

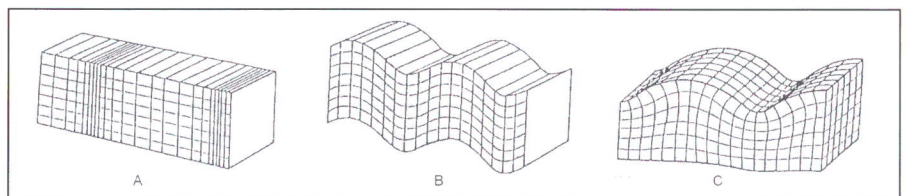
# Onderzoek naar trillingen in de bodem met behulp van Eindige Elementen Methode

**Trillingsproblemen worden steeds actueler. Zeker daar waar trillingsgevoelige objecten in toenemende mate dichterbij trillingsbronnen worden gesitueerd. Denk hierbij bijvoorbeeld aan woon- en kantoorbebouwing zeer nabij of zelfs boven spoorwegen of oprukkende woonbebouwing richting industriële omgevingen ('compacte-stad'-problematiek). Ook schaalvergroting van fabrieken en nieuwe machinerieën kunnen leiden tot hogere trillingsniveaus in de omgeving.**

Félippe van Eekhout en Ferry Koopmans

Mogelijke trillingsisolerende voorzieningen, zowel bij de bron, in de overdracht als bij de ontvanger, zoals onder meer trillingsisolerende veren en matten, zijn reeds lang voorhanden. Ook diverse rekenmethoden en handboeken om de effectiviteit van eenvoudige voorzieningen te berekenen zijn in beginsel aanwezig. Maar voor de situaties waar trillingen zich door de bodem voortplanten waarbij ook de overdracht van trillingen naar complexe constructiedelen en gebouwen een belangrijke rol gaan spelen, zijn deze formules en handboeken vaak niet toereikend om een goede voorspelling te kunnen maken van de effectiviteit van trillingsisolerende voorzieningen. Zeker ook indien de trillingen in een breder frequentiegebied dienen te worden beschouwd. Mede dankzij de thans beschikbare reken capaciteit van moderne computers, bieden Eindige Elementen Methode (EEM) berekeningen hierin steeds vaker een uitkomst.

In onderhavig artikel zal na een beknopte theoretische uitleg, ingegaan worden op een tweetal sprekende praktijkvoorbeel-



FIGUUR 1: OVERZICHT VOORTPLANTING TRILLINGEN DOOR DE BODEM.

den waarbij voor complexe trillingsproblemen middels EEM-berekeningen, betrouwbare prognoses zijn gemaakt van de te verwachten trillingsniveaus en effectieve trillingsisolerende voorzieningen zijn gedimensioneerd.

## PRINCIPE VAN TRILLINGEN DOOR DE BODEM

Trillingen kunnen zich, afhankelijk van de belastingsituatie, op verschillende wijze door de bodem voortplanten. Zo zijn longitudinale golven, transversale golven en oppervlaktegolven te onderscheiden. Bij longitudinale golven trilt de bodem in de richting van de golfvoortplanting (zogenaamde drukgolven, zie figuur 1a). Bij transversale golven trilt het materiaal loodrecht op de richting van de golfvoortplanting (zogenaamde schuifgolven, zie figuur 1b). Daar de bodem een half oneindig medium betreft en de trillingsbronnen op of juist onder het maaiveld zijn gesitueerd, zullen in de bodem ook oppervlaktegolven optreden (zogenaamde Rayleigh-golven, zie figuur 1c).

Uit de figuren volgt duidelijk dat de vervormingen voor de verschillende golven anders zijn, waardoor tevens de voort-

plantingssnelheid van deze trillingsgolven zal verschillen. De voortplantingssnelheid voor de drukgolven ( $c_p$ ) volgt uit:

$$c_p = \sqrt{\frac{G \cdot 2(1 - \nu)}{\rho(1 - 2\nu)}}$$

en voor de schuifgolven ( $c_s$ ) uit:

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}}$$

waarbij:

$E$  = elasticiteitsmodulus in  $N/m^2$ ;  
 $G$  = afschuifmodulus in  $N/m^2$ ;  
 $\nu$  = Poissonratio (dwarscontractie);  
 $\rho$  = dichtheid van de bodem in  $kg/m^3$ .

Uit bovenstaande formules volgt eveneens dat de voortplantingssnelheden afhankelijk zijn van de bodemeigenschappen (stijfheid, dichtheid e.d.). In tabel 1 is ter illustratie een overzicht gegeven van een aantal bodemparameters en de bijbehorende voortplantingssnelheden, karakteristiek voor de regio Amsterdam. Te onderscheiden zijn de wat stijvere toplagen (laag 1 en 2), de slappe klei- en leemlagen (laag 3 tot en met 6) en de stijve zandlagen (7 en verder). Op de laatste lagen zijn de welbekende houten fundatiepalen uit Amsterdam gefundeerd.

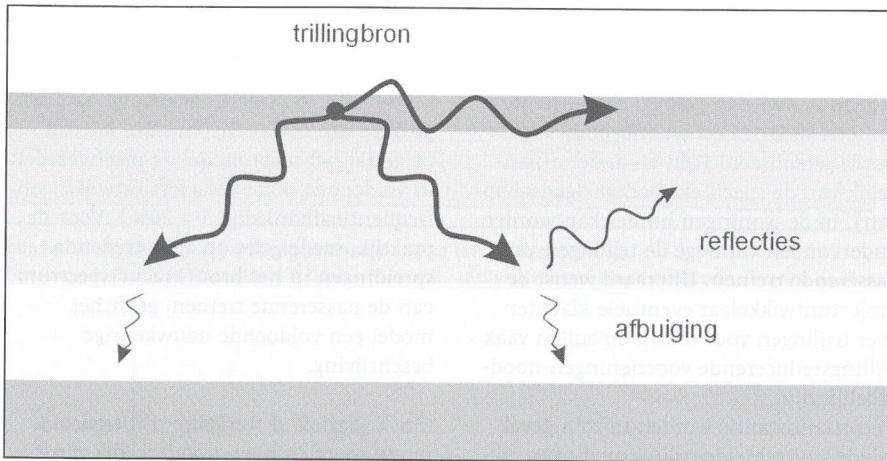
### Over de auteurs

Ir. F.C. van Eekhout is projectleider trillingstechniek bij Peutz B.V.  
Ir. J.F.W. Koopmans, adviseur en directeur bij Peutz B.V.  
[www.peutz.nl](http://www.peutz.nl)



Bodemlaag	Beginlaag t.o.v. NAP in m	Eindlaag t.o.v. NAP in m	Dichtheid E in kg/m <sup>3</sup>	Elasticiteit in MN/m <sup>2</sup>	C <sub>p</sub> in m/s	C <sub>s</sub> n m/s
1	+ 1	0	1560	42	189	101
2	0	- 2	1960	166	338	181
3	- 2	- 4	1960	14	346	48
4	- 4	- 7	1320	10	362	51
5	- 7	-10	1800	22	458	64
6	-10	-13	1640	11	335	47
7	-13	-16	1960	458	2000	280
8	-16	-19	1800	40	614	86
9	-19	-25	1960	319	1669	234

TABEL 1.



FIGUUR 2: TRILLINGSGEDRAG DOOR NIET HOMOGENE BODEM.

Bovendien is de bodem overduidelijk niet als een homogeen materiaal aan te merken, de diverse bodemlagen hebben zeer verschillende materiaaleigenschappen. Hierdoor zullen de trillingen zich op een complexe wijze in de bodem voortplanten. De trillingen kunnen bijvoorbeeld bij een overgang van de bodemlagen worden afgebogen en gereflecteerd. In figuur 2 is één en ander schematisch weergegeven. Bovendien is het trillingsgedrag in de bodem sterk frequentieafhankelijk; de golflengte van een trilling is namelijk het quotiënt van de golfsnelheid en de frequentie. Bij bepaalde frequenties zal de trilling in de bodem zich relatief makkelijk voortplanten. De frequentie waarop dit optreedt, wordt de voorkeursfrequentie genoemd. Indicatief kan worden aangegeven dat voor slappe kleilagen de voorkeursfrequentie ligt tussen de 5 en 25 Hz, voor stevige klei en zand en grind tussen de 15 en 40 Hz en voor stevige steenachtige bodemlagen hoger dan 30 Hz.

#### PRINCIPE VAN DE EINDIGE ELEMENTEN METHODE

Om de trillingsniveaus via de bodem in de constructies te bepalen, kan gebruikgemaakt worden van de Eindige Elementen Methode (EEM). Het principe van EEM is dat een (complex) mechanisch/dynamisch systeem kan worden benaderd met behulp van een groot aantal (kleine) elementen, waarvan de eigenschappen volledig bekend zijn. Met behulp van deze elementen, samen met de belastingeigen-

senschappen en de randvoorwaarden op het systeem, kan deze set van bewegingsvergelijkingen voor het gehele systeem als volgt worden opgesteld:

$$[M] \cdot \{a\} + [C] \cdot \{v\} + [K] \cdot \{u\} = \{F(t)\}$$

waarbij:

- [M] = massamatrix;
- [C] = dempingmatrix;
- [K] = stijfheidmatrix;
- {F(t)} = tijdafhankelijke belasting/kraftvector;
- {a} = vector met versnellingen in knooppunten;
- {v} = vector met snelheden in knooppunten;
- {u} = vector met verplaatsingen in knooppunten.

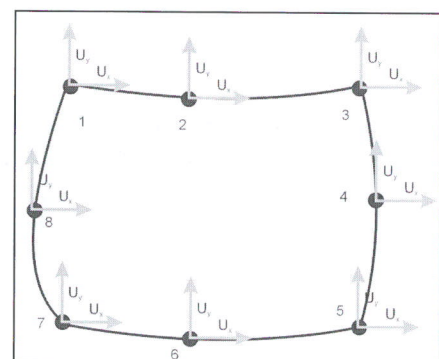
Op basis van deze set van bewegingsvergelijkingen kan het mechanische/dynamische gedrag van het systeem worden bepaald.

Bij de EEM-modellering wordt gebruikgemaakt van een tweetal elementtypen. De diverse bodemlagen en gebouw(del)en worden opgebouwd met behulp van zogenaamde bulkelementen (elementen met acht knooppunten, zie figuur 3). De bodemranden worden met behulp van veer-demperelementen opgebouwd. Door het toevoegen van deze veer-demperelementen aan de randen van het rekenmodel, met zeer specifieke, bodemlaaggerelateerde materiaaleigenschappen, kan een

halfoneindig medium worden beschreven met behulp van een eindig rekenmodel (zgn. randvoorwaarden).

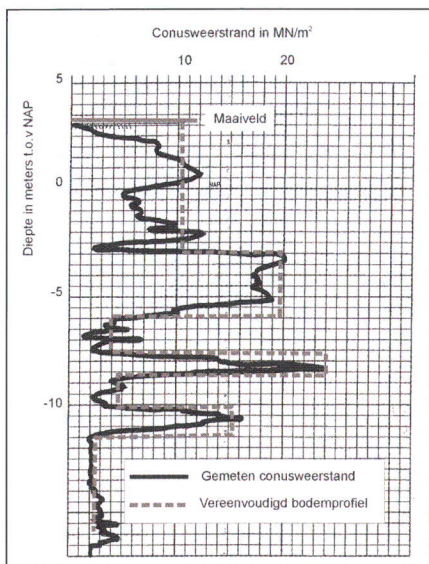
De meeste trillingsproblemen kunnen voldoende nauwkeurig worden gemodelleerd met behulp van een tweedimensionaal (plain-strain) EEM-rekenmodel. Eventuele discontinuïteiten in bijvoorbeeld de bebouwing kunnen dan worden verdisconteerd in (equivalente) materiaaleigenschappen. Voorts wordt uitgegaan van lineaire rekenmodellen; verondersteld wordt namelijk dat de optredende verplaatsingen zodanig klein zijn dat het gedrag rond een belastingsituatie gelineariseerd kan worden. Hoewel de modellering een (sterke) vereenvoudiging weergeeft van de werkelijkheid, kan deze een voldoende nauwkeurige prognose geven van de te verwachten trillingsniveaus. Eén en ander volgt onder meer uit diverse verificatiemetingen en -berekeningen. Voor complexere situaties kunnen ook driedimensionale modellen worden opgesteld.

Uit de sonderingen ter plaatse kunnen de vereenvoudigde bodemprofielen met de bijbehorende bodemeigenschappen worden afgeleid (zie figuur 4). Bij het bepalen van de dynamische elasticiteitsmodulus E wordt uitgegaan van de relatie  $E = 20 \cdot q_c$ , waarbij  $q_c$  de conusweerstand betreft. Voorts wordt bij de bepaling van de bodemeigenschappen rekening gehouden met de grondwaterstand. Voor de bodemlaag waar de grondwaterstand begint, wordt een hogere Poissonratio ( $\nu$ ) gehanteerd (nagenoeg onsamendrukbaar). Met behulp van de opgestelde rekenmo-



FIGUUR 3: VOORBEELD EEM-ELEMENT.





FIGUUR 4: OVERZICHT SONDERING.

dellen kunnen de responsies vanwege de trillingsbronnen in het frequentiedomein worden bepaald (harmonische responsie-analyse). De berekeningen worden uitgevoerd in het doorgaans relevant geachte frequentiegebied van 3 tot en met 80 Hz. Boven de 80 Hz worden de trillingen door de bodem (in Nederland) over het algemeen voldoende snel gereduceerd en zijn dan minder relevant.

In het navolgende wordt een tweetal specifieke toepassingsgebieden aan de hand van projectvoorbeelden gegeven.

#### BEBOUWING NABIJ SPOORTRAJECTEN

In Nederland wordt de ruimte voor woon- en kantoorbebouwing schaarser. Daardoor wordt het steeds vaker wenselijk om op nu nog vrije stroken naast, of zelfs boven de diverse spoortrajecten, woon- en kantoorbebouwing te realiseren.

De afstand van de bebouwing tot het spoortraject wordt daarmee zo klein (minder dan 35 meter) dat in veel gevallen de te hanteren streefwaarden uit de Richtlijn B 'Hinder voor personen in gebouwen door trillingen, Meet- en beoordelingsrichtlijnen' van de Stichting Bouwresearch (SBR-B) niet meer zonder aanvullende trillingsisolerende voorzieningen kunnen worden gerealiseerd. In figuur 5 is de situatie weergegeven waarin een projectontwikkelaar woningbouw op ca. 15 meter van het spoor wil realiseren. Voor de meeste situaties in Nederland kan worden aangegeven dat indien dichter dan globaal ca. 35 meter van een spoortraject woonbebouwing wordt gerealiseerd (één en ander afhankelijk van de specifieke bodemeigenschappen), in de woningen hinder kan worden ondervonden vanwege de trillingen van passerende treinen. Uiteraard wenst de projectontwikkelaar eventuele klachten over trillingen voor te zijn en zullen vaak trillingsreducerende voorzieningen noodzakelijk zijn.

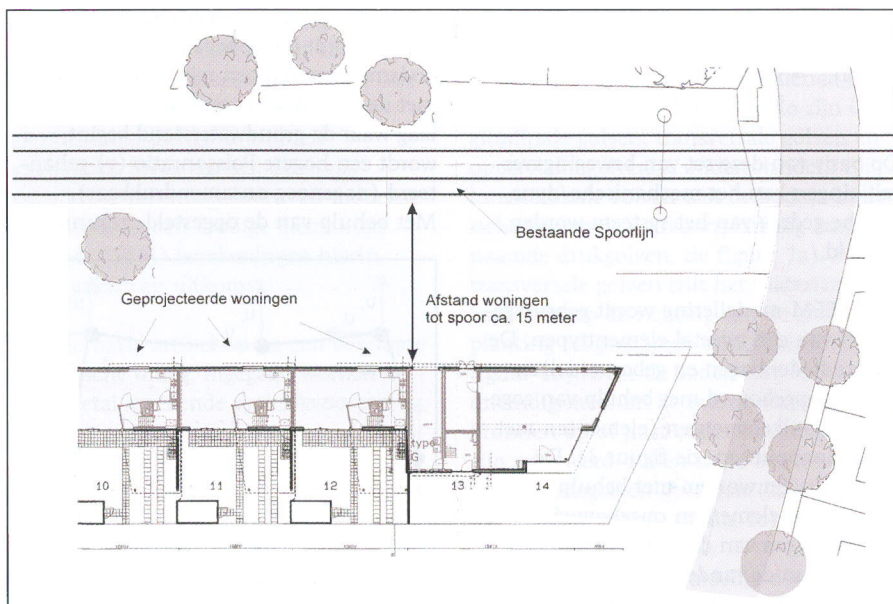
In eerste instantie worden in zo'n geval middels uitgebreide trillingsmetingen op meerdere posities, op verschillende afstanden van het spoor, de trillingniveaus in de bodem vanwege diverse treinpassages vastgesteld. In figuur 6 zijn de trillingspectra weergegeven van een aantal treinpassages gemeten op een grondpen op ca. 15 meter afstand van het spoortraject.

Op basis van uitgebreide sonderingonderzoeken, is het mogelijk de materiaaleigenschappen van de bodem ten behoeve van het EEM-rekenmodel vast te leggen. Met deze bodemgegevens kan een rekenmodel worden opgesteld dat de *gemeten* situatie beschrijft. Dit model wordt enerzijds gebruikt om het bronnspectrum van de

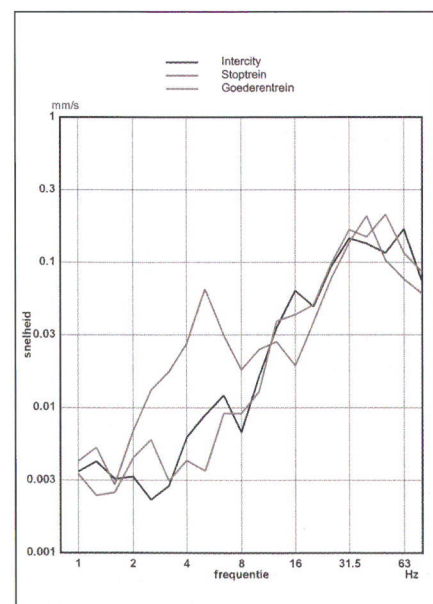
diverse treinsoorten te bepalen en anderzijds om het rekenmodel te verifiëren en te 'tunen' (in het bijzonder de bodemeigenschappen). In figuur 7 is het EEM-rekenmodel weergegeven waarin de diverse bodemlagen duidelijk herkenbaar zijn.

In figuur 8 is ter illustratie de responsie van de bodem sterk opgeschaald weergegeven, waarbij de bodem wordt belast met een harmonische belasting van 16 Hz. In figuur 9 zijn de resultaten van het uiteindelijke verificatierekenmodel spectraal weergegeven. Opgenomen zijn de op twee posities in de bodem gemeten en berekende trillingsniveaus tengevolge van een passage van een goederentrein. Hieruit volgt dat het rekenmodel de meetwaarden in voldoende mate benadert (afwijkingen frequentieafhankelijk 5 à 20%). Voor de praktijk, mede gelet op de optredende spreidingen in het bron(kracht)spectrum van de passerende treinen, geeft het model een voldoende nauwkeurige beschrijving.

Om te bezien of werkelijk trillingsisolerende voorzieningen noodzakelijk zijn, wordt een EEM-rekenmodel opgesteld voor de situatie waarin nog geen voorzieningen zijn aangebracht. In figuur 10 is het gehanteerde rekenmodel weergegeven. Duidelijk zijn de woningen te onderscheiden. De woningen op de eerste lijn zijn gesitueerd op ca. 15 meter van het spoortraject en de woningen op de tweede lijn op ca. 45 meter. Uit de EEM-berekeningen volgt dat, voor de situatie dat geen nadere voorzieningen worden getroffen, gedurende de (bepalende) nachtperiode (23.00-07.00 uur) de maximale trillingsnelheid  $V_{max}$  (dimensieloos) op de eerste verdieping ca. 1,15 bedraagt. De (gewogen) trillingsnelheid over de gehele

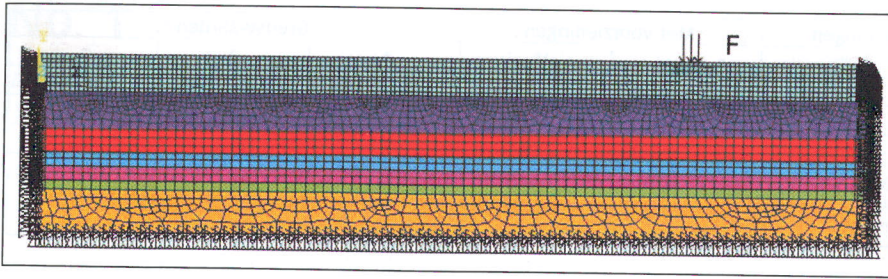


FIGUUR 5: OVERZICHT SITUERING GEPROJECTEERDE WONINGBOUW NABIJ SPOORTRAJECT.

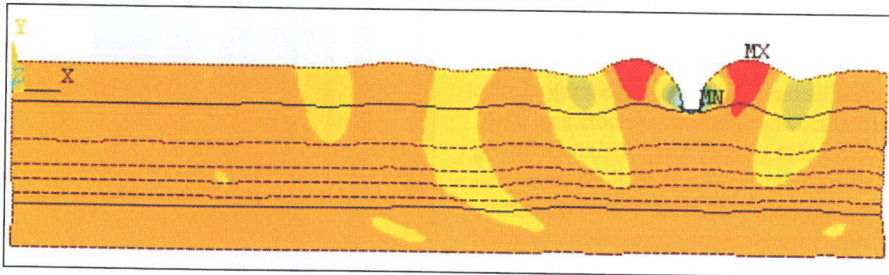


FIGUUR 6: RESULTATEN TRILLINGSMETINGEN.

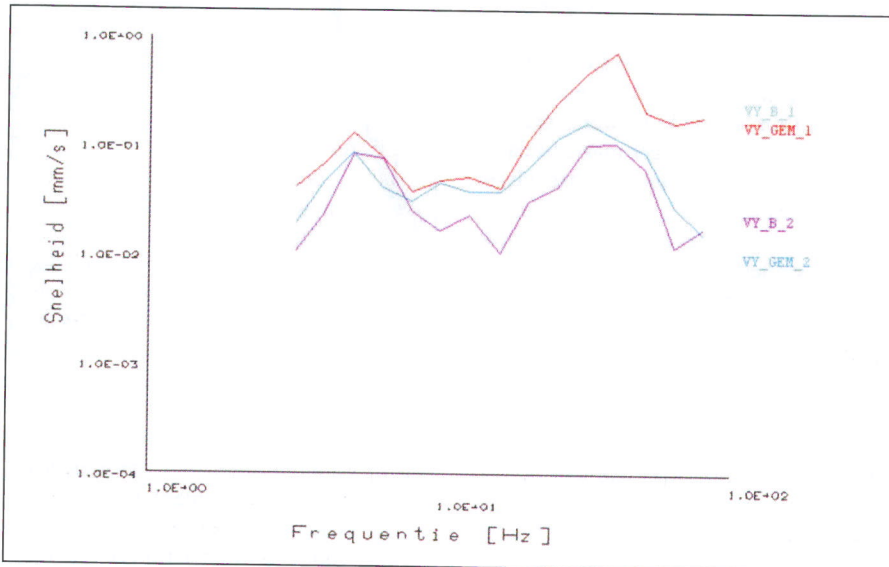




FIGUUR 7: REM-REKENMODEL TEN BEHOEVE VAN VERIFICATIEREKENMODEL.



FIGUUR 8: RESPONSIE VERIFICATIEREKENMODEL BIJ 16 HZ (STERK OPGESCHAALD).



FIGUUR 9: VERIFICATIERESULTATEN.

nachtperiode  $V_{per}$  (dimensieloos) bedraagt ca. 0,2. Voor de woningen op de tweede lijn bedragen deze waarden respectievelijk 0,14 en 0,03. In tabel 2 is een overzicht gegeven van de berekende trillingssterkte en de conform de SBR te hanteren streefwaarden.

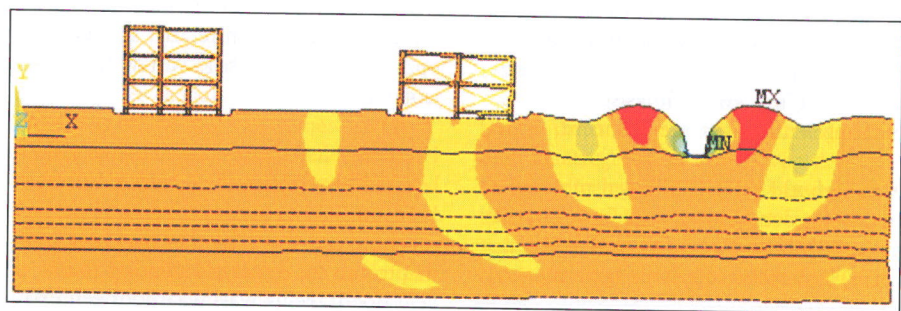
De berekende waarden (zonder voorzieningen) komen in orde van grootte overeen met trillingsniveaus die op basis van indicatieve berekeningen, middels in vergelijkbare situaties gemeten overdrachtsfactoren van trillingen van de bodem naar constructiedelen en de in de bodem gemeten trillingsniveaus, zijn bepaald.

Uit de eerste rekenslag (zonder voorzieningen) volgt dus dat de van toepassing zijnde streefwaarden voor de woningen op de eerste lijn niet worden gerealiseerd, voor de woningen op de tweede lijn worden de streefwaarden juist gerealiseerd. Trillingsisolierende voorzieningen voor de woningen op de eerste lijn zijn in dit

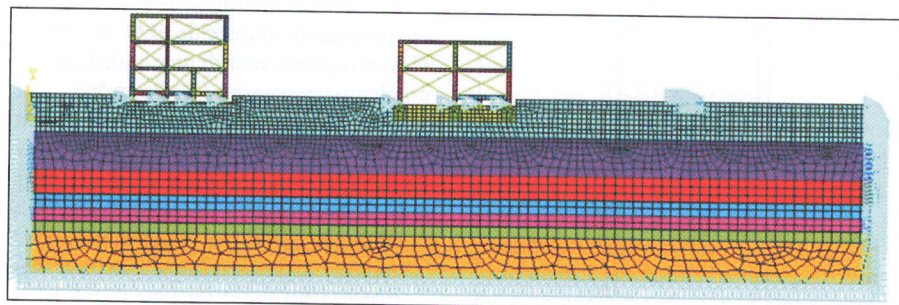
geval noodzakelijk. In een dergelijke situatie kan worden overwogen trillingsisolierende matten tussen de fundering en de opbouw van de woningen als voorziening toe te passen. Deze maatregelen kunnen in het rekenmodel worden toegevoegd. Uit berekeningen volgt dat met deze maatregelen de trillingsniveaus in de woningen in de eerste lijn niet voldoende kunnen worden gereduceerd. Als belangrijke reden kan daarbij worden aangegeven dat de golflengten van een aantal relevante frequenties in de orde grootte liggen van de afmetingen van de diepte van de bebouwing (zie ook figuur 10), waardoor de trillingsisolatoren niet gelijkmatig zullen worden belast en minder effectief zullen werken. De woningen kunnen dan gaan 'dansen' op de trillingsgolven.

Hierdoor wordt het noodzakelijk de fundatie van de woningen op de eerste lijn aanzienlijk te verzwaren en tevens te verstijven. De fundatie van de woning zal zich dan meer als één geheel gaan gedragen. Bovendien kan de additionele massa als een soort trillingsbarrière van de oppervlaktegolven richting de woningen in de tweede lijn fungeren. In figuur 11 is het uiteindelijk gehanteerde EEM-rekenmodel weergegeven voor de situatie met voorzieningen (trillingsisolierende matten en additionele massa).

Door middel van de toegepaste trillingsisolierende voorzieningen zakt de maximale trillingssterkte ( $V_{max}$ ) in de woningen in de eerste lijn naar 0,16 (was zonder voorzieningen ca. 1,15, i.e. een reductie van 86%). Aanvullend voordeel (overigens



FIGUUR 10: OVERZICHT REM-REKENMODEL (ZONDER VOORZIENINGEN), RESPONSIE 16 HZ (STERK OPGESCHAALD).



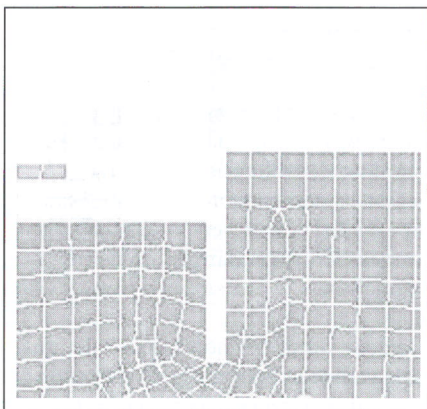
FIGUUR 11: OVERZICHT REM-REKENMODEL, SITUATIE MET VOORZIENINGEN (TRILLINGSISOLERENDE MATTEN EN ADDITIONELE MASSA).



	Zonder voorzieningen		Met voorzieningen		Grenswaarden *)		
	$V_{max}$	$V_{per}$	$V_{max}$	$V_{per}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
Dagperiode (07.00-19.00 uur)	1,15	0,26	0,16	0,04	0,1	0,4	0,05
Avondperiode (19.00-23.00 uur)	1,15	0,30	0,16	0,05	0,1	0,4	0,05
Nachtperiode (23.00-07.00 uur)	1,15	0,20	0,16	0,03	0,1	0,2	0,05

\*) Ten aanzien van de in de geprojecteerde woningbouw optredende herhaald voorkomende trillingen kan worden opgemerkt dat de waarde van de maximale trillingssnelheid  $V_{max}$  lager dient te zijn dan  $A_1$ . Indien dit niet het geval is, dient enerzijds de waarde van de maximale trillingssnelheid  $V_{max}$  lager te zijn dan  $A_2$  en anderzijds dient de trillingssnelheid over de gehele beoordelingsperiode  $V_{per}$  lager te zijn dan  $A_3$  (één en ander conform SBR-richtlijn B).

TABEL 2.



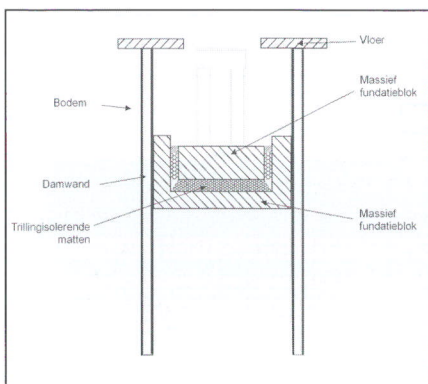
FIGUUR 12: OVERZICHT DEEL VAN EEM-REKENMODEL, TRILLINGSISOLERENDE FUNCTIE.

beperkt) van het toepassen van een additionele massa is dat ter hoogte van de woningen in tweede lijn de trillingsniveaus eveneens worden gereduceerd (ca. 10%).

#### DIMENSIONEREN VAN TRILLINGSISOLERENDE FUNDATIE VOOR VERDICHTINGSMACHINE

In het voorgaande projectvoorbeeld is de situatie aangegeven dat trillingsisolerende voorzieningen getroffen zijn bij de ontvanger. Dit, daar maatregelen aan de bron niet mogelijk waren (bestaand spoortraject). Er zijn situaties denkbaar waar voorzieningen aan de bron nog wel mogelijk zijn en waar middels EEM berekeningen effectieve trillingsisolerende maatregelen zijn gedimensioneerd.

Als voorbeeld geldt hierbij een metaalgietterij welke een nieuwe verdichtingsmachine in bedrijf wenst te nemen. De (zandvorm)verdichtingsmethode is de zoge-



FIGUUR 14: GEREALISEERDE OPSTELLING.

naamde explosieverdichting, waarbij het vormzand in de vormkasten met behulp van lucht onder zeer grote druk (3 tot 4 bar) in een zeer korte tijd (15 ms) wordt verdicht. Dit verdichtingsproces gaat dus gepaard met relatief grote dynamische krachten. Op zeer korte afstand van de metaalgietterij (ongeveer 35 meter) zijn woningen gesitueerd. De verdichtingsactiviteiten zullen hoge trillingsniveaus met zich meebrengen. Trillingsisolerende voorzieningen zijn derhalve noodzakelijk.

Als randvoorwaarde wordt gesteld dat de maximale trillingssnelheid vanwege de nieuwe vormmachine in de woningen nabij het bedrijf niet hoger mag zijn dan 0,1 mm/s, i.e. globaal de voelbaarheids-grens.

Teneinde een effectieve trillingsisolerende voorziening te dimensioneren zijn uitgebreide trillingmetingen verricht aan een soortgelijke machine in Duitsland. Op basis van deze metingen is het bronspectrum voor de explosies vastgesteld.

Uit deze EEM-berekeningen volgde dat door simpelweg trillingsisolerende matten onder de fundatie van de machine toe te passen, de trillingsniveaus in de woning onvoldoende werden gereduceerd. De reden hiervoor was onder meer dat de onderliggende bodem relatief slap was ten opzichte van de stijfheid van de trillingsisolerende matten.

Hierdoor bleek het noodzakelijk een 'dubbele' trillingsisolerende fundatie aan te brengen. Tevens bleek dat rondom de machine een verstijfde damwand tot een diepte van ca. 8 meter onder het maaiveld noodzakelijk was, waardoor een extra impedantieovergang gecreëerd wordt voor de trillingen. In figuur 12 is een deel van het uiteindelijk opgestelde EEM-rekenmodel weergegeven, met de noodzakelijke voorzieningen waarmee de door de metaalgietterij opgestelde trillingseis wordt gerealiseerd.

In de figuren 13 en 14 is de uiteindelijk gerealiseerde opstelling weergegeven.

#### CONCLUSIE

EEM berekeningen kunnen voor complexe trillingsproblemen, waarbij trillin-



FIGUUR 13: GEREALISEERDE OPSTELLING.

gen zich door verschillende constructiedelen en de bodem voortplanten, een uitkomst bieden bij het dimensioneren van trillingsisolerende voorzieningen. Hierbij dient wel rekening gehouden te worden met de grote invloed die variatie van de verschillende invoerparameters kan hebben op het rekenresultaat, bijvoorbeeld lokaal afwijkende bodemeigenschappen en verschillen in bronspectra. Bij het hanteren van deze rekenmethode blijft het dus wenselijk de berekeningen te ondersteunen en te verifiëren op basis van metingen ter plaatse. Ook hier blijft de aloude stelling van kracht 'Garbage In Is Garbage Out'.

#### LITERATUUR

- J.P. Wolf, 'Soil-structure-interaction analysis in time domain', Prentice-Hall, Inc., 1988.
- L. Meirovitch, 'Elements of vibration analysis', McGraw-Hill Book Co, 1986.
- S.P. Timoshenko en J.N. Goodier, 'Theory of Elasticity', McGraw-Hill Book Co, 1970.
- 'Rapport 95-2 Prognosemodel trillinghinder', Stichting CUR, 1995.
- DIN 4150-1, 'Vibrations in buildings - Part 1: Prediction of vibration parameters', DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 1999.
- 'Meet- en beoordelingsrichtlijn Schade aan gebouwen', Stichting Bouwresearch, 2002.
- F.C. van Eekhout en J.F.W. Koopmans 'The paradox of a complex vibration-insulated system and cost efficiency', Internoise Congres 2001.