

## PRAKTISCHE REKENTOOL VOOR TRILLINGSARME GEBOUWCONSTRUCTIES

IN DE RUBRIEK TOPTALENT BELICHT BOUWWERELD RECENTE INNOVATIEVE AFSTUDEERONDERZOEKEN DIE ZEER HOOG ZIJN GEWAARDEERD. IN DEZE EDITIE HET ONDERZOEK VAN GERWIN SCHUT NAAR COMPLEXE DYNAMISCHE ONTWERPBEREKENINGEN VAN GEBOUWCONSTRUCTIES. SCHUT STUDEERDE IN OKTOBER 2019 AF AAN DE TU DELFT, CIVIELE TECHNIEK, ZIJN SCRIPTIE IS GEWAARDEERD MET EEN 9.

**TEKST EN BEELD** IR. GERWIN SCHUT



**Gerwin Schut was eerder constructeur bij Pieters Bouwtechniek te Delft. Hij is nu werkzaam als constructeur Ondergrondse Infrastructuur bij Witteveen+Bos in Amsterdam.**

**D**oor steeds verdere verfijning in wetenschappelijk onderzoek worden onder andere medicijnen beter en computerchips sneller. Hiervoor is geavanceerde apparatuur nodig waarmee op micro- en nanoschaal gewerkt kan worden. De geringste trilling zorgt voor ruis in of zelfs onbruikbaarheid van de resultaten. Trillingen worden veroorzaakt door verschillende bronnen, zoals auto's, wind, of mensen die in het gebouw lopen.

Onderzoeksapparatuur heeft vaak al ingebouwde trillingisolators. Ook bestaan er trillingisolerende eilanden of platen waarop de apparatuur geplaatst kan worden. Toch zijn die trillingreducerende ingrepen niet altijd afdoende voor dergelijk trillingsgevoelig onderzoek. Daarom dient ook de gebouwconstructie trillingsarm te zijn. Pieters Bouwtechniek is een constructief adviesbureau dat constructies ontwerpt en uitwerkt, ook voor onderzoeksgebouwen. Hun wens is te beschikken over een praktische ontwerptool voor gebruik in de beginfase van een constructief ontwerp (voordat zware 3D eindige-element-methodeberekeningen worden gebruikt). Pieters heeft dit afstudeeronderzoek aan de TU Delft geïnitieerd. Dit artikel geeft een zeer beknopte beschrijving van de gehele masterscriptie, die kan worden geraadpleegd via [repository.tudelft.nl](https://repository.tudelft.nl).

### SCOPE

Voor het onderzoek bleek één type trillingsbron maatgevend voor trillingsarme vloeren binnen een gebouw: passerend zwaar wegverkeer buiten het gebouw. Een volgende aanname voor de tool is dat de gebouwconstructie zwaar en rigide wordt uitgevoerd met over het algemeen stijve verbindingen en relatief beperkte overspanningslengtes. Tevens is de tool specifiek ontwikkeld voor geologische locaties in het (noord)westen van Ne-

derland met een zachte bodemopbouw zoals Amsterdam.

Voor het voorspellen van het driedimensionaal trillingsveld in de bodem is gebruikgemaakt van de software FEMIX. EDDABuSgs (Early Design Dynamic Analysis of Building Structures by Gerwin Schut) is de ontwikkelde ontwerp-/rekentool (Excel input en Python rekensheets) en voorspelt het dynamische gedrag van de constructie (Figuur 1).

### METHODE EN RESULTATEN

Het probleem is opgedeeld in vier aan elkaar gerelateerde subonderdelen: de trillingsbron, de transmissie van de trilling door de grond, de interactie tussen de grondopbouw en de gebouwconstructie en de trillingontvangende gebouwconstructie. De resultaten zijn geverifieerd met metingen uit de praktijk. Er is onvoldoende informatie beschikbaar over metingen in Nederland, daarom zijn de resultaten geverifieerd aan het onderzoek van prof. Geert Degrande e.a. van de Katholieke Universiteit (KU) Leuven. Hun onderzoek betreft trillingen in de bodem en in gebouwen op locaties in België. Let wel, de aannames voor EDDABuSgs zijn gebaseerd op zachtere bodems dan die in België: het (noord)westen van Nederland, waarin trillingen voortplanten met over het algemeen langere golflengtes (waardoor de grondverplaatsingen over de lengte van het gebouw minder variëren).

### DE BRON VAN TRILLINGEN

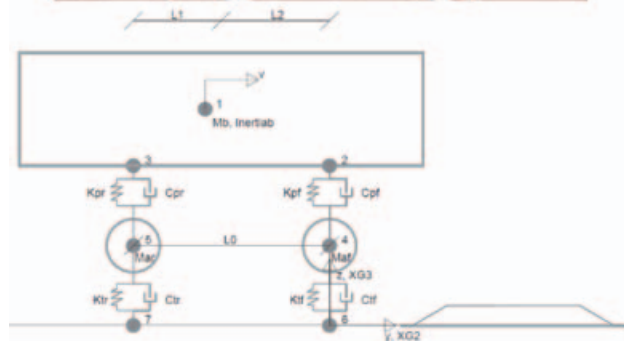
De trillingsbron in het verificatieproject bestaat uit een twee-assige vrachtwagen welke over een kunstmatige wegoneffenheden rijdt (Figuur 2). Het dynamische model van de vrachtwagen is in FEMIX geïmplementeerd als een vereenvoudigd 2D voertuigmodel.

De gegenereerde bewegende dynamische belasting is sterk afhankelijk van de dynamische eigenschappen van het voertuig (massa's, veerstijfheden en dempingwaarden). Ook de snelheid van het voertuig en de eigenschappen van de weg (oneffenheid) hebben grote invloed op de gegenereerde belasting. De pieken in de dynamische belasting geven het op- en afrijden van de oneffenheid aan en zijn vergelijkbaar met een impulsbelasting. De resultaten van FEMIX zijn gelijk aan de rekenresultaten uit het verificatieproject (Figuur 3).

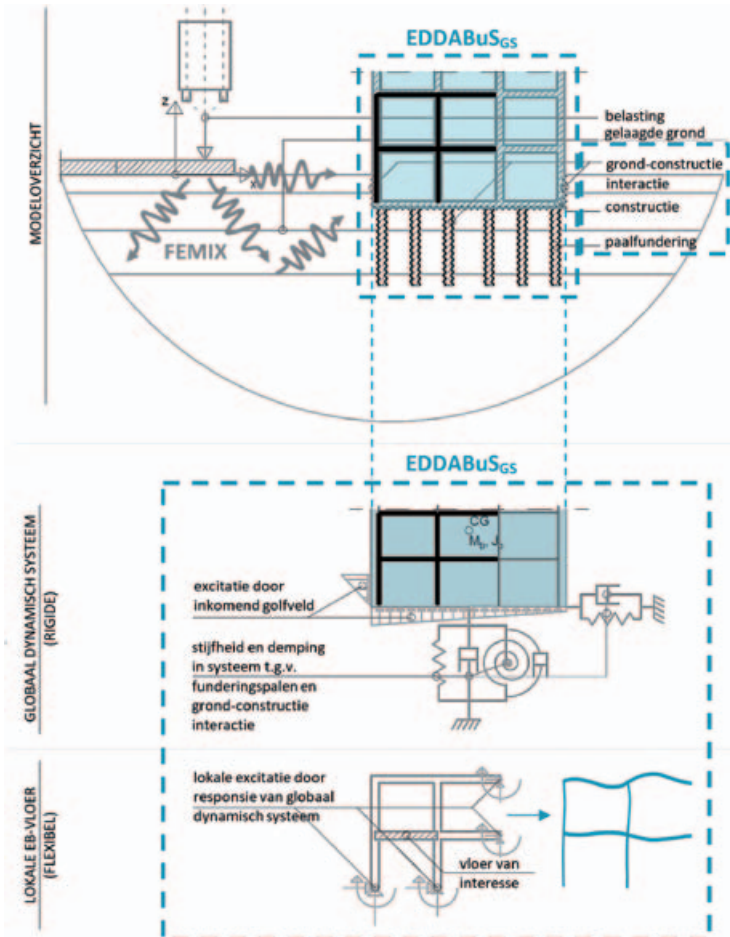
### TRANSMISSIE VAN DE TRILLINGEN

De bewegende dynamische belasting veroorzaakt trillingen in de bodemopbouw. De bodem is gemodelleerd met perfect horizontale grondlagen. Elke grondlaag heeft specifieke dynamische eigenschappen, zoals stijfheid, dichtheid, dempingsgraad en Poisson's ratio.

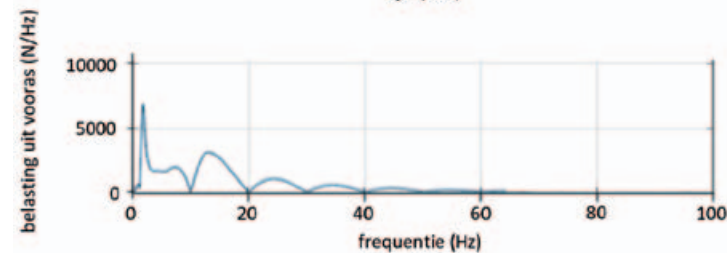
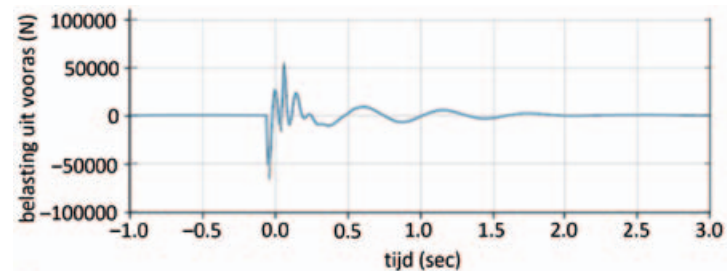
Een trillingsveld ten gevolge van een oppervlakte-impuls verspreidt zich in de vorm van halfbollen en oppervlaktegolven. Het trillingsveld bestaat uit allemaal verschillende trillingen die elk met een andere snelheid propageren. De grootste verplaatsingsenergie zit nabij de oppervlakte van de grondopbouw. Op de randen van iedere grondlaag zorgt het verschil in dynamische eigenschappen voor refractie en reflectie van een inkomende trilling (Figuur 4). Daarbij komt nog eens dat in werkelijkheid de



2. Voertuig, wegoneffenheid (plaatselijke hobbel met hoogte van circa 50 mm) en 2D dynamisch model van het verificatieproject.

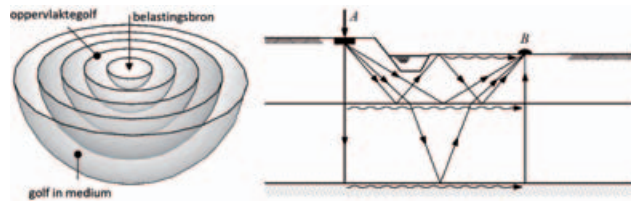


1. Onderscheid in FEMIX en EDDABuSgs en 2D-representatie van de constructie.



3. Vergelijk resultaten FEMIX (blauw) met verificatieproject (zwart) voor de gegenereerde dynamische belasting op het wegoppervlak. De zwarte lijn ligt nagenoeg geheel onder de blauwe lijn.

4. Bolvormige voortplanting van trillingen bij impulsbelasting (links) en reflectie en refractie van trillingen bij verschil in grondlagen (rechts).



## DIEPGAAND EN PRAKTISCH ONDERZOEK

Dynamische ontwerpberekeningen van gebouwconstructies zijn complex en tijdrovend. Dynamische belastingen worden daarom vaak omgerekend naar semi-statische equivalente belastingen. De eisen die aan de dynamische eigenschappen van gebouwen gesteld worden, worden echter steeds hoger. Hierbij is het dynamische gedrag van zowel de ondergrond als het gebouw van belang. Het voorliggende probleem is daarmee niet alleen complex, maar ook multidisciplinair. Er is in het ontwerpstadium van dergelijke gebouwen behoefte aan een ontwerptool, waarmee sneller dan nu een inschatting kan worden gemaakt van het te verwachten trillingsniveau en van de effectiviteit van mitigerende maatregelen. Gerwin Schut heeft zich de verschillende deelgebieden eigen gemaakt, en is erin geslaagd de verschillende aspecten van dit complexe, multidisciplinaire probleem te combineren in een model. Hierbij is rekening gehouden met de gelaagde bodemopbouw. Het model is gevalideerd door de uitkomsten te vergelijken met eerder door derden gedane praktijkmetingen. Het model heeft vervolgens nuttige ontwerpaanbevelingen opgeleverd, zowel voor gebouwen belast door verkeestrillingen in het algemeen, als voor een casestudie in het bijzonder.

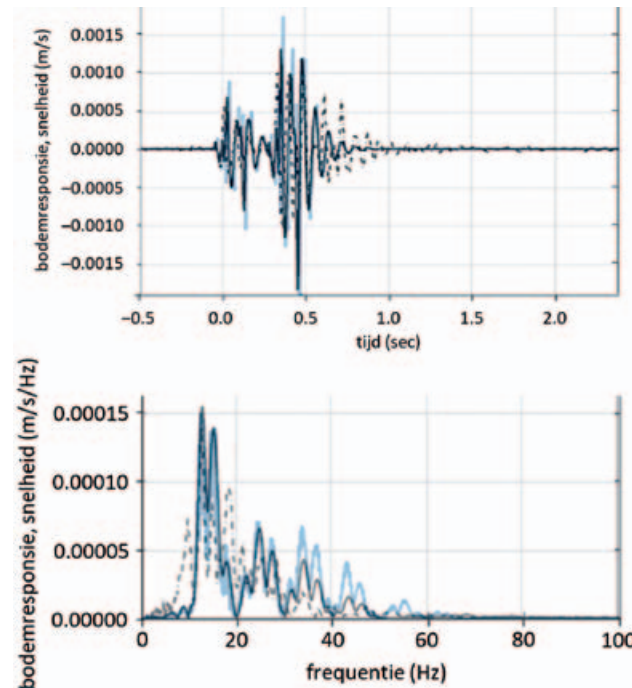
Het is de combinatie van verschillende disciplines, de kwaliteit, diepgang en de praktische toepasbaarheid van de resultaten waarvoor de afstudeercommissie grote waardering heeft. Het onderzoek heeft nieuwe kennis en inzichten opgeleverd.

*Afstudeercommissie TU Delft en Pieters Bouwtechniek: Rob Nijssse, João de Oliveira Barbosa, Sander Pasterkamp en Maarten Koekoek.*

bodemlagen nooit perfect horizontaal zijn. Dit alles maakt het voorspellen van het trillingsveld complex. Ondanks de onzekerheden in het modelleren komen de resultaten van FEMIX goed overeen met de metingen uit het verificatieproject (Figuur 5).

### BODEMCONSTRUCTIE INTERACTIE

Door de aanwezigheid van een constructie in of op de gelaagde bodemopbouw worden opnieuw refracties en reflecties van de trillingen veroorzaakt. De grondtrillingen nabij de constructie



5. Vergelijk resultaten FEMIX (blauw) met voorspelling verificatieproject (zwart, niet-onderbroken) en metingen verificatieproject (zwart, onderbroken) voor de trillingen in de bodem.

kunnen daardoor zowel geamplificeerd als gereduceerd worden. Daarnaast biedt de bodem weerstand aan het gebouw als deze in beweging wordt gebracht. Ook een paalfundering zorgt voor weerstand tegen de beweging van het gebouw. De weerstanden die de bodem en de paalfundering aan het gebouw bieden, worden gemodelleerd met veren en viskeuze dempers in de richting van alle vrijheidsgraden (Figuur 6).

### DE ONTVANGER VAN TRILLINGEN: DE GEBOUWCONSTRUCTIE

De trillingontvangende gebouwconstructie is versimpeld naar een symmetrische 2D-representatie van het gebouw (Figuur 6). Globaal gezien is het hele gebouw rigide en heeft daarom slechts drie vrijheidsgraden: horizontale en verticale translatie en rotatie. De excitatie op de constructie bestaat uit de tijdsafhankelijke bodemverplaatsingen nabij de constructie ten gevolge van het trillingsveld. De onbekende verplaatsingen van het globale gebouwstelsel worden door EDDABuSgs aan de hand van de bewegingsvergelijkingen opgelost.

Echter gelden de trillingseisen voor de lokale constructieonderdelen, zoals een vloer waarop de trillingsgevoelige apparatuur staat. Daarom wordt een extra stap gemaakt: een lokaal flexibel frame is gemodelleerd dat volledig is ingeklemd in de fundering van het



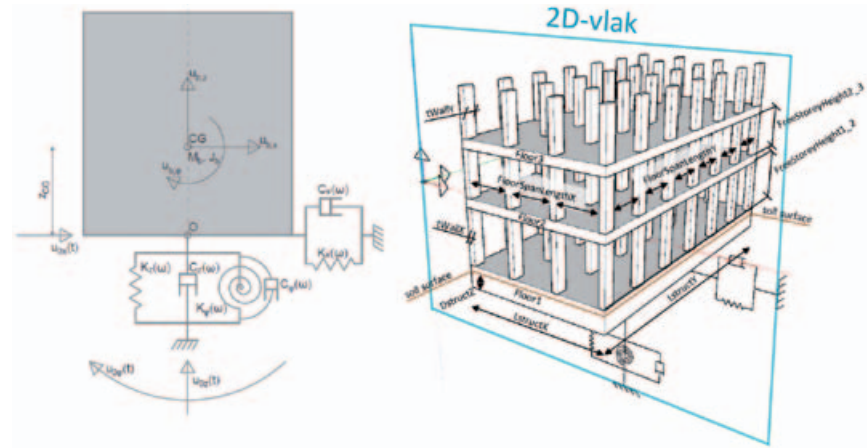
globale gebouw (Figuur 1). Het frame wordt daardoor geëxciteerd door het dynamische gedrag van de globale constructie.

Het gebouw in het Belgische verificatieproject leent zich niet ideaal voor EDDABuSgs, omdat het gebouw door zijn lengte, flexibele constructie en relatief stijve bodem niet als rigide geschematiseerd kan worden. Toch blijkt uit de vergelijking tussen de rekenresultaten van EDDABuSgs met de metingen uit het verificatieproject dat de trillingen in de vloer met relatief hoge nauwkeurigheid voorspeld kunnen worden (Figuur 7). De verwachting is dat de voorspellingen nog beter zullen zijn voor zware en rigide constructies in zachtere bodems.

**GEVOELIGHEIDSANALYSE**

Na verificatie is de tool gebruikt om een gevoeligheidsanalyse uit te voeren voor een fictieve betonnen trillingsarme gebouwconstructie in Amsterdam. Hieruit is onder andere gebleken dat het vergroten van de globale massa en demping van het gebouw gunstige effecten hebben op het reduceren van de trillingen in de vloer. Ook het verstijven van de lokale vloer heeft een gunstig effect.

In het algemeen resulteert een stijvere ondersteuning van het gebouw (bijv. meer funderingspalen) in een reductie van de trillingen in het gebouw. Echter is uit de analyse gebleken dat een stijvere ondersteuning ook een ongunstig effect kan hebben, namelijk wanneer de (verhoogde) eigenfrequenties van het gebouw dicht bij de fundamentele frequenties van de excitatie komen.

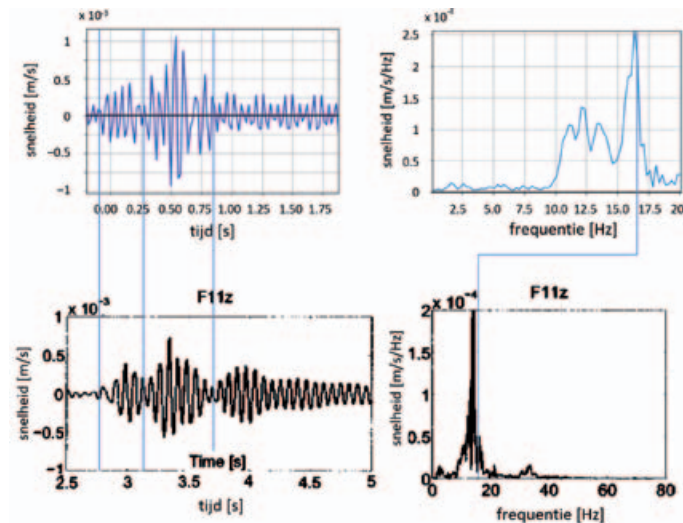
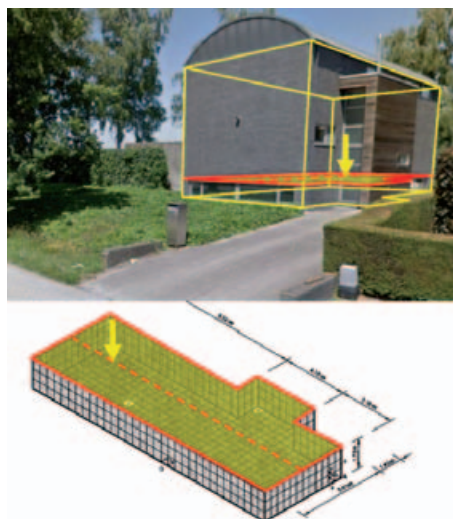


**CONCLUSIE**

Het eenvoudige tweedimensionale gebouwmodel in EDDABuSgs kan met een relatief korte rekentijd (circa 2 uur, waarvan slechts 24 minuten voor resultaten in het tijdsdomein ten opzichte van circa 1 week voor een zware EEM-berekening) betrouwbaar inzicht geven in het dynamische gedrag van gebouwconstructies waarin trillingsgevoelige werkzaamheden plaatsvinden.

Het onderzoek laat zien dat alleen bij een integrale beschouwing van de vier genoemde subonderdelen van het dynamische probleem, een betrouwbare voorspelling gedaan kan worden van het trillingsniveau van een trillingsarme vloer. Tevens kan geconcludeerd worden dat de juiste versimpelingen in een complex vraagstuk voor een specifieke situatie kunnen resulteren in een vergrote praktische inzetbaarheid van een tool. ■

**6. Dynamisch model van de constructie in een tweedimensionaal vlak in het gebouw.**



**7. Links: situatie gebouw verificatieproject België. Rechts: voorspelde vloertrilling door EDDABuSgs (blauw) en gemeten vloertrilling in het verificatieproject (zwart).**