Deze serie artikelen wordt verzorgd door de Technische Commissie 1 (Duurzaamheid) van Bouwen met Staal. Doel is de raakvlakken tussen duurzaamheid en het constructeursvak zichtbaar te maken en praktische handvatten te bieden voor het formuleren van oplossingen. De TC1 bestaat uit: Bart van Leeuwen (voorzitter), Movares; Malcolm Aalstein, Ingenieursbureau Amsterdam; Elise Bilardie, IMd Raadgevende Ingenieurs; Mark van der Heijde, Movares; Jan Willem Hoekstra, Van Rossum Raadgevende Ingenieurs; Jan-Pieter den Hollander, Bouwen met Staal; Thijs Huijsmans, DHV; Hilbert-Jan Kuijer, ABT; Bart Spaargaren, Grontmij; Wouter Visser, Iv-Consult.

Een volhoudbaar brugontwerp

Een brug is in de gebruiksfase van nature energiezuinig, maar het minst flexibel en 'toekomstvast' van de infrastructurele keten. Vooral door conceptueel anders te denken zijn nog wel degelijk verbeteringen mogelijk. Een afweging van duurzaamheidsconcepten.

ir. M.C. Aalstein en ing. B. Spaargaren
Malcolm Aalstein is senior strategisch adviseur bij Ingenieursbureau Amsterdam, Bart Spaargaren is adviseur werktuigbouw bij Grontmij Nederland in De Bilt.

Vergeleken bij de kantoren- en woningbouw is duurzaamheid in de infrastructuur nog lang geen *common practice*, maar hier liggen de vraagstukken ook anders dan bij gebouwen. In dit artikel behandelen we de duurzaamheidsconcepten die volgens ons relevant zijn voor het ontwerp, de bouw en het gebruik van de brug. Vrij vertaald zegt de Brundtlanddefinitie over duurzaamheid dat we in het hier en nu onze zaken zodanig regelen dat we de rekening van ons handelen niet afwentelen op toekomstige generaties. De Zuid-Afrikanen hebben een woord dat de lading nog beter dekt: 'volhoudbaarheid'. Een manier om gevoel te krijgen voor duurzaamheid bij bruggen is te kijken naar de aspecten die bijzonder zijn aan bruggen. Over het algemeen zijn het materiaalintensieve objecten waarin tonnen staal en beton gaan zitten. Daarnaast kost het maken van een brug veel energie. De verwerking van al dit materiaal veroorzaakt milieuschade en heeft naast de uitstoot van CO_2 ook andere schadelijke emissies naar grond, water en lucht tot gevolg. Het energiegebruik in de gebruiksfase van bruggen valt in het niet bij de energie die in de fabricage en bouw zit. In de gebruiksfase beperkt het verbruik zich hooguit tot verlichting en bij beweegbare bruggen tot het openen en sluiten: een markant verschil met gebouwen. Significant is ook dat de kosten voor beheer en onderhoud fors kunnen oplopen.
Voorts blijken bruggen de minst flexibele of 'toekomstvaste' schakels in de infrastructurele keten. In de omkering van deze vraagstukken vinden wij de aanzet tot de duurzaamheidsconcepten voor de brug.

Duurzaam materiaalgebruik

Het ligt voor de hand om voor een meer duurzame brug het grondstofverbruik terug te dringen, maar dit geeft het duurzaamheidsdenken nog geen onderscheidende impuls. De prikkel om minder materiaal te gebruiken zit immers al in de genen van de constructeur ingebakken: een slankere brug is minder zwaar, heeft kortere aanbruggen, is goedkoper en oogt nog eens eleganter. Een andere insteek is de materiaalkeuze. Welk constructiemateriaal geeft de laagste CO_2-uitstoot en schadelijke emissies, beschouwd over de volledige levensduur van de brug? Dus van grondstoffenwinning, transport, fabricage en bouw, tot en met de sloop van de brug. Het antwoord hierop is lastig te geven. Welk materiaal milieutechnisch het beste presteert, hangt samen met de functie, de overspanning en de economische levensduur van de onderdelen van de brug. De keuze voor beton, staal, hout of een (kunststof)composiet kan zijn ingegeven doordat een brug bestemd is voor langzaam of voor treinverkeer (waarbij aspecten als vermoeiing en doorbuiging een bepalende rol spelen) of omdat het om een kleine of juist zeer grote overspanning gaat (en eigengewicht en stijfheid doorslaggevend zijn). Ook kan voor de hoofddraagconstructie een ander materiaal als milieuvriendelijk uit de bus komen, dan voor het brugdek. Er is inmiddels een aantal onderzoeken uitgevoerd naar de milieuprestaties van een langzaamverkeerbrug van een bescheiden overspanning (2x13,5 m). De resultaten wijzen er op dat voor dit type brug de kunststofcomposieten het twee keer zo goed doen als de stalen en betonnen variant (die beide vrijwel even slecht scoren)[1]. Op dit moment loopt er een onderzoek bij Agentschap NL waarin de milieuprestaties van verschillende materialen als constructiemateriaal voor een verkeersbrug met een overspanning van 230 m met elkaar worden vergeleken. De ontwerpen zijn gebaseerd op dezelfde pve, de varianten zijn dus vergelijkbaar. Ingenieursbureau Amsterdam maakt het 'stalen' ontwerp.

Traditie in hoogwaardig hergebruik

Nog duurzamer dan het bouwen met een materiaal met een lage milieu-impact is het 'niet-bouwen' of het hoogwaardig hergebruik van bestaande constructiedelen. Dit concept staat centraal in de Cradle-to-Cradle-filosofie. In de bruggenbouw is het hoogwaardig hergebruik echter al meer dan 100 jaar gebruikelijk. Zie de advertentie die op vrijdag 2 april 1897 verscheen in het *Nieuws van de Dag* (*afb. 1*). Door de verbreding (van 7,8 naar 12 m) van de Sluis Spaarndam zou de dubbele ijzeren ophaalbrug na slechts 7 jaar overbodig worden. De aannemer zag toen al in dat het zonde zou zijn deze bruggen verloren te laten gaan en besloot tot de verkoop.
Een ander voorbeeld is het hergebruik van twee ophaalbruggen van Rijkswaterstaat over de sluis van Harderwijk (*afb. 2*). Die waren overbodig geworden na de aanleg van een aquaduct. De bruggen zijn in 2003 door Grontmij geïnspecteerd en hieruit bleek dat ze nog niet aan het einde van hun levensduur waren. Eén van deze bruggen is een jaar later hergebruikt bij de Ketelsluis in Dronten, ter vervanging van de vaste betonnen brug over de sluiskolk, zodat de achtergelegen scheepsreparatiewerf beter bereikbaar werd voor zeilboten. Weer een ander mooi voorbeeld van een hergebruikte brug is de in 2008 geplaatste ophaalbrug bij het KNSF-terrein in Muiden (*afb. 3*). De firma Gebr. Schouls verplaatste de uit 1944 daterende brug van Vrouwenakker naar Muiden. Eén van de laatste in zijn soort bewaard gebleven stalen spoordraaibruggen in Amsterdam, nabij het Westerdok, dient sinds 2008 als drager van café-restaurant 'Open'; de uit omstreeks 1922 daterende draaibrug staat permanent open (*afb. 4*). De haalbaarheid van deze bijzondere herbestemming werd door IBA onderzocht en is naar het ontwerp van de Architekten Cie in bouwteamverband met onder meer IMd Raadgevende Ingenieurs en ontwikkelaar/bouwer Heddes Vastgoed verder uitgewerkt[2]. Een ander voorbeeld is het stalen brugdek van een tijdelijke brug, nodig voor de bouw van het Arena-stadion, die is hergebruikt als dek voor een tijdelijke fietsenstalling op de Zuidas (*afb. 5*).

Eigentijdse anticipatie

De voorbeelden illustreren dat in de wereld van stalen bruggen hoogwaardig hergebruik al langer mogelijk is. Nieuw is de invalshoek om vooraf in de ontwerpfase te anticiperen op hergebruik en flexibiliteit van de constructie. De opdrachtgever, architect en constructeur stellen zich de vraag: hoe is deze brug zodanig vorm te geven dat de constructie eenvoudig is aan te passen aan gewijzigde behoeften en dat de brug of onderdelen daarvan, na bewezen diensten elders op een hoogwaardige manier kunnen worden ingezet?
De constructieve opzet van de Brug Oostelijke Kruising Zuidas is hiervan een concreet voorbeeld (*afb. 6*). De brug, door Hans Moor Architects en IBA ontworpen in opdracht van Dienst Zuidas als een belangrijke schakel in de hoofdinfrastructuur van de nuts en energie-infrastructuur in de Zuidas, dient de kruising van het kabel- en leidingennetwerk over het metro-, trein- en snelwegtracé in de Dokzone te faciliteren en de bouw van het Zuidasdok mogelijk te maken. De brug is dus tijdelijk. In de eindsituatie worden de kabels en leidingen ondergebracht in de constructie van het Dok. Het ontwerp bestaat uit een 230 m lange vakwerkligger. Er is gekozen voor het mechanische model, waarbij de twee uiteinden/opleggingen zijn ingeklemd. Niet alleen kan de brug daarmee zo slank mogelijk worden gedimensioneerd, tevens krijgt de brug een dynamischer uiterlijk. De Oostelijke Kruising heeft een heldere functie; kabels van de ene kant van de Zuidas naar de andere kant vervoeren.
Tijdens de uitvoering van het Zuidasdok zal de ligging van de onderliggende configuratie van wegen en sporen een aantal keren wijzigen. Om dit te accommoderen, moeten tussenpijlers van de brug gemakkelijk van plek kunnen veranderen en zijn daarom ontworpen om in horizontale richting te kunnen verschuiven (*afb. 7*). Voor deze flexibiliteit is plaatselijk in de brugconstructie het vakwerk fijnmaziger gemaakt. De steunpunten kunnen binnen deze zone nagenoeg overal worden geplaatst, zonder dat dit aanpassingen aan de hoofddraagconstructie vergt.
Zodra de kabels en leidingen op hun definitieve plek liggen, kan de brug worden verwijderd en op een andere locatie ingezet.
Voor maximaal hoogwaardig hergebruik is

IJzeren Ophaalbrug.
Wegens vergrooting Sluis Spaarndam te Koop: een dubbele IJzeren Ophaalbrug, gemaakt in 1890. Sluiswijdte 7.80 M. Br. fro. aan het adres van A. DE GROOT Cz., te Spaarndam. (9395

1. Advertentie 'IJzeren Ophaalbrug' uit het Nieuws van de Dag *van vrijdag 2 april 1897.*

2. Een van de twee ophaalbruggen uit Harderwijk is in 2004 herplaatst bij de Ketelsluis in Dronten.

Literatuur
1. R. A. Daniel, *A Composite Bridge is favoured by Quantifying Ecological Impact*, TRB (International Association for Bridge and Structural Engineering), Berkshire (UK) 2010. 2. R. Treels en R.H. Wiltjer, 'Voor altijd open', *Bouwen met Staal* 203 (2008), p. 38-41.

3. Gebr. Schouls heeft de uit 1944 daterende brug uit Vrouwenakker in 2008 verplaatst naar het KNSF-terrein in Muiden.

Foto: Pieter Kers

5. Voor een tijdelijke fietsenstalling bij de Amsterdamse Zuidas zijn dekken gebruikt van een eveneens tijdelijke brug bij de bouw van het Arena-stadion.

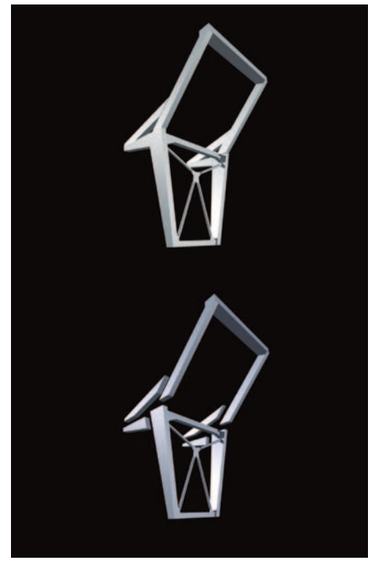
4. De stalen spoordraaibrug van het type 'Joosting'; hergebruikt voor een restaurant in Amsterdam.

de constructie zodanig vormgegeven dat er eenvoudig voorzieningen kunnen worden aangebracht die de passage van voetgangers en fietsers mogelijk maken. Denk daarbij aan een brugdek, trappen en liften. De brug laat zich vanwege de flexibiliteit van de middensteunpunten makkelijk schikken naar een nieuwe omgeving. Daarnaast kan de brug een travee worden ingekort.
Belangrijk bij dit concept is dat demontage eenvoudig is, zonder risico op materiaalschade of inzet van bijzonder materieel. De onderdelen zijn van een formaat dat zich makkelijk laat transporteren. De opgeleverde brug krijgt een 'IKEA-handleiding' met daarin de technische karakteristieken van de onderdelen en aanwijzingen voor de demontage, het transport en heropbouw. Een kind kan de was doen.

Flexibiliteit en adaptief vermogen

Bruggen worden ontworpen en gebouwd om technisch 80 tot 100 jaar mee te kunnen, maar om uiteenlopende redenen is de economische levensduur vaak een stuk korter. Zo zijn in de Amsterdamse binnenstad veel bruggen vernieuwd omdat de toelaatbare belastingen omhoog moesten (vrachtverkeer), er functies werden toegevoegd (een extra rij- of trambaan) of omdat de belastingfrequentie (het aantal voertuigbelastingen per etmaal) was toegenomen. De toename van de belastingen en de belastingfrequenties op brugdekken waren destijds met de meest pessimistische statistische prognoses niet te voorzien. Het zal duidelijk zijn hoeveel stalen brugdekken hierdoor in de problemen zijn gekomen en lijden aan vermoeiing.
Flexibiliteit en adaptief vermogen van bruggen voor wijzigende behoeften en voortschrijdende ontwikkelingen, neemt in belang toe. In een duurzaam ontwerp van een stalen brug is het dek zodanig ontworpen dat – mocht de situatie zich voordoen – het stalen dek eenvoudig kan worden vervangen of versterkt, door een sterkere staalconstructie, hogesterktebeton, kunststofcomposiet of een ander innovatief materiaal dat op dat moment voor handen is. De omkering van deze insteek biedt interessante mogelijkheden.
De hoofddraagconstructie van de brug is op 100 jaar berekend, maar het vermoeiingsbelaste brugdek kan expliciet op een levensduur van bijvoorbeeld 30 jaar worden ontworpen. Door te differentiëren in de technische levensduur van verschillende onderdelen kan er worden bespaard op een zware en dure dekconstructie, waarvan de verkeersprognosen onzeker zijn. Mettertijd kan het brugdek gemakkelijk worden vervangen. De afgedankte brugdelen kunnen ergens anders hoogwaardig worden hergebruikt. Bijvoorbeeld voor een langzaamverkeerbrug.
Om te voorkomen dat de bruggen van nu verkeerskundig de bottlenecks van later worden, is het denkbaar vooraf in brugontwerp voorzieningen op te nemen om voorbereid te zijn op de toekomst. Er zijn voorbeelden te over waarbij al na een paar jaar behoefte bestond aan een extra rijbaan, fietspad of busbaan. De kunst is om deze uitbreidingen mogelijk te maken zonder in het 'hier en nu' kostbare voorinvesteringen te doen. Denk aan het demontabel uitvoeren van kritieke onderdelen of het opnemen van voorzieningen om kritieke onderdelen op een later tijdstip eenvoudig te kunnen versterken. Of het eenvoudigweg maken van ruimtelijk-constructieve reservering om in de toekomst een brug naast de brug te kunnen maken.

6. De (leidingen)brug is een belangrijke schakel voor de nutsvoorzieningen in de Zuidas.



7. Exploded view van de middensteunpunten van de brug Oostelijke Kruising Zuidas.

Energie in de exploitatiefase

In het energieverbruik in de exploitatiefase zit het wezenlijk verschil tussen gebouwen en bruggen. Bij bruggen valt deze in het niet ten opzichte van de energie benodigd voor winning van grondstoffen, fabricage, bouw en sloop. Een brug consumeert energie voor verlichting en voor het eventueel open en dicht gaan. Voor beide is inmiddels zuinige technologie voor handen.
IBA heeft voor de provincie Zuid-Holland onderzoek gedaan naar de terugwinning van de remenergie bij beweegbare bruggen, vergelijkbaar met de terugwinning van remenergie bij de hybride auto. Het onderzoek bestond uit het meten en narekenen van een aantal bruggen representatief voor het areaal van de provincie. De conclusie is helder. De netto energiebesparing is te gering om de investeringskosten goed te maken. Met andere woorden: de bruggen zijn al in ontwerp dermate goed uitgebalanceerd dat ze van nature energiezuinig zijn. Het is dus veel effectiever om de brug goed uit te balanceren en de rotatietraagheid van het brugval in de hand te houden, dan vernuftige maatregelen te treffen om remenergie terug te winnen.

Total Cost of Ownership

De kosten van de exploitatie en het beheer en onderhoud van (met name beweegbare) bruggen bedraagt over de levensduur van de brug een veelvoud van de stichtingskosten. Daarnaast worden al deze kosten door eenzelfde organisatie gedragen, zij het de gemeente, provincie of het Rijk. Total Cost of Ownership (TCO) kan daarmee de financiële drager zijn van het duurzaamheidsdenken in de infrastructuur. Civiel ingenieurs hebben derhalve de verantwoordelijkheid om constructies te ontwerpen die in financiële zin 'volhoudbaar' zijn. Constructies waarbij er geen extreme beheerskosten worden afgewenteld op toekomstige generaties.
De afweging van alternatieven dient in de ontwerpfase dus verder te gaan dan inpassing, maakbaarheid, risico's en stichtingskosten. Een gedegen TCO-gedreven ontwerpproces beschouwt ook de kosten die over de gehele levensduur worden gemaakt voor inspectie, reiniging, regulier en groot onderhoud (zoals de vervanging van de conservering en kostenintensieve onderdelen als de slijtlaag, voegen, opleggingen, werktuigbouwkundige en elektrische installaties, enzovoort), maar ook kosten van exploitatie, zoals het energieverbruik in de gebruiksfase, afschrijving van inspectie- en onderhoudsmaterieel en personeelskosten. Het beschouwen van de kosten voor tijdelijke maatregelen tijdens (groot) onderhoud, de kosten voor uitbreiding of upgrading van de constructie en de restwaarde van onderdelen die worden vervangen, maken de TCO-analyse compleet.
Ten slotte is een belangrijk discussiepunt of de sloopkosten aan het einde van de levensduur horen of juist bij het begin van een volgende object. •