



# **Berekeningsmethoden dynamische responsies hoogbouw**

**Onderzoek naar praktische rekenregels  
voor dynamische responsies door windbelasting**



*Nu er in Nederland steeds hoger en slanker wordt gebouwd, blijken onze normen hierin niet te voorzien. Onderzoek naar wetenschappelijke publicaties en internationale regelgeving hebben een aantal praktische rekenregels opgeleverd waarmee ontwerpberekeningen kunnen worden uitgevoerd voor onder andere de toetsing van de invloed van winddynamica op comfort.*

**In 2017 is IMd Raadgevende Ingenieurs in samenwerking met BREED Integrated Design gestart met het constructief ontwerp voor de Baantoren in Rotterdam.** Deze woontoren van 150 m hoog, met een breedte van 23 m en een diepte van 20 m heeft een slankheid van 7,5 (verhouding hoogte/diepte). Het wordt daarmee de slankste woontoren van Europa (fig. 1). Uiteraard speelt winddynamica bij dergelijke hoge slanke torens een belangrijke rol. Direct vanaf het begin was duidelijk dat onze normen (NEN-EN 1991-1-4, Eurocode 1, deel Windbelasting) hier helaas (nog) niet volledig in voorzien. In het Convenant hoogbouw – Deel 3: Constructieve veiligheid (NTA 4814-3) uit 2012 wordt in paragraaf 8.5.4 nog beweerd dat het trillingsniveau bij resonantie dwars op de windrichting lager zal zijn dan bij resonantie evenwijdig aan de windrichting en dat deze dwarstrillingen daarom niet afzonderlijk in rekening hoeven te worden gebracht. Deze bewering kan bij hoge slanke torens echter geen stand houden. Voor de Baantoren is IMd daarom een onderzoek gestart naar wetenschappelijke ar-

tikelen en internationale rekenregels over dynamische responsies.

### **Soorten dynamische responsies**

Variaties van de windsnelheid in de luchtstroom waarin gebouwen zijn opgesteld, hebben een fluctuerende (wind)belasting op het gebouw tot gevolg, waardoor het gebouw evenwijdig aan de wind een dynamische respons geeft. Bovendien geeft de overstroming (wind die langs het gebouw stroomt) aanleiding tot het ontstaan van wervels en daarmee ook een fluctuerende (wind)belasting loodrecht op de eigenlijke windrichting (het zogenoemde vortex-effect). Als laatste kunnen alle fluctuerende (wind)belastingen er ook voor zorgen dat het gebouw gaat draaien om zijn (hoogte)as. We spreken dan van een rotatieresponsie. In figuur 2 zijn de drie afzonderlijke dynamische responsies voor de Baantoren afgebeeld.

De dynamische responsie evenwijdig aan én loodrecht op de windrichting veroorzaken translatieversnellingen. De dynamische rotatieresponsie veroorzaakt een rotatieversnelling rondom de verticale as van het ge-

auteur



**IR. ROB TREELS RC**

Projectleider /  
Projectingenieur  
IMd Raadgevende  
Ingenieurs

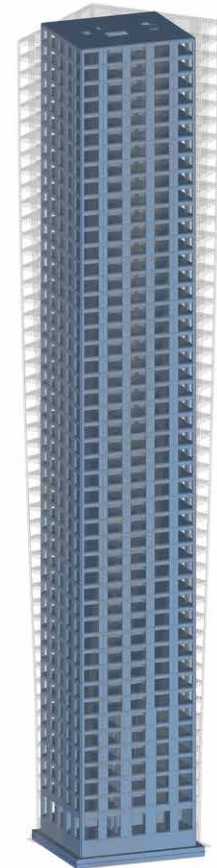
*Voor de toetsing van winddynamica wordt onderscheid gemaakt tussen de toetsing op vervorming/krachten en op versnelling*



**responsie evenwijdig aan de windrichting**



**responsie loodrecht op de windrichting**



**rotatieresponsie**

bouw. Uit deze rotatieversnelling zijn op basis van de breedte en diepte van de bouwplaattegrond ook de bijbehorende translatieversnellingen te bepalen (fig. 3). Verderop in dit artikel wordt nader ingegaan op een combinatie van deze drie afzonderlijke translatieversnellingen.

### **Toetsing van winddynamische responsies**

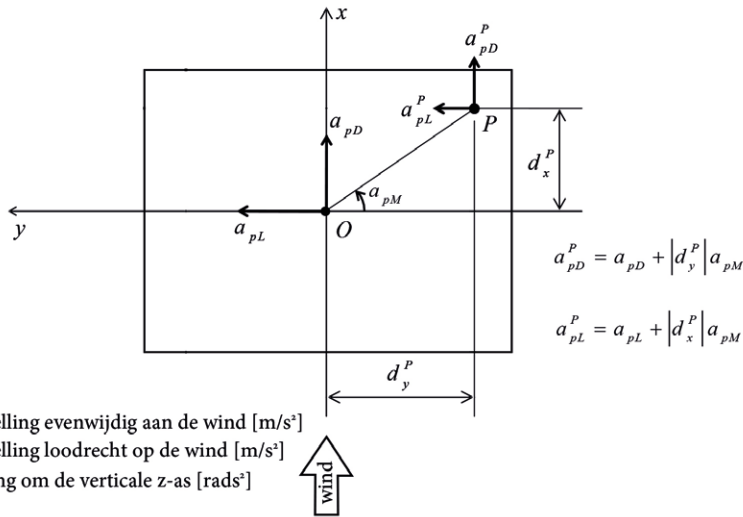
De dynamische responsie als gevolg van windbelasting op gebouwen kan resulteren in een (horizontale) vervorming van het gebouw die groter is dan de vervorming ten gevolge van statische windbelasting en zal dus ook gepaard gaan met acceleraties. Voor de toetsing van winddynamica wordt daarom onderscheid gemaakt tussen de toetsing op vervorming/krachten en op versnelling.

Voor de toetsing op vervorming (BGT) en krachten (UGT) wordt in NEN-EN 1991-1-4

gebruikgemaakt van de zogenoemde bouw-  
werkfactor  $c_s c_d$ , die wordt bepaald door de  
afmetingsfactor  $c_s$  van het gebouw te vermen-  
igvuldigen met de dynamische factor  $c_d$   
van het gebouw. De windbelasting op het ge-  
bouw wordt vervolgens vermenigvuldigd  
met deze bouwwerkfactor en hiermee wor-  
den vervolgens alle gebruikelijke berekenin-  
gen en toetsingen uitgevoerd.

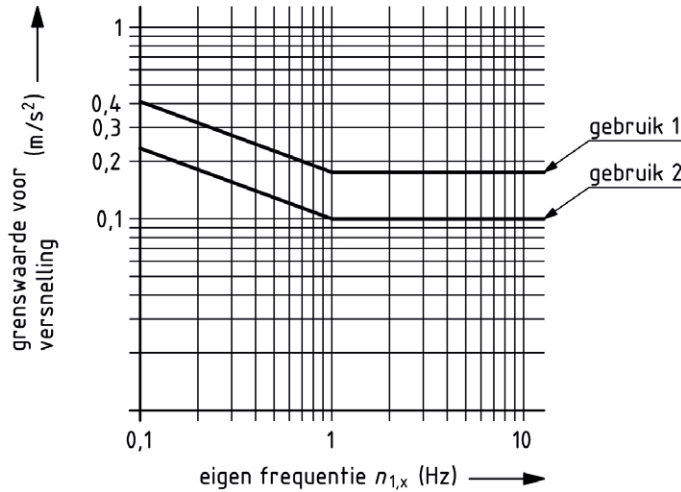
Een winddynamische responsie veroorzaakt  
naast horizontale vervormingen dus ook  
versnellingen. En aangezien wij deze alleen  
kunnen waarnemen met onze evenwichts-  
organen, bepaalt de grootte van deze ver-  
snellingen of wij ons hierbij wel of niet pret-  
tig voelen. Er wordt daarom ook wel  
gesproken van een comforttoets. In de nati-  
onale bijlage van NEN-EN 1990 is een grafiek  
gegeven (fig. 4) waarin grenswaarden voor  
de (piek)versnelling in een verblijfsruimte

3

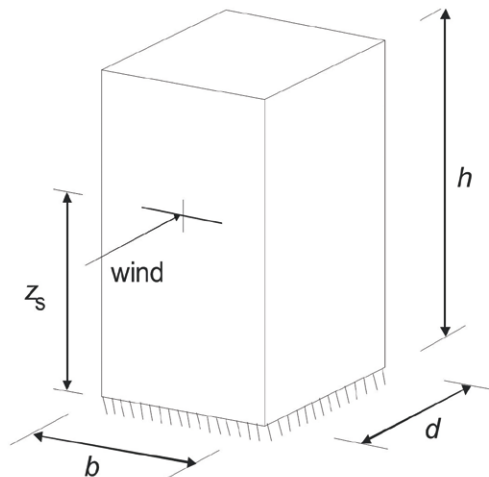


$a_{pD}$  is piek(translatie)versnelling evenwijdig aan de wind [m/s<sup>2</sup>]  
 $a_{pL}$  is piek(translatie)versnelling loodrecht op de wind [m/s<sup>2</sup>]  
 $a_{pM}$  is piek(rotatie)versnelling om de verticale z-as [rads<sup>2</sup>]

4



5



zijn af te lezen, die afhankelijk zijn van de eerste eigenfrequentie van het gebouw. In deze grafiek wordt nog onderscheid gemaakt tussen gebouwen met een gebruiksklasse 1 (kantoor-, onderwijs- en industrie-functie) en een gebruiksklasse 2 (bijeenkomst-, woon-, logies-, cel-, gezondheidszorg-, sport- en winkelfunctie). Deze grenswaarde voor de (piek)versnelling mag één maal per jaar optreden en zal uiteraard optreden op de verblijfsruimten van de bovenste verdieping.

### Belangrijkste parameters bij dynamische windberekeningen

Naast gebouwafmetingen (hoogte, breedte en diepte) volgens figuur 5 en de massa (totale permanente belasting en het momentane deel van de veranderlijke vloerbelastingen), zijn de parameters eigenfrequentie, demping en windsnelheid van belang. Deze parameters worden nu kort toegelicht.

**Eigenfrequentie** In NEN-EN 1991-1-4 wordt een vereenvoudigde formule voor de eerste eigenfrequentie gegeven:

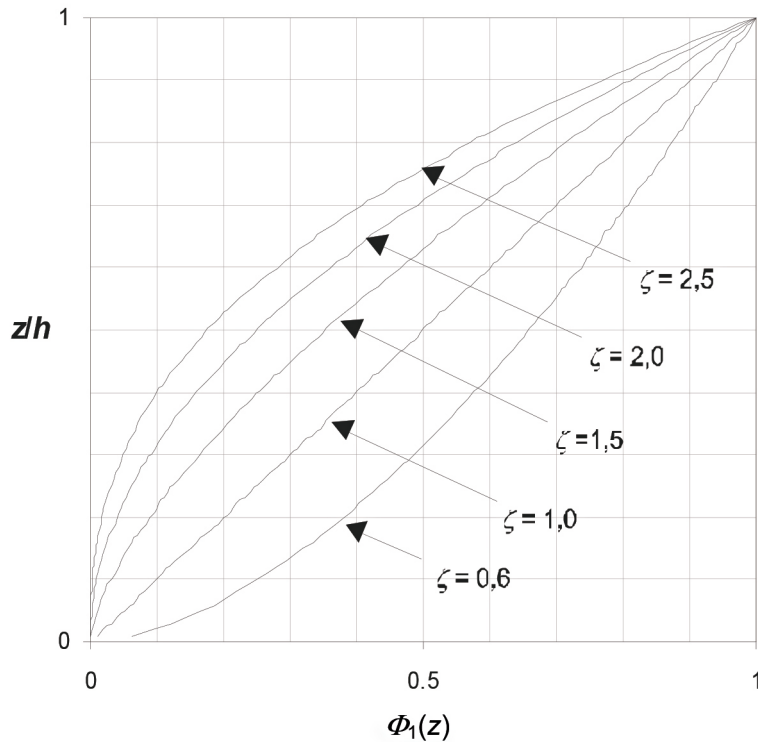
$$n_1 = \frac{46}{h} \quad (1)$$

Met de meeste FEM-programma's (3D) zijn de eigenfrequenties ook te berekenen op basis van de ingevoerde modale massa's en de (buig)stijfheid van de constructie. Met deze twee uitgangspunten geeft de eerder in NEN 6702 opgenomen benaderingsformule voor een 1D-staaf (die onderin oneindig stijf of verend is ingeklemd) dezelfde nauwkeurige waarde voor de eerste eigenfrequentie:

$$n_1 = \sqrt{\frac{0,384}{\delta}} \quad (2)$$

waarin  $\delta$  de grootste (horizontale) uitbuiging van de constructie voorstelt, indien de 1D-staaf horizontaal wordt belast met een combinatie van de totale permanente belasting en het momentane deel van de veranderlijke (vloer)belastingen.

Ook de trillingsvorm is van invloed op de dynamische responsie. Zo wordt in bijlage C uit NEN-EN 1991-1-4 voor de comforttoets de factor  $K$  gebruikt. De grootte hangt af van de



eerste trillingsvorm, die uniform, linear, parabolisch of sinusvormig over de hoogte kan zijn. In bijlage B uit NEN-EN 1991-1-4 en andere berekeningsmethoden wordt de eerste trillingsvorm beschreven met de formule:

$$\Phi_1(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^\zeta \quad (3)$$

waarbij de exponentiële factor  $\zeta$  deze trillingsvorm bepaalt (fig. 6).

**Damping** De dempingsmaat  $D$  van een gebouw bepaalt de mate waarin de door wind opgewekte dynamische kinetische energie wordt omgezet naar hoofzakelijk thermische energie (warmte). Door wrijving in een constructiemateriaal tussen onderdelen van een constructie of tussen constructie en omgeving (bodem, lucht), komt deze warmte vrij.

Deze dempingsmaat  $D$  geeft de fractie (of het percentage) aan ten opzichte van de kritische demping (die nodig is om de constructie na een uitwijking direct terug te laten keren in de evenwichtstoestand). In Eurocode NEN-EN1991-1-4 wordt het logaritmsch decrement van demping  $\delta$  (ook

wel constructieve demping genoemd) gehanteerd, zijnde:  $\delta = 2\pi D$ .

Damping is helaas (nog) niet vooraf exact te berekenen en alleen achteraf door metingen te bepalen.

Voor de aan te houden demping bij gebouwen wordt vaak onderscheid gemaakt tussen gebouwen van gewapend beton en staal, zo worden er bijvoorbeeld in het Italiaanse rapport CNR-DT 207/2008 twee aparte formules gegeven [1]:

$$D = \frac{1}{100} \frac{68}{h} \geq 0,01 \quad (4)$$

voor gebouwen van gewapend beton,  $h \geq 30$  m

$$D = \frac{1}{100} \frac{56}{h} \geq 0,008 \quad (5)$$

voor gebouwen van staal,  $h \geq 30$  m

Ook zal de demping bij gebouwen van gewapend beton in de UGT hoger zijn dan in de BGT, omdat door het optreden van scheuren er meer wrijvingswarmte zal ontstaan. In NEN 6702 wordt in bijlage A.4 bij het bepalen van de dynamische vergrotingsfactor  $\phi_1$  (UGT) voor gebouwen van gewapend beton een dempingsmaat van 0,02 genoemd. In bijlage A.5 wordt bij het bepalen van de dynamische vergrotingsfactor  $\phi_2$  (BGT) voor gebouwen met een eigenfrequentie lager dan 1 Hz een dempingsmaat van 0,01 genoemd.

In NEN-EN 1991-1-4 wordt voor gebouwen van gewapend beton een constructieve demping  $\phi_s$  van 0,10 (wat overeenkomt met een dempingsmaat  $D$  van 0,016) gegeven en voor stalen gebouwen wordt de helft aangehouden. Hierbij mag dan volgens bijlage F.5 het logaritmsch decrement van de aerodynamische demping  $\phi_a$  ook nog worden opgeteld.

In de Nederlandse vakliteratuur zijn de laatste tijd diverse artikelen gewijd aan demping en dan met name in het kader van een promotieonderzoek bij TNO.

Er zijn vermoedens dat onze slappe bodem en het gebruik van paalfunderingen hierin een gunstig effect hebben en dus kunnen leiden tot hogere dempingswaarden bij Nederlandse gebouwen.

Dit wordt enigszins bevestigd door

metingen van TNO [2] aan vijftien Nederlandse gebouwen (tien van gewapend beton met een gemiddelde demping van 1,7% en vijf van staal met een gemiddelde demping van 2,2%).

Resumerend kan worden gesteld dat voor toetsing op vervormingen (BGT) en versnellingen (comfort) het aanhouden van een dempingsmaat  $D$  van 1% aan de veilige kant is en dat voor Nederlandse gebouwen wellicht een hogere waarde van 1,5% realistisch is.

**Windsnelheid** Voor de in de dynamische berekeningen te hanteren basiswindsnelheid worden internationaal nogal verschillende definities gebruikt, zoals de snelheid van een 3 s durende windstoot of de gemiddelde windsnelheid over een periode van 10 min (o.a. NEN-EN 1991-1-4) of 1 uur (o.a. NEN 6702). Bij het vergelijken van de diverse berekeningsmethoden moet daar dus rekening mee worden gehouden.

In NEN-EN 1991-1-4 is de grootte van de basiswindsnelheid  $v_{\text{bo}}$  afhankelijk van het windgebied (I, II of III) en de terreincategorie (zee of kustgebied aan zee, onbebouwd en bebouwd) en deze heeft dan een herhalingsstijd (referentieperiode) van 50 jaar. Voor windgebied II onbebouwd bedraagt de basiswindsnelheid  $v_{\text{bo}}$  27,0 m/s en deze kan vervolgens worden gebruikt bij een dynamische toetsing op vervormingen (BGT) of krachten (UGT). Voor een dynamische toetsing op versnellingen (comfort) geldt echter een herhalingsstijd van 1 jaar, zodat de basiswindsnelheid mag worden gereduceerd met een waarschijnlijkheidsfactor  $c_{\text{prob}}$ :

$$c_{\text{prob}} = \left( \frac{1 - K \cdot \ln(-\ln(1 - p))}{1 - K \cdot \ln(-\ln(0,98))} \right)^n \quad (6)$$

met  $p = 1 - e^{-\frac{1}{R}}$  met  $R$  is herhalingsstijd/referentieperiode in jaren

Met  $R = 1$  jaar en  $K = 0,234$  (bij windgebied II) bedraagt de basiswindsnelheid  $v_{\text{bo}}$  19,5 m/s die vervolgens kan worden gebruikt bij een dynamische toetsing op comfort.

Met deze basiswindsnelheden kunnen vervolgens de gemiddelde windsnelheden op een bepaalde hoogte  $z$  worden berekend. In

de diverse berekeningsmethoden worden ook nog verschillende hoogten aangehouden op basis waarvan de gemiddelde windsnelheid moet zijn bepaald. Zo wordt in NEN-EN 1991-1-4 deze gemiddelde windsnelheid bepaald bij een referentiehoogte  $z_s$  (gelijk aan  $0,6 h$ ).

In de meeste berekeningsmethoden moet voor de windbelasting ook een totale krachtcoëfficiënt  $c_f$  als een combinatie van winddruk (bijvoorbeeld 0,8) en windzuiging (bijvoorbeeld 0,5) worden ingevoerd. In de nationale bijlage van NEN-EN 1991-1-4 is nog gesteld dat vanwege het gebrek aan correlatie tussen die twee, deze krachtcoëfficiënt met een factor van 0,85 mag worden gereduceerd. Bij hoge slanke gebouwen is het raadzaam om met windtunnelonderzoek de exacte windbelastingen en daarmee de krachtcoëfficiënt  $c_f$  te bepalen.

## Berekeningsmethoden

Bij het onderzoek zijn uiteindelijk vijf berekeningsmethoden gevonden om één of meerdere van de eerdergenoemde drie dynamische responsies te kunnen berekenen. Deze methoden worden kort toegelicht.

**NEN 6702** In NEN 6702 kan alleen de dynamische responsie evenwijdig aan de windrichting worden berekend. In bijlage A.4 kan een vergrotingsfactor  $\phi_1$  worden bepaald, die samen met de afmetingsfactor  $C_{\text{dim}}$  de dynamische vergrotingsfactor voor de windbelasting bepaalt. In bijlage A.5 kan de versnelling voor de regulier bepaalde eerste eigenfrequentie en voor een verhoogde eerste eigenfrequentie worden berekend. Deze eenvoudige berekeningsmethode is ook nog opgenomen in NEN-EN 1990.

**NEN-EN 1991-1-4** De dynamische responsie evenwijdig aan de windrichting is met Eurocode NEN-EN 1991-1-4 volgens twee berekeningsmethoden (bijlage B of C) te bepalen. Door TNO is aangetoond dat de berekeningsmethode conform bijlage C nauwkeuriger resultaten oplevert die beter aansluiten op de theoretische modellen [3]. Met beide berekeningsmethoden kan zowel de eerdergenoemde bouwwerkfactor  $c_s c_d$ , als de maxi-

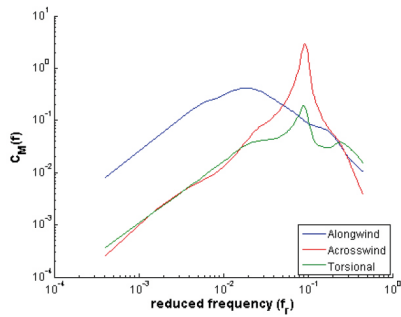
*Bij het onderzoek zijn vijf berekeningsmethoden gevonden om één of meerdere van de drie dynamische responsies te kunnen berekenen*

User selected Side Ratio (D/B) = 1.00 with Building dimensions of B = 30 m, D = 30 m and H = 210 m under Exposure B, which lead to Aspect Ratio (H/√BD) = 7.00.  
**Note:**  
 No Error

Input parameters by user [On-line Unit Converter](#)

B	30 m	D	30 m	H	210 m
f <sub>x</sub>	0.2 Hz	f <sub>y</sub>	0.2 Hz	f <sub>z</sub>	0.35 Hz
β <sub>1</sub>	1	β <sub>2</sub>	1	β <sub>3</sub>	1
ρ <sub>B</sub>	450 kg/m <sup>3</sup>	γ	12.25 m	ζ	0.01
ΔH	3.1 m	ρ <sub>A</sub>	1.25 kg/m <sup>3</sup>	C <sub>D</sub>	1.5
U <sub>air</sub>	27.00 m/s	U <sub>ser</sub>	19.50 m/s	TKU_DB with AR = 7.00	
Input	Metric(SI) unit	Output	Metric(SI) unit	EN 1991-1-4:2005/AC:2010	

Non-dimensional PSD for alongwind, acrosswind and torsional [C<sub>M</sub>(f) = f · S<sub>M</sub>(f) / σ<sub>M</sub><sup>2</sup>]



Mean wind speeds for designs

Survivability design (Bending Moments and Displacements) : U<sub>H</sub> = 38.02 m/s  
 Serviceability design (accelerations) : U<sub>H</sub> = 27.46 m/s

Survivability Design : Base Moments

	Base Moment (10 <sup>3</sup> kN-m)			
	$\dot{M}$	$\dot{M}_B$	$\dot{M}_R$	$\dot{M}$
Alongwind	0.7716	0.3094	0.7162	1.5518
Acrosswind	-	0.5816	1.5783	1.6820
Torsional	-	0.0340	0.0565	0.0659

Survivability Design : Maximum Displacements

	Maximum Displacements at roof
Alongwind	0.165 m
Acrosswind	0.179 m

Serviceability Design : Peak and RMS Accelerations

	Peak Accelerations at roof	
Alongwind	5.03 milli-g	
Acrosswind	9.88 milli-g	
Lateral Accelerations at Corner Induced by Torsion	0.0036 rad/s <sup>2</sup>	Alongwind component : 5.50 milli-g
		Acrosswind component : 5.50 milli-g
Total Lateral Accelerations at Corner	Alongwind component : 7.45 milli-g	Acrosswind component : 11.31 milli-g

male piek(translatie)versnelling op de bovenste verdieping worden bepaald.

In een artikel van TNO uit *Bouwen met Staal* 204 uit 2008 [4] is aangegeven hoe met bijlage C uit Eurocode NEN-EN 1991-1-4 onder andere ook een maximale piek(translatie)versnelling op de bovenste verdieping ten gevolge van de rotatieresponsie is te bepalen.

Voor de dynamische responsie loodrecht op de windrichting wordt voor gebouwen geen berekeningsmethode gegeven. Om toch een vergelijking met andere berekeningsmethoden te kunnen maken, kan voor deze dynamische responsie het gebouw in dwarsrichting met windbelasting in dwarsrichting worden beschouwd.

**Artikel Cement 1992/12** In het artikel 'Dynamische belastingen (VI)' uit *Cement* 1992/12

[5], uit een langere reeks artikelen over dynamische belastingen, wordt behandeld hoe te rekenen aan beweging van gebouwen als gevolg van wind. De theorie in dat artikel is deels gebaseerd op het boek 'Windeffects on Structures' [6].

Bij het reproduceren van het rekenvoorbeeld blijken twee formules in het artikel helaas niet juist te zijn weergegeven, dus voor de volledigheid worden hier de juiste formules gegeven:

$$Y(f_c) = 4,45 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{U(H)}{f_c D} \right]^{1,3} \quad (7)$$

$$\sigma_{dyn}(\theta) = \frac{3 \rho e^4 h f_l^2 U_r^{2,68}}{2(2\pi f_l)^2 \rho_b h I_l} \sqrt{\frac{1,58\pi \cdot 10^{-6}}{\zeta}} \quad (8)$$

Bij deze methode wordt gerekend met de uurgemiddelde windsnelheid op hoogte h van het gebouw en deze wordt bepaald aan

de hand van de wrijvingsnelheid  $u^*$  conform NEN 6702. Meer hierover is te lezen in het TNO-rapport B-90-0483 [7].

Uiteindelijk zijn met deze berekeningsmethode de dynamische vervorming, de dynamische piek(translatie)versnelling evenwijdig aan én loodrecht op de windrichting en de dynamische piek(rotatie)versnelling te bepalen.

**Rapport CNR-DT 207/2008** In Italië is naar aanleiding van het verschijnen van de Eurocode het allesomvattende en zeer goed leesbare rapport CNR-DT 207/2008 uitgebracht, waarin alle aspecten van windbelasting op constructies met duidelijke voorbeelden worden toegelicht [1].

Voor de dynamische responsie evenwijdig aan de windrichting wordt de berekeningsmethode volgens bijlage B uit Eurocode NEN-EN 1991-1-4 gevolgd.

Voor de dynamische responsie loodrecht op de windrichting en voor de dynamische rotatieresponsie worden de berekeningsmethoden uit de Japanse norm AIJ 2004 gevolgd. Bij deze twee berekeningsmethoden moet voor het bepalen van de gemiddelde windsnelheid de hoogte  $h$  worden aangehouden, in tegenstelling tot de berekeningsmethode volgens bijlage B uit Eurocode NEN-EN 1991-1-4, waarin voor het bepalen van de gemiddelde windsnelheid de hoogte  $0,6 h$  mag worden aangehouden.

**Onlinerekentool DEDM-HR** Door het NatHaz Modelling Laboratory (University of Notre Dame, USA) en het Wind Engineering Research Center (Tamkang University, Taiwan) is een onlinerekentool genaamd 'Database-Enabled Design Module - High-Rise' ontwikkeld ([http://evovw.ce.nd.edu/dadm\\_INT/VW\\_design6\\_INT1\\_noauth1.html](http://evovw.ce.nd.edu/dadm_INT/VW_design6_INT1_noauth1.html)), waarmee dynamische berekeningen aan gebouwen kunnen worden uitgevoerd. Er is zelfs de mogelijkheid om met verschillende internationale normen, waaronder ook de Eurocode te rekenen [8, 9].

Met deze berekeningsmethode zijn onder andere de dynamische vervorming, krachten, dynamische piek(translatie)versnelling evenwijdig aan én loodrecht op de windrichting en de dynamische piek(rotatie)

versnelling te bepalen.

De meeste in te voeren variabelen zijn in dit artikel ook al toegelicht, waarbij de factor  $\beta$  gelijk is aan de exponentiële factor  $\zeta$ , die de eerste trillingsvorm beschrijft. De rotatieresponsie is onder andere afhankelijk van de gemiddelde (rotatie)traagheidsstraal  $Y$ , waar bij benadering de volgende formule voor kan worden gebruikt:

$$Y = \sqrt{\frac{(b^2 + d^2)}{12}} \quad (9)$$

Het soortelijk gewicht ( $\rho$ ) van de lucht zelf is mede bepalend voor de dynamische responsies, in Nederland bedraagt deze waarde  $1,25 \text{ kg/m}^3$ .

In figuur 7 is een in- en uitvoer van deze dynamische berekening weergegeven. In de uitvoer is goed te zien dat er ook bij deze rekenmethode onderscheid wordt gemaakt tussen de Survivability (krachten en vervormingen) en de Serviceability (versnellingen).

### Combinatie van de drie dynamische responsies

Nu met een aantal berekeningsmethoden de drie verschillende dynamische responsies kunnen worden berekend, is het nog de vraag of en in hoeverre de drie bijbehorende piek(translatie)versnellingen met elkaar moeten worden gecombineerd.

Aangezien de drie piek(translatie)versnellingen  $a_y$ ,  $a_x$  en  $a_r$  (waarbij  $a_r$  de vectorieel bij elkaar opgetelde piek(translatie)versnellingen in de twee hoofdrichtingen uit de dynamische rotatieresponsie zijn) samen kunnen optreden, wordt in de literatuur [5, 6] ook wel de totale gecombineerde piek(translatie)versnelling berekend door de drie genoemde losse versnellingscomponenten vectorieel bij elkaar op te tellen. Daarbij kan door de niet-maatgevende componenten met 30% te reduceren, rekening worden gehouden met het feit dat het onwaarschijnlijk is dat alle drie de maxima tegelijkertijd zullen optreden én het feit dat de eerste eigenfrequenties voor buiging meestal nooit gelijk zullen zijn aan de eerste eigenfrequentie voor torsie.

Voorgaande combinatieregel kan dan met de volgende formule worden samengevat:

*Er blijken  
behoorlijke  
verschillen te  
zitten tussen  
de uitkomsten  
van de  
dynamische  
berekenings-  
methoden*



$$\alpha_c = \text{MAX} \left[ \sqrt{a_{r,r}^2 + (0,7 \cdot a_{1,r})^2 + (0,7 \cdot a_{r,r})^2}; \sqrt{(0,7 \cdot a_{r,r})^2 + a_{1,r}^2 + (0,7 \cdot a_{r,r})^2}; \sqrt{(0,7 \cdot a_{r,r})^2 + (0,7 \cdot a_{1,r})^2 + a_{r,r}^2} \right] \quad (10)$$

In het rapport CNR-DT 207/2008 worden drie afzonderlijke lineaire combinatieregels gegeven, waarbij verschillende weegfactoren (waarvan sommige ook weer variabel zijn) in rekening worden gebracht. Ook hier moet de maatgevende combinatieregels worden toegepast.

Overigens zou het dan ook voor de hand liggen om vanuit de dynamische windberekeningen voor de toetsing op vervorming (BGT) en krachten (UGT) dezelfde maatgevende combinatieregels (en dan met name van de responsie evenwijdig aan én loodrecht op de windrichting) op te nemen.

## Rekenvoorbeeld

Tot slot van dit artikel worden met een rekenvoorbeeld de uitkomsten van de verschillende berekeningsmethoden met elkaar vergeleken. Het rekenvoorbeeld betreft een gebouw met een vierkante plattegrond ( $b = d = 30$  m) en een hoogte  $h$  van 210 m. In figuur 7 bij de omschrijving van de online berekeningsmethode DEDM-HR is ditzelfde voorbeeld gebruikt.

Het gebouw staat in Nederland in windgebied II in een onbebouwde omgeving en voor de krachtcoëfficiënt  $c_f$  wordt 1,5 aangehouden. De massa van het gebouw bedraagt 405.000 kg/m.

De demping  $D$  bedraagt 0,01 en er wordt geen aerodynamische demping in rekening gebracht.

De eerste eigenfrequentie (in beide hoofdrichtingen) voor buiging bedraagt 0,20 Hz en de eerste eigenfrequentie voor torsie bedraagt 0,35 Hz. De verticale trillingsvorm is lineair ( $\zeta = 1,0$ ).

In figuur 8 zijn de resultaten van alle vijf verschillende berekeningsmethoden voor de zes piek(translatie)versnellingen evenwijdig aan de wind in de comfortgrafiek geplot en in de naastgelegen tabel weergegeven.

In figuur 9 zijn de resultaten van de vier verschillende berekeningsmethoden voor de piek(translatie)versnellingen loodrecht op de wind in de comfortgrafiek geplot en in de naastgelegen tabel weergegeven.

Hieruit blijkt dat de dynamische responsie loodrecht op de windrichting bij twee van de vier berekeningsmethoden groter is dan de responsie evenwijdig aan de windrichting.

In figuur 10 zijn de resultaten van de vier verschillende berekeningsmethoden voor de vectorieel gesommeerde piek(translatie)versnellingen ten gevolge van de dynamische rotatieresponsie in de comfortgrafiek geplot en in de naastgelegen tabel weergegeven.

In figuur 11 zijn de resultaten van de vier verschillende berekeningsmethoden voor de vier maatgevende combinaties van alle piek(translatie)versnellingen in de comfortgrafiek geplot en in de naastgelegen tabel weergegeven.

Uit diverse vergelijkingen van de berekeningsresultaten blijkt dat er behoorlijke verschillen zitten tussen de gevonden dynamische berekeningsmethoden. Elke berekeningsmethode is dan ook gebaseerd op andere theoretische modellen en heeft andere uitgangspunten.

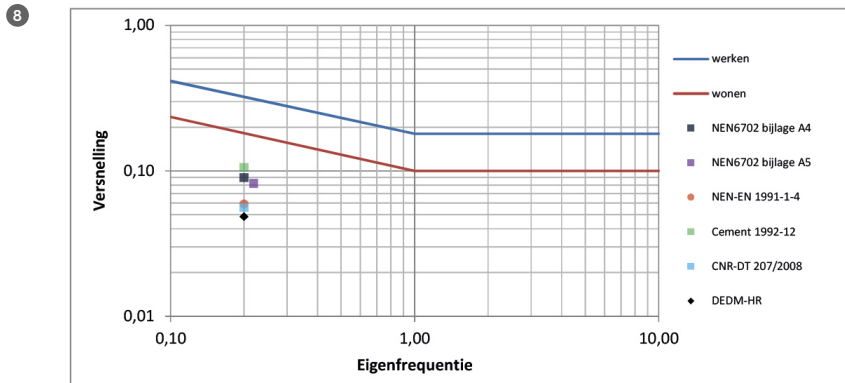
## Tot slot

Met de beschikbare berekeningsmethoden zijn op relatief eenvoudige wijze goede voorspellingen te doen over de dynamische responsies van gebouwen op windbelasting. Uiteraard kunnen dergelijke dynamische responsies ook worden berekend met geavanceerde 3D-FEM-computerprogramma's, maar daarvoor moet dan wel een dynamische windbelasting (bijvoorbeeld uit een windtunneltest) bekend zijn.

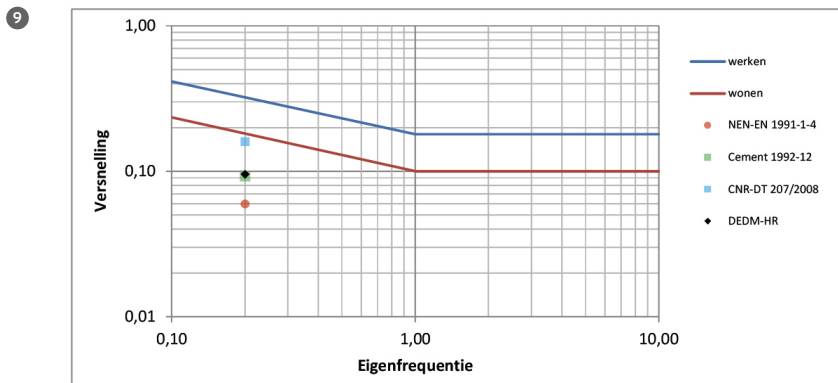
Er is behoefte aan verificatie van de verschillende berekeningsmethoden door veel meer metingen te verrichten aan gerealiseerde gebouwen, waarbij ook de demping in de specifieke Nederlandse situatie nog nader onderzocht moet worden. Vanuit TNO worden hier dan ook nieuwe initiatieven voor opgestart. In de nieuwe conceptversie voor Eurocode NEN-EN 1991-1-4 zijn ook rekenregels voor de dynamische responsie loodrecht op de windrichting én de dynamische rotatieresponsie opgenomen. ●

## LITERATUUR

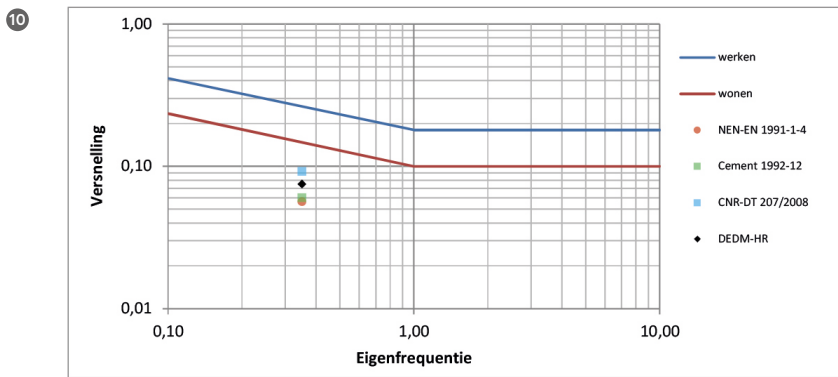
- 1 Diverse auteurs, Technical Document CNR-DT 207/2008 Guide for the assessment of wind actions and effects on structures. National Research Council Italy; June 2010.
- 2 Geurts, C.P.W., Bentum, C.A. van, Sanchez, S., Dijk, S. van, Demping hoogbouw voorspeld. *Cement* 2015/3.
- 3 Steenbergen, R.D.J.M., Vrouwenvelder, A.C.W.M., Geurts, C.P.W., The use of Eurocode EN 1991-1-4 procedures 1 and 2 for building dynamics, a comparative study. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* vol. 107-108; August 2012.
- 4 Steenbergen, R.D.J.M., Geurts, C.P.W., Bentum, C.A. van, Trillingen veroorzaakt door fluctuerende windbelasting. *Bouwen met Staal* 204; oktober 2008.
- 5 Wisse, J.A., Staalduinen, P.C. van, Dynamische Belastingen (VI) – Beweging van Gebouwen als gevolg van Wind. *Cement* 1992/12.
- 6 Simiu, E., Scanlan, R.H., Windeffects on Structures, 3th Edition. John Wiley & Sons, 1996.
- 7 Staalduinen, P.C. van, Rapport B-90-483 Achtergronden van de windbelastingen volgens NEN 6702:1991. TNO Bouw Januari 1992 met correcties van September 1993.
- 8 Kwon, D., Kijewski-Correa, T., Kareem, A. e-Analysis of High-Rise Buildings Subjected to Wind Loads. *Journal of Structural Engineering* vol. 134; No. 7; July 2008 (ASCE).
- 9 Kwon, D., Kareem, A. A Multiple Database-Enabled Design Module with Embedded Features of International Codes and Standards. *International Journal of High-Rise Buildings* vol. 2; Nr. 3; September 2013.



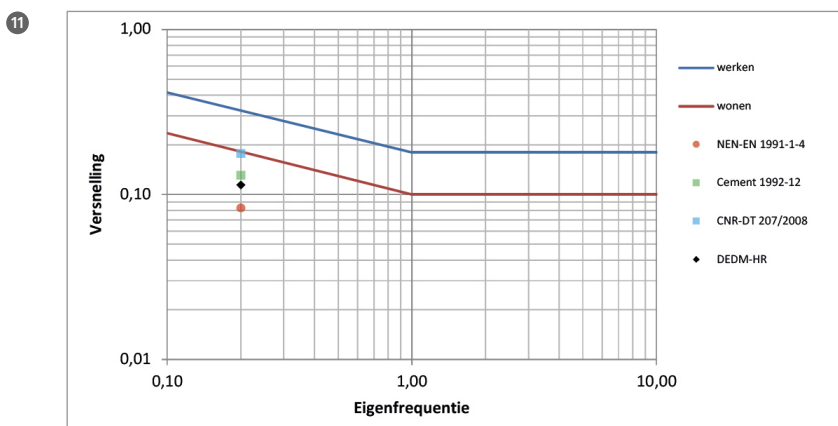
Grenslijnen grafiek		
	f [Hz]	a [ $m/s^2$ ]
werken	0,10	0,42
	1,00	0,18
	10	0,18
wonen	0,10	0,24
	1,00	0,10
	10	0,10
NEN6702 bijlage A4	0,200	0,090
NEN6702 bijlage A5	0,219	0,082
NEN-EN 1991-1-4	0,200	0,059
Cement 1992-12	0,200	0,106
CNR-DT 207/2008	0,200	0,056
DEDM-HR	0,200	0,049



Grenslijnen grafiek		
	f [Hz]	a [ $m/s^2$ ]
werken	0,10	0,42
	1,00	0,18
	10	0,18
wonen	0,10	0,24
	1,00	0,10
	10	0,10
NEN-EN 1991-1-4	0,200	0,059
Cement 1992-12	0,200	0,092
CNR-DT 207/2008	0,200	0,160
DEDM-HR	0,200	0,095



Grenslijnen grafiek		
	f [Hz]	a [ $m/s^2$ ]
werken	0,10	0,42
	1,00	0,18
	10	0,18
wonen	0,10	0,24
	1,00	0,10
	10	0,10
NEN-EN 1991-1-4	0,350	0,057
Cement 1992-12	0,350	0,060
CNR-DT 207/2008	0,350	0,092
DEDM-HR	0,350	0,075



Grenslijnen grafiek		
	f [Hz]	a [ $m/s^2$ ]
werken	0,10	0,42
	1,00	0,18
	10	0,18
wonen	0,10	0,24
	1,00	0,10
	10	0,10
NEN-EN 1991-1-4	0,200	0,083
Cement 1992-12	0,200	0,131
CNR-DT 207/2008	0,200	0,177
DEDM-HR	0,200	0,114

8 Berekeningsresultaten met (piek)versnellingen evenwijdig aan de windrichting

9 Berekeningsresultaten met (piek)versnellingen loodrecht op de windrichting

10 Berekeningsresultaten met vectorieel gesommeerde (piek)versnellingen t.g.v. de rotatieresponsie

11 Berekeningsresultaten met de maatgevende combinatie van de drie afzonderlijke (piek)versnellingen