

Naar een beter begrip

van lokale windbelastingen in de stedelijke omgeving

Wat is de invloed van een gebouw op de windbelasting van de gevel- en dakelementen van een nabijgelegen gebouw? Het antwoord op die vraag is van belang voor een veilig ontwerp van gevel- en daksystemen. Okke Bronkhorst onderzoekt deze invloed in het kader van zijn promotieonderzoek aan de Technische Universiteit Eindhoven.

Okke Bronkhorst, TNO en TU/e, Chris Geurts, TNO en TU/e, Carine van Bentum, TNO, Bert Blocken, TU/e

Windinterferentie

De verankering van dak- en gevelelementen is afhankelijk van de ontwerp-windbelasting. Deze wordt aan de hand van voorschriften berekend, en is afhankelijk van het windgebied waar het gebouw zich in bevindt, de ruwheid van het omliggende terrein, de vorm van het gebouw en de zonering van gevel en dak. Minder bekend is dat ook omringende bebouwing invloed heeft op de belasting door de wind. Deze invloed wordt ook wel windinterferentie genoemd, omdat het windveld rond de omringende bebouwing interfereert met het windveld rondom het beschouwde gebouw.

Interferentie kan leiden tot lagere lokale belastingen, met name als er sprake is van een afschermende werking, maar ook tot hogere lokale belastingen. Dat laatste is van belang voor een veilig ontwerp van gevels en daken. In de huidige regelgeving is interferentie slechts voor een beperkte situatie opgenomen. In deze bijdrage wordt dieper ingegaan op de invloed van interferentie op het windveld en wordt beschreven welke gevolgen dit heeft voor de lokale windbelastingen. Op basis hiervan wordt de huidige regelgeving wat betreft de invloed van interferentie op lokale windbelastingen tegen het licht gehouden.

Een methode om de invloed van interferentie op de windbelasting te kwantificeren is de interferentie factor:

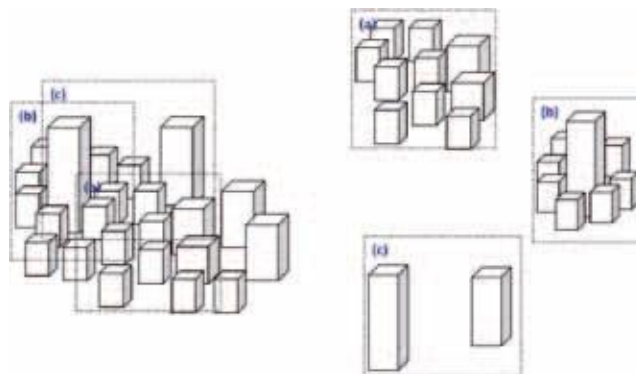
$$IF = F_{\text{interferentie}} / F_{\text{geïsoleerd}}$$

De interferentie factor geeft de verhouding weer tussen de kracht op een dak- of gevelelement op een gebouw onder invloed van interferentie en de kracht op hetzelfde element, waarbij het gebouw geïsoleerd is van de invloed van omringende gebouwen. Deze factor is afhankelijk van een groot

aantal parameters, zoals de snelheid en turbulentie van de wind, de windrichting, het aantal storende gebouwen, de positie, de vorm en de grootte van de gebouwen en de positie van het gebouwelement op het gebouw. Om een uitspraak te kunnen doen over de effecten van deze parameters, definiëren we drie stedelijke typologieën waaraan onderzoek naar de invloed van windinterferentie op windbelastingen is gedaan. Figuur 1 geeft een schematische weergave van een stad waarin deze stedelijke typologieën gespecificeerd zijn:

- de invloed van lage gebouwen met vergelijkbare hoogte op elkaar
- de invloed van een hoog gebouw (of meerdere hoge gebouwen) op omringende laagbouw
- de invloed van twee of meerdere hoge gebouwen op elkaar.

Een hoog gebouw is volgens de Eurocode [1] een gebouw dat tweemaal zo hoog is als de gemiddelde gebouwhoogte van de omgeving.

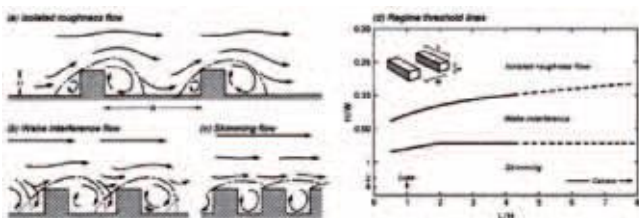


Invloed van lage gebouwen met vergelijkbare hoogte op elkaar

In een omgeving met gebouwen van vergelijkbare hoogte is er over het algemeen sprake van afscherming, waardoor de windbelastingen lager uitvallen dan in een alleenstaande situatie. Studies (bv. Oke [2]) naar het windveld tussen ge-

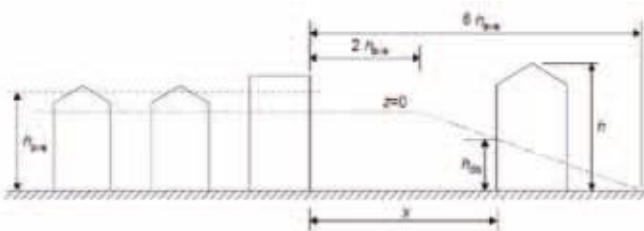
bouwen onderscheiden drie soorten stroming, geïllustreerd in figuur 2, afhankelijk van de afstand tussen de gebouwen:

- a Indien de gebouwen op een afstand groter dan ongeveer 4 maal de gebouwhoogte van elkaar af staan, dan ziet de stroming de gebouwen als onafhankelijk,
- b Voor een kleinere afstand tussen de gebouwen zal interferentie optreden tussen het windveld van beide gebouwen.
- c Als de afstand tussen de gebouwen kleiner wordt dan 2 maal de gebouwhoogte, ontstaat er een zogenaamde ketsende stroming. Hierbij is er een grote stabiele werveling aanwezig tussen de gebouwen, zoals te zien is in figuur 2(c), die wordt aangedreven door de atmosferische grenslaag.



Voor situatie (b) en (c) ligt het niveau waarop de windsnelheid nul is gemiddeld genomen op een grotere hoogte dan de grond, afhankelijk van de verhouding tussen de hoogte van de gebouwen en de afstand ertussen. Om deze reden wordt er voor ruwe terreinen vaak een zogenaamde verplaatsingshoogte toegepast, deze is representatief voor de hoogte waarmee de grenslaag wordt opgetild.

Ook in NEN-EN 1991-1-4 [1] wordt, voor terreincategorie IV, het effect van dichtbij elkaar gelegen gebouwen en obstakels op het windgedrag in rekening gebracht met de verplaatsingshoogte (h_{dis}). Het profiel van de extreme waarde van de stuwdruk met de hoogte mag in dit geval worden opgetild met h_{dis} (figuur 3). Hierbij moet wel aangetekend worden dat voor toepassing van deze regel de gebouwen niet precies dezelfde hoogte moeten hebben. Indien er dus een hoog gebouw in deze omgeving staat dan kan deze regel nog wel steeds worden toegepast. Er moet dan echter ook rekening worden gehouden met de interferentie tussen het hoge gebouw en zijn directe omgeving.

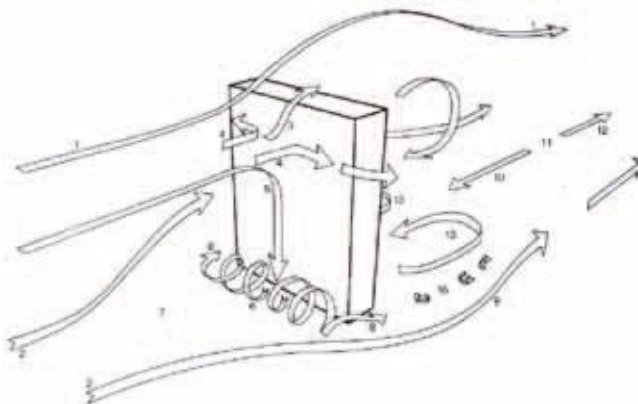
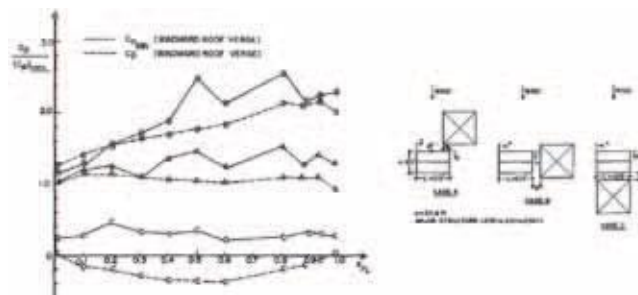


Invloed van een hoog gebouw op naastgelegen laagbouw

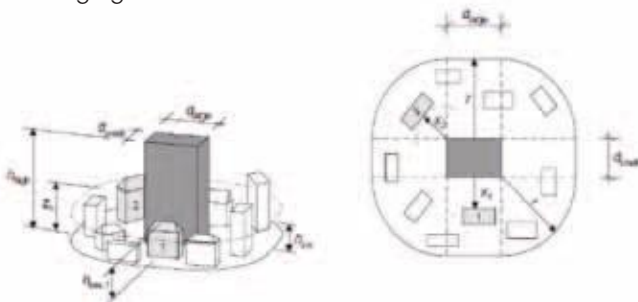
De invloed van 1 hoog gebouw op omliggende laagbouw, geïllustreerd in figuur 1 (b), is onderzocht door Stathopoulos [3]. Figuur 4 geeft de interferentiefactoren voor de gemiddelde en piekdrukcoëfficiënten van dit onderzoek, hieruit blijkt dat indien het lage gebouw naast het hoge gebouw staat,

de piekdruk op sommige posities op de dakrand met een factor 2.5 kan toenemen ten opzichte van de geïsoleerde situatie, zoals geïllustreerd voor case B in figuur 4.

Figuur 5 geeft een kwalitatief beeld van de stroming rond een hoog gebouw (Beranek [4]) Deze illustratie maakt duidelijk wat de oorzaak is van de belastingsverhoging op de omringende laagbouw. De wind die door het gebouw wordt afgebogen naar beneden (5), wordt door de grond gedeeltelijk afgebogen naar voren en veroorzaakt een wervel voor het gebouw (6). De afgebogen stroming zorgt voor een verhoging van de windsnelheid nabij de hoeken van het gebouw (8), en resulteert in grote snelheidsfluctuaties.



De Eurocode [1] geeft een grove rekenmethode voor het effect van een hoog gebouw op omliggende laagbouw, geïllustreerd in figuur 6. Indien een gebouw meer dan twee maal zo hoog is als de gemiddelde hoogte h_{ave} van nabijgelegen bouwwerken, dan mag als eerste benadering de windbelasting op de omringende laagbouw berekend worden op basis van de extreme waarde van de stuwdruk op hoogte z_n boven het maaiveld. De hoogte z_n is hierin afhankelijk van de straal van de invloedzone (r) van het hoge gebouw en het lage gebouw (h_{low}) en de afstand tussen de gebouwen (x). De straal van de invloedzone is afhankelijk van de hoogte (h_{high}) of van de grootste breedte (d_{large}) van het hoge gebouw.



ONDERZOEK

In het kader is een vergelijking gemaakt tussen de Eurocode en de resultaten van Stathopoulos voor de invloed van interferentie op de lokale windbelastingen op het dak. De lokale belastingen berekend met de Eurocode zijn voor dit geval onveilig. De berekeningsmethode van de Eurocode dient dus echt als een eerste benadering beschouwd te worden, windtunnelmetingen zijn voor deze situatie een veilige bepalingsmethode. Deze analyse laat zien dat deze regel herzien dient te worden.

VERGELIJKING REKENREGEL EUROCODE [1] EN ONDERZOEK STATHOPOULOS [3]

In deze analyse wordt uitgegaan van de gebouwdimensies en karakteristieken van het windprofiel zoals gespecificeerd door Stathopoulos [3]:

Hoog gebouw: $h_{\text{high}} = 76 \text{ m}$; $d_{\text{small}} = d_{\text{large}} = 38 \text{ m}$

Laag gebouw: $h_{\text{low}} = 10 \text{ m}$; $x = 6.5 \text{ m}$

De straal r van het invloedsgebied van het hoge gebouw kan nu berekend worden met (voor $h_{\text{high}} \leq 2d_{\text{large}}$):

$$r = h_{\text{high}} = 76 \text{ m}$$

Indien $x \leq r$, dan is de stuwdrukhoogte die toegepast moet worden voor bepaling van de windbelasting:

$$z_n = 0.5r = 32 \text{ m}$$

De karakteristieken van het windprofiel beschreven door Stathopoulos [3] komen ongeveer overeen met het windprofiel boven een onbebouwde omgeving. Voor gebied II kunnen dan de volgende stuwdrukken bepaald worden voor de ongestoorde situatie ($z_n = 10 \text{ m}$) en de gestoorde situatie ($z_n = 32 \text{ m}$):

$$q_p(10) = 0.85 \text{ kN/m}^2 \text{ en } q_p(32) = 1.22 \text{ kN/m}^2$$

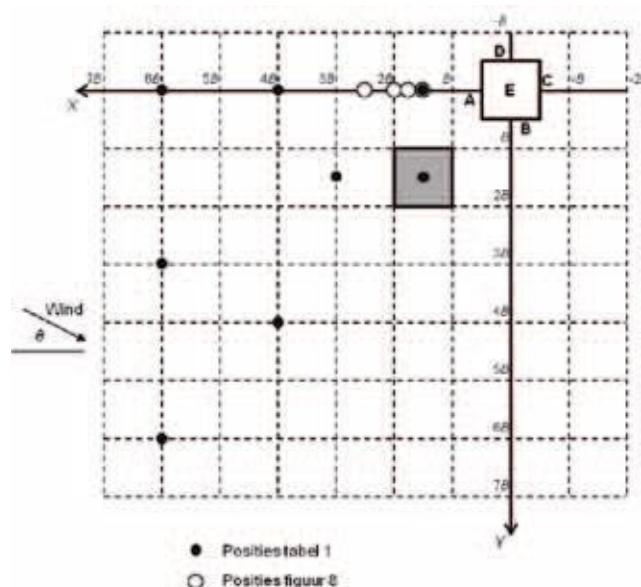
Aangezien de andere waarden (c_{pe} , A_{ref} en c_{se}) hetzelfde worden aangenomen voor beide situaties, is de interferentiefactor nu te bepalen met:

$$IF = F_{\text{interferentie}} / F_{\text{geïsoleerd}} = q_p(32) / q_p(10) = 1.22 / 0.85 = 1.4$$

Vergeleken met de grootste interferentiefactor van 2.5 gevonden door Stathopoulos in het door hem onderzochte geval B, zie figuur 4 en [3], is deze rekenregel voor dit specifieke geval dus onveilig.

optreedt als de gebouwen relatief dicht bij elkaar staan (tot ~1 maal de gebouwbreedte). Hoewel de grootste invloed op de gevels werd verwacht, blijkt dat een storend gebouw met vergelijkbare hoogte als het beschouwde gebouw ook een grote invloed op de dakbelastingen kan hebben. Tabel 1 laat zien dat de belastingen op het dak ook met ongeveer 40% kunnen toenemen als het gebouw op 1 maal de gebouwbreedte staat. Minder grote invloeden (factoren in de orde van 1.1 tot 1.2) zijn waarneembaar voor een grotere afstand tussen de gebouwen, tot 6 maal de gebouwbreedte.

Uit deze studies kan worden geconcludeerd dat de grote invloeden over het algemeen alleen waarneembaar zijn voor een beperkt aantal windrichtingen en vaak maar op een klein deel van de gevels en het dak optreden. Figuur 8(a) en (b) geven dat bijvoorbeeld weer voor de piekdruk op de gevel en het dak voor twee hoge gebouwen die naast elkaar staan. Deze figuren laten zien dat met een afname van de afstand tussen de gebouwen er een toename is in de piekdruk op zowel de gevel als op het dak.

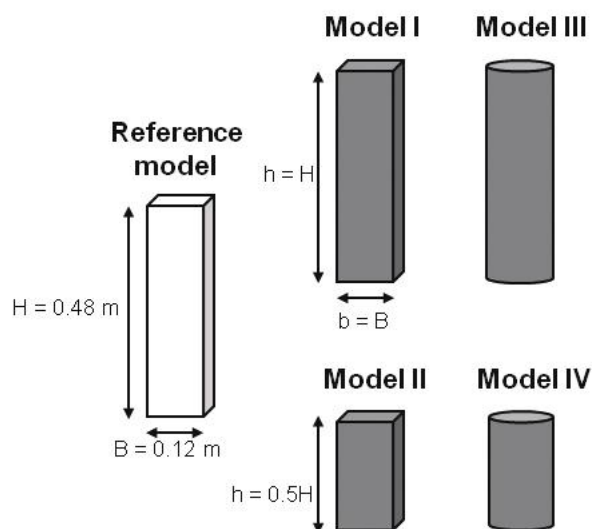


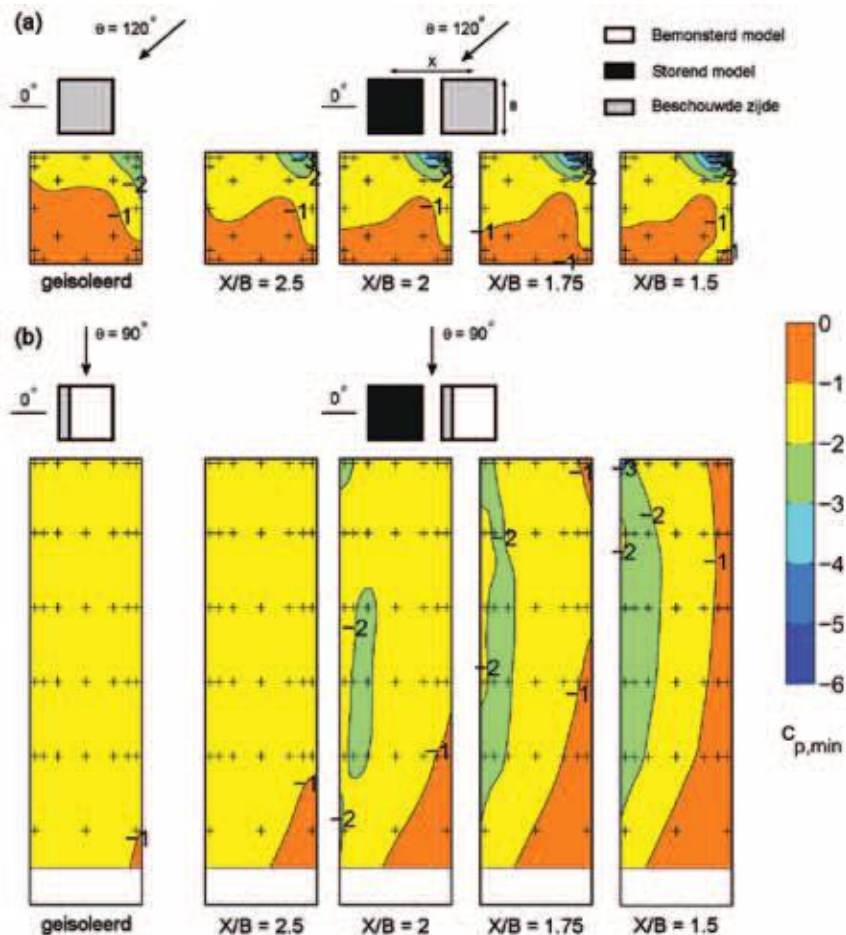
Invloed van een hoog gebouw op een ander hoog gebouw

Er is relatief veel onderzoek gedaan naar de invloed van twee hoge gebouwen op elkaar (bv. Saunders en Melbourne [5], Taniike [6] en Khanduri [7]). In deze studies is voornamelijk de invloed op de globale belasting (de belasting op de hoofdconstructie) onderzocht.

Recentelijk wordt ook veel onderzoek gedaan naar de invloed van interferentie op de lokale belastingen op hoogbouw. Daarbij is vooral de belasting op gevels onderzocht (Kim et al [8] en Hui et al [9] en [10]). Het onderzoek van Bronkhorst [11] en [12] onderzoekt zowel de invloed op de gevels als op het dak van het hoge gebouw. Figuur 7(a) illustreert de posities van het storende gebouw waar windtunnelmetingen aan zijn uitgevoerd, al deze posities zijn onderzocht voor de gebouwmodellen weergegeven in figuur 7(b).

Uit deze studies en het huidige onderzoek blijkt dat de laagste minimum piekdruk op de gevels van het gebouw met zo'n 30 tot 40% kan toenemen (tabel 1), maar dat dit alleen





Conclusie

In dit artikel is een overzicht gegeven van stedelijke typologieën waarvoor interferentie kan optreden. Voor elk van deze typologieën is het huidige kennisniveau omschreven en is een vergelijking gemaakt met de manier waarop interferentie in de Eurocode is verwerkt. Gezien de verschillen in resultaten, en de orde van groottes in verhoging van de lokale belastingen die kunnen optreden, is windtunnelonderzoek momenteel nog een vereiste voor de bepaling van windbelastingen op gebouwen in de nabijheid van hoogbouw; ontwerpregels zoals beschreven in de Eurocode zijn voor de inschatting van lokale belastingen op daken niet altijd veilig. De onderzoeksresultaten geven aan in welke richting de ontwerpregels in de Eurocode en andere normen voor interferentie in de toekomst kunnen worden aangepast voor zowel dak- als gevelbelastingen. In een opvolgend artikel zullen de relaties die gedefinieerd kunnen worden voor de afstand tussen de gebouwen, en de hoogte en vorm van het storende gebouw in meer detail worden besproken.

Zie ook het artikel 'Lichtgewicht zonne-energiesystemen op platte daken stormbestendig' in *Roofs* juli-2013 op www.dakweb.nl.

REFERENTIES

1. NEN-EN 1991-1-4, 2005, Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-4: Algemene belastingen – Windbelasting, Nederlands Normalisatie-Instituut (NEN).
2. T.R. Oke, 1988, Street Design and Urban Canopy Layer Climate, Energy and Buildings, 11, 103-113.
3. T. Stathopoulos, 1984, Adverse wind loads on low buildings due to buffeting, Journal of Structural Engineering, 110, 2374-2392.
4. W.J. Beranek, 1984, Wind environment around single buildings of rectangular shape, Heron, 29, 1.
5. J.W. Saunders, W.H. Melbourne, 1979, Buffeting effects of upstream buildings, Proc. 5th International Conference on Wind Engineering, 593-606.
6. Y. Taniike, 1992, Interference mechanism for enhanced wind forces on neighbouring tall buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44, 1073-1083.
7. A.C. Khanduri, T. Stathopoulos, C. Bédard, 1998, Wind-induced interference effects on buildings – a review of the state-of-the-art, Engineering Structures, 20, 617-630.
8. W. Kim, Y. Tamura, A. Yoshida, 2011, Interference effects on local peak pressures between two buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 99, 584-600.
9. Y. Hui, Y. Tamura, A. Yoshida, 2012, Mutual interference effects between two high-rise building models with different shapes on local peak pressure coefficients, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 104-106, 98-108.
10. Y. Hui, A. Yoshida, Y. Tamura, 2013, Interference effects between two rectangular-section high-rise buildings on local peak pressure coefficients, Journal of Fluids and Structures, 37, 120-133.
11. A.J. Bronkhorst, C.P.W. Geurts, B. Blocken, C.A. van Benthum, 2012, Peak pressure effects on a high-rise building influenced by a mid-rise building, 7th Int. Col. on Bluff Body Aero. and Appl., Shanghai, China.
12. A.J. Bronkhorst, M. van Uffelen, C.P.W. Geurts, L. Aanen, and C.A. van Benthum, 2013, A comparison of peak pressure interference factors for high-rise buildings determined in two ABL wind tunnels, European-African Conference on Wind Engineering, Cambridge, UK.