

# Beheersen van windtrillingen bepaalt comfort

## Constructieve aspecten van woontorens

Voor het constructief ontwerp van hoge gebouwen speelt het slim omgaan met de windbelasting een buitengewoon belangrijke rol. In verband met de stabiliteit, maar vooral met de stijfheid, want die bepaalt uiteindelijk of je comfortabel kunt slapen op grote hoogte. De nieuwe richtlijnen blijven streng voor de woningbouw, terwijl de kantoorfuncties wat meer bewegingsvrijheid krijgen.

Josine Crone

Wie vroeger de bekende staalbouwflat in Delft bij een flinke storm bezocht, was gelijk genezen van hoogbouw in staal. Zeebenen waren vereist om hier normaal te kunnen wonen. De constructie van deze flat is inmiddels versterkt. Dit voorbeeld is overigens helemaal niet representatief voor hoogbouw in staal. Het systeem uit de jaren zestig wordt niet meer toegepast. Toch bestaat bij veel mensen nog het beeld dat hoog wonen samenhangt met zwiepende lampen en een wee gevoel in de maag.

### Windbelasting

Dat hoge gebouwen in beweging komen, heeft ultiem te maken met de windbelasting in combinatie met de stijfheid van het gebouw. Bij de definitie van hoogbouw gaat men vaak uit van een minimale hoogte van 70 meter. Deze maat heeft ook een relatie naar het Bouwbesluit. Bij gebouwen boven de 70 meter krijgt de windbelasting en alles wat nodig is om die op een goede manier te accommoderen, zo'n grote invloed dat het zinvol is te zoeken naar slimme oplossingen en vormen. In Nederland houden de rekentabellen in de TGB (technische grondslagen voor bouwconstructies) op bij een hoogte van 150 meter. Dat komt overeen met het hoogste gebouw dat we nu hebben, maar te verwachten valt dat deze grens over enige tijd wordt overschreden. Voor gebouwen hoger dan 150 meter moet de gelijkwaardigheid van de oplossing worden aangetoond.

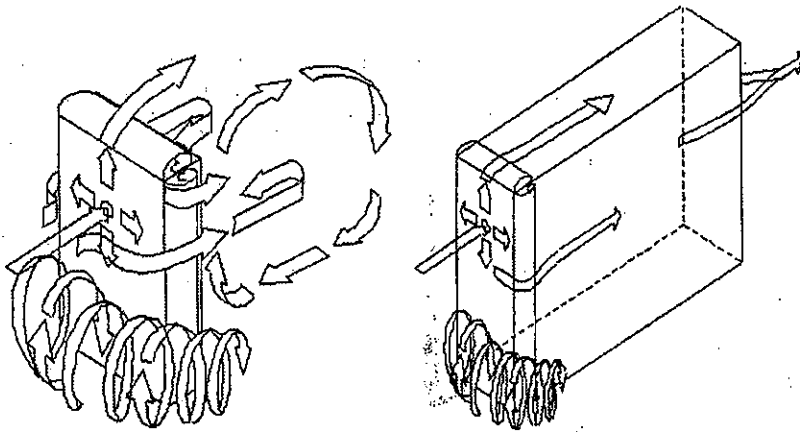
Behalve de kracht van de wind is de richting van waaruit de sterkste windbelasting komt belangrijk voor het bepalen van een efficiënt constructief ontwerp. Om de dynamische invloed van de windbelasting op een hoog gebouw vast te stellen, is een windtunnelonderzoek onmisbaar. Een dergelijk onderzoek is tevens bruikbaar voor het nagaan van de windhinder rondom het gebouw.

### Versnelling in de top

De windbelasting heeft invloed op de doorbuiging van een gebouw, maar veroorzaakt ook veel wervelingen en drukverschillen op en rond alle gevels. Een gevolg hiervan is dat een hoog gebouw loodrecht op de windrichting gaat trillen. Als de versnelling van die trilling te hoog wordt, is dat zeer hinderlijk voor de gebruikers. Tijdens het onlangs gehouden congres *Tendenzen im Hochhausbau* in Frankfurt kwam dit aspect uitgebreid aan de orde. Duitsland kent een grenswaarde van 20 tot 25 milli g (g is de versnelling onder invloed van de zwaartekracht) bij een zogenaamde tienjarenwind. De berekening van de maximaal optredende versnelling is gebaseerd op de eigenfrequentie van het gebouw.

Frankfurt heeft al veel ervaring met hoogbouw. Hier staan vier torens hoger dan 200 meter: de Main Tower (200 meter), de Westend Tower/DG bank (208 meter), Messeturm (256 meter) en de Commerzbank (300 meter). De hoogbouwtorens voldoen aan de vereiste berekeningen, maar bij sommige weersomstandigheden zijn er toch klachten. De universiteit van Leipzig doet hier onderzoek naar en heeft op diverse torens meetapparatuur geplaatst. Daarmee worden de bewegingen geregistreerd in combinatie met de optredende windbelasting.

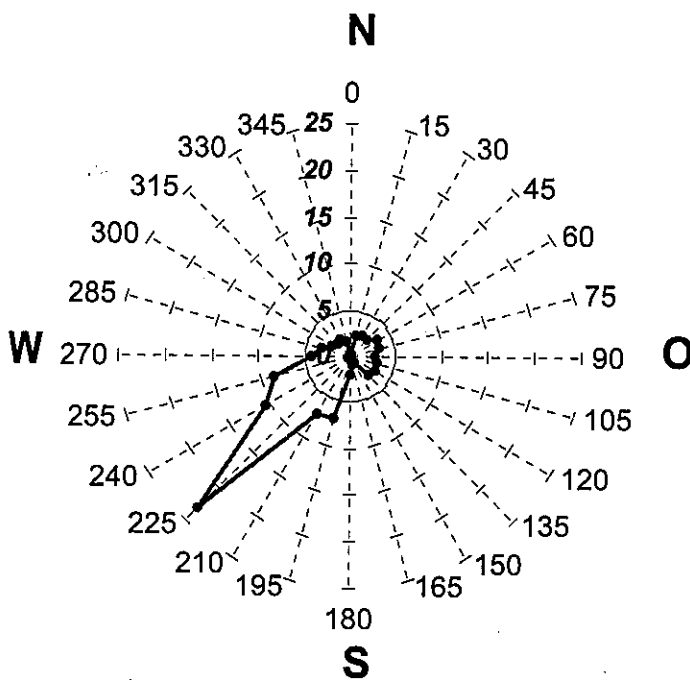
Veel hoge woontorens telt Frankfurt nog niet. De comforteisen bij woningbouw en hotels liggen hoger dan bij kantoren, omdat je in liggende positie meer last hebt van de versnelling dan in staande of zittende. Daarnaast kan het uitmaken of je een gebouw tijdelijk kunt verlaten, zoals bij een kantoorgebouw. In verband met toekomstige functieveranderingen wordt er wel over gedacht om met hogere comforteisen rekening te houden.



Boven: winddruk veroorzaakt wervelingen rondom hoge gebouwen.

Midden: frequentiewindroos van de windsnelheden rond de Commerzbank in het jaar 1998 (bron Bauingenieur, juli/august 2001).

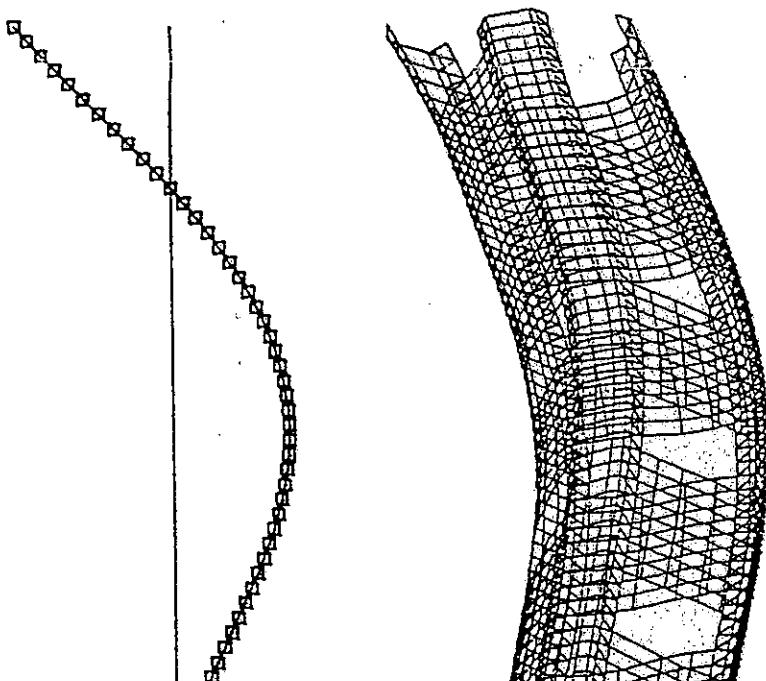
Onder: modelanalyse van de vervormingen in een hoogbouwtoeren bij een eigenfrequentie van 0,477 Hz (Commerzbank in Frankfurt, bron Arup/Krebs und Kiefer)



### Eisen doorbuiging maatgevend

Nederland kent een afwijkende regelgeving op het gebied van hoogbouw. Aronsohn in Rotterdam deed in de loop der jaren heel wat ervaring op met hoogbouw zoals het kantoor van Nationale Nederlanden de Delftse Poort, het World Port Center (beide in Rotterdam) en de ABN Amro-toren in Amsterdam. Directeur ir George Henkens van Aronsohn licht toe: 'We hebben in Nederland, anders dan bijvoorbeeld in Amerika, een uitbuigingseis aan een gebouw in een normblad. Een gebouw mag niet meer uitbuigen dan 1/500 van de hoogte. Dus dat betekent dat een 400 meter hoge toren bij een maximale storm 0,80 meter mag uitbuigen.' Zo'n storm komt een keer in de vijftig jaar voor, uit die bepaalde richting, meent Henkens. 'De richtlijn is maatgevend voor de stijfheid. Het is geen bouwbesluit, maar een privaatrechtelijke afspraak in de norm. Het Bouwbesluit stelt namelijk alleen eisen aan vervormingen van vloeren. Als die verplaatsing in bijvoorbeeld een halfuur wordt opgebouwd, dan merk je daar niets van, hooguit doordat je ziet dat de lamp scheef hangt. Maar als die verplaatsing een seconde duurt, heb je hetzelfde effect als bij een lift die naar je gevoel te snel stijgt of stopt. Je krijgt last van je maag.'

Henkens vervolgt: 'Die maximale versnelling wordt bepaald door de eigenfrequentie van het gebouw. De NEN 6702 geeft in een grafiek de maximale waarden. Er was tot voor kort maar één lijn en die was afhankelijk van de eigenfrequentie. Er is nu een tweede lijn bij gekomen, die laat hogere versnellingen toe. Die oude lijn is voor gebouwen waar mensen slapen, dus woningen, ziekenhuizen en hotels. De nieuwe lijn is een verruiming en geldt voor de rest van de gebouwen, zoals kantoren.' De Nederlandse eisen zijn niet bepaald sophisticated, meent Henkens. 'Er is geen mogelijkheid tot differentiatie naar de regelmaat en de richting van die maximale storm, bijvoorbeeld naar de vraag of deze eens in de vijf, tien of vijftien jaar mag voorkomen. Die doorbuigingseis is zo bepalend voor de stijfheid, dat je daarmee al automatisch voldoet aan de versnellingseis. De eigenfrequentie kan je redelijk goed uitrekenen, waarbij het niet zo belangrijk is dat hij exact is!' Als de eigenfrequentie 0,2 Hz is,' stelt Henkens, 'dan blijkt dat bij een waarde van 0,1 Hz of 0,4 Hz de optredende versnelling ook nog voldoet, mits de vorm hetzelfde blijft. Dus de exacte waarde is niet zo belangrijk, als hij binnen het kritische gebied valt. Die frequentie is daar-



# De Nederlandse hoogbouwseisen zijn niet bepaald sophisticated

dure apparaten die het ritme van de trilling compenseren.'

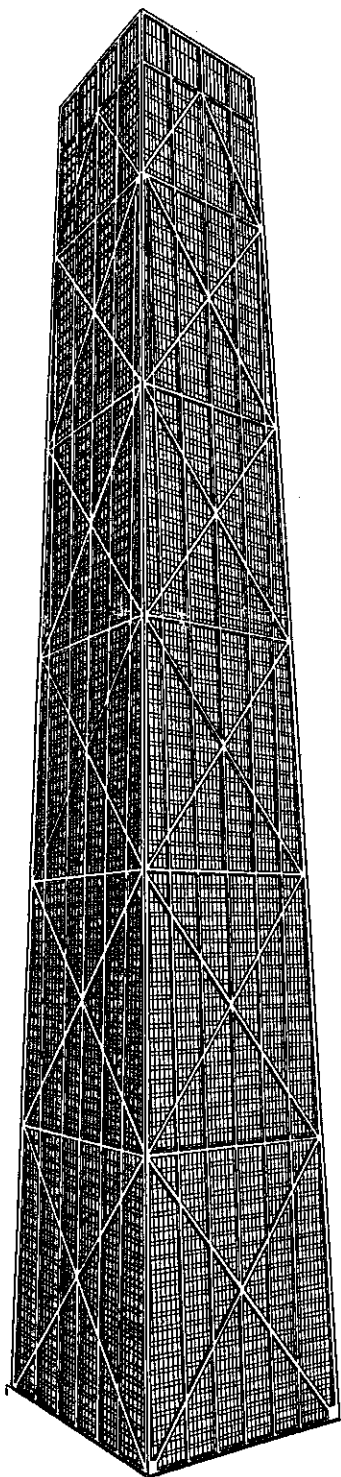
## Superhoogbouw

Bij de bouw van woontorens in Nederland is de traditionele bouwwijze in beton nog favoriet. Vaak worden de torens met een tunnelbekisting opgetrokken. Dat biedt verschillende voordelen, zoals de bekendheid met de techniek, de mate van geluidisolatie door de massa en niet te vergeten de prijs. In de utiliteitsbouw zie je steeds vaker hybride constructies. Hierbij wordt gezocht naar een optimum in de toepassing van staal en beton. Bij een bouwwijze met een (betonnen) kern die de horizontale stabiliteit en stijfheid verzorgt, loop je bij hoogbouw al gauw tegen beperkingen op. Bij grotere hoogten zou de kern veel breder moeten worden voor de gevraagde stijfheid. Gebruikelijk is dan om een frame in de gevel de horizontale krachten te laten opnemen: een 'tube'-constructie. Een inmiddels zeer bekend voorbeeld hiervan was het WTC in New York. Ook komt wel voor de 'tube-in-tube' constructie: samenwerking tussen de kern en de gevelconstructie. Een andere wijze van construeren is de outrigger-constructie. Terwijl de zeer hoge gebouwen steeds vaker zijn uitgerust met megastructuren in de gevel. Een soort supervakwerken.

Hoe hoger het gebouw, hoe belangrijker gewichtsbeparing is. Normaal beton is voor de hoofd-draagconstructie dan al gauw uit de gratie. Met hoge sterkte beton zijn betere en efficiëntere constructies mogelijk. Zo is bij de bouw van het (nu nog) hoogste gebouwencomplex ter wereld, de Petronas Towers in Kuala Lumpur, veel hoge sterkte beton toegepast.

Henkens: 'Bij voor Nederlandse begrippen zeer hoge torens, zoals de 392 meter hoge Amazing Tower (zie elders in BOUW) moet je het natuurlijk heel anders aanpakken. Hier speelt ook de kwaliteit van de bodem een grote rol in de noodzaak tot gewichtsbeparing. Bovendien wil je snel kunnen bouwen, en niet weersafhankelijk zijn. Licht bouwen heeft nog een ander belangrijk effect. Als je uitgaat van zware materialen worden namelijk alle kolommen zwaar en dus groter in doorsnede. Dat gaat af van de verhuurbare vierkante meters. Zeker bij hoogbouw is het belangrijk om de afmetingen van de constructie beperken. De Amazing Tower is daarom ontworpen met een staalconstructie in de vorm van een megastructuur. De geluidseisen worden niet opgelost met massa, maar met ontkoppelde wandconstructies, zwevende dekvloeren en dergelijke.'

John Hancock Center in Chicago (architecten Graham en Skidmore, Owings, Merrill), 1968. Deze 335 meter hoge (woon)toren heeft een staalskelet met een uitwendige verstijvingsconstructie: een megastructuur. Boven de winkels zijn tot de vijfde verdieping parkeerlagen. Daarboven zijn 37 lagen bestemd voor kantoren gevolgd door 51 lagen woningen. Op de honderdste verdieping is een tv-station gevestigd.



## Aërodynamisch ontwerp

Terwijl het voor de vliegtuig- en de auto-industrie heel normaal is om aërodynamisch te ontwerpen, is dat bij hoge gebouwen vreemd genoeg nog niet zo ingeburgerd. Het constructief ontwerp van het World Port Center is daardoor minder economisch. Hier prevaleerden andere eisen, zoals de toegankelijkheid van de parkeerlagen en de daglichtvoorziening in de kantoren. Ook van het hoofdkantoor van ABN Amro in Amsterdam kun je moeilijk zeggen dat deze is ontstaan door een economisch aërodynamisch ontwerp.

Bij de Amazing Tower was aanvankelijk eveneens sprake van een ongelukkige (driehoekige, grondvorm). Dat is volgens Henkens één van de slechtste vormen die je kunt bedenken, omdat deze veel wind vangt en resulteert in grote zuigingskrachten aan de niet-windbelaste zijde. Aërodynamisch levert het verhoudingsgewijs een bijna tweemaal zo hoge drukfactor op in vergelijking met een vierkante grondvorm en zelfs driemaal ten opzichte van een ronde vorm.

Inmiddels is de vorm van de toren gewijzigd in een zeer sterk afgeronde driehoek. De laatste finesses in de optimalisatie volgen uit het windtunnelonderzoek.

De versnellingsseis was geen probleem bij dit superhoge ontwerp, maar wel is het gecompliceerd om aan de Nederlandse doorbuigingseis te voldoen, want dat bepaalt de stijfheid van het skelet. Henkens: 'Het is de vraag of je die uitbuigingseis moet handhaven voor alle gebouwen. Ik kan mij een differentiatie voorstellen. Maak er bijvoorbeeld 1/250 van als het gebouw erg hoog is of schrap het voor gebouwen hoger dan 200 meter. Dan ga je dus ontwerpen op die versnellingsseis zoals in het buitenland gebruikelijk is.

Daarmee kun je nog een hoop verdienen, meent Henkens. 'Ik ben ervan overtuigd dat als we meer hoogbouw en vooral ook hogere hoogbouw plegen, het alleen lukt als wij erin slagen om de grenzen zodanig te formuleren dat ze realistisch zijn. De verfijningen in de windbelasting en richting op grotere hoogte moet je weten. Ook de effecten van de vorm moet je weten. Daarvoor moeten we in Nederland meer expertise opbouwen.' ■

## Hoogbouw funderen op staal

Eén van de beperkingen voor hoogbouw in Nederland is de slappe bodem. Toch zijn daar wel oplossingen voor. Directeur ir. George Henkens van Aronsohn noemt onder andere de mogelijkheid om een gebouw aan de voet breder te maken en van daaruit de belasting over een groter oppervlak te verdelen door de funderingspalen schuin te plaatsen. Zo kan de totale belasting over een anderhalf tot tweemaal zo groot grondvlak worden verdeeld.

Een andere mogelijkheid is de bouw van een kelder, zoals onder het World Port Center in Rotterdam gebeurde. Eén kelderlaag weegt op tegen drie à vier kantoorlagen. Dat komt door het verschil in gewicht van de verwijderde grond minus het gewicht van de constructie en door de opwaartse kracht van het grondwater. Bij de Amazing Tower in Rotterdam wordt ook aan deze oplossing gedacht, alleen dan met een diepte van 22 meter! Dat resulteert in een fundering op staal, direct op de eerste zandlaag.