
HIVIBE – Monitoring van trillingen in hoogbouw

Naar een Nationaal Programma Hoogbouwmonitoring

Het trillingsgedrag van hoogbouw wordt niet goed voorspeld met de huidige rekenmethoden. De invloed van de ondergrond in de Nederlandse Delta speelt hierbij een belangrijke rol. Een consortium genaamd HIVIBE bouwt daarom kennis op over het trillingsgedrag van hoogbouw in Nederland door metingen uit te voeren aan acht hoge gebouwen, waaronder De Zalmhaven. Het doel van deze kennisontwikkeling is een betrouwbare voorspelling van windtrillingen in de ontwerpfase van hoogbouw. Het is de ambitie van het consortium om te komen tot een Nationaal Programma Hoogbouwmonitoring.

Hoogbouw is aan een sterke groei bezig, zowel wereldwijd [1] als in Nederland [2]. Alle grote steden in Nederland omarmen hoogbouw in hun visie op stadsontwikkeling. Er is niet alleen een trend naar hoger maar ook naar slanker en tegelijk naar toepassing van andere materialen (zoals hout of hogesterktestaal en -beton). Duurzaamheidseisen vragen om lichtere gebouwen met minder materiaalgebruik. Het steeds hoger, lichter en slanker bouwen maakt gebouwen gevoeliger voor wind. De wind veroorzaakt trillingen in het gebouw die gevolgen kunnen hebben voor de constructieve veiligheid (in de uiterste grenstoestand, UGT) en voor de beleving van gebruikers (in de bruikbaarheidsgrenstoestand, BGT).

auteurs



IR. OKKE BRONKHORST

Onderzoeker Bouwdynamica
TNO



DR. IR. CHRIS GEURTS

Senior Scientist / Consultant
TNO

Beter voorspellen

Inmiddels is met De Zalmhaven (foto 1) de grens van 200 m hoogte gepasseerd in Nederland. Rond deze hoogte wordt de beleving van de trillingen door gebruikers bepalend voor de dimensionering van de constructie. Het wordt dus steeds belangrijker dit gedrag goed te voorspellen [3], om enerzijds te voorkomen dat achteraf problemen ontstaan die kostbare ingrepen vergen en anderzijds in het ontwerp niet te conservatief te zijn en onnodig veel materiaal te gebruiken.

Eerste vuistregels voor trillingsgedrag van hoogbouw

Het trillingsgedrag van hoge gebouwen wordt al onderzocht sinds de jaren 30 van de vorige eeuw. De eerste experimenten →



Tabel 1 Overzicht van gebouwen waaraan is gemeten

Gebouw	Oplevering	Stad	Meting	Materiaal	Hoogte [m]	Eigenfrequentie [Hz]	Demping [%]
Laakhaven	-	Den Haag	1971	staal	36	1,2	1,5
De Nederlandsche Bank	1968	Amsterdam	1971	beton	58	0,63	1,6
Ommoord	-	Rotterdam	1971	-	60	0,80	1,3
Bouwes Palace	1970	Zandvoort	1971	beton	61	0,96	1,8
De Generaal (C.R.M.) ¹⁾	1966	Rijswijk	1971	beton	65	0,63	1,7
EWI gebouw (TU Delft)	1967	Delft	1971	beton	90	0,44	1,5
E.M.C. I ²⁾	1968	Rotterdam	1971	beton	108	0,50	2,1
HBG gebouw	1966	Amsterdam	2000	beton	26	1,3	2,6
's-Graventower I	1991	Capelle a/d IJssel	2000	beton	30	1,6	2,2
Mexx gebouw	1991	Amsterdam	2000	staal	54	0,6	3,1
ClG gebouw	1995	Groningen	2000	staal	22	2,1	2,8
Oval tower	2001	Amsterdam	2002	beton	99	0,4	0,7
Winston Churchill tower	1971	Rijswijk	2005	beton	82	0,55	1,7
La Fenetre	2005	Den Haag	2005	staal	60	0,6	2
Hoftoren	2003	Den Haag	2008	beton	105	0,4	1,9
Montevideo	2005	Rotterdam	2009	beton/staal	142	0,42	1
Kennedytoren	2003	Eindhoven	2010	staal	82	0,45	1,8
E.M.C. II ²⁾	2013	Rotterdam	2011 ³⁾	beton	121	0,52	1,6
New Orleans	2010	Rotterdam	2011 – nu	beton	158	0,28	0,8
JuBi toren (Zuidtoren)	2012	Den Haag	2016	beton	153	0,46	1,2
Tinbergen	1965	Rotterdam	2021	beton	76	0,67	1,0

¹⁾ C.R.M. = Ministerie van Cultuur, Recreatie en Maatschappelijk werk

²⁾ E.M.C. = Erasmus Medisch Centrum

³⁾ Meting uitgevoerd in ruwbouwfase

VUISTREGELS

In de internationale literatuur zijn eenvoudige vuistregels gegeven voor de dynamische eigenschappen van hoogbouw, met name voor de eigenfrequenties, de demping en de trilvormen. De meest eenvoudige vuistregels voor de eigenfrequentie zijn gerelateerd aan de gebouwhoogte H . Zo geeft de Eurocode $f_e = 46/H$, gebaseerd op het werk van Ellis [6]. Soortgelijke relaties zijn in meerdere handboeken en artikelen terug te vinden, zie bijvoorbeeld Holmes en Bekele [4].

Soms wordt ook onderscheid gemaakt op basis van het constructiemateriaal, zoals door Tamura [18]:

- Voor gebouwen uit beton (of beton gecombineerd met staal):
 $f_e = 1/0,015H$ (voor BGT-toetsing) tot $1/0,018H$ (voor UGT-toetsing) (ofwel $66/H$ tot $55/H$)
- Voor gebouwen met een constructie van staal:
 $f_e = 1/0,020H$ (voor BGT-toetsing) tot $1/0,024H$ (voor UGT-toetsing) (ofwel $50/H$ tot $42/H$)

Naast deze empirische relaties zijn er ook vuistregels met een meer theoretische basis. Uit de theorie voor een uitkragende ligger met uniforme verdeling van stijfheid en massa volgt:

$$f_e = \frac{3,52}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{ml^4}}$$

Dit komt overeen met

$$f_e = \frac{0,385}{d}$$

waarbij d de verplaatsing is als gevolg van het eigen gewicht van de ligger, wanneer deze horizontaal wordt verondersteld. Deze vuistregel was ook in NEN 6702 opgenomen.

Voor de demping van hoogbouw zijn in de normen doorgaans waarden gegeven die afhankelijk zijn van het constructiemateriaal.

Deze getalswaarde betreft ofwel de dempingsmaat D , ofwel het logaritisch decrement δ . De verhouding tussen deze grootheden is bij benadering $\delta = 2\pi D$. Soms wordt onderscheid gemaakt tussen de demping in BGT-berekeningen versus UGT-berekeningen. De demping is dan wat hoger aangenomen voor UGT-berekeningen. Voorbeelden van dergelijke waarden staan in tabel 2.

Tabel 2 Voorbeelden van waarden voor dempingsmaat D en logaritisch decrement δ

	D uit NEN 6702	δ uit EN 1991-1-4
Staalconstructies	0,01	0,05
Betonconstructies	0,02 (BGT: 0,01)	0,10
Gemengd beton en staal	geen waarde	0,08
Houtconstructies	0,05	geen waarde

Verschillende onderzoekers hebben dempingsschatters afgeleid op basis van de dempingswaarden verkregen van metingen aan (hoge) gebouwen. Zo geeft Jeary [15] de volgende dempingsschatter:

$$D = f_n + 10^{(\sqrt{d}/2)} \cdot x_{H^*}/H + 0,15 \quad \text{met de limiet } D \leq 60/H + 1,3$$

Hierin is f_n de eigenfrequentie, d de diepte van het gebouw in de trillingsrichting, x_{H^*} de amplitude aan de top, en H de gebouwhoogte.

Tamura [18] geeft een dempingsschatter waarbij onderscheid is gemaakt tussen gebouwen met een hoofddragconstructie van beton of van staal:

- $D = 0,93/H + 470 \cdot x_{H^*}/H - 0,0018$ (beton)
- $D = 0,65/H + 400 \cdot x_{H^*}/H + 0,0029$ (staal)

Deze schatters kunnen worden toegepast voor $x_{H^*}/H \leq 2 \cdot 10^{-5}$.

werden gedaan aan het Empire State Building. Een beschrijving van die eerste experimenten is bijvoorbeeld te vinden in Holmes en Bekele [4]. In de jaren 60, 70 en 80 is dit onderzoek verder ontwikkeld door onder andere Davenport [5], Ellis [6] en Jeary [7] om tot generieke regels voor het trillingsgedrag te komen. In Nederland zijn toen ook de eerste trillingsmetingen uitgevoerd door Van Koten [8] aan diverse gebouwen (tabel 1). Deze metingen stonden aan de basis van de

eerste vuistregels voor demping en eigenfrequenties van gebouwen (zie kader Vuistregels), die ook nu nog worden gebruikt in de normen.

De onvoorspelbaarheid van demping

Promotieonderzoek door van Oosterhout [9] en Geurts [10] leverde het inzicht op welke parameters van invloed zijn op het berekende dynamisch gedrag van hoge gebouwen. In het kader van deze onderzoeken zijn geen

Uit een vergelijking van meetresultaten met waarden in richtlijnen bleek de noodzaak van betere voorspellingsmodellen voor de demping

trillingen aan gebouwen gemeten. Met de toenemende hoogte van hoogbouw in Nederland zijn er sinds 2000 metingen door TNO verricht aan meerdere hoge gebouwen in Nederland. Een overzicht daarvan is gepresenteerd in [11] en ook te vinden in tabel 1. Deze metingen zijn over het algemeen uitgevoerd over periodes van een dag tot een week, en bij windsnelheden lager dan de ontwerpomstandigheden voor bruikbaarheid en veiligheid.

In eerder onderzoek door TNO [12] is een vergelijking gemaakt tussen de voorspelde en gemeten trillingseigenschappen van gebouwen. Hieruit volgde dat er verschillen zijn tussen het gemeten en voorspelde gedrag wat in werkelijkheid zowel ongunstiger als gunstiger was dan voorspeld. Uit de vergelijking blijkt vooral ook dat de demping niet goed wordt voorspeld met de huidige voorspellingsmodellen. Om tot een betere voorspelling van het trillingsgedrag te komen is een beter model nodig.

Rol van de fundering

Sanchez Gomez [13] toonde met modelberekeningen aan dat de fundering een significant aandeel heeft in de demping van veel Nederlandse hoogbouw. De slappe ondergrond speelt hierbij een belangrijke rol. Cruz en Miranda [14] laten zien dat met de interactie tussen de grond en de bouwconstructie een fysische verklaring kan worden gegeven voor de in situ waargenomen afname in demping met gebouwhoogte. Deze relatie tussen de demping en de gebouwhoogte vormt de basis voor de meeste empirische dempingsschatters die in het verleden zijn ontwikkeld, zoals [15] en [16]. Op basis van het werk van Sanchez Gomez is een dempingsmodel ontwikkeld waarmee de invloed van de ondergrond expliciet wordt meegenomen [17]. Uit een vergelijking van dit model met gemeten dempingswaarden bleek dat voor een betrouwbare schatting van de totale demping het cruciaal is de eigenfrequentie van de constructie en de materiaaldemping van de grond goed te kennen.

Rol van de amplitude

Naast de invloed van de ondergrond speelt de amplitude van de trillingen een grote rol

in het trillingsgedrag van hoogbouw. De empirische dempingsschatters uit [15] en [16] gaan uit van een toename van de demping met amplitude. Tamura [18] liet zien dat vanaf een bepaalde trillingsamplitude de demping weer kan afnemen. Deze afname in demping is ook gevonden uit metingen aan de woontoren New Orleans in Rotterdam [19]. Tamura [18] geeft een mogelijke fysische verklaring voor deze amplitudeafhankelijkheid van de demping. Er bestaat op dit moment echter geen algemeen toepasbaar dempingsmodel dat dit gedrag betrouwbaar beschrijft, vooral door een gebrek aan voldoende validatiedata.

Noodzaak van langeduurmonitoring

Een laatste aspect waar nog weinig over bekend is, is de verandering van het dynamisch gedrag over de levensduur van hoogbouw. Bronkhorst en Geurts [20] hebben een analyse uitgevoerd over vier jaar aan data van de New Orleans-toren. Hieruit blijkt dat er over deze periode een kleine maar gestage afname waarneembaar is in de eigenfrequenties van deze toren, terwijl de demping geen significante verandering onderging. De oorzaak van de afname in eigenfrequentie in de tijd is niet bekend. Het zou bijvoorbeeld te maken kunnen hebben met scheurvorming in het beton of het zettingsgedrag van de toren. Dit is echter nog niet eerder onderzocht.

Meer kennis over de rol van de trillingsamplitude en de invloed van de tijdsduur kunnen alleen worden verkregen met trillingsdata over een langdurige periode. Om tot meer betrouwbare voorspellingsmodellen te komen voor de bruikbaarheidsgrenstoestand en de uiterste grenstoestand van hoogbouw is langdurige monitoring aan verschillende hoge gebouwen dus een vereiste.

HIVIBE

Ondanks de onderzoeksresultaten en kennis verkregen uit meetcampagnes is er nog steeds sprake van een discrepantie tussen voorspelling en praktijk als het gaat om het trillingsgedrag. De beschikbare meetdata zijn meestal voor een bepaalde casus gemeten, gedurende korte tijd, met een beperkte →

HIVIBE

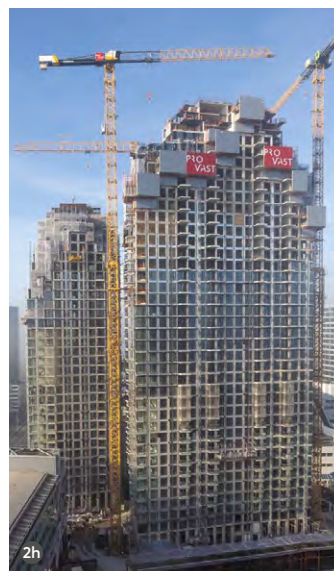
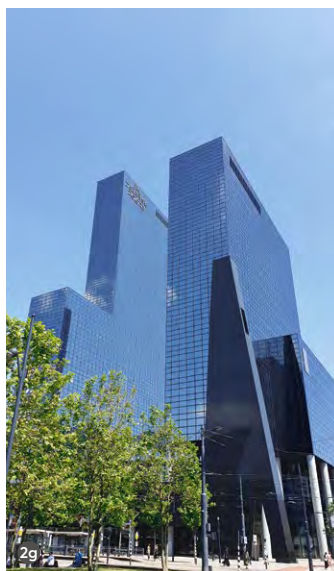
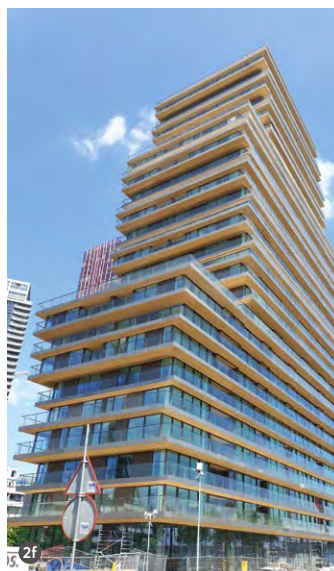
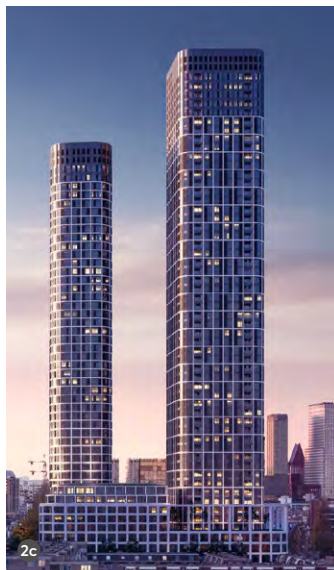
HIVIBE staat voor Highrise Vibrations in delta cities Explored. Het HIVIBE-onderzoek wordt uitgevoerd als Topconsortium voor Kennis en Innovatie (TKI Deltatechnologie). Dit consortium wordt geleid door TNO en bestaat daarnaast uit de partners BAM, Zonneveld, Fugro, Imd Raadgevende Ingenieurs, Aronsohn Constructies, Structure Portante Grimaud, BESIX, Peutz, SCIA en Stichting Kennisoverdracht Windtechnologie.

meetopzet en onder specifieke omstandigheden. Dergelijke metingen zijn vaak lastig te gebruiken om generieke rekenmodellen mee te ontwikkelen. Verder zijn er vrijwel geen metingen uitgevoerd op basis waarvan het mogelijk is de invloed van de fundering op het trillingsgedrag te bepalen. Metingen op ware grootte aan gerealiseerde gebouwen zijn noodzakelijk om rekenmodellen te kunnen ontwikkelen, kalibreren en valideren.

Om deze metingen uit te voeren is het zogenoemde HIVIBE-consortium opgericht (zie kader HIVIBE). Het doel van dit consortium is tot een nauwkeuriger voorspelling

van het trillingsgedrag van hoogbouw te komen. Dit heeft impact op het leefcomfort, biedt mogelijkheden voor efficiënt gebruik van materialen en helpt constructeurs om alternatieven voor de constructie af te wegen.

Het onderzoek is in twee fases opgezet. De eerste fase, die begin 2021 is afgerond, diende als vooronderzoek om vast te stellen welke eigenschappen moeten worden gemeten, en welke technieken daarvoor ter beschikking staan. Daarnaast hebben de partners gebouwen aangedragen, en is vastgesteld welke criteria worden gehanteerd om de selectie uit deze gebouwen te maken. →



LANGEDUURMONITORING ZALMHAVEN

Onlangs heeft De Zalmhaven in Rotterdam haar hoogste punt bereikt. Uit de dynamische berekeningen blijkt dat deze toren ruim voldoet aan de norm. Nog voor de oplevering van het gebouw wordt een meetsysteem geïnstalleerd. Het doel is om het trillingsgedrag en de gebouw- en funderingseigenschappen te bepalen en deze over een lange periode te monitoren.

De volgende eigenschappen van het gebouw en de wind worden gemeten:

- De trillingseigenschappen eigenfrequenties f_n , dempingswaarden D_n en trilvormen φ_n van het gebouw inclusief fundering.
- De gebouweigenschappen buigstijfheid EI en massa M .
- De funderingseigenschappen rotatie- en translatiestijfheden K_r en K_t .
- De windsnelheid V en de windrichting α .

Het meetsysteem bestaat uit de volgende sensoren verdeeld over drie verdiepingen:

- Dak:
 - twee windmeters op de mast van het gebouw.
- 58e verdieping:
 - twee versnellingsmeters waarmee de trillingen in de hoofd-draagrichtingen van het gebouw worden gemeten;
 - twee inclinometers waarmee de hoekverdraaiingen in de hoofd-draagrichtingen van het gebouw worden gemeten.
- Mezzanine:
 - twee versnellingsmeters waarmee de trillingen in de hoofd-draagrichtingen van het gebouw nabij de fundering worden gemeten. Hiermee wordt de invloed van de fundering op het trillingsgedrag bepaald;
 - twee inclinometers waarmee de hoekverdraaiing nabij de fundering wordt gemeten;
 - twaalf reksensoren waarmee de rekken worden gemeten en de belasting op de fundering wordt ingeschat.

Met de versnellingsmetingen op de 58e verdieping worden de eigenfrequenties en dempingswaarden van het gebouw bepaald. In combinatie met de versnellingen gemeten op de mezzanine wordt de invloed van de fundering op de trilvormen bepaald. Met behulp van de bepaalde trillingseigenschappen kan een inschatting worden gemaakt van de gebouwmassa M , de gebouwstijfheid EI , en de rotatie- en translatiestijfheden K_r en K_t van de fundering. Deze inschatting wordt gemaakt door de trillingseigenschappen van een model te tunen op de gemeten eigenschappen. In combinatie met de rek- en hoekverdraaiingmetingen kunnen de gebouw- en funderingseigenschappen nauwkeuriger worden bepaald, en kan de dempingsbijdrage van de fundering D_f worden ingeschat.

Zoals geconstateerd voor de New Orleans-toren kunnen de trillingseigenschappen in de tijd variëren, enerzijds door veranderingen in

mast (209 m):

2 windmeters

58e verdieping (183 m):

2 versnellingsopnemers

2 tilsensoren

Mezzanine (3 m):

12 reksensoren

2 versnellingsopnemers

2 tilsensoren

3

het gebouw zelf [20], en anderzijds omdat deze afhankelijk kunnen zijn van de mate waarin een gebouw beweegt [19]. Om de oorzaak van deze veranderingen te bepalen, zullen zowel de trillingseigenschappen als de gebouw- en funderingseigenschappen gedurende lange tijd worden gemonitord op De Zalmhaven. Zodra het meetsysteem operationeel is, zal het volcontinu in bedrijf zijn. De meetgegevens worden met een meetfrequentie van 50 Hz (50 maal per seconde) gemeten en opgeslagen. Het is de bedoeling om de metingen voor een periode van minstens vier jaar door te laten lopen.

Het HIVIBE-consortium heeft als doel om aan de hand van metingen tot een nauwkeuriger voorspelling van het trillingsgedrag van hoogbouw te komen

In de tweede fase, lopend van begin 2021 tot eind 2024, zijn acht gebouwen (fig. 2a t/m h) geselecteerd waarvoor monitoringcampagnes zullen worden opgezet en uitgevoerd.

De Zalmhaven vormt hierbij een bijzondere casus omdat er zeer uitgebreid en over een lange tijd gemonitord zal worden (zie kader Langeduurmonitoring Zalmhaven). Tevens worden door de betrokken ingenieursbureaus rekenmodellen voor de gebouwen opgezet. Deze rekenmodellen worden gebruikt om vooraf het dynamisch gedrag te voorspellen, om gevoeligheidsanalyses uit te voeren en om na de metingen de meetresultaten te vergelijken met de modelresultaten. TNO gebruikt de meetdata om het voorspellingsmodel voor demping van hoogbouw verder te ontwikkelen waar in het onderzoek van Sanchez Gomez [13] een begin mee is gemaakt.

Nationaal Programma Hoogbouwmonitoring

De metingen die in het lopende project worden uitgevoerd, leveren waardevolle informatie op om in de toekomst het trillingsgedrag van hoge gebouwen beter te voorspellen. De reikwijdte van deze informatie wordt bepaald door de gebouwen die in het onderzoek worden meegenomen, en de manier waarop aan deze gebouwen kan worden gemeten. Het is de ambitie van het HIVIBE-consortium om tot een Nationaal Programma Hoogbouwmonitoring te komen. ●

LITERATUUR

- 1 CTBUH, The global impact of 9/11 on tall buildings, www.skyscrapercenter.com/9-11-global-impact, 2021.
- 2 Stichting Hoogbouw, HOOG – Hoogbouw in Nederland 2020, www.stichtinghoogbouw.nl/hoogbouw-in-nederland-2020/, 2021.
- 3 Caulil, E. van, Is de tijd rijp voor slankere gebouwen in Nederland, Cementonline, 21 oktober 2021.
- 4 Holmes, J.D., Bekele, S., Wind Loading of Structures, 4th edition, Taylor & Francis, 2020.
- 5 Davenport, A.G., The treatment of wind loading on tall buildings, Proc. Symp. Tall Buildings, Southampton, p. 3-45, 1967.
- 6 Ellis, B.R., An assessment of the accuracy of predicting the fundamental natural frequencies of buildings and the implications concerning the dynamic analysis of structures, Proc. Inst. Civil Eng., Part 2, 69, p. 763-776, 1980.
- 7 Jeary, A.P., Ellis, B.R., On predicting the response of tall buildings to wind excitation, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 13(1-3), p. 173-182, 1983.
- 8 Van Koten, H., Some measurements on tall buildings in the Netherlands, Proc. of the Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, Ottawa, p. 685-704, 1968.
- 9 Van Oosterhout, G.J., Wind-induced dynamic behaviour of tall buildings, PhD Thesis, TU Delft, 1996.
- 10 Geurts, C.P.W., Fluctuating wind loads on building facades, PhD Thesis, TU Eindhoven, 1997.
- 11 Geurts, C.P.W., Van Bentum, C.A., Sanchez, S., Van Dijk, S., Demping hoogbouw voorspeld, *Cement* 3, p. 60-65, 2015.
- 12 Geurts, C., Bronkhorst, O., Dynamica van hoogbouw onder windbelastingen, *Cement* 6/7, p. 20-26, 2019.
- 13 Sanchez Gomez, S., Energy flux method for identification of damping in high-rise buildings subject to wind, PhD Thesis, TU Delft, 2019.
- 14 Cruz, C., Miranda, E., Insights into damping ratios in buildings, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, p. 1-19, 2020.
- 15 Jeary, A., Designer's guide to the dynamic response of structures, First edition, The University Press, Cambridge, 1997.
- 16 Tamura, Y., Suda, K., Sasaki, A., Damping in buildings for wind resistant design, Proc. Int. Symp. on Wind and Structures for the 21st Century, Cheju, Korea, p. 115-130, 2000.
- 17 Bronkhorst, A.J., Geurts, C.P.W., Slappe ondergrond dempt trillingen van hoogbouw, *Bouwen met Staal* 266, p. 40-44, 2018.
- 18 Tamura, Y., Amplitude dependency of damping in buildings and critical tip drift ratio, *Int. Journal High-Rise Buildings* 1, p. 1-13, 2012.
- 19 Bronkhorst, A.J., Van Bentum, C.A., Sanchez Gomez, S., Wind-induced vibrations and damping in high-rise buildings, report TNO 2018 R10644, 2018.
- 20 Bronkhorst, A.J., Geurts, C.P.W., Long-term vibration and wind load monitoring on a high-rise building, Proc. Int. Conf. Noise and Vibration Eng., Leuven, 2020.
- 21 Bronkhorst, A.J., Moretti, D., Geurts, C.P.W., Identification of the dynamic properties of the residential tower New Orleans, 9th Int. Conf. on Experimental Vibration Analysis for Civil Eng. Struct., 2021.