

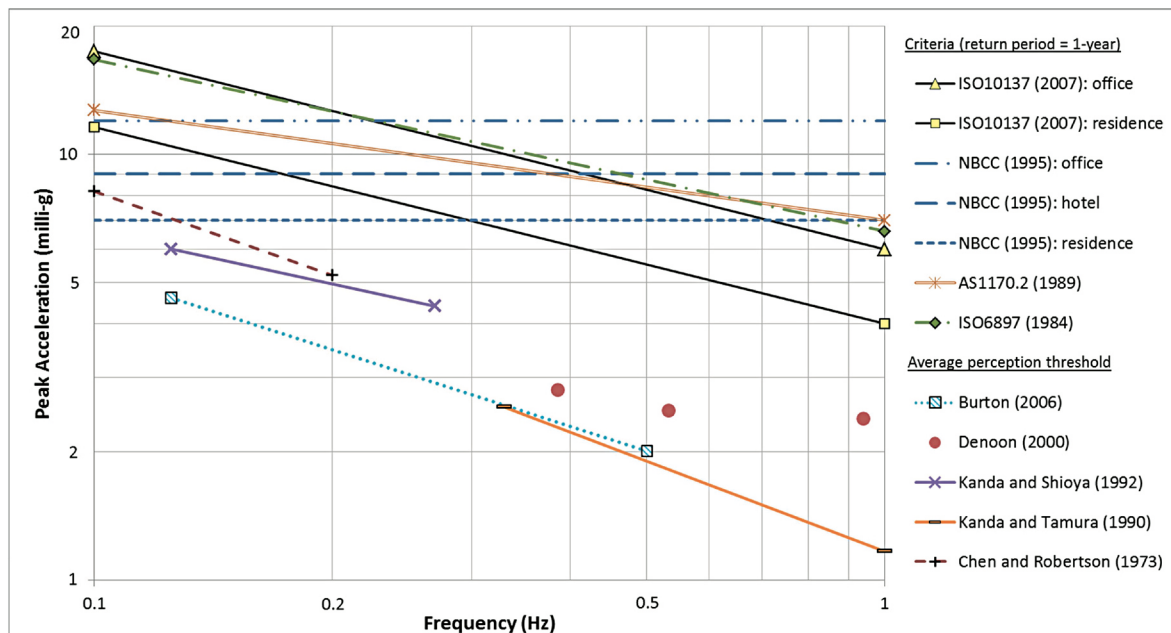
4D dynamische analyse van hoogbouw

Analyse toegelicht aan de hand van project EPO

Om invulling te geven aan de toenemende vraag naar woningen treedt een verdichting op in binnenstedelijke gebieden. Doordat de beschikbare ruimte beperkt is, wordt de footprint van gebouwen kleiner en worden torens slanker. Vanaf een slankheid van één op zeven gaan dynamische aspecten een belangrijke rol spelen. Die kunnen in het ontwerp worden meegenomen met behulp van dynamische analyses.



2



Toetsing

Als gevolg van windbelastingen kunnen niet alleen verplaatsingen maar ook versnellingen in een gebouw optreden. Deze versnellingen kunnen als hinderlijk worden ervaren. Daarom moet het gebruikerscomfort worden beoordeeld. Dit kan door een maatgevende versnelling van een gebouw tijdens een storm te bepalen en deze te toetsen aan een grenswaarde.

Afhankelijk van de toe te passen voorschriften wordt getoetst op een piekwaarde of een gemiddelde waarde (RMS-waarde). In het laatste geval wordt een kwadratisch gemiddelde bepaald van de versnellingen over de tien maatgevende minuten in een storm en wordt deze getoetst aan een grenswaarde. In figuur 2 [1] zijn een aantal grenswaarden uit internationale literatuur en normen met elkaar vergeleken.

In NEN-EN 1990-NB [3] wordt voorgeschreven om een piekversnelling te toetsen aan een grenswaarde, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen woongebouwen en gebouwen met een andere gebruiksfunctie. Een nadeel is dat een toets op de piekversnelling minder goed aansluit bij de werkelijkheid. Een piekversnelling op zichzelf zal

niet als onprettig worden ervaren door de gebruikers. Maar wanneer gedurende een bepaalde periode de versnellingen boven een drempelwaarde worden waargenomen, zal men dit wel als onprettig ervaren. Dit kan zich uiten in concentratieproblemen, afname van gezichtswaarneming, vermoeidheid, prikkelbaarheid en slaapstoornissen [2].

Een beschouwing van een RMS-waarde van de versnelling geeft beter bruikbare resultaten omdat deze kunnen worden 'vertaald' naar een percentage mensen dat discomfort ervaart. In NEN-ISO 6897 [5] zijn hiervoor twee drempelwaarden gedefinieerd: een drempelwaarde voor discomfort en een drempelwaarde voor het waarnemen van versnellingen (fig. 3).

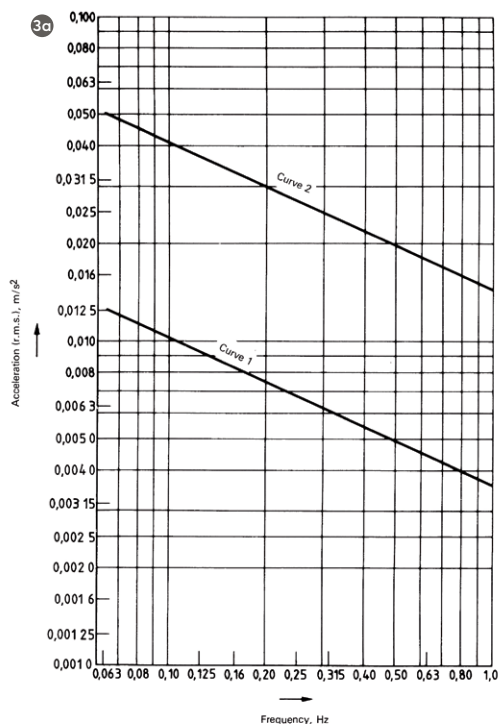
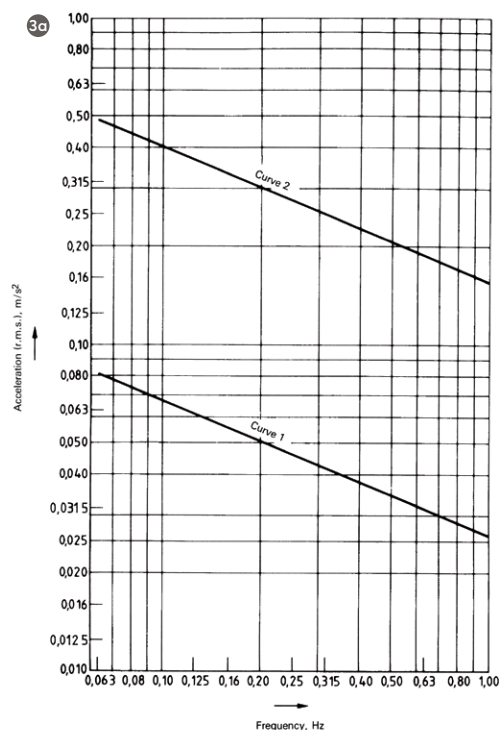
Volgens Boggs [4] kan de drempelwaarde worden vertaald naar het aantal mensen met klachten afhankelijk van de herhalings-tijd. De drempelwaarde van figuur 3a geeft bij een herhalings-tijd van 5 jaar klachten voor 2% van de mensen en voor 12% van de mensen bij een herhalings-tijd van 1 jaar. De drempelwaarde van figuur 3b voor het voelen van trillingen kan worden gebruikt als een extra randvoorwaarde. Deze is niet nor-

auteur



**IR. ARNOLD
ROBBEMONT RO**

Raadgevend ingenieur
constructies –
Adjunct-directeur
Zonneveld ingenieurs



matief vastgelegd, maar kan bijvoorbeeld worden gebruikt om het aantal keer per jaar dat windtrillingen zullen worden gevoeld vast te leggen.

Bepalen respons De dynamische windbelasting op een gebouw wordt onder andere bepaald door de geometrie van het gebouw, zoals de plattegrond maar ook door bijvoorbeeld het verloop van breedte en diepte over de hoogte. Daarnaast zullen voor slanke gebouwen belastingen loodrecht op de windrichting een rol kunnen gaan spelen, de zogeheten vortex shedding.

Eén-massa-veersysteem Er zijn verschillende manieren om de versnellingen in een gebouw te bepalen. In een eenvoudige benadering wordt het gebouw beschouwd als een gedempt één-massa-veersysteem, waarbij stijfheid, massa en damping ontwerpspecifieke variabelen zijn. Hierbij wordt een respons van het gebouw bepaald op het gegeven van een dynamische windbelasting die als bekend wordt beschouwd. Deze methode geeft echter onvoldoende inzicht in het dynamisch gedrag van hoge en slanke gebouwen. Voor een gedetailleerde analyse kan deze benadering onvoldoende nauwkeurig zijn en de plank zelfs behoorlijk mis slaan.

4D-modellering Voor slanke gebouwen kan een 4D-analyse in een eindig-elementenprogramma, zoals Abaqus, worden gebruikt om aan te tonen dat een gebouwwontwerp voldoet aan de gestelde eisen. Dit betreft een 3D-analyse aangevuld met de factor tijd (4e dimensie). Een belangrijk voordeel hierbij is dat uit een complexe analyse wel praktische resultaten komen. Zo kan een inschatting worden gegeven van hoeveel mensen op welke plek in een gebouw gedurende de periode van bijvoorbeeld een jaar, trillingen als gevolg van wind zullen waarnemen of hoeveel mensen windtrillingen daadwerkelijk als hinderlijk zullen ervaren en hoe vaak dit zal voorkomen.

Windbelasting

Belangrijke input voor het berekenen van versnellingen is uiteraard de windbelasting.

Omdat bij dynamische analyses wordt gerekend in het tijdsdomein is de dynamische windsnelheid vastgelegd volgens formule:

$$v_{(t)} = \sum_{i=1}^N \hat{v} \sin(\omega_i t + \phi_i)$$

$$\hat{v} = \sqrt{2 S_{vv} \Delta \omega}$$

waarin:

$v_{(t)}$ is de dynamische windsnelheid

S_{vv} is het windsnelheidsspectrum

ω_i is de frequentie

ϕ_i is de fasehoek

De windsnelheid kan over de gebouwhoogte nog worden verschaald. Vervolgens kan hiermee de dynamische windbelasting op het gebouw worden ingeschat. Met deze inschatting kan een eerste beeld worden gekregen van de dynamische eigenschappen van een gebouw. De windbelasting mag volgens NEN-EN1991-1-4 [6] worden gereduceerd voor de gebouwfmetingen. Hiervoor geldt een factor c_s ($\approx 0,85$). Daarnaast mag er een reductie worden toegepast om de correlatie tussen winddruk en zuiging in rekening te brengen (factor 0,85). In totaal geldt dus in een reductiefactor van 0,7.

Door deze belasting in te voeren op een eindig-elementenmodel kunnen de versnellingen in het gebouw worden berekend.

In de praktijk worden vrij conservatieve waarden gevonden en is een meer nauwkeurige beschouwing noodzakelijk. Dit kan aan de hand van windtunnelonderzoek om de dynamische belasting op een gebouw te genereren. Dit wordt nader toegelicht aan hand van een voorbeeld waarin windtunneldata zijn gebruikt.

EPO Rijswijk

Het hoofdkantoor EPO (foto 1) in Rijswijk is een kantoorgebouw van 110 m hoog, 156 m lang en 23 m diep. Niet alleen de afmetingen zijn uitzonderlijk, dat geldt ook voor de constructie: het gebouw is opgebouwd uit een lichte stalen draagstructuur met holle vloeren. Het gemiddelde gebouwgewicht bedraagt circa 7,5 kN/m². Door de gebouwhoge atria aan voor- en achterzijde bedraagt het volumieke gewicht slechts 1,2 kN/m³. De stabiliteitsstructuur in dwarsrichting bestaat uit zes stalen vakwerken (fig. 4). Beide cen-

traal gelegen kernen hebben elk twee vakwerken. Ook aan beide uiteinden van het gebouw is een vakwerk toegepast. Deze laatste zijn 50% zwaarder uitgevoerd dan de centraal gelegen vakwerken.

In een samenwerking tussen TNO, DIANA FEA, Peutz en Zonneveld is een analyse uitgevoerd van het dynamisch gedrag van het gebouw. Hierbij zijn de dynamische winddrukken vanuit een windtunnel vertaald naar dynamische lasten op het model.

Dynamische analyse

In een eerste analyse van het ontwerp zijn de piekversnellingen voor een jaarlijkse windbelasting beschouwd. De dynamische windbelasting is bepaald volgen NEN-EN-1991-1-4. Hierbij werden versnellingen gevonden die binnen de grenswaarden volgens NEN-EN-1990 vielen.

Bij de dynamische analyse is de eigenfrequentie een belangrijke parameter. Die moet worden bepaald voor zowel torsie als buiging. Beide liggen voor EPO vrij dicht bij elkaar, te weten 0,29 Hz voor torsie en 0,34 Hz voor buiging (fig. 5). Een veilige aanname is het optellen van de versnellingen voor buiging en torsie wanneer deze per trillingsvorm zijn berekend.

In dit geval zijn de buigstijfheid van de buitenste vakwerken bepalend voor de torsiestijfheid en de buigstijfheid van het gebouw. Voor de trillingsvormen buiging en torsie van de constructie als geheel ondergaat dit spant op zichzelf een identieke buigcurve. Indien torsie en buiging elkaar versterken, zou dit spant in twee nabijgelegen frequenties trillen in dezelfde trillingsvorm, wat niet aannemelijk is. In hoeverre en in welke mate versnellingen als gevolg van torsie en buiging gelijktijdig optreden, kan met genoemde werkwijze niet worden bepaald, maar is wel essentieel om de maximaal optredende versnellingen te bepalen.

Verder wordt verwacht dat de belasting te hoog is ingeschat door de oriëntatie met de smalle zijde richting de zuidwestrichting, de richting met de hoogste windsnelheden (fig. 6). Ook lijkt de correlatie van 0,85 hoog voor het aangeblazen oppervlak van $156 \times 110 \text{ m}^2$.

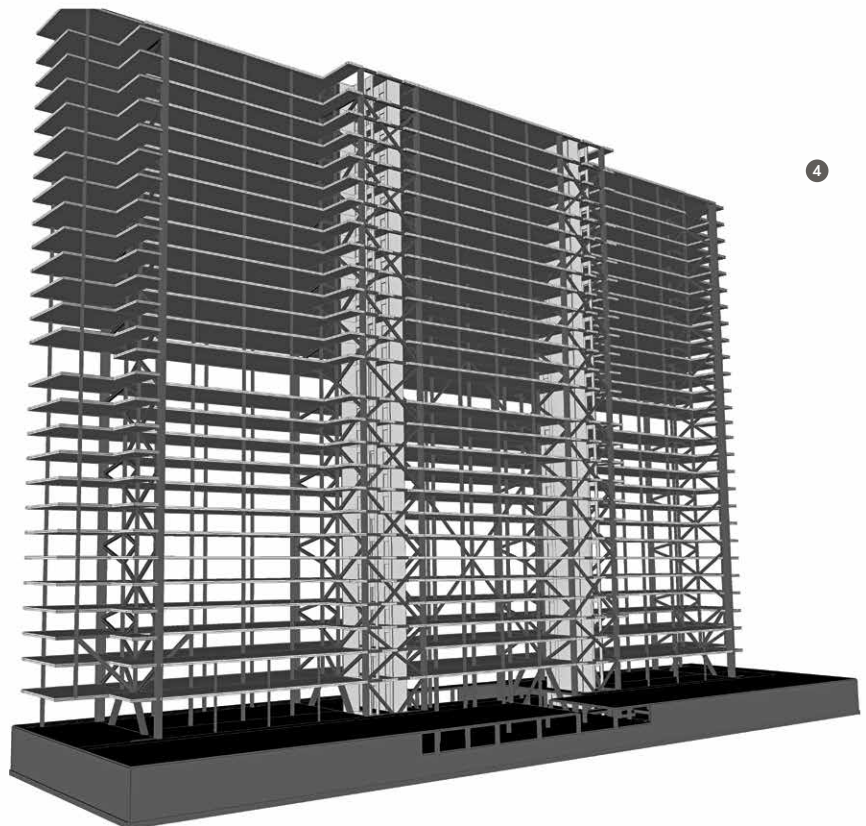
Om meer inzicht in het dynamisch gedrag te krijgen, is besloten de windbelasting vanuit het windtunnelonderzoek in een EEM-model te plaatsen.

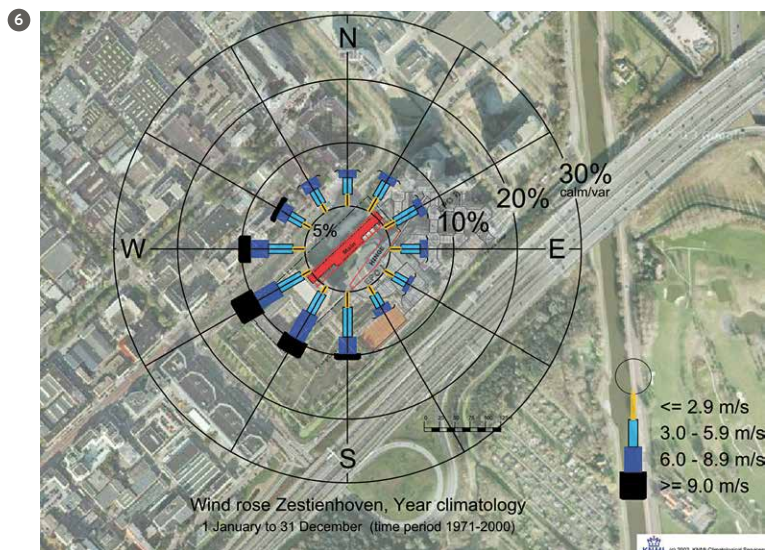
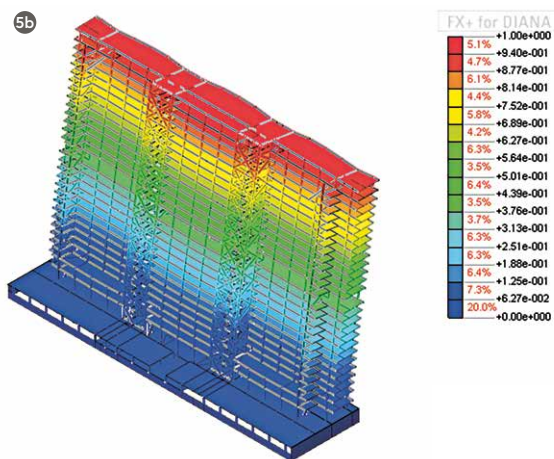
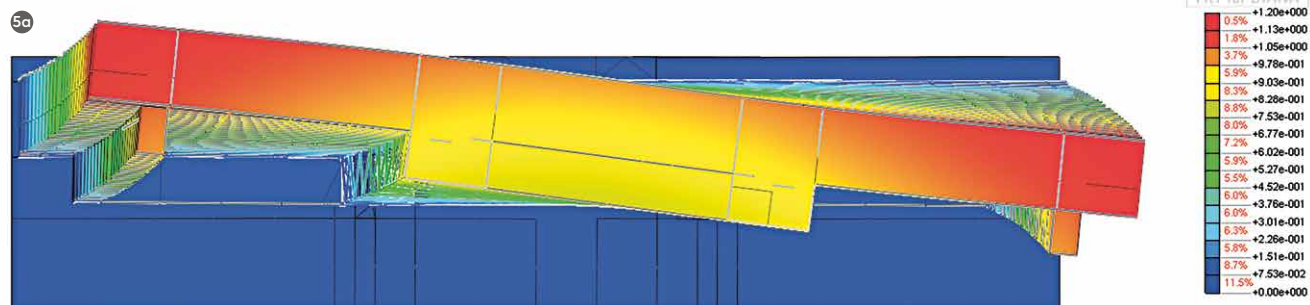
Windbelasting uit windtunnel

In het windonderzoek zijn in totaal 64 punten aan de loef- en lijzijde gemeten (fig. 7). Van deze punten zijn de tijdseries van de gemeten winddrukken vertaald naar belastingen op het rekenmodel. Hierbij wordt voor een vlak op de gevel aangenomen dat de winddruk min of meer gelijk is. Om dit te verifiëren, is de correlatie van de winddruk tussen verschillende punten geanalyseerd.

In figuur 8a is de correlatie tussen een drukpunt midden op de gevel met de overige drukpunten gegeven. Te zien is dat binnen het zwart omliggende vlak de correlatie nabij 1 is en dus de gemeten druk in dit punt representatief is voor dit vlak. De correlatie met een naastgelegen punt is een maat voor de waarschijnlijkheid dat in deze punten de piekdruk gelijktijdig optreedt. Deze waar-

Voor slanke gebouwen kan met een 4D-analyse worden aangetoond dat een gebouw-ontwerp voldoet aan de gestelde eisen





schijnlijkheid neemt naar de randen van de gevel snel af.

Ook tussen de winddruk aan de loefzijde en de zuiging aan de lijzijde is de correlatie bepaald (fig. 8b). De correlatie is uniform verdeeld en gemiddeld circa -0,3.

De eerder – aan de hand van NEN-EN 1991-4-1 – bepaalde factor van 0,7 om de invloed van de gebouwfmetingen en de correlatie in rekening te brengen, is te ongunstig. Door de grote afmetingen van het gebouw varieert de belasting over de geveloppervlakken meer dan voorzien en is de totale windbelasting lager.

4D-analyse

Op basis van een analyse van de balansmetingen over de 24 windrichtingen zijn drie maatgevende windrichtingen geselecteerd waarvoor de windbelasting gedurende 5 uur is beschouwd op het EEM-model. Twee tor-

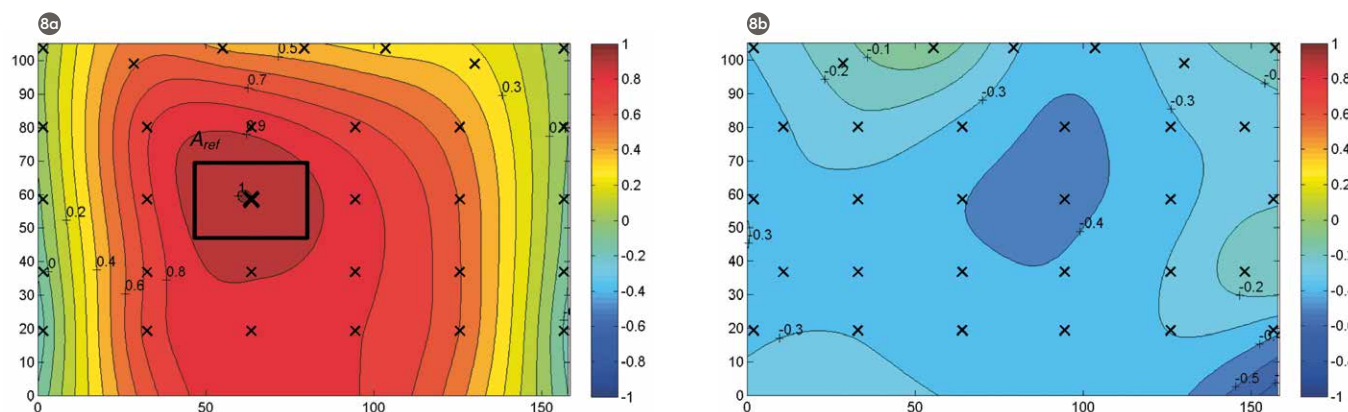
sierichtingen en één buigrichting. Vanuit de berekende versnellingen (fig. 9) zijn de volgende maximale waarden berekend:

- piekversnelling $0,069 \text{ m/s}^2$ ($< 0,15 \text{ m/s}^2$ drempelwaarde NEN-EN 1990);
- 10 min RMS-versnelling herhalingstijd 5 jaar $0,027 \text{ m/s}^2$ ($< 0,038 \text{ m/s}^2$ drempelwaarde ISO6897);
- 10 min RMS-versnelling herhalingstijd 1 jaar $0,020 \text{ m/s}^2$ ($< 0,022 \text{ m/s}^2$ drempelwaarde ISO6897).

Voor verschillende windrichtingen werden vergelijkbare versnellingen gevonden. Torsie en buiging geven versnellingen in dezelfde orde van grootte.

Beoordeling resultaten

Versnellingen in de torsiefrequentie worden veroorzaakt door wind onder verschillende hoeken nabij de dominante zuidwes-



tenwind en kunnen dus relatief vaak optreden. Versnellingen in de buigfrequentie komen alleen voor bij noordwestenwind. Daar staat tegenover dat torsie piekversnellingen geeft in de bovenste hoeken van het gebouw, waar dit voor buiging de gehele bovenste verdieping betreft. Bij torsie van het gebouw zullen dus minder mensen blootgesteld worden aan de piekversnellingen dan bij buiging het geval is.

Vanuit de gevonden RMS-waarden kan een inschatting worden gemaakt van het aantal mensen dat jaarlijks windversnellingen zal waarnemen in het gebouw en het aantal mensen dat zal klagen over hinder als gevolg van windtrillingen. Uit de analyse volgt dat deze laatste waarde lager is dan 2%, en dus voldoet aan ISO6897. Het is voor dit project gebleken dat de vertaling van versnellingen naar het aantal te verwachten

klachten goed bruikbaar is om een opdrachtgever te informeren over het gebruikersgemak in relatie tot de windbelasting.

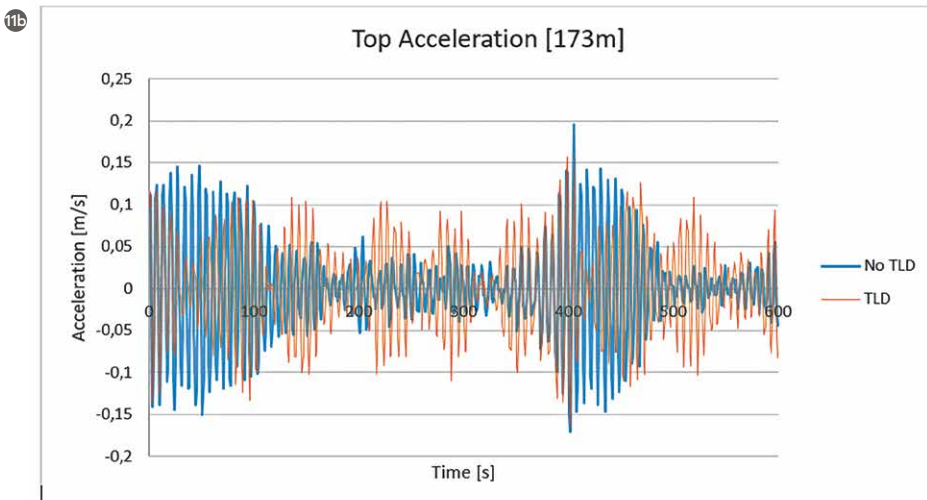
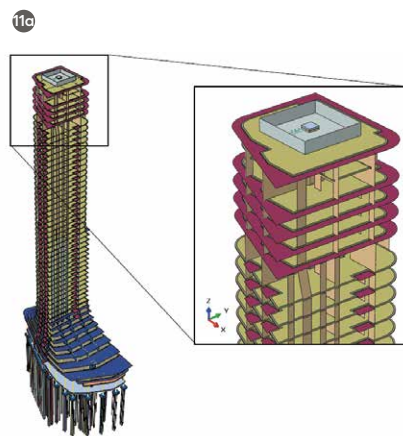
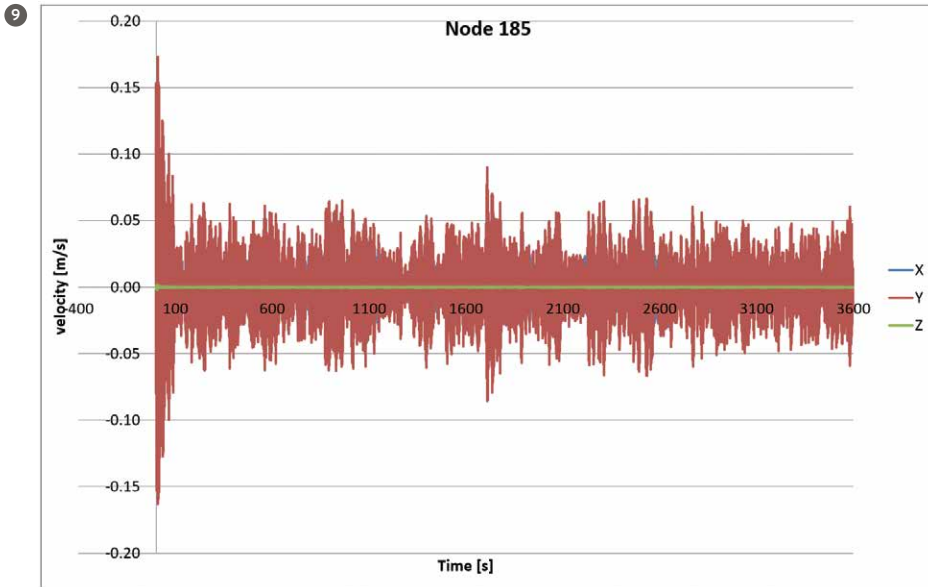
Toekomst: CFD

Een interessante ontwikkeling is de opkomst van *Computational Fluid Dynamics* (CFD), waarbij de windbelasting door de computer wordt gesimuleerd. Op dit moment worden CFD-modellen ingezet voor windhinderberekeningen, maar bijvoorbeeld ook voor het bepalen van explosiedrukken op gevels.

Hoewel de toepassing van CFD voor het bepalen van winddrukken in opkomst is, is de techniek op dit moment nog niet zover dat deze bruikbaar is voor het ontwerp [7]. Het maken van één 4D-EEM-berekening waarin de respons van een structuur in een CFD direct wordt berekend, lijkt dan ook nog verder in de toekomst te liggen. Tot die

Een interessante ontwikkeling is de opkomst van Computational Fluid Dynamics (CFD)

7 Windtunnelmodel EPO, in 64 meetpunten op voor- en achtergevel is de dynamische windbelasting in 24 windrichtingen geregistreerd
8 (a) correlatie van windbelasting gemeten in de windtunnel van de punten op de loefzijden ten opzichte van de piekwaarde (vet kruis), en (b) correlatie van windbelasting gemeten in de windtunnel van lijzijde ten opzichte van de piekwaarde aan de loefzijde (vet kruis figuur 8a)



tijd zijn windtunneldata goed bruikbaar om dynamische analyses van hoogbouw uit te voeren. Ook is het hiermee mogelijk parameters te variëren en de invloed hiervan te onderzoeken.

Zo is voor het project E-district in Eindhoven (foto 10) onderzocht wat de invloed is van het plaatsen van een sprinklertank op het dak. Voor de hoogste van de drie torens (170 m) is in het ontwerpstadium berekend dat hiermee versnellingen met 16% kunnen worden gereduceerd (fig. 11).

Met een 4D-EEM is het mogelijk verbeteringen aan een gebouw concreet te maken zodat er gewogen keuzen kunnen worden gemaakt. Door de projectspecifieke analyses met gebruik van windtunneldata kan eenduidig en praktisch worden geadviseerd over de kwaliteit van een slank gebouw met betrekking tot hinder door windtrillingen. ●

LITERATUUR

- 1 Burton, M.D., Kwok, K.C.S. and Abdelrazaq, A., Wind-induced motion of tall buildings: Designing for occupant comfort. *International Journal of High-Rise Buildings*, 2015.
- 2 Esposito, G., Geurts, C.P.W., Perceptie van windtrillingen in hoogbouw. *Cement* 2006/1.
- 3 NEN-EN 1990+A1+A1/C2: Grondslagen van het constructief ontwerp, 2011.
- 4 Boggs, D., Acceleration Indexes for Human Comfort in Tall Buildings – Peak or RMS? Submitted for publication in CTBUH Monograph Chpt. 13: Motion Perception Tolerance and Mitigation, CPP, 1997.
- 5 NEN-ISO 6897:1984 Evaluatie van reacties van personen op laagfrequente horizontale bewegingen (0,063 tot 1 Hz) van bouwwerken, in het bijzonder gebouwen en constructies buitengaats.
- 6 NEN-EN 1991-1-4+A1+C1: Belastingen op constructies – Deel 1-4: Algemene belastingen windbelastingen, 2011.
- 7 Kalkman, I.M., Bronkhorst, A.J., Bentum, C.A. van, Blocken, B. en Geurts, C.P.W., Implicaties bij CFD. *Bouwen met Staal* 234, 2013.