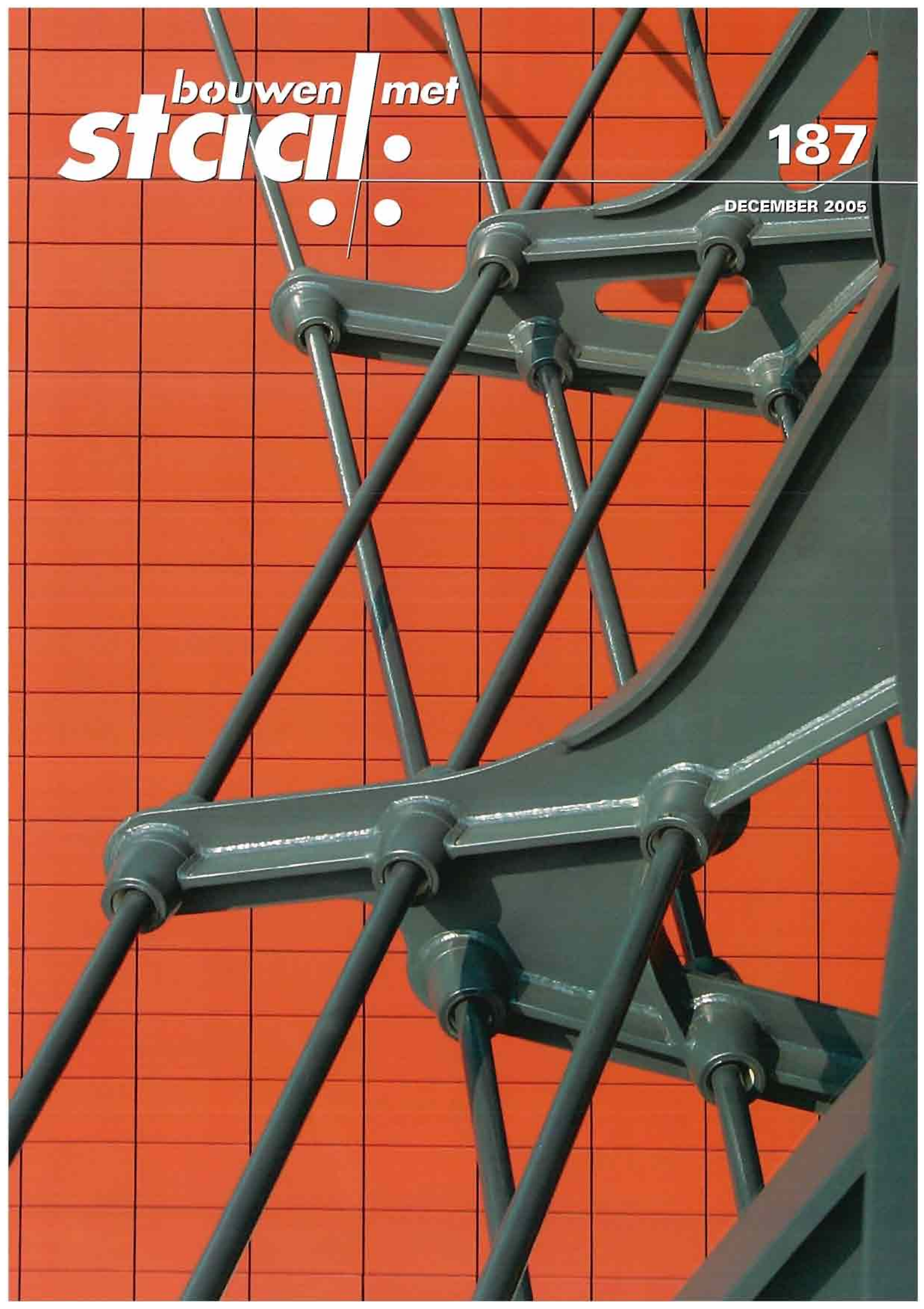


bouwen met
stacil ● ●

187

DECEMBER 2005



Een voetgangersbrug zonder tussensteunpunten: dat was de opgave aan de ontwerpers van de Zouthavenbrug. De brug moest refereren aan de maritieme historie van de plek en licht en transparant ogen. Het beeld dat hierbij als conceptueel vertrekpunt diende, is dat van een loopplank tussen wal en schip. Een visioen dat werd versterkt door het gegeven dat de aanlandingen van de brug niet even hoog liggen en de overspanning niet haaks is. Het dynamische ontwerp bleek na plaatsing de gebruikers ook letterlijk tot trillen te brengen. Over de maatregelen die nodig waren om dat te bestrijden, doen de auteurs verslag in het volgende artikel. Dit is eerst het verhaal van een integraal ontwerpproces dat vertrok met een klassiek beeld, maar resulteerde in een brug voor de toekomst.

Zouthavenbrug, Amsterdam: ontwerp en uitvoering

Klassiek concept dynamisch

*ir. M. Aalstein en
ir. H. van Heeswijk*

Malcolm Aalstein is ontwerpleider bij het Ingenieursbureau Amsterdam

Hans van Heeswijk is architect en directeur van Hans van Heeswijk architecten, Amsterdam

Over het ontwerpconcept voor de Zouthavenbrug is grondig overleg gevoerd met een team van supervisors dat de ontwikkeling langs de IJ-oever begeleidde. In verschijningsvorm zou deze hoogwaardige brug als het ware de ruimtelijke bekroning moeten vormen voor de stedenbouwkundige ontwikkeling van dit gebied. Een zo elegant mogelijke constructie, waarbij de constructie zich zoveel mogelijk onder het loopvlak zou bevinden, was daarbij een belangrijk uitgangspunt.

Het ontwerpteam heeft veel energie in het project gestoken om de brug qua vormgeving en detaillering aan te laten sluiten bij het ambitieniveau van de omgeving. Het resultaat is een integraal ontwerp, waarbij architectonische vormgeving en constructie elkaar versterken. Hierbij is een nauwe samenwerking tussen architect en constructeur uiteraard een voorwaarde.

Het statisch systeem

De brug functioneert als vrij opgelegde ligger op twee steunpunten. De horizontale reacties ten gevolge van temperatuurwisseling in de richting van de brug zijn verwaarloosbaar omdat de brug glijdend is opgelegd in deze richting. Om sowieso de oplegreacties ter plekke van het Muziekgebouw te beperken, bevindt het rolscharnier zich aan die zijde. Belastingen in de asrichting van de brug worden daarom door de vaste oplegging aan de andere zijde bij de Piet Heinkade opgevangen. Horizontale belastingen loodrecht op de

brugas worden wel evenredig verdeeld over de noordelijke en de zuidelijke oplegging.

In de kabels

Omdat het brugdek in feite 'in de kabels hangt', zijn de trekkabels de belangrijkste constructieve onderdelen. In verticale zin werkt de brug als een onderspannen ligger. In zijaanzicht is duidelijk te zien hoe de kabels de momentenlijn volgen. In het midden van de overspanning is de afstand tussen kabels en brugdek met ongeveer drie meter het grootst. De kabels verlopen ook in bovenaanzicht parabolisch en spelen eenzelfde rol in de opvang van krachten in horizontale richting. De ruimtelijke kromming van de kabels draagt tegelijkertijd bij de tot de torsiestijfheid van deze brug.

De brug is ontworpen als kabelconstructie omdat daardoor een zeer elegante en slank gedetailleerde constructie mogelijk werd. Deze hoofdopzet is vervolgens uitgewerkt tot een ruimtelijk bouwwerk waarin de kabelconfiguratie uitwaaiert. Dit driedimensionale verloop zorgt voor een spannend lijnenspel. De kabelconfiguratie is opgebouwd uit twaalf kabels. Deze bundels zijn op hun beurt verdeeld in vier kabelgroepen (twee buiten, twee binnen). In het krachtenspel werkt elke kabelgroep feitelijk als een enkele kabel. Om deze 'kabels' zelf een rank uiterlijk te geven is al tijdens het schetsontwerp besloten hen op te splitsen in drie dunnere kabels. De hieruit volgende keuze per kabel voor het 'full locked coil' kabeltype zonder omhulling, kwam mede



vormgegeven

voort uit deze wens voor slankheid. Een 'locked coil' kabel is namelijk zelf weer samengesteld uit in elkaar grijpende Z-vormige strengen die nauw op elkaar aansluiten. Dit heeft een compacte kabel tot gevolg met een minimale holle ruimte en dus een grote effectieve staaldoorsnede. De diameter van de uiteindelijk toegepaste kabel is 50 mm.

Puur op sterkte beschouwd, had een veel dunner kabelconfiguratie volstaan. Al in het stadium van schetsontwerp is echter onderkend dat deze brug gevoelig zou zijn voor trillingen door voetgangers. Om het dynamische gedrag van de brug gunstig te beïnvloeden, is het kabelsysteem daarom op maatgevende stijfheid ontworpen.

Drukbuizen

De trekkrachten in de kabels worden kortgesloten op drie drukbuizen onder het brugdek. Hiermee is de brugconstructie dus zelfdragend en in zichzelf stabiel. Twee belangrijke redenen leiden tot de keuze om de trekkrachten uit de kabels niet door de landhoofden op te laten nemen. Ten eerste omdat het Noordelijk landhoofd wordt gevormd door het Muziekgebouw. Het afspannen van de horizontale trekkrachten op dit object was uitgesloten. De tweede reden was dat de in zichzelf stabiele constructie volledig gecontroleerd in de fabriek kon worden afgebouwd en voorgespannen om daarna eenvoudig naar de bouwplaats te kunnen transporteren.

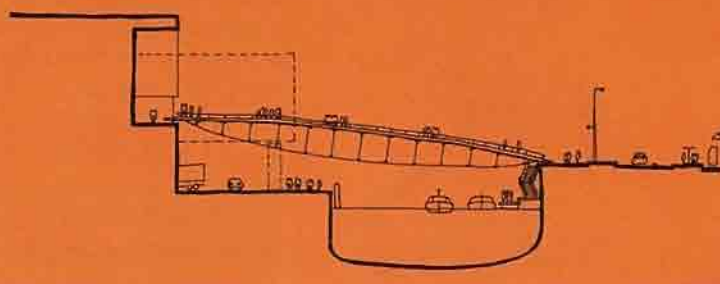
Het primaire drukelement ligt in de as van de brug en heeft een semi-driehoekige doorsnede

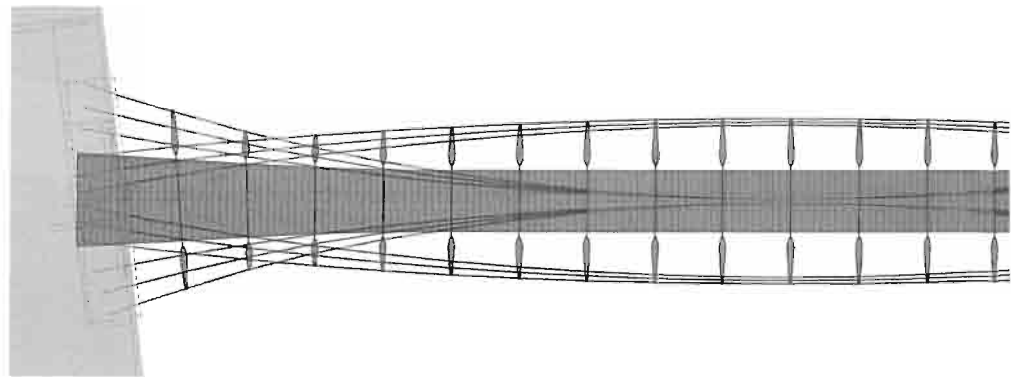
Bij het nieuwe Muziekgebouw

De Zouthavenbrug bevindt zich aan de Kop van de Oostelijke Handelskade in Amsterdam, en verbindt het nieuwe Muziekgebouw aan het IJ met de Piet Heinkade. Op de kade bevindt zich een halte voor tramlijn 26, die via de brug loopt over de Oosterdoksdoorgang. De brug overspant de nog uit te graven Zouthaven in een enkele sprong van circa zestig meter. De functie van de brug is een korte, rechtstreekse verbinding tussen tramhalte en het muziekgebouw.

Hierdoor hoeven bezoekers niet meer helemaal om de Zouthaven heen te gaan vervolgens ook nog het niveauverschil te overbruggen.

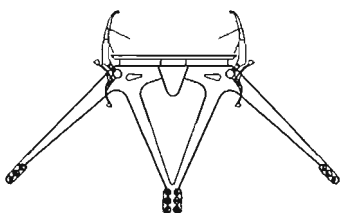
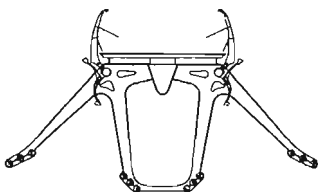
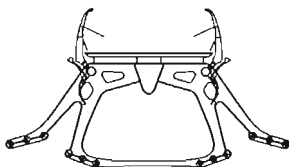
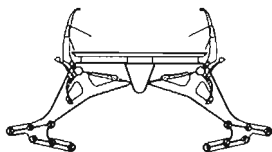
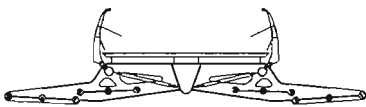
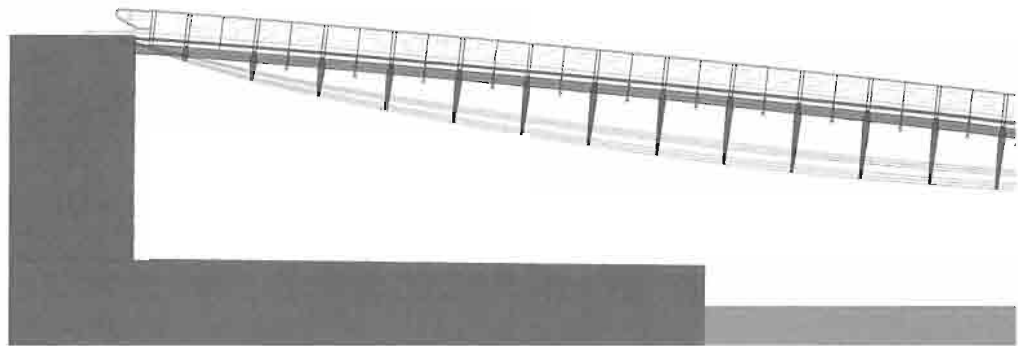
De Oostelijke Handelskade ligt aan het IJ en is tot het eind van de negentiende eeuw het havengebied van Amsterdam geweest. Het gebied ligt op een paar minuten lopen van het Centraal Station. Na de laatste decennia lange tijd grotendeels braak gelegen te hebben, wordt de Oostelijke Handelskade samen met de overige gebieden langs de zuidelijke IJ-oever momenteel ontwikkeld tot een hoogwaardige binnenstedelijke zone. Amsterdam wordt als het ware over de spoordijk heen, weer aan het IJ gelegd. Naast de Oostelijke Handelskade worden ook het Westerdokseiland, het Stationsseiland en het Oosterdokseiland aangepakt. Op de kop van de Oostelijke Handelskade bevinden zich ondermeer het onlangs gerealiseerde Muziekgebouw, een hotel en de nieuwe passagiersterminal voor cruiseschepen. De locatie wordt vervolmaakt door de Zouthaven opnieuw uit te graven en in are te herstellen met aanlegsteigers voor rondvaartboten. Van hieruit kunnen passagiers van cruiseschepen een rondvaart door de stad maken.





Bovenaanzicht.

Zijaanzicht.



'Amoeba'.

met een hoogte van 700 mm en een wanddikte van 20 mm. De secundaire drukbuizen liggen in dezelfde richting aan weerszijden van het brugdek en hebben een diameter van 194 mm.

Jukken

De brug heeft aan beide uiteinden een T-vormige beëindiging. De primaire functie van deze op buiging belaste eindjukken is het overbrengen van de trekkrachten uit de kabels naar de drukbuizen. De eindjukken bestaan uit naar buiten toe verjongende rechthoekige stalen kokers, waarin de verankeringen voor de kabels en de brugopleggingen zijn verwerkt. De jukken als zodanig zijn aanzienlijk grote constructies (10,8 x 2,3 x 0,3 m). Het juk aan de Piet-Heinkade ligt in een ondergrondse betonnen bak. De constructie is onder het trottoir verstoppt met uitneembare prefabplaten. Het andere juk is weggewerkt onder de houten vloerafwerking van het promenadedek van het Muziekgebouw.

In de jukken zitten de ankerkoppen van de twaalf kabels verwerkt. Daar waar de ankerkoppen in de jukken steken, is de jukconstructie aan de bovenkant opengewerkt zodat de ankerkoppen goed bereikbaar zijn voor onderhoud. Elk juk steunt af op twee oplegblokken. Aan de Noordzijde liggen deze blokken precies boven een repetitieruimte in het Muziekgebouw waaraan strenge eisen betreffende geluidsisolatie worden geteld. Om het voortplanten van brugtrillingen te voorkomen, is de brug hier op geluidsisolerende rubbers gelegd.

Luiken in de voorplaat van de jukken maken inspectie en onderhoud mogelijk.

Spanten als een amoebe

De drukbuizen liggen op spanten. Aangezien de spanten de drukbuizen en kabels onderling op gezette afstand koppelen, ontstaat een samenhangend geheel. In het vormgeven van de spanten heeft de architect ingespeeld op het driedimensionale verloop van de kabels. De spanten die dichtbij de opleggingen liggen, hebben een afgeplat amoebe-achtig aanzicht. Naarmate de spanten dichter naar het midden van de brug komen, ontwikkelen deze uitstulpingen zich tot slanke spantbenen. De spanten vormen samen met de drukbuizen het skelet van de brug.

De kabels worden door 400 mm lange kabeldoorvoeren door de spanten geleid. Deze stalen cilinders zijn aan de binnenkant afgewerkt met een sferisch gevormde kunststofring die een glijdende oplegging van de kabel verzorgt en tevens de hoekverdraaiing van de kabel begeleidt. Een te abrupte hoekverdraaiing geeft namelijk ongewenste buigspanningen in de kabel, die de trekcapaciteit beperken.

Conservering

De staalconstructie is voorzien van een gesloten conservering, die is opgebouwd uit een zink/aluminiumlaag, een epoxycoating, grijs blauw metallic finish en een blanke lak ter afsluiting. De laagdiktes bedragen respectievelijk 80, 80, 80 en 40 micron.

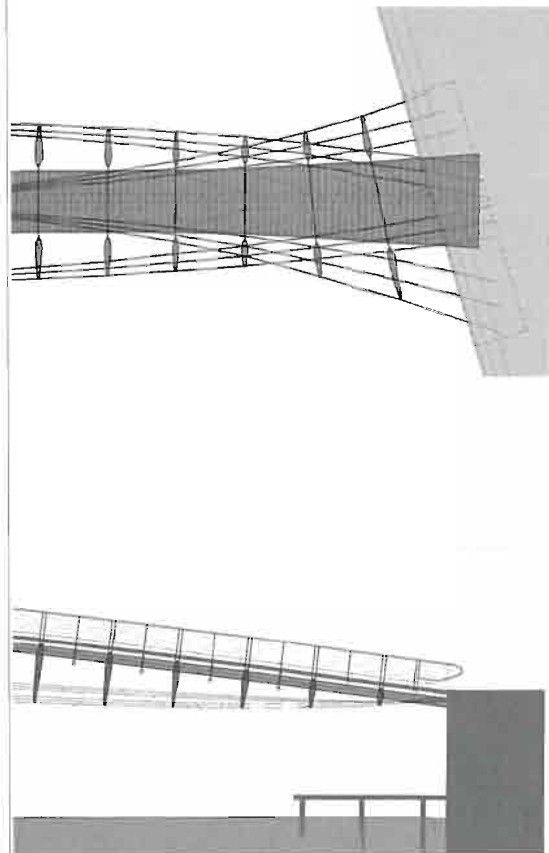


foto: Hans van Heeswijk



Silhouet.

Op kabels is geen kunststofomhulling aangebracht. De strengen van de kabels zijn afzonderlijk gegalvaniseerd. Na het voorgespannen zijn de kabels met de roller in kleur afgeschilderd.

Elk spant uniek

Deze brug heeft een gecompliceerde vormgeving. De spanten hebben een afwijkende profilering en staan onder een variërende hoek ten opzichte van de brugas. Ondanks het feit dat niets aan deze brug recht is en vrijwel elk spant uniek, heeft de aannemer met een zorgvuldig uitgekende fabricage een prima resultaat weten te bereiken.

Vanwege de driedimensionale kromming van de kabels zou bijna elke van de 228 kabeldoorvoeren een unieke ruimtelijke hoek krijgen. Om de vormcomplexiteit te beheersen, heeft de aannemer voorgesteld het aantal unieke hoeken tot een minimum terug te brengen. Dit betekent dat een groot aantal van de kabeldoorvoeren een net iets andere oriëntatie heeft dan de kabel die er doorheen voert. Een gevoelig spel, want een te groot verschil in oriëntatie introduceert onacceptabele buigspanningen in de kabel en beperkt – zoals eerder gesteld – het draagvermogen.

Uit onderzoek bleek een reductie tot vijftien verschillende hoeken, zowel ten aanzien van de opvang in de kunststof ringen als in esthetisch opzicht, acceptabel.

Kabels spannen

Een bijzonder moment tijdens de realisatie was het spannen van de kabels. De benodigde

voorspanning in de kabels wordt ondermeer bepaald door de gewenste zeeg in de eindsituatie. Deze zeeg vanuit het ontwerp bleek alleen haalbaar met afspannen na feitelijke plaatsing. De twaalf kabels zijn in drie fasen nagespannen. Telkens zijn successievelijk vier kabels aangespannen. Bij het aanspannen van deze kabels neemt door de verkorting van de brug de spanning in de overige kabels iets af. Om het aantal span-iteraties te beperken, zijn de kabels in eerste instantie op een gecalculerde overspanning gebracht. Bij het aantrekken van de laatste set kabels zorgde het ontspanningseffect ervoor dat de andere kabels vanzelf op de juiste spanning uitkwamen.

Voor het voorlopig aanspannen van de kabels zijn hydraulische vijzels gebruikt. Vanwege de beperkte ruimte in de jukken kon de vijzel voor het definitief afspannen een maximale slag van slechts vijftig millimeter maken. Het afspannen moest om laatstgenoemde reden handmatig gebeuren. Na elke stap is de vervorming van de brug gecontroleerd met het meetinstrument *total station*.

De volledig afgebouwde brug is van de fabriek te Schiedam over water naar de Oostelijke Handelskade verscheept. De 109 ton zware constructie is met behulp van twee dolly's en twee mobiele kranen opgehesen en in positie gebracht. ●

Projectgegevens

- Opdrachtgever Ontwikkelingsbedrijf Gemeente Amsterdam
- Architect Hans van Heeswijk Architecten, Amsterdam
- Constructief ontwerp Ingenieursbureau Amsterdam
- Hoofdaannemer BAM Steel Structures
- Ontwerp dempers Sonus
- Aanneemsom € 878.500 excl. btw

Technische gegevens

- Overspanning 61 meter
- Staalgewicht 91 ton (excl. kabels)
- Totaalgewicht 113 ton (incl. afbouw)

Vaak is de oplevering van een brug voor de ontwerpers een feestelijke afsluiting van een project. Bij de Zouthavenbrug begon toen juist een heel spannende periode, omdat tijdens het ontwerpproces al was berekend dat er een gevoeligheid voor trillingen zou zijn. Dit artikel beschrijft het proces van het voorspellen en inmeten van de dynamische respons van de brug – gemeten op locatie – en de daarop getroffen maatregelen. Alleen de trillingen door voet- en fietsgebruik worden besproken. Tijdens het ontwerp van de brug zijn trillingen door wind ook onderzocht, maar niet risicovol gebleken.

Zouthavenbrug, Amsterdam: dynamische analyse en controle

Over kritische lopers, hufters en

ir. M. Aalstein en

ir. H. van Kleef

Malcolm Aalstein en Hans van Kleef zijn respectievelijk ontwerpleider en staalconstructeur bij Ingenieursbureau Amsterdam.

Al tijdens het schetsontwerp was het duidelijk dat deze brug gevoelig zou zijn voor trillingen veroorzaakt door voetgangers. Een prikberekening op de achterkant van een sigarenkistje wees uit dat de eerste verticale frequentie rond de 1,4 Hz zou liggen. Dit is aanzienlijk lager dan de voor voetgangersbruggen als vuistregel geldende ondergrens van 4 Hz.

De opening van de Millennium Bridge in Londen speelt mee op de achtergrond. De Millennium bridge vertoonde op de dag van de opening een aanzienlijke horizontale trilling ten gevolge van de grote massa voetgangers die de brug belastte. Deze trilling maakte normaal lopen over de brug nagenoeg onmogelijk.

Net als de Londense brug is de Zouthavenbrug een lichtgewicht stalen voetgangersbrug met een grote overspanning en vindt de krachtsafdracht via kabels plaats. Tijdens het voorlopig ontwerp is een modaalanalyse uitgevoerd met behulp van een eenvoudig computermodel. De resultaten bevestigden de verwachting; de eigenfrequenties van deze buigslappe brug vallen samen met het belastingspectrum van voetgangers.

Om deze reden is vanaf het begin af aan rekening gehouden met het aanbrengen van voorzieningen voor extra demping. Ook is er tijdens het ontwerp gestuurd op gunstige beïnvloeding van het dynamisch gedrag. Samen met de architect is een evenwicht gezocht tussen de gewenste rankheid van de kabels en een afdoende stijfheid van de brug. Eigenfrequentie neemt namelijk toe met stijfheid.

Analyse belasting en vervorming

In het definitief ontwerp is een uitgebreide dynamische analyse verricht aan de hand van een uitgebreid driedimensionaal computermodel. De analyse is uitgevoerd volgens de richtlijnen van de Praktijkrichtlijn PrEN 1991-2. Voetgangers veroorzaken bepaalde belastingspectra tussen de 0,7 en 4,0 Hz. De verwachte eigenfrequenties van de constructie zijn in *grafieken 1 en 2* in verticale en horizontale richting apart vergeleken met deze frequentiespectra. Uitgezet op de verticale as lopen deze eigenfrequenties van boven naar beneden op en kennen ieder een specifieke verticale of horizontale vorm. Bovendien kennen de verticale frequenties vervolgvormen als gedraaide vormen (hier als vierde vorm aangeduid).

Op de horizontale as van de grafieken staat ook aangegeven met welke frequenties de uit de tabel overgenomen voetgangersbelastingen, lopen, joggen en sprinten overeenkomen. Het is zaak om niet één van de eigenfrequenties van de constructie samen te laten vallen met de frequenties aan weerszijden van en inclusief het kritische lopen. In de grafiek is dit spectrum weergegeven als een gebied lopend van oranje naar rood tot in oranje.

De zwarte ruitjes in de eerste grafiek markeren het samenvallen van frequenties van constructie en belasting. Hieruit blijkt dat met name de tweede verticale mode (1,660 Hz) en de eerste torsie mode (2,620 Hz) kritisch zijn. Ondanks het feit dat de eerste verticale (1,277 Hz) buiten het frequentiespectrum van de voetgangers

De Zouthavenbrug in aanbouw met links het Muziekgebouw.



foto: Hans van Heeswijk



de frequentie van een brug

valt kan deze worden aangetikt door een 'dubbele' loopfrequentie 2,56 Hz, in de grafiek als 2,6 Hz. Uit de tweede grafiek blijkt verder dat de horizontale modes geen noemenswaardig risico vormen, aangezien deze buiten het oranje gebied liggen.

De vervormingsdiagrammen vertalen de cijfers in 'golven'. De eerste zes van de zeven vormen zijn geplot als 'overdreven' vervormingsdiagrammen in zij- of bovenaanzicht. De eerste drie vormen in zijaanzicht tekenen zich af als een halve, een hele en anderhalf maal een staande golf.

Specifieke responsie-analyse

Om te kunnen voorspellen of een bepaalde eigenfrequentie daadwerkelijk aanleiding geeft tot onacceptabele trillingen, moeten de feitelijk optredende versnellingen worden uitgerekend en getoetst. Deze responsie-analyse per zwart ruitje uit de grafieken 1 en 2 wordt uitgevoerd aan de hand van genormeerde belastingen. Bij deze belasting wordt onderscheid gemaakt tussen een geconcentreerde groep voetgangers (als het ware een 'puntlast') of een continue stroom voetgangers ('vlaklast').

Dergelijke dynamische belastingen zijn afhankelijk van de frequenties. In het geval van voetgangersbelastingen is de dynamische last afhankelijk van de eerder besproken belastingfrequentie, oftewel de loopfrequentie. Simpel gezegd stelt de PrEN 1991-2 dat naarmate deze loopfrequentie zijn gemiddelde waarde nadert (zie het globaal gemiddelde uit tabel

Bachman uit de richtlijn), de kans op synchronisatie tussen de voetgangers groter is. Synchronisatie geeft op zijn beurt weer een toename van de dynamische belasting. Vandaar de grote verschillen in belasting bij eenzelfde aantal personen!

De ernst van de trillingen is getoetst aan de comfortcriteria uit de PrEN 1991-2. Deze zijn net als de dynamische belastingen frequentieafhankelijk gesteld van de eigenfrequenties oftewel de optredende trillingen.

Voor verticale trillingen geldt een maximaal toelaatbare versnelling van 7% g ($0,7 \text{ m/s}^2 = 0,07 \times 9,8 \text{ m/s}^2$). Voor trillingen lager dan de kritische loopwaarde 2 Hz is de eis toenemend strenger. Voor horizontale trillingen (met een drempelwaarde van 1 Hz behorende bij lopen) ligt die eis sowieso lager met een maximaal toelaatbare versnelling van 1,5% g.

In elke dynamisch belaste constructie vindt evenwel demping plaats, die het nadelige effect van de tijdsafhankelijke belasting in gunstige zin compenseert en daarmee van grote invloed is op de werkelijke respons van het systeem.

Inherente demping

Het meest precaire aspect van de modaalanalyse is het voorspellen van deze inherente demping (ζ) van de constructie. Deze waarde is afhankelijk van een aantal lastig in te schatten karakteristieken zoals de inwendige wrijving van het materiaal en de speling in de verbindingen. In tabel 3 staat de berekende respons van de constructie ten gevolge van de bovenstaande

belastingen. Hierbij is de in de PrEN geadviseerde demping van de constructie van $\zeta = 0,005$ ($\delta = 0,03$) aangehouden. Recente publicaties op dit gebied wijzen echter uit dat de demping in de praktijk nog lager en daarmee ongunstiger uit kan vallen (zie bijvoorbeeld het artikel 'Vortex excitatie trillingen getemd', *Bouwen met Staal* 171, april 2003). Daarom is voorzichtigheidshalve ook gerekend met een conservatieve waarde van $\zeta = 0,002$. De berekende respons oftewel amplitude is bij laatstgenoemde waarde ongeveer 2,5 keer de onderstaande waarden.

In de laatste kolom van tabel 3 is de hoeveelheid demping aangegeven die extra moet worden aangebracht om de optredende versnellingen en hiermee gepaarde gaande amplitudes (uitwijkingen) in te dammen. Tabel 3 voorspelt dat met name de responses voor de eerste (1,28 Hz) en de tweede verticale eigenmode (1,66 Hz) ongunstig uitvallen. De berekende versnellingen overschrijden het comfortcriterium ruimschoots. De horizontale versnelling overschrijdt de comfortgrens eveneens, maar de amplitude is klein en het is daarom niet waarschijnlijk dat deze trilling tot ongemak zal leiden. Overigens is met behulp van de staalspanningen die uit de responsieberekeningen volgen, de trillende constructie ook nog op sterkte en vermoeiing getoetst. Hieruit bleek dat de trillingen geen risico vormen voor de duurzaamheid van de brug. De trillingen benadelen alleen het comfort van de gebruiker.

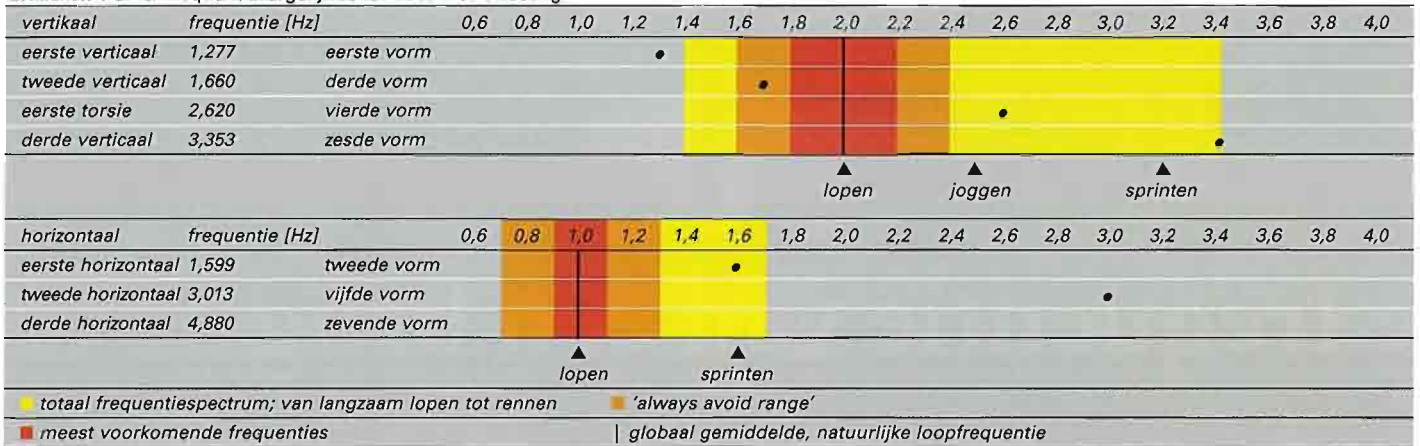
Tabel 1. Belastingfrequenties van voetgangers naar Bachman.

belastingsspectrum	verticaal	horizontaal
totaal frequentiespectrum	1,4 - 4,0 Hz	0,7 - 1,7 Hz
'always avoid range'	1,6 - 2,4 Hz	0,7 - 1,3 Hz
meest voorkomend	1,8 - 2,2 Hz	0,9 - 1,1 Hz
globaal gemiddelde	2,0 Hz	1,0 Hz

Tabel 2. Aangehouden dynamische belastingen volgens de PrEN per eigenfrequentie constructie

frequentie	richting	belasting ten gevolge van een groep (8-15 personen)	belasting ten gevolge van een continue stroom voetgangers
1,28 Hz	eerste verticaal	560 N	25 N/m ²
1,60 Hz	eerste horizontaal	70 N	3 N/m ²
1,66 Hz	tweede verticaal	840 N	38 N/m ²
2,62 Hz	eerste torsie	840 N	38 N/m ²
3,35 Hz	Derde verticaal	230 N	11 N/m ²

Grafieken 1 en 2. Frequentievergelijk constructie met belasting.



Trends in brugontwerp, becommentarieerd door de technaut

Het is inmiddels gemeengoed dat bij het ontwerp van bruggen de architect het voortouw heeft overgenomen van de constructeur. Opdrachtgevers hebben immers de kracht van een goed vormgegeven brug ontdekt. De brug is niet alleen een puur functionele verbinding tussen twee punten, maar ook een landmark met een krachtige bijdrage aan de identiteit van de omgeving. Het meest bekende en succesvolle voorbeeld hiervan is de Erasmusbrug als het symbool voor Rotterdam. En als meest extreme voorbeeld in Nederland, de drie extravagante Calatravabridgen in de Haarlemmermeer.

Een tweede ontwikkeling die van grote invloed is op ontwerpvrijheden binnen bruggen is de voortschrijdende techniek. Materialen worden sterker en duurzamer, 3D-ontwerp tools worden geavanceerder en toegankelijker en de fabricagemethoden flexibeler en goedkoper. Samengenomen vormen al deze ontwikkelingen de stuwende kracht achter steeds ranker wordende bruggen waarvan de vormgeving constructief minder voor de hand ligt en vrije overspanningen toe kunnen nemen. Een niet te onderschatten gevolg hiervan is dat bruggen – met name voetgangersbruggen – steeds gevoeliger worden voor trillingen. Zijn we doorgeschoten?

Met de beschikbaarheid van geavanceerde (computer)simulaties, windtunnels en de ervaring die wereldwijd op dit gebied is opgedaan, is voldoende know how voorhanden om de dynamische respons van bruggen te voorspellen. Ook de technologie voor het dempen van ongewenste trillingen is voor handen. Daarmee is de weg vrij voor het verantwoord ontwerpen van lichte, slappe constructies. Hierbij geldt echter als voorwaarde dat de dynamische analyse al in het schetsontwerp integraal onderdeel vormt van het ontwerpproces. Daarmee is het zaak om zowel in technische, architectonische als financiële zin rekening te houden met wenselijke demping en beperkte aërodynamische gevoeligheid van de constructie. • **Malcolm Aalstein**



foto: Rob Hoeksma

Tabel 3. Respons van de constructie bij $z = 0,005$

frequentie	richting	comfortcriterium:	gedrag:	berekende	extra
		maximaal toelaatbare versnelling	berekende optredende versnelling	amplitudes	benodigde demping ter compensatie
1,28 Hz	eerste verticaal	5,7 % g	20,3 % g	32 mm	0,08
1,60 Hz	eerste horizontaal	1,5 % g	2,9 % g	3 mm	0,03
1,66 Hz	tweede verticaal	6,4 % g	28,7 % g	26 mm	0,11
2,62 Hz	eerste torsie	7,0 % g	8,4 % g	3 mm	0,01
3,35 Hz	Derde verticaal	7,0 % g	3,2 % g	1 mm	-

Tabel 4. Vergelijking van voorspelde en gemeten eigenfrequentie en demping.

richting	frequentie [Hz]		demping [%]	
	voorspeld	gemeten	voorspeld	gemeten
eerste verticaal	1,227	1,208	0,500	1,314
tweede verticaal	1,660	1,565	0,500	2,185
eerste torsie	2,620	2,778	0,500	1,042
derde verticaal	3,353	3,204	0,500	0,995
tweede torsie	3,013	3,806	0,500	0,638

Tabel 5. Vergelijking van voorspelde en gemeten versnelling en uitwijking.

richting	voorspelling DO		bijgestelde schatting	
	versnelling [%g]	uitwijking [mm]	versnelling [%g]	uitwijking [mm]
eerste verticaal	20,3	32	14,8	25,3
eerste horizontaal	2,9	3	0,3	0,3
tweede verticaal	28,7	26	18,1	18,8



foto: Hans van Heeswijk

Tuned mass dampers

De respons van de constructie wordt zoals gesteld in hoge mate bepaald door de aanwezige demping. Daar waar het comfortcriterium wordt overschreden, dient dus extra demping te worden aangebracht.

Demping kan op verschillende manieren tot stand komen. Een viskeuze demper is in staat trillingen behorende bij meerdere eigenfrequenties te lijf te gaan. Dit middel moet dan wel worden bevestigd aan een vaste ondergrond. Vanuit de vormgeving van de brug genoot dit niet de voorkeur.

Een tweede mogelijk zijn 'tuned mass dampers' (tmd's). Een tmd is in feite niets anders dan een massa, bijvoorbeeld een stalen blok, die met een veer aan de brugconstructie wordt opgehangen. De grootte van de massa en de stijfheid van de veer worden zodanig gekozen dat deze voorziening bij een specifieke frequentie in tegenfase trilt met de brug. Het effect daarvan is dat de constructie snel 'tot rust' komt. Nadeel van deze ingreep dat per tmd slechts één kritische eigenfrequentie aanpak kan worden. Aangezien hier alleen de eerste en tweede verticale eigenfrequenties demping vereisten, lag de keuze voor de hand. De tmd's zijn onder het brugdek weggewerkt, zonder de vormgeving aan te tasten.

Theorie en praktijk

Ervaring leert dat met name in de dynamica van bruggen theorie en praktijk uiteen kunnen lopen. De eigenfrequenties en de trillingsvor-

men van een constructie zijn redelijk exact te voorspellen. Vereiste grootheden voor stijfheid en massa, en in dit geval de voorspanning in de kabels, zijn tijdens de fase van het definitief ontwerp redelijk in te schatten.

Het voorspellen van de omvang van de respons, en dus de mate waarin de trillingen als storend zullen worden ervaren, is echter een ander verhaal. Deze voorspelling hangt samen, zoals inmiddels aangetoond, met de demping van de constructie.

Ons advies aan de opdrachtgever luidde daarom de brug eerst te monteren en af te werken, de werkelijke respons van de brug door te meten en dan pas te beslissen over de toevoeging van tmd's. Hierop anticiperend is al tijdens het ontwerp rekening gehouden met de extra belasting door vier tmd's. Voor deze elementen van pakweg duizend kilogram per stuk, zijn in de spanten bevestigingspunten opgenomen.

Trillingen: aantikken

Na de montage van de brug is deze in twee stappen doorgemeten. In de eerste praktijkproef is de brug 'aangetikt' met een 5 kg zware hamer. Hierbij zijn bij alle negentien spanten de versnellingen langs beide brugranden gemeten. Dit versnellingsprofiel is teruggerekend naar eigenfrequenties, trillingsvormen en dito demping.

In tabel 4 zijn resultaten van deze meting vergeleken met de waarden uit de dynamische analyse. De voorspelde en de gemeten eigen-

frequenties blijken nagenoeg met elkaar overeen te komen. De werkelijke demping valt (aanzienlijk) hoger uit dan is voorspeld, wat op zich gunstig is te noemen.

De gemeten waarden voor eigenfrequentie en demping zijn vervolgens terug vertaald naar te verwachten versnellingen en uitwijkingen ten gevolge van de geïdealiseerde PrEN belasting. Deze schatting is in tabel 5 uitgezet tegen de in eerste instantie berekende waarden uit de dynamische analyse.

Uiteraard vallen de bijgestelde resultaten door de hogere feitelijke demping binnen de waarden van het definitief ontwerp. Aangezien de waarden van de verticale bijgestelde versnellingen 14,8 en 18,1 die van comfort de restricties 5,7 en 6,4 overschrijden, is hier nog steeds sprake van een risico.

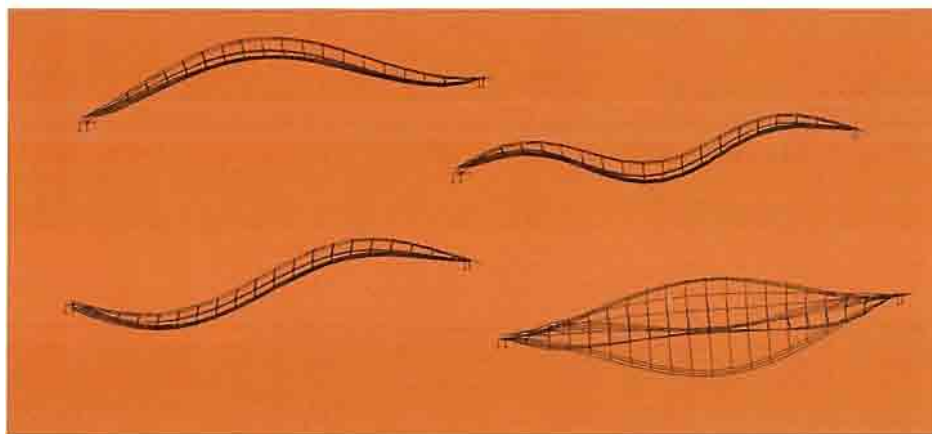
Tweede proef: oneigenlijk gebruik

Met de resultaten van de eerste proef is bewezen dat alleen de eerste en de tweede eigenfrequenties een risico vormen voor het comfort. Omdat het gedrag van de brug in dit stadium een afgeleide was van enkel een hamertik én omdat comfort grotendeels toch een psychologisch fenomeen is, moest een tweede aanvullende looptest uitsluitel bieden.

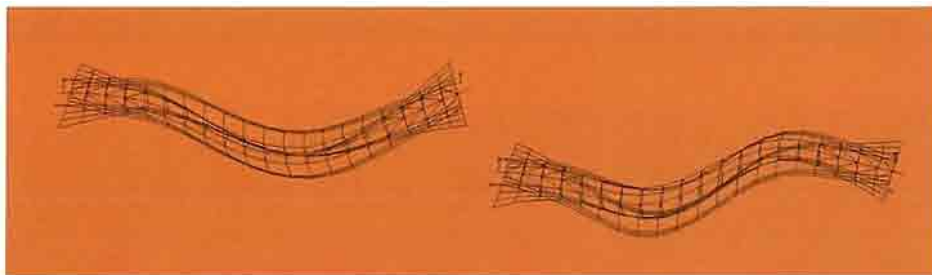
Bij deze tweede praktijkproef is de brug met een groep van zestien personen belast. De grootte van de groep is in overeenstemming met de voor de computerberekeningen aangehouden PrEN normbelasting. Deze 'veranderlijke belasting' heeft in verschillende formaties en met



Figuur 1. Zijaanzicht van de eerste, tweede en derde verticale trillingsvorm (1,28 Hz, 1,66 Hz en 3,35 Hz) en de eerste torsietrillingsvorm (2,62 Hz).



Figuur 2. Bovenaanzicht van de eerste en tweede horizontale trillingsvorm (1,60 Hz en 3,01 Hz).



verschillende snelheden over de brug gelopen. Bij een normale loopsnelheid waren de trillingen nauwelijks merkbaar. Conform de voorspellingen kwam de brug pas voelbaar in trilling toen de testgroep opzettelijk langzaam en in de maat liep. Deze trillingen werden echter niet als storend ervaren. De maximaal gemeten versnelling bedroeg 2% g met een uitwijking van 3,4 millimeter behorende bij de tweede verticale eigenfrequentie. Deze waarden zijn zelfs aanzienlijk lager dan de bijgestelde schattingen van 18,1% g respectievelijk 18,8 mm. Echter, bij de hufteproef was de respons rondt uit spectaculair. De bedoeling van deze proef was het simuleren van oneigenlijk gebruik van de brug. Hierbij is de testgroep geïnstrueerd de brug moedwillig te laten opslingeren door deze geconcentreerd en op een trillingsgevoelige plek aan te stoten. Voor de eerste verticale eigenfrequentie (vervorming als een halve golf-lengte) ligt deze gevoelige plek op de helft van de overspanning. Voor de tweede ligt deze op een kwart van de overspanning. Voor beide eigenfrequenties was de resulterende slingering aanzienlijk. De maximaal gemeten versnelling bedroeg 129% g bij een uitwijking van 259 millimeter (eerste verticale eigenfrequentie). Uit deze resultaten is geconcludeerd dat extra demping aangebracht moest worden. Niet alleen voor de eerste, maar ook voor de tweede verticale eigenfrequentie. Voor de eerste eigenfrequentie om vandalisme te pareren, voor de tweede omdat bij normaal doch intensief ge-

bruik van de brug een reële kans bestaat dat de brug toch in een als onprettig ervaren trilling raakt.

Implementatie onderzoeksresultaten

Er zijn vier dempers op de brug aangebracht. Deze hangen twee aan twee in de buiken van de tweede trillingsvorm, een staande golf. De buiken van deze trillingsvorm zitten op een kwart en op driekwart van de overspanning. Per paar is één van de twee tuned mass dampers afgestemd op de eerste eigenfrequentie en de andere op de tweede eigenfrequentie. De theorie schrijft voor dat een tmd in de buik van de te dempen trillingsvorm moet worden aangebracht. De eerste eigenfrequentie heeft een buik die precies op de helft van de overspanning zit. Qua vormgeving gaf dit geen fraaie oplossing en daarom is hiervan afgezien. Met een computermodel is onderzocht en aangetoond dat de dempers voor de eerste eigenfrequentie toch nog bijdrage leveren en daarmee voldoende effectief zijn als deze als dempers worden opgehangen in de buiken van de tweede trillingsvorm. In het technische ontwerp van de tmd's heeft de architectonische vormgeving steeds een grote rol gespeeld. Volgens de filosofie van de architect mocht de techniek zeker gezien worden, maar moesten de apparaten netjes zijn ingepast. De dempers als zodanig hebben daarom een driehoekige vorm en zijn dicht tegen de centrale koker onder het brugdek opgehangen. Elke demper is uitgevoerd met een totaal ge-

wicht van 1000 kg. Hiervan is 160 kg variabel. In het midden van de vaste massa zitten vier uitneembare schijven van ieder 40 kg. Door deze schijven weg te nemen kan de demper worden afgestemd op de brug. Met het verlagen van de massa gaat de eigenfrequentie van de tmd omhoog en daarmee ook de relatief smalle frequentierange waarin de demper effectief is.

Massa's

Elke massa is met drie veren aan de brug opgehangen. De massa is in het midden met een viskeuze demper aan de brug verbonden. Behalve dat deze viskeuze demper trillingsenergie verstrooit (dissipatie), krijgt de tmd met deze toevoeging een breder effectief frequentiebereik. Het verbreden van dit bereik of range is wenselijk omdat de eigenfrequentie van de brug varieert met de hoeveelheid mensen en daarmee massa die van de brug gebruikmaakt. Met het aanbrengen van de in totaal 4 ton wegende tmd's wijzigen de eigenfrequenties van de brug enigszins. Om de dempers te finetunen is de brug na plaatsing van deze voorzieningen voor de derde maal ingemeten. De ophanging van de dempers is zodanig uitgedacht dat het stellen van de variabele massa van bovenaf op het brugdek kan plaatsvinden. Met het verwijderen van een aantal aluminium dekplanken krijgt de monteur rechtstreeks toegang tot de tmd. ●