



Demping en energiestromen in trillende hoogbouw

Onderzoek naar de nauwkeurigheid van de Energie Flux Analyse voor het bepalen van demping in hoogbouw

Demping is een belangrijke parameter in de analyse van het trillingsgedrag van hoogbouw. Met een beter begrip van demping kunnen modellen worden ontwikkeld waarmee het trillingsgedrag nauwkeuriger kan worden voorspeld. Met een nieuwe analysetechniek, genaamd Energie Flux Analyse (EFA) of energiestroomanalyse, kan de dempingsbijdrage van zowel de fundering als het gebouw worden bepaald. Dit artikel beschrijft een afstudeeronderzoek waarin de nauwkeurigheid van deze analysetechniek nader is onderzocht.

AFSTUDEERSTUDIE

Dit artikel is gebaseerd op de afstudeerstudie 'Verification of the energy flow analysis method as identification tool for damping in high-rise buildings' die Ikram Talib heeft uitgevoerd aan de Technische Universiteit Eindhoven faculteit Built Environment. Afstudeerhoogleraar was prof.dr.ir. A.S.J. Suiker. In haar afstudeercommissie hadden verder zitting: prof.ir. S.N.M. Wijte (TU/e), ir. A.J. Bronkhorst (TNO) en ir. J.P. Pruiksmas (TNO). Bij dit artikel op www.cementonline.nl staat een link naar de thesis.

Het steeds hoger, lichter en slanker bouwen maakt gebouwen gevoeliger voor wind. De windbelasting veroorzaakt trillingen in het gebouw, die voelbaar kunnen zijn voor de gebouwgebruikers. Deze trillingen kunnen als ongemakkelijk worden ervaren en in het ergste geval het welzijn van mensen in het gebouw beïnvloeden.

Demping

Demping is een belangrijke parameter bij het berekenen van trillingen in hoogbouw. Een belangrijk deel van de constructieve demping is in geval van slappe grond afkomstig uit de fundering, zo blijkt uit promotieonderzoek van Sergio Sanchez Gomez [1]. In NEN-EN 1991-1-4 en NEN-EN 1990 is de demping

echter alleen afhankelijk van het gebruikte materiaal in de hoofdconstructie respectievelijk van de eigenfrequentie van het gebouw. Om de dempingsbijdrage goed mee te kunnen nemen in een berekening van de trillingsniveaus, heeft TNO [2][3] een dempingsmodel onderzocht waarin deze bijdrage expliciet wordt meegenomen. Uit dit onderzoek blijkt dat dit model de potentie heeft om tot een betere voorspelling van de demping te komen dan andere voorspellingsmodellen [4, 5]. In zijn huidige vorm schat het dempingsmodel de totale demping echter te laag in. Om met dit model tot een nauwkeurige voorspelling van de demping te komen, zijn meetdata van de demping in de fundering en het gebouw nodig.

Dempingsmeetmethoden en Energie Flux Analyse

Er zijn verschillende methoden waarmee op basis

auteurs



IR. IKRAM TALIB

Constructeur
IMd Raadgevende
Ingenieurs



**IR. OKKE
BRONKHORST**

Onderzoeker
Bouwdynamica
TNO

van metingen de demping kan worden bepaald, zoals de logaritisch decrement methode en de half power bandwidth methode (zie kader 'Logaritisch decrement - en half power bandwidth methode'). Met deze methoden kan, op basis van een gemeten trillingssignaal van een constructie, de totale demping worden bepaald. Het is echter niet mogelijk de demping in een deel van de constructie te bepalen.

Om de dempingsbijdrage van verschillende delen van een constructie te kunnen bepalen, heeft Gomez [1][6][7] een analysemethode ontwikkeld, genaamd Energie Flux Analyse (EFA, zie kader). Met deze methode kan, met behulp van data van de bewegingen en belastingen op een gebouw, de hoeveelheid demping in de grond worden bepaald. Doordat er weinig ervaring is met deze techniek voor deze specifieke toepassing, is er weinig bekend over de nauwkeurigheid van de methode voor de bepaling van bodemdemping. In het genoemde afstudeeronderzoek [8] is op basis van modelanalyses een eerste stap gezet om meer vat te krijgen op de nauwkeurigheid van de EFA voor deze toepassing. Het doel van dit onderzoek was om inzicht te krijgen in de invloed van een gebrek aan informatie op de bepaling van demping met de EFA-techniek.

Onderzoeksmethode

Het onderzoek is uitgevoerd met een eindige-elementenmodel (EEM) in het softwarepakket Abaqus. In deze gecontroleerde omgeving zijn de demping van het gebouw en de fundering bekende waarden. Abaqus berekent zelf ook de exacte energieën van het model. Daarnaast zijn in het pakket alle data van de bewegingen en de belastingen op het gebouwmo-

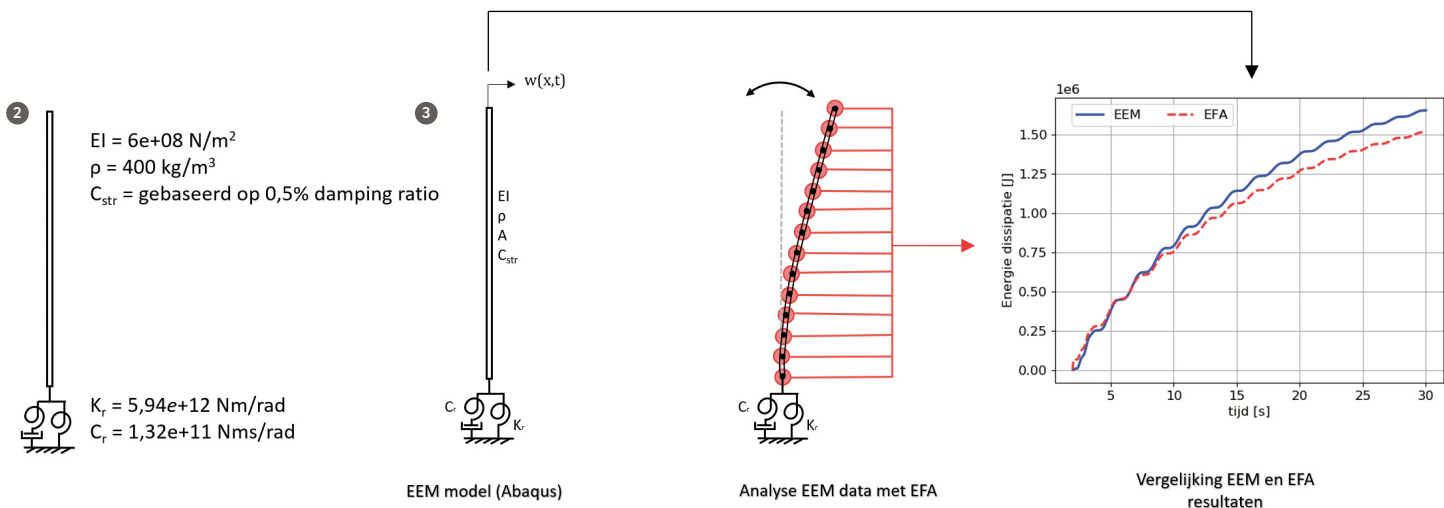
del beschikbaar. Hierdoor kan de invloed van een reductie in deze data op de dempingsbepaling met de EFA nauwkeurig worden bepaald.

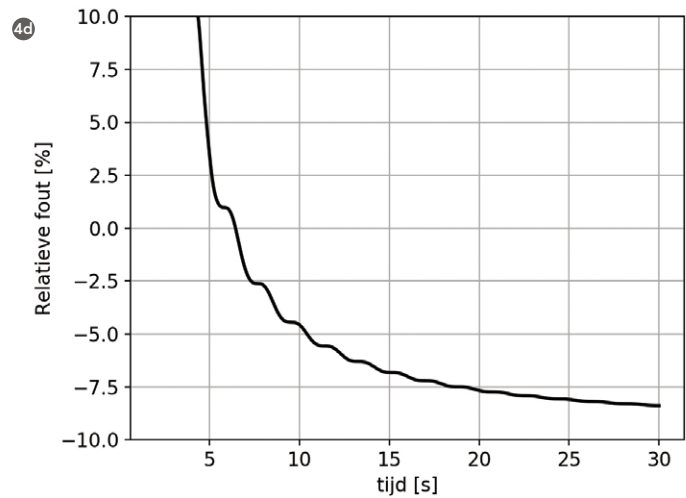
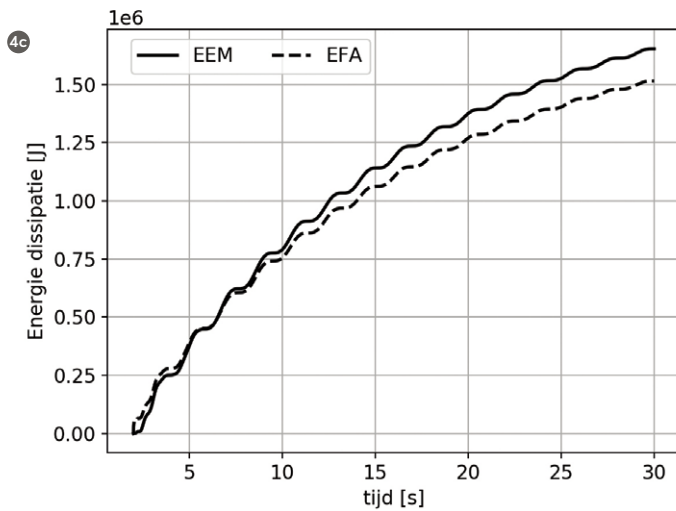
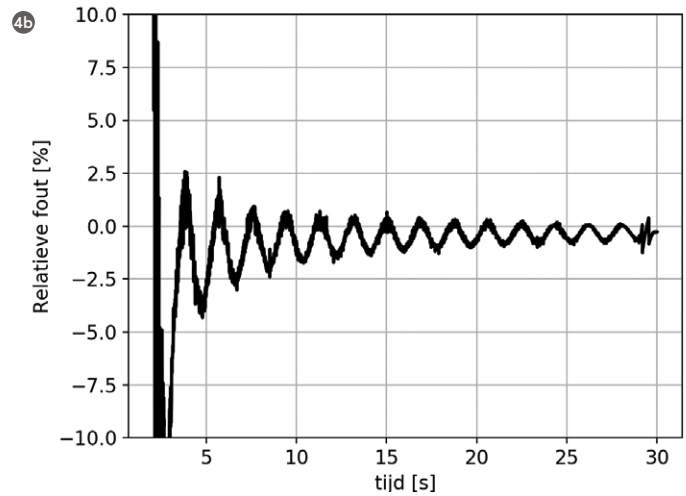
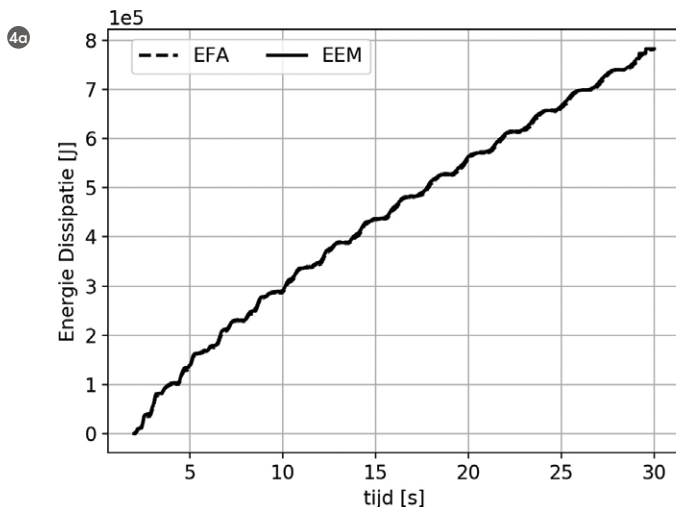
Het EEM-model is opgezet aan de hand van de eigenschappen van het Erasmus Medisch Centrum in Rotterdam (foto 1). Het gebouw is gemodelleerd als continu-balkmodel met een buigstijfheid EI , een volumieke gebouwmassa ρ en een constructiedemping C_{str} . De fundering van het gebouw is gemodelleerd met een rotatieveer en -demper K_r en C_r , (fig. 2). Figuur 3 geeft de methode schematisch weer.

Er is een tijdsafhankelijke berekening uitgevoerd met het EEM-model. De berekende tijdsignalen van de verplaatsing, snelheid en kromming van elke knoop van het model zijn gebruikt als invoersignalen in de EFA-methode. Op basis van deze signalen kunnen alle energieën van de energiebalans worden bepaald. Het verschil tussen de gedissipeerde energie bepaald in Abaqus en de berekende gedissipeerde energie met de EFA geeft informatie over de nauwkeurigheid van de EFA.

Nauwkeurigheid bepaling dempingsmechanismen

Eerst is onderzocht hoe nauwkeurig de EFA-methode verschillende dempingscomponenten kan bepalen, als alle data uit het model worden toegepast. Hierbij is het model in trilling gebracht door aan het begin van de simulatie een uitwijking op te leggen aan de top van het model, en deze los te laten. Door gebruik te maken van een initiële verplaatsing werkt er geen externe belasting op het model tijdens de simulatie. De arbeid ten gevolge van de externe belasting speelt in deze situatie geen rol in de EFA. Er zijn





Met de huidige dempingsmeetmethoden kan de bijdrage van de fundering niet worden bepaald

- twee cases onderzocht met een initiële verplaatsing:
- een model met bodemdemping C_p , maar geen constructiedemping C_{str} (case 1);
 - een model met bodemdemping C_p en constructiedemping C_{str} (case 2).

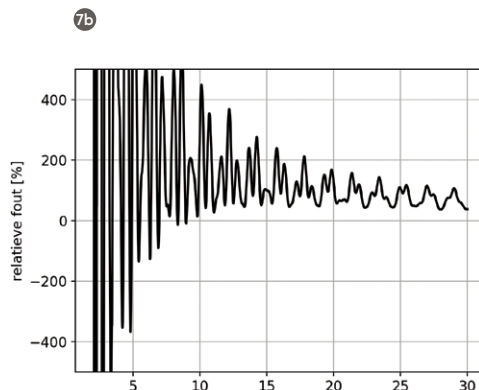
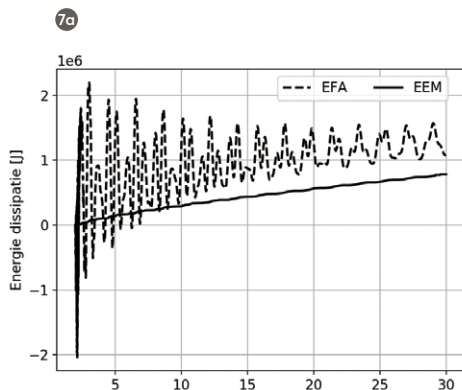
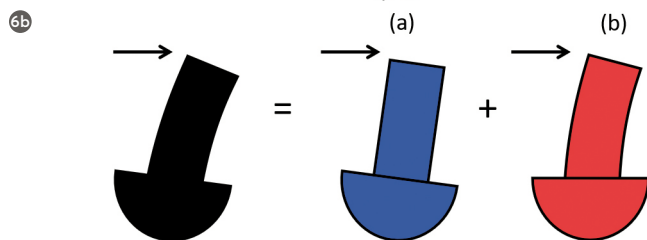
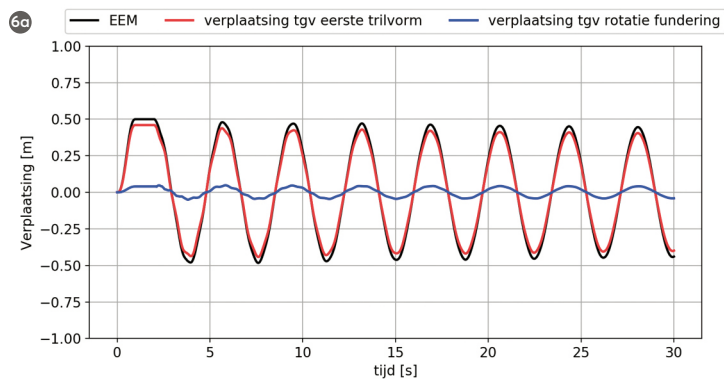
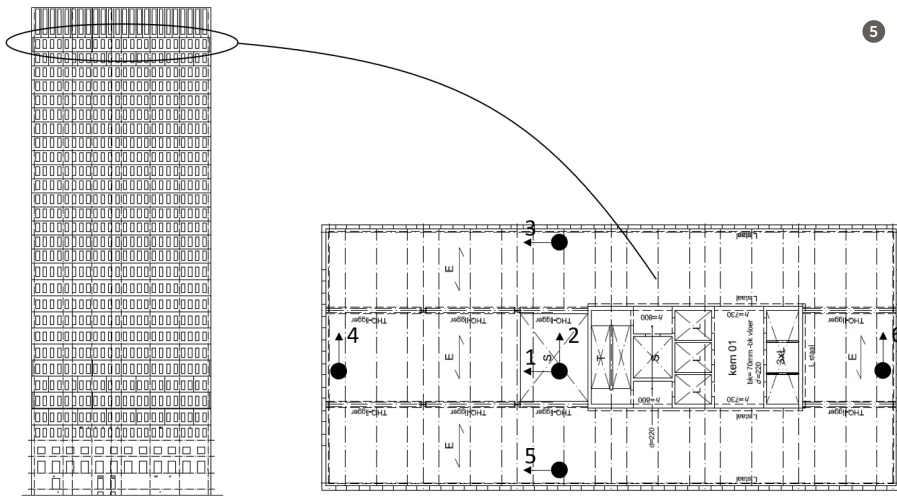
Figuur 4 geeft een aantal resultaten van de berekeningen. De energiedissipatie bepaald met de EFA wordt zoals eerder gesteld vergeleken met de dissipatie berekend door Abaqus. In figuur 4a en 4c is de ontwikkeling van de energiedissipatie in de bodem over de tijd weergegeven bij respectievelijk het toepassen van enkel bodemdemping (case 1) en bodemdemping in combinatie met constructiedemping (case 2). Figuur 4b en 4d geven de relatieve fout van de energiedissipatie berekend met de EFA en Abaqus. De fout is bepaald als het verschil tussen de twee waarden bepaald voor de energiedissipatie.

De fout na 25 s simulatietijd met één dempingsmechanisme is ongeveer 0,5% en met twee dem-

pingsmechanismen 8%. Met één dempingsmechanisme geeft de EFA-techniek dus een nauwkeurige inschatting van de ingevoerde demperwaarde in Abaqus. De fout met twee dempingsmechanismen is groter. Dit komt door de nauwkeurigheid waarmee de energieflux S wordt bepaald en heeft te maken met de invloed van het numerieke schema en C_{str} op de kromming en de rotatiesnelheid in het onderste element van het model. Nader onderzoek is nodig om deze invloeden te kwantificeren. De gevoeligheid van de dempingsbepaling voor deze data demonstreert het belang van nauwkeurige informatie over de kromming en de rotatiesnelheid op deze positie om tot een nauwkeurige bepaling van de demping te komen.

Dempingsbepaling fundering met beperkte informatie

In een meetcampagne kan op een beperkt aantal posities in een hoogbouw worden gemeten (fig. 5). In de afstudeerstudie is onderzocht wat de invloed is van



een beperkt aantal sensoren op de bepaling van de bodemdemping met de energiestroomanalyse. In plaats van alle informatie uit het EEM-model te gebruiken, wordt in case 3 alleen de informatie van de bovenste en onderste knoop van het model gebruikt. Om de kinetische en potentiële energie van het gebouw te kunnen bepalen, is met behulp van analytische vergelijkingen een inschatting gemaakt van de trillingen op tussenliggende knopen. Hiervoor is aangenomen dat dynamisch gedrag van een toren een combinatie is van (a) een rotatie aan de basis en (b) een trilvorm afkomstig van een buiglijger onder invloed van een flexibele bodem. Figuur 6 illustreert deze twee bewegingen en geeft in een grafiek de bijdrage van beide componenten in de bovenste knoop van het model.

Figuur 7 geeft de resultaten van de energiedissipatie in de fundering van case 3, bepaald met de EFA en direct afkomstig uit Abaqus. In deze case is alleen gebruikgemaakt van de berekende data aan de top op basis van het EEM-model. De overige signalen zijn gegenereerd door middel van analytische vergelijkingen gebaseerd op de eerste trilvorm.

De gedissipeerde energie bepaald met de EFA vertoont grote fluctuaties in de tijd, maar convergeert geleidelijk in de richting van de gedissipeerde energie bepaald met Abaqus. Hoewel de fluctuerende fout reduceert met simulatietijd, is een langere simulatietijd nodig om tot een nauwkeurige inschatting van de fout te komen. De grote fluctuaties in de gedissipeerde energie, bepaald met de EFA, worden veroorzaakt door het ontbreken van hogere trilvormen. Het beschouwen van een combinatie van meerdere trilvormen zal in minder, en kleinere fluctuaties resulteren. Waarschijnlijk zal dit ook voor een grotere nauwkeurigheid van de dempingsbepaling met de EFA zorgen.

Invloed windbelasting op dempingsbepaling

Als laatste is onderzocht wat de invloed van de windbelasting is op het bepalen van de demping met de EFA. Een realistische windbelasting is aangebracht op het EEM-model door gebruik te maken van druksignalen gemeten in een windtunnelonderzoek (fig. 8). Omdat het in de praktijk lastig is de volledige windbelasting te bepalen, zijn de volgende twee cases onderzocht, beide met enkel bodemdemping:

- Een model met een volledige dataset over de windbelasting, waarbij elke knoop in het EEM-model voorzien is van een windbelastingssignaal, bepaald uit windtunnelmetingen (case 4).
- Een model met een beperkte dataset van de wind-

belasting op het gebouw. Hierbij zijn alleen de gemeten winddrukken aan de top van het gebouw gebruikt in de EFA (case 5).

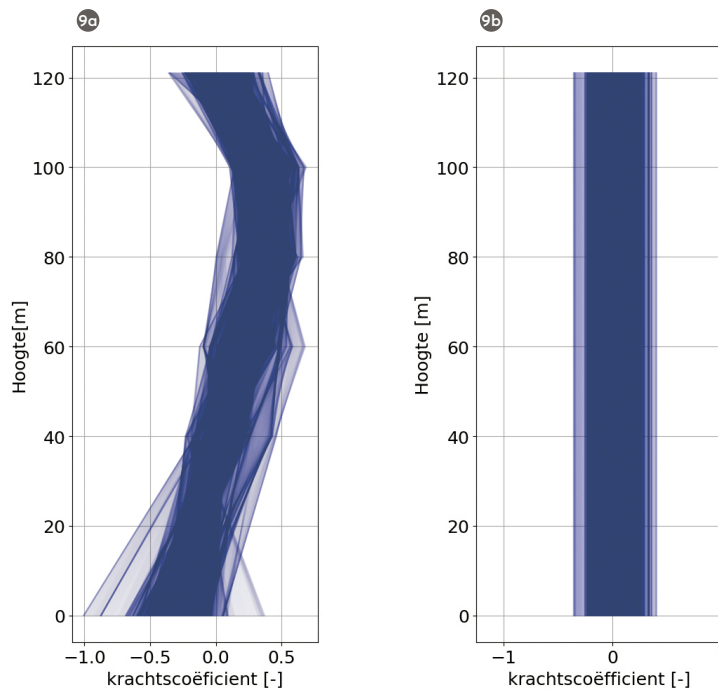
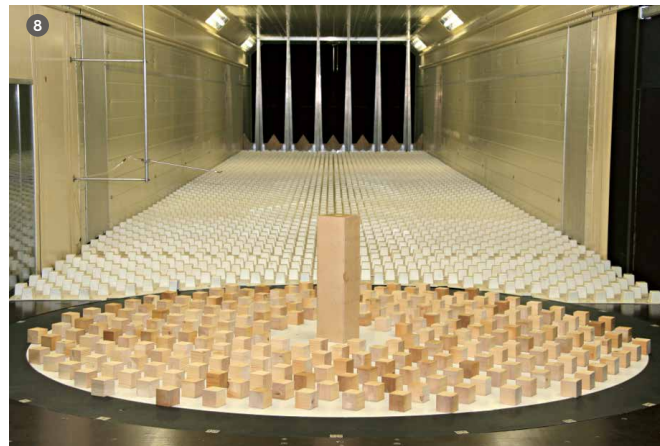
Figuur 9 geeft de krachtscoëfficiënten over de hoogte voor beide cases weer. Met deze krachtscoëfficiënt is het mogelijk de windbelasting op het gebouw uit te rekenen. Het effect van de reductie in data van de windbelasting voor case 5 is duidelijk zichtbaar. Met de EFA is voor beide gevallen de energiedissipatie bepaald (fig. 10).

De fout na 25 s simulatietijd met volledige winddata (case 4) is ongeveer 0,5% en met gereduceerde winddata (case 5) 0,2%. Deze resultaten laten zien dat een gereduceerde hoeveelheid winddata geen significant effect heeft op de bepaling van de demping in de fundering met de EFA. Voor een nauwkeurige bepaling van de demping in de fundering blijkt de belasting geen belangrijke rol te spelen. De energiestroom S naar de fundering moet echter wel nauwkeurig worden bepaald. Dit betekent dat er nauwkeurige data benodigd zijn van het buigend moment, de rotatiesnelheid en de rotatiestijfheid van de fundering.

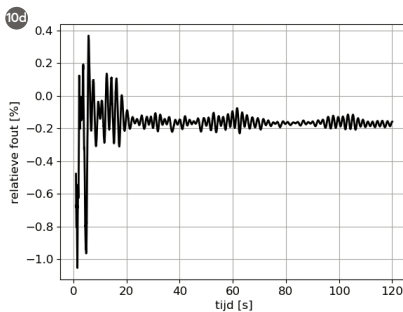
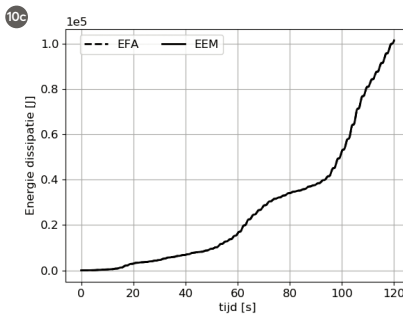
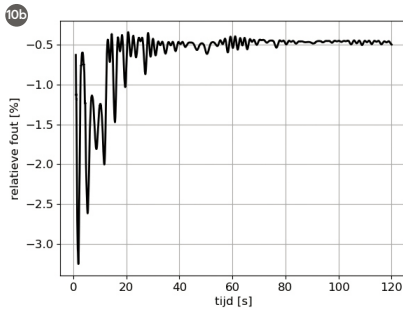
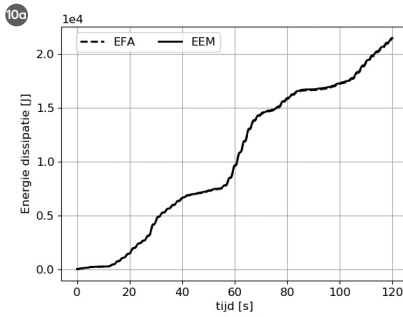
Conclusies en aanbevelingen

Ten behoeve van een betere bepaling en voorspelling van demping in hoogbouw is een afstudeeronderzoek uitgevoerd naar de nauwkeurigheid van de Energie Flux Analyse (EFA). Met deze nieuwe techniek kan, met behulp van meetdata van een gebouw, de hoeveelheid demping in de grond worden bepaald. Het doel van het afstudeeronderzoek was om inzicht te krijgen in de invloed van een gebrek aan informatie op de dempingsbepaling met deze techniek. Uit het onderzoek kan het volgende worden geconcludeerd:

- Met de EFA is het mogelijk de constructie en bodemdemping te onderscheiden, indien er een nauwkeurige bepaling plaatsvindt van de energiestroom naar de fundering. Hiervoor zijn nauwkeurige data nodig van het buigend moment, de rotatiesnelheid en de rotatiestijfheid van de fundering.
- Als het dynamisch gedrag van het gebouw wordt beschreven met analytische vergelijkingen voor de rotatie aan de basis en één trilvorm van het gebouw, fluctueert de fout in de gedissipeerde energie bepaald met de EFA. Hoewel de fout in de tijd steeds kleiner wordt, is een langere simulatietijd nodig om tot een nauwkeurige inschatting van de fout te komen.
- Voor bepaling van de demping in de bodem is geen nauwkeurige informatie van de (wind)belasting op het gebouw nodig.



Onderzocht is wat de invloed is van een beperkt aantal sensoren op de bepaling van de bodemdemping met de Energie Flux Analyse



ENERGIE FLUX ANALYSE

De Energy Flux Analyse is een analyse-techniek waarmee op basis van meet- of modeldata de energiestromen in verschillende onderdelen van een systeem kunnen worden bepaald. Deze analysetechniek is gebaseerd op de wet van behoud van energie en gebruikt een energiebalans waarmee de verandering van de energie van het systeem wordt beschreven:

$$\partial E / \partial t + S = w_{\text{ext}} + w_{\text{dis}}$$

waarin:

$\partial E / \partial t$ is de verandering in de inwendige energie (i.e. is de kinetische en potentiële energie) van het systeem

S is de energiestroom, de energiestroom over een specifiek begrensde deel van het systeem

w_{ext} is de energiestroom ten gevolge van de arbeid verricht door de externe belasting die op het systeem wordt uitgeoefend

w_{dis} is de energiestroom ten gevolge van energiedissipatie in het systeem

Met deze energiebalans en data van de

verschillende termen kan de gedissipeerde energie worden bepaald. Met deze gedissipeerde energie kan de waarde van de demper van het systeem worden berekend:

$$C = w_{\text{dis}} / (\partial u / \partial t)^2$$

waarin:

$\partial u / \partial t$ is de trillingssnelheid van het gebouw

De demper C is gerelateerd aan de dempingsmaat D met:

$$D = C / C_c = C / (2\sqrt{km})$$

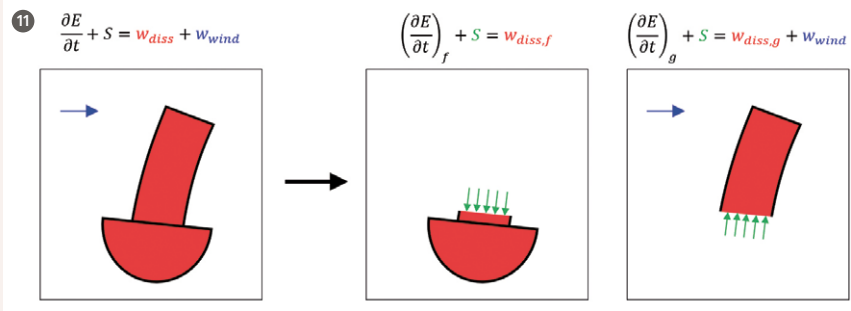
waarin:

C_c is de kritische demping

k is de veerstijfheid

m is de modale massa van het systeem

Door de introductie van de energiestroom S kan een energiebalans worden opgesteld voor een deel van een constructie (fig. 11). Hiermee wordt het mogelijk het dempingsaandeel van dat deel van de constructie te bepalen.



Op basis van de bevindingen uit dit onderzoek wordt aanbevolen om:

- De nauwkeurigheid van de EFA-techniek verder te onderzoeken. Specifieke punten die nader onderzoek behoeven zijn:
 - de invloed van de numerieke modellering op de energiestroom S ;
 - het combineren van meerdere trilvormen om het dynamisch gedrag van een hoogbouw te beschrijven;

- de invloed van beperkte informatie over de windbelasting op de bepaling van de demping in de gebouwconstructie boven de grond.
 - Op basis van metingen aan de fundering van hoogbouw te bepalen welke rotatiesnelheden en welk buigend moment in de praktijk typisch optreden, en de funderingsstijfheid te bepalen.
 - Analyses uit te voeren met meer gedetailleerde modellen om onder andere de volgende punten te

onderzoeken:

- op welke posities op de fundering versnellingen, rekken, inclinaties en krachten gemeten moeten worden om een nauwkeurige inschatting van de demping in de bodem te kunnen maken;
- op welke manier een combinatie van meerdere dempers (bijv. een rotatie-, translatie- en torsiedemper) voor de modellering van de grond demping nauwkeurig bepaald kunnen worden. ●

LOGARITMISCH DECREMENT EN HALF POWER BANDWIDTH METHODE

Er zijn verschillende analysemethoden om de demping van een constructie te bepalen op basis van meetdata. Hier worden een paar van deze methoden kort toegelicht.

De logaritmisch decrement methode is gebaseerd op de verhouding van twee opeenvolgende pieken van een gedempt trillings signaal (fig. 12). Hiermee kan het logaritmisch decrement worden bepaald:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{a(t)}{a(t+nT)}$$

waarin:

δ is het logaritmisch decrement

n is het aantal beschouwde pieken

$a(t)$ is de amplitude van de piek op tijdstip t

T is de trillingsperiode van het trillings signaal

De dempingsmaat D kan hieruit worden bepaald met $D = \delta / 2\pi$.

De half power bandwidth methode bepaalt de demping op basis van het vermogens spectrum van een gemeten trillings signaal (fig. 13). De piek in dit spectrum geeft de eerste eigenfrequentie van het gebouw. De demping bij deze eigenfrequentie kan worden bepaald door de grootte van de piek te delen door wortel 2. Bij deze waarde wordt een frequentie bereik df bepaald. De demping wordt nu gegeven door:

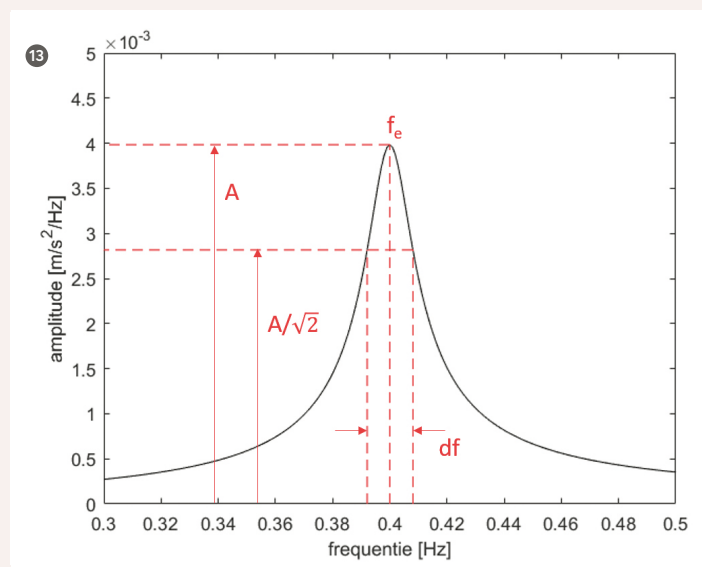
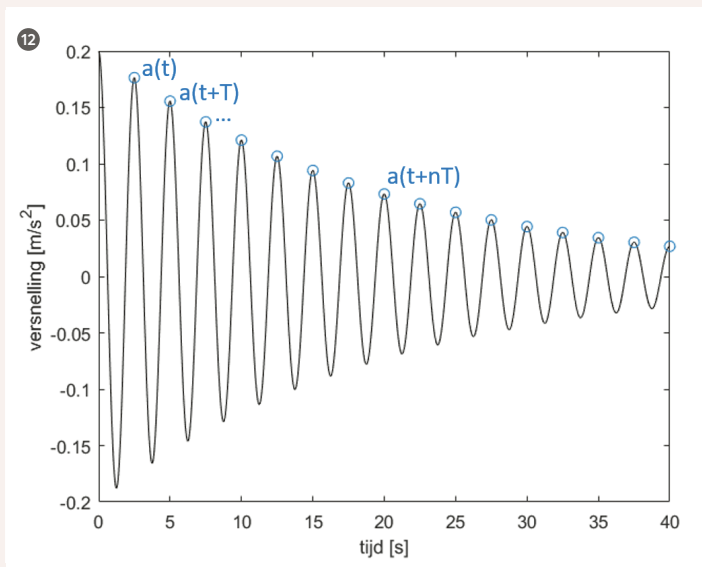
$$D = df / 2f_e$$

waarin:

D is de dempingsmaat

df is het frequentie bereik

f_e is de eigenfrequentie



LITERATUUR

- 1 Gomez, S.S., Energy flux method for identification of damping in high-rise buildings subject to wind, PhD thesis, Technische Universiteit Delft, 2019.
- 2 Bronkhorst, A.J., van Bentum, C.A., Gomez, S.S., Wind-induced vibrations and damping in high-rise buildings, TNO 2018 R10644, 2018.
- 3 Bronkhorst, A.J., Geurts, C.P.W., Slappe ondergrond dempt trillingen hoogbouw, *Bouwen met Staal*, 40-44, 2018.
- 4 Jeary, A.P., Designer's guide to the dynamic res-

- ponse of structures, 1st edition, Cambridge University Press, 1997.
- 5 Tamura, Y., Satake, N., Suda, K., Arakawa, T., Sasaki, A., Damping evaluation using full-scale data of buildings in Japan, *Journal of Structural Engineering*, 129, 4, ASCE, 470-477, 2018.
- 6 Gomez, S.S., Metrikine, A., Carboni, B., Lacarbonara, W., Identification of energy dissipation in structural joints by means of the energy flow analysis, *Journal of Vibration and Acoustics*, 140, 1, 2017.

- 7 Gomez, S.S., Metrikine, A., The energy flow analysis as a tool for identification of damping in tall buildings subjected to wind: Contributions of the foundation and the building structure, *Journal of Vibration and Acoustics*, 141, 1, 2018.
- 8 Talib, I., Verification of the energy flow analysis method as identification tool for damping in high-rise buildings, MSc thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2019.