
Bouwen langs het spoor

Inzicht in rekenmethoden en grond-constructie-interactie



Er wordt steeds vaker dicht op het spoor het gebouwd. Daarbij kunnen trillingen die worden veroorzaakt door treinverkeer, voor hinder zorgen in de nabijgelegen gebouwen. Om die overlast bij nieuwbouw te beperken moet hiermee in het ontwerp rekening worden gehouden, bijvoorbeeld door het toepassen van dikkere vloeren of het afveren van het gebouw. Er zijn verschillende rekenmethoden om de trillingen te voorspellen, maar de uitkomsten lopen erg uiteen. De vraag is waar deze verschillen vandaan komen en hoe deze kunnen worden verklaard. Dit is één van de vragen die zijn onderzocht in een afstudeeronderzoek.

Met de huidige trend in verstedelijking wordt bouwen langs het spoor steeds aantrekkelijker.

Dit is echter niet zonder obstakels. Onderzoek van het RIVM uit 2019 toont aan dat 20% van de mensen die binnen een straal van 300 m van het spoor wonen, ernstige hinder ervaart door de trillingen die worden veroorzaakt door reizigerstreinen. Maar liefst 40% van de omwonenden ervaart ernstige hinder door voorbijkomende goederentreinen [1]. Dit geeft de noodzaak aan om deze overlast te voorkomen bij nieuwbouw.

Het inschatten van het effect van deze trillingen is niet eenvoudig, vanwege het grote aantal parameters dat hierop van invloed is. Afhankelijk van de manier waarop de trillingen in gebouwen worden berekend, kunnen vergelijkbare situaties tot aanmerkelijk verschillende uitkomsten leiden, met grote consequenties voor de maatregelen en dus ook bouwkosten.

Om inzichtelijk te krijgen wat de oorzaak is van deze verschillen, zijn de spoortrillingen in een betonnen appartementengebouw met drie rekenmethoden berekend en vergeleken. In een vervolg zullen ook trillingsmetingen worden uitgevoerd voor en na de bouw van een betonnen appartementengebouw en worden de resultaten hiervan naast de berekende waardes gelegd. Hierop wordt in een vervolg artikel ingegaan.

auteurs



IR. MARICA DE WIT

Constructeur /
Afstudeerder
**BAM Advies &
Engineering / TU-Delft**



**IR. MARK
SPANENBURG RO**

Adviseur Constructies
BAM A&E



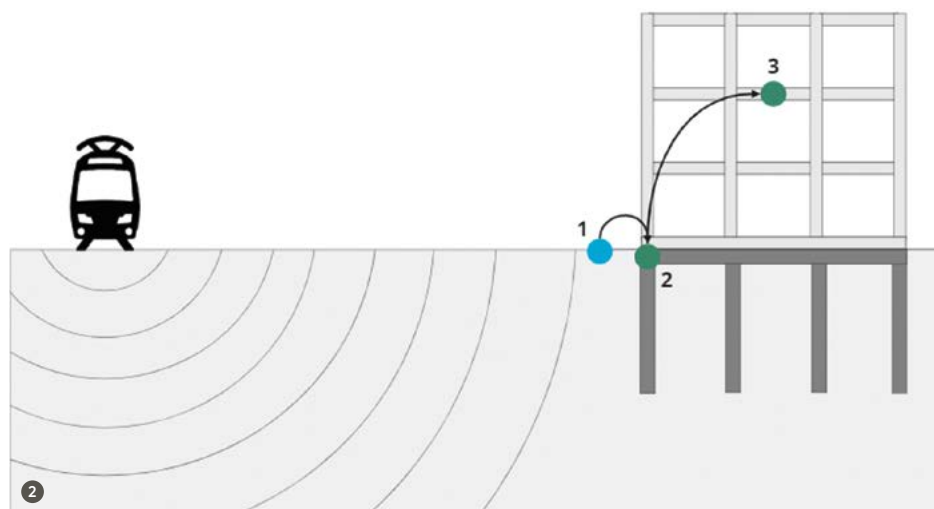
**ING. EDWIN DE
VRIES**

Adviseur Geluid en
Trillingen
Peutz

Spoortrillingen

Om te begrijpen wat het effect van spoortrillingen op omliggende gebouwen is, is het belangrijk om eerst uit te zoomen en het algehele systeem te begrijpen (fig. 2). Dit begint bij de bron, waar de trillingen worden gecreëerd: de trein en de spoorweg. Op dit punt zijn er meerdere parameters die de trillingssterktes en de frequenties waarbij deze optreden beïnvloeden. Denk bijvoorbeeld aan het type trein, de aanwezigheid van wissels of overwegen, de snelheid van de trein en of het gaat om een tunnel of een spoorbaan op maaiveld [2]. Vervolgens bewegen de trillingen zich voort als golven door de bodem. Ook hier worden de trillingen beïnvloed, ditmaal door de grondeigenschappen. Een belangrijke factor is daarom ook de afstand van het gebouw tot het spoor, waarbij bij grotere afstanden de trillingen meer worden gereduceerd. Dit effect is vergelijkbaar met de demping van een golf in een vijver waar een steentje in is gegooid, waarbij de golven afzwakken naarmate ze zich verder van de bron af bewegen.

Nadat de golven zich door de ondergrond hebben verplaatst, komen ze aan bij het gebouw, waar ze voor zowel horizontale als verticale trillingen zorgen (punt 1 in fig. 2). De trilling in de grond wordt vervolgens overgedragen naar de fundering van het gebouw, van punt 1 naar punt 2 in figuur 2. →



Deze overdracht zorgt ook voor een demping van de trillingen, wat in literatuur vaak het *kinematische effect* wordt genoemd. De fundering vereffent door zijn stijfheid de golfbeweging in de grond. Hierdoor is de trillingssterkte van een punt op de fundering lager dan die van een punt in het vrije veld (fig. 3).

Vanuit de fundering wordt de trilling binnen het gebouw doorgegeven naar de vloeren, in figuur 2 van punt 2 naar punt 3. Dit zorgt veelal voor een versterking van de trillingen, met name wanneer de frequenties van de spoortrillingen samenvallen met eigenfrequenties van de constructie, zoals de vloeren en wanden, waardoor resonantie optreedt.

Een belangrijk aspect bij de gebouwtrillingen is de demping van de grond op de trillingen in het gebouw. Dit wordt het *traag-*

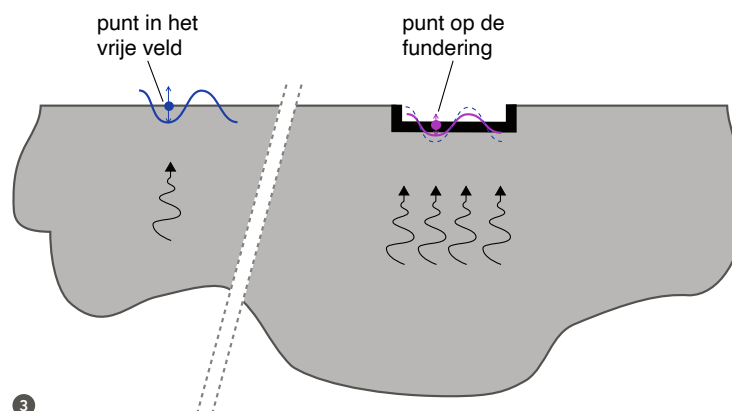
heidseffect genoemd en is vooral afhankelijk van de massa van het gebouw, de fundering en de grondsoort.

Het totale effect van de interactie tussen het gebouw en de grond kan dus worden verklaard door het kinematische effect en het traagheidseffect. In het Nederlands wordt de combinatie van deze twee effecten de *grond-constructie-interactie* genoemd en in het Engels *soil-structure interaction* (SSI). Deze grond-constructie-interactie heeft een belangrijk effect op de trillingen in het gebouw. Verschillende studies laten zien dat het buiten beschouwing laten van de grond-constructie-interactie kan zorgen voor een significante overschatting van de trillingen die uiteindelijk in het gebouw worden doorgegeven [3, 4].

Anders dan bij trillingen door wind en aardbevingen, zijn bij spoortrillingen de verticale

AFSTUDEERONDERZOEK

Dit artikel is gebaseerd op de afstudeerstudie 'The Effect of Railway-Induced Vibrations on Timber Apartment Buildings' dat Marica de Wit uitvoerde op de TU Delft, faculteit Civil Engineering & Geosciences, in samenwerking met BAM Advies & Engineering. Zij werd voor haar onderzoek begeleid door dr.ir. G.J.P. Ravenshorst (voorzitter), ir. M. Spanenburg RO (begeleider BAM), dr.ir. M. Mirra en dr.ir. P.C.J. Hoogenboom.



Of trillingen voor overlast zorgen, kan worden getoetst aan de SBR-B-richtlijn

componenten bijna altijd maatgevend [5, 6 en 7]. Dit komt enerzijds doordat de gevonden trillingssterktes normaliter hoger zijn in verticale richting en anderzijds doordat deze trillingen gemakkelijker worden overgedragen naar de fundering. In dit artikel wordt daarom alleen ingegaan op de verticale trillingen, maar in de praktijk moeten zowel de verticale als de horizontale trillingen worden onderzocht.

Eisen

Hoewel er geen wettelijke norm is voor het voorkomen van trillingshinder uit de ondergrond, wordt er bij nieuwbouw wel vaak vanuit de vergunningverlener gevraagd aan te tonen dat de spoortrillingen niet voor een (onaanvaardbaar) leefklimaat zorgen. Of de trillingen voelbaar zijn en voor overlast zorgen, kan worden getoetst aan de SBR-B-richtlijn [13]. Hierin worden specifieke waarden gegeven waaraan de berekende trillingsniveaus in het gebouw moeten voldoen. Deze trillingsniveaus worden uitgedrukt in $V_{\max}$. Dit is de trilsnelheid met een correctie op frequenties die minder goed zijn waar te nemen. $V_{\max}$ is dimensieloos.

Het stroomschema voor railverkeer voor het beoordelen van de trillingsniveaus is weergegeven in figuur 4. Er gelden twee streefwaardes voor $V_{\max}$, een onderste, A1, en een bovenste, A2. Voor nieuwbouw is A1 gelijk aan 0,1 en voor bestaande bouw 0,2 (dag en nacht). A2 is voor nieuwbouw gelijk aan 0,4 overdag en 0,2 in de nacht en voor bestaande bouw respectievelijk 0,8 overdag en 0,4 in de nacht.

Wanneer de gevonden $V_{\max}$ waardes niet voldoen aan de A1-waarde maar wel onder de A2-waarde blijven, moet ook V_{per} worden

getoetst. V_{per} is de gemiddelde trillingsterkte over een beoordelingsperiode en moet onder de streefwaarde A3 uitkomen. Voor nieuwbouw is A3 gelijk aan 0,05 en voor bestaande gebouwen moet deze waarde onder de grens van 0,1 blijven (dag en nacht). Als er in de praktijk aan A2 wordt voldaan, dan voldoet V_{per} in de meeste gevallen ook.

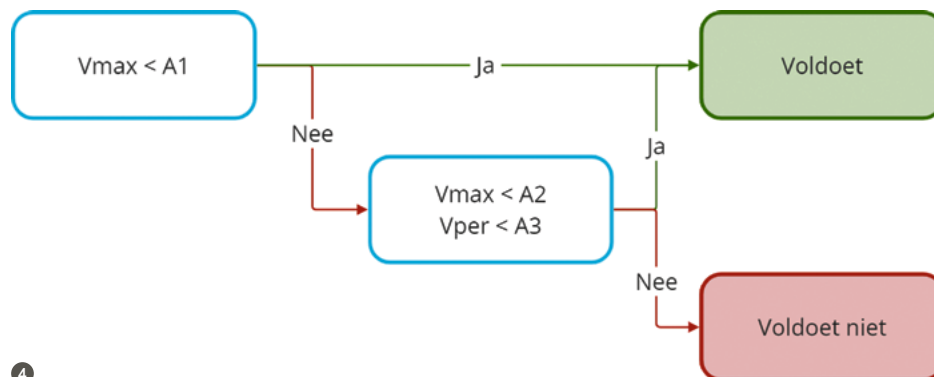
Onderzoek en methode

Er zijn verschillende manieren om de effecten van spoortrillingen bij appartementengebouwen te modelleren. Grofweg kan de volgende onderverdeling worden gemaakt:

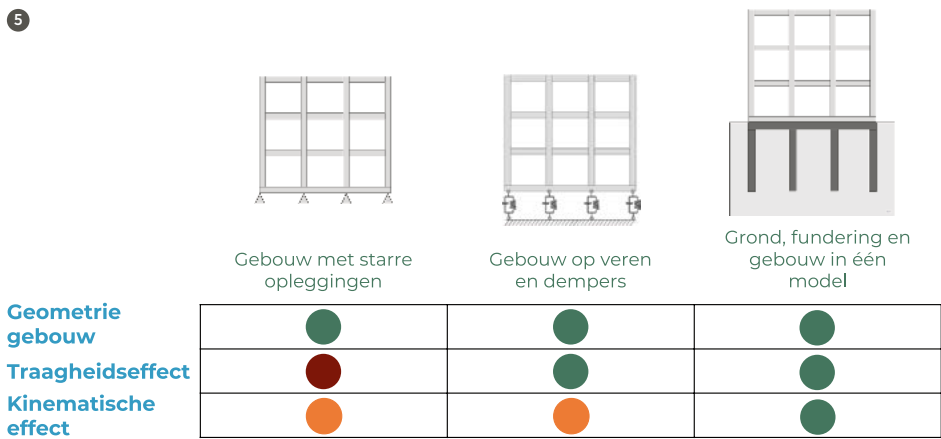
- 1 gebouw met starre opleggingen;
- 2 gebouw met grond als veren en dempers;
- 3 grond, fundering en gebouw in één model.

In de praktijk wordt voor alle drie de manieren vaak gebruikgemaakt van de eindigeelementenmethode (EEM). Het meest eenvoudige is om het gebouw te modelleren met starre opleggingen (1). De grond en fundering worden dan niet expliciet meegenomen in de berekening en in dit type model wordt het eerder genoemde traagheidseffect dus ook niet berekend. Om het traagheidseffect wel mee te nemen, is het mogelijk om het gebouw te modelleren met veren en dempers als opleggingen, die de grond en het funderingssysteem representeren (2). Het voordeel hiervan is dat niet de volledige grond hoeft te worden gemodelleerd, wat de rekentijd significant omlaag brengt. Beide modellen nemen het kinematische effect niet mee, maar dit kan indien nodig wel in een los model worden berekend.

Het laatste type model is een model waarin de grond, fundering en het ge- →



De overdrachtsfuncties zouden hetzelfde moeten zijn voor alle drie de cases, maar de resultaten liggen ver uit elkaar



bouw expliciet worden gemodelleerd (3). Hierin worden zowel het kinematische effect als het traagheidseffect in één model meegenomen. Doordat dit laatste type model het meest gedetailleerd, complex en groot is, heeft het ook een aanzienlijk langere reken-tijd in vergelijking tot beide andere model-len. Vooral in de initiële ontwerpfase is dit niet altijd wenselijk. Wijzigingen in het ont-werp doorvoeren in dit type model is name-lijk kostbaar. Een overzicht van alle drie deze methoden is weergegeven in figuur 5.

Impedantiemethode van Auersch

Een andere manier om de overdracht van spoortrillingen in gebouwen te berekenen dan de eindige-elementenmethode, is door gebruik te maken van een analytisch model – dus op basis van formules – zoals het im-pedantiemodel van Auersch [8]. Dit model is gebaseerd op de impedantiemethode die in de dynamica wordt toegepast voor akoestiek en elektromagnetisme [9].

In de context van spoortrillingen be-schrijft de impedantie de weerstand die de trillingsgolven ondervinden wanneer deze zich door de constructieonderdelen ver-plaatsen. De methode is gevalideerd speci-fiek voor spoortrillingen met behulp van testen en door de vergelijking te maken met de resultaten uit een gedetailleerder eindige-elementenmodel.

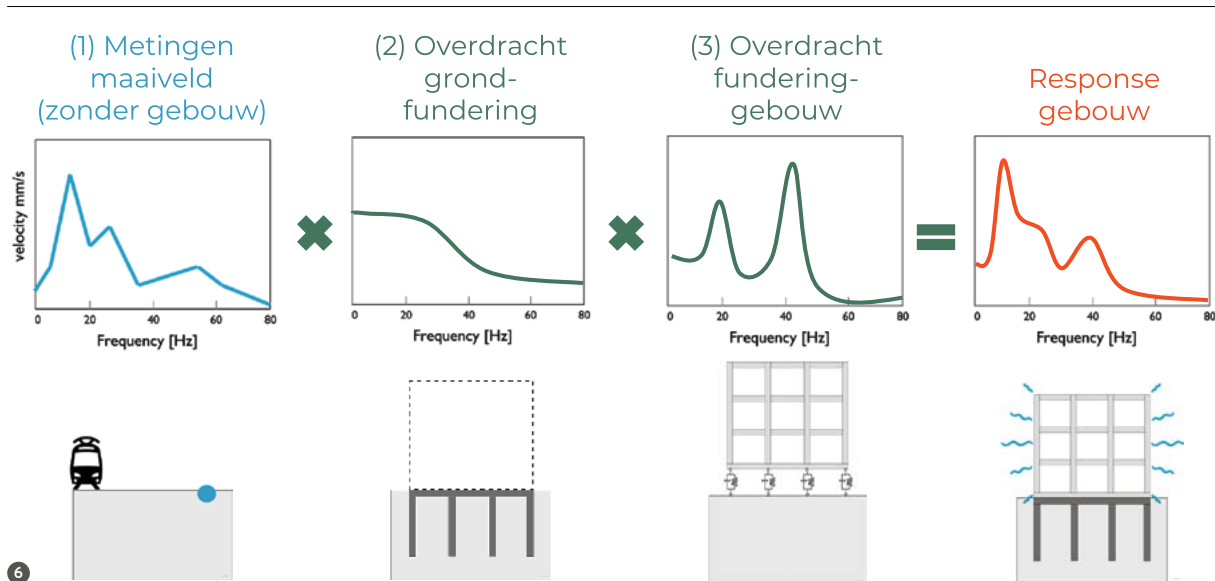
De impedantiemethode bestaat uit het (analytisch) bepalen van de overdrachts-functies per onderdeel en deze met elkaar te vermenigvuldigen om de uiteindelijke gebouwrespons te berekenen. Een over-

drachtsfunctie beschrijft hoe een trilling bij verschillende frequenties wordt overgedra-gen van het ene element naar het volgende element. Bijvoorbeeld van fundering naar begane grondvloer, of wand naar verdie-pingsvloer.

Om de trillingsniveaus in een nog te realiseren gebouw te bepalen met de impe-dantiemethode, zijn er drie stappen die moeten worden doorlopen (net als in fig. 2). Deze stappen zijn weergegeven in figuur 6. De eerste stap is het bepalen van de trillin-gen op het maaiveld, door middel van me-tingen of berekeningen. Vervolgens worden de trillingen op maaiveld vertaald naar tril-lingen op de fundering, oftewel het kinema-tische grond-gebouweffect. De laatste stap bestaat uit het bepalen van de overdracht in het gebouw, waarbij in dit model de grond en fundering worden meegenomen als ve-ren en dempers, rekening houdend met het traagheidseffect van de grond-gebouwinter-actie. Iedere stap wordt uitgedrukt in een overdrachtsfunctie, die uiteindelijk met elkaar worden vermenigvuldigd om de ge-bouwrespons te bepalen. Dit resulteert in trillingsniveaus in het gebouw die kunnen worden getoetst aan de waardes uit de SBR-B-richtlijn.

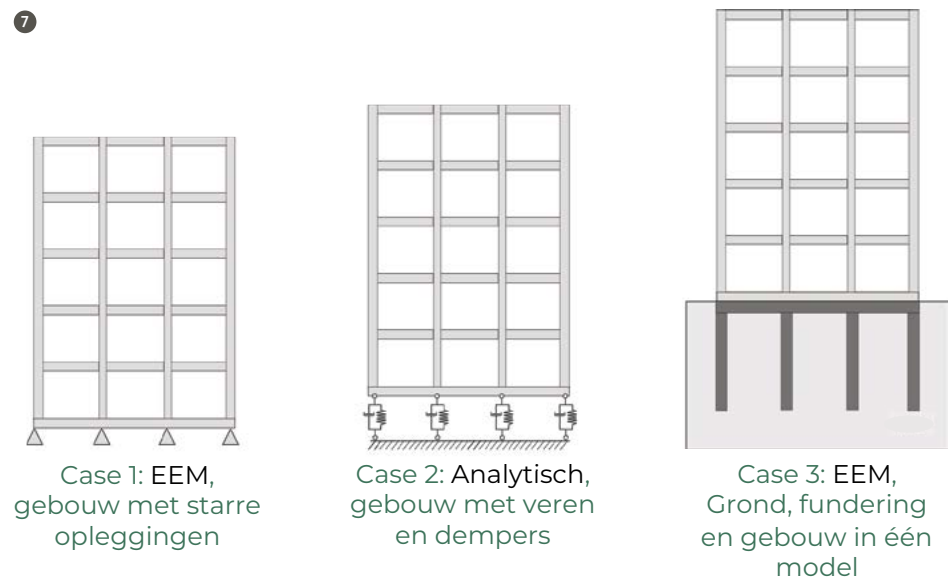
Case studies beton

Om de verschillen tussen de rekenmethoden inzichtelijk te maken, zijn drie cases (van hetzelfde gebouw) met elkaar vergeleken. De eerste case gebruikt een eindige-elementen-model voor de bovenbouw met starre opleg-gingen, waarin het traagheidseffect van de



grond niet wordt meegenomen (manier 1 zoals genoemd onder ‘Onderzoek en methode’). Het kinematische effect wordt met behulp van een grove inschatting in rekening gebracht. De tweede case is het analytische impedantiemodel, waarin de grond en de fundering als veren en dempers onder het gebouw worden gerepresenteerd. Het traagheidseffect wordt hier dus in meegenomen en het kinematische effect wordt hier door middel van een overdrachtsfunctie ingeschat. De derde case is het meest gedetailleerd en bestaat uit een eindige-elementenmodel waarin naast het gebouw de volledige

grond rondom het gebouw tot aan het spoor is gemodelleerd, inclusief de fundering (manier 3 zoals genoemd onder ‘Onderzoek en methode’). Hierin is dus zowel het kinematische als het traagheidseffect verwerkt. In figuur 7 zijn de drie cases weergegeven. Voor case 1 en 3 zijn de resultaten gebruikt van twee daadwerkelijke projecten, waarvan de gebouwkenmerken en grondopbouw overeenkomen. Voor het analytische impedantiemodel (case 2) zijn dezelfde grondopbouw en gebouwkenmerken als case 1 aangehouden. Het beschouwde gebouw bestaat uit vijf verdiepingen en een paalfun- →



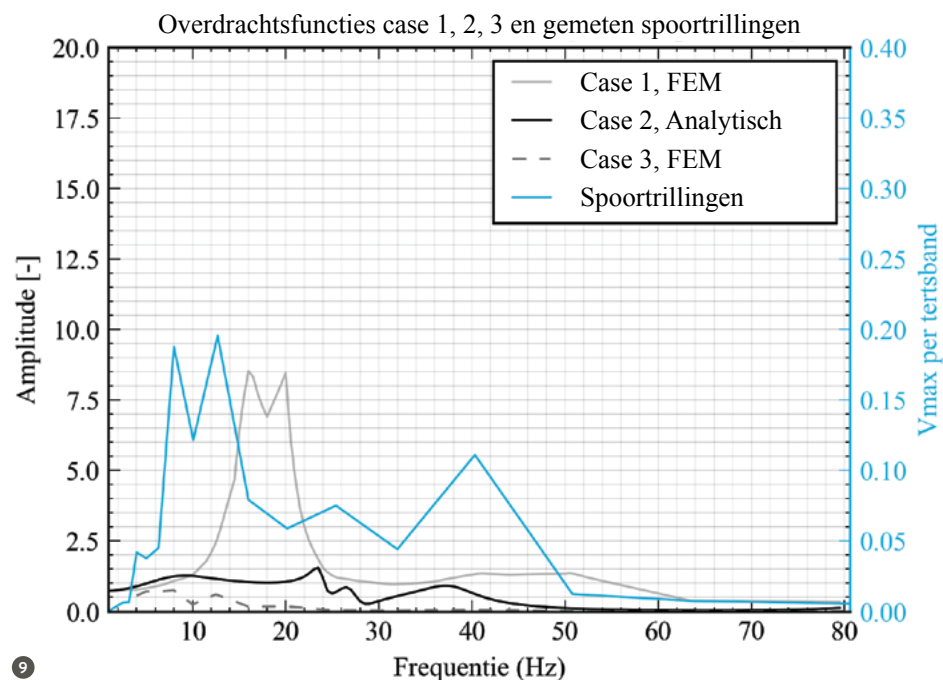
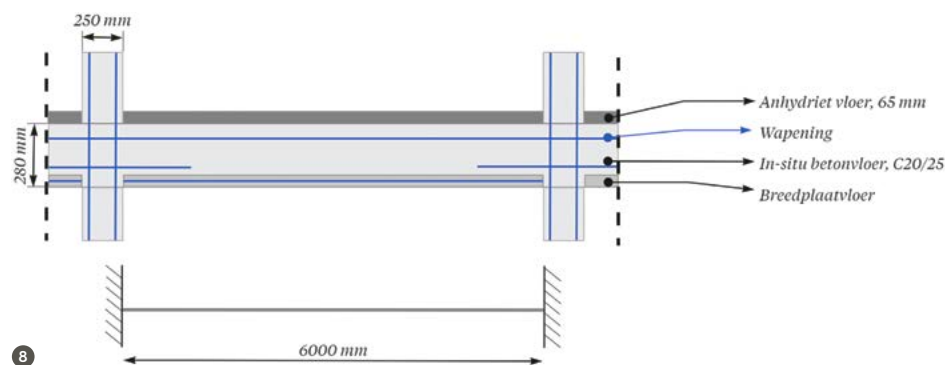
De exacte rol van de grond-constructie-interactie hangt af van drie onderdelen: de massa van het gebouw, de stijfheid van de grond en het type fundering

dering. In figuur 8 zijn de overige relevante gebouweigenschappen weergegeven.

Overdrachtsfunctie Voor alle drie de cases kan op dezelfde locaties in het gebouw de overdrachtsfunctie worden bepaald. Bij een EEM-model wordt de overdrachtsfunctie numeriek berekend en bij de impedantie-methode analytisch. Deze zouden hetzelfde moeten zijn voor alle drie de cases, het zijn immers identieke gebouwen, met eenzelfde fundering en grondopbouw. In figuur 9 is de overdrachtsfunctie van de grond naar de hoogste verdiepingvloer voor elk van de rekenmethoden weergegeven. Tegen de verwachtingen in liggen de resultaten ver uit elkaar. De overdrachtsfunctie is een karakteristiek voor het gebouw en onafhankelijk

van type, zwaarte of frequentie van de gemeten spoortrillingen op de desbetreffende locatie. Het verschil kan dus enkel voortkomen uit het verschil in rekenmethode, niet uit de locatie. De manier waarop de grond-gebouwinteractie wordt meegenomen heeft een significant effect op de uitkomsten.

Case 1, bestaand uit het eindige-elementen-model met het gebouw met starre ondersteuning, resulteert in een substantieel hogere overdrachtsfunctie in vergelijking met de andere twee methoden. Het verschil met de andere twee cases is dat bij case 1 het traagheidseffect niet is meegenomen. Door methode 1 naast de resultaten van methode 2 en 3 te leggen, wordt duidelijk hoeveel effect de gronddemping voortkomend uit het traagheidseffect heeft op de over-



dracht van de spoortrillingen. De laagste overdrachtsfunctie wordt gevonden met methode 3. Het grond-constructie-effect wat hier gedetailleerder in is meegenomen ten opzichte van de analytische methode 2 zorgt voor een nog verdere demping van de door-gave van de trillingen.

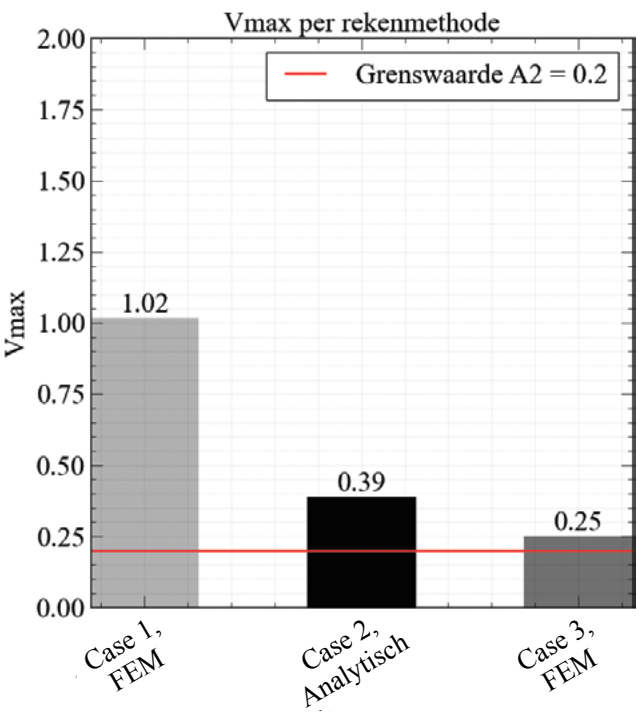
Beoordeling $V_{\max}$ Voor de verschillende cases zijn de waarden van $V_{\max}$ berekend uitgaande van hetzelfde gemeten spectrum op maaiveld (blauwe lijn in figuur 9). In figuur 10 staan de berekende $V_{\max}$ -waarden gegeven. Zoals beschreven is de grenswaarde A2 0,2 voor nieuwbouw en 0,4 voor bestaande bouw. Case 3 voldoet bijna aan de nieuwbouweis, case 2 voldoet niet aan de nieuwbouweis maar wel aan de eis voor bestaande bouw, terwijl case 1 ver buiten beide grenswaardes valt.

Maatregelen

Bij de uitkomsten van case 3 zijn relatief eenvoudige maatregelen, zoals het verzwaren of verstijven van de fundering, voldoende om de trillingsniveaus onder de streefwaardes van de SBR-richtlijn te brengen. Bij case 1 zijn de berekende $V_{\max}$ -waardes zo hoog dat afveren van het gebouw de enige

optie is. Afveren is een techniek waarbij er rubberen blokken of stalen veren worden geplaatst tussen het gebouw en de fundering om deze van elkaar te ontkoppelen. Dit zorgt ervoor dat de overdracht van trillingen bij dominante frequenties van het spoor wordt verminderd. Bij case 2 is afveren niet noodzakelijk, maar zijn er wel zwaardere maatregelen dan enkel het verzwaren of verstijven van de fundering nodig.

Voor hetzelfde gebouw zijn dus drie verschillende maatregelen nodig puur alleen op basis van de verschillende rekenmethoden. Dit is ook meteen van invloed op de bouwkosten, aangezien het afveren van het gebouw significant duurder is dan het enkel verzwaren van de fundering. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het zo nauwkeurig mogelijk meenemen van de grond-constructie-interactie essentieel is voor het inschatten van de trillingsniveaus ten gevolge van spoortrillingen. Het opzetten van een model zoals dat van case 3, waarbij zowel de omliggende grond en de fundering als het gebouw worden gemodelleerd, kan in de beginfase van het project voor hogere kosten zorgen, maar die kosten kunnen wegvallen bij de alternatief benodigde kosten voor duurdere trillingsverminderende maatregelen. →



LITERATUUR

- 1 Kamp, I. van, Kempen, E.E.M.M. van, Simon, S.N., Mabaja, N., Verheijen, E., Wijnen, H. van, Herhaalmeting Wonen langs het Spoor, RIVM-rapport 2021-0103.
- 2 Vos, P. deRailway induced vibration - State of the art report. In: International Union of Railways (november 2017) door Nick Craven and Linus Grob, p. 82.
- 3 Mott Macdonald Group et al. Simplified models to inform the base-isolation design of buildings. Tech. rep. 2023.
- 4 Talbot, J., Edirisinghe, T., Sanitate, G., The influence of foundation and building structures on ground-borne vibration: What we might expect and what we find in practice, july 2023.
- 5 Hanson, C.E., Towers, D.A., Meister, L.D., Transit Noise and Vibration Impact Assessment, 2006.
- 6 Edirisinghe, T., Talbot, J., Some observations on the transmission of ground-borne vibration into base-isolated buildings, september 2022.
- 7 Sanayei, M., Maurya, P., Moore, J.A., Measurement of building foundation and ground-borne vibrations due to surface trains and subways, 2013.
- 8 Auersch, L., Simple and fast prediction of train-induced track forces, ground and building vibrations. In: Railway Engineering Science 28.3 (sept. 2020), pp. 232–250.
- 9 Fahy, F., Walker, J., Advanced Applications in Acoustics, Noise and Vibration. Tech. rep. 2004.
- 10 Persson, N., Predicting railway-induced ground vibrations. Tech. rep. 2016.
- 11 Arnesson, M., Analysis and Estimation of Residential Vibration Exposure from Railway Traffic in Sweden. Tech. rep. 2016.
- 12 Huang, S., et al., Train-induced environmental vibrations by considering different building foundations along curved track. In: Transportation Geotechnics 35 (July 2022), p. 100785.
- 13 SBR richtlijn Meet- en beoordelingsrichtlijn voor trillingen:2013 - Deel B - Hinder voor personen in gebouwen.
- 14 Spanenburg, M., Dynamische belasting op tribunes (2). *Cement* 2023/1.
- 15 Jerath, M., Shibani, M.M., Dynamic stiffness and vibrations of reinforced concrete beams. *ACI Journal* maart-april 1985.

Hoewel het model van rekenmethode 3 theoretisch gezien het meest accuraat is, is het belangrijk om te checken of dit overeenkomt met de praktijk. Hoewel er voor de bouw van appartementencomplexen in de nabijheid van het spoor vaak metingen worden uitgevoerd op maaiveld als input voor de trillingsberekeningen, is er nauwelijks data beschikbaar van trillingsmetingen in gebouwen na de realisatie. Voor een vervolg op dit artikel zullen BAM en Peutz daarom trillingsmetingen uitvoeren voor- en na de realisatie van een betonnen appartementen-gebouw en de gevonden trillingsniveaus vergelijken met de berekende waarden van de drie rekenmethoden.

De rol van grond-constructie-interactie

De exacte rol van de grond-constructie-interactie hangt af van drie onderdelen:

- de massa van het gebouw;
- de stijfheid van de grond;
- het type fundering.

Het beschouwde betonnen appartementen-gebouw heeft een hoge massa, waardoor de grond door het traagheidseffect voor veel demping zorgt. Dit effect neemt sterk af bij lichtere gebouwen, zoals stalen of houten gebouwen, wat kan resulteren in meer door-gave van de spoortrillingen en dus hogere trillingsniveaus in het gebouw. Het is daarom vooral bij dit type constructies van belang om vroeg in het ontwerpproces een zorgvuldige berekening te maken.

Naast de massa van het gebouw heeft de stijfheid van de grond veel invloed op de trillingen en demping die optreedt ten gevolge van grond-constructie-interactie. Bij slappere gronden worden dichter bij het spoor hogere trillingsniveaus gevonden op het maaiveld, vooral in het lagere frequentiegebied van 0-20 Hz waar ook de eigenfrequenties van het gebouw voorkomen. Dit resulteert in een versterking van de trillingen in het gebouw. Aan de andere kant zorgt een slappere grond voor meer demping ten gevolge van het traagheidseffect en doven trillingen ook sneller uit met toenemende afstand van het spoor [10]. Daarom is het van belang om een duidelijk beeld te hebben van

de grondopbouw bij het inschatten van de spoortrillingen en dit zowel bij de berekening van het kinematische effect als het traagheidseffect in beschouwing te nemen.

Het type fundering is een factor die zowel het kinematische als het traagheidseffect beïnvloedt. Uit verschillend onderzoek [11 en 12] blijkt een paalfundering voor meer demping van de spoortrillingen te zorgen dan een fundering op staal. Over het algemeen geldt dat de trillingen meer afnemen bij zwaardere funderingen dan lichtere funderingen.

De rol van de E-modulus van beton

Een ander belangrijk aandachtspunt bij het rekenen met trillingen aan betonnen gebouwen is de E-modulus die in rekening wordt gebracht. Deze is belangrijk voor de eigenfrequentie van de vloeren en is vaak hoger dan bij statische berekeningen wordt gehanteerd. Spoortrillingen zijn een kortdurend belastingeffect waardoor geen kruip optreedt. Daarnaast zijn de momenten in de vloer bij de quasi-blijvende combinatie (= belastingcombinatie voor het beoordelen van trillingen) veelal lager dan het scheurmoment, waardoor de vloer ongescheurd of zeer beperkt gescheurd is. Beide effecten zorgen voor een hogere E-modulus. Meer informatie hierover is te vinden in EC-2 artikel 7.4.3, het *Cement*-artikel 'Dynamische belasting op tribunes (2)' [14] en een *ACI Journal* uit 1985 [15]. Binnenkort wordt een artikel door Peutz hierover gepubliceerd in *Cement*.

Conclusie

De toenemende bouw van woningen dicht bij het spoor benadrukt de noodzaak van het uitvoeren van trillingsberekeningen in de ontwerpfase. Verschillende rekenmethoden laten echter uiteenlopende resultaten zien afhankelijk van de manier waarop de grond-constructie-interactie wordt meegenomen. Daaruit volgen ook significant verschillende maatregelen en daarbij horende bouwkosten. In een vervolgartikel worden deze rekenmethoden vergeleken met metingen in een gebouw, om te zien hoe de theorie zich tot de werkelijkheid verhoudt. ●