

Windtunnelonderzoek aan windbelasting op gebouwen

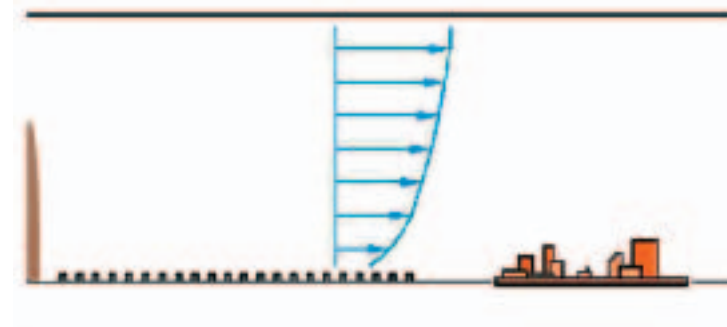
ir. K.W.M. van der Ven en ir. G.M. van Uffelen, Peutz & Associates, Zoetermeer/Mook

De windbelasting op gebouwen wordt steeds frequenter onderzocht in een windtunnel. In dit artikel wordt ingegaan op de techniek van dit soort onderzoek en over de mogelijkheden ervan. Ook enkele uitgevoerde projecten passen de revue, waarbij vooral wordt ingegaan op het bepalen van de representatieve windbelasting op de, vaak in beton uitgevoerde, hoofdconstructie.

1 | Windtunnel Peutz BV



2 | Opwekking atmosferische grenslaag met 'zwaarden' en 'voorland' van blokken



Bij windtunnelonderzoek wordt de windbelasting op de hoofdconstructie of op constructieonderdelen van gebouwen om een aantal redenen gemeten:

- veel gebouwen vallen niet binnen toepassingsgebied van NEN 6702 [1];
- de invloed van de omgeving of van de oriëntatie van het gebouw op windbelasting is rekenkundig moeilijk te bepalen;

- mogelijke besparing door optimaliseren van de constructie;
- onderzoek naar de oorzaak van defecten.

Zeker in het eerste geval is windtunnelonderzoek noodzakelijk, omdat een gebouw vaak niet op verantwoorde wijze is te schematiseren in de eenvoudige vormen waarvoor in NEN 6702 windvormfactoren worden voorgeschreven.

Techniek

In de op foto 1 weergegeven windtunnel, het zogenoemde 'gesloten type' met een doorsnede van 3,2 x 1,8 m² en een stromingslengte van 40 m, kan een gemiddelde windsnelheid worden opgewekt van ruim 25 m/s. Gemeten wordt aan modellen met een schaal die varieert van 1:150 tot 1:500. Bij metingen aan gevelonderdelen is de schaal meestal 1:150, omdat de afmeting van de kleinste wervels in de kunstmatig opgewekte 'atmosferische grenslaag' enkele millimeters bedraagt. Het heeft dus geen zin kleinere details te modelleren.

Gemeten wordt om de 15°, dus bij 24 windrichtingen. In figuur 2 is het verloop van de windsnelheid over de hoogte in de 'atmosferische grenslaag' schetsmatig aangegeven. De turbulentie hierin wordt opgewekt door de wind door een rij 'zwaarden' en over een 'voorland' van blokken te blazen.

De winddrukken worden gemeten met dynamische drukopnemers die in de gevel van het schaalmodel zijn ingebouwd (fig. 3). Een typisch meetsignaal van 24 windrichtingen is in figuur 4 weergegeven. Bij elke windrichting is duidelijk te zien dat er een aantal extremen optreedt.

De gemeten windbelasting moet voldoen aan de in het Bouwbesluit vastgelegde voorschriften, gebaseerd op een probabilistische grondslag. Een bepaalde *betrouwbaarheid conform* NEN 6700 [2], gekoppeld aan de ontwerplevensduur van het gebouw, moet worden verzekerd. Er dient dus een waarde te worden bepaald die representatief is voor de windbelasting gedurende de ontwerplevensduur: de zogenoemde *representatieve waarde*.

Cook heeft hiervoor een probabilistische methode ontwikkeld: de *extreme-waardenanalyse* [3]. Allereerst dient de kansverdeling van de gemeten extremen van de fluctuerende windbelastingen te worden vastgelegd [4]. Dit blijkt de zogenoemde Fisher-Tippett I kansverdeling te zijn. Bij elke meting moeten vervolgens de parameters van deze kansverdeling worden bepaald uit de verkregen extremenreeks. In figuur 5 zijn voor één meetpunt en één windrichting de gemeten extremenreeks en de kansverdeling weergegeven. Ten slotte moet worden berekend welke maximale windbelasting gemiddeld ééns in de vijftig jaar zal worden overschreden.

In de praktijk wordt gewerkt met de belastingsnorm NEN 6702. Een windtunnelonderzoek zal dus gelijkwaardig moeten zijn aan een berekening volgens NEN 6702, hetgeen met de methode van Cook wordt gerealiseerd. Deze ligt overigens ook ten grondslag aan NEN 6702 en vergelijkbare buitenlandse normen.

Omdat alle meetpunten simultaan worden gemeten, kunnen er ook 'real time' bewerkingen op worden uitgevoerd, zoals het berekenen van de netto-windbelasting op een gevelonderdeel of een overkapping.

Een ander voorbeeld is het berekenen van de totale krachten en momenten op de fundering van een gebouw. Als van elk meetpunt het geveloppervlak eromheen en de hoogte worden meegenomen en vervolgens alle meetsignalen worden opgeteld, wordt een nieuw signaal verkregen dat er weer uitziet als figuur 4, maar nu in MN en MNm. Om voldoende nauwkeurige waarden te verkrijgen, worden op een enkel gebouw 60 à 120 drukopnemers aangebracht, afhankelijk van de complexiteit.

Een interessant verschijnsel dat bij het meten van de windbelasting op hoge gebouwen een rol speelt, is

de tijdschaal van de windvlagen. Grote en langdurige windvlagen kunnen op het gehele gebouw aangrijpen en, vanwege hun grote tijdschaal, een forse uitwijking veroorzaken. Kleine en kortdurende windvlagen kunnen weliswaar zeer hevig zijn, maar vanwege de grote massa van het gebouw en daardoor de relatief geringe versnelling ($F = m \cdot a$) zal de uitwijking relatief gering zijn binnen de kleine tijdschaal. Daarom zijn windbelastingen boven de laagste eigenfrequentie van het gebouw doorgaans niet maatgevend bij onderzoek naar de windbelasting op de hoofd-draagconstructie. De opslingering bij de eigenfrequenties van het gebouw is overigens alleen met een zogenoemd 'aero-elastisch' schaalmodel te meten, of te berekenen volgens NEN 6702.

Projecten

WTC-toren Amsterdam-Zuid

Aan de Zuidas in Amsterdam wordt een nieuwe, ruim 100 m hoge toren voor het WTC gebouwd. Windtunnelonderzoek is verricht naar de representatieve krachten en momenten op de betonconstructie (fig. 6). Berekening volgens NEN 6702 leverde een hoeveelheid extra wapening op, omdat de betonnen constructiekern, ondanks het hoge eigen gewicht, op de onderste zes verdiepingen nogal sterk op trek zou worden belast. Daardoor zou voor deze verdiepingen geen klimbekisting kunnen worden ingezet, met als gevolg een langere bouw-tijd.

Echter, de oriëntatie van de toren is gunstig: niet naar het zuidwesten (de meest bepalende windrichting) gericht. Ook is er aan de zuidkant veel afscherming door de stad. Die wordt in de windtunnel gemodelleerd door een zogenoemd 'voorland' van blokken (zie fig. 2); de lengte van het voorland houdt verband met het aantal kilometers stad en de maximale hoogte waarop de invloed van die stad nog zichtbaar is in de atmosfe-



3 | Drukopnemers

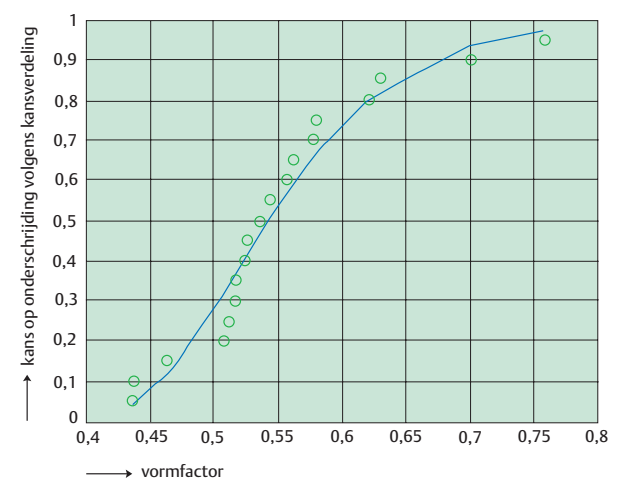


4 | Fluctuerende winddruk bij 24 windrichtingen

sche grenslaag. Bovendien heeft de toren gezien vanaf het zuiden een geringe hoogte-breedteverhouding, waardoor de windbelasting op grotere hoogte relatief gunstig uitvalt ten opzichte van de 'oneindig lange' toren uit NEN 6702.

Eén en ander resulteerde uiteindelijk in een gemeten reductie op de representatieve windbelasting van circa 15% ten opzichte van NEN 6702, waardoor geen extra wapening in de onderste verdiepingen behoefde te worden toegepast. Daardoor kon de klimbekisting wél voor alle verdiepingen worden gebruikt en de bouw-tijd aanzienlijk worden verkort.

5 | Gemeten extremenreeks en cumulatieve kansverdeling FT I



6 | WTC Amsterdam

Onderzoek in samenwerking met Van Rossum Raadgevende Ingenieurs



7 | Galgenwaardkantoren Utrecht

Onderzoek in samenwerking met Bartels Ingenieursbureau



8 | Wijnhaventoren Rotterdam

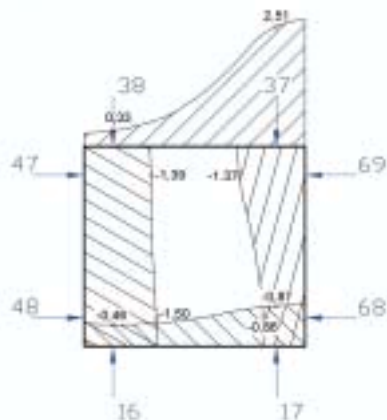
Onderzoek in samenwerking met Corsmit Raadgevende Ingenieurs



Ook voor de projecten Mahler 4 en Millennium Tower in Amsterdam, de Galgenwaardkantoren te Utrecht en de Wijnhaventoren te Rotterdam is dit soort windtunnelonderzoek uitgevoerd. De twee laatstgenoemde zijn mooie voorbeelden van projecten waar het windtunnelonderzoek veel nuttige informatie en inzicht opleverde voor de constructeur.

9 | Momentane winddrukcoëfficiënten

Wijnhaventoren

*Galgenwaardkantoren Utrecht*

Interessant aan deze kantoren is de sterk asymmetrische vorm (foto 7). Aan de achterzijde steekt het gebouw ver uit ten opzichte van de centrale kern. Dit heeft vooral gevolgen voor het torsiemoment: het gemeten moment bleek ruim 20% hoger dan het volgens NEN 6702 berekende. Het maximale effect bleek op te treden bij wind uit westelijke richting; dat is de richting vanwaar foto 7 is genomen. Dit toont aan dat bij een gebouw dat afwijkt van de rechthoekige schematisering volgens NEN 6702, het uitvoeren van een windtunnelonderzoek essentieel is.

De gemeten krachten en momenten in de richting oost-west vielen overigens ruim 40% lager uit dan berekend volgens NEN 6702. Belangrijkste redenen hiervoor zijn de gunstige oriëntatie: niet naar het zuidwesten, maar naar het westen en de lichte wigvorm van het gebouw. Verder bevindt zich ten westen van het gebouw veel stedelijke bebouwing, wat een gunstige invloed heeft op het windprofiel ter plaatse van het onderzochte gebouw.

Wijnhaventoren Rotterdam

Bij de Wijnhaventoren te Rotterdam (fig. 8) speelt het torsiemoment ook een belangrijke rol. In figuur 9 is een momentopname van de winddrukcoëfficiënten om de toren weergegeven. De verdeling van de coëfficiënten is veel asymmetrischer dan NEN 6702 voorschrijft voor het berekenen van het torsiemoment. De norm verdeelt de toren namelijk in twee helften; op de ene helft moet een stuwdruk p_w worden aangebracht en op de andere helft $1/2 p_w$. De werkelijke drukverdeling resulteert in een gemeten torsiemoment dat ruim twee keer zo hoog is. Om inzichtelijk te maken in hoeverre de windbelasting op de Wijnhaventoren wordt bepaald door de gebouwen in de omge-

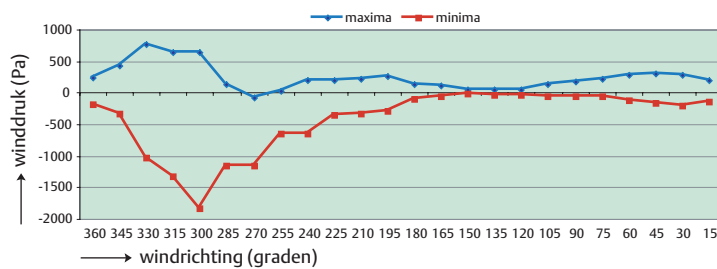
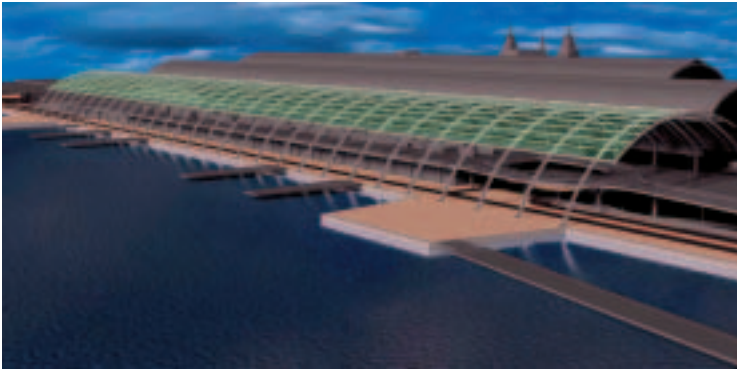
ving, is tevens een variantmeting uitgevoerd waarbij deze gebouwen zijn afgeknot tot een hoogte van 15 m. Het verschil tussen beide metingen bedraagt ruim 10% bij de kracht zuidoost-noordwest. Hoe hiermee om te gaan is nog onderwerp van discussie; hierop wordt nog nader ingegaan. Ook is voor dit project een meting aan het te verwachten windklimaat voor de belendingen uitgevoerd. Daarvoor is van dezelfde maquette gebruikgemaakt. Vanwege de grote hoogte van de toren is in de rondom gelegen straten bijvoorbeeld een aantal grote luifels nodig, die op hun beurt weer op een forse windbelasting gedimensioneerd moeten worden.

Amstelstation

Voor het Amstelstation in Amsterdam zijn metingen uitgevoerd om de invloed van mogelijke hoogbouw vlakbij deze gebouwen te onderzoeken. Er zijn metingen uitgevoerd voor de huidige situatie en de situatie met hoogbouw. Bij dit station is een toename van de windbelasting tengevolge van mogelijke hoogbouw van tientallen procenten gemeten. Een dergelijk windtunnelonderzoek leidt dus niet altijd tot besparingen, maar wel tot extra veiligheid.

Stationsoverkapping IJSEI

Een interessant voorbeeld van windtunnelmetingen aan een busstationsoverkapping betreft 'IJSEI' te Amsterdam (fig. 10, [5]). Vanwege zijn bijzondere vorm valt de overkapping buiten het toepassingsgebied van NEN 6702. Daarom is in de windtunnel zowel de representatieve windbelasting op de spanten als op de afzonderlijke ruiten bepaald. Op de zuidwestelijk gelegen rand zijn representatieve waarden voor de opwaartse kracht tot maar liefst 3000 N/m^2 gemeten, onder meer omdat de wind ónder de overkapping lokaal voor forse overdrukken zorgt.



Turbulentie gegenereerd door de in de nabijheid geplande uitbreiding van het IBIS-hotel speelt hier ook een rol. In figuur 11 is de representatieve windbelasting ter plaatse van de rand als functie van de windrichting weergegeven.

Tevens zijn de gemeten winddrukken als randvoorwaarden in een Computational Fluid Dynamics rekenmodel ingevoerd, dat is gebruikt om een eventuele brand in het busstation te simuleren. Ten slotte is voor dit project het windklimaat onderzocht.

Discussie

Bij de interpretatie van de resultaten resteert nog een aantal vragen.

Tijdens de ontwerplevensduur moeten alle mogelijke belastingssituaties worden afgedekt. Natuurlijk is niet duidelijk hoe bijvoorbeeld de nabije omgeving van het gebouw er in de komende vijftig jaar zal blijven uitzien. Als er nu sprake is van gunstige afscherming, is dat over vijftig jaar ook nog zo? En als er een ensemble van torens wordt gebouwd, worden deze gelijktijdig gebouwd? Mag windrichtingsafhankelijkheid worden meegenomen in het onderzoek of moet er conform NEN 6702 met een uniforme windroos worden gerekend? De fysische werkelijkheid is natuurlijk windrichtingsafhankelijk.

Probleem is dus eigenlijk dat er in Nederland nog niet echt eisen zijn vastgelegd voor de wijze waarop het windtunnelonderzoek moet worden uitgevoerd en geïnterpreteerd. Hieraan wordt in CURverband gewerkt in de commissie 'Windtunnelonderzoek aan de windbelasting op gebouwen' [6]. ■

Literatuur

1. NEN 6702:1991, TGB 1990 – Belastingen en vervormingen. NEN, Delft.
2. NEN 6700:1991, TGB 1990 – Algemene basiseisen. NEN, Delft.
3. Cook, N.J., The designer's guide to wind loading of building structures, Part 2. Butterworths, London, 1989.
4. Wieringa J. en P.J. Rijkooft, Windklimaat van Nederland. Staatsuitgeverij, Den Haag, 1983.
5. Vos, Joost, Compact Comfort. Cement 2004, nr. 2.
6. Woudenberg, I.A.R. en J.N.J.A. Vambersky, Windbelasting, hoogbouw en regelgeving. Cement 2003, nr. 6.

10 | 'IJSEI' Amsterdam
Onderzoek in samenwerking met Holland Railconsult
visualisatie: HR Visuals

11 | Lokale windbelasting
rand kap

Kwantitatieve vergelijking

Om een kwantitatieve vergelijking van de meetmethode met een bepaling volgens NEN 6702 mogelijk te maken, is op verzoek van Bouwtoezicht Amsterdam een proefmeting uitgevoerd aan een vrijstaande, rechthoekige en niet al te slanke toren ($l \times b \times h = 30 \times 30 \times 100 \text{ m}^3$, fig. 12). Opzet, uitvoering en gegevensverwerking van de meting zijn reeds zo veel mogelijk uitgevoerd overeenkomstig de concept-Aanbeveling van de CUR-commissie. De verhouding tussen de in de windtunnel bepaalde en de volgens de norm berekende momenten bedraagt in dit specifieke geval 1,07. Verwacht mag worden dat deze verhouding bij slankere rechthoekige en vrijstaande gebouwen nog wat hoger zal zijn.



12 | Proefmodel op schaal
1:400 van een rechthoekige vrijstaande toren