

Nr.1 Jaargang 25
maart 2017



Bruggen

Bruggen in de lift

Inhoud



4 **SPOORBRUG MUIDERBERG**



12 **CANON VAN DE NEDERLANDSE BRUG**



16 **VVK KOMT OVER DE BRUG**



24 **3D BETONPRINTEN – DE TECHNIEK**



29 **CALL FOR PAPERS FIETS·VOETBRUGGEN**



30 **INNOVATIEPROGRAMMA STROOMVERSNELLING BRUGGEN**



35 **BRUGGEN IN DE KUNST – DE VLAKEBRUG IN ZUID-BEVELAND**



38 **IN MEMORIAM HENK VAN MAARSCHALKERWAART**

39 **KOUD GEBOGEN BETONBRUGGEN**



42 **BRUG OVER HET IJ IN AMSTERDAM**

COLOFON

De Bruggenstichting is een onafhankelijk kenniscentrum dat zich richt op het vastleggen en uitdragen van kennis over bruggen

Opgericht 10 april 1992

BESTUUR

Jan de Boer, Fred Westenberg (voorzitter), Cees Heiden, Bert Hesselink, Gert-Jan Luijendijk, Dick Schaafsma, Joris Smits en Theo Schillemans.

RAAD VAN ADVIES

Antea Group, Arup Nederland, DIVV Amsterdam, Haasnoot Bruggen, IV-Infra, Janson Bridging, Mammoet, Mobilis TBI Infra, Movares, ProRail, Rijkswaterstaat, Spanbeton, Vereniging SNS Staalbouw, Ingenieursbureau Westenberg.

BRUGGEN

Het tijdschrift BRUGGEN verschijnt vier maal per jaar. Abonnement € 37,50 per jaar. Gratis voor begunstigers van de Nederlandse Bruggenstichting. Losse nummers: € 10,-, te bestellen via NL82 INGB 0000 0589 75

KOPIJ

Ingezonden bijdragen worden alleen in behandeling genomen als zij digitaal worden aangeleverd. Alle bijdragen dienen voorzien te zijn van naam, adres en telefoonnummer van de inzender. Inzendingen kunnen zonder opgave van redenen worden geweigerd.

ADVERTENTIES

Rob Lutke Schipholt (uitgever), renm-schipholt@planet.nl of 06 53 78 80 29

REDACTIE

Jan Arends, Michel Bakker, Elisabeth van Blankenstein, Fred van Geest, Hein Klooster, Frans Remery, Heico de Lange, Wils van Soldt en Pieter Spits.

REDACTIEADRES

Nederlandse Bruggenstichting, Lange Kleiweg 34, 2288 GK, Rijswijk
Tel: 088 7970727
e-mail: redactie@bruggenstichting.nl

HOOFDREDACTEUR

Fred van Geest, Annaplaats 1, 2713 AK Zoetermeer, tel: 079 3160168
e-mail: redactie@bruggenstichting.nl

WEBSITE

<http://www.bruggenstichting.nl>

GRAFISCHE VORMGEVING

Ronald Boiten en Irene Mesu, Amersfoort

OMSLAGFOTO VOORZIJDE

Pijlebrug in Oosterwolde

OMSLAGFOTO ACHTERZIJDE

Stolperophaalbrug bij Schagen

OPLAGE

800
ISSN 1571-4586

VAN DE REDACTIE

Deze eerste uitgave van 2017, het jaar waarin dit tijdschrift 25 jaar bestaat, is voor een belangrijk deel gewijd aan de lezingen die tijdens de Bruggendag 2017 zijn uitgesproken.

Eén uitzondering betreft de lezing over het overlagen van stalen brugdekken. Ir. D. Tuinstra van Arup had in verband met drukke werkzaamheden geen gelegenheid om ruim van

tevooren de tekst van zijn voordracht in te dienen. Zijn lezing wordt geplaatst in BRUGGEN 2 dat in juni zal verschijnen.

In deze uitgave een nieuw artikel van Michel Bakker, ditmaal over de brug over het Kanaal door Zuid-Beveland, aan de hand van twee pentekeningen. Het is de geschiedenis van een brug die in de oorlog is vernield, maar herbouwd.

Op persoonlijk gebied een in memoriam van Henk van Maarschalkerwaard die op 13 december van het vorige jaar is overleden. Verder heeft Rob Lutke Schipholt zijn functie als directeur van de Bruggenstichting neergelegd. Veel van zijn taken zijn overgenomen door Heico de Lange, inmiddels de vertrouwde centrumman van het Bureau in Rijswijk.



Afscheid Directeur Nederlandse Bruggenstichting

Tot 1 januari 2017 is deze functie op parttime basis uitgeoefend door Rob Lutke Schipholt. In deze functie coördineerde hij de activiteiten van de vrijwilligers van de Bruggenstichting en was hij de initiator en aanjager van grote evenementen als de Bruggendag en de uitgave van de 'Canon van de Nederlandse Brug'. Ook bij het verkrijgen van de juiste ANBI-status (Algemeen Nut Beogende Instelling) heeft hij een belangrijke rol gespeeld. Daarnaast was hij de verbindingschakel tussen bureau en bestuur. Na een korte zitting in het bestuur heeft hij de laatste 3,5 jaar de directeursfunctie bekleed. Hij heeft de overgang van de Bruggenstichting van een archiefgerichte organisatie

naar een kenniscentrum voor praktiserende bruggenbouwers op gang gebracht en op de rails gezet. Ook de huidige vorm van het tijdschrift *BRUGGEN* heeft hij geïnitieerd en ondersteund. Het tijdschrift moet verder doorgroeien naar het blad voor de professionele bruggenbouwer.

Een aantal taken is inmiddels overgenomen door Heico de Lange.

We spreken onze dank uit aan Rob voor zijn enthousiaste en gedreven inzet als directeur en we wensen Heico veel succes met de vernieuwde taakinvulling!

Redactie



Allegorische uitbeelding hoe Rob Lutke Schipholt door diep te duiken de fundamenteën van de Bruggenstichting wist te verstevigen

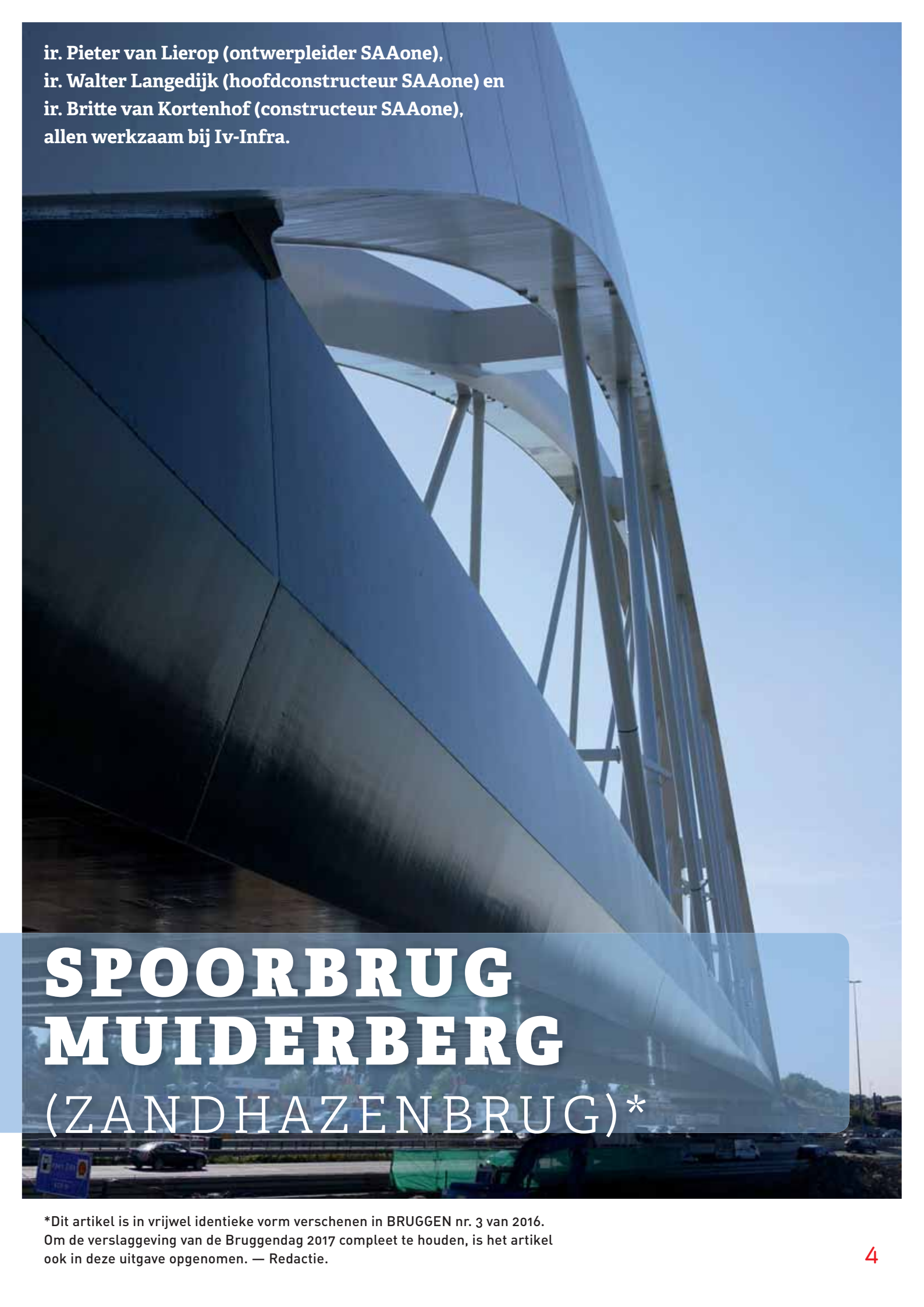
BEGUNSTIGER

Belangstellenden voor het werk van de Bruggenstichting kunnen begunstiger worden, als particulier of als bedrijf/organisatie. U ontvangt dan viermaal per jaar het tijdschrift *BRUGGEN*. Begunstigers en donateurs kunnen advies krijgen van de Bruggenstichting en ontvangen korting op onze activiteiten en boekuitgaven. De Bruggenstichting is door de Belasting-

dienst erkend als culturele ANBI, wat staat voor Algemeen Nut Beogende Instelling. Van de culturele status is in 2016 om belastingtechnische redenen afgezien. Voor 2016 is de minimumbijdrage voor particulieren € 37,50 (incl. btw) en voor bedrijven en instellingen € 130,- per jaar (excl. btw). Studenten betalen € 10,- (maximaal 2 jaar). U kunt zich aanmelden door het overmaken van de bijdrage op

onze rekening NL82 INGB 0000 0589 75 t.n.v. de Nederlandse Bruggenstichting te Rijswijk. Aanmelden is ook mogelijk via de website www.bruggenstichting.nl > begunstiger worden.





ir. Pieter van Lierop (ontwerpleider SAAone),
ir. Walter Langedijk (hoofdconstructeur SAAone) en
ir. Britte van Kortenhof (constructeur SAAone),
allen werkzaam bij Iv-Infra.

SPOORBRUG MUIDERBERG (ZANDHAZENBRUG)*

*Dit artikel is in vrijwel identieke vorm verschenen in BRUGGEN nr. 3 van 2016.
Om de verslaggeving van de Bruggendag 2017 compleet te houden, is het artikel
ook in deze uitgave opgenomen. — Redactie.

De spoorbrug over de snelweg A1, in de buurt van verkeersknooppunt Muiderberg, is een onderdeel in het project SAA, de grootschalige verbreding van de corridor Schiphol - Amsterdam - Almere. De spoorbrug ligt in het gedeelte A1/A6 Diemen - Almere Havendreef. Aangezien de A1 op deze locatie zal worden uitgebreid tot 16 rijstroken, moet het bestaande betonnen spoorwegviaduct, dat de weg onder een hoek van 30 graden kruist, worden vervangen door een nieuwe spoorbrug.



1 Ligging Zandhazenbrug in de corridor Schiphol-Amsterdam-Almere, traject A1/A6

Eén van de belangrijkste eisen voor de Zandhazenbrug was om deze één enkele overspanning te geven, waardoor de loop van de onderliggende rijstroken in de toekomst kan worden aangepast. Daarnaast heeft de spoorbeheerder ProRail gesteld dat het alignment van de spoorlijn niet mag worden gewijzigd en de hinder voor het wegverkeer, alsmede het treinverkeer tijdens de bouwfase minimaal moest zijn. Zo waren er twee korte buitendienststellingen van het spoor toegestaan (van respectievelijk maximaal 52 uur en maximaal 120 uur) en twee keer een afsluiting van de rijweg (tijdens het verrijden van de spoorbrug maximaal 16 uur en voor het slopen van de oude brug en het intrekken van de nieuwe spoorbrug een weekend).

Om aan deze eisen te kunnen voldoen, lag tijdens het ontwerpproces de focus op een slimme assemblage- en montagemethode. Met het vormen van een integraal ontwerp-team vanaf de start van het project, waarin alle benodigde kennis omtrent constructie, spoor, architectuur, fabricage en geluidsemis-sie) was opgenomen, is het gelukt om één van de grootste stalen spoorboogbruggen in Europa te realiseren.

BOUWMETHODE

De aangewezen bouwmethode, bedacht door de opdrachtgever, was een tijdelijke bypass van de spoorlijn parallel aan de bestaande spoorbrug. De bestaande brug kon worden afgebroken en de nieuwe brug direct op de bestaande positie worden gebouwd.



2 Visualisatie van de toekomstige situatie



3 Bouw van één van de tijdelijke landhoofden

Deze methode had het nadeel dat de treinen gedurende de gehele bouwperiode met beperkte snelheid moesten rijden, wat het treinverkeer zou hinderen.

Een variantenstudie leidde tot een alternatieve bouwmethode met minder verkeershinder. Daarbij werd de bestaande brug in bedrijf gehouden, terwijl de nieuwe brug naast de snelweg en evenwijdig aan de spoorlijn werd geassembleerd. De brug (ca. 8.500 ton staal, met inbegrip van de wapening en bekisting van het betonnen dek) werd met behulp van SPMT's (zie foto 13) in zijn geheel over de snelweg getransporteerd naar een tijdelijke positie parallel aan de huidige brug. Om de nieuwe landhoofden te kunnen bouwen onder de bestaande spoorlijn, moesten tijdelijke hulpbruggen worden geplaatst.

Nadat de nieuwe stalen brug boven de snelweg was geplaatst, werd het betonnen dek gestort en werden het ballastbed en alle spoorvoorzieningen aangebracht. In een buitendienststelling van 120 uur werd de oude brug gesloopt en de nieuwe brug (totale massa ca. 15.200 ton) op een schuifbaan naar zijn definitieve positie verschoven.

Door deze bouwmethode moest de brug een overspanningslengte van minimaal 255 m krijgen opdat de landhoofden van de nieuwe brug achter de bestaande landhoofden

konden worden gebouwd. Vanwege de grote bruglengte in combinatie met de vereiste slankheid van de hoofdliggers en bogen, zijn deze vervaardigd uit de staalsoort S460. Zo doende kon het gewicht van de brug beperkt blijven en kon de brug over de snelweg worden getransporteerd.

De stalen brug is in België in delen geprefabriceerd en om verkeershinder zoveel mogelijk te beperken, werd de aanvoer naar de bouwplaats in de nacht uitgevoerd, zonder extra wegafsluitingen. Om dit mogelijk te maken, moest elk brugdeel (hoofdligger- en boogsectie) passen in een 'envelop' van 3 m x 4 m x 20 m en mocht geen kleinere massa hebben dan 80 ton. De booggeboortes waren groter dan de envelop en zijn via het water aangevoerd tot de Hollandse Brug en vandaar met een speciaal transport naar de bouwplaats gereden.

BRUGONTWERP

In de tenderfase van het project zijn verschillende boog- en hangerconfiguraties van de brug onderzocht. Samen met architect



4 Assemblage van de brug (inbrengen middendeel boogsectie met strand-vijzels)

Nadat de nieuwe stalen brug boven de snelweg was geplaatst, werd het betonnen dek gestort en werden het ballastbed en alle spoorvoorzieningen aangebracht.

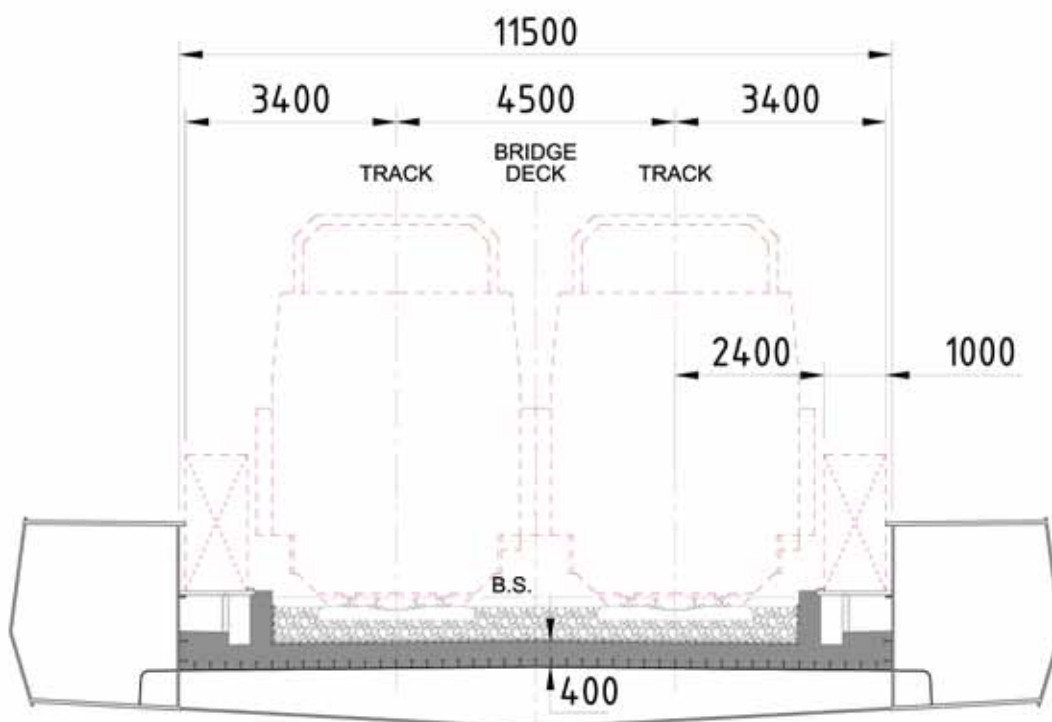


5 Architectonisch ontwerp

Zwarts-Jansma en staalbouwer Victor Buyck is gekozen voor een boogbrug met twee parallelle bogen die onder een hoek tegen elkaar leunen en op vier plaatsen met elkaar zijn verbonden. De bogen bepalen het beeld uit de verte, het dek is ondergeschikt. De bogen steken daarom door langs het dek. Een duidelijk onderscheid tussen de kleur van de bogen en het dek versterkt dit beeld.

Vanwege het feit dat de brug zich direct naast een woongebied bevindt, is ervoor gekozen om een dek met minimale geluidsemissie te maken. Het brugdek bestaat daarom uit stalen dwarsdragers met een betonnen dek, voorzien van een ballastbed.

Omdat de vereiste stijfheid van de brug maatgevend was, leidt een diagonale hangerconfiguratie tot een optimaler ontwerp dan een verticale hangerconfiguratie. Bovendien, het hoge gewicht van het dek zelf reduceert de axiale drukkrachten in de diagonale hangers



6 Dwarsdoorsnede rijdek

als gevolg van een ongunstige positie van de treinen. De diagonalen bestaan uit buisprofielen en zijn zodanig gedimensioneerd dat deze spanningsloos en zonder na te stellen in de constructie konden worden ingebouwd.

STAALSOORT S460

De toepassing van staalsoort S460 voor de hoofdliggers en bogen was noodzakelijk. De keuze voor staalsoort S355 in combinatie met de vereiste slankheid van de brug zou leiden tot ontoelaatbare plaatdiktes en een 30% hoger transportgewicht. Volgens de huidige ontwerprichtlijn van ProRail is het echter niet toegestaan om staalsoorten hoger dan S355 toe te passen. Redenen hiervoor zijn de wens voor het verkrijgen van een robuuster brugontwerp en het beperken van het risico op lasfouten tijdens fabricage- en herstelwerkzaamheden van de brug. Dit laatste heeft geleid tot het gebruik van S355 voor de relatief aanrijdgevoelige dwarsdragers van het dek. In overleg met ProRail is besloten om voor een betere lasbaarheid thermomechanisch gewalst staal S460M/ML toe te passen. Tegelijkertijd werd een aantal strengere eisen gesteld aan de chemische samenstelling en de mechanische eigenschappen van het materiaal. Het resultaat was een voor alle partijen acceptabel ontwerp, zowel in technische als economische zin; de gewichtsbesparing was bijna 30%.

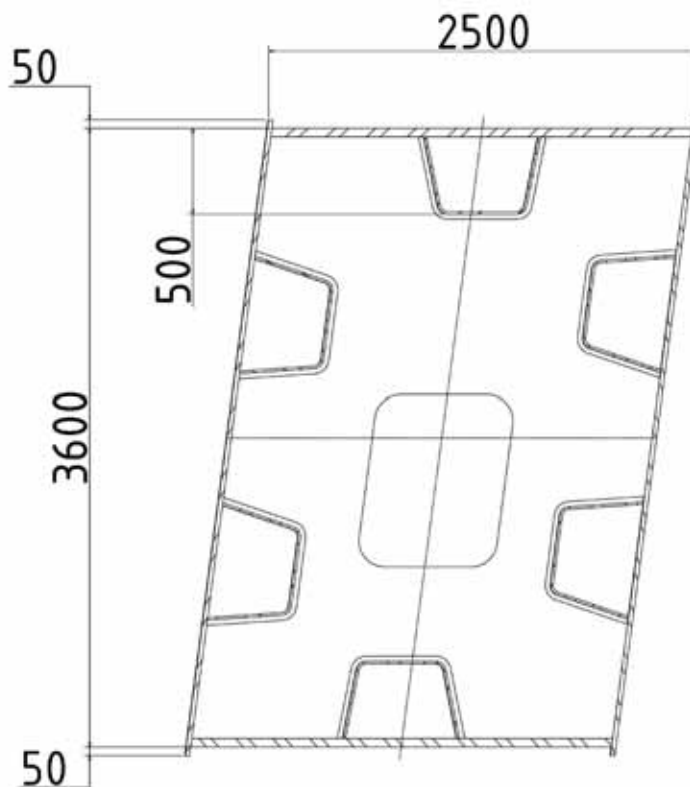
CONSTRUCTIEF ONTWERP

Eén van de meest kritische ontwerpaspecten betrof de lokale en globale stijfheid van de brug, en in het bijzonder de verplaatsingen bij de voegovergangen van de brug. Het dynamische gedrag van de brug tijdens een treinpassage was eveneens kritisch. Omwille van het verhogen van de stijfheid is daarom gekozen voor het toepassen van diagonale hangers in plaats van verticale hangers, zodat de boogbrug zich meer als een vakwerklijger gedraagt.

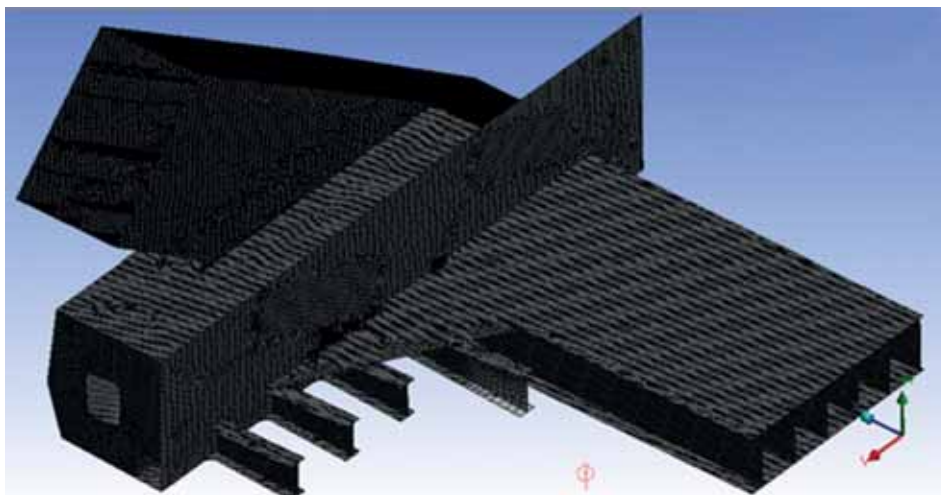
Door het beperkte aantal boogkoppelingen zijn tweede-orde effecten voor de dimensionering van de bogen maatgevend. Bovendien is de lokale stabiliteit van de boogdoorsnedes kritisch mede vanwege de kromming van de flenzen. Een studie leidde tot een optimale doorsnede van de boogsecties met een zestal trogverstijvers.

DWARSDOORSNEDE VAN DE BOOG

De booggeboorte is een complex detail, zowel voor het ontwerp als de fabricage. Het ontwerp ervan is volledig geanalyseerd met

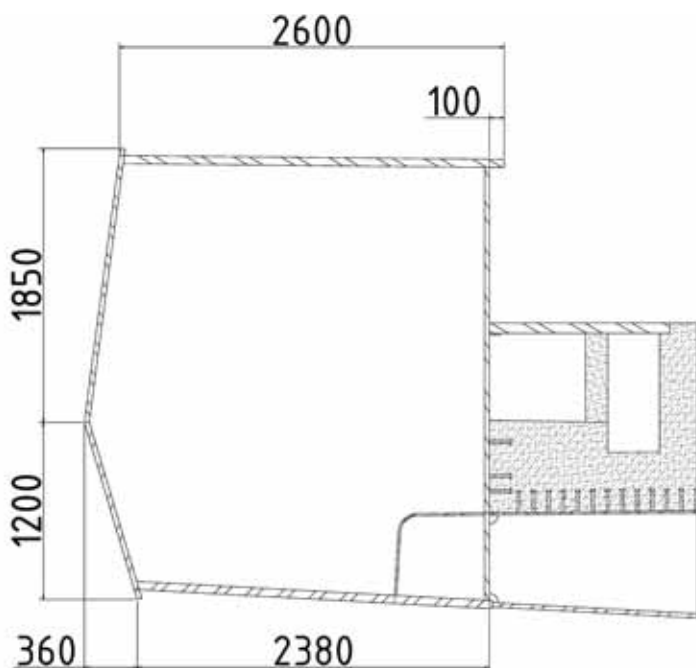


7 Doorsnede boog met trogverstijvers



8 FEM-model van de booggeboorte

Een studie leidde tot een optimale doorsnede van de boogsecties met een zestal trogverstijvers.



9 Dwarsdoorsnede hoofdligger

behulp van een ANSYS FEM-model, waarbij alle plaatdelen en lasverbindingen zijn gecontroleerd op sterkte, stabiliteit en vermoeiing. Tegelijkertijd is de goede bereikbaarheid van alle lasverbindingen onderzocht en zo nodig geoptimaliseerd.

Het profiel van vrije ruimte onder de brug, in combinatie met de eis dat passagiers vanuit de trein over de constructie moesten kunnen kijken, heeft de maximale constructiehoogte van de hoofdliggers bepaald. De knik in de buitenste lijfplaat is gekozen vanwege de reflectie van het licht, waardoor de hoofdlig-



10 Dwarsdragers met stiftdeuvels

ger slanker oogt en bovendien voor het reduceren van de geluidemissie van de treinen zorgt.

De binnenste lijfplaat van de hoofdligger is voorzien van stiftdeuvels om de axiale krachten in de hoofdligger en het betonnen dek te herverdelen. Omdat toepassing van S460 resulteert in een reductie van de trekstijfheid van de hoofdligger, wordt het betonnen dek meer op trek belast. Om te kunnen voldoen aan de toets op scheurwijdte was het noodzakelijk om relatief veel wapening aan te brengen (circa 600 kg/m³). Verder moest een speciaal soort lichtbeton worden toegepast, dat in één keer gestort moest worden.

De dwarsdragers hebben een lengte van 11,5 m en een constructiehoogte die varieert van 650 mm bij aansluiting hoofdligger tot 1000 mm in het midden van de brug. Omdat de totale constructiehoogte van het staalbetonnen brugdek beperkt is door de beschikbare ruimte tussen onderkant spoor en de snelweg, werd een hart-op-hart afstand van 1,6 m gekozen om voldoende vermoeiingssterkte te verkrijgen.

De diagonalen waaraan het brugdek hangt, zijn vervaardigd uit buisprofielen. In tegenstelling tot kabels, hoeven buisprofielen niet vervangbaar te zijn en hoeven de aansluitingen aan de hoofdliggers en bogen niet toegankelijk te zijn. De diameter van de buisprofielen is 610 mm, benodigd vanwege het feit dat de diagonalen ook op druk kunnen worden belast bij een treinpassage. De diagonalen zijn niet momentvast verbonden aan de bogen en hoofdliggers. Via een schetsplaat, die door openingen in de flenzen van de hoofdliggers en boogsecties zijn gestoken, heeft de diagonaalaansluiting enige rotatievrijheid en is daardoor minder gevoelig voor vermoeiingsspanningen bij treinpassages en windtrillingen.

Om de naleving van de luchtdichtheid van de kokers te handhaven, is een relatief dunne flexibele afsluitplaat aangebracht.

WINDDYNAMICA

Bij het ontwerp van de spoorbrug is veel aandacht besteed aan wind- en verkeersdynamica. Voornamelijk vortex-excitatie van de slanke diagonalen werd als één van de grootste (dynamische) risico's geïdentificeerd. Volgens de vortex-theorie kan, wanneer de loslaatfrequentie van de Von Karmanwervels gelijk valt met eigenfrequentie van de diagonaal, deze in trilling komen loodrecht op de windrichting wat op den duur leidt tot vermoeiingsschade.



11 Aansluiting van de diagonalen

De kans op trillingen van de diagonalen is sterk afhankelijk van de demping. De opdrachtgever had een demping voor de diagonalen van $\delta_s = 0,001$ voorgeschreven. Om de kans op trillingen te verkleinen is daarbij gekozen voor een Scrutongetal (S_c) van de diagonalen groter dan 20. Dit leidde tot een diameter van 610 mm en een wanddikte van 55 mm. Aan de hand van de Eurocode NEN-EN 1991-1-4 is de vortexbelasting berekend en aangebracht op de diagonalen van het ANSYS-plaatmodel, zodat direct de juiste inklemmingsstijfheid, systeemplengte en spanningsverdeling in rekening werd gebracht. De diagonaalansluitingen zijn daarbij zo ontworpen dat de vermoeiingsspanningen onder de cut-off limit blijven.

Aangezien de dempingmaat van de diagonalen onzeker is en er twijfels bestaan over de vortexberekening volgens de Eurocode, zijn extra beheersmaatregelen genomen gedurende het gehele proces, te beginnen in de ontwerpfase. In overleg met ProRail en de architect is besloten om voorzieningen in het ontwerp mee te nemen waaraan, na realisatie van de brug, eventuele externe trillingsdempers kunnen worden aangebracht. Door een soort van stalen kapstokken aan te brengen boven op de speciaal ontworpen bovenleidingsportalen, kunnen de viskeuze dempers de diagonalen in alle benodigde richtingen dempen.

Om te bepalen of externe dempingsmaatregelen nodig zijn, zijn na de assemblage van de staalconstructie metingen verricht om de werkelijke demping van de brug vast te stellen. Na de eerste metingen in december 2015 bleek de demping 15% lager te zijn dan aangenomen ($\delta_s = 0,00085$), met een poten-

tieel risico op trillingen als gevolg. Dit risico werd een paar weken later bevestigd toen twee diagonalen bij een bepaalde windkracht en windrichting hevig begonnen te trillen. Om vermoeiingsschade te voorkomen zijn de diagonalen toen direct met tijdelijke banden afgespannen. Daarna zijn de dempers aangebracht.

TRANSPORT, AFBOUW EN INSCHUIVEN

In de avond van 6 mei 2016 werd de stalen brug door SPMT's met in totaal 976 wielen in beweging gebracht. De rit van ongeveer 400 m ging van de bouwplaats schuin over de A1.

Het verplaatsen duurde in totaal circa 6,5 uur, dat was sneller dan aanvankelijk werd gedacht. Voor het verplaatsen was een speciale rijbaan aangelegd om te voorkomen dat de brug tijdens het verrijden zou verzakken of uit balans zou raken.

Terwijl het verkeer onder de brug door reed, is het betonnen dek gestort en zijn het ballastbed, het spoor en de bovenleiding aangebracht. Eind augustus 2016 is de oude spoorbrug gesloopt en de nieuwe spoorbrug op zijn definitieve plek geschoven. Hierna werd de wegverbreding richting knooppunt Muiderberg verder afgebouwd. ■



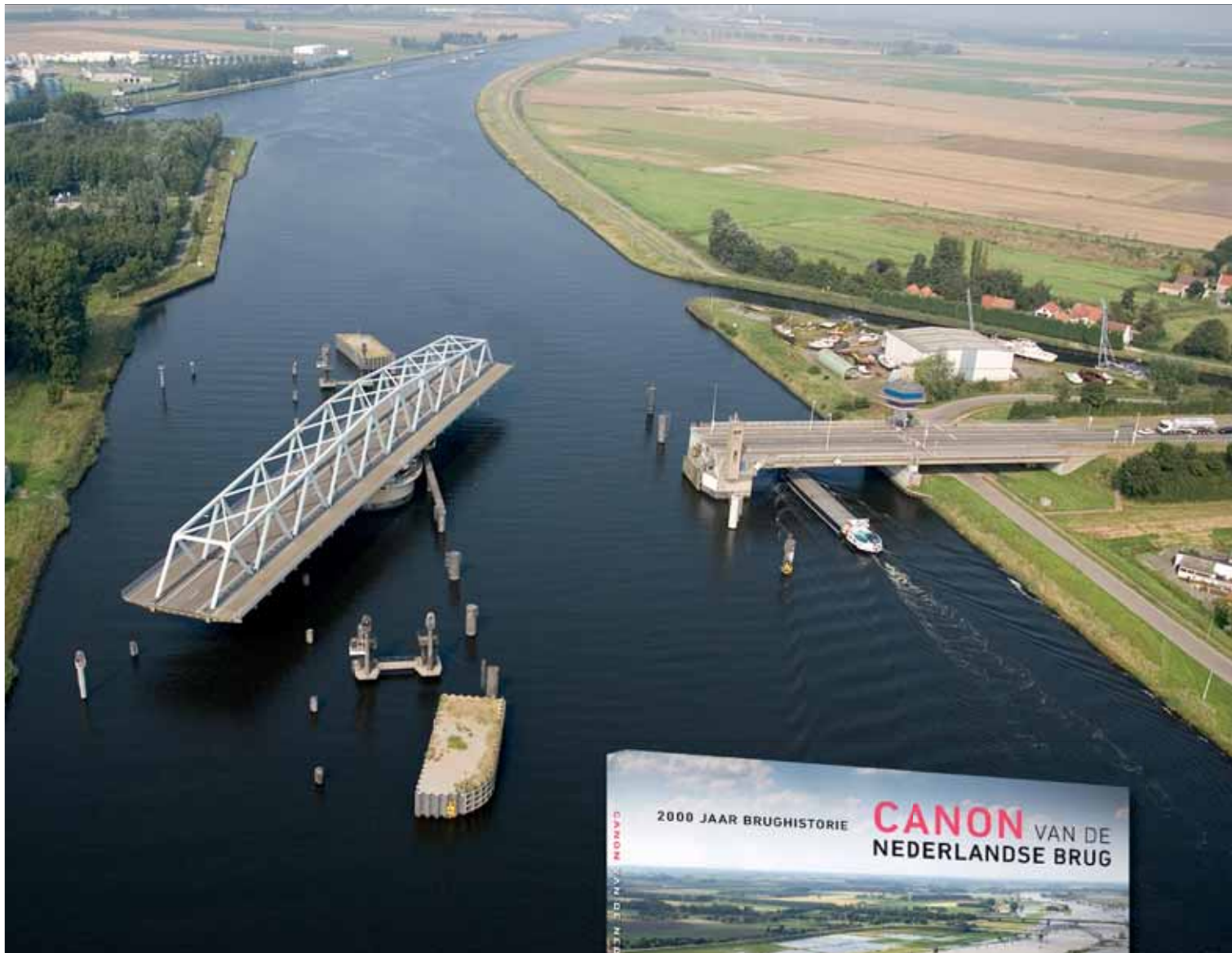
12 Ophangconstructie dempers geïntegreerd met bovenleidingsportalen



13 Transport over de A1 met behulp van een SPMT (mei 2016)



14 Afwerken brug boven de A1 (juni 2016)



ir. Frans Remery

2000 JAAR ONTWIKKELING IN DE BRUGGENBOUW IN NEDERLAND

Op 12 november 2016 vond de presentatie van het nieuwste boek van de Nederlandse Bruggenstichting plaats. Onder de titel 'Canon van de Nederlandse Brug, 2000 jaar brughistorie' geeft het boek een overzicht van belangrijke ontwikkelingen in de Nederlandse bruggenbouw. De opkomst van vervoermiddelen als treinen en auto's, het gebruik van bouwmaterialen als staal, beton en kunststof en de toepassing van elektriciteit speelde daarin een belangrijke rol.



2 Schipbrug over de IJssel bij Zutphen, na 1600.

Na eerdere boeken over bruggen in Nederland stelde de Nederlandse Bruggenstichting een boek samen dat in grote stappen de geschiedenis van de bruggenbouw in Nederland belicht. Die geschiedenis omvat een periode van 2000 jaar, waarvan vooral de laatste 200 jaar goed gedocumenteerd zijn, terwijl wij de geschiedenis van oudere bruggen veelal moeten aflezen van historische beschrijvingen, prenten of sporen in de bodem.

Het boek is geschreven in de vorm van een Canon zoals er de laatste jaren vele zijn verschenen. De Bruggencanon omvat 43 vensters die vanuit verschillend gezichtspunt een beeld van de bruggenontwikkeling in Nederland bieden. Als natie bestaat Nederland pas 200 jaar. Met Nederland wordt dan ook het grondgebied van het huidige Nederland bedoeld.

2000 JAAR BRUGHISTORIE

Bruggen bouwen is mensenwerk. Sprekend over brughistorie komen we dan ook vanzelfsprekend mensengeschiedenis tegen. De perioden zijn herkenbaar, de gebeurtenissen niet, want die worden in de gewone geschiedenisboeken niet vermeld. Dat is het leuke van het uitzoeken van bruggenhistorie. En er zijn wat bruggen gebouwd!

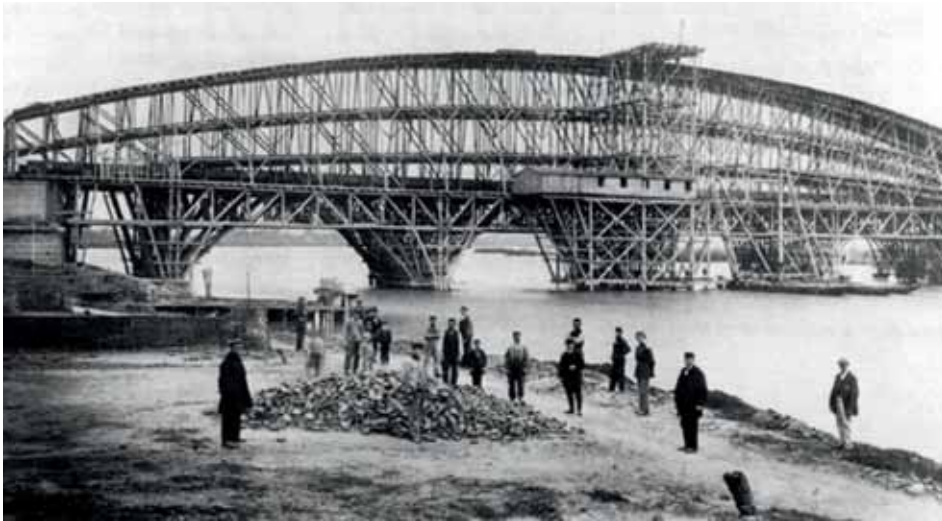
Zelfs uit de prehistorische tijd zijn sporen van brugachtige constructies in de bodem overgebleven. Het waren half drijvende houten

voetpaden of bruggen die dienden om veilig levensgevaarlijke moerassen te kunnen passeren. Uit de Romeinse tijd vinden we in de bodem sporen van houten bruggen en in de Maas zijn zelfs resten van stenen brugpijlers uit die tijd gevonden.

In de Middeleeuwen werden bruggen op particulier initiatief gebouwd als toegang en beveiliging bij versterkte woonplaatsen, kastelen en steden. De kanunniken van het kapittel van Sint Servaes bouwden aan het eind van de dertiende eeuw een grote stenen brug over de Maas bij Maastricht ter vervanging van een oudere brug die kort tevoren was ingestort. Die nieuwe brug bestaat nog steeds en geldt als de oudste brug van Nederland.

Toen de rijkdom en organisatiegraad van de steden toenamen, kwamen er grotere bruggen, ook over de rivieren. Hanzesteden als Kampen, Deventer en Zutphen bouwden in de vijftiende eeuw alle een vaste houten brug over de IJssel. Deventer en Zutphen vervingen hun vaste brug al spoedig door een schipbrug. Ook op andere plaatsen werden schipbruggen aangelegd. Dat was op zich al een verbetering ten opzichte van de gebruikelijke veerbootjes.

In de steden werden veel bruggen over de grachten gebouwd. Hout en (bak)steen bleven daarvoor de geëigende bouwmaterialen, totdat op grote schaal ijzer beschikbaar kwam voor de bouw van bruggen. De ontwikkeling



3 Spoorbrug over de Lek bij Culemborg in aanbouw (1868).

daarvan begon tegen het eind van de 18^e eeuw in Engeland met de Iron Bridge, ruim 40 jaar later (!) in Nederland gevolgd door de Stokkenbrug in Rotterdam, maar dat was dan ook meteen een dubbele basculebrug.

Die eerste ijzeren bruggen waren van gietijzer, een materiaal dat geschikt is voor het opnemen van drukkrachten, maar niet voor trekkrachten. Door verbeterd inzicht in de metallurgie van ijzerverbindingen en verdere bewerking van het gietijzer kwam smeedijzer beschikbaar, dat al spoedig op ruime schaal werd toegepast toen de eerste bruggen werden gebouwd voor een nieuw vervoermiddel: de (stoom)trein.

Door het hele land werden spoorlijnen aangelegd en rond het midden van de 19^e eeuw begon de bouw van smeedijzeren spoorbruggen over de grote rivieren. Ze werden gebouwd door gewalste platen en hoekprofielen en later ook I-profielen van dit materiaal aan elkaar te klinken. In de periode tussen 1853 en 1888 kwamen 21 spoorbruggen over de grote rivieren tot stand, de meeste ontworpen en gebouwd door buitenlandse bedrijven. In de decennia die volgden, werden daarnaast veel interlokale tramwegen aangelegd voor het vervoer van personen en goederen.

70 jaar na de trein verschenen gemotoriseerde wegvoertuigen die eisen stelden aan de kwaliteit van de weg. Aanvankelijk konden zij voor het passeren van waterlopen nog gebruik maken van reeds bestaande veerverbindingen, schipbruggen of spoorbruggen. Spoedig werd echter duidelijk dat de auto een serieus vervoermiddel zou worden. Er kwam

dan ook een Rijkswegenplan waarin de landverbindingen voor het wegverkeer werden vastgelegd. Bij de realisatie daarvan waren, behalve bestrate wegen, ook weer veel bruggen nodig. Binnen Rijkswaterstaat werd daarvoor een apart bruggenbureau opgericht. In het decennium voorafgaande aan de Tweede Wereldoorlog werden talloze verkeersbruggen, waaronder 12 grote stalen rivierbruggen gerealiseerd, de meeste gebouwd door Nederlandse bedrijven. Nederland was

een bruggenbouwland geworden. Bij het uitbreken en aan het eind van de oorlog werden veel rivierbruggen vernield. Na de oorlog zijn ze, eerst met kunst- en vliegwerk, en later definitief hersteld.

Voor de bruggenbouw in de twintigste eeuw was de ontwikkeling van gewapend beton en van voorgespannen beton uiterst belangrijk. Het leidde zelfs tot een dominantie van beton over staal voor de bouw van verkeersbruggen, ook voor die met grote overspanningen. Alleen voor grote spoorbruggen werd en wordt nog steeds gebruik gemaakt van staal.

Het ontwerp van de uitdagende nieuwe bruggen zou niet mogelijk zijn geweest zonder steeds verbeterd inzicht in de mechanica van constructies, de verbetering van materiaaleigenschappen en de ontwikkeling van (ict-)hulpmiddelen om de steeds complexere constructies te berekenen.

Beweegbare bruggen konden pas gaan groeien toen rond het begin van de twintigste eeuw elektromotoren beschikbaar kwamen voor de aandrijving. Tegen het eind van de twintigste eeuw bleek de elektronica mogelijkheden te bieden voor de regeling, bewaking en besturing van de elektrische brugaandrijvingen en voor de bediening, ter plaatse van de brug of op afstand vanuit een bedieningscentrale.



4 Aanvankelijk werd de ruimte op de spoorbruggen nog gedeeld met auto's, fietsers en voetgangers; hier de spoorbrug over de IJssel bij Deventer.

Met het toenemen van de welvaart en van de bevolkingsdichtheid ontstond meer aandacht voor de kwaliteit van de gebouwde omgeving. Dat uitte zich niet alleen in spectaculaire stadsuitbreidingen en gebouwen, maar ook

in uitdagende bruggen, in staal, beton of kunststof, die door hun vormgeving de openbare ruimte niet alleen op een praktische, maar evenzeer op een esthetische manier vullen. ■



5 Lekbrug Vianen - op de achtergrond de boogbrug uit 1936 en rechts de nieuwe betonnen brug in bedrijf; op de voorgrond is de tweede, identieke brug in aanbouw.



6 Ibisbrug in Rotterdam, een ophaalbrug met een verrassende vormgeving (2013).



7 Spoorbrug in de Hanzelijn over de IJssel bij Zwolle (2012).

De tijd dat met VVK alleen maar parkbrugges werden gebouwd, ligt achter ons. We zijn er inmiddels van overtuigd dat VVK vele (duurzaamheids)voordelen te bieden heeft. Het materiaal ziet er strak uit en is licht, onderhoudsvriendelijk, bestand tegen vermoeiing en oersterk. Steeds

verdergaand zetten we VVK in, in toepassingen waarin het materiaal daadwerkelijk moet 'presteren' en verschil kan maken. Denk aan verkeersbruggen, zoals de Nelson Mandelabrug met een overspanning van 22,5 meter, waarvoor de vermoeiingslevensduur aangetoond



ir. Liesbeth Tromp, Royal Haskoning DHV

VEZELVERSTERKT KUNSTSTOF KOMT OVER DE BRUG

moet worden. Maar hoe komen we aan ontwerpgegevens en hoe regelen we de kwaliteitsborging? Dit artikel gaat in op de uitdagingen in het ontwerp en de trends in Nederland en Europa. Want een nieuwe generatie bruggen komt eraan en de ontwikkelingen gaan wellicht sneller dan men nu verwacht!



1 'Smart' bridges: communicerende, zich zelf monitorende bruggen (producent MOCS)

STATE OF THE ART VVK-VOETGANGERSBRUGGEN

In de afgelopen jaren heeft de toepassing van vezelversterkte kunststoffen (VVK) een grote vlucht genomen. In 2010 werd VVK nog als 'nieuw' materiaal bestempeld en werd een eenvoudige VVK-voetgangersbrug als een onderzoeksproject in de markt gezet en met de grootste zorg omringd. Terecht, opdrachtgevers willen immers eerst ervaren wat ze krijgen.

Deze aanpak zorgde er tevens voor dat het nodige inzicht werd verkregen in de toepassing van VVK in (voetgangers)bruggen en dat de markt zich ontwikkelde op zowel productniveau als op procesniveau: ontwerpeisen, contractdocumenten, afnameprocedures. Dit zijn belangrijke voorwaarden om VVK in steeds meer, grotere en complexere constructies toe te passen.

Het is positief dat bij veel gemeentes de afdeling Beheer een steeds prominenter rol inneemt bij de inkoop van nieuwe kunstwerken. Dat betekent een beleid gericht op onderhoudsarme constructies en dus wordt de meerwaarde van VVK steeds meer onderkend.

Het afgelopen jaar is een goede basis gelegd voor kennis en vertrouwen in VVK als constructiemateriaal bij partijen in de hele keten. Opdrachtgevers, inkopers, beheerders, vergunningverleners en aannemers hebben zich met VVK bekend gemaakt en het materiaal heeft zich inmiddels bewezen als een mooi, aanvullend bouw materiaal naast staal en beton. Er zijn diverse toeleveranciers van 'standaard' voetgangersbruggen, met kenmerkende overspanningen van 10 – 15 meter en veel gemeentes hebben al meerdere VVK-bruggen in bezit.

Overigens worden in de praktijk materialen vaak gecombineerd. Bij grote overspanningen en zwaarbelaste verkeersbruggen kunnen staal en VVK prima samenwerken en zijn hybride constructies soms dé oplossing.

TRENDS IN VOETGANGERS- BRUGGEN: SNELLER, SLIMMER, SLANKER...

VVK-bruggen worden door de grootschaligere productie en meerdere marktpartijen niet alleen voordeliger of mooier, er zijn meer positieve trends te signaleren.

Sneller? Jazeker, een belangrijk voordeel samenhangend met een VVK-brug, is de korte bouwtijd. Vanwege het lage gewicht plaatst Rotterdam de bruggen zonder paalfundering en de bruggen komen gereed en afgemonteerd van de fabriek. Hiermee wordt de omgevingshinder tot een minimum beperkt. Er zijn voorbeelden bekend waarbij de stremmingen minder dan een werkdag zijn geweest.

SMART BRIDGES

Een andere ontwikkeling in de markt is de integratie van optische glasvezels in de constructie, de 'smart' bridges. Hiermee kan de brug continu gemonitord worden op eigenschappen als temperatuur, vervorming, of eigenfrequentie. De beheerafdeling krijgt bijvoorbeeld een seintje als er gestrooid moet worden en kan op afstand zien hoe de brug presteert nu, en over 50 jaar. Een aantal van deze bruggen is te vinden in de TU-wijk in Delft (foto 1).

De kennis die hiermee opgebouwd wordt, kan vervolgens worden toegepast om de ontwerpfactoren in de normen te kalibreren, waardoor steeds preciezer en efficiënter geconstrueerd kan worden. En als we weten wat een brug aan belastingen heeft meegemaakt, dan kunnen we de brug verantwoord een tweede leven geven op een andere locatie,

wat de gemeenschap veel afval bespaart. Een duurzaam ontwerp houdt meer in dan alleen goed materiaalgebruik: de maatschappij verandert en een flexibele infrastructuur beweegt mee!

Architecten houden van slank en VVK kan dit bieden. Het heeft de stijfheid van beton, terwijl de sterkte zich beter laat vergelijken met staal. Omdat VVK een relatief sterk materiaal is, is het mogelijk om bijzondere funderingsprincipes te realiseren waarbij de brug bijvoorbeeld wordt ingeklemd. Een voorbeeld is de Exercitiebrug in Rotterdam (foto 2). Met een overspanning van 20 meter en een dikte van slechts 250 mm is dit misschien wel de slankste VVK-brug van Nederland, vooral omdat deze brug met glasvezel geproduceerd is.



2 Exercitiebrug, Crooswijk, Rotterdam
producent FiberCore Europe



4 Brug Paradis, Bergen, Noorwegen

architectuur Joris Smits

VOETGANGERSBRUGGEN MET GROTE OVERSPANNINGEN

Een ander brugtype waar een laag gewicht en besparing op onderhoudskosten een belangrijke rol spelen, zijn passages over drukke (vaar)wegen of over het spoor. Afsluitingen zijn namelijk ongewenst en kostbaar.

Network Rail in Engeland heeft al diverse voetgangersbruggen over het spoor geplaatst. Ook de Noorse overheid is om: voor veel locaties waar een besparing op onderhoud grote voordelen biedt, kijkt zij serieus naar VVK.

Bij grote overspanningen van deze bruggen is de gewichtsbesparing nog interessanter. Dit kunnen overigens zowel hybride constructies zijn, denk aan de 140 m lange brug over de A27, een brug waar overigens ook auto's overheen kunnen (foto 3). De combinatie stalen bovenbouw met VVK-dek zorgde voor voldoende gewichtsbesparing om de brug op de vereiste lichte fundering te kunnen bouwen. Een recent voorbeeld is de brug Paradis, voor Bergen in Noorwegen. Een 42 meter lange voetgangersbrug volledig uit VVK (foto 4). Het 'vakwerk' is hierbij opgebouwd uit een gering aantal elementen om het aantal verbindingen te beperken. Vormgeving en engineering van het ontwerp zijn door ons bureau verzorgd. De Noorse overheid zoekt hierbij specifiek ondersteuning uit Nederland, een bevestiging dat we voorop lopen in Europa.

Een kleine massa in combinatie met een lage stijfheid betekent bij grote overspanningen dat er een gedetailleerde analyse uitgevoerd moet worden. Niet de sterkte bepaalt het ontwerp, maar het comfort, zo ook in deze brug. Gelukkig heeft VVK een hoge mate van damping. De Eurocode geeft instructies voor ontwerp op comfort en verwijst naar de richtlijn 'Human induced vibrations of Lightweight footbridges'. Hierin is gedetailleerd beschreven hoe men het ontwerpen op comfort aanpakt.

De vormvrijheid van VVK, samenhangend met de maltechnieken zoals die in Nederland veel gebruikt worden, zorgen voor een grote variatie aan mogelijke verschijningsvormen. En omdat comfort een belangrijke ontwerp-bepalende eigenschap is, zal dit voor VVK bruggen een interessant ontwikkelingsgebied zijn, waarbij architecten, constructeurs en producenten samen zullen werken aan een nieuwe generatie oplossingen.

VERKEERSBRUGGEN EEN BRUG TE VER?

Je hoeft maar naar de draaiende bladen van een windturbine te kijken om te zien dat VVK goed tegen vermoeiing kan. Beter dan staal. Net als bij staal zijn de details bepalend en vereisen grote aandacht in de uitvoering. Diverse testen in projecten, zoals het ASSET-project met de dekprofielen van producent Fiberline (onder andere de brug over de M6 in Lancashire, Engeland en de brug Friedberg, Duitsland), maar ook de Pijlebrug en de Nelson Mandelabrug laten zien dat een VVK verkeersdek de miljoenen belastingwisselingen van vrachtwagenwielen kan weerstaan, zelfs nadat een zware last op het dek gevallen is.



3 Hybride brug Lunetten voor voetgangers en autoverkeer 140 m lang en 6,2 m breed

producent FiberCore Europe



5 Hefbrug Oosterwolde – het contragewicht zit in de korte zijde van het dek
producent VVK: FiberCore Europe



6 Pijlebrug, Meppel

Kunnen we VVK verkeersdekken maken? Jawel! Maar dat betekent wel dat de ontwerp-kennis en kwaliteitsborging mee moet groeien met de hoge eisen die aan een verkeersdek gesteld worden. Producenten zullen deze kwaliteit ook aan moeten tonen en wellicht moet er bijvoorbeeld een apart certificaat komen voor elk type VVK-verkeersdek. De afgelopen jaren zijn in Nederland diverse verkeersbruggen en verkeersdekken geplaatst waarmee de nodige ervaringen in verschillende praktijkomstandigheden opgedaan kunnen worden.

OOSTERWOLDE

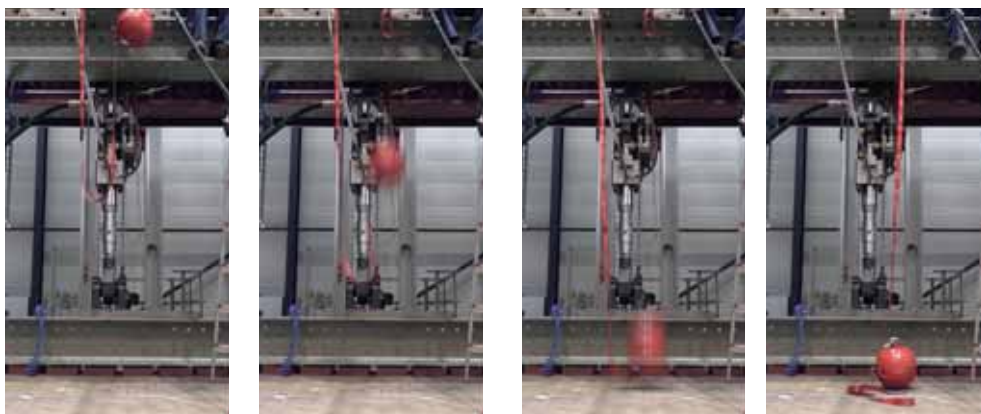
De eerste VVK beweegbare verkeersbrug in Nederland is in 2010 gebouwd in Oosterwolde (foto 5). Daarmee is aangetoond dat ook een dek voor het zwaarste verkeer mogelijk is.

PIJLEBRUG

De Pijlebrug in Meppel, gebouwd in 2015 (foto 6) is een ander belangrijk project. Opdrachtgever Willem Paas van de provincie Drenthe heeft in zijn provincie gekozen voor innovatie, maar zorgt hierbij dat er voldoende aandacht is voor kennisopbouw, marktverbreding en kwaliteitsborging. Remco Renting, ontwerpleider van de provincie Groningen, is betrokken bij de voorbereiding en uitvoering van deze projecten. De ervaringen uit het eerste grote VVK-project voor de provincie, de VVK-deuren voor de Spaarsluis in Emmen, zijn gebruikt om het ontwerpproces en de ontwerpbewijsvoering in goede banen te leiden. Specifiek voor VVK heeft Royal HaskoningDHV de provincie geadviseerd en de ontwerp-toets en kwaliteitstoetsen uitgevoerd. Omdat er in de op dat moment aanwezige VVK-richtlijnen nog geen uitvoeringseisen zijn vastgelegd, worden deze in de contracten per project specifiek vastgesteld.

In dit project is in aanvulling op wat standaard materiaalproeven ook een vermoeiingsproef uitgevoerd op een proefstuk van 3 x 8,2 m². De testen zijn uitgevoerd door WMC, een testcentrum gespecialiseerd in VVK-materiaal en -constructies, waar ook veel windturbinebladen gecertificeerd worden.

Voorafgaand aan de vermoeiingsproef is een valproef uitgevoerd met een 50 kg zware kogel (figuur 7). In de navolgende vermoeiingsproef (figuur 8) is slechts een klein zettingsscheurtje geconstateerd, waarna het brugdek de volledige vermoeiingscyclus volgens de Eurocode heeft doorstaan zonder verdere scheurgroei.



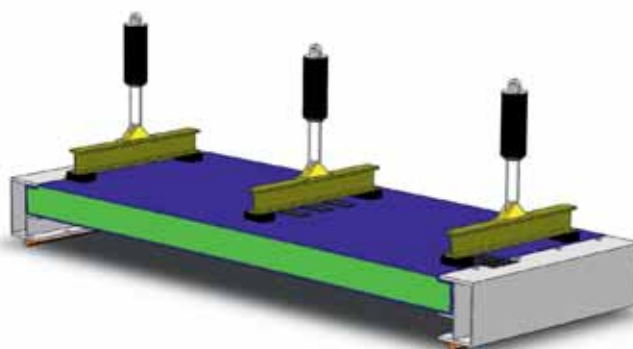
7 Impactbelasting, voorafgaand aan de vermoeiingsproef Pijlebrug foto Eric Stammes WMC

Zijn deze testen in deze vorm ook in de toekomst nodig? Nee, de verwachting is dat dit zeker niet voor elk project nodig is. Wel is een dergelijke bewijsvoering dé manier om voor een brugdektype aan te tonen dat het principe voldoet. Met een dergelijk testcertificaat kan een leverancier de kwaliteit aantonen. Deze test is mede een belangrijke stap in de kennisopbouw die nodig is om in de toekomst op basis van materiaalproeven en gevalideerde ontwerp-oplossingen in VVK te kunnen ontwerpen.

NELSON MANDELABRUG

In 2016 is de Nelson Mandelabrug in Alkmaar geopend (foto 9). Deze hefbrug zorgt voor een betere doorstroming van het verkeer en biedt belangrijke voordelen vanuit economisch perspectief. “Voor het college is het van belang om het bedrijventerrein zo aantrekkelijk te houden voor bestaande en nieuwe bedrijven”, aldus Piet Bruinooge, burgemeester van Alkmaar.

De aanbruggen zijn van beton, maar het 22,5 m lange beweegbare deel is van VVK. Daarmee is dit de grootste beweegbare verkeersbrug in VVK ter wereld.



8 Proefstuk en opstelling vermoeiingsproef beelden: WMC/FiberCore Europe





9 Nelson Mandelabrug, Alkmaar; tafelbrug (hefbrug met geringe hefhoogte – hier ongeveer 1,5 m)
producent VVK: Delft Infra Composites

DUURZAME BRUG

Door de toepassing van VVK is het beweegbare deel van de brug met een massa van 90 ton maar liefst de helft lichter dan een stalen uitvoering. Met VVK kan niet alleen het beweegbare deel, maar ook het bewegingsmechanisme lichter worden uitgevoerd, is een lichtere fundering nodig en zijn de contragewichten kleiner. Bovendien is een on-

dergrondse draaikelder niet langer nodig en is veel minder energie nodig om de brug te openen. En VVK is nagenoeg onderhoudsvrij.

De brug werd in opdracht van de gemeente Alkmaar en provincie Noord-Holland gebouwd door de combinatie CFE-Demako, naar ontwerp van Joris Smits. Hij zorgde tevens voor de benodigde kennis van VVK in

verkeersbruggen met de ondersteuning in de ontwerpstoets en de systeemgerichte contractbeheersing (SCB). Volgens Joris Smits is de Nelson Mandelabrug “een brug die in ontwerp en materiaalgebruik volledig aan de eisen en wensen voor de brug van de toekomst voldoet”.



HYBRIDE BRUGGEN

Zoals aangetoond in de hier beschreven bruggen, worden materialen gericht ingezet. Daar waar staal of beton voordelen bieden boven VVK, worden deze materialen toegepast. Hybride bruggen van VVK en staal vormen een interessant toepassingsgebied voor nieuwbouw, denk aan de Spieringbrug

bij Muiden en de eerder genoemde brug bij Lunetten. Maar ook als onderdeel van renovatie en levensduurverlenging, zoals een VVK-dek op de Elburgerbrug, de brug in Doesburg en bruggen in Weert. Bij de beweegbare Pijlebrug en Nelson Mandelabrug is de overspanning zelfdragend en volledig in VVK, maar de voor- en achterhar zijn in staal uitgevoerd, vanwege de strenge vervormingslimieten die gelden bij voegovergangen en de beperkte beschikbare constructiehoogte.

Ook de staalbranche signaleert deze kansen en wil hieraan mee investeren waartoe de Vereniging 'Bouwen met Staal' een technische commissie is opgestart. Kees van IJsselmuiden van ons bureau is lid van deze commissie: "De TC Hybride zal zich richten op het raakvlak tussen staal en VVK. Verschillende staalbouwers en VVK-toeleveranciers werken hierin samen op onderwerpen zoals de verbindingen tussen VVK en staal, om hierin de vereiste kennis te verdiepen en oplossingen te ontwikkelen voor de toekomst".

REGELGEVING

De ontwikkelingen gaan verder en de toepassingen worden groter en complexer. De regelgeving blijft niet achter: dit jaar wordt de herziene richtlijn voor VVK CUR96 gepubliceerd die de vereiste materiaal-, ontwerp- en kwaliteitsrichtlijnen geeft voor de volgende generatie VVK-bruggen. Deze herziening is medegefinancierd door Rijkswaterstaat (initiatiefnemer Ane de Boer, RWS GPO). De VVK-branche en diverse leidende VVK-leveranciers, ingenieurbureaus en kennisinstellingen hebben met hun kennis en ervaring een bijdrage geleverd aan de hoofdstukken.

Op Europees niveau wordt eveneens gewerkt aan ontwerprichtlijnen. Nederland heeft hier vanuit CUR96 een belangrijk aandeel in geleverd, zodat de toekomstige werkwijze zo goed mogelijk aansluit op de huidige praktijk in Nederland.

BOUWEN AAN DE TOEKOMST...

Het is belangrijk dat opdrachtgevers in VVK blijven investeren zodat we kunnen leren van deze projecten en deze kennis kunnen uitdragen in publicaties, onderwijs en ontwerpnormen.

Dat is nodig omdat op dit moment de ontwerpspanning nog groot is, en er nog testen nodig zijn voor de ontwerponderbouwing. De testmethoden om de prestaties van VVK efficiënt en doeltreffend aan te tonen, zijn nog in ontwikkeling. Bepaalde testen zullen nodig blijven, net als de drukproeven

voor betonkubussen. Maar hoe beter de theoretische modellen zijn die we in het ontwerp kunnen gebruiken, des te voordeliger is het ontwerpproces.

Het is niet alleen belangrijk om goedkopere verkeersbruggen te kunnen leveren. Lichtgewicht verkeersdekken kunnen een aanzienlijk verschil maken in de levensduurverlenging van bestaande kunstwerken. Op een aantal cruciale verkeerspunten heeft de infrastructuur te kampen met grote problemen door een toegenomen verkeersdruk. Een nieuwe brug bouwen brengt veel problemen met zich mee. Nog los van de directe kosten, samenhangend met de vervanging, is met name de bijkomende schade voor de maatschappij groot. De recente problemen met de Merwedeburg hebben dit pijnlijk zichtbaar gemaakt. Het is niet ondenkbaar dat VVK oplossingen zal bieden die met staal en beton minder voor de hand liggen: renovatie in plaats van nieuwbouw. De kennisopbouw kunnen we niet alleen in een laboratorium doen. Dat moet buiten in de praktijk. ■

DE AUTEUR

Liesbeth Tromp heeft 20 jaar ervaring met vezelversterkte kunststoffen in allerlei toepassingen waaronder de infrastructuur. Zij is als ontwerper, toetsers en adviseur bij Royal HaskoningDHV nauw betrokken bij de realisatie van verschillende in dit artikel genoemde projecten zoals brug Paradis, de Pijlebrug en de Nelson Mandelabrug. Verder is zij technisch coördinator van de Nederlandse richtlijn voor VVK (CUR96) en de vertegenwoordiger van Nederland in de Europese werkgroep voor de ontwikkeling van de Eurocode voor VVK.



3D-PRINTEN VAN BETONCONSTRUCTIES

In dit artikel worden achtergronden gegeven van de 3D printtechniek en enkele toelichtingen op het huidige onderzoek bij de TU Eindhoven. Het artikel is een bewerking van een eerder in Cement verschenen artikel (nr. 7 van 2015).

└ 1 De grote afmetingen van de 3D-betonprinter op de TU/e staan toe op grote schaal objecten te printen en tegelijkertijd met hoge nauwkeurigheid kleine elementen te maken

foto: Rien Meulman

3D-printen is sterk in opkomst. Van protheses tot vliegtuigonderdelen, dagelijks komen er nieuwe industrieën bij die gebruikmaken van deze opkomende techniek. Het is de vraag of printen ook voor de bouw een toegevoegde waarde kan leveren. Op de TU Eindhoven is daartoe een grootschalig onderzoek gestart om de nieuwe maakmethode op bouwkundig niveau te beheersen. Dit artikel bevat een eerste kennismaking.

3D-printen is een Additive Manufacturing (AM) techniek, waarbij objecten laag voor laag worden opgebouwd totdat de gewenste geometrie is voltooid. Met deze maakmethode kunnen unieke, niet-repeterende producten worden gemaakt. De toepasbaarheid van het printen in de bouw wordt in de praktijk al verkend.

Printen van beton biedt een duidelijk voordeel ten opzichte van traditioneel storten: een bekisting is niet langer noodzakelijk. Dit vraagt echter een materiaal met bijzondere eigenschappen. De afgelopen jaren is beton ontwikkeld tot een zelfverdichtend materiaal dat zich probleemloos verspreidt in de mal of bekisting. Te printen beton vraagt juist het tegenovergestelde: als het materiaal eenmaal uit de printkop komt, dient het ook op die exacte plaats te blijven staan (foto 1).

STATE OF THE ART

Het toepassen van deze techniek is nog verre van vanzelfsprekend. Dit heeft een kleine groep pioniers er echter niet van weerhouden om aan de slag te gaan en het 3D-printen van betonconstructies op de kaart te zetten.



2 Impressie van Contour Crafting



3 Voorbeeld van Concrete Printing

CONTOUR CRAFTING

De eerste voorbeelden komen uit de Noord-Amerikaanse universiteit van Zuid-Californië. Daar ontwikkelt Behrokh Khoshnevis sinds de jaren negentig het zogenoemde Contour Crafting. Deze techniek bouwt betonnen wanden gelaagd op, gebruikmakend van een printkop met meerdere nozzles (spuitmonden). Hiermee kunnen binnen- en buitenblad van een wand in één productiegang worden geprint. Contour Crafting past in Khoshnevis' visie van een bouwplaats die zich niet beperkt tot printen, maar waar ook het plaatsen van balken, vloeren, installaties en de afwerking is geautomatiseerd. Khoshnevis is een samenwerking aangegaan met NASA om te onderzoeken of de techniek ook buiten de aarde toepasbaar is (foto 2).

CONCRETE PRINTING

Op de Britse Loughborough University wordt onderzoek verricht naar Concrete Printing. Deze printtechniek is vergelijkbaar met Contour Crafting, maar heeft een hogere resolutie en een betonsoort van hogere sterkte. Hiermee kan niet alleen de uitwendige contour worden geprint, ook worden de inwendige structuur en doorsnedeopbouw

van bijvoorbeeld een wand vormgegeven. Dit biedt de mogelijkheid tot integratie van leidingwerk of isolatie. De universiteit werkt nu samen met het Zweedse bouwbedrijf Skanska om de techniek op commerciële schaal door te ontwikkelen.

SMART DYNAMIC CASTING

De Gramazio Kohler Research Group van het Zwitserse ETH hanteert een andere aanpak, genaamd Smart Dynamic Casting. Deze techniek maakt, in tegenstelling tot de eerder genoemde technieken, wel gebruik van een bekisting. Het gaat hier echter om een dynamische bekisting: de geometrie van de kist wordt tijdens het extruderen van beton bijgestuurd. Ook met deze techniek kunnen

complexe objecten in beton worden gerealiseerd, zonder steeds een nieuwe bekisting te maken.

D-SHAPE

Naast de genoemde onderzoekstellingen zijn er start-ups die de techniek in de praktijk trachten toe te passen. De Italiaan Enrico Dini ontwikkelde de techniek van D-Shape. Bij deze printmethode wordt telkens een laag droog materiaal neergelegd, waarna honderden kleine nozzles lokaal bindmiddel extruderen. Hiermee hardt het materiaal alleen uit waar het is gewenst en het onverharde materiaal werkt als tijdelijke ondersteuning tijdens het printproces.

De potentie van 3D-printen van betonconstructies is duidelijk: een bouwproces met lagere kosten door de afwezigheid van bekistingen.



↑↓ 4-5 Het meng-pompsysteem is gekoppeld aan de besturing van de robot; de output van de printer wordt dynamisch geregeld, evenals het type materiaal dat wordt verpompt en geprint (foto's: Rien Meulman)



TOTALKUSTOM, CYBE EN WINSUN

In het Noord-Amerikaanse Minnesota richtte aannemer Andrey Rudenko het bedrijf TotalKustom op, dat vergelijkbaar met Contour Crafting, betonnen objecten op locatie kan printen. De bouwplaats beperkt zich momenteel tot zijn garage en achtertuin, waar hij een betonnen schaalmodel van een kasteel heeft geprint. Rudenko heeft plannen om zijn techniek op grote schaal in de praktijk toe te passen, maar wordt daarin vooralsnog belemmerd door de Amerikaanse wet- en regelgeving.

In Nederland is een soortgelijke techniek eveneens al opgepakt. CyBe, gevestigd te Oss, ontwikkelt momenteel verschillende 3D-printers die grote en gekromde betonnen objecten kunnen realiseren. Ook in China wordt deze techniek ontwikkeld. Zo komen regelmatig nieuwsberichten uit Shanghai, waar WinSun de eerste grote huizen, appartementen en zelfs villa's in beton heeft geprint. In die berichten ontbreekt echter vaak het feit dat de onderdelen voor deze gebouwen in een fabriek worden geprint. Deze gebouwdelen worden naar de bouwplaats vervoerd en daar geassembleerd tot grote bouwwerken. Dit doet echter niets af aan de prestaties van het Chinese bedrijf.

TOEPASBAARHEID IN DE BOUW

De potentie van 3D-printen van betonconstructies is duidelijk: een bouwproces met lagere kosten door de afwezigheid van bekistingen. Niet alleen bij gangbare constructies, maar zeker bij complexe geometrieën, heeft de bekisting immers een groot aandeel in de kosten. Daarnaast resulteert printen in minder materiaalgebruik en minder afval, omdat het materiaal alleen daar wordt neergelegd waar het nodig is. Bovendien is het een geautomatiseerde maakmethode die 24/7 kan doorgaan zonder nauwkeurigheid te verliezen.

Printen heeft nog extra voordelen. Zo kan het een bijdrage leveren aan het vergroten van de gewenste integratie van de bouwketen. Door ontwerpen en maken bij elkaar te brengen (CAD/CAM) kunnen gebouwen van een hogere kwaliteit worden gerealiseerd. Met een printer is het namelijk niet significant duurder en duurt het niet langer om elk element anders te maken. Elk gebouw of elke bouwsteen kan voor zijn specifieke functie worden ontworpen (*mass customization*).

Een belangrijke vraag blijft onbeantwoord. Het toepassingsgebied van 3D-printen kan namelijk twee kanten op: worden hoge kwaliteit gebouwen in de toekomst in-situ geprint of zit de grootste meerwaarde juist in het prefab printen van slimme bouwblokken, die vervolgens op locatie tot een duurzaam gebouw worden geschakeld? Het gaat daarbij niet om de definitie van 3D-printen, maar om de toegevoegde waarde voor de bouw. Dat zijn niet alleen lage kosten en sneller bouwen, maar vooral juist de mogelijkheid om een hoogwaardige en duurzame bebouwde omgeving te realiseren.

AANDACHTSPUNTEN

De printtechniek heeft naast de voordelen ook een andere kant. Bij 3D-printen kunnen ontwerpproces en maakmethode namelijk niet los van elkaar worden gezien. Deze verbinding bestaat uit de relaties tussen drie componenten: de printstrategie, het geprinte materiaal (beton) en de gewenste vorm. Vanwege de vroege fase van ontwikkeling waarin deze techniek zich nu bevindt, is de aard van deze relaties nog onbekend. Verder wordt een juiste toepassing belemmerd en gestuurd door de traditionele gescheiden ketens van ontwerp tot uitvoering. De voorbeelden die wereldwijd verschijnen, zijn daardoor vaak gerealiseerd door *trial and error*.

Het toepassen van wapening is bovendien niet vanzelfsprekend in het printproces. Dit vraagt om los te komen van traditionele constructies en na te denken over de definitie van wapening voor 3D-printen. Wordt de wapening geplaatst en het beton er omheen geprint of is het juist de wapening die geprint gaat worden? Het is verder mogelijk om sparings te 'printen' en daar later (voorspan) wapening in te plaatsen. Wellicht moeten we wennen aan het idee van constructief beton zonder wapening en zijn het juist de hoogwaardige en nieuwe vezelversterkte betonsoorten (met een grotere ductiliteit of trekcapaciteit) die het toepassingsgebied van de printmethode vergroten.

Deze vraagstukken zetten aan tot opnieuw nadenken over de toegevoegde waarde van 3D-printen voor de bouw. We moeten niet blijven hangen in de eerste voordelen zoals snel produceren tegen lage kosten, maar ook moeten we niet afhaken bij de eerste problemen die de techniek met zich meebrengt. Het begrijpen en ontsluiten van de potentie vergt onderzoek.

ONDERZOEKSPROJECT TU/e

De Technische Universiteit Eindhoven (TU/e) heeft het initiatief getoond door een onderzoeksproject getiteld '3D Printing of Sustainable Concrete Structures' te starten. Het onderzoeksteam zal de komende vier jaar op experimentele en numerieke wijze het 3D-printen van betonconstructies onderzoeken. Het bedrijfsleven wordt in het project betrokken. Om invulling te geven aan de vraag naar ketensamenwerking vertegenwoordigt een groep van tien industriële partners een breed spectrum van de bouw: Ballast Nedam, Bekaert, Concrete Valley, CRH, CyBe, SGS Intron, Verhoeven Timmerfabriek, Weber Beamix, Van Wijnen en Witteveen+Bos. Verder ondersteunt de stichting SKKB het project financieel.

3D-PRINTER

Om tijdens het onderzoekstraject experimenten nauwkeurig te kunnen uitvoeren, is op de TU/e een 3D-betonprinter gebouwd. De afmetingen van de printer zijn circa 11 x 6 x 4 m³. Dat is bewust groot, om het gehele toepassingsgebied van 3D-printen te kunnen onderzoeken. Deze afmetingen staan toe op grote schaal objecten te printen en tegelijkertijd met hoge nauwkeurigheid kleine elementen te maken (zie foto 1).

Het meng-pompsysteem is gekoppeld aan de besturing van de robot. Deze besturing beperkt zich daarmee niet tot uitsluitend de robotbewegingen en snelheid. De output van de printer wordt ook dynamisch geregeld, evenals het type materiaal dat wordt verpompt en geprint (foto 4 en 5).

De printer krijgt in de loop van het project een tweede printkop, waarmee een tweede materiaal kan worden geprint. Hier kan een herbruikbaar materiaal worden ingezet dat kan worden toegepast als tijdelijke ondersteuning, zoals bij overspanningen, vloeren of ramen. Na de tijdelijke ondersteunende functie wordt dit materiaal weer weggehaald en bij een volgende overspanning of opening gebruikt.

AANPAK

Het onderzoeken van de 3D-printtechniek vraagt om een aanpak die afwijkt van traditionele ontwerp- en analysetechnieken. Door de onlosmakelijke relaties tussen de componenten printstrategie, materiaal en vorm, wordt gebruikgemaakt van het zogenoemde toestandsparameterconcept. Dit is een concept waarbij de materiaaleigenschappen worden uitgedrukt als functie van de toestand waarin

het beton op ieder moment verkeert. De experimentele en numerieke resultaten worden verwerkt in parametrische modellen, die de relaties tussen de drie componenten (printstrategie, materiaal en vorm) beschrijven. Deze modellen vormen de basis voor het ontwerp van printbare objecten. Zo hebben topologische optimalisatietechnieken de afgelopen jaren een flinke ontwikkeling doorgemaakt. Een realistische toepassing in de praktijk wordt echter, zeker voor beton, nog belemmerd door de beperkingen van traditionele maakmethoden, zoals het storten in een bekisting. Met 3D-printen kunnen deze geoptimaliseerde vormen op een efficiënte manier worden gemaakt.

Maar met een 3D-printer kan deze optimalisatie nog een stap verder gaan. Als een object wordt gestort, zal de verdeling van beton altijd zo homogeen mogelijk over het object zijn verspreid. Daarmee zit er soms materiaal op plekken waar het niet nodig is. Door het printproces op een slimme manier aan te sturen, kan hierin verandering worden gebracht. De materiaalsamenstelling kan zo van plek tot plek variëren in het object en over de doorsnede. Waar hogere sterkte is gewenst, kan het cement- of vezelpercentage lokaal toenemen, terwijl op minder belaste locaties bijvoorbeeld een meer poreuze structuur wordt geprint. Daarmee ligt het juiste materiaal op de juiste plek.

TOT SLOT

3D-printen van betonconstructies kan de bouw vele voordelen bieden. De noodzaak tot bekisten wordt weggehaald en de techniek gebruikt minder materiaal dan bij regulier storten van beton. Bovendien kan printen de verschillende ketens in de bouw bij elkaar brengen en daarmee de kwaliteit van gebouwen verhogen. Deze nieuwe maakmethode brengt nog wel de nodige vragen met zich mee die moeten worden opgelost om de techniek in de praktijk te brengen. Het onderzoeksteam aan de TU/e zal er de komende jaren naar streven antwoorden te bieden.





Call for papers

3^{de} Symposium Fiets+Voetbruggen, 2 november 2017 in Amersfoort

Het Platform Fiets+Voetbruggen organiseert het 3^{de} symposium over Fiets+Voetbruggen door en met u als sprekers.

OPZET VAN HET SYMPOSIUM

- inhoudelijke presentaties van opdrachtgevers, architecten, constructeurs, aannemers en anderen;
- na elke voordracht is er gelegenheid met elkaar van gedachten te wisselen;
- elk onderwerp over Fiets+Voetbruggen mag aan bod komen, mits kennisoverdracht leidend is.

(Deelname levert punten op voor het Constructeursregister, als toehoorder 2 KE's en als spreker 4 KE's).

FIETSBRUG DE HOVENRING REGIO EINDHOVEN

TROTS OP UW WERK

Werk, waar u trots op bent, kunt u delen met vakgenoten via uw bijdrage. Deze bestaat uit:

- Een voordracht van 20 minuten om uw onderwerp nader te bespreken, gevolgd door een 10 minuten durende inhoudelijke discussie.
- verder staan de redactionele pagina's van het tijdschrift BRUGGEN open voor het plaatsen van een artikel van uw hand.

Aanmelden als spreker vóór 1 juli a.s.

ONDERWERPEN KUNNEN ZIJN:

- in aanbouw of gerealiseerde Fiets+Voetbruggen in binnen- of buitenland;
- specifieke oplossingen, vormgeving of detailleringen;
- toepassing van nieuwe materialen al dan niet in combinatie met bestaande constructiematerialen;
- uitkomsten van gerealiseerd of onderhanden onderzoek, normering, enz.

In principe kan elk relevant onderwerp worden ingebracht. Uw voorstel (circa 150 woorden met een aantal afbeeldingen, graag voorzien van uw cv) kunt u sturen naar de secretaris van het Platform Fiets+Voetbruggen, Heico de Lange, nbs@rws.nl.

KEUZE DOOR COMMISSIE

Nadat een commissie van het Platform Fiets+Voetbruggen de ingediende voorstellen heeft beoordeeld, krijgen de inzenders uiterlijk op 1 september a.s. bericht of hun voorstel wel of niet is gehonoreerd. Het symposium biedt ruimte voor 4 à 5 voordrachten met bijbehorende discussies.

KENNIS DELEN

Dit symposium is hét moment voor u om kennis te delen met uw vakgenoten. Indien u zelf niet in de gelegenheid bent om een presentatie te houden, kunt u deze Call for papers doorgeven aan uw collega's. Geef hen ook de datum van dit symposium door. De dag wordt mede mogelijk gemaakt door CROW en Gemeente Amersfoort.

PLATFORM FIETS+VOETBRUGGEN

Nederlandse Bruggenstichting
Lange Kleiweg 34, 2288 GK Rijswijk
Telefoon: 088 7970 727 (di, wo, en do)
e-mail: nbs@rws.nl
www.bruggenstichting.nl

INNOVATIEPROGRAMMA **STROOMVERSNELING**

BRUGGEN Maximale beschikbaarheid – minimale maatschappelijke kosten

Voordracht gehouden door:
ir. Egon Jansen, Bouwcampus Delft en dr. Paul Waarts,
Provincie Noord-Holland, Haarlem

Bewerking tot artikel door:
Maurits van de Toorn

De komende jaren zijn duizenden bruggen, tunnels en viaducten in Nederland aan vervanging toe. Dat is niet alleen een enorme investering, er dreigt ook onvoldoende ontwerp- en bouwcapaciteit te zijn om dit allemaal in betrekkelijk korte termijn uit te voeren. Opdrachtgevers en bouwbedrijven werken daarom op De Bouwcampus samen in het programma Stroomversnelling Bruggen aan manieren om het probleem efficiënt en innovatief aan te pakken. De ambitie van het programma is de totale kosten voor de vervangingsopgave met 40% te verminderen.



1 Vervanging van de Stolperophaalbrug in de N248 bij Schagen

Foto: Anya Boen

Het lijkt een mooie vraag voor een quiz: hoeveel bruggen zijn er in Nederland? Het lijkt, want niemand weet het juiste antwoord, er bestaat geen registratie. Alleen al in Amsterdam zijn er zo'n 2000 bruggen die geregistreerd en genummerd zijn, maar als alle ongenummerde bruggen en bruggetjes ook worden meegeteld zijn het er bijna twee keer zoveel. Landelijk is er evenmin zicht op het totaal. Als je alles meerekent, van de kleinste til in Groningen tot en met nationale iconen als de Van Brieneoordbrug en de Zeelandbrug, kom je misschien wel op 100.000 stuks. Een serieuze schatting is dat het om 40.000 tot 50.000 bruggen, tunnels en viaducten oftewel kunstwerken van enige omvang gaat.

BOUWPERIODE

Een groot deel van die kunstwerken is verzetten vanaf de jaren vijftig tot circa 1975. Om verschillende redenen zijn er toen zoveel gebouwd. Er moest nog lange tijd schade uit de oorlogsperiode worden hersteld. Vervolgens werd het wegennet sterk uitgebreid – denk aan de aanleg van het snelwegennet – en omdat het (auto)verkeer snel groeide en er kwamen

er steeds meer rondwegen om dorps- en stadskernen te ontlasten.

De beheerders geven inmiddels jaarlijks zo'n zes miljard euro uit aan de instandhouding van al deze infrastructuur. Hoe essentieel een goede instandhouding is, bleek een paar maanden geleden toen de Merwedebrug bij Gorinchem ineens een paar maanden dicht moest voor vrachtverkeer. Het economisch belang van een goede infrastructuur werd – ongewild – weer eens geïllustreerd. Die zes miljard is al veel geld, maar het is peanuts in vergelijking met het bedrag dat vervanging van deze kunstwerken zou kosten. Uitgaande van een levensduur van vijftig tot tachtig jaar is er geen hogere wiskunde voor nodig om te bedenken dat er de komende jaren een golf aan noodzakelijke vervangingen op ons afkomt.

AANPAKKEN

Lindy Molenkamp, hoofd van de Eenheid Wegen en Kanalen van de provincie Overijssel, heeft het probleem benoemd: "Er komt een piek in de vervangingscyclus aan en het gaat erom de golf die op ons afkomt te spreiden,



2 Beweegbare brug, kanaal Almelo-Coevorden

Foto: Harry Roelofs, provincie Overijssel

te verlagen en naar achteren te schuiven. Dat is niet alleen om overheidsgeld uit te sparen, het is ook nodig omdat de markt zoveel opdrachten niet in één keer aan kan. Er zijn gewoonweg niet voldoende ontwerpers en bouwers in Nederland en daarbuiten. We moeten het probleem daarom op verschillende manieren aanpakken. Je kunt kunstwerken inderdaad vervangen, maar je kunt ze ook versterken, het gebruik ervan beperken door de toegelaten aslasten of totaallasten te begrenzen en, het meest drastisch, je kunt een kunstwerk ook weghalen. Maar wat je ook doet, samenwerking is essentieel: Het heeft niet zoveel zin als de ene wegbeheerder een kunstwerk helemaal laat vernieuwen, terwijl

de aangrenzende wegbeheerder een paar kilometer verderop in dezelfde weg een aslastbeperking voor een viaduct instelt.”

Het probleem heeft ook een bestuurlijke dimensie, want er is voor een minister, gedeputeerde of wethouder weinig eer aan te behalen. Grootscheepse vervangingen duren meestal langer dan één bestuursperiode, kosten veel geld en leveren amper gelegenheid om feestelijk linten door te knippen. Molenkamp: “Je kunt het vergelijken met het vervangen van je oude wasmachine, dat wekt bij de meeste mensen ook geen warme gevoelens op.”

PROGRAMMA

Voor het aanpakken van het probleem is vorig jaar het programma ‘Stroomversnelling Bruggen’ van start gegaan. Het is ontstaan vanuit een initiatief van de ministeries van Economische Zaken en Binnenlandse Zaken. Inspiratiebron daarbij was de ‘De stroomversnelling’, een efficiënte manier van werken die bij de renovatie van jaren zestig-woningen met succes is toegepast. Aanjager van het programma is De Bouwcampus in Delft.

Robert Koolen, directeur Strategie en Innovatie van bouwbedrijf Heijmans, legt uit wat de bedoeling is: “Het gaat erom dat we ontwerp- en bouwprocessen opschalen en standaardi-

seren. Dat standaardiseren kan door net zoals bij woningen ook infrastructuur modulair te gaan bouwen. We hebben één keer een opdracht voor twaalf fietstunneltjes in negen gemeenten gehad, waarbij elke gemeente andere eisen stelde. Doordat we de eisen hebben samengevoegd moesten alle tunneltjes weliswaar aan de zwaarste eisen voldoen, waardoor de bouw zelf duurder werd, maar het ontwerpproces verliep zoveel efficiënter dat we uiteindelijk goedkoper uit waren. Nog een goed voorbeeld van deze manier van werken is de 'catalogus' van fiets- en voetgangersbruggen die Rotterdam heeft gemaakt en de gecombineerde aanbesteding voor de gestandaardiseerde vernieuwing van een aantal daarvan."

OPSCHALEN

Koolen: "Rotterdam is in staat om zo'n aanbesteding te doen omdat het een grote gemeente is met een goed ingenieursbureau. Veel kleinere gemeenten kunnen dat niet. De huidige gang van zaken waarbij een gemeente voor elke opdracht een apart ontwerp laat maken door een architect of een ingenieursbureau, vervolgens een uitvraag doet waar vijf bouwbedrijven op reageren die

elk ook weer gaan rekenen, is niet meer te betalen als je je realiseert welke opgave er op ons afkomt. We moeten dergelijke processen meer modulair oppakken en opschalen tot regionaal, provinciaal of landelijk niveau."

Molenkamp valt hem bij: "Het is een vraagstuk dat te groot is voor kleine partijen zoals veel gemeenten en de waterschappen, terwijl grote partijen – de meeste provincies, grote gemeenten en het Rijk – eveneens zullen moeten samenwerken om kostenvoordelen te hebben door gezamenlijke inkoop en opdrachtverlening. Bovendien geldt: zoveel kennis op dit gebied is er niet; alle partijen hebben elkaar hard nodig. De kwestie van verouderende en oudere infrastructuur speelt in de meeste ontwikkelde landen. Ik zie het als vraagstuk, maar ook als kans. Zo ben ik ervan overtuigd dat bedrijven die hier ervaring opdoen met een innovatieve aanpak hun marktpositie elders in de wereld kunnen versterken."

'LEGOLISERING'

Paul Waarts, senior technisch adviseur bij de provincie Noord-Holland, houdt zich bezig met het al genoemde modulaire bouwen van

bruggen. Hij gebruikt daarvoor het begrip 'legolisering', iets waar iedereen zich wat bij kan voorstellen, want wie heeft er als kind niet met Lego gespeeld? Waarts: "Elke brug is nu een individueel ontwerp, maar als je door je oogharen kijkt, lijken veel bruggen op elkaar. Veel onderdelen zijn in feite hetzelfde, maar worden nu nog altijd afzonderlijk ontworpen, terwijl standaardisering veel efficiënter is, in bouw en onderhoud. In de automobilindustrie en in de scheepsbouw is men daar al veel verder mee dan wij."

Dat is natuurlijk te verklaren door het verschil in schaalgrootte: duizenden auto's bouwen is iets anders dan één brug, en de meeste brugeigenaren komen niet verder dan één of hooguit twee bruggen per jaar. Het idee is dan al snel: waarom zou je standaardiseren? Het antwoord daarop is dat je er al heel snel voordelen van hebt, zelfs al bij twee bruggen. Waarts: "Het idee is om vanaf 2020 op een gestandaardiseerde manier beweegbare bruggen te bouwen door interface te definiëren – om in stijl te blijven: dat zijn de 'nopjes' van de Lego – waarmee we ervoor zorgen dat alle onderdelen van de verschillende bruggen op elkaar passen."

Alle bruggen zullen er nog steeds verschillend uit kunnen zien; wie bang is voor versaaing van het landschap hoeft zich geen zorgen te maken. Waarts: "De ontwerper houdt de vrijheid om een individueel ontwerp te maken, zolang hij er maar voor zorgt dat hij zich aan de interface houdt. Bruggen houden een verschillend uiterlijk, want alles tussen de interfaces kan verschillend zijn." Het maken van zo'n interface kost tijd en geld, maar door de standaardisatie heb je al snel een kostenreductie binnengehaald. "Naast die reductie verwacht ik een verbetering van de kwaliteit, een snellere bouwtijd en een duurzamere infrastructuur. Standaardisering brengt hergebruik van onderdelen in beeld. We streven ernaar dit in Noord-Holland en Overijssel zo te gaan doen. Voor het maximale effect zou het mooi zijn als dit model in heel Nederland wordt toegepast."

CONCURRENTIE

Al die standaardisering, plus de deelname van meerdere bouwbedrijven in het programma, roept de vraag op hoe het zit met de verhoudingen tussen de bouwers. Ze zullen toch met elkaar concurreren als het tot aanbesteding komt?



3 Egon Janssen van De Bouwcampus op de composiet Exercitiebrug in Rotterdam. De aanpak van de vervangingsopgave van 150 fiets/voetgangersbruggen in Rotterdam is een belangrijke inspirator geweest van de 'Stroomversnelling Bruggen'
Foto: M. van der Tol, AmRoR

Elke brug is nu een individueel ontwerp,
maar als je door je oogharen kijkt, lijken veel
bruggen op elkaar

dingen volgens dit nieuwe model komt. Koolen: “Je kunt dat oplossen door in consortia te gaan werken, maar opdrachtgevers kunnen ook op een hoger abstractieniveau aanbesteden. Ik noem dat het ‘sleutel-slotprincipe’: de opdrachtgever bepaalt samen met de opdrachtnemers het slot, de opdrachtnemers bedenken vervolgens hoe de sleutel eruit ziet en zorgen dat die past.”

“Het is wel verstandig dat alle deelnemende partijen een keer een opdracht krijgen om te oefenen met deze manier van werken en zo ervaring op kunnen doen. Bij het woningenprogramma is ook steeds een mandje opdrachten aan alle deelnemers ter beschikking gesteld. Nadat op die manier een eerste innovatieslag is gemaakt, kunnen de aanbestedingen vervolgens ‘open’ worden gemaakt.”

WET- EN REGELGEVING

Buiten techniek en innovatie zijn er maatregelen op het gebied van wet- en regelgeving te bedenken die kunnen bijdragen aan een beter resultaat en lagere kosten. Molenkamp pleit voor aanpassing van het Bouwbesluit: “In het Bouwbesluit 2012 is vastgelegd dat alle, ook kleinere kunstwerken geschikt moeten zijn voor voertuigen met een totaalgewicht tot zestig ton. Dat is niet altijd nodig, er was vroeger niet voor niets een driedeling in gewichtsklassen. We proberen die driedeling weer terug te krijgen, want dat scheelt miljarden aan investeringen.”

Nog een simpele maar effectieve maatregel is een stringenter aanpak van de overbelading van vrachtwagens. Naar schatting is circa tien procent van alle vrachtwagens overbeladen, terwijl het in sommige sectoren nog wel meer is. “De ironie is dat de overheid als opdrachtgever van grote bouwprojecten daar medeverantwoordelijk voor is, want juist in de bouwsector komt veel overbelading voor. Dat veroorzaakt schade aan wegen en kunstwerken en naarmate kunstwerken ouder worden, neemt de schade daardoor toe. Het is aan te bevelen dat opdrachtgevers in hun contracten vastleggen dat ze op overbelading controleren en daarvoor een convenant opstellen. Overbelading veroorzaakt nu jaarlijks zo’n 400 miljoen euro aan schade, dus afspraken daarover schelen al gauw veel geld.”

STAND VAN ZAKEN

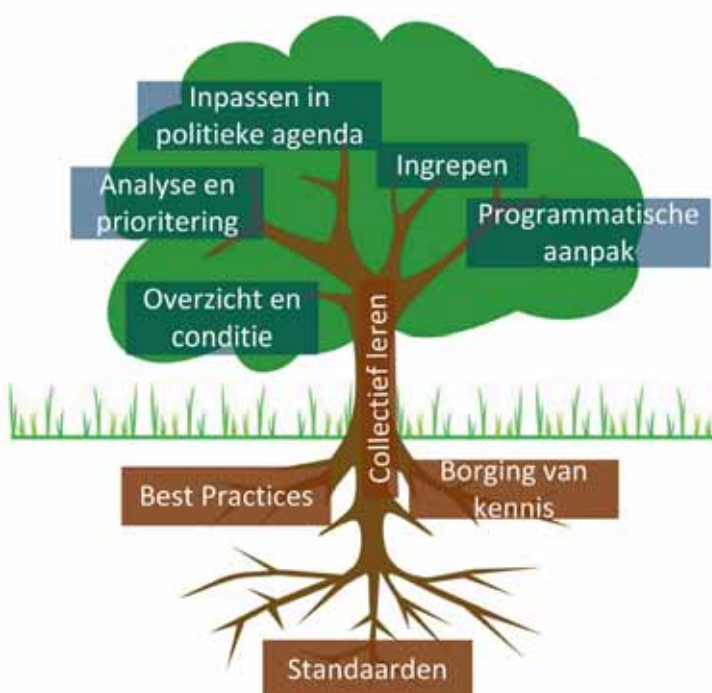
De Bouwcampus, de neutrale aanjager van het programma, heeft sinds begin 2016 een reeks sessies georganiseerd om het probleem te definiëren. In eerste instantie gaat het erom dat de beheerders van de bruggen, tunnels en viaducten, die nu vaak ‘onbewust

onbekwaam’ zijn als het om dit probleem gaat, ‘bewust onbekwaam’ worden gemaakt. Vervolgens moet er een instrumentarium worden ontwikkeld om te kunnen prioriteren, ofwel waar moet het snelst worden ingegrepen? Dat vergt uitgebreide controles van alle kunstwerken, mogelijk met moderne hulpmiddelen als drones en sensoren.

Vervolgens kan worden bepaald wat de beste ingrepen zijn. Vervanging zal niet altijd direct nodig of mogelijk zijn. In die gevallen kunnen maatregelen als beperking van de aslast of de totaallast voorlopig soelaas bieden. In werkateliers en een innovatielab worden innovatieve manieren bedacht om de problemen aan te pakken; de bouwbedrijven die hieraan deelnemen doen dat zonder betaling voor hun nadenk- en meedenkwerk. Op basis van de keuzes uit de werkateliers en *best practices*, zoals de al genoemde Rotterdamse gebundelde aanbesteding, volgen pilots. De concepten die in die pilots hun waarde bewijzen kunnen uiteindelijk overal in het land worden gebruikt.

Dat is allemaal niet van vandaag op morgen te realiseren, maar de noodzaak van het programma is inmiddels wel breed doorgedrongen, merkt Koolen: “De bijeenkomsten waren de eerste keren nog erg aftasten, maar inmiddels is het besef bij alle deelnemers doorgedrongen dat er een heel grote opgave

4 Aanpak van de Stroomversnelling Bruggen. De hoofdtakken geven de scope weer van het programma. Op deze onderwerpen worden rondom casussen werkateliers ingericht. De opgedane kennis en ervaringen worden verzameld (weergegeven in de wortels van de boom)



ligt.” Waarts voorziet eveneens dat er nog een lange weg te gaan is: “We staan nog maar aan het begin. Het is nu een kwestie van de geesten rijp maken, want het gaat om een omslag in de civiele techniek.”

BETROKKEN PARTIJEN: ZIE WWW.DEBOUWCAMPUS.NL

Voor meer informatie of het leveren van een bijdrage aan deze opgave? U kunt contact opnemen met Egon Janssen, business developer van De Bouwcampus via 06-53467664 of e.janssen@debouwcampus.nl. ■



De Bouwcampus in Delft is dé ontmoetingsplaats waar partijen samen innovatieve oplossingen creëren voor vraagstukken op het gebied van leven, wonen en werken. Het is hét netwerk dat partijen in de gehele bouwsector met elkaar verbindt: alle partijen uit de bouwketen, inclusief de eindgebruiker, zitten aan de tekentafel. De Bouwcampus stimuleert betrokken partijen expertise, creativiteit, netwerk en faciliteiten te delen. Daardoor inspireren ze elkaar om sneller, kwalitatiever en goedkoper te innoveren. Meer informatie over De Bouwcampus: www.debouwcampus.nl.

MICHEL BAKKER



BRUGGEN IN DE KUNST

Vlakebrug — verbroken verbinding

Vorig jaar vierde men het 150-jarig bestaan van het Kanaal door Zuid-Beveland, een voor het scheepvaartverkeer belangrijke waterweg die de Ooster- en Westerschelde met elkaar verbindt. Over dat kanaal ligt de Vlakebrug. In de serie *Bruggen in de Kunst* is de provincie Zeeland nillens willens wat stiefmoederlijk bedeed. Tot nu. De fraaie pentekeningen van de Zeeuwse kunstenaar Marius Weststrate tonen een belangrijke episode uit de geschiedenis van die Vlakebrug.

DE BRUG

In 1938 kwam deze gepentekende Vlaktebrug over het kanaal tot stand. Feitelijk bestond deze overbrugging uit een trits van nevenschikte bruggen: twee voor het spoorverkeer en één voor het wegverkeer. Eerder lag er een draaibrug (1865). Stalen basculebruggen over één van de brugopeningen gaven ook grotere schepen een doorvaartmogelijkheid. In de Tweede Wereldoorlog viel Zuid-Beveland tijdens de meidagen van 1940 ten prooi aan oorlogsgeweld. Ten oosten van het Kanaal door Zuid-Beveland richtte men, op de lijn Hansweert-Yerseke, tevens ter verdere afscherming van Walcheren, de Zanddijkstelling op. De Vlaktebrug maakte er deel van uit. Ook na de capitulatie van woensdag 15 mei ging daar de strijd nog door. Die woensdag vernielde men met springstof de vaste stalen overspanningen van de Vlaktebrug, dit om te verhinderen dat de Duitsers het kanaal zouden oversteken. De beide basculebruggen werden omhoog gedraaid. Uiteindelijk moest ook hier de verdediging opgegeven worden toen de bezetter dreigde Middelburg te bombarderen. Op 17 mei was de algehele capitulatie dan een feit.

Treinverkeer was al vanaf augustus 1940 weer mogelijk over een provisorisch herstelde spoorbrug. In 1941 was de oeververbinding geheel hersteld. Maar zoals vaker in oorlogstijd, moest de brug het een tweede keer ontgelden. Op 8 juli en 3 augustus 1944 bombardeerde de Britse Royal Air Force de overspanning en zelfs op 5 oktober bracht een Duits Sprengcommando nog schade toe. Het scheepvaartverkeer was volledig gestremd. Het wegverkeer kon de oversteek echter nog maken middels de Postbrug en de Bonzijbrug of te voet of met de fiets over het sluisencomplex in Wemeldinge en Hansweert.

Na de voor de geallieerden succesvolle Slag om de Schelde werden er eerst twee pontonbruggen en iets later een baileybrug over het kanaal geslagen. Begin 1945 herbouwde men de spoorbrug, vervolgens herstelde men in 1947 de verkeersbrug; deze zouden tot 1992 dienst doen. De huidige Vlaktebrug – nabij de Vlaketunnel – bestaat nog steeds uit een verkeers- en een spoorbrug.

DE KUNSTENAAR

Marius Weststrate is autodidact. Hij is geboren en getogen in Wemeldinge. Na de LTS – afdeling metaal – kwam hij in de bouwwereld terecht. Zijn carrière zou echter een bijzondere wending nemen: hij legde zich toe op sportmassage en verzorging van sporters. Dertig jaar heeft hij wielrenners begeleid en verzorgd, ook op de grote evenementen als de Tour de France, de Giro d'Italia, de Vuelta in Spanje, de wereldkampioenschappen en in 1988 de Olympische Spelen in Seoel.

Vanaf 1990 verbleef hij samen met echtgenote Jozien Ruissen – keramiste – jaarlijks een langere tijd in Roquetas de Mar in Andalusië (Zuid-Spanje). Daar vond hij de tijd en rust om met pasteltekeningen en aquarellen te beginnen, les te nemen en zich door middel van studie en zorgvuldig observeren kunstzinnig te bekwamen. Potlood, pen, pastel en penseel worden nog steeds afwisselend gehanteerd.

“Tekenen was een oude hobby en geïnteresseerd in beeldende kunst was ik al langer. Ik zocht steeds naar andere uitdrukkingsmogelijkheden en ben schilderend eerst met water- en acrylverf aan de slag gegaan. Daarna met olieverf en de laatste jaren – sinds 2010 - geeft pentekeningen met de Rotringpen me veel plezier.”

De interesse voor zijn geboortestreek Zuid-Beveland, maar ook de liefde voor Andalusië, zijn zichtbaar in zijn werk. De natuur en de stilte zijn het uitgangspunt en het verleden komt als thema steeds terug. De hier afgebeelde pentekeningen *Verbroken* en *Verbinding* zijn in mei 2016 gemaakt voor de Kunst en Natuurroute Wemeldinge. ■

Met dank aan Jaap Geleijnse en Peter van Strien.

LITERATUUR

E. van Blankenstein, *Bruggen in Nederland, Vernieling en herstel, 1940-1950*, Zutphen 2009.
J. Cats, 'Kanaal verhaal', in: *Zeeland Boek Brochures*, nr. 6, Vlissingen 1992.



↑ *Verbinding - de Vlaktebrug gezien vanaf de oostzijde van het kanaal van Zuid-Beveland, situatie na de oplevering in 1938, pentekening op Japans papier, 2016, 400 mm x 600 mm.*

Tekenen was een oude hobby en
geïnteresseerd in beeldende kunst
was ik al langer



DE VERBROKEN



← Verbroken - de Vlakebrug
gezien vanaf de westzijde van
het kanaal van Zuid-Beveland,
situatie na de vernieling in 1940,
pentekening op Japans papier,
2016, 400 mm x 600 mm.

HENK VAN MAARSCHALKERWAART

(1927 – 2016)



Op 13 december 2016 overleed Henk op 89-jarige leeftijd.

Na het behalen van zijn HBS-diploma volgde Henk de studie Weg- en Waterbouwkunde aan de MTS (nu HTS) in zijn geboortestad Amsterdam. Hij studeerde in 1948 af en trad als staalbouwkundige in dienst van de Nederlandse Spoorwegen waar hij tot zijn pensionering zou blijven werken. Van staalbouwkundige, via chef tekenkamer, projectingenieur en chef staalconstructie, klom hij in de loop der jaren op tot hoofd van de sector staalbouw en brugonderhoud. In die functie was hij begin jaren tachtig verantwoordelijk voor de uitvoering van het meerjarenplan voor het vervangen van de grote vaste spoorbruggen.

Reden voor die vervanging was in de meeste gevallen de vermoeiing van het materiaal waarvan de bruggen in de tweede helft van de 19^e eeuw waren vervaardigd. Van begin jaren zeventig tot ver na zijn pensionering

is Henk bezig geweest met het onderwerp vermoeiing van ijzer en staal, een onderwerp dat hem bovenmatig boeide. Op dat gebied werd hij een expert al liet hij zich daar zelf, bescheiden als hij was, nooit zo op voorstaan. Degenen die het moesten weten, wisten het natuurlijk toch. Hij liet in de laboratoria van de NS en de TU Delft vermoeiingsonderzoek doen op brugmateriaal. En hij was jarenlang lid van de internationale commissie van Office de Recherche et d'Essai. Met recht een expert. Tot ver na zijn pensionering bleef hij op dat gebied actief. En als zijn geheugen hem niet in de steek had gelaten, zou hij alles wat recent speelde met betrekking tot de Merwedebrug bij Gorkum verslonden hebben en de "jonkies" desgevraagd graag geadviseerd hebben.

Henk van Maarschalkerwaart was een brugman in hart en nieren. Dat hield niet op toen hij na ruim 40 dienstjaren in 1989 met de VUT ging. In 1992 werd de Nederlandse

Bruggenstichting opgericht om de geschiedenis van de bruggenbouw in Nederland te beschrijven. En wie zou het belangrijke hoofdstuk ijzeren en stalen spoorbruggen beter kunnen schrijven dan ervaringsdeskundige Van Maarschalkerwaart? Toen Jaap Oosterhoff, oprichter en eerste voorzitter van de Bruggenstichting, hem daarvoor benaderde greep de net weduwnaar geworden Henk het project met beide handen aan. Zoals hij me later meerdere malen vertelde heeft de samenwerking binnen dat grote project hem door een heel moeilijke periode heen geholpen.

Ik kan me niet herinneren wanneer en waar ik Henk voor het eerst ontmoette. Was dat in de jaren negentig bij een bijeenkomst van de Commissie Erfgoed IJzer en Staal of toch bij een studiereis van KIVI Geschiedenis der Techniek? Het was in elk geval al voordat ik actief werd binnen de Bruggenstichting. Hoe het zij, in Henk trof ik een zeer aimabele en geduldige leermeester. Hij heeft me op de GdT-reis naar midden Frankrijk uitgelegd hoe knap de spoorbruggen van Gustav Eiffel in elkaar zitten. En tijdens een andere GdT-reis, staand bij het monument van de Britannia Bridge in Wales, vertelde hij me over het onderzoek naar de vermoeding van die brug en de impact die de verwoestende brand op het oude materiaal heeft gehad.

Intensief contact kregen we nadat mij in 2003 gevraagd werd een inhoudelijke bijdrage te leveren aan het nieuwe NBS-project "Bruggen, visie op architectuur en constructie". Zijn inbreng en bijsturing resulteerden niet alleen in een inhoudelijk beter hoofdstuk maar ook in een dierbare vriendschap met hem en zijn tweede vrouw Clara. Zij merkte een paar jaar geleden dat Henk steeds meer moeite had om zich te concentreren en vergeetachtiger werd. Uit onderzoek bleek: Alzheimer. Hij had zich toen al teruggetrokken uit activiteiten voor de Bruggenstichting en als vermoeiingsexpert besepte hij heel goed dat hij steeds meer los zou moeten laten en dat er geen weg terug was. Het was duidelijk dat er zowel geestelijk als lichamelijk sprake was van vermoeiing, ernstige vermoeiing die slechts kon leiden tot einde levensduur. We hebben hem langzaam maar zeker zien wegzakken tot hij op 13 december uiteindelijk bezweek. Evenals andere organisaties is de Bruggenstichting Henk veel dank verschuldigd voor zijn inbreng en inzet, voor zijn betrokkenheid en kameraadschap. De vele mooie en goede herinneringen aan deze aimabele bruggenexpert zullen zijn familie en vrienden zeker tot troost zijn. ■

Gert Jan Luijendijk



GETOOGDE BRUGGEN VAN BETON UIT EEN RECHTE MAL?

Het aanbrengen van een toging (zeeg) in houten of stalen liggers is geen nieuwe ontwikkeling. Speciale buigbanken brengen koudvervormd een kromming aan in staalprofielen en ook het bewerken van hout met water en warmte is een bekend procedé om in een houten ligger een toging aan te brengen. Bij het materiaal

beton is dat altijd een probleem geweest, omdat met temperatuursverhoging en/of opgelegde vervorming geen spanningsloze, blijvende vervorming te realiseren is. Met voorgespannen beton is het iets anders: door excentrisch spannen van voorgespannen betonliggers kan een opbuiging worden gerealiseerd (de zogenaamde 'kattenrug'), maar

die is niet spanningsloos. Als het over beton gaat, is een zeeg het best te realiseren door de bekistingsvorm hier op aan te passen: een dure oplossing omdat voor elke kromming en overspanning een aparte mal gemaakt moet worden. Standaardisering van zo'n bekisting is niet op een economische manier te realiseren.

OPLOSSING VOOR BETON

Met de komst van het ultrahogesterktebeton (zie ook het artikel in *BRUGGEN 2015-1*) is er verandering gekomen in deze situatie. In dit materiaal zijn staalvezels toegepast en is er relatief veel ongehydrateerd cement aanwezig. Wanneer nu een plaat van uhsb een kromming wordt opgelegd, ontstaan in de trekzone scheuren, die door de staalvezels over een groot oppervlak worden verdeeld: veel kleine scheuren in plaats van plaatselijk grote scheuren.

Het bij dit type beton meer aanwezige, niet gehydrateerde cement krijgt dan de gelegenheid alsnog te reageren met water en de scheuren te dichten en daarmee de vervorming te fixeren.

TOEPASSING IN DE BRUGGENBOUW

UHSB-specieproducent Hi-Con is er in samenwerking met Pieters Bouwtechniek en ipv Delft klaar voor om, in navolging van het 'Delft Bruggensysteem' voor een opdracht-

gever een reeks van bruggen te ontwerpen, waarbij deze koud gebogen bruggen kunnen worden toegepast en waarbij de zeeg kan worden aangepast aan de gewenste waarde. Na één dag verharden is een sterkte ontwikkeld in een vlak gestorte plaat van 70 à 80 N/mm². Nadat veel van de ontwikkelde hydratiewarmte is verdwenen, kan de plaat worden belast tot de gewenste zeeg is bereikt. Na enige tijd zijn de scheuren 'dichtgegroeid' en is de vervorming blijvend. De onderkant is tijdens het storten al voorzien van een slijtlaag, zodat - na omdraaien - het rijdek bij plaatsing reeds voorzien is van afwerking. Een andere toepassing van deze ontwikkeling kan zijn het vervangen van een houten brugdek op stalen liggers, waarbij de kromming overeenkomt met de opbuiging die in de praktijk aanwezig is. Er kunnen plaatbruggen worden gemaakt van 2 tot 4,5 m breed, met een lengte van maximaal 15 m, waarbij de dikte slechts 80 mm bedraagt!



Nadat veel van de ontwikkelde hydratatie-warmte is verdwenen, kan de plaat worden belast tot de gewenste zeeg is bereikt



↑↓ Het belasten van een plaat om de gewenste doorbuiging te verkrijgen





Raad van Advies

ARUP



ProRail





BRUG OVER HET IJ IN AMSTERDAM WORDT WERKELIJKHEID

[Naar een artikel in het NRC Handelsblad van 14 januari j.l.](#)

Burgemeester en Wethouders van Amsterdam hebben het besluit genomen: er komt een voet+fietsbrug over het IJ, vanaf het Java-eiland in Amsterdam-Oost in het verlengde van de Jan Schaefferbrug, naar Amsterdam-Noord.



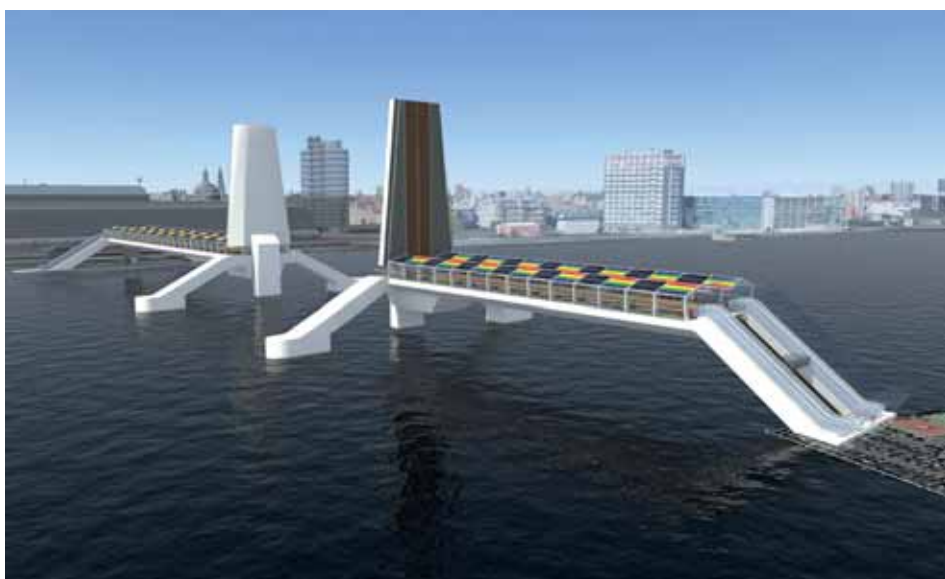
Artist impressie van de toekomstige brug over het IJ, vanaf het Java-eiland in Oost. (illustratie Dijkstra en Venhoeven)

In 2020 wordt nog een besluit genomen over een kleinere brug over het Noord-Hollandsch Kanaal en een brug meer westelijk: vanaf Het Stenen Hoofd over het IJ naar Amsterdam-Noord. In de tussentijd gaan er meer ponten varen over het IJ.

Na anderhalve eeuw lobbyen, actievoeren, plannen maken en presenteren, halen vele Amsterdammers en andere voorstanders van een brug opgelucht adem. Er komt een brug! Maar hoe lang zal die blijdschap duren? Of het genoeg is, moet immers nog maar blijken, zeggen critici. "Want het overgrote deel van de mensen woont aan de westkant", zegt Bas Kok, auteur van *Oerknal aan het IJ* en sinds zes jaar groot voorvechter van een brug over het IJ. "Namelijk alle bewoners van de grachtengordel, stadsdeel Zuid en West. En in Noord de inwoners van Buiksloterdam, NDSM en Tuindorp Oostzaan. Het is wel zorgwekkend dat ze zeggen: 'dat moeten we later nog maar eens bekijken.'" Volgens de woordvoerder van wethouder Eric van der Burg (Ruimtelijke Ordening) wil de gemeente pas over deze kwestie besluiten zodra de woningen in de nieuwe buurt Havenstad af zijn. Kok: "Dat betekent dat een mogelijke brug in West er binnen tien jaar nog niet is. Terwijl het natuurlijk onzin is om te denken dat daar nu nog niet genoeg mensen wonen." "Er moeten minimaal twee of drie verbindingen komen", zegt ook Sander Groet, mede-initiatiefnemer van de A'DAM Toren. "Hoe fantastisch het ook is dat er nu één brug komt, het is niet voldoende." Groet is ook pleitbezorger van een passage onder het IJ. De tunnel die hij en anderen in gedachten

hebben, zou naast ruimte voor fietsers en voetgangers ook plek aan winkeltjes en eettentjes bieden en vanuit het Centraal Station het IJ in lopen: "een verlenging van de rode loper". Het college geeft hier momenteel geen voorkeur aan, zegt een woordvoerder. Volgens Groet een gemiste kans. "De tijd zal het leren, uiteindelijk zal je zien dat er wel een verbinding achter Centraal Station komt. Je kunt de ponten niet voor eeuwig uitbreiden. En het aantal mensen dat de pont neemt, blijft maar toenemen."

Ook Lucas Hendricks, directeur van ketenbroedplaats A Lab achter de A'DAM Toren, vreest dat deze ene brug de druk niet gaat ontlasten. "Deze brug alleen houdt de stad bij elkaar, maar ze verbindt niet. Het idee is nou juist dat we één Amsterdam krijgen. Dat we niet meer spreken van Amsterdam-Noord. De oplossingen die het college prefereert, zijn niet krachtig genoeg." Het voorkeursplan van het college ligt nu open ter bespreking. Komende zomer legt het college zijn plannen aan de gemeenteraad voor. Volgens een woordvoerder moet de eventuele brug over vier tot vijf jaar klaar zijn. Een uitbreiding van de ponten zou al eerder moeten gebeuren, in 2019. Het nieuws betekent voor Bas Kok en 'Brug over het IJ' dat ze zich gaan inzetten voor een brughoogte die onder de tien meter blijft en ze blijven strijden voor een tweede brug in West. Kok: "Met rationele argumenten in plaats van met ludieke acties. Dat werkt beter hebben we gemerkt. Want we zien de bui al hangen dat het nu bij één brug blijft. En dat is een halve oplossing." ■



Brug over het IJ: één van de vele voorgaande ontwerppogingen

BRUGGEN

