

Zware dempers tuien definitief



Tijdelijke maatregel: het onderling door-koppelen van tuien met spanbanden.

(foto: Cityview Fotografie, Rotterdam)

Op maandag 4 november 1996 werd Rotterdam opgeschrikt doordat de gloednieuwe Erasmusbrug voor alle verkeer werd afgesloten. Door een combinatie van wind en regen raakten alle voortuilen in trilling. Met een tijdelijk 'noodverband' werd dit probleem verholpen. Dat bood een commissie de gelegenheid een definitieve oplossing te bedenken. Na ruim zes maanden studie viel de keuze op het aanbrengen van twee extra hydraulische dempers per tui.

Direct nadat de Erasmusbrug werd afgesloten, kreeg een onderzoekscmissie opdracht te rapporteren over de oorzaak en de te nemen tijdelijke maatregelen, zie ook *Bouwen met Staal* 133. Op basis van de eerste bevindingen werd als tijdelijke maatregel besloten de tuilen op drie niveau's in hoogte af te spannen. Vervolgens verleende het Gemeentebestuur opdracht aan het Ingenieursbureau van Gemeentewerken Rotterdam om samen met internationale experts binnen zes maanden een advies uit te brengen over de te nemen definitieve maatregelen. Het onderzoeksprogramma dat daarna is opgesteld, valt uiteen in vier trajecten.

- In een *inventarisatie-traject* is expertise en ervaringen uit de (buitenlandse) praktijk verzameld en beoordeeld. Er is een literatuurstudie verricht, er is wereldwijd contact gezocht met specialisten en er zijn oplossingen en ervaringen bij andere bruggen onderzocht.
- Een *meet-traject* voorziet in (dempings)metingen op de Erasmusbrug onder verschillende omstandigheden. Zonodig worden windtunnelproeven en metingen uitgevoerd aan een prototype van de definitieve maatregel.
- Een *rekenmodel-traject* moet een beter theoretisch inzicht geven in het gedrag van de Erasmusbrug en van de tuilen onder invloed van regen en wind aan de hand van een op te stellen dynamisch rekenmodel van de brug. Startend met een reconstructieberekening moet dit traject uiteindelijk de effectiviteit aantonen van de definitieve maatregel.
- Tot slot is er een *uitvoerings-traject*, waarin het ontwerp wordt gemaakt en een prototype van de definitieve maatregel kan worden getest. Hierbij speelt onder meer de zorg dat de te nemen definitieve maatregel ook architectonisch zorgvuldig wordt ingepast.

Trillingsmechanisme

Tui-instabiliteit door een combinatie van regen en wind onderscheidt zich van bekende vortex- en (wake-)galloping-mechanismen door de initiërende invloed van de regen [1-3]. Het afstromende regenwater op de tui vormt onder invloed van de wind twee waterstroompjes. De belangrijkste bevindt zich aan de bovenzijde van de tui, aan de loefzijde. De andere waterstroom loopt aan de onderzijde, maar deze is voor de instabiliteit van minder belang. De beweging van het bovenste waterstroompje om de lengteas van de tui beïnvloedt het loslaatgedrag van de luchtstroomlijnen rond de tui. Hierdoor ontstaan relatief grote variërende liftkrachten op de tui, loodrecht op de windrichting. Deze liftkrachten werken in de bewegingsrichting van de tui en resulteren in een negatieve tuidemping.

De loslaatfrequenties van de luchtvervelingen vallen samen met één van de eigenfrequenties van de tui, en dat resulteert in een geleidelijk opslingerproces. Na enige tijd ontstaat er een dynamische evenwichtstoestand door de toename van de demping van de bewegende tui (zowel door interne demping als door luchtdemping). De beweging van de tui stabiliseert zich echter pas bij grote bewegingsamplitudes van één tot vier keer de tuidiameter. De bewegingsfrequentie ligt daarbij tussen ongeveer 1 en 3 Hz. Is de eerste eigenfrequentie van de tui lager, dan beweegt de tui in een hogere harmonische eigentrilling.

Voorwaarden

De opgetreden instabiliteit door de combinatie van regen en wind (rain-wind induced vibration) treedt uitsluitend op bij een combinatie van specifieke omstandigheden.

- Er moet in elk geval sprake zijn van een lang, glad cilindrisch element met een grote verhouding tussen de lengte en de diameter en met een geringe eigen demping. De gemeten tuidemping voor de tweede eigenfrequentie bedroeg bij de Erasmusbrug slechts ongeveer 0,3% van de kritische demping. Na het aanbrengen van de tijdelijke verbanden bedroeg dit 0,7%. Deze verbetering is toe te schrijven aan het gebruik van spanbanden met een hoog energiedissiperend vermogen.
- De weerscondities moeten aan een aantal voorwaarden voldoen. Zo moet de windsnelheid liggen tussen 10 en 18 m/s, moet de windrichting ongeveer loodrecht staan op het tuivlak, is de turbulentie-intensiteit beperkt en is er sprake van afstromend regenwater op de tui. Deze voorwaarden zijn weliswaar noodzakelijk, maar niet volledig: er treedt hierdoor nog niet vanzelfsprekend instabiliteit van de tuilen op.

Dat instabiliteit door regen en wind zich niet beperkt tot tuibruggen blijkt uit gelijksoortige bewegingen van de hangers van boogbruggen [4] en hangbruggen (Akashi Kayko-brug en Humberbrug). Bij deze laatste brug zijn de bewegingen pas voor het eerst gerapporteerd, nadat de hangers opnieuw zijn geconserveerd. Overigens is uit recente literatuur en uit windtunnelonderzoek [5-7] bekend dat er bij een schuine aanstroming van ronde prisma's objecten een laagfrequente aerodynamische belasting kan optreden door een verstoring van het zog. Dit verschijnsel vertoont sterke overeenkomsten met het regen-wind mechanisme, behalve dat het effect van de variërende liftcoëfficiënt door de waterstroom nu wordt bereikt door een axiale lucht-

stroom aan de lijzijde van de tui. Er is derhalve geen aanwezigheid van regen nodig en er lijkt een voorkeur te zijn voor lagere responsiefrequenties.

Rekenmodel

Voor de dynamische analyse is een nieuw eindig-elementenmodel van de brug en de tuilen gebouwd, samen met TNO Bouw. Hierbij deed zich het probleem voor dat er nog geen gevalideerd belastingmodel beschikbaar is. Er is gebruik gemaakt van een gemodificeerd galloping belastingmodel dat is afgestemd op de werkelijk gemeten responsie van de brug. De beschrijvende (frequentie-specifieke) galloping-vergelijking wordt vanaf een zekere kritieke windsnelheid echter blijvend instabiel, terwijl juist in geval van trillingen bij regen en wind ook een bovenbegrenzing is vastgesteld. Dat is fysisch verklaarbaar, omdat bij een hogere windsnelheid het waterstroompje wordt weggeblazen. Uitgangspunt vormt het onderzoek van Matsumoto, waarbij op experimentele wijze de liftcoëfficiënt is vastgesteld door het aanbrengen van een kunstmatige stripvormige verstoring op de tuiomtrek nabij het loslaatpunt van de stroming [5-7]. In het model is vervolgens een frequentiefilter toegevoegd waarmee de responsie van de eerste eigentrilling kan worden onderdrukt, overeenkomstig de waarnemingen van 4 november vorig jaar.

Een complicatie is dat de beweging van het waterstroompje langs de omtrek van de tui wordt beïnvloed door windkrachten, massakrachten en versnellingskrachten. Deze laatste krachten zijn een gevolg van de grote bewegingsamplitude van de tui. Hierdoor kan het stroompje zelfs doorslaan (naar de andere kant van de mantel) of loslaten: de liftcoëffi-

ciënt wordt tijdens de tuibeweging daardoor een instabiele grootte. De tuidemping is door meting aan de brug bepaald en ingevoerd als equivalente visceuze demping op de tui. Het belastingmodel verwaarloost of benadert een aantal invloedsfactoren, zoals het gedrag van het waterstroompje (grootte, dikte, adhesie, lift- en momentcoëfficiënten) en de demping, waardoor het belangrijke onzekerheden bevat.

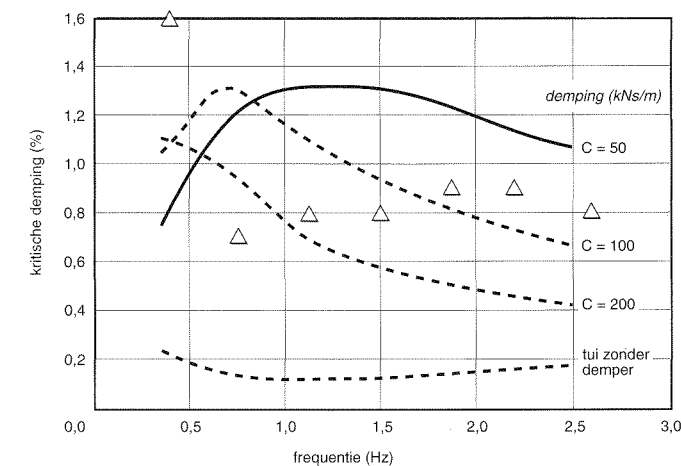
Geometrie

Voor de geometrie van het rekenmodel zijn de volgende drie vormen gebruikt.

- Met een verend ingespannen, geïsoleerde tui is de werking van het systeem en het belastingmodel getest.
- Een compleet model van de brug met tuilen is gebruikt voor het interactie-onderzoek tussen brugdek en tuilen. Hierbij is onderzocht of er versterking plaatsvindt van de tuibeweging vanuit het brugdek, of dat vortex van het brugdek mogelijk zelfs de oorzaak is van de tuibeweging. Het dek van de Erasmusbrug is destijds tijdens het ontwerp weliswaar als 'sectional model' in de windtunnel getest, maar de geringe stijfheid van de brug en de waargenomen torsiebeweging van het dek op 4 november was reden voor nader onderzoek.
- Bij het derde model is de brugconstructie rond de tui als 'substructure' gemodelleerd voor de zware berekeningen van de responsie in het tijdsdomein.

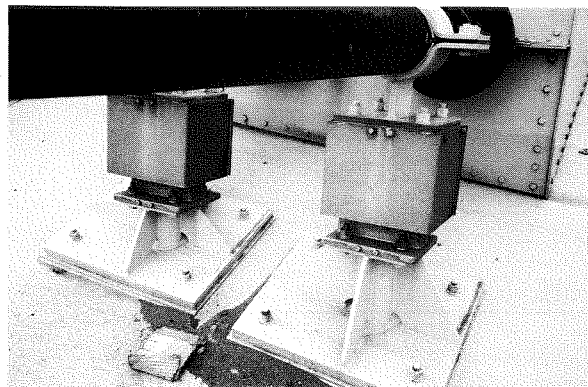
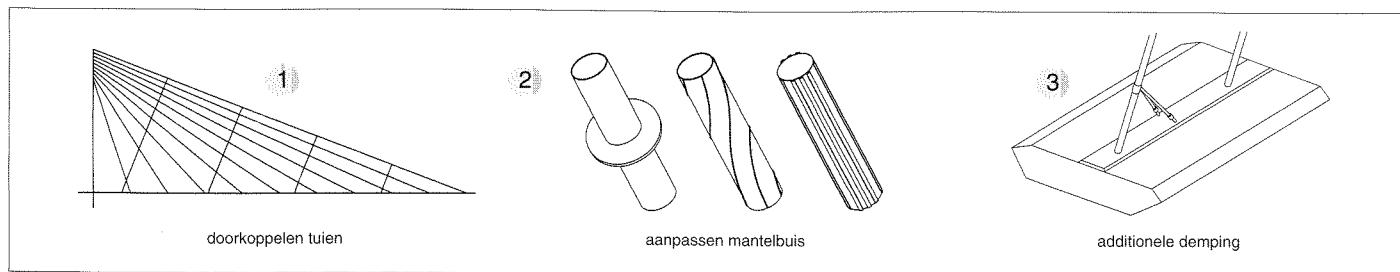
De tui is in de drie modellen opgedeeld in twintig knopen volgens de kettinglijn en voorzien van de juiste doorhang, de werkelijke gemeten tuivoorspanning en de modale massa. De inwendige tuidemping is gemodelleerd als een equivalente visceuze demping. De uitwendige demper tussen tui en brugdek is met

Berekende dempingswaarde als functie van de demperkarakteristiek. Aangegeven zijn de gemeten waarden (Δ) bij de demptest op de Erasmusbrug in juli jl. (met $C = 50$ kNs/m).

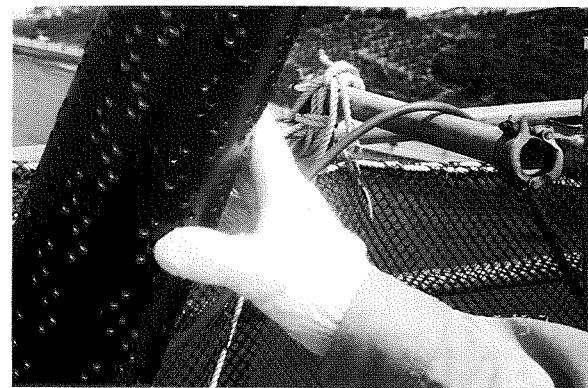


Bij regen en wind ontstaan waterstroompjes op de buis om de tuilen. Deze zorgden voor de ongewenste trillingen.

ir. J.H. Reusink
namens de onderzoekscmissie,
Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam



Geperforeerde mantelbuis voor de tuien in de Tartara-brug in Japan.



Voorbeeld van een visco-elastische demper.

de juiste specificaties ingevoerd (plaats van aangrijpen, snelheids- en frequentieafhankelijk gedrag). Met het ingevoerde werkelijke dempingsgedrag zijn vervolgens de gebeurtenissen op 4 november jl. gereconstrueerd. Evenals in werkelijkheid gebeurde, gaf de berekening ook grote uitwijkingen van de tuien als resultaat.

Berekening

De berekening van de definitieve maatregel was gericht op het toepassen van externe dempers (zie verderop). Via een berekening zijn de posities en de instelkarakteristiek van deze dempers vastgesteld. De werking van de dempers bevindt zich tussen twee uitersten: bij een te slappe instelling of een te korte werkmarm wordt de tui niet effectief gedempt, terwijl bij een te stugge instelling de demper als tussenoplegging voor de tui fungeert en daardoor ook niet effectief dempt [8, 9]. Daarbij moet de demper over een karakteristiek beschikken waarbij ook bij lage exitatiesnelheden voldoende dempingskracht wordt geleverd en waarbij de maximale kracht wordt begrensd. Een equivalente visceuze regelkarakteristiek, waarbij de demperkracht evenredig is met de snelheid in combinatie met een lage droge wrijving, voldoet het best aan de criteria. Een aandachtspunt bij het ontwerp is de mogelijke belasting van de tui door aanstoting via de demper vanuit het brugdek.

Maatregelen

Tot nog toe zijn in de praktijk uitsluitend passief werkende systemen beproefd om de bewegingen van de tuien te beperken. Deze systemen zijn:

- onderling doorkoppelen van de tuikabels per tuivlak;

- veranderen van de oppervlaktegesteldheid van de mantelbuizen;
- aanbrengen van additionele demping.

Doorkoppelen tuien

Het onderling doorkoppelen van tuien met dwarsverbanden op een of meer niveau's leek aanvankelijk de meest belovende oplossing te zijn, omdat daardoor de vrije tuilenlengte werd gereduceerd. Dit systeem berust op een werking, waarbij interferenties van bewegingsvormen ontstaan. Daardoor worden de eigenfrequenties verhoogd, wordt er demping toegevoegd en nemen ten slotte de stijfheid en de modale massa voor de bewegingsvorm toe [10]. De positie van de koppelingen wordt bij voorkeur zo gekozen dat zo veel mogelijk bewegingsvormen worden verstoord.

Al vrij snel bleek dat deze oplossing in de praktijk tot andere problemen leidde. Door de mobiele verkeersbelasting ontstaan namelijk doorhangverschillen tussen de tuien onderling. De koppelingen verhinderen dit en worden daardoor op vermoeiing belast. Dat kan enerzijds leiden tot breuk bij te zwakke doorkoppelingen en anderzijds tot een beschadiging van de tuikabels wanneer de doorkoppelingen te sterk en te stijf worden uitgevoerd. Voorts treden er onvoorspelbare trillingen op in delen van tuien tussen de koppelingen en zijn de doorkoppelingen door hun hoge positie kostbaar bij inspecties en onderhoud. Een laatste, niet-technisch aspect betreft de ingreep op het esthetisch beeld van de brug. Om deze redenen worden tuidoorkoppelingen tegenwoordig nog slechts incidenteel toegepast.

Aanpassen manteloppervlak

Een tweede groep van maatregelen

heeft betrekking op het veranderen van het uitwendige oppervlak van de mantelbuis om de tuien. Het doel van deze aerodynamische oplossing is te voorkomen dat er waterstroompjes ontstaan. De afgelopen jaren zijn in verschillende laboratoria een groot aantal buizen met verschillende oppervlakken onderzocht, variërend van axiale, helix en ringvormige verdikkingen tot systemen met groeven of putjes in de mantelbuis [3, 11, 12].

Weliswaar blijkt in het laboratorium dat bepaalde oppervlaktebewerkingen inderdaad effect sorteren, in de praktijk blijft scepsis op zijn plaats. Sommige bewerkingen hebben nauwelijks effect of resulteren in extra tuibewegingen doordat de luchtweerstand toeneemt, zoals bij de Higashi Kobe brug. Ook hebben oppervlaktemaatregelen weinig effect bij laagfrequente bewegingen en tot slot is er weinig bekend over het effect van vervuiling, dichtslibben en onderhoud.

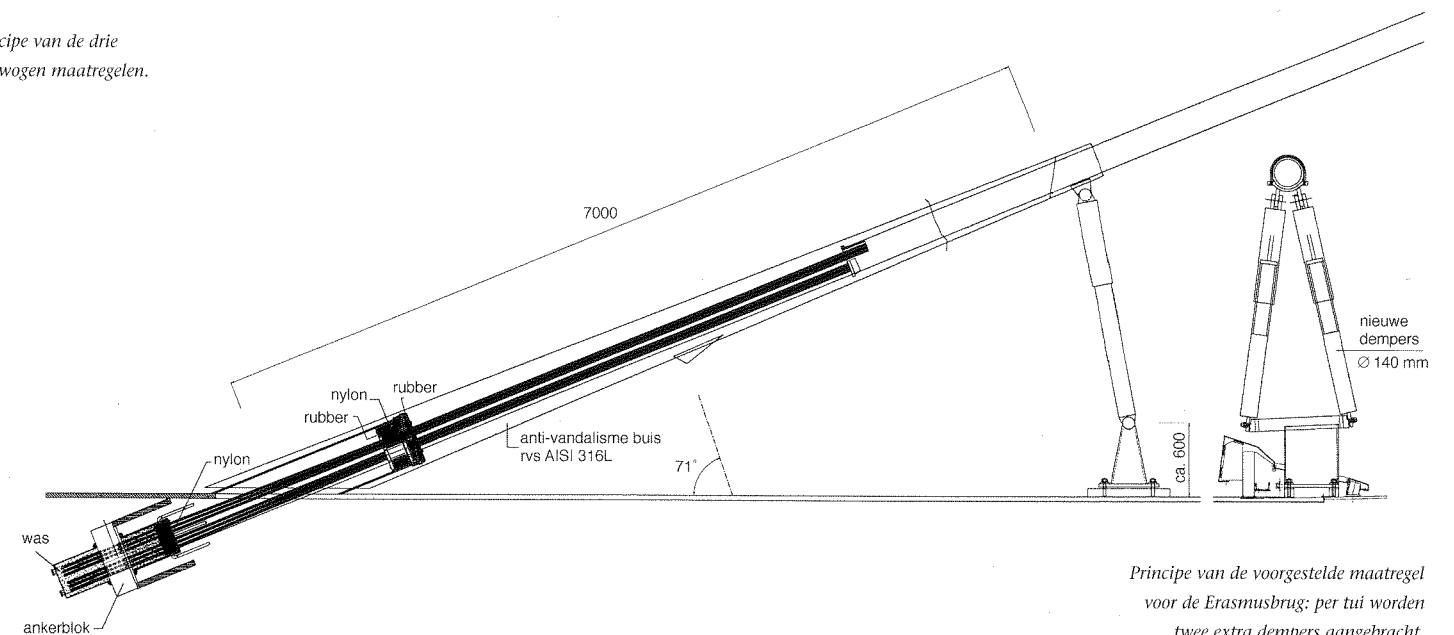
Vergroten tuidemping

Een derde groep van maatregelen betreft het vergroten van de tuidemping. Dit kan op vier manieren, namelijk met:

- tuned mass dempers;
- rubber dempers;
- visco-elastische dempers;
- hydraulische dempers.

De bestaande tuikabels van de Erasmusbrug worden gedempt door een combinatie van wrijvingsdemping (tussen de anti-vandalisme buis en de tuikabel en in de deviator (flexibele strengenklem) en demping in de schokbrekers. Japans onderzoek toont aan dat het toevoegen van voldoende demping (tot minimaal 0,5%) in de praktijk voldoende

Principe van de drie overwogen maatregelen.



de is om elke vorm van tui-instabiliteit te verhinderen. Deze bevindingen worden ondersteund door de uitkomsten van het rekenproces.

- *Tuned mass dempers* bestaan uit kleine, afgeveerde en meebewegende massa's en grijpen verdeeld aan op de tui. Ze zijn daardoor esthetisch en onderhoudstechnisch minder interessant [4].
- *Rubber dempers* kunnen als een manchet in een verzwaarde buis van de tui-verankering worden weggewerkt [1]. Sumitomo heeft uitgebreide praktijkervaring opgedaan met een dergelijk systeem. Er zijn echter een aantal redenen om deze dempers bij de Erasmusbrug niet toe te passen: het installeren achteraf is gecompliceerd, de beschikbare ervaring reikt tot tuilenlengten tot 200 m en het systeem is bij voorkeur geschikt voor eerste eigenfrequenties van de tui boven 1 Hz.

- *Visco-elastische dempers* grijpen aan als juk tussen het brugdek en de tui en zijn opgebouwd uit vrij bewegende evenwijdige platenpakketten, waartussen zich een energiedissiperend siliconenachtig visceus materiaal bevindt. Ze worden met name in Japan veel toegepast en zijn onderhoudsvriendelijk [1]. Een nadeel is dat de werking van het systeem sterk afhangt van de temperatuur en de bewegingsfrequentie. Daardoor kon voor de Erasmusbrug geen voldoende garantie worden gegeven dat een minimaal benodigde dempingsniveau kon worden bereikt.

- Een systeem met *hydraulische dempers* ten slotte heeft als nadelen de onderhoudsgevoeligheid en de moeilijke regelkarakteristiek van de demper. Door de keuze van een goede aangrijppositie op de tui en het uitvoeren van metingen aan een prototype worden deze bezwa-

ren grotendeels ondervangen. Voor deze oplossing is uiteindelijk dan ook gekozen.

Definitieve keuze

Grote tuibruggen met gladde mantelbuizen van poly-ethyleen kunnen met een grote mate van onvoorspelbaarheid ten prooi vallen aan tui-instabiliteit. Omdat de beweging zich dynamisch stabiliseert bij grotere bewegingsamplituden, bestaat er geen direct gevaar voor de veiligheid van de brug. Zo wordt in Japan dan ook vaak pas achteraf een dempingsmaatregel getroffen, indien dit daadwerkelijk nodig blijkt.

Doordat het aandrijvende mechanisme zich nog moeilijk laat beschrijven, is het niet mogelijk om het effect van verschillende maatregelen vooraf met een berekening vast te stellen. Wel kan (achteraf) voor externe dempingssystemen de frequentieafhankelijke en positieafhankelijke instelling worden bepaald uitgaande van een benaderend gallopingbelastingmodel, afgestemd op het effect van de tijdelijke maatregelen.

Er zijn een aantal maatregelen beschikbaar. Op dit moment is echter het toevoegen van enigerlei vorm van externe demping het meest betrouwbaar. Uit berekeningen en uit ervaringen in de praktijk blijkt een tuidemping van 0,5% voldoende om tui-instabiliteit te voorkomen. Gelet op het slappe brugdek en de relatief grote tuidiameter door het losse strengensysteem (in vergelijking tot het Japanse systeem met evenwijdige draden en zonder vrije tussenruimte) wordt voor de Erasmusbrug veiligheidshalve een demping van 0,8% nagestreeft. Dit wordt bereikt door het toepassen van twee dempers per tui in een opstelling waarbij tevens de demping in zijdelingse richting wordt vergroot.

Literatuur

1. S. Akashi, R. Kiyota en E. Hamada, 'Rain vibration of cable stays', in: *1994 International Symposium on Cable-Stayed Bridges*, Shanghai 1994, p. 283-289.
2. Y. Hikami en N. Shiraishi, 'Rain-wind induced vibrations of cables in cable stayed bridges', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 29 (1988), p. 409-418.
3. G. Hirsch, 'Cable vibration overview', in: *Cable-stayed and suspension bridges*, conferentie AIPC/FIP, Deauville 1994, p. 453-464.
4. G. Lüsse, H. Ruscheweyh, C. Verwiebe en G.H. Günther, 'Regen-Wind induzierte Schwingungserscheinungen an der Elbebrücke Dömitz', *Stahlbau* 65 (1996) 3, p. 105-114.
5. M. Matsumoto, N. Shiraishi en H. Shirato, 'Rain-wind induced vibration of cables of cable stayed bridges', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 41-44 (1992), p. 2011-2022.
6. M. Matsumoto, T. Saitoh, M. Kitazawa, H. Shirato en T. Nishizaki, 'Response characteristics of rain-wind induced vibration of stay-cables of cable-stayed bridges', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 57 (1995), p. 323-333.
7. M. Matsumoto, M. Yamagishi, J. Aoki en N. Shiraishi, 'Various mechanism of inclined cable aerodynamics', in: *Nineth International Conference on Wind Engineering*, New Delhi 1995, p. 759-770.
8. I. Kovács, *Zur Frage der Seilschwingungen und Seildämpfung*, overdruk uit: *Die Bautechnik* nr. 10 (1982).
9. B.M. Pacheco, Y. Fujino en A. Sulekh, 'Estimation curve for modal damping in stay cables with viscous damper', *Journal of Structural Engineering* 119 (1993) 6.
10. H. Yamaguchi, 'Control of cable vibrations with secondary cables', in: *Symposium on cable dynamics*, Luik 1995, p. 445-452.
11. O. Flamand, 'Rain-wind induced vibration of cables', in: *Cable-stayed and suspension bridges*, conferentie AIPC/FIP, Deauville 1994, p. 523-531.
12. H. Kobayashi, Y. Minami en M. Miki, 'Prevention of rain-wind induced vibration of an inclined cable by surface processing', in: *Nineth International Conference on Wind Engineering*, New Delhi 1995, p. 753-758.