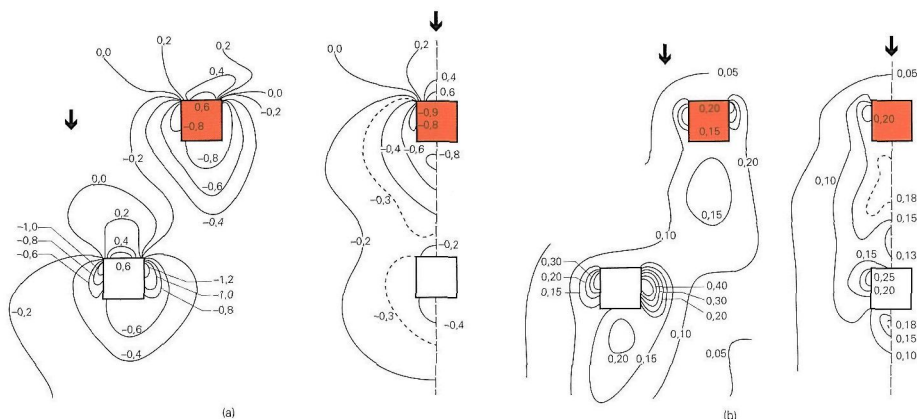


ir. G.M. van Uffelen

Marcel van Uffelen is raadgevend ingenieur bij Peutz in Mook.



1. Gemiddelde (a) en fluctuerende (b) vormfactoren van de drukken (C_p) bij verschillende plaatsing van twee hoge slanke torens.

Locale drukken op gevels en daken onderschat

Nieuwbouw heeft invloed op de windbelasting van bestaande gebouwen, vooral bij lokale drukken. Maar het effect van windinterferentie is niet eenvoudig uit literatuur te halen. Uit windtunnelonderzoek blijkt dat de gevolgen bij lokale drukken groter kunnen zijn dan bijvoorbeeld de Eurocode aangeeft. Aanvulling van de norm lijkt daarom verstandig. Overzicht van het onderzoek en de conclusies, met daaraan gekoppeld een voorstel voor aangepaste regels en vervolgonderzoek.

De windbelasting op gebouwen wordt doorgaans bepaald met normen als de Eurocode¹⁾ of door metingen aan schaalmodellen in de windtunnel. Dit gebeurt in de ontwerpfasen en dan wordt over het algemeen de invloed van bestaande omringende bebouwing meegenomen, bijvoorbeeld met figuur A.4 uit [1]. Maar nieuwe gebouwen kunnen

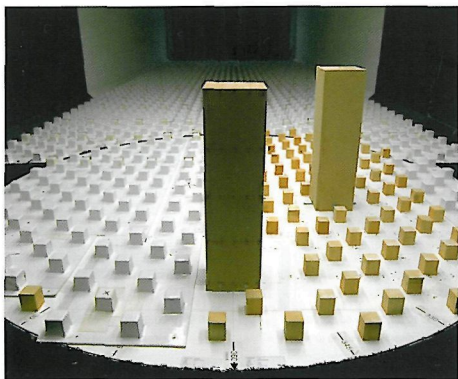
van grote invloed zijn op de bestaande. Deze wisselwerking heet windinterferentie en hangt af van de vorm en afmetingen van de gebouwen, de onderlinge afstand en de ruwheid van de omgeving. Ontwerpgegevens uit de wetenschappelijke literatuur putten is niet eenvoudig, zeker niet waar het gaat om de impact op bijvoorbeeld

beeld gevels of daken, en case-studies zijn meestal maar voor een specifiek project geschikt. Daarom is systematisch onderzoek nodig om algemeen toepasbare gegevens over windinterferentie, en dan vooral voor lokale drukken, te krijgen. Dit kan van belang zijn voor met name constructeur en gevelbouwers, maar ook voor eigenaren van gebouwen waar vlakbij een nieuw gebouw wordt gepland.

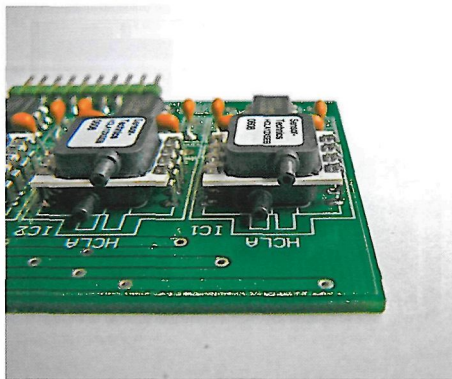
Een dergelijk onderzoek is uitgevoerd met metingen aan rechthoekige, ronde en driehoekige gebouwen met verschillende hoogten. De afmetingen, onderlinge afstanden en de turbulentie-intensiteit van de in de windtunnel aangeboden wind zijn gevarieerd. De resultaten worden in dit artikel gepresenteerd.

Literatuur

1. NEN-EN 1991-1-4 (Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-4: Algemene belastingen – Windbelasting), 2005 + A1, 2011 + C2, 2011 + NB, 2011.
2. Y. Taniike, 'Interference mechanism for enhanced wind forces on neighbouring tall buildings', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 42 Issues 1-3 (1992), p. 1073-1083.
3. CUR Aanbeveling 103, *Windtunnelonderzoek voor de bepaling van ontwerp-windbelastingen op (hoge) gebouwen en onderdelen ervan*, CUR, Gouda 2005.
4. C.P.W. Geurts en C.A. Van Bantum, 'Hoge gebouwen vangen lokaal meer wind dan de norm', *Bouwen met Staal* 195 (2007), p. 42-45.
5. G.M. van Uffelen en H. Plomp, 'Windbelasting op bestaande gebouwen neemt toe door nieuwe hoogbouw', *Bouwen met Staal* 206 (2008), p. 50-54.
6. O. Bronkhorst, 'Adverse effects on loads due to wind interference between low-rise and high-rise buildings', *conference ICWE13*, Amsterdam 2011.
7. G.M. van Uffelen, 'Wind-induced building interference: increase of wind loads on existing buildings after erection of new high-rises', *conference ICWE13*, Amsterdam 2011.



2. Windtunnel met proefopstelling voor windinterferentie.



3. Druksensoren van de SensorTechnics HCL-serie.

teerd, vergeleken met de literatuur en de Eurocode en gegeneraliseerd. Ook wordt een eerste voorstel voor normering gedaan, dat kan worden gebruikt voor het ontwerp van gevels en daken of om te bepalen of een voor het bouwplan specifieke case-studie wenselijk is of om planschade te beoordelen.

Literatuurstudie windinterferentie

De definitie van de interferentiefactor, IF .

IF = windbelasting op gebouw in groep/
windbelasting op vrijstaand gebouw (1)

Bij de windbelasting kan het gaan om krachten en momenten op de hoofd-draagconstructie of om lokale winddruk en -zuiging op gevelonderdelen of dakbedekking. Daarnaast kan eenvoudig onderscheid worden gemaakt tussen de gemiddelde en fluctuerende componenten, maar ook piekwaarden. Waar over winddrukken wordt gesproken, kan het overigens gaan over zowel druk als zuiging.

Doorgaans wordt bij dit soort onderzoeken een proefopstelling gebruikt als in *afbeelding 1*. Het nieuwe, bovenwindse gebouw (rood) wordt verschoven, waarbij het

bestaande, benedenwindse gebouw, waaraan wordt gemeten, blijft staan. Voor elke positie van het bovenwindse gebouw wordt de interferentiefactor IF bepaald. In dit geval gaat het om lokale winddrukken. Deze worden met dynamische druksensoren gemeten die via gaatjes in de gevels en dak zijn verbonden door slangetjes. Taniike^[3] heeft dergelijke metingen gedaan aan de windinterferentie tussen twee hoge slanke torens. Taniike bracht een rij drukmeetpunten aan rondom de voet van de benedenwindse toren en toonde aan dat de dimensieloze vormfactor van de fluctuerende component van de lokale winddrukken kon toenemen van $C_p' = 0,2$ tot maar liefst $0,4$, zoals in *afbeelding 1* is te zien. Hierdoor namen de piekdrukken met ongeveer 70% toe, dus $IF = 1,7$. Dit was bij een onderlinge afstand van bijna vier keer de gebouwdiameter. In de linker plot van *afbeelding 1* is te zien dat ook de gemiddelde winddrukken toenemen als er een nieuw gebouw bovenwinds wordt geplaatst. Dit is een significant verschil met de gemiddelde krachten en momenten op de hoofd-draagconstructie, die doorgaans wel profiteert van gunstige afscherming. Zie ook literatuur bij [4], [5], [6] en [7].

Systematische metingen

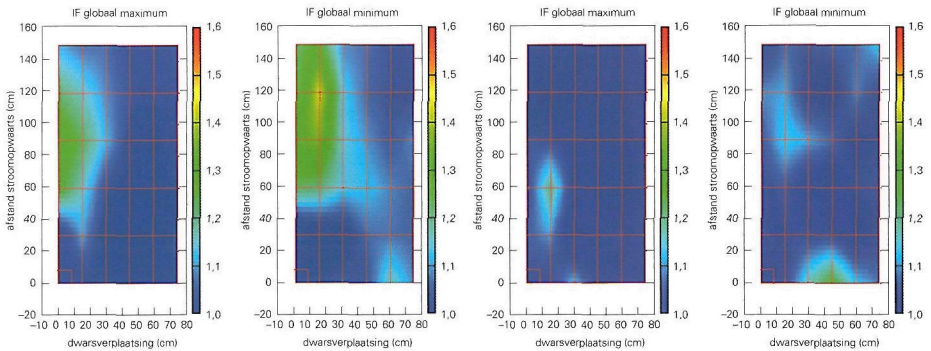
Door Peutz zijn systematische metingen uitgevoerd aan windinterferentie ten aanzien van lokale winddrukken (*afb. 2*) in navolging van het werk van Taniike.

De dynamische winddrukken worden simultaan op maximaal 128 meetpunten uitgelezen met een samplefrequentie van 1000 Hz. De druksensoren zijn van de HCL-serie van SensorTechnics (*afb. 3*) en staan via dunne slangen in verbinding met de meetpunten in de gevels en dak (vooraan in *afb. 2*). De metingen en uitwerking gebeuren met de CUR-Aanbeveling 103^[8].

Het benedenwindse gebouw heeft een hoogte-breedte verhouding van 4:1. De onderzochte varianten zijn: rechthoekig, driehoekig en cilindervormig grondplan van het benedenwindse gebouw.

De hoogte-breedte verhouding van het bovenwindse gebouw is 4:1 en 2:1. Een lager bovenwinds gebouw kan namelijk een delta-vleugelwervel loslaten langs de dakrand die naar de opgaande gevels van het andere gebouw wordt getransporteerd.

De interferentiefactoren worden grafisch weergegeven in plattegronden met contouren voor de waarden van IF als functie van



4. Interferentiefactor voor maximale overdruk en zuiging op bestaande gebouw. 5. Interferentiefactor voor maximale winddruk of zuiging met hogere turbulentië-intensiteit in aangeboden grenslaagstroming (stedelijke omgeving).

de positie van het bovenwindse gebouw. Deze interferentiefactoren zijn gebaseerd op het gemiddelde van de vier hoogste overdrukken (links in *afb. 4*), respectievelijk het gemiddelde van de hoogste vier zuigingen op het bestaande gebouw (rechts in *afb. 4*) zonder te kijken op welk meetpunt op de gevels of dak de hoogste waarden zijn gemeten. *Afbeelding 4* laat verder zien dat een bovenwinds gebouw meer invloed op de zuiging heeft dan op de overdruk op het benedenwindse gebouw. Dat komt door de verdringingswerking van de bovenwindse, nieuwe toren, waardoor de snelheden toenemen en de drukken dalen. Ook de wervels die bij de bovenwindse toren worden losgelaten, zorgen lokaal voor een snelheidsverhoging en daardoor nog meer zuiging. Daarnaast zijn er verticale geveelaanzichten weergegeven in *afbeelding 6*. Hierin is juist per meetpunt weergegeven hoe de lokale interferentiefactoren verdeeld zijn over de gebouwmhulling, dus op basis van de per meetpunt gemeten maximale overdruk of zuiging. Op de gebouwhoek in de zijgevel bedraagt de maximale lokale IF $\pm 2,3$. Gemiddeld over de vier meetpunten met de hoogste zuiging

in deze zone geeft nog altijd een IF-waarde van ongeveer 1,8. Het effect treedt overigens niet alleen op bij kleine onderlinge gebouwfstanden, maar houdt over grote afstanden stand, tot wel ruim vijf maal de gebouwdiameter. Nabij de voet van de bestaande toren bedraagt de maximale lokale IF $\pm 1,7$, wat goed overeenkomt met het werk van Taniike. Aan de voorrand van het dak, zie *afbeelding 7*, is een IF van ongeveer 1,8 te zien, dus bijna een verdubbeling van de lokale zuiging. Betrokken op de vier hoogste waarden in deze zone is de IF duidelijk lager, maar nog altijd zo'n 1,4.

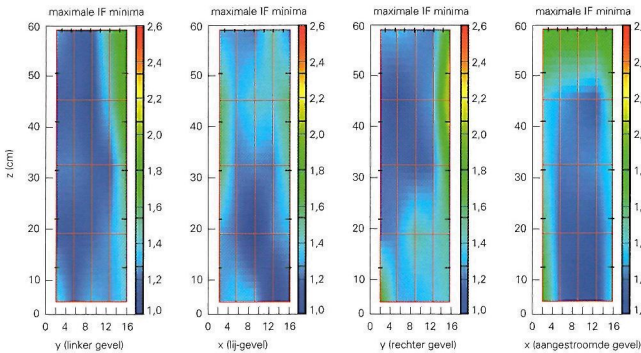
Gebouwworm

Cilindervormige gebouwen blijken trouwens minder windinterferentie op te leveren dan rechthoekige. De verdringingswerking van een cilinder is namelijk minder dan van een rechthoek; daarom is ook de totale vormfactor C_v van een cilindervormig gebouw lager. Bij driehoekige gebouwen is het effect ongeveer gelijk aan dat van een rechthoekig gebouw, tenzij de scherpe hoek van de driehoek naar de wind is toegericht. Dan is het effect kleiner. Interessant is dat ook een lagere bovenwinds gebouw de zuiging kan ver-

hogen. Zelfs een half zo hoog bovenwinds gebouw kan lokaal interferentiefactoren van 2 opleveren. Als er naar de vier hoogste gemeten zuigingen wordt gekeken, is er nog altijd een toename van de zuiging op het benedenwindse, hogere gebouw van 20% gemeten.

Twee bovenwindse gebouwen

Er is ook gemeten aan het effect van twee bovenwindse gebouwen. De eerste is geplaatst op de meest ongunstige locatie volgens uit bovengenoemde metingen aan één gebouw (de gele plek in *afbeelding 4*). De positie van de tweede is gevarieerd. Ook hier bleek de invloed op de zuiging het grootst te zijn. Als de twee bovenwindse gebouwen vlak bij elkaar staan, zal het bestaande gebouw vooral van afscherming profiteren. Als aan de andere kant de onderlinge afstand heel groot is, zijn de waarden van de IF weer gelijk aan die met een enkele bovenwinds gebouw. De lokale waarden per meetpunt gaan iets omhoog, van 2,3 naar 2,6. In het dakvlak gaat de waarde zelfs sterk omhoog, als de tweede vlakbij het bestaande gebouw staat. Dit komt door de verhoogde verdringingswerking van



6. Verhoging van de winddruk of zuiging per meetpunt gevels.

de beide gebouwen samen, die dan samenwerkt met de interferentie door het andere, meer bovenwinds geplaatste gebouw.

Turbulentie-intensiteit

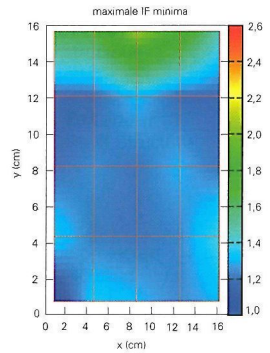
Verhoging van de turbulentie-intensiteit van de aangeboden grenslaagstroming werkt gunstig. De globale interferentiefactor, dus voor de hoogst gemeten zuiging of overdruk, is nu nog maar 1,3 (afb. 5). Ook hier gaat het overigens nog steeds om het gemiddelde van de vier hoogste. Hiermee wordt de gunstige invloed van een stedelijke omgeving op de windinterferentie aangetoond. Dit heeft namelijk tot gevolg dat de druk- en zuigingspieken ook bij de nulmeting aan het oorspronkelijke vrijstaande gebouw al wat hoger zijn. Bovendien zal de grotere hoeveelheid turbulentie de snelheidsverschillen in het zog van de nieuwe toren weer sneller uitwissen. Maar opvallend is dat aan de voet van het bestaande gebouw nog wel de bovengemiddelde interferentiefactor van 1,7 wordt gevonden. Deze wordt kennelijk door een ander effect veroorzaakt dan de interferentiefactoren hoger op de gevels. Dit is waarschijnlijk het effect van 'downwash': wind uit hogere luchtlagen – waar de windsnelheid hoger is –

die door de verdringingswerking van de bovenwindse toren naar beneden wordt geduwd. Hier heeft de hogere turbulentie-intensiteit kennelijk minder vat op.

In de bovenste helft van de gevels loopt de hoogste lokale interferentiefactor, gemiddeld over de vier meetpunten met de hoogste zuiging in de desbetreffende zone, nog altijd op tot $\pm 1,7$, ook hier weer tot op grote onderlinge gebouwfstanden.

Conclusies en consequenties

Het effect van windinterferentie op bestaande gebouwen door nieuwbouw kan groot zijn. Met name de zuiging op gevels en daken neemt toe, niet alleen de piekwaarde maar ook de fluctuerende component. Dit kan leiden tot snellere vermoeiing van materialen. Zelfs plaatsing van een lager gebouw in de nabijge omgeving heeft een aanzienlijke invloed. In de Eurocode staat in figuur A.4 aangegeven hoe de invloed van een nieuw hoog gebouw op de bestaande in de omgeving moet worden verdisconteerd. Alleen als de hoogte h_{high} van het nieuwe gebouw meer dan twee maal zo hoog is als de gemiddelde hoogte h_{avg} van de omringende gebouwen, worden de windlasten verhoogd.

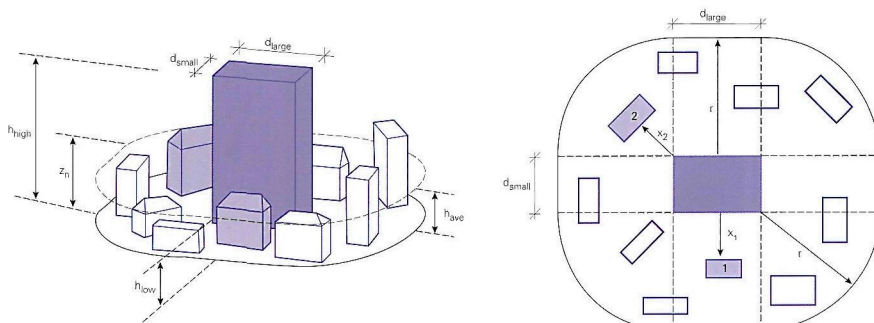


7. Verhoging van de winddruk of zuiging per meetpunt dak.

Het is duidelijk dat dit voor lokale winddrukken een te soepele benadering is en dat het daarom verstandig is om aanvullende richtlijnen voor lokale winddrukken op te stellen. Het feit dat verhoging van de turbulentie-intensiteit van de aangeboden grenslaagstroming een gunstig effect heeft, relateert dit overigens enigszins. Een stedelijke omgeving resulteert immers in een verlagings van de gemeten interferentiefactoren. Hiermee rekening houdend, kan als vuistregel gesteld worden dat bij plaatsing van een even hoog gebouw in de nabijheid interferentiefactoren voor de hoogste zuiging of overdruk op het gebouw tot 1,3 kunnen optreden, dit bij onderlinge gebouwfstanden tot maar liefst tien maal de gebouwdiameter. De lokale interferentiefactoren op het dak en de gevels kunnen waarden tot 1,3 op het dak en 1,7 in de bovenste helft van de gevels aannemen, bij onderlinge gebouwfstanden tot ruim vijf maal de gebouwdiameter, niet alleen aan de voet van het bestaande gebouw, maar ook bovenaan en op het dak. In tabel 1 is een eerste voorstel voor normering uitgewerkt. Aansluitend op de rekenregels uit NEN-EN 1991-1-4 wordt de windinterferentie gekwantificeerd door de referentiehoogte z_0

Tabel 1. Bestaande rekenregels windinterferentie NEN-EN 1991-1-4 en voorstel aanvulling voor effect op lokale winddrukken door een enkel bovenwinds gebouw in bebouwde omgeving.

situatie	bestaande normering: referentiehoogte z_n , C_{pe}	voorstel aanvulling: referentiehoogte z , voor
	NEN-EN 1991-1-4 (alleen als $h_{high} > 2h_{avg}$): $r = 2d_{large}$ bij slank bovenwinds gebouw $r = h_{high}$ bij massief bovenwinds gebouw	lokale winddrukken met één bovenwinds gebouw, bebouwde omgeving (alleen als $h_{high} > h_{avg}$): $r = 5d_{large}$
$x \leq r$	$z_n = \frac{1}{2}r$, dus $z_n = d_{large}$	$z_n = h_{low} + h_{high}$ daarbij: vormfactor $C_{pe,1} = 1,3C_{pe,1}$ in randzones van bovenste helft gevels
$r < x < 2r$	$z_n = \frac{1}{2}r(1 - (1 - 2h_{low}/r)(x - r))$	$z_n = h_{low} + \frac{1}{2}h_{high}$ daarbij: vormfactor $C_{pe,1} = 1,3C_{pe,1}$ in randzones van bovenste helft gevels
$x \geq 2r$	$z_n = h_{low}$, dus geen effect	$z_n = h_{low}$, dus geen effect



8. Reproductie van figuur A.4 uit NEN-EN 1991-1-4, invloed van een hoog gebouw op nabijgelegen bouwwerken.

voor de stuwruk q_p op het beschouwde gebouw te verhouden als functie van de onderlinge afstand x en de breedte van het bovenwindse gebouw d_{large} of de hoogte van het bovenwindse gebouw h_{high} , en de hoogte van het beschouwde gebouw h_{low} , zie de definities in afbeelding 8.

De voorgestelde verhoging van de referentiehoogte z_n voor de stuwruk q_p op het beschouwde gebouw lijkt fors, maar vertaalt zich niet in een heel grote toename van de stuwruk q_p . Als bijvoorbeeld het bovenwindse gebouw even hoog is als het bestaande, neemt de stuwruk $\pm 30\%$ toe in een bebouwde omgeving en aan de voet van het gebouw $\pm 70\%$ van de lokale winddruk, omdat er bij toepassing van deze rekenregels immers één waarde voor de stuwruk voor het gehele gebouw wordt gebruikt, namelijk die op de referentiehoogte z_n . Op deze wijze blijkt de resulterende toename van de stuwruk q_p dus een redelijke overeenkomst met de in dit artikel gepresenteerde interferentiefactoren IF op te leveren, behalve in de randzones in de bovenste helft van de gevels, waarvoor derhalve nog een extra verhoging van de lokale vormfactoren $C_{pe,1}$ wordt voorgesteld. Voordeel van deze aanpak is verder

dat deze goed aansluit bij de bestaande methode uit NEN-EN 1991-1-4, waarbij figuur A.4 en de daarin aangegeven definities ook blijven worden gebruikt voor lokale winddrukken.

Geadviseerd wordt verder om bij dit voorstel de windrichtingsfactoren uit *CUR Aanbeveling 103*^[3] mee te nemen in de uitwerking. Gebouwen die aan de oostzijde van het bestaande gebouw staan, vallen dan bijvoorbeeld buiten beschouwing, want uit het oosten komen minder zware stormen voor dan uit het westen.

Houd er ook rekening mee dat in een verder onbebouwde omgeving de interferentiefactoren nog duidelijker hoger kunnen uitvallen dan in tabel 1 aangegeven waarden. Er geldt dan bij benadering: $z_n = h_{low} + h_{high}$ voor het gehele gebied $x < 2r$, waarbij voor de lokale vormfactoren geldt: $C_{pe,1} = 1,5C_{pe,1}$ in de randzones van de bovenste helft van de gevels.

Verder onderzoek

Interessant voor verder onderzoek is het relatief lage, bovenwindse gebouw met hoogte-breedte verhouding 2:1. Er is nog niet bekend wat het effect is van draaiing

van dit gebouw ten opzichte van de windrichting, wat tot een deltaxleugelwervel op het dak en daardoor verder verhoogde windinterferentiefactoren kan leiden. Ook het mogelijk verzachtende effect van verhoging van de turbulentie-intensiteit van de aangeboden grenslaagstroming hierop, moet dan natuurlijk mee worden onderzocht. Ook kan nog gedacht worden aan een meting met nog meer omgevingsbebouwing, bijvoorbeeld door – conform afbeelding 8 – de meetschijf vol te zetten met gebouwen van wisselende hoogte.

Om windtunnelmetingen aan windinterferentie verder te kunnen verbeteren, is Peutz bezig met een langdurige meting op het eigen kantoor te Mook, waar bij een aantal windrichtingen een significant effect qua windinterferentie van de windtunnel wordt verwacht. Wordt vervolgd. •