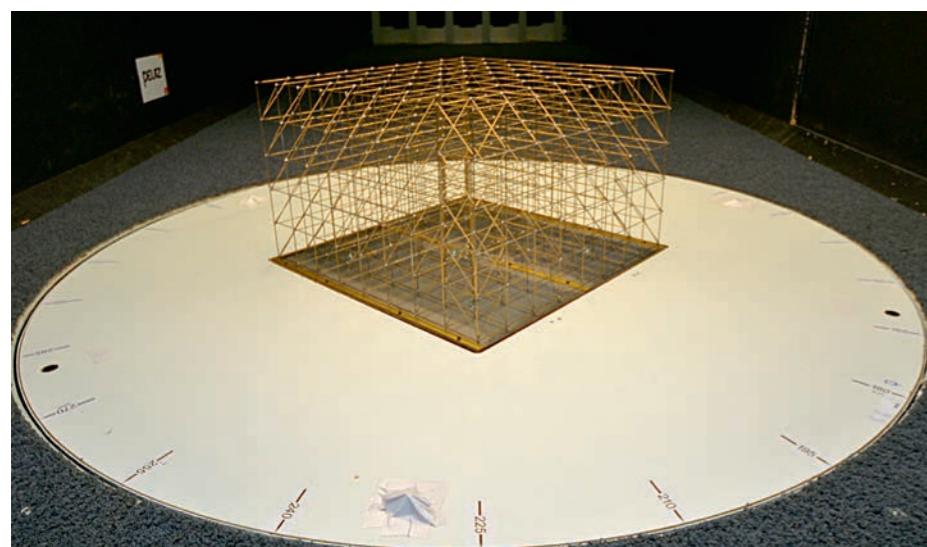


Windtunnelonderzoek voor praktijkrichtlijn steigers



1. Maquette van een onbeklede ruimtelijke steiger in de windtunnel.

Voor een praktijkrichtlijn voor de bepaling van de windbelasting op steigers is uitgebreid windtunnelonderzoek verricht. Onderzoek naar windbelasting op steigerontwerpen is niet nieuw, maar binnen de branche leven nog steeds vragen, onder meer met betrekking tot nauwkeurige dimensionering en verankering. Overzicht van de onderzoeksopzet, meetmethode en eerste resultaten.

ir. G.M. van Uffelen

Marcel van Uffelen is raadgevend ingenieur bij Peutz in Mook.

Steigerconstructies in de bouw en industrie zijn vaak onbekleed en soms bekleed met steigerdoek. Ze kunnen tegen een gebouw aan staan, wat in de branche een objectsteiger wordt genoemd, of zijn vrijstaand. Voor de Vereniging van Steiger-, Hoogwerk- en Betonbekistingsbedrijven (VSB) en Kontaktgroep Materieel (KOMAT) is bij Peutz in Mook een reeks windtunnelonderzoeken uitgevoerd voor de bepaling van de te verwachten extreme, fluctuerende windkrachten op vrijstaande steigers en objectsteigers, waarvan een deel hier zal worden behandeld. In het onderzoek zijn concrete waarden bepaald van de windbelasting op beklede en

onbeklede steigers, vrijstaand en bij een cilindervormige tank of tegen een gebouw. Ook is gekeken naar de invloed van steigervloeren, kantplanken en leuningingen op de windkrachten op diverse steigers, en naar de gunstige invloed van afronden van de hoeken. De gemeten krachten als functie van het aantal rijen staanders en liggers, dus hoe vol de steiger is gebouwd, en de gunstige afwerking van een achterliggende gevel, uitgedrukt in de 'site coëfficiënt', zullen worden vergeleken.

Achtergrond

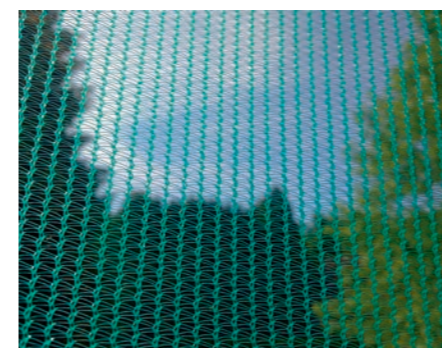
Voor de berekening van windbelasting op steigers wordt gebruik gemaakt van NEN-

EN 1991-1-4 en NEN-EN 12811-1, en *Richtlijn steigers* uit 2014^[1]. In het verleden zijn door diverse partijen al metingen verricht aan de stromingsweerstand van verschillende soorten steigerdoek, onder meer door TNO, en aan de windbelasting op steigers onder invloed van het gebouw waar de steigers voor staan, door Landesgewerbeanstalt Bayern, LGA^[2]. Dit laatste onderzoek is gedaan door middel van statische krachtmetingen in een turbulentie-arme stroming. Voor windtunnelonderzoek worden echter volgens de CUR-Aanbeveling 103^[3] metingen voorgeschreven in een goed gemodelleerde atmosferische grenslaagstroming op de juiste schaal en met de juiste turbulentie-intensiteit en voldoende hoge luchtsnelheid. Dit voor een goede aansluiting op de wetgeving en Eurocodes.

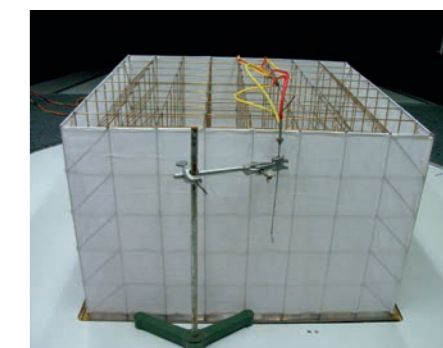
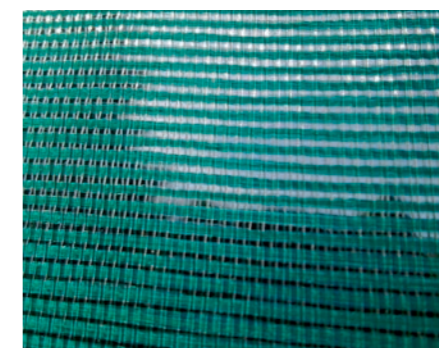
Bij het onderzoek dat hier wordt beschreven, is gebruik gemaakt van een dynamische Kistler piezo-elektrische 6-componenten balans voor dynamische krachtmetingen op de steigers. Dit maakt ook meteen een data-verwerking en extreme-waardenanalyse conform methode B uit de CUR-Aanbeveling 103 mogelijk. Daardoor kunnen de gemeten representatieve windkrachten door de constructeurs worden gebruikt, in plaats van de winddrukken bepaald met de windvormfactoren uit de genoemde normen.

Meetmethode windtunnel

Voor het uitvoeren van windtunnelonderzoek beschikt Peutz over een eigen windtunnel. Dit is een gesloten grenslaagtunnel, speciaal ontworpen voor het simuleren van een atmosferische grenslaag. In het hier besproken onderzoek is, om een conservatieve benadering van de optredende drukken te verkrijgen, verondersteld dat de steigers vrij aangestroomd kunnen worden, waarbij er dus geen omgevingsbebouwing is gemodelleerd.



2. Steigerdoeken die 50% en 90% windreducerend worden genoemd in de branche (schaal 1:1 op A4 papier).



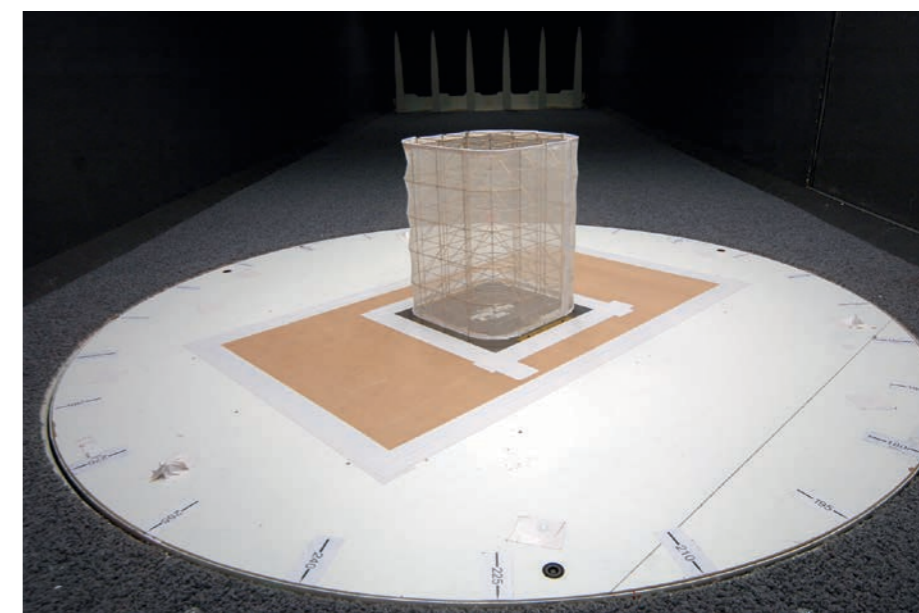
3. Schaalmodel met strijkdoek en meetopstelling.

Schaalmodel

Eerst is uit messing buisjes een schaalmodel van een ruimtelijke steiger op schaal 1:20 gesoldeerd. Elk stramien is $\pm 2 \times 2 \times 2$ m op volle schaal, dus $10 \times 10 \times 10$ cm op schaal. De dikte van de buizen is ongeveer 48 mm op volle schaal, dus ongeveer 2,5 mm op schaal. Uitgaande van vijf verdiepingen met een breedte van ± 16 m op volle schaal, is het rechthoekige schaalmodel ongeveer $80 \times 80 \times 50$ cm, dus met negen staanderrijen ($n = 9$). Er is een variant gemaakt van het schaalmodel van de ruimtelijke steiger met drie staanderrijen en liggers rondom, dus waarbij het midden open is ($n = 3$). Hierin kan een model van een tank worden geplaatst. Tevens zijn een variant met vijf staanderrijen ($n = 5$) en een extra grote variant onderzocht van $140 \times 80 \times 50$ cm ($n = 15$) om de invloed van het aantal staanderrijen voor bijzonder grote steigers te kunnen bepalen. Ook is een los segment van $80 \times 10 \times 10$ cm gebruikt ($n = 2$), te plaatsen voor een gesloten gebouw; dit heet een objectsteiger. Tevens zijn varianten onderzocht met houten vloeren op de vloerbuizen, leuningingen en kantplanken.

Modelleringsdoek

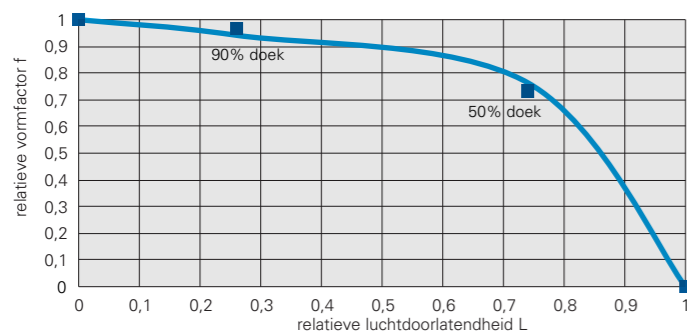
Voor het onderzoek zijn twee varianten steigerdoek toegepast (afb. 2), die 50% en 90% windreducerend worden genoemd (door de toeleveranciers). Proeven zijn onder meer gedaan voor objectsteigers, vrijstaand en vóór een gebouw, en ruimtelijke steigers met doek rondom. Het steigerdoek is geschaald. Optisch is het 50% windreducerend steigerdoek ongeveer 75% open en het 90% windreducerend steigerdoek zo'n 25%. De maas-



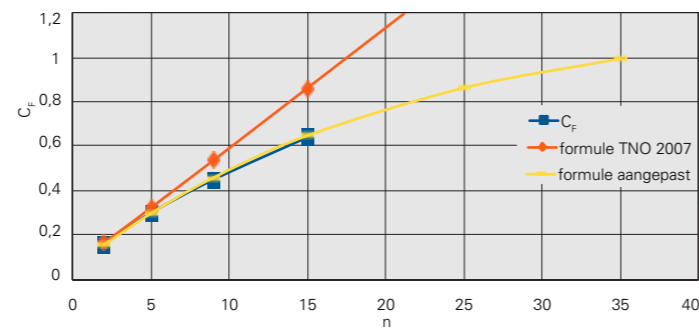
4. Maquette afgeronde vrijstaande steiger, met 50% winddicht doek

wijde van het 50% windreducerend steigerdoek is circa 5 mm en van de 90% winddichte variant 2 mm. De draaddiameter is ongeveer 1 mm. Om het gedrag van steigerdoek bij wind op volle schaal te modelleren, zijn fijnmaziger, alternatieve doeken gezocht met de juiste stromingsweerstand bij de luchtsnelheden in de windtunnel. De stromingsweerstand dient bij de windtunnelproef immers gelijk te zijn aan die op volle schaal tijdens een storm. Dit moet zorgvuldig gebeuren omdat de stromingsweerstand van het doek sterk toeneemt bij lage waarden van het Reynoldsgetal (maat voor de verhouding tussen traagheidskrachten en viskeuze krachten in een stroming) betrokken op de draaddiameter^[10]. Na onderzoek van verschillende

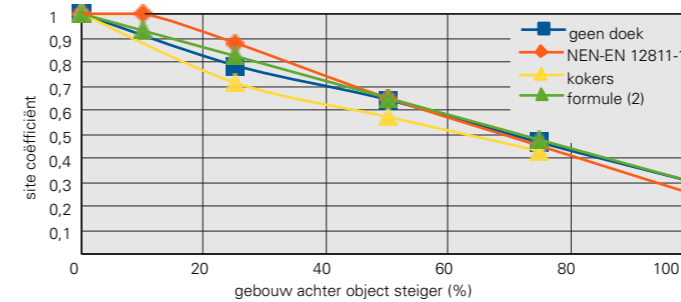
doeken is gekozen voor kaasdoek en fijnmazig strijkdoek (afb. 3). Op advies van TNO zijn de bij de windtunnelmetingen optredende Reynoldsgetallen gemeten bij meerdere regelsnelheden, via een tweetal pitotbuizen, waarvan één midden voor de maquette van een vrijstaand steiger en de ander erin. Zo konden drukval en bruto doorstroomsnelheid door het doek in het schaalmodel van een vrijstaand steiger worden gemeten. Bij een regelsnelheid van 20 m/s bleek het gedrag van het kaasdoek en strijkdoek voldoende overeen te komen met de steigerdoeken in de praktijk (de gemeten weerstandswaarden zijn $K = 0,9$, respectievelijk 15). De aanpak en de resultaten zijn door TNO beoordeeld en akkoord bevonden^[10].



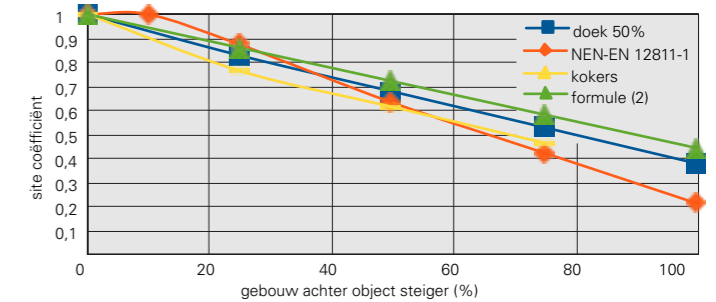
Figuur 1. Afhankelijkheid relatieve vormfactor ruimtelijke rondom beklede steiger als functie van relatieve luchtdoorlatendheid van steigerdoek.



Figuur 2. Vormfactor als functie van aantal staanderrijen.



Figuur 3. Site coëfficiënt objectsteiger, zonder doek.



Figuur 4. Site coëfficiënt objectsteiger, met 50% winddicht doek.

Krachtmeetsysteem

De horizontale krachten in x- en y-hoofdrichtingen van de steigermaquette zijn gemeten met een dynamische piezo-elektrische 6-componenten balans van Kistler met bijbehorende ladingsversterker. De 8 kanalen van deze balans worden simultaan uitgelezen met data-acquisitiekaarten van National Instruments met een samplefrequentie van 400 Hz. De gemeten krachten zijn voor met doek beklede vrijstaande steigers gerelateerd aan de maximale dynamische windsnelheidsdruk op dakrandhoogte in het aangeboden windprofiel bij de maquette-schijf en gedeeld door het frontaaloppervlak, waardoor een dimensieloze vormfactor ontstaat. De aldus bepaalde vormfactor noemen we C_F . Het gaat hier om de ongunstigste gemeten waarden voor een bereik van windrichtingen van $\pm 45^\circ$ aan beide zijden van de orthogonale richting, dus inclusief effecten van 'overhoekse' aanstroming. Bij de gepresenteerde waarden hoeft dus geen extra verhoging te worden toegepast vanwege het eventueel verhoogde frontaal oppervlak van de steigers overhoeks gezien. Voor onbekte steigers zijn de gemeten krachten gerelateerd aan de over de hoogte van het steiger gemiddelde referentiestuwdruk. De vormfactoren zijn op deze wijze qua definitie direct te vergelijken met vormfactoren uit bijvoorbeeld NEN-EN 1991-1-4^[4] en NEN-EN 12811-1^[5]. Er is een extreme-waardenanalyse conform methode B uit de CUR-Aanbeveling 103 uitgevoerd om de vormfactoren met de juiste kans van optreden uit de dynamische krachtmetingen te berekenen.

Resultaten

Invloed luchtdoorlatendheid doek op windkrachten

In *figuur 1* is de afhankelijkheid van de relatieve vormfactor voor de kracht op de ruimtelijke steiger van de relatieve luchtdoorlatendheid van het steigerdoek te zien. Het gaat bij de relatieve vormfactor om de reductie ten opzichte van een geheel gesloten steigerdoek (zeil), dus een factor waarmee de vormfactor van de steiger kan worden vermenigvuldigd. Bij deze ruimtelijke steiger gaat het om de

relatieve luchtdoorlatendheid van 2xdoek, daar de steiger rondom bekleed is. De grafiek komt sterk overeen met eerdere metingen door LGA, hoewel het nu gaat om dynamische krachtmetingen in een turbulente windstroming terwijl het bij LGA om statische in een turbulentie-arme stroming ging. Te zien is dat de vormfactor maar langzaam afneemt bij toenemende luchtdoorlatendheid van het doek. Met 50% winddicht doek is de windbelasting op de vrijstaande steiger echter toch al gauw zo'n 25% lager dan een met dicht zeil beklede steiger.

Invloed aantal staanderrijen op windkrachten

In *figuur 2* is het verband tussen n , het aantal staanderrijen achter elkaar (dus hoe vol de steiger is gebouwd), en C_F te zien. Tevens wordt een vergelijking gemaakt met de formule uit het TNO-rapport *Windbelasting op grote steigers*^[6]. Het verband volgens die formule is in rood aangegeven. Blauw zijn de gemeten waarden. Geel is een aangepaste formule (1), die de gemeten waarden beter beschrijft.

$$A_\phi = A_1 + (A_{\text{totaal}} - A_1) \cdot (1 - e^{-(0,85 \cdot (n-1) \cdot A_2 / A_{\text{totaal}})}) \quad (1)$$

Het is een e-macht, die beschrijft dat iedere extra toegevoegde staanderrij wat minder effect heeft dan de eerdere. Verder houdt ook deze formule er rekening mee dat het effect van een staanderrij afhangt van de verhouding tussen zijn windvangend oppervlak (A_2) en het totale omhullende oppervlak (A_{totaal}) van de steiger.

C_F gemeten met $n = 2$ bedraagt 0,16. Dit is gelijk aan de waarde die wordt berekend voor deze steiger met de formule uit het TNO-rapport, uitgaande van een realistische vormfactor voor een enkele buis van $C_F = 1,2$. Het is ook nagenoeg gelijk aan de waarde (0,15) gemeten door DNW^[8]. De waarde neemt bij deze metingen echter duidelijk minder snel toe als functie van het aantal staanderrijen dan berekend met de formule uit het TNO-rapport. Kennelijk vindt bij deze metingen bij grotere aantallen staanderrijen toch wat meer gunstige

afscherming plaats van de achtergelegen rijen door de bovenwindse rijen. Bij de hogere waarden van het aantal staanderrijen vindt (in de grafiek) tevens een afvlakking plaats. De achterste staanderrijen zijn afgeschermd door de voorste, omdat de wind al om de steiger is heengeleid door de verdringingswerking, zodat de achterste niet meer helemaal evenredig aan de windkracht kunnen bijdragen. Dit verband is ook gemeten bij een aantal metingen met 50% winddicht doek op drietal verschillende rondom beklede, vrijstaande steigers. Het verloop van de maximale totale vormfactor C_F voor rondom beklede steigers lijkt op dat in *figuur 2*, met dezelfde lichte afvlakking in de grafiek.

Invloed dichtheid achterliggende gevel op site coëfficiënt

In *figuur 3* is het verband tussen de dichtheid van de achterliggende gevel en de site coëfficiënt op een onbekte objectsteiger te zien. Dit is voor twee wijzen van modelleren van de achterliggende gebouwen gedaan, namelijk met losse gebouwen met open ruimten ertussen en met een gebouw gemaakt van holle kokers, om een tunnelbouwwijze te simuleren. Hiervan is een gedeelte van de verdiepingen dichtgezet, om een gebouw waarvan nog maar een deel van de gevels is geplaatst, te simuleren. Het verschil tussen beide wijzen van modelleren is gering. De invloed van de diepe en dichte zijwand bij de modellering met kokers zorgt voor iets gunstiger resultaten bij lage percentages dichtheid van het achterliggende gebouw. Bij een geheel dicht gebouw is een waarde van de site coëfficiënt van $\pm 0,3$ gemeten, wat een fractie ongunstiger is dan de waarde van 0,25 uit NEN-EN 12811-1. Toch zijn de resultaten voldoende overeenkomstig om de grafiek uit NEN-EN 12811-1 veilig te kunnen blijven gebruiken; ze zijn niet strijdig. Tevens is in de grafiek in groen het verband conform de verderop in de tekst voorgestelde benaderingsformule (2) weergegeven. In *figuur 4* is dezelfde grafiek te zien, maar nu met 50% winddicht doek op de objectsteiger. De site coëfficiënt neemt met doek minder snel af als

functie van de dichtheid van het gebouw, omdat er minder lucht door het doek stroomt dan door een onbekte steiger, waardoor minder gunstige drukopbouw tegen het gebouw plaatsvindt. Het doek zelf vangt de meeste wind op om deze om de steiger heen te geleiden door verdringingswerking. Het gebouw erachter wordt daardoor nagenoeg geheel afgeschermd en heeft diens gevolge minder invloed meer. De verkregen resultaten voor de site coëfficiënt c_s zijn voor onbekte en beklede steigers bij voldoende veilige benadering samen te vatten in een enkele formule:

$$c_s = 1 - 0,7 \cdot (1 - \% \text{doek}_{\text{winddicht}} / 100)^{0,4} \cdot (\% \text{gebouw}_{\text{achter objectsteiger}} / 100) \quad (2)$$

Let op: het $\% \text{doek}_{\text{winddicht}}$ betreft hier het percentage conform de benaming van de onderzochte doeken (de winddoorlatendheid is ruwweg evenredig met \sqrt{K}).

Invloed tank op windkrachten

Ook is de vormfactor van een vrijstaande tank van $\pm 0,6$ gemeten, wat goed overeenkomt met de waarden voor een licht ruwe cilinder inclusief eindeffectfactor uit NEN-EN 1991-1-4. Deze waarde neemt sterk af als er een ruimtelijke steiger, met $n = 3$, al dan niet met doek, rondom de tank wordt geplaatst. Opvallend is dat de kracht op de ruimtelijke steiger zelf nauwelijks verandert als het om een tank heen wordt geplaatst. Dit vanwege de wind die enerzijds om de tank wordt gestuwd en de krachten op met name de flanken van de steiger vergroot, maar anderzijds de afscherming van het deel van de steiger achter de tank die de krachten aan de achterzijde van de steiger verlaagt. Plaatsing van een 1-vakssteiger naast een cilindervormige tank resulteert in ruwweg een verdubbeling van de windkracht op de steiger. Het wordt door de zuiging op de flanken van de tank richting de tank gezogen.

Invloed vloeren, kantplanken en leuning op windkrachten

De metingen aan vrijstaande steigers ($n = 2$)

met enkel vloeren in alle slagen, laten zien dat de windkracht licht toeneemt ten opzichte van een vergelijkbare steiger zonder vloeren. Toevoegen van kantplanken en leuning zorgt echter voor een relatief grote toename, namelijk van C_F van 0,16 naar 0,23 voor een onbekte steiger. Dit door toename van het windvangend oppervlak. Dit wordt bevestigd door de metingen aan steigers met vijf staanderrijen ($n = 5$). Met alleen vloeren in alle slagen, neemt de windkracht licht toe ten opzichte van een vergelijkbare steiger zonder vloeren. Toevoegen van kantplanken en leuning zorgt voor een grotere toename, namelijk van 0,22 naar 0,32 bij aanbrenge in alleen de eerste vakrij en naar 0,36 bij kantplanken en leuning rond de omtrek van de steiger.

Invloed afronden/afschuiven hoeken op windkrachten

Tot slot zijn metingen verricht aan een ruimtelijke steiger met vijf staanderrijen ($n = 5$) met afgeschuinde dan wel afgeronde hoeken (*afb. 4*). Gebleken is dat het effect van afschuiven en vooral afronden groot is, met name bij 90% winddicht doek, waar een afname van ruim 30% wordt gemeten; de reductiefactor waarmee de krachtscoëfficiënt kan worden vermenigvuldigd, bedraagt circa 0,68. Daarmee wordt de op basis van *figuur 7.24* van NEN-EN 1991-1-4 te verwachten reductiefactor van 0,5 echter niet geheel gehaald. Maar daarbij moet opgemerkt worden dat de slankheid van de gebruikte steigermaquette beperkt is. Bij een hoge steiger, veel slanker dus, zou de reductie zeker hoger zijn uitgevallen. De resultaten zijn derhalve niet strijdig met *figuur 7.24* van NEN-EN 1991-1-4. De gemeten reductiefactor is wat lager bij meer open doek; die bedraagt ongeveer 20% bij 50% winddicht doek.

Conclusie

Een breed scala aan varianten is doorgemeten, waarvan de resultaten gedeeltelijk zijn besproken. Ze dragen bij aan het oplossen van een aantal in de branche levende vragen en maken nauwkeuriger dimensionering van

de steigers en de verankeringen mogelijk. De bevindingen zullen de basis vormen van een uitgebreide richtlijn voor de bepaling van de windbelasting op steigers, waaraan wordt gewerkt door een VSB-werkgroep, waarvan de leden ook betrokken zijn geweest bij de opzet van het windtunnelonderzoek en de interpretatie en toepassing van de resultaten. Als deze in concept klaar is, zal deze ook ter commentaar in *Bouwen met Staal* worden gepresenteerd. •

Literatuurlijst

1. *Richtlijn Steigers*, VSB, Zoetermeer 2014 (concept).
2. *Strömungstechnische Modellversuche zur Ermittlung der Windlasten auf mit Netzen und Planen bekleidete Fassadengerüste*, LGA, München (D) 1991.
3. *CUR-Aanbeveling 103* (Windtunnelonderzoek voor de bepaling van ontwerp-windbelastingen op (hoge) gebouwen en onderdelen ervan), Aeneas, Den Bosch 2005.
4. *NEN-EN 1991-1-4* (Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-4: Algemene belastingen - Windbelasting), 2011 + C2, 2010.
5. *NEN-EN 12811-1* (Tijdelijke hulpconstructies voor de bouw - Deel 1: Steigers - Prestatieeisen en algemeen ontwerp), 2004.
6. C.P.W. Geurts, C.A. van Bentum en P.E.J.M. de Winter, *Windbelasting op grote steigers (R1302/B)*, TNO, Delft 2007.
7. C.P.W. Geurts, *Windbelasting op gevelsteigers (R10570)*, TNO, Delft 2013.
8. *Wind tunnel tests on scaffolds in combination with a circular cylinder*, LST-2011-28, DNW, 2011.
9. *NEN 6702* (Technische grondslagen voor bouwconstructies - TGB 1990 - Belasting en vervormingen), 2007 + C1, 2007 + A1, 2008.
10. C.P.W. Geurts, *TNO-201 5-BF-01 00289203*, 16 september 2015.
11. P.J. Richards en M. Robinson, 'Wind loads on porous structures', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 83(1), p. 455-465, 1999.
12. W.H. Melbourne, 'Wind tunnel blockage effects and corrections', *7th Australasian Conference*, Melbourne 1981.
13. N.J. Cook, *Designers guide to wind loading of building structures. Part 1*, Butterworth Publishers, Stoneham MA (US) 1990.