunnen worden toegepast in de praktijk en dat deze methoden gaandeweg onderdeel zullen worden van de gereedschapskoffer van de ingenieur in de praktijk. ●

LITERATUUR

- 1 Steenberghe, R., Vrouwenvelder, T. en Scholten, N., Veiligheidsfilosofie bestaande bouw. *Cement* 2012/4, p. 8-16.
- 2 Lantsoght, E., et al., Spreiding puntlasten plaatviaducten. *Cement* 2012/4, p. 46-50.
- 3 Belletti, B., et al., Nonlinear finite element analyses of reinforced concrete slabs: comparison of safety formats, in VIII International Conference on Fracture Mechanics of concrete and Concrete Structures, FraMCoS-8, J.G.M. Van Mier, et al., Editors, 2013, p. 12.
- 4 Kashif Ur Rehman, S., et al., Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Construction and Building Materials*, 107, 2016, p. 58-86.
- 5 Alampalli, S., et al., Bridge Load Testing: State-of-the-Practice. *Journal of Bridge Engineering* 26(3), 2021, p. 03120002.
- 6 Fennis, S., Hemert, P. van, Hordijk, D. en Boer, A. de, Proefbelasting viaduct Vlijmen-Oost. *Cement* 2014/5: p. 40-45.
- 7 Zarate, G., Lantsoght, E. & Yang, Y., Monitoring structural responses during load testing of reinforced concrete bridges: a review. *Structure and Infrastructure Engineering* 18(10-11), 2022, p. 1558-1580.
- 8 Alampalli, S., et al., Primer on Bridge Load Testing. Transportation Research Board, Washington DC, 2019, p. 136.
- 9 Zhang, F., Acoustic emission-based indicators of shear failure of reinforced concrete structures without shear reinforcement, PhD. Thesis, Delft University of Technology, 2022.
- 10 Miceli, M., et al., Structural monitoring. Transportation Research Board: Washington DC, 2019.

Voor de volledige literatuurlijst zie www.cementonline.nl.

