



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Een uniform rekenmodel voor spoortrillingen 2016

Ontwikkelingsmogelijkheden

RIVM Briefrapport 2016-0209
D. de Gruijter et al.



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Een uniform rekenmodel voor spoortrillingen 2016

Ontwikkelingsmogelijkheden

RIVM Briefrapport 2016-0209
D. de Gruijter et al.

Colofon

© RIVM 2016

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

D. de Gruijter (auteur), RIVM
A. Koopman (auteur), Level Acoustics & Vibration
E. Verheijen (auteur), dBvision
S. Lentzen (auteur), Level Acoustics & Vibration
H. Boshuizen (auteur), RIVM
J. Bolte (auteur), RIVM

Contact:
Dolf de Gruijter
RIVM/M&V/MIL
dolf.de.gruijter@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van Ministerie IenM, Directie KLG, in het kader van Expertise Centrum Geluid

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Een uniform rekenmodel voor spoortrillingen 2016

Ontwikkelingsmogelijkheden

Om te komen tot een landelijk toepasbaar uniform rekenmodel heeft het RIVM geïnventariseerd welke modellen en methoden er bestaan om trillingsniveaus door treinverkeer te bepalen en heeft deze beoordeeld op hun kwaliteit. Op basis daarvan is onderzocht welk model het meest geschikt is om trillingen van treinverkeer te bepalen. Geen van de onderzochte modellen voldoet aan de gestelde eisen. Wel is het mogelijk om een uniform rekenmodel te realiseren door verbetering en combinatie van bestaande methoden en data. Dit nog te ontwikkelen model bestaat uit een register met data van het spoor, een 3D rekenmethode en een database met bodemeigenschappen.

De aanleiding voor het onderzoek is de wens van de staatssecretaris van Infrastructuur en Milieu om te komen tot een uniform rekenmodel dat landelijk toepasbaar is en waarmee spoortrillingen kunnen worden beoordeeld zonder metingen uit te voeren. Met een uniform rekenmodel kunnen trillingseffecten in het kader van tracébesluiten eenduidiger en eenvoudiger voorspeld en getoetst worden. Ook kan eenduidig bepaald worden welke effecten maatregelen hebben. Het uniforme rekenmodel kan de huidige werkwijze, waarbij langdurige en kostbare metingen noodzakelijk zijn, vervangen zonder aan zorgvuldigheid in te boeten. Ook zorgt een uniform rekenmodel voor eenduidige uitkomsten, onafhankelijk van wie de berekeningen uitvoert.

Bij tracébesluiten voor de aanleg, wijziging of het opnieuw in gebruik nemen van een landelijke spoorweg is de Beleidsregel trillinghinder spoor van toepassing. Daarvoor moeten trillingsniveaus bepaald worden op de vloeren van gebouwen, zoals woningen. Dit onderzoek richt zich op de bepaling van trillingsniveaus op de fundering van gebouwen. Voor het bepalen van trillingsniveaus op vloeren zal in een uniform rekenmodel nog een module moeten worden ontwikkeld.

Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het ministerie van IenM. Het RIVM heeft de kwaliteit van 7 Nederlandse en 10 buitenlandse rekenmethoden beoordeeld.

Kernwoorden: spoortrillingen, trillingsniveaus, rekenmethode, Beleidsregel trillinghinder spoor

Synopsis

A uniform calculation method for railway vibration 2016

In order to attain a nationwide uniform calculation method, the National Institute for Public Health and the Environment (RIVM) has made an inventory of existing models and methods that are used to determine vibration levels caused by railway traffic. Based on the inventory results, it was investigated which model, or combinations of models, is most suitable to determine railway vibration. It turns out that none of the assessed models meets the requirements. However, it is possible to accomplish a uniform calculation model by improving and combining existing models and data. The new model to be developed consists of a railway data registry, a 3D calculation model and a database of soil properties.

This inventory follows a request of the Minister for the Environment to establish a uniform calculation model which is applicable nationwide and capable of determining railway vibration without performing measurements. Such a model allows for easier and more unambiguous assessment of vibration for the purpose of Infrastructure Decrees. Also, the impact of mitigation measures can be determined unambiguously. The uniform calculation model would largely replace the current practice (which requires long-term and costly measurements), without affecting accuracy. Furthermore, the uniform calculation model ensures results to be irrespective of the person performing the calculations.

For Infrastructure Decrees concerning the construction, modification or re-commissioning of a national railroad, the *Railway vibration annoyance regulation* (Bts) prescribes how to assess the vibration impact of the plan. For this, vibration levels need to be determined at the floors of buildings, such as dwellings.

This study focuses on the determination of vibration levels at the foundation of buildings. For the determination of vibration at the floors, an additional module in the uniform calculation model needs to be developed.

This study was commissioned by the Ministry of Infrastructure and the Environment. The merits of seven Dutch and ten foreign calculation methods have been assessed.

Keywords: railway vibration, vibration levels, calculation method, Railway vibration nuisance regulation

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1	Inleiding — 15
1.1	Vraagstelling — 15
1.1.1	Achtergrond — 15
1.1.2	Uitwerking vraagstelling — 15
1.2	Aanpak — 17
1.3	Draagvlak sector — 17
1.4	Aandachtspunten — 17
1.5	Leeswijzer — 18
1.6	Onderzoeksteam — 19
2	Functionele specificatie — 21
2.1	Doelstelling — 21
2.2	Eisen aan de bruikbaarheid — 24
2.2.1	Mate van gedetailleerdheid — 24
2.2.2	Gebruikers — 24
2.2.3	Eisen aan de kwaliteit — 28
2.2.4	Eisen aan de fysische beschrijving — 29
2.2.5	Eisen aan distributie en onderhoud — 30
3	Inventarisatie bestaande modellen — 31
3.1	Inleiding — 31
3.2	Eerdere inventarisaties — 31
3.2.1	RENVIB II — 31
3.2.2	BET Verkeer — 32
3.3	Modelhiërarchie — 33
3.4	Stochastiek — 35
3.4.1	Uitkomst rekenmodel — 35
3.4.2	Betrouwbaarheid van de uitkomsten — 37
3.5	Bestaande rekenmodellen — 40
3.5.1	VibraDyna (Movares) — 40
3.5.2	SRM-T (COB) — 42
3.5.3	Prognosemodel Arcadis-Fugro — 44
3.5.4	Deens model (NVM) — 45
3.5.5	GeoVibration (DGMR) — 46
3.5.6	TRINT-Momfer-Bever (TNO) — 48
3.5.7	DC-Viran — 49
3.5.8	Conclusies over de bestaande rekenmodellen — 51
3.6	Wetenschappelijke rekenmodellen — 52
3.6.1	Southampton-Qatar model — 53
3.6.2	Porto-Coimbra model — 54
3.6.3	Edinburgh-Mons model (ScopeRail) — 55
3.6.4	Cambridge-Qatar-Terre Haute-Leuven model — 56
3.6.5	Lissabon model — 57
3.6.6	Athene-Mons model — 58
3.6.7	Leuven-Sevilla model — 59
3.6.8	Southampton model — 60
3.6.9	Perugia model — 61
3.6.10	VIBRA-1 & -2 model — 62

3.7 Stamboom bestaande rekenmodellen — 63

4 Ontwikkelingsmogelijkheden en scenario's — 65

4.1 Inleiding — 65

4.2 Kruistabel — 65

4.2.1 Deelsystemen — 65

4.2.2 Inhoud kruistabel — 66

4.3 Workshop — 68

4.4 Selectie van modellen voor ontwikkelscenario's — 69

4.4.1 Inleiding — 69

4.4.2 Beoordeling kruistabel — 69

4.4.3 Ideeën workshop — 70

4.4.4 Deelmodellen die in scenario's gebruikt kunnen worden — 70

4.4.5 Stamboom — 71

4.5 Scenario's — 71

4.5.1 Vaste elementen in elk scenario — 72

4.5.2 De 5 scenario's in detail — 73

4.5.2.1 VibraDyna — 73

4.5.2.2 Hybride — 75

4.5.2.3 SRM-T — 78

4.5.2.4 Kookboek — 79

4.5.2.5 Random Forest — 80

4.5.3 Samenvatting van de scenario's — 82

4.6 Stamboom uitgebreid met scenario's — 85

5 Advies — 87

5.1 Optiek end-user — 87

5.2 Optiek lead-user — 88

5.3 Vervolgstappen — 89

5.4 Risico-analyse — 90

5.5 Impact — 92

6 Literatuur — 95

Bijlage A – Lijst van afkortingen en begrippen — 97

Bijlage B – Beschrijving methoden — 99

Bijlage C – Kruistabel — 120

Bijlage D – Literatuurscan, shortlists — 127

Samenvatting

Inleiding

Bij de aanleg of uitbreiding van spoorwegen waarvoor een Tracébesluit nodig is, moet het aspect trillingshinder worden beoordeeld. De beoordelingsmethode en normstelling daarvoor zijn in 2012 vastgelegd in de Beleidsregel trillinghinder spoor (Bts). In de huidige praktijk wordt dit onderzoek grotendeels gebaseerd op langdurige meetcampagnes, waarna uiteenlopende methoden worden gebruikt om de trillingshinder na realisatie van het project te bepalen.

Op 29 februari 2016 stelt de Staatsecretaris van Milieu in haar brief aan de Tweede Kamer dat een gestandaardiseerde methodiek zeer wenselijk is, omdat het hiermee eenvoudiger wordt om op een eenduidige wijze trillingseffecten te prognosticeren en te toetsen, alsmede de effecten van maatregelen te bepalen. Daarnaast is er behoefte aan beter inzicht in de kwaliteit van de rekenmodellen.

In opdracht van Ministerie van IenM heeft het RIVM de mogelijkheden onderzocht om tot een uniforme rekenmethodiek te komen voor spoortrillingen.

De vraagstelling die ten grondslag ligt aan dit onderzoek is driedelig:

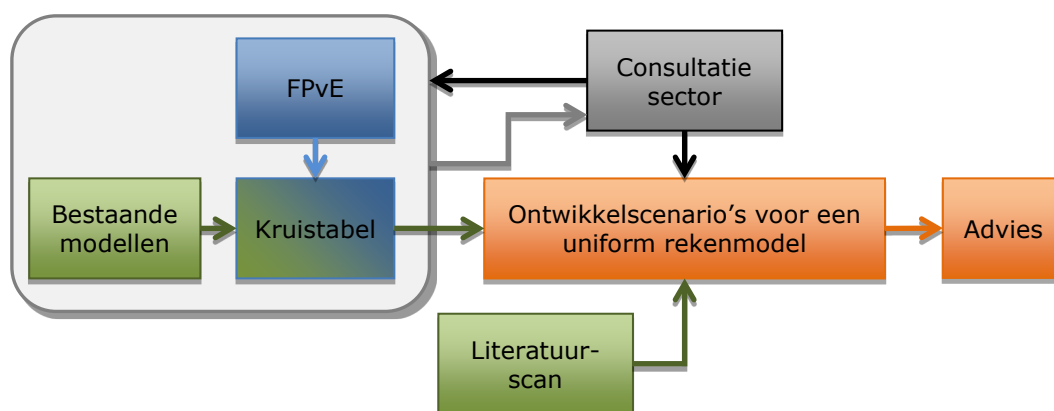
1. Welke kwaliteit hebben de bestaande rekenmodellen?
2. Kunnen die modellen verbeterd worden?
3. Welk rekenmodel wordt voorgesteld?

Uitgangspunt daarbij is dat het voor te stellen rekenmodel ook leidt tot lagere uitvoeringslasten dan nu het geval is.

Onderzoeksopzet

Om deze onderzoeksvragen te beantwoorden is de volgende onderzoeksopzet gehanteerd (zie figuur A). Eerst is een functioneel programma van eisen (FPvE) opgesteld. Dit FPvE is het referentiekader waarmee wordt nagegaan of een rekenmodel voorziet in de vereiste aspecten. Daarmee wordt ook duidelijk welke zaken nog doorontwikkeling of uitbreiding behoeven.

De bestaande rekenmodellen die zijn beoordeeld, komen uit de huidige onderzoekspraktijk bij Nederlandse spoorprojecten, aangevuld met kansrijke internationale modellen (ontwikkeld of beoordeeld in Europese projecten op het gebied van spoortrillingen).



Figuur A De onderzoeksopzet geschematiseerd.

De confrontatie van de bestaande rekenmodellen met de eisen uit het FpvE is vervolgens uitgewerkt in een kruistabel. In die tabel is per bestaand model aangegeven aan welke eisen uit het FPvE het voldoet. Tevens is een totaalscore gegeven op basis van de geschiktheid en de verbetermogelijkheden van het model.

Een eerste versie van het FPvE, de beschrijving van bestaande modellen en de kruistabel zijn gedeeld met de sector: de ingenieursbureaus die het trillingsonderzoek bij spoorprojecten in opdracht van ProRail uitvoeren. De opmerkingen en suggesties die tijdens een workshop zijn geuit en die per e-mail zijn ontvangen zijn verwerkt in het FPvE en de kruistabel. Verder heeft de workshop geresulteerd in ideeën over hoe het uniforme rekenmodel, en de daarbij benodigde data-infrastructuur, er uiteindelijk uit kan zien. Deze ideeën zijn vervolgens door het RIVM uitgewerkt tot scenario's die de ontwikkeling beschrijven die nodig is om de ideeën te realiseren. Daaraan zijn nog enkele andere kansrijke scenario's toegevoegd die voortborduren op of combinaties zijn van bestaande (deel)modellen. Hierbij is ook gebruik gemaakt van recente ontwikkelingen uit de vakliteratuur (literatuurscan).

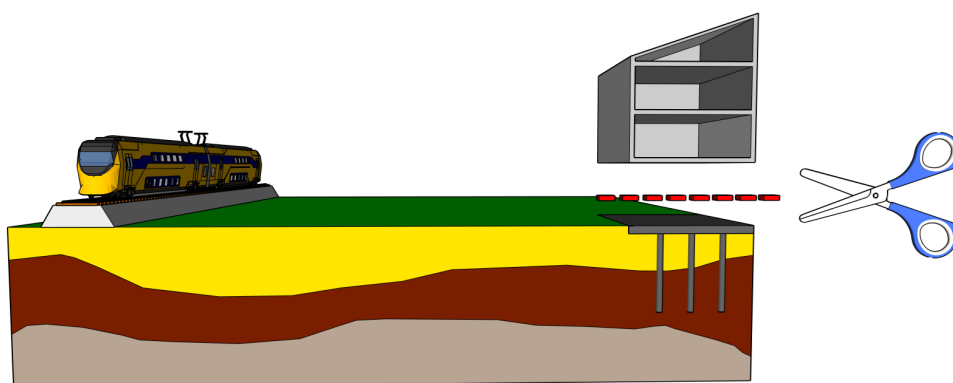
De ontwikkelscenario's vormen het belangrijkste resultaat van dit onderzoek. Ze beschrijven enerzijds het eindbeeld, dit wil zeggen het rekenmodel in de vorm waarin het in gebruik kan worden genomen inclusief de wijze waarop invoergegevens moeten worden verkregen en verwerkt. Ze beschrijven anderzijds het ontwikkelingstraject, dit wil zeggen de acties die nodig zijn om dit eindbeeld te realiseren. Uiteindelijk moet een keuze gemaakt worden voor het te volgen scenario. Dit rapport geeft hiervoor een systematiek. Hierbij wordt elk scenario beoordeeld op de aspecten ontwikkelingstijd, haalbaarheid, onderzoekslast, transparantie en bureauonafhankelijkheid. Vervolgens worden de scores gewogen opgeteld tot een eindoordeel.

Scope

Het beoogde uniforme rekenmodel dient compatibel te zijn met de Beleidsregel trillinghinder spoor (Bts). Dat betekent dat de rekenresultaten van het model geschikt moeten zijn voor de toetsing van trillinghinder in woningen en werkruimten vanwege railverkeer. Daarom zal het rekenmodel moeten voorzien in de eerste twee stappen

van trillingsonderzoek: de zogenoemde scoping fase (bepaling van het onderzoeksgebied) en screening fase (toetsing trillingshinder).

De Bts hanteert normen voor trillingsniveaus op vloeren in gebouwen. Dat betekent dat voor de Bts behoefte is aan een model dat reikt van de opwekking van trillingen op het spoor tot de daaruit voortkomende trillingen van de vloeren in gebouwen met voor trillingen gevoelige functies. De opdracht waar dit rapport zich op richt (zie §1.1) en waar in §3.4.1 ook op wordt ingegaan, betreft het deel tot de fundering (zie figuur B). Daarnaast dient de rekenmethode te worden uitgebreid met de overdracht van fundering naar de vloeren. Op dat moment is de totale rekenmethode pas volledig compatibel met de Bts. Vanuit de modellering bezien is dat ook een logische knip, omdat de modellering van trillingsvoortplanting binnen gebouwen een geheel andere aanpak kent dan de trillingsvoortplanting vanaf de spoorbaan door de bodem.



Figuur B Dit rapport beperkt zich tot trillingen aan de fundering.

Als te bepalen grootte op de fundering wordt niet uitgegaan van de uiteindelijk voor de Bts te bepalen V_{per} en V_{max} , maar de V_{RMS} . Deze grootte is makkelijker te bepalen en te valideren. In een aanvullend ontwikkeltraject dient een module te worden gebouwd die uit de V_{RMS} , uit gegevens over het spoorgebruik en uit gegevens over het gebouw de voor de Bts benodigde V_{per} en V_{max} op de vloeren bepaalt.

Functioneel programma van eisen

In een functionele specificatie is een opsomming gegeven van de eisen waaraan een uniform rekenmodel voor spoortrillingen binnen de scope van de Bts zal moeten voldoen. Dit betreft met name eisen aan de bruikbaarheid, de kwaliteit, en de fysische beschrijving.

Beoordeling bestaande modellen

Van 7 Nederlandse en 10 buitenlandse rekenmodellen voor spoortrillingen is een beschrijving gegeven. Deze modellen zijn beoordeeld in een kruistabel. Daarbij wordt per aspect uit het functioneel programma van eisen een duiding gegeven van de mate waarin het model daarin voorziet. Geen van deze modellen voldoet echter om direct te kunnen worden toegepast.

Uit deze beoordeling blijkt wel dat drie modellen in principe in aanmerking komen om te dienen als basis voor een uniform rekenmodel. Dat gaat om VibraDyna en SRM-T als specifieke modellen voor spoortrillingen en daarnaast om de generieke methode FEM. Maar

omdat geen van de modellen, elk om verschillende redenen, in de huidige vorm geschikt wordt geacht, is een verbetering nodig.

Stochastiek, trillingsmaat en onderzoekslast

De meeste rekenmodellen voor spoortrillingen zijn (semi-)empirische modellen, wat inhoudt dat ze gebaseerd zijn op (het parametriseren van) meetresultaten. De grote uitdaging van zulke modellen is een adequate beschrijving van de stochastiek, dit wil zeggen het feit dat belangrijke factoren in de praktijk variëren. Die variatie is er niet alleen tussen situaties (zoals de grote variatie aan bodemopbouw in Nederland) maar ook binnen situaties (zoals de verscheidenheid aan treinen die passeren en aan constructiewijzen van woningen). De impact van die variatie wordt vergroot door de keuze van een maximum, namelijk de V_{max} , als beoordelingsgrootte in de Bts. Dit betekent een behoorlijke onderzoekslast, in termen van kosten, doorlooptijd, maar ook in de belasting van omwonenden in wiens huizen de trillingen van treinen langdurig moeten worden geregistreerd.

In dit onderzoek wordt daarom voorgesteld om een tussenstap als rekenresultaat van het uniforme rekenmodel te introduceren, de V_{RMS} . Dit heeft als voordeel dat

1. het rekenmodel eenvoudiger kan worden.
2. metingen (veel) eenvoudiger kunnen worden.
3. metingen en berekeningen beter kunnen worden vergeleken.

Samengevat zal de onderzoekslast verminderen en de meet- en rekenmethoden verbeteren. Dit betekent overigens niet dat de beoordelingsgrootheden V_{max} en V_{per} uit de Bts moeten worden losgelaten: deze zullen in het uniforme rekenmodel worden berekend uit de V_{RMS} via de module die in een parallel traject dient te worden ontwikkeld.

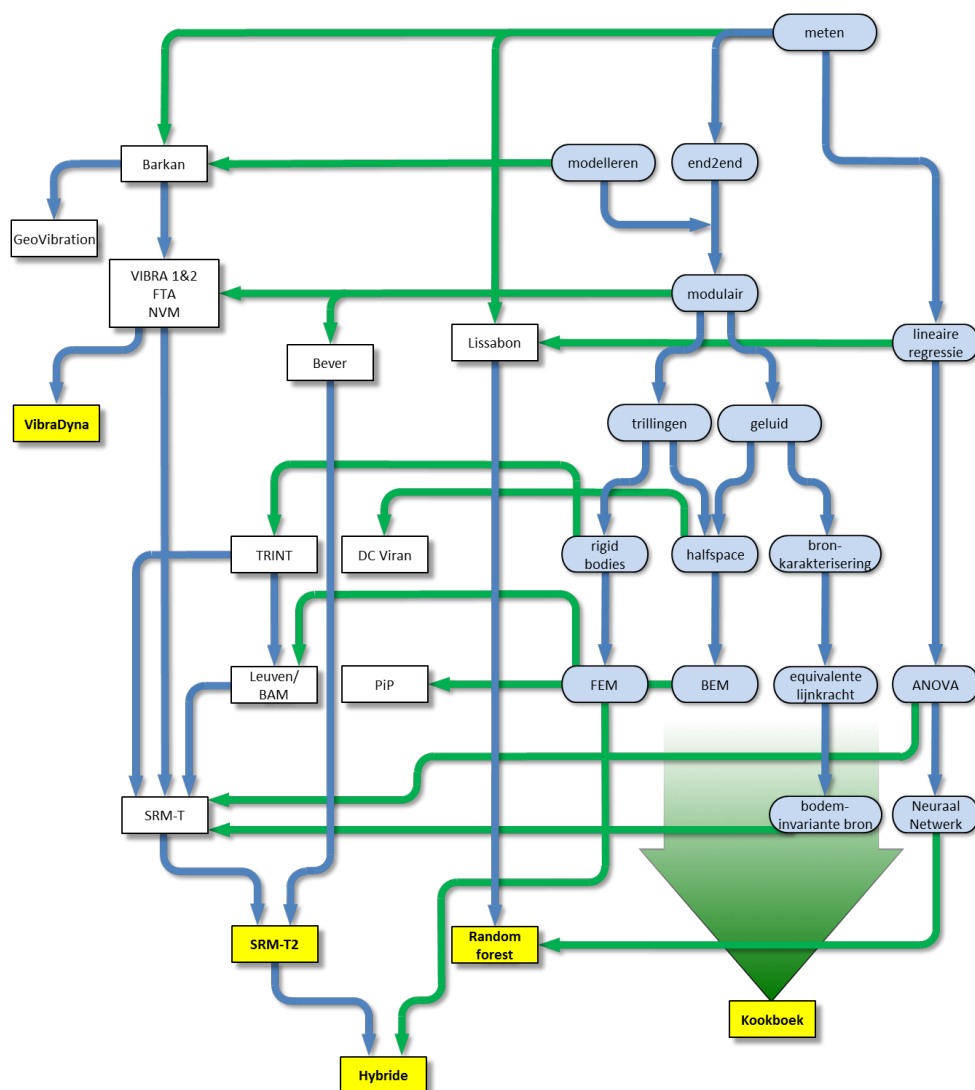
Scenario's

De volgende vijf scenario's tekenen zich af als kansrijk:

- VibraDyna, uitgaande van het gelijknamige rekenmodel van Movares.
- "Hybride", een nieuw te bouwen rekenmodel (op basis van o.a. FEM).
- SRM-T, uitgaande van een eerder samenwerkingsproject uit de sector.
- "Kookboek", een formalisering en structurering van de bestaande, zeer diverse, methodes.
- Random Forest, een nieuwe, zuiver stochastische aanpak.

Op basis van de beoordeling vanuit het perspectief van verschillende gebruikers blijkt het "Hybride" het beste uitgangspunt voor verdere ontwikkeling.

De samenhang van de beoordeelde modellen en methoden is in een relationeel diagram weergegeven in figuur C. Dit is een stamboom die aangeeft hoe deze modellen zich verhouden tot elkaar en tot externe invloeden en ontwikkelingen. Ook de positie van de vijf ontwikkelscenario's is hierin weergegeven.



Figuur C "Stamboom" van bestaande rekenmodellen en de 5 ontwikkelscenario's

De vijf scenario's zijn nader uitgewerkt en vervolgens beoordeeld op een zestal criteria. Uit een multicriteria-analyse komen het Hybride-scenario, dat delen van andere modellen combineert, en het SRM-T-scenario, dat het bestaande SRM-T basismodel vervolledigt, als beste naar voren. Daarvan heeft het Hybride-model de beste opties om de toekomstige onderzoekslast te minimaliseren. Om dit model te realiseren is een ontwikkeltijd van naar schatting anderhalf jaar benodigd. Het Hybride-scenario komt voort uit twee primaire ideeën van de workshop met de sector. De belangrijkste kenmerken van het Hybride-model zijn:

- Het is in potentie het meest nauwkeurige model, wat betekent dat al veel duidelijk wordt in de screeningfase en er minder onderzoek nodig is in de (veel duurdere) gedetailleerde fase. Dat scheelt geld en tijd.
- Het sluit aan bij de praktijk van andere milieu-aspecten, zoals geluid. Bronnen worden ingemeten en opgenomen in een register. Daarop zou bronbeleid kunnen worden gevoerd.
- Het heeft de potentie om als gedetailleerd model te worden gebruikt, waardoor meer ingenieursbureaus in staat zullen zijn

ook die onderzoeksfase uit te voeren, wat scheelt in doorlooptijd en geld.

Impact

Keuze voor het Hybride-model en daarmee het Hybride scenario levert vooruitgang ten opzichte van huidige praktijk:

1. Introductie van een voor iedereen beschikbaar, uniform rekenmodel.
2. Reductie van de onderzoekslasten. De uitgebreide, langdurige en dure meetcampagnes die nu onderdeel vormen van trillingsonderzoek komen te vervallen.

Het uitgaan van een uniforme rekenmethode heeft ook de volgende gevolgen:

- Voor omwonenden: meer rechtsgelijkheid. De kwaliteit van het onderzoek is nu veel minder afhankelijk van de kennis en mogelijkheden van het ingenieursbureau dat het onderzoek uitvoert. Bovendien worden omwonenden van spoorprojecten verlost van de last van trillingsmetingen binnenshuis (o.a. op de slaapkamervloer).
- Voor ProRail: trillingsonderzoek kan veel sneller uitgevoerd worden (kortere doorlooptijd) en bevindt zich daarmee niet langer op het kritieke pad binnen spoorprojecten.
- Voor IenM: een besparing op de onderzoekskosten van spoorprojecten. Wel komt er een vaste kostenpost voor terug: die voor het onderhoud aan het model. Per saldo kan deze investering worden terugverdiend afhankelijk van de grootte van de besparingen op metingen.
- Voor ingenieursbureaus: een vermindering van de omzet (minder meten), maar tevens een meer 'level playing field'. De aard van het werk verschuift van metingen en analyses naar bureaustudies.
- Nieuwe taken erbij: beheer van de benodigde registers en van het model.

1 Inleiding

1.1 Vraagstelling

1.1.1 *Achtergrond*

Bij de aanleg of uitbreiding van de hoofdspoorweginfrastructuur, en bij de heringebruikname van minimaal 5 kilometer lengte ervan, moet het aspect trillingshinder in het betreffende Tracébesluit worden meegenomen. De huidige praktijk is dat voorafgaand aan de realisatie van een dergelijk project het bestaande trillingsniveau wordt *gemeten*. Op basis van de meetresultaten wordt het verwachte trillingsniveau berekend. Er zijn daarbij verschillende meet- en rekenmethoden voorhanden, die alle voldoen aan de reken- en meetvoorschriften en bepalingen uit de Beleidsregel trillinghinder spoor (Bts), die sinds 2012 geldt. Met de Bts is meer eenduidigheid gekomen in de aan te houden streef- en grenswaarden voor trillingen in situaties waarin door fysieke ingrepen aan de spoorweg de trillingssterkte in naburige gebouwen kan toenemen. Vanuit de praktijk van trillingsonderzoek is daaraan een standaard meet- en analysemethode toegevoegd.

Er is echter geen uniforme rekenmethode die voor het hele land toepasbaar is, en waarmee te verwachten trillingen berekend kunnen worden zonder metingen uit te voeren.

Op 29 februari 2016 stelde de Staatsecretaris van Milieu in haar brief aan de Tweede Kamer (Tweede Kamer, vergaderjaar 2015–2016, 29 984, nr. 655) dat een gestandaardiseerde methodiek echter zeer wenselijk blijft, omdat het hiermee ten behoeve van Tracébesluiten eenvoudiger wordt om op een eenduidige wijze trillingseffecten te prognosticeren en te toetsen, alsmede de effecten van maatregelen te bepalen. Daarnaast is er behoefte aan beter inzicht in de kwaliteit van de rekenmodellen.

Ze beloofde in haar brief aan het RIVM opdracht te geven te onderzoeken of de al bestaande methoden, waarmee inzicht gegeven wordt in te verwachten trillingen door spoor, beter beschreven, verbeterd en zo mogelijk geborgd kunnen worden. Indien dat mogelijk blijkt, dient het RIVM, in samenspraak met het Ministerie van Infrastructuur en Milieu en ProRail, nog in 2016 een voorstel te doen met welke methoden verder te gaan.

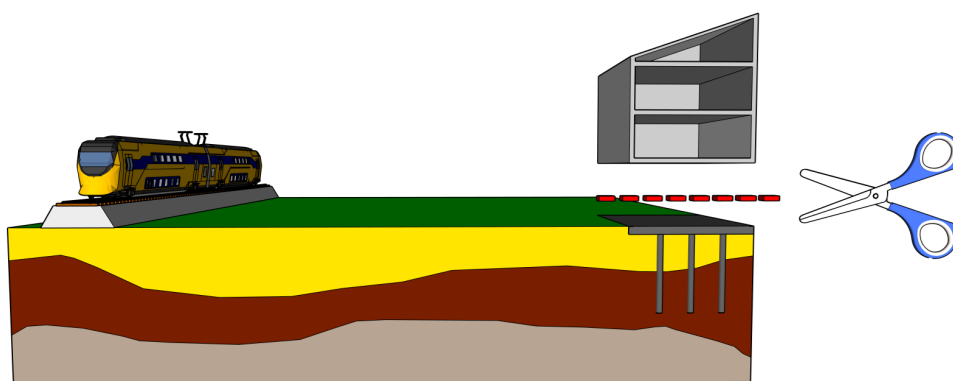
1.1.2 *Uitwerking vraagstelling*

Op basis van bovenstaande brief aan de Tweede Kamer heeft het RIVM van de directie Klimaat, Lucht en Geluid van het ministerie van IenM de opdracht ontvangen het voorliggende onderzoek uit te voeren. Daarbij is overwogen dat in het gehele pad van de trillingen van spoorconstructie tot vloer in een gebouw, de gebouwconstructie een specifiek onderdeel vormt. Het model voor het doorrekenen van het gebouw zal een ander model zijn dan het overdrachtmodel voor de trillingen door de bodem. Ook de invoergegevens hebben niet alleen een geheel andere vorm, maar komen ook uit een andere bron. Dat houdt in dat in de praktijk er in berekeningen altijd een tweedeling optreedt: eerst berekening van de trillingen die de fundering aanstoten en vervolgens uitgaande van die waarden, berekening van de respons van de constructie en de

veroorzaakte trillingsniveaus in (verdiepings)vloeren. Deze werkwijze komt wat systematiek betreft sterk overeen met geluidberekeningen, waar eerst de geluidbelasting op de gevel wordt berekend en van daaruit de geluidbelasting binnen een woning.

Het is om uitvoeringslasten te besparen op voorhand al duidelijk dat het ongewenst is om altijd bij alle aanwezige woningen trillingsniveaus binnen te berekenen. Immers als de trillingswaarden op de fundering al erg laag zijn, zullen waarden binnen niet overschreden worden. En als overschrijding niet kan worden uitgesloten is het de vraag hoe met de gebouwreactie moet worden omgegaan. Deze kan per pand namelijk sterk variëren, wat grote impact kan hebben op de onderzoekslast. Een globale aanname over de gebouwreactie, zoals dat bij geluid ook gebeurt (over de gevelisolatie), ligt voor de hand.

Dat was aanleiding om in de opdracht voor het voorliggende onderzoek de modellering van woningen zelf vooralsnog buiten beschouwing te laten. Dit betekent dat het onderzoek zich richt op trillingswaarden op de fundering en niet op (verdiepings)vloeren in woningen. In een aansluitend traject zal dan de afronding kunnen plaatsvinden van het gehele model van spoor tot gebouwvloer.



Figuur 1 Dit onderzoek tot op de fundering.

Bij onderzoek naar trillingen moet onderzoek worden verricht naar de impact van trillingen van de treinen in de toekomstige situatie (plansituatie). Nu er geen uniforme, voor het hele land toepasbare rekenmethode is, worden in de praktijk nu verschillende methoden gebruikt, vaak combinaties van meting en modellering. De vraag richt zich primair op een analyse van die bestaande modellen en methoden. Daarbij is ook beschouwd wat er internationaal beschikbaar is.

Vanuit die vraag is onderzocht:

1. Welke kwaliteit hebben de bestaande rekenmodellen?
2. Kunnen die modellen verbeterd worden?
3. Welk rekenmodel wordt voorgesteld?

Daarnaast is vanuit de opdrachtgever aangegeven dat het voor te stellen rekenmodel ook zou moeten leiden tot lagere uitvoeringslasten dan nu het geval is.

De genoemde drie vragen kunnen niet los van elkaar gezien worden. Vraag 1 naar de kwaliteit van modellen staat daarbij centraal. Daaruit ontstaat immers het beeld van de zwakke punten in de bestaande

modellen met betrekking tot de betrouwbaarheid en in bredere zin ook het inzicht in de kans dat verbetering tot een model of modellen met acceptabele uitkomsten zal kunnen gaan leiden.

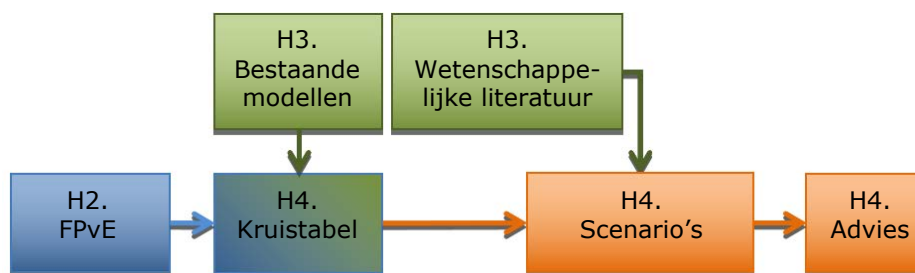
1.2 Aanpak

Om deze vragen te beantwoorden is duidelijkheid nodig over wat goed genoeg is en wat verbeteringen inhouden. Daarom starten we met de formulering van een functionele specificatie: een functioneel programma van eisen (FPvE). Het FPvE schept een referentiekader. Het FPvE is weliswaar kwalitatief, want een opsomming van aspecten zonder criteria, maar 'goed' en 'beter' kan in absolute zin worden gedefinieerd als de mate van dekking (aantal aspecten dat in een model zit) en in relatieve zin door de mate waarin een aspect beter wordt behandeld door een model t.o.v. een ander model.

Het opstellen van een FPvE maakt het mogelijk op voorhand 'vrij' vast te stellen wat nodig is. Vervolgens kan worden vastgesteld of een model **goed genoeg** is door de mate van dekking te bepalen.

De FPvE biedt een kader waarbinnen modellen onderling kunnen worden vergeleken, zodat **verbetering** boven tafel kan komen (door bijv. delen van modellen te combineren tot een rijker model).

Omdat de kans groot is dat er meer dan één manier is om via verbeteringen tot een gewenste rekenmethode te komen sluiten we niet af met één voorstel, maar met enkele scenario's. Een **scenario** bevat een route en een eindbeeld van een rekenmethode. Het heeft de bestaande modellen als vertrekpunt en benoemt de eventuele uit te voeren acties om tot een acceptabel rekenmodel te komen.



Figuur 2 Schematische weergave van de opbouw van dit rapport.

1.3 Draagvlak sector

Deze aanpak is in een workshop gedeeld met de trillingsdeskundigen van de ingenieursbureaus. Tijdens de workshop is een conceptversie van het rapport gepresenteerd met daarin het FPvE, een beschrijving van de bestaande modellen en een eerste versie van de kruistabel. De bevindingen en adviezen van de workshop zijn meegenomen in de beoordeling en scenariovorming waarmee het rapport eindigt.

1.4 Aandachtspunten

Er zijn enkele bekende issues waarmee in de modelvorming wordt geworsteld en die er mede toe hebben bijgedragen dat er niet al lang een rekenmethode is komen "bovendrijven". Deze issues betreffen met name:

- Goederentreinen zijn veelal maatgevend voor de huidige beoordelingssystematiek en ook maatgevend voor de hinder. Deze treinen zijn echter zeer variërend in bronsterkte. Dat komt onder meer doordat goederenwagens onderling sterk verschillen in ontwerp (type), in belading (aslast), en in onderhoudstoestand (loopeigenschappen).
- Specifiek voor de Nederlandse situatie is de complexe relatie tussen trein, baan en bodem bij wisselende bodemtypes. De scheiding tussen het brongebied (bodem onder het spoor) en het overdrachtsgebied (bodem tussen spoor en gebouwen) is niet precies te lokaliseren. De bodem bij het spoor oefent invloed uit op de trein en daarmee op het ontstaan van trillingen.
- De bodem beïnvloedt ook sterk de overdracht naar de omgeving en die invloed is locatie-afhankelijk omdat de bodemopbouw sterk varieert, zelfs op een schaal van tientallen meters.

Samenvattend zijn zowel de trein als de bodem grote bronnen van onzekerheid en spreiding. Die kan niet zo maar worden 'weggemiddeld'. De beoordelingssystematiek¹, gebaseerd op een maximum-in-een-week, is er zeer gevoelig voor. Bij het toetsen van de bestaande modellen aan het FPvE en het opstellen van scenario's dienen deze issues expliciet te worden behandeld.

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt eerst de definitie van 'rekenmodel' en van 'uitvoeringslasten' gegeven zoals die in deze studie wordt gehanteerd. Daarna volgt een uitgebreide functionele specificatie. Dat is het referentiekader waaraan de geschiktheid van bestaande modellen wordt getoetst.

Hoofdstuk 3 bevat een beschrijving van bestaande modellen. Dat betreft enerzijds de Nederlandse modellen die in spoorprojecten worden gebruikt en anderzijds de buitenlandse modellen die in Europese projecten zijn ontwikkeld of geëvalueerd.

Vanwege het belang van een goed begrip van de stochastiek van trillingen wordt in een aparte paragraaf aandacht besteed aan dat aspect.

De confrontatie van functionele specificaties (FPvE, hoofdstuk 2) en bestaande modellen (hoofdstuk 3) volgt in hoofdstuk 4 in de vorm van een kruistabel. Een en ander is voorgelegd op een workshop met trillingsdeskundigen (18 oktober 2016). De bevindingen van deze workshop en de beoordeling van de bestaande modellen (kruistabel) zijn verwerkt in een vijftal verbeterscenario's, die elk op een andere wijze leiden tot een uniforme aanpak voor trillingsprognoses. Uit een review van deze scenario's volgt tot slot een advies in hoofdstuk 5.

Een lijst met afkortingen en begrippen is als Bijlage A opgenomen achter in dit rapport. Bijlage B bevat uitleg over de verschillende generieke methoden voor trillingsmodellering. De kruistabel is als Bijlage C

¹ Bestaande uit de Beleidsregel trillinghinder spoor (Bts) en de door de Bts aangewezen delen van de SBR richtlijn B.

opgenomen. Bijlage D bevat een lijst met relevante en interessante publicaties.

1.6 Onderzoeksteam

Het onderzoek is in de periode van juli tot december 2016 uitgevoerd door een team bestaande uit Dolf de Gruijter (RIVM, projectleider), Arnold Koopman (Level Acoustics & Vibration), Edwin Verheijen (dBvision), Sven Lentzen (Level Acoustics & Vibration), Hendriek Boshuizen (RIVM) en John Bolte (RIVM).

2 Functionele specificatie

2.1 Doelstelling

Eisen

Een rekenmodel dat geschikt is voor de beoordeling van trillingshinder in woningen en werkruimten vanwege railverkeer (compatibel met de Bts).

Wensen

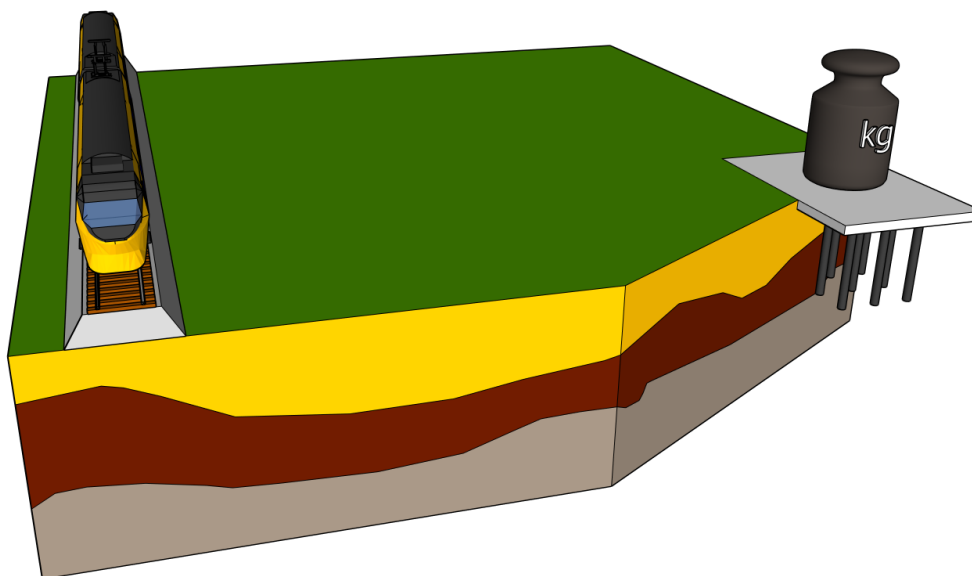
- ook geschikt voor beoordeling trillingssschade (SBR-richtlijn A);
- ook geschikt voor verstoring van gevoelige apparatuur (SBR-richtlijn C).

Toelichting

In het voorliggend onderzoek wordt rekening gehouden met een gefaseerde groei naar bovenstaande eindsituatie toe. In deze fase beperken we ons tot het bepalen van trillingsniveaus aan de fundering² (bron+bodemoverdracht), naar analogie met de systematiek bij omgevingslawaai (geluid aan de gevel).

Daarnaast dient de rekenmethode te worden uitgebreid met de overdracht van fundering naar de vloeren. Op dat moment is de rekenmethode compatibel met de Bts.

Een rekenmodel dat trillingen aan de fundering bepaalt, is inclusief de overdracht van trillingen van het maaiveld naar die fundering, zie Figuur 3.



Figuur 3 Dit onderzoek berekent trillingen op de fundering.

Opgemerkt wordt dat het voordelen kan bieden om vervolgens ook de overdracht naar hinderbeleving³ binnen het model te brengen. Het

² Deze worden in 3 dimensies (x,y,z) bepaald.

³ Hier wordt niet de trillingshinder bedoeld die de bewoners van de onderzochte woning zeggen te ervaren, maar een gegeneraliseerde trillingshinder. De mate van hinder kan bijvoorbeeld met behulp van blootstellings-responsrelaties in percentages (ernstig) gehinderden worden uitgedrukt.

berekenen van de Bts-trillingsmaten V_{\max} en V_{per} is immers slechts een middel om de trillingshinder te beoordelen. Een focus op hinderbeoordeling als het einddoel kan voordelen hebben voor de onderzoekslast en de maatregelen. Zo kunnen kosten voor onderzoekslast en maatregelen slinken omdat dubbele conservativiteit (conservatief model getoetst aan een conservatief hindercriterium) kan worden vermeden. Bovendien komt een nieuw type maatregelen in beeld: maatregelen die niet zozeer het trillingsniveau reduceren als wel de hinderbeleving bij een trillingsniveau.

De overdracht naar hinderbeleving kan een relatief eenvoudig onderdeel van het model worden door de fysische uitkomsten van het model te combineren met de bestaande beschikbare blootstellings-responsrelaties (relatie tussen V_{\max} en/of V_{per} enerzijds en percentages gehinderden en slaapgestoorden anderzijds).

Definitie rekenmodel

Bij de aard en betekenis van rekenmethoden, rekenmodellen, rekenvoorschriften e.d. kunnen verschillende beelden bestaan. In deze paragraaf worden deze voor dit document gedefinieerd.

In het spraakgebruik worden modellen en methoden vaak als synoniemen van elkaar gebruikt, maar in dit rapport maken we onderscheid tussen generieke **methoden**, zoals de Finite Element Method (FEM), en de implementaties daarvan in **modellen**, zoals ANSYS⁴.

Met betrekking tot gevraagde uniforme rekenmodel voor spoortrillingen zijn nog verschillende gradaties mogelijk:

1. Idealiter betreft het uniforme **rekenmodel** voor spoortrillingen een set rekenformules (of een numeriek rekenhart⁵), inclusief een database met parameterwaarden, en een handleiding (of modelleervoorschrift) die de gebruiker vertelt hoe gedetailleerd de werkelijkheid moet worden gemodelleerd, welke modelleerkeuzes er moeten worden gemaakt in bijzondere situaties, en hoe moet worden omgesprongen met ontbrekende parameterwaarden.

NB: Bij een rekenmodel kan ook gedacht worden aan een softwarepakket als praktische implementatie van dat rekenmodel. De stap van een uitgeschreven rekenmodel naar een foutloos werkend softwarepakket kan nog een behoorlijke inspanning zijn, afhankelijk van de complexiteit van de modelopzet, de wensen voor de gebruiksvriendelijkheid en de compatibiliteit met gangbare invoer- en uitvoerformaten.

⁴ Doorgaans wordt ook het gemodelleerde object zelf een model genoemd (bijv. het model van een bepaalde wohntoren bij het spoor), maar daar gaat het in dit rapport niet over.

⁵ Modelleersoftware bestaat meestal uit een grafische *user-interface* (GUI, datgene wat de gebruiker op zijn scherm ziet, waarin de werkelijkheid wordt gemodelleerd: gebouwen, spoorlijnen, invoervelden, keuzelijsten, etc) en een *rekenhart*. Het rekenhart bevat de rekenformules. Het is een apart computerprogramma dat wordt opgestart vanuit de user-interface op het moment dat de gebruiker op de rekenknop drukt. Pas dan starten de berekeningen.

Ter vergelijking: voor geluid is de wijze van modellering beschreven in de regeling Reken- en meetvoorschrift geluid 2012 (Rmg 2012). Hoewel de titel anders doet vermoeden, is dit vooral een rekenvoorschrift. Voor metingen verwijst het Rmg door naar afzonderlijke voorschriften of normen (NEN/ISO).

Eenzijds bevat het Rmg de rekenformules en parameterwaarden (voor de softwareprogrammeur) en anderzijds bevat het een modelleervoorschrift (voor de geluidsadviseur).

De softwarepakketten waarin de rekenformules en parameterwaarden van het Rmg in Nederland zijn geïmplementeerd (Geomilieu en Winhavik), zijn commerciële producten. Deze worden niet gecontroleerd of beheerd door de overheid, zoals dat wel gebeurt bij bijvoorbeeld de rekenpakketten voor luchtkwaliteit en externe veiligheid.

2. Onder een rekenmodel kan ook een **methodiek** worden verstaan die bestaat uit het aanwijzen van enkele bestaande modellen plus richtlijnen hoe en in welk toepassingsbereik⁶ die te gebruiken, mogelijk aangevuld met rekenregels en een database. In dit kader is het mogelijk dat een generieke methode voor modellering van mechanische trillingen, zoals FEM/BEM, wordt voorgeschreven in bepaalde (complexe) situaties, terwijl voor andere situaties een eenvoudigere aanpak van toepassing wordt verklaard.
3. Tot slot, een nog vrijere vorm kan zijn dat het rekenmodel een **voorschrift** betreft dat vertelt aan welke eisen een in te zetten methode moet voldoen, hoe men bepaalde effecten in rekening moet brengen, welke uitgangspunten er moeten worden gehanteerd, zonder echter concrete modellen of methoden aan te wijzen.

Definitie uitvoeringslasten

In de huidige praktijk van spoorproject waarin trillingen worden beoordeeld, gaat het trillingsonderzoek gepaard met aanzienlijke onderzoekslasten. Deze omvatten modellering, trillingsmetingen, en onderzoek naar dimensionering van maatregelen. In dit rapport definiëren we *onderzoekslasten* als het totaal aan kosten voor trillingsonderzoek, gerekend vanaf de start van de planvorming tot aan het (Tracé)besluit. Dit betreft ook het maatregelonderzoek, waarin de locatie en dimensionering van maatregelen wordt bepaald. Daarnaast rekenen we de (lange) doorlooptijd en de overlast voor bewoners op wiens vloer trillingsmetingen worden uitgevoerd (ze mogen de metingen niet verstoren), mee als onderzoekslast.

De kosten voor de *realisatie* van de genomen maatregelen uit het besluit, dit wil zeggen de engineering, onderzoek kabels en leidingen, de bouw van die maatregelen, en de opleveringstoets uit de Bts, maken geen deel uit van de onderzoekslast. Deze kosten zijn vaak een veelvoud van de onderzoekslasten. Ze tellen wél mee in de totale uitvoeringslasten.

⁶ Een toepassingsbereik is een situatie waarin een model geldig is, zoals: "te gebruiken bij eenvoudige geometrieën" (bijv. doorgaand spoor zonder obstakels tussen spoor en gebouwen), "te gebruiken voor situaties met wissels en/of betonnen kunstwerken", etc.

Met andere woorden, de *uitvoeringslasten* bestaan uit de som van onderzoekslasten en de lasten voor de realisatie van eventuele trillingsmaatregelen.

2.2 Eisen aan de bruikbaarheid

2.2.1 *Mate van gedetailleerdheid*

We onderscheiden een aantal niveaus van gedetailleerdheid van een rekenmethode. In oplopende volgorde van gedetailleerdheid komen de volgende niveaus voor bij trillingsonderzoek.

Scoping

Antwoord op de vraag: dienen trillingen onderzocht te worden?

Voorbeeld: een eenvoudige afstandscontour met een orde van grote van circa 150 meter. Buiten 150 meter geldt $V_{\max} < 0,2$.

Toepassing: Milieueffectrapportages (MER's)

Screening

Antwoord op de vraag: in welke gebouwen wordt mogelijk niet aan richtlijnen voldaan en is nader onderzoek nodig.

Voorbeeld: afstandsrelaties, gebaseerd op de zgn. Barkan-formule en in-situ gemeten trillingsniveaus. (Meer over Barkan in Bijlage B.7).

Toepassing: Tracébesluiten (TB's)

Gedetailleerd

Antwoord op de vraag: wordt in een gebouw aan de richtlijnen voldaan, eventueel na maatregelen?

Voorbeeld: numerieke modelleringen en/of gedetailleerde metingen

Toepassing: knelpuntonderzoek in TB's

Ter vergelijking: bij verkeersgeluid is van 'gedetailleerd onderzoek' sprake als een nieuw type geluidmaatregel wordt onderzocht, waarvoor nog geen rekenregels bestaan in de wettelijke rekenmethode (actueel voorbeeld: de diffractor-goot).

Een ander voorbeeld is het gevelweringsonderzoek, waarbij maatregelen worden beoordeeld om het binnenniveau van een bepaalde woning te laten voldoen. Hiervoor bestaan aparte voorschriften en rekensoftware, los van Rmg 2012.

2.2.2 *Gebruikers*

Vanuit de verschillende soorten gebruikers van een rekenmodel kunnen verschillende eisen of wensen bestaan. Het is daarom nuttig na te gaan welke 'gebruikers' er zijn. We onderscheiden twee soorten gebruikers: zogenaamde lead-users en de end-user. De end-user is de uiteindelijke *beneficiary*, in dit geval het Ministerie van Infrastructuur en Milieu, die aan de ene kant railverkeer mogelijk wil maken, maar aan de andere kant de omgeving wil beschermen tegen nadelige effecten.

De lead-users zijn de meest directe gebruikers van het rekenmodel, zij die aan de knoppen zitten. In dit geval zullen dat vooral onderzoekers/adviseurs bij adviesbureaus of ProRail zijn. Deze lead-users werken meestal in opdracht van een projectbureau of een aannemer.

Eisen end-user

- voor MER/TB projecten waarbij sprake is van betrokkenheid van railverkeer;
- voor scoping;
- voor screening;
- input vereist niet meer dan de gebruikelijke, reeds beschikbare informatie (beperking onderzoekslast);
- voor bestaande situaties, nieuwe situaties en wijzigende situaties;
- voor berekening effect trillingsmaatregelen;
- ter ondersteuning van de beoordeling van de doelmatigheid van maatregelen;
- output is indifferent onder variatie lead-user (d.w.z. bureau-onafhankelijk);
- output is meetbaar;
- output is in ieder geval V_{\max} en V_{per} conform Bts en SBR (Bts leidend).

Wensen end-user

- voor gedetailleerd onderzoek,
- voor maatregelonderzoek.

NB: maatregelonderzoek kent twee stappen: eerst een gedetailleerd onderzoek naar de dimensionering en het fysisch effect van een maatregel, dan het inbrengen van dit effect in een screening model om het effect op de omgeving te berekenen. Het laatste is een eis, het eerste een wens.

NB2: Met het oog op die verwevenheid tussen screenend onderzoek en gedetailleerd onderzoek is het gewenst dat de rekenmethode ook gedetailleerd aan kan, en bovendien op hetzelfde niveau (screening en detailonderzoek in hetzelfde model). Dit kan onhaalbaar blijken. Een meer haalbare optie is om voor het detailonderzoek in ieder geval een rekenvoorschrift te hebben. De rekenmethode bestaat dan uit de volgende twee onderdelen:

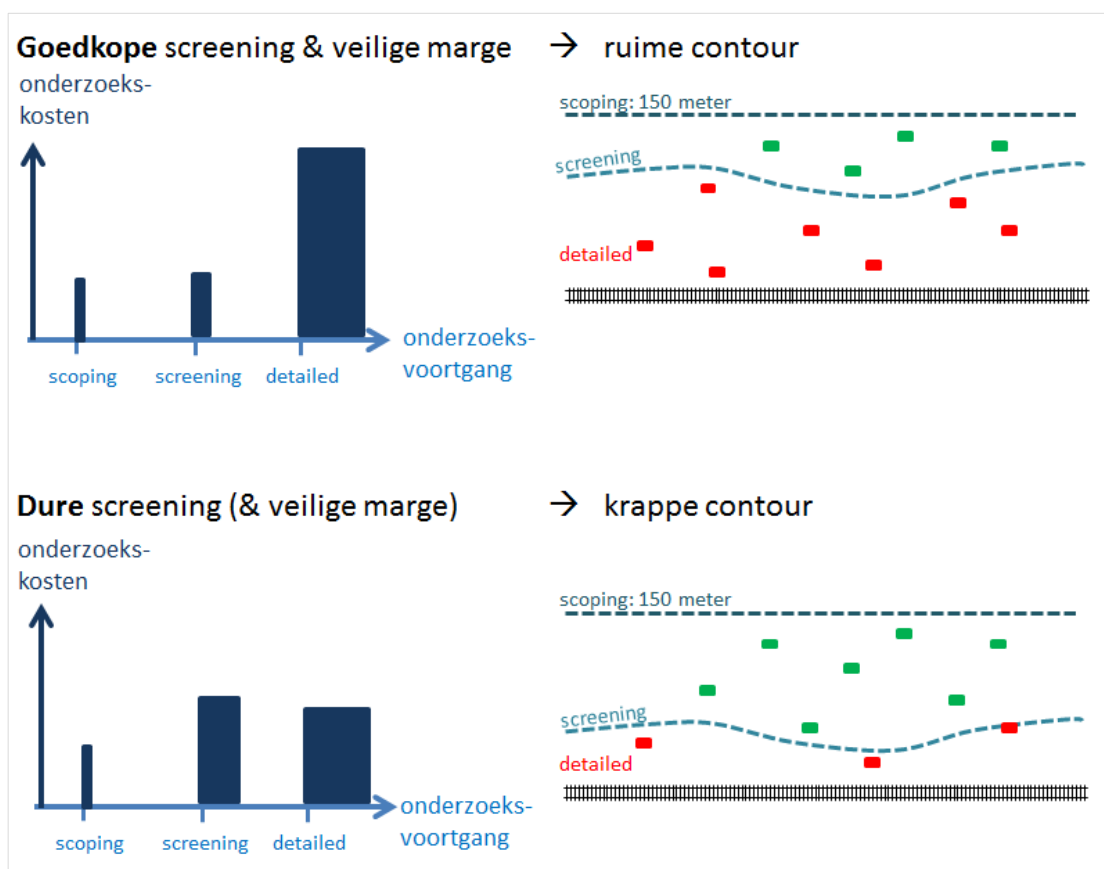
- Een model of een methodiek voor scoping en screening.
- Een voorschrift voor gedetailleerd onderzoek en maatregelontwerp waarvan de resultaten terug in worden gebracht in het model.

NB3: De onderzoekslast bij scoping, bij screening en bij gedetailleerd onderzoek vormen 'communicerende vaten' waar een optimum in moeten worden gezocht.

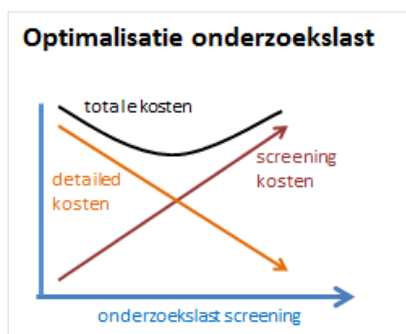
Onderstaande grafieken lichten dit toe. Bij scoping wordt bijvoorbeeld een vaste (ruime) afstand gebruikt tot het spoor, waarop het vervolgonderzoek zich richt. Dit volstaat voor een eerste schatting van het aantal potentiële trillingsgevoelige locaties (bijvoorbeeld in de MER-fase).

Bij de screening wordt het treinverkeer, de spoorconstructie en de bodem in het rekenmodel betrokken om meer nauwkeurig de afstand van de trillingscontouren te bepalen. Als de onderzoekslast in die fase laag wordt gehouden, zie Figuur 4 bovenste deel, moet een ruime marge worden ingebouwd (d.w.z. kans op overschatting

trillingsniveaus). Er zullen relatief veel potentiële knelpunten resteren, waarvoor gedetailleerd onderzoek nodig is. In het gedetailleerde onderzoek wordt het rekenmodel verfijnd met behulp van metingen op maaiveld en in de woningen, wat hoge onderzoekskosten meebrengt. De totale kosten zijn in dat geval hoger dan wanneer bij de screening wat meer detaillering is gebruikt (onderste deel). In paragraaf 3.5.4 wordt de Deense manier als een typisch voorbeeld van scoping en screening beschreven.



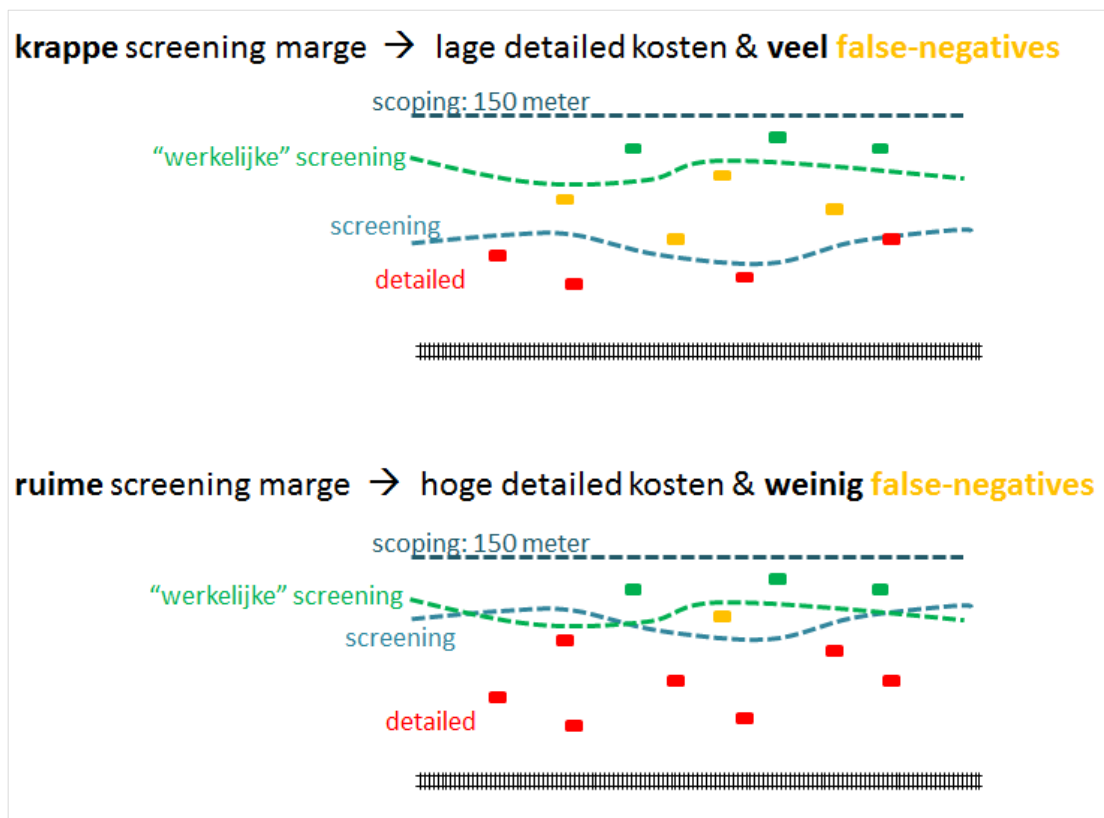
Figuur 4 Screening en onderzoekslast gevisualiseerd met woningen langs een spoorlijn.



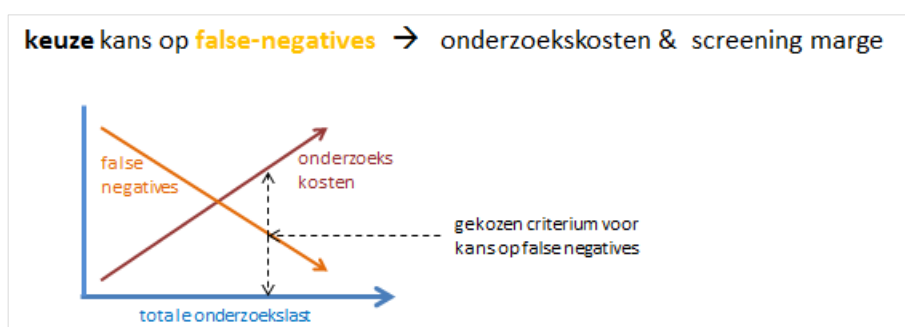
Figuur 5 Totale onderzoekslast afhankelijk van insteek bij de screening.

NB4: De onderzoekslast en *false negatives* (gebouwen die ten onrechte niet voor nader onderzoek en/of maatregelen in aanmerking komen) vormen ook communicerende vaten. Voor deze tweede vorm van

onderzoekslastcommunicatie is een principieel standpunt noodzakelijk: welk niveau van *false negatives* is acceptabel? Onderstaande grafieken (Figuur 6 en Figuur 7) lichten dit toe.



Figuur 6 Krappe en ruime screening: effect op kosten en false negatives.



Figuur 7 Onderzoekslast en criterium voor false negatives.

Eisen lead-users

- model maakt onderscheid naar die aspecten die vaak variëren bij een onderzoek:
 - treintype,
 - treinsnelheid,
 - treinfrequentie,
 - bovenbouwtype,
 - onderbouwtype,
 - baanvariaties (met name: wissels, spoorwegovergangen),
 - bodemgesteldheid,

- gebouwconstructie,
- vloerconstructie [valt buiten deze fase].
- model genereert meetbare output (voor sanity-check, verificatie, validatie, etc.)

Wensen lead-users

- Modulair, om, bij nader onderzoek, onderdelen te vervangen door eigen methoden (numerieke modellen, metingen, etc.)⁷.
- Ingebouwde alarmbel voor situaties buiten de technische scope van het model .
- Ingebouwde alarmbel voor knelpunten, dus automatische identificatie van knelpunten (locaties waar gedetailleerder onderzoek geadviseerd wordt).
- Geeft aan op welke onderdelen nader onderzoek zich zou moeten richten.

2.2.3 *Eisen aan de kwaliteit*

Eisen

- **Robuustheid.** Een "kleine" verandering van de input, gerelateerd aan onzekerheid over en/of natuurlijke variatie in die input, mag niet leiden tot grote veranderingen in de output. Onderdelen van het model die wel dat effect kunnen hebben (zoals resonantie die net wel of net niet optreedt) dienen daar stochastisch mee om te gaan: het gaat niet om het voorspellen van elke unieke situatie maar van een algemeen gemiddeld beeld.
- **Resolutie.** Een "significante" verandering van de input, groter dan de onzekerheid over en/of natuurlijke variatie in die input, dient te leiden tot een significante verandering in de output. Dit dient te gelden in het "werkgebied" van de input: die inputwaarden die er toe doen en daarom tot input zijn gekozen (denk aan treinsnelheden met als werkgebied 40 en 160 km/uur).
- **Domein.** Het inputdomein (range van invoerwaarden) dient bekend te zijn.
- **Validatie/Interpolatie.** De methode dient te zijn vergeleken met metingen voor een zo groot mogelijk aantal punten in het domein. Het domein binnen de punten kan dan als gevalideerd domein worden beschouwd.
- **Verificatie/Extrapolatie.** De methode dient te zijn vergeleken met meer gedetailleerde modellen voor alle punten in het domein. Het domein buiten het gevalideerd domein kan dan in ieder geval als geverifieerd worden beschouwd.
- **Transparantie.** Alle onderdelen van de methode, zoals fysische schematisering, empirische data, etc., dienen te zijn beschreven,

⁷ Hier wordt niet voorgesteld om particuliere methodes te laten concurreren met het rekenmodel. Het gaat om de situaties die buiten het toepassingsbereik van het rekenmodel liggen. Een belangrijk voorbeeld is de stap van screening naar gedetailleerd prognosticeren. Indien het rekenmodel niet voorziet in detailprognoses zullen bureaus met eigen methodes verder moeten. Het is echter niet praktisch en ook niet gewenst dat het complete bron – overdrachtssysteem opnieuw wordt gemodelleerd. Meestal gaat het alleen om dat onderdeel waar veel onzekerheid over is en/of maatregelen worden ontworpen. Het is gewenst dat voor de beschrijving van de rest van het systeem het rekenmodel wordt gebruikt. Het rekenmodel en de particuliere methodes moeten dan wel op elkaar aan te sluiten zijn.

inclusief gesignaleerde beperkingen, uitsluitingen etc. Van empirische data dient bijvoorbeeld bekend te zijn wat de meetopstelling was en hoe de meetdata is verwerkt en volgens welk meetvoorschrift is gewerkt.

- **Betrouwbaarheid.** De methode dient een bandbreedte te geven bij het resultaat. De methode is dus niet conservatief maar geeft een verwachtingswaarde plus een spreiding. Als toetswaarde kan een 95%-waarde worden genomen, van een modelresultaat of van een verhouding tussen modelresultaten (toetsing toenames), conform de meetmethode voor de Bts.

Wensen

Kwaliteitsgroei.

Idealiter is er de mogelijkheid om het model te updaten, te groeien naar de eindspecificaties toe, terwijl het al in gebruik is. Bijvoorbeeld eens in de zoveel jaar op 1 januari. Reden is dat aan de kwaliteitseis validatie niet direct zal kunnen worden voldaan. Het is voorstelbaar dat een methode in gebruik wordt genomen die nog validatie behoeft, of waar überhaupt nog aan gewerkt wordt, nog updates behoeft e.d. Dat is uiteraard niet praktisch, maar het is beter dan de huidige situatie.

Er zijn (tenminste) twee soorten updates te onderscheiden:

- Update van de rekenmethode. Dit zou bijvoorbeeld eens in de 5 jaar kunnen gebeuren.
- Update van de rekenwaarden (invoergegevens). Bijvoorbeeld eens per twee jaar. Juist wat betreft de rekenwaarden is nl. een steile leercurve te verwachten. Enerzijds is het mogelijk opportuun om alvast met de methodiek te starten terwijl nog niet voor alle situaties voldoende rekenwaarden beschikbaar zijn. Dat is de eerste paar jaar denkbaar. Anderzijds zullen op een gegeven moment validaties beschikbaar komen die mogelijk aanleiding geven tot aanpassing van de rekenwaarden.

Voor de kwaliteitsgroei zal e.e.a. moeten worden opgetuigd:

- Een (levend) overzicht van de zwakke plekken en gaten in de invoerdata
- Acties om de invoerdata te verbeteren
- Een centraal beheerde database voor meetresultaten en rekenresultaten
- Afspraken over een uniforme vastlegging van dat soort data alsmede de bijbehorende metadata (situatiebeschrijvingen)
- Geplande toetsmomenten (validatie), met ruimte voor daaruit voortvloeiende acties.
- Geplande toetsing van het formalisme.

2.2.4

Eisen aan de fysische beschrijving

In de bijlage is een behandeling opgenomen over de fysica van spoortrillingen: de wijze waarop ze ontstaan en zich voortplanten, de invloeden erop en de wijze waarop ze kunnen worden beschreven. Het model zal deze fysica moeten bevatten.

Impliciet of expliciet dienen de volgende mechanismen te worden meegenomen in het model.

Eisen

- Bron:
 - spoorgeometrie
 - oneffenheden bij wissels en bij baanovergangen (viaducten, spoorwegovergangen, etc.)
 - moving load (quasi-statische indrukking)
 - variatie van trillingsniveau op de twee tijdschalen (tijdens passage en tussen passages)
- Effecten op bronmechanismen:
 - invloed van de trein op de bronmechanismen
 - invloed van de baan op de bronmechanismen
 - invloed van baanmaatregelen op de bronmechanismen
 - invloed van de bodem op de bronmechanismen (zware trein op slappe grond, etc.)
- Overdracht
 - invloed van de bodemgesteldheid (tot ongeveer 15 meter diepte)
 - invloed van de geometrie van de situatie (afstanden etc.)
 - invloed van bodemmaatregelen op de overdracht
 - invloed van de gebouwfundering en gebouwconstructie op de overdracht
 - invloed van vloeren op de overdracht [valt buiten deze fase]

Wensen

- bron: stijfheidsvariatie en geometrievariatie in de onderbouw (impliciet al in gemeten spoorgeometrie)
- bron: wielgeometrie (onrondheid, vlakke plaatsen, etc.)
- invloed van verende lagen in de baan (pads, ballastmatten, etc.)
- invloed van draaisteldynamica

2.2.5*Eisen aan distributie en onderhoud*

Met het rekenmodel kan pas gerekend worden nadat het is geïmplementeerd in een softwarepakket. De implementatie in een softwarepakket kan aan de markt worden overgelaten of vanuit de overheid worden geregeld. In het laatste geval kan de overheid ervoor kiezen ofwel de software zelf beschikbaar te stellen, ofwel goedkeuring te verlenen aan rekenpakketten. Het stellen van eisen aan distributie en onderhoud hangt af van die keuze. In het algemeen kan men denken aan verschijningsvormen als:

- Document met formules, databases met standaard invoerwaarden
- Implementatie in een software tool
 - standalone applicatie
 - Excel workbook
 - dll (apart stukje programmacode, bijvoorbeeld voor het rekenhart)
 - GIS module

3 Inventarisatie bestaande modellen

3.1 Inleiding

Voor de inventarisatie van bestaande modellen is onze aanpak als volgt. Eerst bestuderen we eerdere inventarisaties, voornamelijk om vast te stellen waarop gelet moet worden. Bovendien leveren die de eerste input voor een *long-list* aan huidige modellen. Vervolgens werken we uit wat er over de modellen boven tafel moet komen. Dat is enerzijds op basis van de leerpunten van de eerdere inventarisaties en anderzijds op basis van de functionele specificatie van eisen.

We gaan na welke rekenmodellen en analysemethoden reeds in Nederlandse spoorprojecten zijn gebruikt door de ingenieursbureaus en we beschrijven die modellen. Ook voeren we een literatuurscan uit naar recente internationale publicaties, om er zeker van te zijn dat we de laatste ontwikkelingen op dit gebied in beeld hebben. Dit levert bovendien inzicht in de verbetermogelijkheden voor de in Nederland gebruikte rekenmodellen. In de wetenschappelijke literatuur gaat het overigens vaak om een deelmodel, dit wil zeggen een model dat slechts een deel van de gehele keten van bron naar ontvanger in detail beschrijft. We beschrijven die internationale (deel)modellen aan de hand van de vragen.

Omdat een juiste beschrijving van de stochastiek bij trillingsprognoses van groot belang is, krijgt dit aspect een aparte paragraaf.

3.2 Eerdere inventarisaties

In het verleden zijn er vaker inventarisaties uitgevoerd, vaak in het kader van (inter-)nationale onderzoeksprojecten. De belangrijkste, vanwege hun breedte en hun gerichtheid op screening, zijn RENVIB II en BET Verkeer. Andere inventarisaties, zoals binnen CargoVibes en RIVAS, beperkten zich tot specifieke onderdelen, zoals methoden voor maatregelonderzoek.

3.2.1 RENVIB II

In de jaren 90 is door de ERRI (European Rail Research Institute, een inmiddels opgeheven onderdeel van de internationale spoorwegunie UIC) een drietal onderzoeken uitgevoerd naar het voorspellen en bestrijden van spoortrillingen: RENVIB I, II en III. Het tweede onderzoek start met een State of the Art (SotA) van empirische modellen, uitgevoerd door Ather Sharif (toen van Civil Engineering Dynamics) en "mathematische" modellen, uitgevoerd door Michel Villot (CSTB). In beide gevallen is de sector (spoorbedrijven, bureaus, onderzoeksinstituten en universiteiten) bevraagd door middel van enquêtes en zijn literatuurscans uitgevoerd. Dit leverde een reeks aan modellen op die te scharen zijn onder de volgende methoden (deze methoden worden verderop in dit hoofdstuk of in de bijlage behandeld):

- Finite Element- en Boundary Element Method (FEM resp. BEM)
- Statistical Energy Analysis (SEA)
- Numerieke trein-baan-bodem modellen
- Analytische halfspace
- Een reeks aan empirische modellen, waaronder VIBRA (Zwitserland).

Het doel van deze inventarisatie was om modellen te kiezen die in de tweede fase van RENVIB II gebruikt moesten gaan worden om een reeks aan maatregelen door te rekenen. De conclusie was dat de modulair-empirische modellen daarvoor niet geschikt zijn en dat deze verder maar matig gevalideerd zijn. De numerieke modellen (met name FEM) waren weliswaar toen nog niet in staat tot goede "absolute" voorspellingen maar wel goed toegerust voor relatieve voorspellingen zoals de mate van trillingsreductie door een maatregel. Fase 2 is toen ingegaan met enkele bureaus/instituten die werkten met FEM.

Uit de SotA bleek verder dat in een aantal landen, waaronder Duitsland, Zwitserland, Frankrijk en de VS, bij spoorprojecten trillingsonderzoek werd uitgevoerd met een screenend model. Deze screenende modellen waren empirisch (gebaseerd op metingen) met toeslagfactoren voor veranderingen t.o.v. een referentiesituatie (toeslag voor hogere treinsnelheid, toeslag voor houten vloer, etc.). Een alternatief voor (in feite een logisch vervolg op) de toeslagfactoren waren de modulair empirische modellen. Dit zijn modellen die het systeem, van bron tot ontvanger, in modules opdeelt en per module een empirische bronsterkte of overdracht bepaalt. Dit biedt de mogelijkheid om bij nadere studie alleen die onderdelen nader te modelleren, bijvoorbeeld met FEM, waarover de empirie onzeker is of waar maatregelen kunnen worden genomen.

In Nederland ging men op dat moment nog een stapje verder en werd een numeriek modulair screening model ontwikkeld: L400 (het latere DC-Viran). Daarbij werd in Nederland overigens die eerste stap, een empirisch screenend model overgeslagen. De rationale daarachter was dat de Nederlandse bodem, met zijn gelaagdheid en met zijn inwerking op de dynamica van de spoorbaan (door zijn slappe) hoge eisen stelt aan de modellering en dat in de sinds de jaren 70 door de NS opgebouwde empirie geen lijn te vinden zou zijn.

De SotA had nog een spin-off: de opstellers (met name Ather Sharif) namen het initiatief tot een ISO-norm voor spoortrillingspredicties: ISO-14387.

3.2.2 *BET Verkeer*

De inventarisatie die onder BET Verkeer (2009) was uitgevoerd had tot doel de methodiek te signaleren die het meest kansrijk is voor een "standaard rekenmodel". Sterktes en zwaktes van de toen beschikbare methoden werden beschreven, zie Tabel 1, en het kwam inderdaad tot een keuze: die voor de equivalente lijnkrachtmethode. Deze had als voornaamste zwakte dat interactie (tussen bron, bodem en gebouw) niet in rekening werd gebracht. In het vervolgtraject, waarin het rekenmodel werd ontwikkeld, werd voor deze zwakte vervolgens een oplossing gevonden. Het resultaat is wat nu SRM-T heet.

Leerpunten uit deze inventarisatie:

- Met stochastiek werd, tot dan, bijna geen rekening gehouden
- Koppeling en interactie worden vaak niet in rekening gebracht
- De meeste modellen zijn niet gevalideerd.

Tabel 1 Sterkte-zwakte analyse uit BET Verkeer

	Barkan	Equivalente lijnkracht	Analytische halfruimte	Raytrace	Multi-body physics	BEM	FEM	Auersch	VROM (1995 rapport)	de Grande (Leuven)	DC-Viran
	■	✓	✓	■	✓	■	■	✗	✗	✓	✓
moving load	■	✓	✓	■	✓	■	■	✗	✗	✓	✓
oneffenheden wiel/rails	■	✓	✗	■	✓	■	■	✓	✗	✓	✓
discontinuïteiten spoor	■	✓	✗	■	✓	■	✓	✓	✗	✓	✓
Kunstwerken	■	✓	✗	■	✓	■	✓	✗	✗	✓	✗
oneffenheden baan	■	✓	✗	■	✓	■	✓	✓	✗	✓	✗
type spoor	■	✓	✗	■	✓	■	✓	✓	✗	✓	✗
golfkarakter	✗	✓	✓	✗	■	✓	✓	✓	✗	✓	✗
stochastiek bodem	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓
koppeling subsystemen	■	■	■	■	✓	✓	■	✓	✓	✓	✗
onafhankelijkheid trillingsbron/bodem	✗	✗	✗	■	✓	✓	■	✓	✗	✓	✓
validatie	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗
gebruikersvriendelijk	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗

✓ OK
✗ niet OK
■ n.v.t.

3.3 Modelhiërarchie

Een model beschrijft een systeem met een zeker detailniveau volgens een bepaalde schematiseringsmethode. Een systeem, zoals het ontstaan en de voortplanting van treintrillingen, is meestal op meer dan één detailniveau te schematiseren. Er is in het algemeen sprake van een hiërarchie van methoden: de ene methode is gedetailleerder dan de andere. Als methoden op hun detailniveau uitputtend zijn in de systeemeffecten die er expliciet (als variabele of parameter) of impliciet (verborgen in de schematisering) in zitten, is de abstractere methode te beschrijven in de meer gedetailleerde.

Bijvoorbeeld, de bodem in het overdrachtsgebied kan wat betreft gelaagde structuur heel complex zijn. Het is denkbaar dat rekenmodel A die complexiteit in geometrie en laag-eigenschappen heel gedetailleerd in de berekeningen meeneemt, terwijl rekenmodel B volstaat met één simpele formule en één parameter waarmee de effectieve overdracht wordt beschreven voor de betreffende bodemklasse. Rekenmodel B is dan abstracter, d.w.z. hoger in de hiërarchie, maar niet per se nauwkeuriger. Rekenmodel A, lager in de hiërarchie, kan rekenmodel B volledig beschrijven. Hoog en laag zijn hier dus geen kwaliteitsoordelen. Deze schematisering is nuttig omdat ze aangeeft op welk model terug kan worden gevallen als een abstract model tekort lijkt te schieten.

Bij treintrillingen, zoals bij veel complexe systemen, is er een verzameling methoden ontstaan die zich op een aantal niveaus bevinden. Er zijn zeer gedetailleerde methoden, die het systeem (trein,

baan, bodem, etc.) met veel parameters (honderden, duizenden) beschrijven, maar ook zeer globale, die met enkele parameters volstaan. Er is echter nauwelijks sprake van een nette hiërarchie: gedetailleerde methoden bevatten vaak niet alle mechanismen, die globalere modellen dan weer wel (impliciet) meenemen. Dit is een probleem omdat in regulier trillingsonderzoek, waarbij met steeds meer detail naar een probleem wordt gekeken, de methoden niet op elkaar aansluiten. Bij bijvoorbeeld maatregelontwerp is het met een zeer gedetailleerd model niet langer zeker dat de werkelijkheid goed wordt beschreven.

Verder beschrijven de methoden in principe maar een deel van het systeem en dienen voor een complete beschrijving methoden te worden gecombineerd. Er kunnen dan de meest uiteenlopende mengvormen ontstaan. Een belangrijke mengvorm is het zogenaamd "hybride" modelleren waarbij modellen met metingen (in feite ook een schematisering, dus een modelmethode) worden gecombineerd. Gewenst is een methode die op zijn niveau (in dit geval: screenend) het hele systeem op een evenwichtige wijze beschrijft: consequent in detailniveau en compleet in relevante fysische effecten. Zo'n methode is echter niet op voorhand aan te wijzen. Dat mag blijken uit het feit dat de huidige ontwikkelaars en gebruikers van methoden en modellen verschillende aanpakken hanteren en daar ook in de loop van hun onderzoekswerk in evolueren.

Het is dus noodzakelijk de bestaande methoden nader te analyseren.

De gangbare methoden waarop modellen zijn gebaseerd, zijn te categoriseren naar de volgende drie detailniveaus. Belangrijk is op te merken dat de methoden in principe maar een deel van het systeem beschrijven: de bron en/of bodemoverdracht en/of gebouwreactie.

Gedetailleerd (onderdelen < golflengte)

- FEM
- BEM, FDM, etc

Gecondenseerd

- Raytracing
- Superelementen
- Rigid-body
- Analytisch (bijv. halfspace)
- SEA

Geglobaliseerd (geen onderdelen)

- Barkan
- Equivalente lijnkracht

Een beschrijving van deze *generieke rekenmethoden* voor trillingen is opgenomen in bijlage B. Deze methoden, of delen ervan, zijn geïmplementeerd in *rekenmodellen* specifiek voor spoortrillingen. Bij elk model voor spoortrillingen is een adequate beschrijving van de stochastiek noodzakelijk. Wat hiermee bedoeld wordt, wordt uiteengezet in de volgende paragraaf.

In de daaropvolgende paragrafen wordt vervolgens een beschrijving gegeven van de bestaande rekenmodellen voor spoortrillingen. In §3.5

betreft het rekenmodellen die al in de praktijk worden toegepast in Europa. In §3.6 gaat het om modellen die uit (recente) wetenschappelijke publicaties naar voren komen.

3.4 Stochastiek

De grootste uitdaging voor een trillingsmodel is de "stochastiek van de situatie", de grote mate waarin belangrijke factoren in de praktijk variëren. Die variatie is er niet alleen tussen situaties (zoals de grote variatie aan bodemopbouw die we in NL kennen) maar ook binnen situaties (zoals de verscheidenheid aan treinen die passeren en aan constructiewijzen van woningen). De impact van al die stochastiek wordt vergroot door de keuze van een maximum, nl. V_{max} , als beoordelingsgrootte. Het gaat om een maximum (in een week) van maxima (hoogste waarde tijdens een passage). Deze grootte blijkt voorspellend te zijn voor hinder en voor slaapverstoring en vormt daarom niet ten onrechte de basis van de regelgeving, maar is zeer lastig te meten en te berekenen.

Deterministische modellen, zoals FEM e.d., geven zich geen rekenschap van deze stochastiek. Ze gaan ervan uit dat de invoergegevens goed bekend en vaststaand zijn en komen zo tot een precieze voorspelling. Stochastiek kan worden geïntroduceerd door herhaaldelijk het model te draaien waarbij de invoergegevens worden gevarieerd binnen bandbreedtes: het zogenaamde Monte-Carlo-proces. Gedetailleerde modellen hebben daarbij als bijkomend probleem dat de invoergegevens voor een groot deel niet direct meetbaar, laat staan beschikbaar, zijn. Vertaling van wat wel bekend is (type trein) naar wat nodig is (veerstijfheid van bak op het draaistel) introduceert wederom een stochast.

Dit verklaart mede waarom onderzoek op grond van metingen, en de daaruit voortgekomen empirische modellen, zo'n vlucht heeft genomen. Bij empirische modellen wordt veel stochastiek impliciet meegenomen. Het is niet langer nodig van elke kubieke meter bodem alle materiaalgegevens te kennen, alles zit in de metingen. Daar staat tegenover dat er nieuwe stochasten voor terugkomen: bijvoorbeeld de kwaliteit van de meetdata, maar ook de mapping (vergelijking) van een prognose-situatie op de empirie, op grond van (vaak heel magere) informatiebeschrijvingen. Zoals deterministische modellen met Monte Carlo een (incomplete) onzekerheidsband krijgen, zo kunnen empirische modellen worden opgewerkt met Machine Learning, Random Forest of andere technieken, die weliswaar bandbreedtes leveren maar die genoemde nieuwe stochasten vaak niet behandelen.

Het is dus van groot belang bij een gekozen modelaanpak alle stochasten te onderkennen en te behandelen. Dan pas kan blijken of een empirische aanpak betrouwbaarder of minder betrouwbaar is dan een deterministische. In dit hoofdstuk gaan we hier nader op in. Maar we beginnen met een voorstel om in ieder geval één stochast uit te schakelen: het bepalen van een maximum.

3.4.1 *Uitkomst rekenmodel*

De beoordelingsgrootheden van de SBR Richtlijn B en van de erop voortbouwende Bts zijn V_{max} en V_{per} . Deze komen tot stand door van elke treinpassage en (voor V_{per}) elke periode van 30 seconden, het

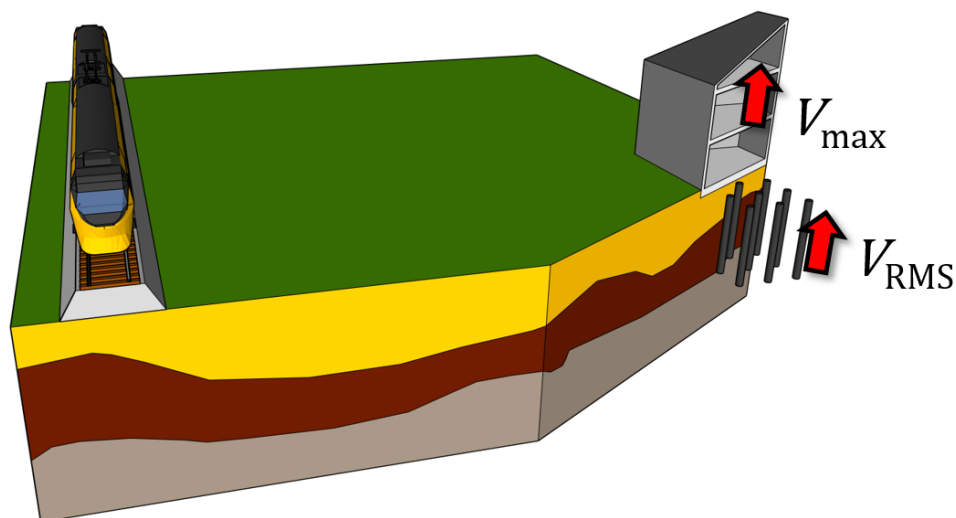
maximale, frequentie-gewogen⁸ trillingsniveau te bepalen $V_{\text{eff,max}}$. Van de verzameling die zo ontstaat wordt het energetische gemiddelde genomen (V_{per}) en het maximum (V_{max}). V_{max} blijkt, in spoorprojecten, vaak maatgevend voor de beoordeling. V_{per} wordt alleen van belang als er sprake is van wijzigingen. Dit relatieve belang heeft uiteraard alles te maken met de aan de grootheden gestelde grenswaarden. Van belang hier is dat V_{max} een belangrijke grootheid is en dat deze, als max-van-maxen, moeilijk vast te stellen is. Dit geldt in zekere zin ook voor V_{per} , als een soort gemiddelde-van-maxen. Het vaststelprobleem speelt niet alleen bij berekeningen maar ook bij metingen en was een van de aanleidingen van de komst van de Bts. De Bts kent uitgebreide protocollen die nopen tot langdurige metingen. De onderzoekslast is sinds de Bts erg toegenomen.

Het vaststelprobleem maakt het ook lastig om metingen met berekeningen te vergelijken en dus modellen verder te brengen met validaties.

Wij stellen voor om een tussengrootheid te introduceren, het gemiddelde van gemiddeldes V_{RMS} , die wel goed vast te stellen is, in berekeningen en in metingen. Dit moet tot effect hebben dat

- De modellen iets eenvoudiger kunnen worden
- Metingen (veel) eenvoudiger kunnen worden
- Metingen en berekeningen beter kunnen worden vergeleken waardoor de ontwikkeling kan worden versneld.

Samengevat zal de onderzoekslast dus verminderen en de meet- en rekenmethoden verbeteren.



Figuur 8 V_{RMS} op de fundering en V_{max} op de gebouwvloeren.

Dit betekent niet dat de beoordelingsgrootheden V_{max} en V_{per} worden losgelaten. V_{max} en V_{per} zullen berekend gaan worden uit de tussengrootheid op grond van die gegevens die de relatie tussen gemiddelde en maximum bepalen: treinlengtes, treinsnelheden en treinfrequenties met name. Die berekening wordt dan zowel voor

⁸ Gewogen voor de menselijke perceptie, die afhangt van de frequentie van de trilling

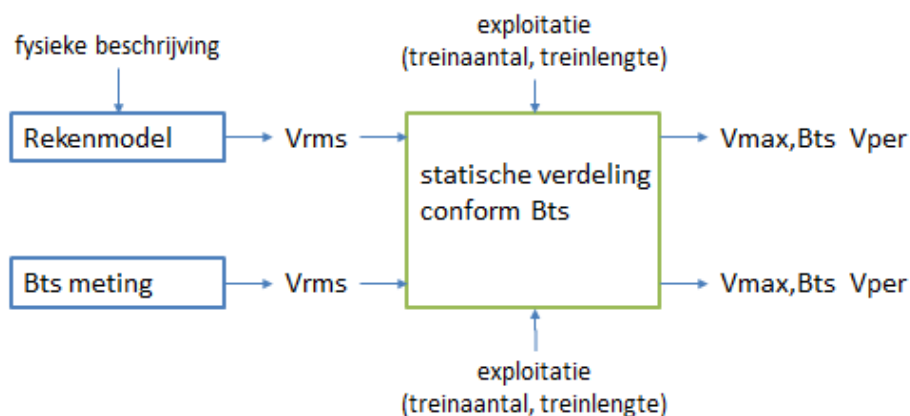
meetcampagnes als voor modelonderzoek gebruikt. Deze aanpak is niet nieuw: hij is toegepast in het Europese onderzoek CargoVibes, om onderzoek uit allerlei landen onderling vergelijkbaar te maken (en bleek daar voldoende betrouwbaar), en is onderdeel van SRM-T.

V_{RMS} :

- beter te meten dan V_{max}
- beter te berekenen dan V_{max}

V_{max} en V_{per} :

- blijven beoordelingsgrootheden
- V_{per} correleert met hinder (mits aangepaste criteria)
- V_{max} correleert met slaapverstoring



Figuur 9 Schematische weergave rekenmodel, rekengrootheden en normgeving.

3.4.2

Betrouwbaarheid van de uitkomsten

Modelresultaten kunnen op twee manieren onnauwkeurig zijn:

- Systematische afwijking (*bias*): model resultaten zijn systematisch te hoog of te laag
- Random afwijking (gebrek aan *precision*): model resultaten zijn gemiddeld gesproken correct, maar een resultaat in een concreet geval wijkt af van de werkelijke waarde

Afhankelijk van het doel van een model zijn deze aspecten meer of minder belangrijk. Wanneer het gaat om het ranken van situaties, dan is de *bias* minder belangrijk. Gaat het om toetsten van een situatie aan een norm, dan zijn beide van belang. Dat is hier het geval. Vaak wordt in dergelijke situaties gekeken naar de RMSE (*root mean square error*), waarbij *bias* en *random error* kwadratisch worden gemiddeld.

De betrouwbaarheid van een model is vooral van belang in de range van resultaten waar een ander resultaat leidt tot een andere actie. Of een model goed presteert bij het voorspellen van heel sterke of juist zwakke trillingen is minder interessant: het gaat om het goed voorspellen in de range waar voorspellingen aanleiding vormen voor screening of nader onderzoek. De vraag is nu hoe we iets kunnen zeggen over de RMSE van de hier bekeken modellen.

De meest voor de hand liggende methode om dit te onderzoeken is om modelresultaten van verschillen modellen/modelketens te vergelijken

met meetresultaten. Dit geeft inzicht in zowel bias als precisie van de verschillende modellen. Daarbij is de aanwezigheid van bias minder van belang, omdat hiervoor in principe (gegeven genoeg meetresultaten) gecorrigeerd kan worden. Wanneer bij het uitvoeren van deze validatiestudie ook nog potentieel verklarende variabelen zouden worden meegenomen (denk aan vochtigheid, temperatuur, factoren met betrekking tot de bodem, tijd sinds laatste onderhoud aan de rails, etc.) kan worden bezien of deze de random meetfouten deels kunnen verklaren, hetgeen een aanwijzing is dat de modellen op dat punt nog verder kunnen worden verbeterd. Een dergelijke validatie studie zou zich moeten richten op situaties rond de range waar modelvoorspellingen aanleiding vormen voor verdere actie.

In het geval van empirische modellen zijn deze modellen al gemaakt op basis van empirisch materiaal. Dit biedt mogelijkheden om de RMSE, de bias en de precision te schatten, met dien verstande dat dit altijd een ondergrens zal zijn: de berekende RMSE is van toepassing voor het domein (het type situaties) waar de empirische data zijn verzameld; het is niet te verwachten dat het model ook zo goed zal functioneren wanneer het model wordt toegepast op andere situaties.

Bij deze schattingen moeten wel correcte statistische methoden (crossvalidatie of vergelijkbare methoden) worden gebruikt. Dit omdat in empirische modellen sprake kan zijn van *overfitting*. Denk aan het trekken van een lijn door 2 meetpunten: deze lijn "voorspelt" deze 2 meetpunten perfect, maar een voorspelling op basis van een derde meetpunt kan er ver naast zitten. In crossvalidatie methoden wordt daarmee rekening gehouden. In *10-fold* cross-validatie bijvoorbeeld, worden de data random in 10 delen verdeeld. Vervolgens wordt telkens 1 deel als *testsample* bestempeld, en wordt het model gefit op de andere 9 delen van de data. Met dit model wordt de uitkomst voorspeld in het testsample (dat dus niet heeft mee gedaan in het schatten van de modelparameters). Uit het verschil tussen gemeten en berekende waarde in het testsample worden bias, precision en RMSE bepaald. Dit wordt 9 maal herhaald met de andere 9 delen, en de resultaten van deze procedure zijn gebaseerd op het gemiddelde van de 10 testsamples. Er bestaan meer methoden, maar zij zijn allemaal gebaseerd op een vorm van crossvalidatie: de validiteit wordt bepaald op data die niet meedoen in de fit van het model.

De leveranciers van empirische modellen zouden in staat moeten zijn dergelijke gegevens aan te leveren.

Wat betreft de deterministische modellen, hier kan de betrouwbaarheid uitsluitend worden vastgesteld met behulp van validatie onderzoek. Wanneer er sprake is van een model-keten (waar de output van het ene model de input is voor het volgende) kan onder aanname van onafhankelijkheid van de model-fouten worden berekend hoe groot de fout in het uiteindelijke resultaat is.

Dit kan:

1. met Monte-Carlo simulatie: De output van model 1 wordt berekend voor een voorbeeld situatie. De output van model 1 wordt voorzien van een onzekerheidsverdeling. Hieruit worden waarden getrokken als input in model 2 (zeg 1000). De 1000 output waarden van model 2 worden eveneens voorzien van een

- onzekerheidsverdeling, en uit iedere verdeling wordt een inputwaarde voor model 3 getrokken, etc.
2. wanneer bekend is hoe de output van model 2 samenhangt met de output van model 1 (die als input voor model 2 fungeert), met andere woorden als je een functie kan opschrijven voor de output van model 2 als functie van alleen de input komend uit model 1, dan kan met de deltamethode (*propagation of errors*) de onzekerheid in de output van model 2 worden berekend. Feitelijk hoeft niet de functie zelf bekend te zijn, alleen de afgeleide van de functie.

Bovenstaande vereist validatie gegevens van de modellen. In de praktijk is die niet altijd (meestal niet?) aanwezig.

Een andere benadering is om te kijken naar het voorspelvermogen van de modellen, uitgedrukt als het percentage verklaarde variantie (R^2) of met het Aikake Information Criterion (AIC).

Een model is een (zeer complexe) functie die de inputruimte (alle mogelijke inputwaarden) afbeeldt op het resultaat. Wanneer modellen goed zijn, en je een reeks van situaties hebt, zal de reeks modelresultaten gelijk zijn aan de reeks werkelijke waarden. Zonder validatiestudies kan dat niet worden nagegaan. Hieronder bezien we of we zonder dergelijk studies aan de hand van statistische gegevens over zowel werkelijke waarden als modelresultaten toch iets kunnen zeggen. Als een model goed is, moet het gemiddelde en de spreiding van beide verdelingen (gemodelleerd en werkelijk) overeenkomen. In de praktijk is er ruis (factoren die niet mee gemodelleerd kunnen worden), waardoor de verwachting is dat modelresultaten minder spreiding kennen dan echte waarden: immers situaties die op de input waarde gelijk zijn (en waar daardoor ook de modelresultaten gelijk zijn), zullen door ruisfactoren toch verschillende werkelijke waarden kennen. Statistisch is een model daarom te beschrijven met de zogenoemde verklaarde variantie: de ratio tussen de variantie in model resultaten en die in de werkelijke waarden. 100% verklaarde variantie betekent dat de werkelijke waarden exact worden voorspeld door het model. 0% verklaarde variantie betekent dat het model voor alle situaties dezelfde waarde voorspelt. Een verklaarde variantie kan alleen correct worden geschat op grond van een data bron waarin voor dezelfde situaties zowel een werkelijke waarde als een gemodelleerde waarde bekend is.

In principe kan voor het verkrijgen van een globaal beeld over de kracht van verschillende modellen ook een verklaarde variantie worden geschat op basis van verschillende databronnen. De verklaarde variantie zou dan kunnen worden afgeleid uit de variantie in bestaande model resultaten. Bij zo'n werkwijze zijn echter wel de nodige kanttekeningen te plaatsen.

- Ten eerste, deze aanpak veronderstelt dat deterministische modellen juist zijn. Er zijn echter modelparameters die de variatie van de uitkomsten beïnvloeden. Wanneer deze niet geheel correct zijn, wordt daarmee de variatie van de uitkomsten direct beïnvloed. Deze kan daardoor te hoog of te laag worden. Dan zegt een juiste variantie van de resultaten niet zoveel meer, want bij beter kijken zou kunnen blijken dat individuele resultaten toch sterk afwijken van werkelijke waarden.

- Ten tweede gaat dit er vanuit dat het model op dit punt niet is gekalibreerd, dat wil zeggen dat de model parameters zo zijn aangepast dat de resultaten qua variantie overeenkomen met de praktijk.

Niettemin kan worden gezegd dat wanneer de verklaarde variantie laag is, het model in de bestaande vorm weinig zal bijdragen aan het voorspellen van trillingsniveaus.

Een betere aanpak lijkt om op grond van expert oordelen te bekijken welk deel van de variantie in principe te verklaren is door de factoren die de input van dat model vormen. In verband met de volgende stap zou die dan liefst ook moeten worden uitgesplitst naar de variantie die verklaard wordt door iedere input factor afzonderlijk.

Als dat van ieder model bekend is, en er kan ook iets worden gezegd over de (on)zekerheid waarmee de input voor de modellen kan worden gegenereerd, dan kan in principe hieruit de verklaarde variantie van de totale model-keten met input worden geschat.

3.5 Bestaande rekenmodellen

In onderstaande lijst zijn de modellen opgenomen die voor de modellering van spoortrillingen in Europa worden gebruikt.

- **DC-Viran** (voortgekomen uit COB-project L400 en CUR/D11)
- **SRM-T**, COB-project (TNO, 2009)
- **FEM-BEM Leuven**, KU Leuven (specifiek voor spoortrillingen)
- **Momfer** (TNO)
- **empirische** aanpak, metingen combineren
 - end2end, alleen meten bij de ontvanger (bijv. vloer)
 - modulair, bron apart, overdracht apart, gebouw apart
- **VibraDyna** (Movares, 2011-2016)
- **PiP**, Pipe-in-Pipe (Engels, 1999-2013, ontwikkeld voor metrotunnels)
- **NVM**, New Vibration Model (Deens, 2011-2015)
- **VIBRA** (Zwitsers, 2010)
- **FEM** (en BEM) met generieke implementaties: ANSYS, LS-DYNA, COMSOL, ABACUS, PLAXIS
- **Barkan**-formule (D.D. Barkan, 1962)
- **Bever** (TNO)
- **TRINT** (trein-baan interactiemodel, TNO)

Het gaat hier om modellen in brede zin. Enerzijds varieert dat van een (simpele) rekenformule voor bodemtrillingen (zoals Barkan) tot rekenmodellen toegespitst op spoortrillingen die gebruik maken van generieke software (FEM). En anderzijds gaat het om modellen die slechts een deelsysteem beschrijven (bijv. de bron, in TRINT) tot een softwarepakket voor het hele systeem van bron tot vloer (zoals VibraDyna). We sluiten deze opsomming af met een conclusie over deze bestaande modellen.

3.5.1 *VibraDyna* (Movares)

Het rekenmodel *VibraDyna* is door Movares ontwikkeld vanaf 2010. Het model is bijvoorbeeld gebruikt in het Tracébesluit DoorStroom Station Utrecht (2015).

Van het model is in 2013 een eenvoudige versie (scoping-niveau) online beschikbaar gesteld. Het bureau gebruikt zelf een in Matlab aanpasbare versie, die al naar gelang de vraagstelling vanuit de projecten gedetailleerder of abstracter kan worden ingesteld. Naar verwachting komt begin 2017 een rekenhart onder licentie beschikbaar, dat onder het softwarepakket Winhavik (tot nog toe bekend van geluid en luchtkwaliteit) kan worden aangeroepen. Het gaat dan om een rekenhart voor spoortrillingen. Voor andere trillingsbronnen bestaan ook plannen.

Blijkens de beschrijving van *VibraDyna* in de Quickscan Uithoornlijn (2016), maakt het model gebruik van een database en door de gebruiker geselecteerde gegevens om de trillingshinder ten gevolge van rail- of wegverkeer te berekenen. Het model is mede gebaseerd op de Barkanvergelijking. Het rekent de trillingssterkte in een gebouw op een vloer uit. Resultaten kunnen worden geëxporteerd naar GIS om kaarten te maken.

Van het model is nog geen uitgebreide beschrijving beschikbaar en daarom is door de ontwikkelaars een toelichting gegeven, waarin de volgende modelleeraanpak is toegelicht⁹.

Indien de gebruiker geen locatiespecifieke gegevens (uit metingen) heeft, wordt teruggevallen op informatie uit een database van ca. 250 metingen door heel Nederland. Hieruit worden voertuig-, bodem- en gebouweigenschappen gebruikt, alsmede onderlinge parameterrelaties. De overdracht wordt in het frequentiedomein berekend met de Barkanvergelijking. De parameters, waarvoor frequentie-afhankelijke correcties zijn opgenomen, zijn weergegeven in Tabel 2 (donkerblauw of oranje).

Tabel 2 Parameters in *Vibradya*

Bron	Transmissie	Gebouwen	Overige
Voertuigtype	Bodemopbouw	Bouwtype	Maaiveldmeting
Voertuigsnelheid	Afstand tot trillingsbron	Bouwjaar	Woningmeting
Wissels of drempels	Obstakels in de bodem	Afmetingen	Maatregelbudget
Aantal voertuigen (d/a/n)	Transmissie maatregelen	Fundatietype	
Spoor- of wegconstructie	Terreinhoogte	Gebouwmaatregelen	
Bronmaatregelen			
Kunstwerkovergangen			Een druk op de knop
ES-lassen			Detailberekening
Spoorligging			Nog niet opgenomen



Voor gedetailleerder werk kan het model aangevuld worden met 3D eindige elementenberekeningen. Per gebouw wordt een trillingsspectrum bepaald voor elk treintype. Op basis van de opgegeven betrouwbaarheid (standaard P95) wordt een dataset samengesteld met behulp van een MonteCarlo-simulatie. Vervolgens wordt dit teruggerekend naar het tijdsdomein, om de uitkomsten te kunnen uitdrukken in V_{\max} en V_{per} .

⁹ Deze vond plaats op 27 juni en 20 september 2016.

Pluspunten

- Reeds beschikbaar, als onderdeel van een veelgebruikt softwarepakket (Winhavik)
- Gebaseerd op een ruime empirische database.
- Berekent onzekerheidsmarge.
- Specifiek voor Nederland.

Minpunten

- Er is geen documentatie. Mede hierdoor is een deel van de inhoud onduidelijk/onbekend. Zo is niet duidelijk wat wel en wat niet wordt meegenomen in de berekening van de betrouwbaarheid.
- De kwaliteit van de metingen, waarmee de database gevuld is, is onbekend. Er zijn geen meetprotocollen, meetrappen, gevoeligheidsstudies, etc. beschikbaar. Zo blijkt uit mondelinge toelichting dat meetpunten zeer dicht bij het spoor (<20 meter) worden gebruikt. Ook is onduidelijk hoe de meetomstandigheden zijn bepaald en vastgelegd (zoals type bodem) en hoe dat in het model wordt gebruikt (bodemtype als invoer).

3.5.2 SRM-T (COB)

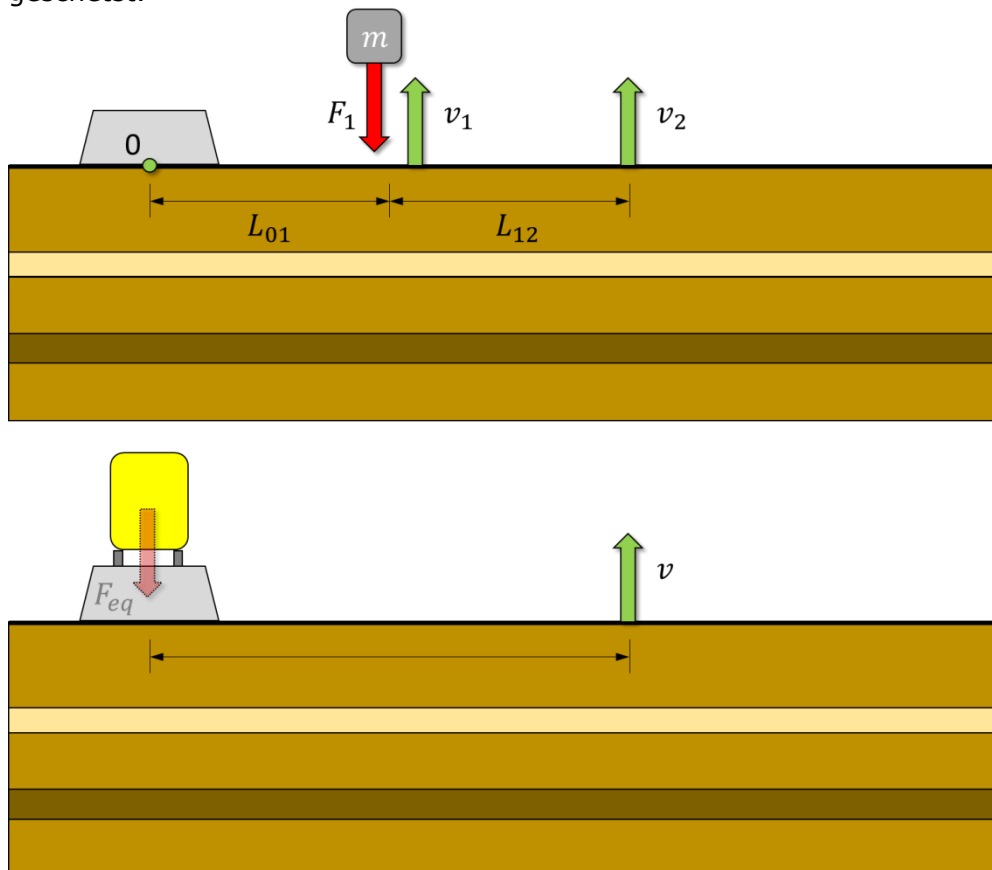
De ontwikkeling van een Standaard RekenMethode voor Trillingen (SRM-T) is rond 2009 gestart in een COB-project¹⁰ met bijdrages van TNO, TUD, Fugro, Deltares en Movares. De methode bestaat uit een set van eenvoudige rekenregels, een database met waarden voor verscheidene situaties en een voorschrift om waarden zelf modelmatig of door metingen te bepalen.

De filosofie is dat het model van trillingsemissie door de trein tot trillingsresponsie aan de fundering van de woning of tot zelfs op een vloer in de woning, opgeknipt wordt in deelmodellen. Ter plekke van elk deelmodel worden situatie-specifieke waarden uit een database ingevuld, of uit meetresultaten die op locatie zijn verkregen. Op die manier wordt een keten van onafhankelijke deelmodellen aan elkaar geplakt tot een trillingsmodel. Dat is niet zonder meer mogelijk, daar een modelmatige knip vaak leidt tot van elkaar afhankelijke deelmodellen. Een trillingsmodel zou dus niet uit een catalogus aan situatie-specifieke en van elkaar onafhankelijke deelmodellen samengesteld kunnen worden.

Om de SRM-T filosofie toch te verwezenlijken is een nieuwe bronkarakterisering bedacht die bodemonafhankelijk is. Zodoende kan een knip gemaakt worden tussen de deelmodellen *trillingsbron* (i.e. trein met spoorbaan) en *bodemoverdracht*. Als basis voor de bodemonafhankelijke bronkarakterisering dient de equivalente lijnkracht (zie bijlage B.8). Wanneer de trillingsbron door een equivalente lijnkracht gerepresenteerd wordt, dan is deze vanwege de interactie tussen spoorbaan en bodem niet locatieonafhankelijk (en dus niet representatief voor alleen de trillingsbron). De idee om de bronkarakterisering bodemonafhankelijk te maken, is door het referentiepunt (van de equivalente lijnkracht) fictief onder de spoorbaan te leggen. Dat is namelijk de plek waar de interactie tussen de

¹⁰ Steenberg RDJM, Lentzen SSK, Koopman A, *Betrouwbare trillingsmaatregel ontwikkeling Standaard RekenMethode voor Trillingen (SRM-T)*. 2009, TNO: Delft.

spoorbaan en de bodem plaatsvindt. Het proces is in Figuur 10 geschetst.



Figuur 10 Meet- en rekenvoorschrift ter bepaling van de bodemonafhankelijke bronkarakterisering (boven: overdrachtsmeting, onder: bronkarakterisering).

Met een valgewicht (zie bijlage B.8) kan op positie 1 de puntadmittantie gemeten worden. Wanneer op locatie 2 (met een afstand L_{12} tussen beide locaties) ook de snelheid t.g.v. het valgewicht gemeten wordt, kan over die afstand de zogenaamde overdrachtsadmittantie bepaald worden $Y_{12} = v_2/F_1$. Wanneer de afstand L_{12} gelijk is aan de afstand van onder de spoorbaan tot het valgewicht L_{01} , wordt aangenomen dat de overdrachtsadmittantie van punt 0 naar punt 1, Y_{01} , gelijk is aan Y_{12} . Onder deze aanname kan bij een meting van de snelheid op locatie 2 tijdens het voorbijrijden van een trein (zie Figuur 10 onder), deze vertaald worden naar een equivalente lijnkracht onder de spoorbaan, F_{eq} .

Fysisch gezien kunnen beide overdrachtsadmittanties Y_{01} en Y_{12} niet gelijk zijn juist vanwege de interactie tussen de spoorbaan en de bodem op locatie 0. Het bedachte concept leidt daarom tot een fictieve, meer wiskundige dan fysische, kracht onder de spoorbaan als bodemonafhankelijke beschrijving voor de bron. Uit onderzoek van TU Delft is gebleken dat het concept standhoudt voor een referentieafstand L_{01} van minimaal gelijk aan 20m.

Het trillingsmodel bestaat uit de volgende formule

$$v(r) = F_{eq} H_{situatie} H_{baan} Y_{ondergrond} H(r) H_{bf} H_{fw} H_{wv}$$

Hierin is v de trillingssnelheid, r de afstand, F_{eq} de bodemonafhankelijke bron, $H_{situatie}$ een correctiefactor voor de bovenbouwsituatie (wissel, duiker, overweg, etc.), H_{baan} een correctiefactor voor de opbouw van de aardebaan (onderbouw), $Y_{ondergrond}$ de puntadmittantie van de bodem en $H(r)$ de verzwakking in de bodem. Verder zijn H_{bf} , H_{fw} en H_{wv} overdrachtsfuncties die de trillingen aan de fundering van een woning vertalen naar trillingen op een vloer in de woning.

Elk van de factoren in bovenstaande vergelijking wordt situatie-specifiek uit een database gehaald. De huidige database is gebaseerd op een groot aantal (> 1 miljoen) simulaties, en wordt aangevuld met praktijksituaties die op basis van SRM-T beoordeeld zijn. Op basis van het grote aantal simulaties is de database niet alleen gevuld met nominale waarden, maar ook met statistisch relevante informatie. Op basis van deze informatie kunnen de resultaten van SRM-T voorzien worden van de benodigde stochastische data.

Het SRM-T model is o.a. toegepast in de projecten 'Wonen langs het spoor' (RIVM 2014) en in 'Postdictie spoortrillingen in Rosmalen' (DPA-CH 2015).

Pluspunten

- Fysisch opgezet.
- Geverifieerd en geïmplementeerd met analytische modellering.
- Redelijk gedocumenteerd.
- Berekent onzekerheidsmarge.
- Inclusief meetprotocol voor vullen empirische database.
- Specifiek voor Nederland.
- Vrij beschikbaar, zonder rechten.

Minpunten

- Database nu niet gevuld met empirie maar met numerieke resultaten.
- Nog geen bodem-gebouw-overdracht en gebouw-vloer-overdracht beschikbaar.
- Nog geen puntbron onderdelen beschikbaar (wissels, lassen, overwegen, etc.)

3.5.3

Prognosemodel Arcadis-Fugro

Arcadis en Fugro hebben rond 2012 een semi-empirisch prognosemodel ontwikkeld voor spoortrillingen¹¹. Dit model is onder meer gebruikt in de studie PHS Meteren-Boxtel (2014).

De aanpak bestaat deels uit metingen aan de bron (treinen) en deels uit modellering, gebaseerd op de CUR 166-aanpak. De richtlijn CUR 166 bevat een trillingspredictiemethode voor het heien of intrillen van damwandconstructies, die voor de beoordeling van onder meer trillingshinder van bouwwerkzaamheden wordt gebruikt.

¹¹ Ontwikkelen nieuwe prognosemethode - Beter voorspellen van spoortrillingen over een lang traject, Civiele Techniek nr 5/6, A.V. van Uiter en A.J. Snethlage, 2013

Het prognosemodel bevat de volgende factoren:

- Bronwaarde van de trilling op 5 m (referentie-afstand), inclusief variatiecoëfficiënt
- Damping van de trilling door:
 - Geometrische damping
 - Materiaaldamping van de grond
 - Overgang van grond naar de fundering van een gebouw
 - Overgang van de fundering naar de vloeren en wanden

Eerst wordt in een aantal karakteristieke meetdoorsneden haaks op het spoor de trillingsoverdracht bepaald. Dat gebeurt door de meetwaarden die op opeenvolgende afstanden van het spoor zijn bepaald, in het prognosemodel van CUR 166 te fitten. Met dat model wordt voor het toekomstige spoorgebruik de trillingssterkte bij of in de gebouwen berekend. Uitgangspunt is dat metingen van de bronsterkte van de treinen in die situatie (types, snelheden) beschikbaar zijn, anders wordt een valgewicht of trilapparaat gebruikt.

Pluspunten

- Empirische data wordt gefilterd, met behulp van een relevant, gangbaar model (CUR-166).

Minpunten

- Er is geen database. Het model is in feite alleen een naverwerkingsmethode, dus vereist ter plekke uit te voeren metingen als input.
- Referentie-afstand van 5 meter is veel te dichtbij. Op die afstand is er nog sprake van een sterk nabijheidsveld, hetgeen een grote onnauwkeurigheid introduceert. Een veilige referentie-afstand is bijvoorbeeld 20 meter.

3.5.4

Deens model (NVM)

Vrij recent is Denemarken een rekenmodel ontwikkeld met de naam New Vibration Model (Deens: *Ny vibrationsmodel*). Van dit model, door het bureau COWI ontwikkeld voor de Deense spoorwegen, is een onderzoeksrapport in het Engels beschikbaar¹². Het model is in Nederland nog niet toegepast.

Het frequentieafhankelijke model bestaat uit een bronmodel gebaseerd op metingen aan treinen, een overdrachtmodel dat vergelijkbaar is met Barkan, en een set overdrachtsspectra voor de transmissie naar de begane grond of eerste verdieping. De trillingssterkte wordt uitgedrukt in het gemiddelde acceleratieniveau in dB over een treinpassage¹³. Het model is geoptimaliseerd voor Deense treinen¹⁴, spoortypes¹⁵, bodemtypes en gebouwen. Er is een softwareprogramma beschikbaar voor Deens trillingsonderzoek.

Bronmodel

Het bronmodel is gevoed met trillingsmetingen op 16 locaties (90% van de spoorssystemen zijn gedekt), aan circa 2000 treinpassages, gemeten

¹² *Banedanmark New Vibration Model*, technical report, COWI A026780-006.1 v 1.1, January 2015

¹³ De website van COWI vermeldt een nauwkeurigheidclaim van 3 dB die niet in het onderzoeksrapport staat. Hierover loopt nog een vraag per mail aan de Deense ontwikkelaars, voor nadere onderbouwing.

¹⁴ 10 types reizigerstreinen en daarnaast "goederentreinen" als groep.

¹⁵ De beschreven spoorstaatypes, onderlegplaatjes, en dwarsliggers wijken alle af van de Nederlandse.

op 5 tot 10 meter uit het spoor. Treinen met vlakke plaatsen op de wielen of lawaaige treinen zijn uitgesloten. De modelbeschrijving gaat niet in op wissels of kunstwerken. Deze vallen kennelijk buiten het toepassingsbereik van het model. Ook lijkt het niet mogelijk om te rekenen met trillingsmaatregelen.

Overdracht

Voor de overdracht in de bodem zijn twee eenvoudige semi-empirische relaties beschikbaar, een voor situaties met een enkele bodemlaag en een voor situaties met twee bodemlagen.

Gebouw

Voor het karakteriseren van gebouwen op typekenmerken zijn meer dan 200 gebouwen onderzocht. Op basis daarvan is een frequentieafhankelijke trillingsoverdracht bepaald voor laagbouw en hoogbouw, waarbij rekening gehouden wordt met vloerresonantiefrequenties.
afhankelijk van vloerresonantiefrequentie

Scoping en screening

Het rapport beschrijft ook de Deense aanpak van scoping naar screening. In eerste instantie wordt in alle gebouwen binnen een contourafstand van 100 meter een trillingsniveau van de vloer berekend, uitgaande van de modelversie voor één bodemlaag en een automatische gebouwtypeherkenning. Gebouwen waar het niveau 10 dB onder de Deense drempelwaarde ligt, worden niet verder beschouwd. De overige gebouwen worden in een tweede ronde opnieuw doorgerekend, nu met de modelversie voor twee bodemlagen en een handmatige gebouwtypeherkenning (bijvoorbeeld op basis van Google Street). Gebouwen die dan nog boven de drempelwaarde liggen worden, gaan door naar een derde ronde, waarin het vloertype plaatselijk wordt gecontroleerd. Eventueel volgen daarna nog metingen.

Pluspunten

- Beschikbaar, met GUI.
- Kent twee rekenniveaus: scoping met 1 bodemlaag, screening met 2 lagen.
- Empirie (uitvoering metingen, beschrijving situatie, naverwerking, etc.) lijkt zorgvuldig opgebouwd.

Minpunten

- Niet specifiek voor Nederland. Dus geen Nederlandse treinen, Nederlandse bodem, Nederlandse huizen, etc.
- Overdrachtsfactoren voor o.a. bodem-gebouw zijn niet realistisch.
- Geen puntbronnen beschikbaar (wissels, kunstwerken, etc.).

3.5.5

GeoVibration (DGMR)

Bij DGMR is een trillingsmodule voor het softwarepakket Geomilieu (berekening geluid, luchtkwaliteit, gevaar). Het model is in Nederland nog niet toegepast.

Met deze nieuwe module, GeoVibration¹⁶, is het mogelijk om trillingsberekeningen te maken van weg- en treinverkeer, alsmede bouw- en industriële activiteiten zoals bijvoorbeeld compressoren, stansmachines en weefgetouwen.

De aanpak is gebaseerd op de empirische formules van Barkan, aangevuld met overdrachtsmetingen die de karakteristieken van bodemdemping bepalen.

De parameters van de geometrische en materiaaldemping van de bodem kunnen per octaafband worden opgegeven. Indien deze informatie ontbreekt kan zonder frequentie-informatie worden gerekend. Het is mogelijk verschillende bodemgebieden in te voeren.

Het model berekend trillingscontouren en optioneel ook de overdracht van bodem naar gebouwfundering, waardoor een beoordeling volgens SBR-A en SBR-B mogelijk is. Het model gebruikt de GUI (*graphical user-interface*) van Geomilieu.

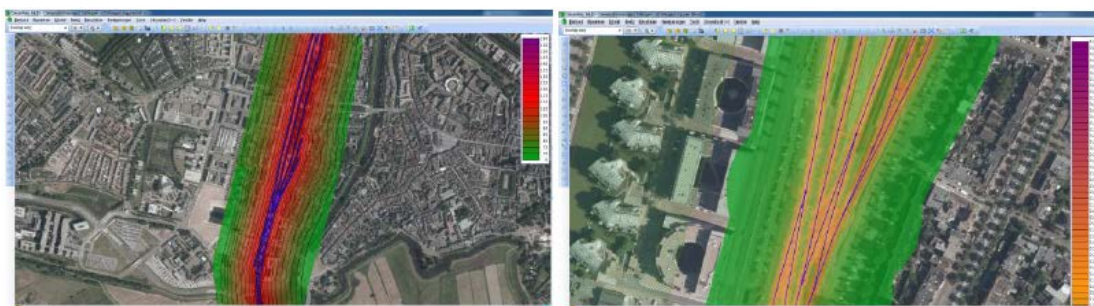
Het model bevat daarnaast de volgende kenmerken:

- Dedicated software: eenvoudig in gebruik zonder kans op implementatiefouten;
- De invoer- en uitvoer in octaven van 1 tot en met 250 Hz;
- Combinaties van punt- en lijnbronnen;
- Emissiewaarden per bron op een zelf te kiezen referentieafstand;
- Berekeningspunt in dB of mm/s;
- Contourpunten en -lijnen in dB en mm/s.

De software is voorbereid op de volgende uitbreidingen:

- Tertsbandspectra;
- Gebruik van andere overdrachtscorrecties en algoritmen;
- Equivalente trillingsniveaus voor bepaling V_{per} (dag, avond, nacht);
- Berekening van laagfrequent geluid door trillingen.

De module is zo ingericht dat de variantenstudie voor de in te voeren parameters op eenvoudige wijze buiten de software om gedaan kan worden.



Figuur 11 Trillingscontouren van GeoVibration

¹⁶ Beschrijving van GeoVibration voor RIVM, H. van Leeuwen, DGMR, 3 oktober 2016

Pluspunten

- Onderdeel van een veelgebruikt softwarepakket (GeoMilieu)
- Lijkt transparant en flexibel, aangezien er geen werkelijke fysica of empirie is ingebouwd: alle factoren zijn expliciete invoer, het model concentreert zich op de GIS taak.

Minpunten

- Bestaat nog niet, is dus nog niet geverifieerd of gevalideerd.
- Geen documentatie beschikbaar
- Niet werkelijk een model, meer een GIS module, voorbereid op trillings specifieke parameterlagen.

3.5.6 TRINT-Momfer-Bever (TNO)

De modelketen TRINT-Momfer-Bever is onder meer gebruikt voor het Tracébesluit Betuweroute (1992). Verder is TRINT ingezet voor het Tracébesluit HSL-Zuid (1998). De opvolger van TRINT is Travist.

De modelketen betreft niet 1 model maar 3 modellen, voor de bron (TRINT), de bodemoverdracht (Momfer) en de gebouwreactie (Bever) die aan elkaar geknoopt kunnen worden of standalone worden gebruikt.

- **TRINT** is een multi-body trein-baan-bodem model, voornamelijk ontwikkeld in de jaren 90, toen een van de eerste van zijn soort in de wereld, gepubliceerd in peer-reviewed journals, en daarna doorontwikkeld. TRINT beschrijft trein, bovenbouw en onderbouw als een combinatie van massa's veren, dempers en liggers met oneffenheden in het spoor en de wielen als oorzaak van trillingen. Het is een numeriek model dat rekent in het tijddomein: de trein wordt over een stuk spoor getrokken en per tijdsstap (orde 1 ms) worden alle krachten en verplaatsingen berekend. TRINT bevat een vrij uitgebreide database met beschrijvingen van treinmaterieel, baansystemen en bodems. De bodembeschrijving is vrij eenvoudig (stijfheid) en dient vooral om de invloed op het brongedrag goed te krijgen, er wordt geen bodemoverdracht berekend. TRINT is 2D, alles gebeurt in principe in het verticale vlak. TRINT heeft een grote rol gespeeld bij de HSL, niet alleen voor omgevingstrillingen maar ook voor de berekening van baandynamica en treincomfort, zowel voor de opdrachtgever als voor de onderbouwaannemers en de bovenbouwaannemer. Sindsdien is TRINT nog ingezet voor tal van andere grote spoorprojecten, maar dan steeds in combinatie met Momfer en Bever. Van TRINT is een uitgebreide inhoudelijke beschrijving en gebruiksaanwijzing beschikbaar.
- **Momfer** is een bodemoverdracht module. Het is geen volwaardig model maar een geometrie-module die 2D bronbeschrijvingen (zoals krachten uit TRINT of een equivalente lijnkracht uit een meting) combineert met daarop haaks staande 2D overdrachtsbeschrijvingen (zoals Barkan, of overdrachten uit 2D FEM, 3D FEM of uit meetraaimetingen) tot een 3D "trillingsveld". Momfer is, gevuld met FEM en/of metingen, in combinatie met TRINT gebruikt in projecten: onder meer de Betuweroute en Sporen in Arnhem. Momfer is geprogrammeerd in Matlab code, er is geen handleiding beschikbaar.
- **Bever** is een analytisch model voor de gebouwresponsie. Enkele fysische verschijnselen die optreden in de bodem-gebouwinteractie (zoals de rol van de massa van het gebouw)

alsmede de opslingeren van het gebouw zelf en van de vloeren worden beschreven met gesloten, spectrale functies. Invoer zijn vrij globale bodemeigenschappen en gebouweigenschappen zoals stijfheden (bodem), massa's (gebouw) en afmetingen. Uitvoer zijn trillingsniveaus en (laagfrequent- dan wel bodem-) geluidniveaus. Met dit model kunnen "passieve" maatregelen (aanpassingen aan fundering, draagconstructie en/of vloeren) worden gedimensioneerd. Bever is o.a. gebruikt voor de VINEX-locatie De Volgerlanden (boven de Sophiaspoortunnel) en voor metroprojecten in Rotterdam. Van Bever is geen handleiding beschikbaar.

Pluspunten

- Gevalideerd (en als zodanig gerapporteerd), zij het nooit compleet en 100%.
- Elk van de drie onderdelen is te combineren met andere modellen.
- Interactie-effecten worden expliciet meegenomen
- Database van treinen en spoorssystemen
- Geschikt voor onderzoek/ontwerp bronmaatregelen en gebouwmaatregelen
- Van TRINT is uitgebreide documentatie beschikbaar.

Minpunten

- Nog geen goede implementatie voor wissels.
- Bodemoverdracht moet extern worden ingevlogen (FEM of metingen).
- Van Momfer en Bever is geen documentatie beschikbaar.

3.5.7

DC-Viran

De grote infrastructurele plannen (HSL, NZL, etc.) van de jaren 90 leidden tot zeven boortunnels en een bundeling van daarvoor benodigd onderzoek middels het Gemeenschappelijk Platform Boortunnels (sturing, geld) en het Centrum Ondergronds Bouwen (uitvoering). Eén van de onderzoekslijnen betrof omgevingstrillingen. Commissie L400 van het COB, waarin deskundigen van o.a. Fugro, GeoDelft (nu: Deltares), Holland Railconsult (nu: Movares), ProRail, RWS, TNO en TU Delft zitting hadden, ontwierp een modulair prognosemodel. Dit model bouwde voort op D11, het begin jaren 90 door de gelijknamige CUR-commissie opgestelde semi-empirisch "computermodel". L400 kwam eind jaren 90 als DOS-programma beschikbaar en werd in de loop der jaren verder uitgebouwd met nieuwe modules en een database en kwam tenslotte, gefinancierd door het onderzoeksproject DelftCluster (DC), met een gebruikersvriendelijke schil als DC-Viran beschikbaar bij Deltares.

DC-Viran is een numeriek model met veel mogelijkheden voor het combineren van modules.

De bronmodule voor treinen is een vereenvoudigde versie van TRINT. Daarnaast zijn er overigens ook bronmodules voor het intrillen van damwanden, verkeersdrempels, e.d. Er zijn twee bodemmodules: een module gebaseerd op ray-tracing en een gebaseerd op analytische halfspace. De gebouwmodule bestaat uit superelementen in FEM. Verder zijn er modules voor de invloed van de baan (zoals een

boortunnelmodule, wederom superelementen in FEM) en de invloed van maatregelen.

Onderdeel van DC-Viran is ook een database structuur en een implementatie daarvan in MS Access. De structuur legt vast hoe metingen, modelresultaten en hun metadata worden vastgelegd, software en hardware onafhankelijk in ASCII/XML, om te kunnen worden bewaard voor later en gedeeld tussen onderzoekers. Deze database-structuur is daarna in een aantal COB-projecten gebruikt om meetresultaten te delen.

Een aantal modules van DC-Viran is gevalideerd in het DelftCluster onderzoek. Daaruit is gebleken dat DC-Viran een bias heeft, groter dan andere prognose-methoden, en een behoorlijke onzekerheidsband. De treinmodule is NIET gevalideerd.

DC-Viran is uitgebreid beschreven in een reeks rapporten van CUR-COB en DC.

DC-Viran is, voorzover bekend, nooit gebruikt voor spoorprojecten. Na de eerste fase, toen het als DOS-programma L400 beschikbaar kwam, bleek het te complex voor de doelgroep (bureaus die zelf nog geen prognosemodellen hadden) en niet goed genoeg voor de bouwers (die het baseerden op eigen, betere modellen). Na de tweede fase, toen het als gevalideerd gebruikersvriendelijk model beschikbaar kwam, was het vertrouwen ook bij de doelgroep geslonken. Het gebrek aan vertrouwen gaat vooral over de bodemmodules, over het gebrek aan fysieke interactie tussen de modules en over de uitkomsten van de validaties. Verder speelt een onbalans mee: de instelmogelijkheden (type treinen, banen, bodems, maatregelen, gebouwen, etc.) zijn beperkt in verhouding tot de gedetailleerdheid waarmee gerekend wordt. Een situatie moet erg precies worden beschreven, maar lang niet alle optredende situaties zijn beschikbaar. Het is in feite een gedetailleerd model dat voor screening geschikt is, maar voor een screening model is het niet breed genoeg en voor een gedetailleerd model niet diep genoeg.

Pluspunten

- Gedetailleerd
- Gevalideerd (en als zodanig gerapporteerd), zij het nooit compleet en 100%
- Sterk modulair, met keuze tussen parallelle modules
- Module met trillingsmaatregelen beschikbaar
- Database van treinen en spoorssystemen
- Uitgebreide documentatie beschikbaar
- GUI

Minpunten

- Interactie-effecten tussen de modules wordt niet meegenomen
- Nooit gebruikt voor projecten
- Kwam niet goed uit validatie
- Geen puntbronnen (wissels, lassen e.d.)

3.5.8 *Conclusies over de bestaande rekenmodellen*

De in dit hoofdstuk beschreven modellen zijn in feite allemaal empirische modellen¹⁷. Ze komen voort uit een onderzoekspraktijk waarin metingen leidend zijn en Barkan wordt gebruikt om deze te extrapoleren voor bijvoorbeeld prognoses. Dit leidde tot een evolutie van verwerkingsmethoden en tot een accumulatie van meetresultaten, uiteindelijk vastgelegd in genoemde modellen. In diezelfde periode zijn ook niet-empirische modellen, zoals DC-Viran, tot stand gekomen, maar mede omdat deze niet aansloten bij de meetpraktijk (en uiteraard andere uitkomsten gaven dan de metingen) bleven deze ongebruikt. De empirische modellen, het toepassen van metingen die op locatie A zijn uitgevoerd voor een prognose voor locatie B, kent een aantal valkuilen die bij de evolutie van de verwerkingsmethoden en de opbouw van de databases en toepassing in projecten niet opvallen en pas aan het licht komen indien een model daadwerkelijk als zodanig (zónder extra metingen voor de invoer) wordt toegepast en gevalideerd (met metingen). Deze valkuilen zijn de volgende.

- Beheersing van de kwaliteit van de metingen. Trillingsmetingen hebben een grote kans niet goed te worden uitgevoerd, zo blijkt uit de praktijk en uit Round Robin studies: verkeerde keuze van meetpunten, geen goede bevestiging van de opnemers, te kort meten, etc. Vaak worden de metingen uitgevoerd door meettechnici, maar verder verwerkt door bureau-onderzoekers waardoor informatie verloren gaat en leerprocessen maar langzaam verlopen.
- Beschrijving van de metingen: de kwaliteit van de metadata. Een datapunt in een empirisch model bestaat uit meer dan alleen het resultaat van de trillingsmeting: de beschrijving van de omstandigheden van de meting zijn even belangrijk, omdat deze nodig zijn om te bepalen of het meetresultaat van toepassing is in een prognose. Voor de rol van treintype en treinsnelheid is tegenwoordig veel aandacht, andere factoren zoals bodemcondities en spooroneffenheid verdienen meer aandacht. Zeker spooroneffenheid, een belangrijke bronparameter, is bijna nooit beschreven, waardoor van alle meetdata onduidelijk blijft wat de rol van de spoor kwaliteit is geweest. Dit introduceert een grote stochast in de empirie.
- Vergelijking van situaties op grond van metadata. Het zogeheten "mapping-probleem". Om (oude) meetresultaten voor een prognose te gebruiken moeten de omstandigheden waaronder die meetresultaten tot stand zijn gekomen worden vergeleken met de prognosesituatie. Zelfs gesteld dat de metadata van goede kwaliteit is, is niet evident hoe situaties onderling kunnen worden vergeleken. Dit speelt met name bij bodembeschrijvingen: elke bodem is anders, maar wanneer zijn ze (voor trillingen) voldoende hetzelfde?

Een ander aandachtspunt bij empirische modellen is interactie. Zodra veel factoren een rol spelen (zoals spooroneffenheid, baan, bodemoverdracht, etc.) zou een simpel, end-to-end empirisch model

¹⁷ SRM-T is weliswaar in de bestaande versie gevuld met gedetailleerde berekeningen, maar dat is beoogd vervangen te worden door metingen.

(dat voor elke combinatie van omstandigheden één maar liefst meer meting heeft) een bijzonder grote database aan empirie vereisen. Daarom wordt al snel overgegaan tot factorisatie, tot het opsplitsen in modules, opdat slechts per factor, per module, empirische gegevens hoeven te worden verzameld. In plaats van dat er bijvoorbeeld 3 treintypes x 3 baantypes x 3 bodemtypes, dus 27 situaties moeten worden gemeten, hoeven er maar 3 treintypes + 3 baantypes + 3 bodemtypes, dus 9 situaties te worden gemeten. Deze aanpak (factorisatie) introduceert echter een risico, dat zich uit in een extra stochast: de fysische interactie tussen de drie fysische onderdelen die impliciet in de 27 end-to-end metingen is meegenomen, zoals de invloed die de baan op de trein heeft, zal in modulaire empirie expliciet moeten worden ingebracht, bijvoorbeeld door enkele ondersteunende metingen of berekeningen. Buitenlandse empirische modellen doen dat in ieder geval niet: bij de daar aanwezige hoge bodemstijfheid worden de meeste interacties verwaarloosbaar klein.

3.6 Wetenschappelijke rekenmodellen

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de literatuurscan besproken. De literatuurscan betreft recente artikelen uit de vakliteratuur vanaf het jaar 2010¹⁸ die het onderwerp van het modelleren van spoorse trillingen behandelen. Na een korte samenvatting van elk relevant artikel, worden zij individueel beoordeeld aan de hand van de volgende vijf vragen:

1. Is dit model een volwaardig alternatief voor het trillingsmodel?
2. Wat is het novum?
3. Wat is de conclusie?
4. Hoe wordt rekening gehouden met de natuurlijke variatie?
5. Welke aspecten zijn te gebruiken in het trillingsmodel?

De literatuurscan is uitgevoerd in de Engelstalige literatuur met de volgende zoekopdracht in de titels en de abstracts:

vibration AND {modeling OR modelling OR prediction} AND {railway OR train}

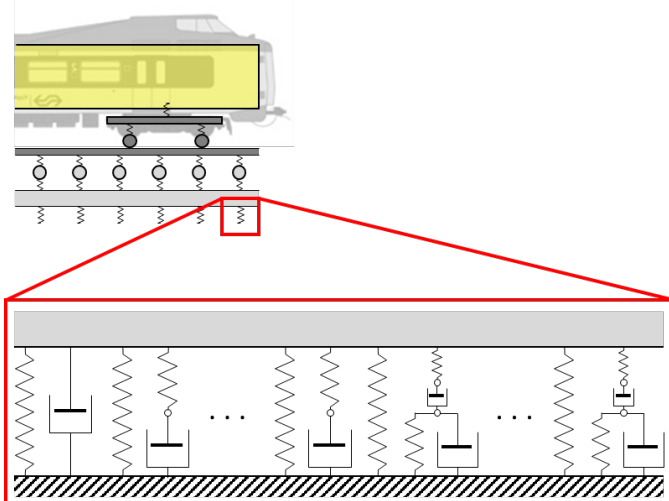
Een dergelijke scan levert publicaties op zoals boeken en artikelen in journals en in congres proceedings. Daarnaast is beperkt gezocht in de zogenaamde "grijze literatuur", zijnde bijv. rapporten van onderzoeksinstituten en artikelen in vaktijdschriften. De grijze literatuur is echter moeilijk toegankelijk omdat het niet ontsloten is door databases.

De scan leverde ongeveer 200 publicaties op. Deze zijn "handmatig" verder gefilterd door bestudering van de abstracts. **Bijlage D** bevat de resultaten hiervan. Deze publicaties zijn gesorteerd en gegroepeerd (een model in ontwikkeling leidt vaak tot meerdere publicaties over de jaren heen en in verschillende soorten literatuur). De meest recente en meest belovende titels zijn opgevraagd en doorgelezen met de vijf eerder

¹⁸ Vakliteratuur voor 2010 is niet expliciet bekeken, omdat de betere ideeën geëvolueerd zijn en dus ook in de recente literatuur worden behandeld. Bovendien dekken de eerdere inventarisaties, zie §3.2, deze oudere modellen.

genoemde vragen als leidraad. Hieronder volgt een samenvatting hiervan.

3.6.1 Southampton-Qatar model



Figuur 12 Schematisering van het Lumped Parameter Model (LPM).

In [1] wordt een model besproken om de spoorse trillingen in de bodem of op maaiveldniveau te voorspellen. De trein en spoorbaan worden als bron in het tijdsdomein gesimuleerd met een bronmodel bestaande uit rigid bodies (bijlage B.3.3) en eindige elementen (bijlage B.3). De bodem wordt als homogene lineaire halfspace (bijlage B.4.1) gemodelleerd.

Allereerst wordt de puntadmittantie in de halfspace bepaald. Daaruit wordt een zogenaamd *Lumped Parameter Model* (LPM) bepaald, zie Figuur 13. Dat is een aaneenschakeling van veren en dempers die de bodem in het bronmodel frequentieafhankelijk representeren. In het bronmodel worden de krachten op de bodem bepaald. Vervolgens worden die naar frequentiedomein (met een Fourier transformatie) getransformeerd en op het bodemmodel gezet.

1. Is dit een volwaardig trillingsmodel?

Nee

2. Wat is het novum?

- Niet-lineaire modellering van de railpads
- LPM modellering van de bodem

3. Wat is de conclusie?

Publicatie:

- Eén voorbeeld is vergeleken met de resultaten van een niet-opgeknipt model, en de resultaten komen goed overeen.
- Het effect van de niet-lineaire veren is aanwezig nabij het spoor, maar niet in het verre veld.

RIVM:

- Koppeling bron – bodem is een eenzijdige koppeling. De aanwezigheid van de spoorbaan wordt genegeerd in het bodemmodel
- Het bodemmodel is niet gelaagd

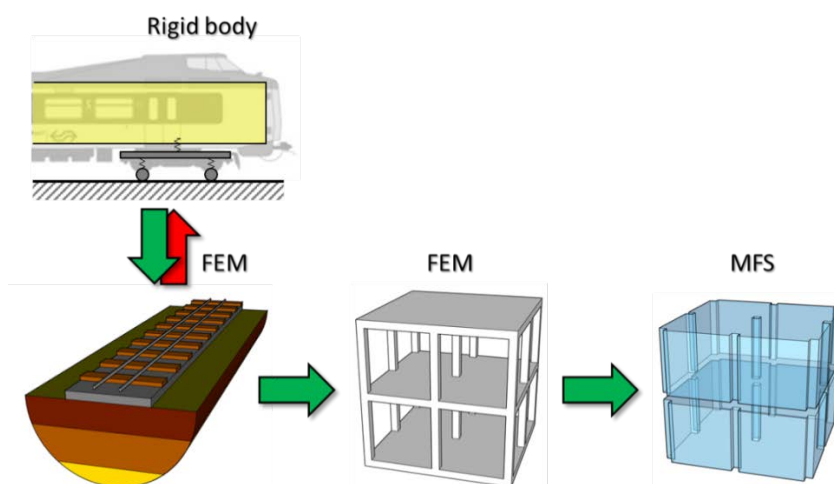
4. Hoe wordt rekening gehouden met de natuurlijke variatie?

Niet

5. Welke aspecten zijn te gebruiken in het trillingsmodel?

- LPM modellering van de bodem in het bronmodel

3.6.2 Porto-Coimbra model



Figuur 13 Schematisering van het Porto-Coimbra model.

In [2] en [3] wordt een model beschreven om de spoorse trillingen en het afgestraalde geluid in gebouwen te voorspellen. Daartoe wordt het model opgeknipt in vier deelmodellen (zie Figuur 13):

1. De spoorbaan-bodem wordt gemodelleerd m.b.v. een 2.5D FEM model (bijlage B.3) met zogenaamde *Perfectly Matched Layer* (PML) randvoorwaarden om golfreflecties aan de randen te voorkomen.
2. De trein wordt met een rigid body model (bijlage B.3.3) gemodelleerd. Deelmodellen 1 en 2 worden tijdens simulatie aan elkaar gekoppeld door ter plaatse van de raakvlakken gelijken verplaatsingen en krachten op te leggen.
3. De gebouwconstructie wordt met een 2.5D FEM model (bijlage B.3) gemodelleerd, waarbij de verre veld trillingen uit deelmodel 2 opgelegd worden.
4. De gebouwakoestiek wordt met een zogenaamd 2.5D MFS (Method of Fundamental Solutions) gemodelleerd. MFS is zeer verwant aan BEM (bijlage B.4), waarbij enkele numerieke problemen die zich bij BEM voordoen, vermeden worden.

Alleen de deelmodellen 1 en 2 worden in het tijdsdomein gekoppeld opgelost. De daaropvolgende deelmodellen worden ontkoppeld opgelost, waarbij de uitkomst van het vorige deelmodel als randvoorwaarde op het volgende deelmodel opgelegd wordt.

1 Is dit een volwaardig trillingsmodel?

Nee

2 Wat is het novum?

- Geen

3 Wat is de conclusie?

Publicatie:

- Er wordt één case studie beschreven, waarbij geïllustreerd wordt, dat de deelmodellen 3 en 4 daadwerkelijk ontkoppeld behandeld mogen worden.

RIVM:

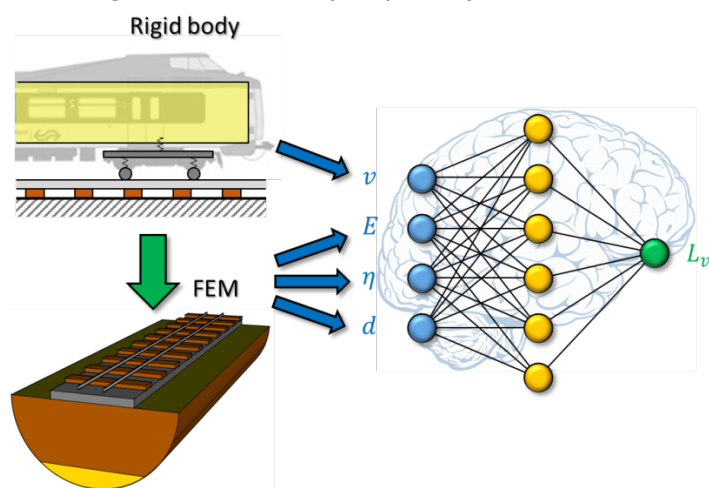
-

**4 Hoe wordt rekening gehouden met de natuurlijke variatie?
Niet**

5 Welke aspecten zijn te gebruiken in het trillingsmodel?

- PML is een optie om het model te reduceren. Echter, deze werkt alleen in sommige gevallen perfect.

3.6.3 *Edinburgh-Mons model (ScopeRail)*



Figuur 14 Schematisering van het Edinburgh-Mons model.

In [4] en [5] wordt een model gepresenteerd dat specifiek voor screening bedoeld is. In het artikel wordt screening in tegenstelling tot dit rapport juist "scoping" genoemd. Het artikel beschrijft hoe een neurale netwerk (NN) gebouwd wordt om aan de hand van verschillende input (bodemgesteldheid, trein type en snelheid) de resulterende trillingsniveaus bij hoge snelheidstreinen voorspeld worden (zie Figuur 14). Bij het opbouwen van het NN wordt gebruik gemaakt van het zogenaamde *back propagation multilayer perceptron* methode. Bij deze methode wordt de blackbox van het NN geupdate door de bekende/voorberekende resultaten te vergelijken met wat het NN zou voorspellen.

Het leerproces geschiedt aan de hand van 360 permutaties van één 3D FEM simulatie (bijlage B.3) waarin alle deelmodellen vertegenwoordigd zijn. Onderzocht is ook met welke invoerparameters het NN heeft. Daartoe is een gevoeligheidsstudie uitgevoerd, waaruit blijkt dat de treinsnelheid, de elasticiteitsmodulus van de bodem, de Rayleigh damping (dat is een typische numerieke manier om de materiaaldemping te definiëren) en de afstand tot het spoor de belangrijkste parameters zijn. Daarnaast is de bodem onderverdeeld in slechts twee lagen.

1. Is dit een volwaardig trillingsmodel?

Nee

2. Wat is het novum?

- Het neurale netwerk en het proces van machine learning

3. Wat is de conclusie?

Publicatie:

- De voorspellingen komen goed overeen met enkele metingen
- De doorlooptijd van een voorspelling is nihil
- Het neurale netwerk kan aangepast worden voor elke voorspellingsgrootte

RIVM:

- Het achterliggende FEM model (dat in het artikel voldoende beschreven is) lijkt erg inefficiënt, omdat 3s aan gesimuleerde tijd, 50u aan rekentijd benodigd.
- De leerdatabase moet veel groter worden, wanneer het aantal invoerparameters groeit. De vraag is bijvoorbeeld of twee bodemlagen voldoende is voor de Nederlandse situatie

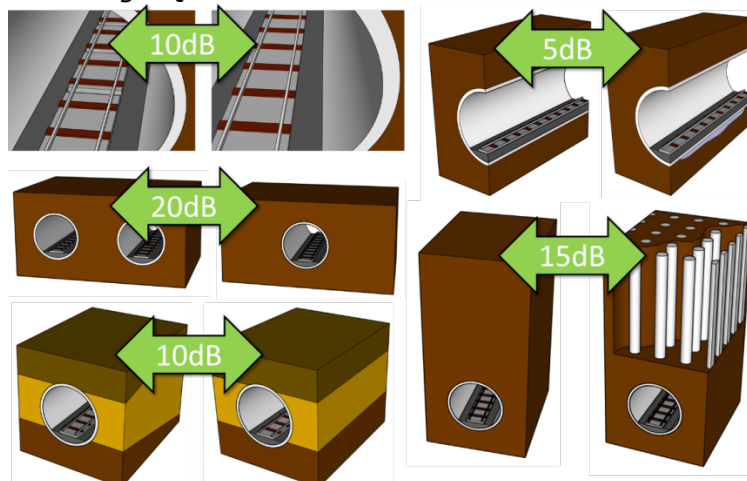
4. Hoe wordt rekening gehouden met de natuurlijke variatie?

Niet

5. Welke aspecten zijn te gebruiken in het trillingsmodel?

- Het toepassen van NN/*Machine learning* is interessant. Dit kan op basis van simulaties, maar ook op basis van metingen.

3.6.4

Cambridge-Qatar-Terre Haute-Leuven model

Figuur 15 Samenvatting van de resultaten uit [4].

In [6] wordt niet zozeer een nieuw model besproken, maar wel waaraan een fysisch compleet model moet voldoen wanneer trillingen door treinen in spoortunnels gesimuleerd worden. De volgende aspecten worden besproken (zie ook Figuur 15):

1. Wanneer een onderbroken ballastloos spoor gemodelleerd wordt als een continue ballastloos spoor dan kunnen de afwijkingen van 10dB in trillingsniveau ontstaan.
2. Vaak komen tunnels in paren voor. Wanneer de aanwezigheid van de tweede tunnel niet gemodelleerd wordt, kunnen afwijkingen van 20dB in trillingsniveau ontstaan.
3. Vaak worden bodemlagen alleen in de horizontale richting aangenomen. Echter, dergelijke lagen laten soms hellingen zien

van 10°. Dergelijke hellingen veroorzaken afwijkingen tot 10dB in trillingsniveau.

4. Door verzakkingen, bestaat niet overal contact tussen de tunnelwand en de bodem. Het negeren van deze verzakkingen in het model kan leiden tot een verschil van maximaal 5dB in trillingsniveaus
5. Als laatste hebben paalfunderingen aan het oppervlak invloed op de ondergrondse trillingen. Paalfunderingen kunnen afwijkingen tot 15dB in het trillingsniveau veroorzaken.

1. Is dit een volwaardig trillingsmodel?

Nee

2. Wat is het novum?

- Er wordt een schatting gemaakt welke onzekerheden enkele factoren introduceren

3. Wat is de conclusie?

Publicatie:

- Maak een zo realistisch mogelijk model (met het oog op de bovengenoemde vijf factoren)

RIVM:

-

4. Hoe wordt rekening gehouden met de natuurlijke variatie?

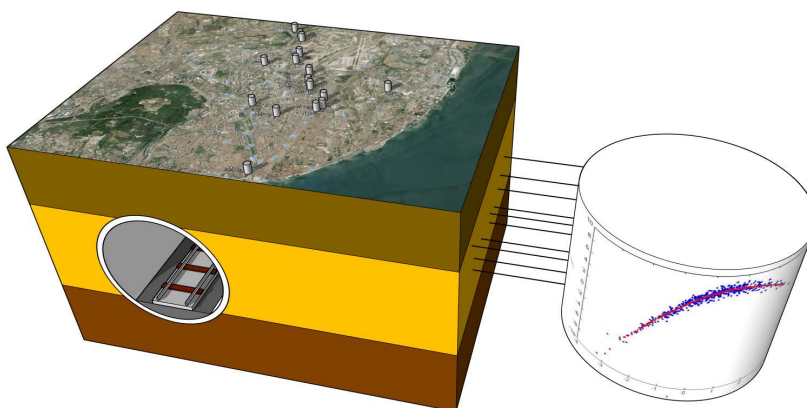
Er wordt een betrouwbaarheidsinterval gegeven bij elk van de vijf bovengenoemde factoren.

5. Welke aspecten zijn te gebruiken in het trillingsmodel?

- De wetenschap hoe belangrijk het is om de bodeminhomogeniteit goed mee te modelleren.

3.6.5

Lissabon model



Figuur 16 Schematische weergave van het Lissabon model.

In [7] wordt een empirisch model voorgesteld om de spoorse trillingen in een woning te voorspellen (zie Figuur 16). Het model is gebaseerd op een database van 172 trillingsmetingen die gedurende 3 jaar in gebouwen rond het spoor in Lissabon zijn uitgevoerd.

Vervolgens is lineaire regressie analyse uitgevoerd op de data, waarbij gefit is op zowel kwantitatieve variabelen (afstand tot het spoor en treinsnelheid) als kwalitatieve/beschrijvende parameters (spoorbaantype, bodem type en gebouw type) is gefit. Het bijzondere is dat er kwalitatieve parameters gebruikt zijn die niet in een cijfer te vangen zijn. Voor elke mogelijke optie van een kwalitatieve parameter

wordt een variabele ingevoerd. In de database van gemeten situaties wordt de waarde van een variabele gelijk één gezet, wanneer de betreffende optie van toepassing is, en gelijk nul wanneer dat niet zo is.

Er zijn verschillende regressie modellen onderzocht, waarbij vooral gelet is of de betreffende variabelen lineair of logaritmisch in het model opgenomen wordt. Uiteindelijk is de geschiktheid van elk model onderzocht aan de hand van meerdere methoden (analyse van de determinatiecoëfficiënt, ANOVA, AIC, SBIC).

1. Is dit een volwaardig trillingsmodel?

Nee

2. Wat is het novum?

- Lineaire regressie met kwalitatieve parameters

3. Wat is de conclusie?

Publicatie:

- De voorspellingen komen redelijk goed overeen met de gemeten waarden
- Door spooroneffenheid mee te nemen wordt de nauwkeurigheid waarschijnlijk vergroot
- De database wordt continue aangevuld

RIVM:

-

4. Hoe wordt rekening gehouden met de natuurlijke variatie?

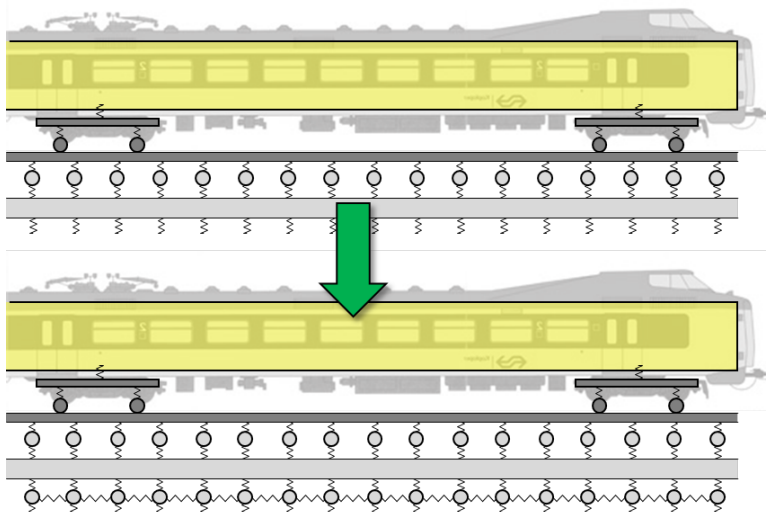
Niet

5. Welke aspecten zijn te gebruiken in het trillingsmodel?

- De methode zou wellicht toegepast kunnen worden op de data gegenereerd in BET verkeer (hoofdstuk 2.1.2)

3.6.6

Athene-Mons model



Figuur 17 Schematische weergave van het Coupled Lumped Mass model (CLM).

In [8] wordt specifiek ingegaan op hoe de bodem in een rigid body bronmodel (bijlage B.3.3) gerepresenteerd dient te worden. De klassieke representatie met veren en dempers (oftewel *Winkler fundering*) wordt vergeleken met een zogenaamde Coupled Lumped Mass model (CLM). Bij een CLM (zie Figuur 18) model worden de individuele veren en dempers van een Winkler fundering voorzien van

een massa en worden ze onderling met extra veren en dempers gekoppeld. De idee is dat met een dergelijke koppeling rekening gehouden wordt met de fysisch aanwezige interactie tussen twee verschillende punten op het maaiveld. De invoerparameters van het CLM model worden bepaald met behulp van een 3D FEM model (bijlage B.3). Dit kan of door statische condensatie gebeuren, waardoor in wezen een superelement ontstaat van het bodemoppervlak (bijlage B.3.2), of door een analytische fit op basis van het zogenaamde *Lysmer* analogon [9].

1. Is dit een volwaardig trillingsmodel?

Nee

2. Wat is het novum?

- CLM model van de bodem in het bronmodel

3. Wat is de conclusie?

Publicatie:

- Een efficiënte manier van CLM modellering is geïntroduceerd
- De CLM modellering is vergeleken met een volledig 3D model, en de resultaten liggen dicht bij elkaar.
- In de bestudeerde cases blijkt de klassieke Winkler fundering nog nauwkeurig genoeg in vergelijking met de CLM modellering

RIVM:

- Hoewel de klassieke Winkler fundering nog redelijk dicht bij de CLM modellering ligt, is CLM toch een efficiënt en interessant alternatief.

4. Hoe wordt rekening gehouden met de natuurlijke variatie?

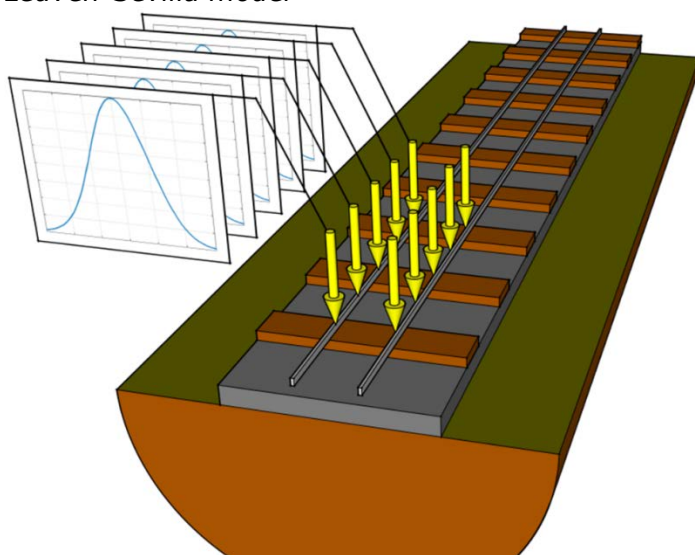
Niet

5. Welke aspecten zijn te gebruiken in het trillingsmodel?

- CLM modellering van de bodem in een rigid body bronmodel

3.6.7

Leuven-Sevilla model



Figuur 18 Schematische weergave van het Leuven-Sevilla model.

In [10] wordt ingegaan op de statistische modellering van het effect van spooroneffenheden (zie Figuur 18). Vanwege het onregelmatige karakter van de spooroneffenheden, worden deze vaak als een smalbandig (een amplitude per golflengte) of als een breedbandig (een RMS waarde per

groepje frequenties) beschreven. Beide typen beschrijvingen leiden niet tot een unieke bepaling van het hoogteprofiel van de spooroneffenheid. Twee verschillende realisaties die bij de spectrale beschrijving van de spooroneffenheid passen, kunnen tot heel verschillende resultaten in de voorspelling van de spoorse trillingen leiden.

In het paper wordt een methode afgeleid waarbij de variabiliteit in voorspelde spoorse trillingen kan worden bepaald, ten gevolge van de niet-deterministische beschrijving van de spooroneffenheid. Het model gaat uit van een 2.5D beschrijving in het k, ω -domein (bijlage B.4), waarbij uitgegaan wordt dat de situatie homogeen is in richting van het spoor. Er wordt verder aangenomen dat de dynamische aslast als een stationair Gaussisch proces beschreven kan worden.

1. Is dit een volwaardig trillingsmodel?

Nee

2. Wat is het novum?

- Statistische modellering van de spooroneffenheid

3. Wat is de conclusie?

Publicatie:

- Het statistische model is gevalideerd aan de hand van Monte Carlo simulatie
- Het model is gebruikt om afwijkingen tussen deterministische voorspellingen en metingen te verklaren

RIVM:

- Het beschreven model lijkt sterk op wat in bijlage B.3.1 beschreven wordt als SFEM

4. Hoe wordt rekening gehouden met de natuurlijke variatie?

De natuurlijke variatie aan spooroneffenheid wordt gemodelleerd

5. Welke aspecten zijn te gebruiken in het trillingsmodel?

- Statische modellering van de spooroneffenheid in een rigid body bronmodel

3.6.8

Southampton model

In [11] wordt welke modellen passend zijn bij welke problemen. Er wordt uitgelegd dat een model een bepaald niveau aan complexiteit behoeft, zodanig dat de voor trillingen en geluid verantwoordelijke fysica onderzocht kan worden. Een model mag daarentegen niet zo complex zijn dat de resultaten niet meer te interpreteren zijn. Voor drie typen aan onderzoeksvragen wordt een aantal modellen voorgeschreven:

1. *Rijgeluid:*

Om het rijgeluid ten gevolge van spooroneffenheden en vlakke plaatsen te simuleren, wordt het software pakket TWINS (Track-Wheel Interaction Noise Software) aangeraden. In TWINS wordt een grote range aan methoden gebruikt, namelijk: (semi-) analytische methode, rigid bodies, FEM en BEM om het afgestraalde geluid van de wielen, spoorstaven en het baanlichaam te berekenen.

2. *Aerodynamisch geluid:*

Vooraf bij hoge snelheidstreinen wordt het geluid veroorzaakt door de luchtstroom om de trein heen, een belangrijke bron. Er wordt voorgesteld om dergelijke fenomenen met behulp van *Computational Fluid Dynamics* (CFD) inclusief turbulentiemodellen zoals *Large Eddy Simulation* (LES) te

simuleren. CDF is een rekenmethode die in de meeste gevallen gebaseerd is op FDM (bijlage B.1).

3. *Bodemtrillingen:*

Voor het modelleren van bodemtrillingen wordt een veelvoud van mogelijke modellen voorgesteld. Deze variëren van analytische modellen tot BEM/FEM modellen en zelfs hybride modellen waarbij deels in het x,t -domein en deels in k,ω -domein gesimuleerd wordt (bijlage B.4).

1. Is dit een volwaardig trillingsmodel?

Nee

2. Wat is het novum?

•

3. Wat is de conclusie?

Publicatie:

•

RIVM:

•

4. Hoe wordt rekening gehouden met de natuurlijke variatie?

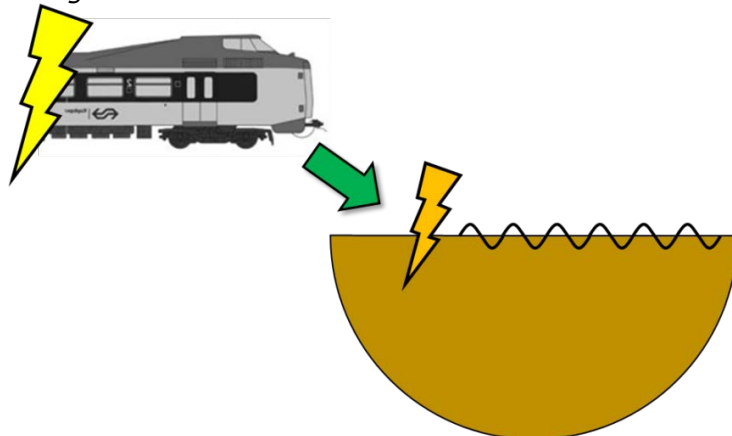
Niet

5. Welke aspecten zijn te gebruiken in het trillingsmodel?

- Dit artikel zou als voorbeeld kunnen dienen voor het scenario van het *Kookboek* (Hoofdstuk 4.3)

3.6.9

Perugia model



Figuur 19 Schematische weergave van het Perugia model.

In [12] wordt een zeer simpel analytisch model voorgesteld, waarbij twee deelmodellen ter sprake komen (zie Figuur 19). In het eerste deelmodel wordt de hoeveelheid energie dat door de bron (trein-spoorbaan) de bodem ingevoerd wordt, berekend. In het tweede model wordt op basis van de aanname dat alleen Rayleigh golven door de bodem getransporteerd worden, de geometrische energieverdeling, en dus de trillingsverdeling, berekend. Dat laatste gebeurt als het ware met de Barkan vergelijking (bijlage B.7) zonder materiaaldemping. Het bronmodel bestaat uit een vertaalslag van de kinetische energie van de trein naar de energie die daadwerkelijk de bodem instroomt. De kinetische energie wordt berekend op basis van treinmassa, treinsnelheid en spoorgeometrie. De vertaalslag gebeurt op basis van

een proportionaliteitsconstante die op basis van metingen langs een hogesnelheidsspoor gekalibreerd is.

1. Is dit een volwaardig trillingsmodel?

Nee

2. Wat is het novum?

- De eenvoudigheid van het model

3. Wat is de conclusie?

Publicatie:

- Na kalibratie komen de voorspellingen goed overeen met andere metingen

RIVM:

- Bovenstaande conclusie lijkt alleen te werken in soortgelijke situaties. De vraag is of de conclusie standhoudt bij de variërende bodem van Nederland

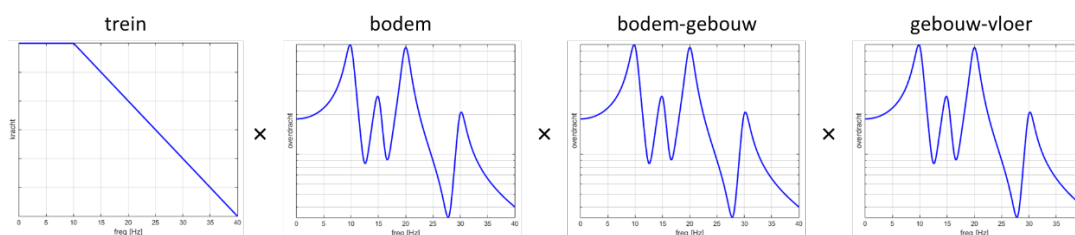
4. Hoe wordt rekening gehouden met de natuurlijke variatie?

Niet

5. Welke aspecten zijn te gebruiken in het trillingsmodel?

- Indien in het trillingsmodel gebruik gemaakt wordt van een brondatabase, zou dit model daaraan gekalibreerd kunnen worden om zo tot een scoping-model te komen.

3.6.10 VIBRA-1 & -2 model



Figuur 20 Het Vibra-1 & -2 model: een aaneenschakeling van spectra.

In [13] worden twee Zwitserse modellen VIBRA-1 en -2 (zie Figuur 20) beschreven en gevalideerd volgens ISO 14837-1. VIBRA-1 is een eenvoudig empirisch model en VIBRA-2 is een semi-empirisch model. Beide modellen beschrijven de trillingen van de bron tot aan de vloer in een woning. Verder kan uit de modelresultaten een afgestraald geluidniveau in de woning berekend worden.

VIBRA-1:

Het model VIBRA-1 bestaat uit een aaneenschakeling van factoren, die (en dat is niet geheel duidelijk) uit een database gehaald worden. Zo bestaan er factoren voor, de beoordelingsgrootte (v_{RMS} , v_{max} , ...), het treintype, de gemiddelde treinsnelheid, het spoortype, de afstand tot het spoor, de koppelfactor tussen bodem en gebouw en een opslingeringsfactor van de vloer.

VIBRA-2:

Het model VIBRA-2 bestaat uit een aaneenschakeling van bron- en overdrachtsspectra (zie bijlage B.8 voor overdrachts-/admittantiespectrum). Het gaat hierbij om de volgende spectra: bron, transmissie door de bodem, bodem-gebouw overdracht en het vloerspectrum. Alle spectra kunnen gemeten worden. Voor het transmissiespectrum door de bodem is een tweetal analytische

deelmodellen toegepast, namelijk een frequentieafhankelijke Barkan vergelijking (bijlage B.7) en een model dat voorgeschreven wordt door het Duitse DB. Dat laatste model is te vergelijken met de Barkan formule zonder materiaaldemping.

1. Is dit een volwaardig trillingsmodel?

Nee

2. Wat is het novum?

•

3. Wat is de conclusie?

Publicatie:

- Beide modellen zijn vergeleken met 70 metingen van uiteenlopende situaties.
- Beide modellen laten een gemiddelde afwijking van ongeveer 3dB en een standaardafwijking van ongeveer 6dB zien

RIVM:

- VIBRA-2 lijkt vanwege de metingen niet geschikt als trillingsmodel
- Het eenvoudige VIBRA-1 heeft in Zwitserland dezelfde performance als VIBRA-2. Echter, de empirische methode is vooral gericht op Zwitserland

4. Hoe wordt rekening gehouden met de natuurlijke variatie?

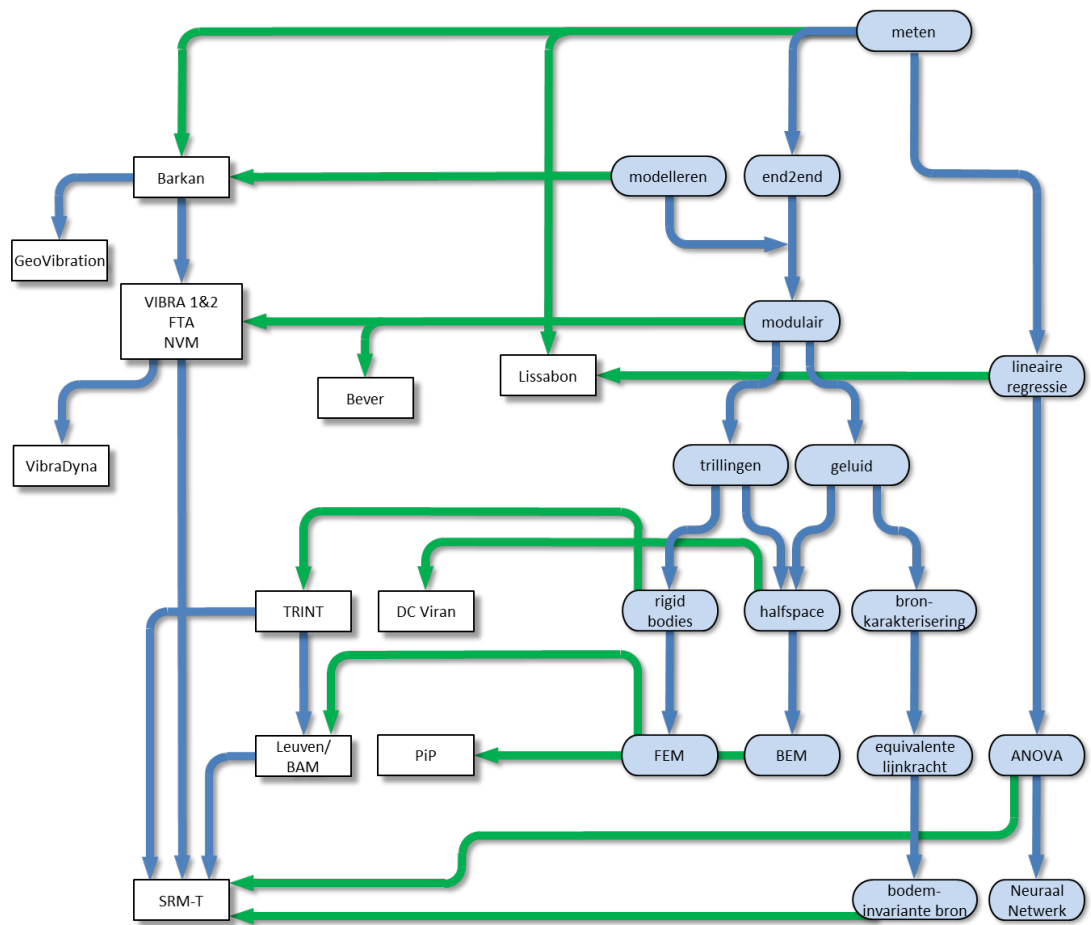
Niet

5. Welke aspecten zijn te gebruiken in het trillingsmodel?

3.7 Stamboom bestaande rekenmodellen

De rekenmodellen die in dit hoofdstuk besproken zijn hebben een zekere relatie met elkaar. Het diagram uit Figuur 21 geeft deze relatie weer. Van boven naar beneden is er sprake van een zekere evolutie¹⁹. Modellen (rechthoek) zijn gebaseerd op methoden of basisprincipes (ovaal).

¹⁹ Een evolutiepijl tussen modellen betekent niet dat de ontwikkelaars hun model bewust hebben gebaseerd op het eerdere.



Figuur 21 Stamboom van de rekenmodellen

4 Ontwikkelingsmogelijkheden en scenario's

4.1 Inleiding

De stappen die moeten worden gezet om van een kansrijk bestaand model te komen tot een uniform rekenmodel noemen we een scenario. Er zijn meerdere modellen en methoden die als startpunt kunnen dienen, elk met hun eigen stappenplan om tot vervolmaking te komen.

In dit hoofdstuk worden eerst de bestaande modellen en methoden beoordeeld op hun kansrijkheid om te kunnen dienen als uniform rekenmodel. Dat gebeurt aan de hand van een kruistabel. Daarnaast worden ideeën die zijn voortgekomen uit een workshop met trillingsdeskundigen van de ingenieursbureaus onderzocht. Tot slot worden ook inzichten uit een literatuurscan gebruikt. Dit levert een vijftal scenario's.

Elk scenario beschrijft het proces om een bestaand model(concept) voor spoortrillingen zodanig te verbeteren dat het voldoet aan de functionele specificaties. De ontwikkelingsmogelijkheden zijn echter niet voor elk bestaand model hetzelfde. Dit leidt ertoe dat het ene scenario een betere kans op een uniform rekenmodel (dat aan de eisen voldoet) heeft dan het andere. Uiteindelijk wordt een voorkeur uitgesproken voor een van die scenario's, enerzijds vanuit het perspectief van de end-user, anderzijds vanuit het perspectief van de lead-user.

4.2 Kruistabel

De kruistabel is een grote matrixtabel waarin de bestaande rekenmodellen op aspecten worden beoordeeld. Deze bestaat uit verschillende deeltabellen. In het eerste deel wordt aangegeven welke 'deelsystemen' door het betreffende rekenmodel worden beschreven. Wat hiermee bedoeld wordt, is in §4.2.1 toegelicht. Het tweede deel van de kruistabel, uitgewerkt in §4.2.2, betreft een toetsing van elk model aan elke eis uit het FPvE.

4.2.1 *Deelsystemen*

In Tabel 3 zijn van links naar rechts de deelsystemen gegeven waaruit het gehele systeem van bron naar de fundering is opgebouwd. Volledigheidshalve is ook het deelsysteem 'gebouw' opgenomen, omdat de scope van de Bts tot aan de vloer reikt.

De rij 'effect min-max' geeft een indicatie van de trillingsvariatie die in de praktijk per deelsysteem wordt aangetroffen, uitgedrukt in dB. Het effect van verschillende treintypes wordt bijvoorbeeld geschat op zo'n 6 dB, terwijl de variatie tussen verschillende vloerconstructies in de orde van 12 dB kan liggen. De totale variatie (18 dB) is de "kwadratische" som van de variaties van de deelsystemen, er van uitgaande dat die variaties onderling onafhankelijk zijn (en uitdrukkelijk dat in de praktijk "nooit" alles tegelijk aan de min- of aan de max-kant zit).

De gekleurde rijen geven de onderzoeksscope voor de Bts, voor de drie fasen van trillingsonderzoek (scoping, screening, gedetailleerd) en voor

de onderzoeksdoelstelling van de onderhavige opdracht. Voor gedetailleerd onderzoek zijn enkele verschillende deelbalken getekend, omdat dit detailonderzoek zich op verschillende deelsystemen kan richten, afhankelijk van waar de meeste onzekerheden in het model dienen te worden geëlimineerd.

Tabel 3 Deelsystemen en scope

	BRON			OVERDRACHT					totaal:	
	trein	baan		bodem			gebouw			
		variatie subbron	lichaam invloed	near field interactie	far field propagatie	near field interactie	fundatie	constructie+vloer		
effect min-max [dB]	6	6	3	6	6	3	3	12	18	
Scope Bts										
Scoping										
Screening										
"Detailed modelling"										
Opdracht RIVM 2016							vervolgfase na 2016			

4.2.2 Inhoud kruistabel

De kruistabel is als Bijlage C opgenomen. Omwille van de leesbaarheid is die over meerdere pagina's verdeeld. Deze paragraaf behandelt deel 1 t/m 3. Een miniatuur daarvan is afgebeeld in Tabel 4.

In de kruistabel wordt voor de bestaande modellen met een gele balk aangegeven welke deelsystemen van het gehele keten van trein tot gebouw ze dekken (links).

Tabel 4 Kruistabel miniatuur (zie Bijlage C, deel 1 t/m 3)

	deelsystemen							enduser							leaduser							kwaliteit							bron							interacties/ invloeden						
	deel 01	deel 02	deel 03	deel 04	deel 05	deel 06	deel 07	eis 01	eis 02	eis 03	eis 04	wens 05	eis 06	eis 07	eis 08	eis 09	eis 10	eis 11	eis 12	eis 13	eis 14	eis 14	eis 15	eis 16	eis 17	eis 18	eis 19	eis 19	eis 20	eis 21	eis 22	eis 22	eis 23	eis 24	eis 25	eis 26	eis 27	wens 28	eis 29			
model 01																																										
model 02																																										
model 03																																										
model 04																																										
model 05																																										
model 06																																										
model 07																																										
model 08																																										
model 09																																										
model 10																																										
model 11																																										
model 12																																										
model 13																																										
model 14																																										

dit deelsysteem zit in het rekenmodel
dit deelsysteem zit niet in het rekenmodel

voldoet
betreft wens, geen eis, dus niet beoordeeld

voldoet niet
voldoet deels niet

actie nodig
voldoet deels

Rechts van de gele balken wordt van de verschillende aspecten uit het FPvE beschreven of deze in het model beschikbaar zijn en, indien mogelijk, hoe uitgebreid de parameteropties zijn. De eisen zijn van links naar rechts gegroepeerd: end-user, lead-user, kwaliteit, fysieke bronbeschrijving, en fysieke beschrijving van interacties en invloeden. Ook enkele wensen zijn opgenomen, maar deze zijn niet in de beoordeling meegenomen.

Daarbij wordt de volgende kleurstelling gebruikt, die het mogelijk maakt in een oogopslag te bepalen hoe compleet het rekenmodel past op het FPvE:

- Groen: model voorziet redelijk tot goed in betreffende eis;
- Oranje: model voorziet matig tot slecht in betreffende eis;
- Grijs: deelsysteem niet beschikbaar; eis daardoor niet van toepassing;
- Wit: actie nodig, is in principe voorzien maar nog niet geïmplementeerd.

Deze kruistabel is, samen met de gebruikte onderzoeks aanpak en het FPvE, tijdens een workshop besproken met de trillingsdeskundigen van de ingenieursbureaus. De bevindingen en adviezen van die workshop zijn vastgelegd in een verslag²⁰. In de volgende paragraaf wordt een beschrijving op hoofdlijnen gegeven.

4.3 Workshop

Tijdens de workshop is een conceptversie van het rapport gepresenteerd met daarin het FPvE, een beschrijving van de bestaande modellen en een eerste versie van de kruistabel (bijlage C, deel 1 t/m 3). De deelnemers hebben hierop hun commentaar gegeven, wat is verwerkt in dit rapport.

In het tweede deel van de workshop zijn drie subgroepen geformeerd die als taak kregen een door hen gewenst eindbeeld van een uniform rekenmodel te schetsen. Hierbij moest men ingaan op vragen over een ideaal model, de haalbaarheid, de omgang met stochastiek en V_{max} , en kosten/baten van een uniforme aanpak. Dit gaf per subgroep een verschillend eindbeeld. Deze drie geschetste perspectieven worden hieronder weergegeven. In de volgende paragraaf blijkt hoe deze kunnen worden ingepast in een scenario om tot een uniform rekenmodel te komen.

1. *Het voorschrift of 'kookboek'*

In dit eindbeeld is er geen uniform model. De visie is dat per situatie de beschikbare informatie kan wisselen en dat het daarom beter is per situatie de best bij de beschikbare informatie passende methode te kiezen en daarmee een model te 'bakken'. Om toch uniformiteit en bureauonafhankelijkheid te bewerkstelligen, kan in een voorschrift worden vastgelegd in welke situatie welke methode moet worden gekozen en hoe daarmee het model wordt opgezet²¹.

²⁰ *Verslag Workshop Rekenmodel trillingen spoor*, 18 oktober 2016, Utrecht, RIVM, 1-11-2016

²¹ Dit laatste betekent dat het voorschrift beantwoordt aan de definitie van 'methodiek' in §2.1: niet alleen de eisen aan het onderzoek, maar ook de te gebruiken onderzoeksmethode of modellen wordt concreet voorgeschreven.

2. *Het uniforme model met 'trillingsregister'*
In dit eindbeeld ligt de nadruk op het organiseren van goede invoergegevens. Analooq aan het 'geluidregister' wordt een database gevuld met gegevens over de spoorbaan en het spoorgebruik. Verder is er een lijst met bronsterkten nodig en een bodemprofielkaart. Dit eindbeeld beschrijft niet welk rekenmodel nodig is, maar eist slechts dat het gekozen model met deze gegevens moet kunnen rekenen.
3. *De 'NL 3D FEM' aanpak*
In dit eindbeeld is het model niet alleen geschikt voor screenend maar ook voor gedetailleerd onderzoek, opdat zo snel mogelijk duidelijkheid ontstaat over maatregelkosten. Waar het in dit eindbeeld om draait is dat een database met nauwkeurige data over de bodem wordt gecombineerd met empirische metingen aan de bron. Hiertoe wordt een database met nauwkeurige bodemdata opgezet, bijvoorbeeld gebaseerd op GeoTOP (een product van DINO Loket). Met die database wordt een 3D FEM model van Nederland (strook langs het spoor) gebouwd. Er wordt parallel een database met trillingsmetingen aan treinen opgezet, bijvoorbeeld op basis van VibraDyna. Er wordt een overkoepelend model gemaakt dat de empirische emissiemetingen combineert met de berekende bodemoverdrachtsberekeningen.

4.4 Selectie van modellen voor ontwikkelscenario's

4.4.1 Inleiding

De stappen die moeten worden ondernomen om van een kansrijk bestaand model te komen tot een uniform rekenmodel noemen we een scenario. Er zijn meerdere modellen en methoden die als startpunt kunnen dienen, elk met hun eigen stappenplan om tot vervolmaking te komen. Voor de bepaling wat kansrijke modellen zijn, gebruiken we de volgende bronnen:

1. bestaande modellen die als kansrijk uit de kruistabel komen;
2. de ideeën die op de workshop zijn aangereikt;
3. deelmodellen die goed scoren in de kruistabel;
4. de stamboom van alle rekenmodellen.

Dat is in de volgende paragrafen uitgewerkt.

4.4.2 Beoordeling kruistabel

Uit de kruistabel (zie §4.2.2) blijkt in één oogopslag dat geen van de bestaande rekenmodellen aan alle eisen voldoet: voor geen model is de hele rij namelijk geheel groen gekleurd. Het is naar verwachting wel mogelijk om modellen te vervolledigen (als ze aan bepaalde eisen nog niet voldoen) of te verbeteren (als bepaalde aspecten kwalitatief onvoldoende beschreven worden door het model). De mate waarin modellen compleet en geschikt kunnen worden gemaakt is vervolgens nader beoordeeld.

Daartoe is een eindbeoordeling gemaakt die als deel 4 van de kruistabel is opgenomen in bijlage C. Een score voor twee aspecten is gemaakt:

- de geschiktheid van het model in zijn huidige vorm;
- de haalbaarheid om dit model tot een uniform rekenmodel te maken.

De "geschiktheid" is alleen beoordeeld voor het deel van de keten waar het model voor bedoeld is. Bijvoorbeeld FEM scoort goed, ook al bevat dit model geen bronbeschrijving (trein-baan interactie).

De "haalbaarheid" betreft de vraag of de basiskwaliteit van een model zodanig is dat het in een scenario kan worden verbeterd tot een uniform rekenmodel.

Een goede "geschiktheid" volstaat niet voor een goede "haalbaarheid". Zo is PiP bedoeld (en zeer geschikt) om trillingen vanuit tunnels te modelleren, maar is het vanwege de schematisering van PiP niet haalbaar om het model voor bovengrondse treinen toepasbaar te maken.

Het product van "geschiktheid" en "haalbaarheid" is de totaalscore. Op basis van deze beoordeling zijn 3 kansrijke modellen geselecteerd:

- **VibraDyna**, het empirische model van Movares;
- **SRM-T**, het door TNO en TU-Delft ontwikkelde empirisch/numerieke model;
- Een nieuw te ontwikkelen rekenmodel op basis van FEM.

4.4.3 *Ideeën workshop*

De workshop leverde drie ideeën voor scenario's op: elk werkgroepje kwam met een andere oplossing. Tijdens de workshop was er geen tijd om deze tot volle wasdom te laten komen. De stap naar een volwaardig scenario is nog noodzakelijk. We stellen voor om de drie ideeën samen te voegen tot twee scenario's.

- "Trillingsregister" en "3D NL FEM" uit de workshop vormen samen een scenario "**hybride**".
- "**Kookboek**", uit de workshop, gaat als apart scenario verder.

"Hybride" komt uit twee modellen voort die – op onderdelen – zeer goed scoren in de kruistabel: het (generieke) modulair empirische model en het (generieke) FEM model en voegt aan daaraan een beheersing van de invoerparameters aan toe (door middel van een bodemregister en een bronregister).

"Kookboek" komt niet in de kruistabel voor. Het is dan ook geen model maar een methodiek: het beschrijft onder welke omstandigheden welke modellen te gebruiken op welke manier.

4.4.4 *Deelmodellen die in scenario's gebruikt kunnen worden*

Naast de vijf genoemde modellen zijn er nog redelijk tot goed scorende deelmodellen. Voor de gebouwresponsie (berekening tot op de fundering of tot op de vloer) is er met name Bever. Dit onderdeel valt voornamelijk buiten de scope van het onderzoek en hoeft ook niet onderscheidend te zijn voor de scenario's. In feite kan in elk scenario naderhand indien nodig Bever of een gebouwresponsiemodel worden toegevoegd. Voor de bron- en bodembeschrijving is er bijv. "Leuven". "Leuven" zou een alternatief kunnen zijn voor "hybride" met dit verschil dat de bron niet wordt ingemeten maar wordt berekend. Juist de bronbeschrijving zien we echter als de zwakste schakel van de niet-empirische modellen. De fysische schematisering en parametrisering zijn nog onvoldoende uitontwikkeld en dat raakt vooral de Nederlandse toepassing (denk aan de rol van stijfheidsvariatie in de onderbouw en de rol van wissels). Het ligt wel voor de hand om een analytische of numerieke bronbeschrijving

als schragend onderdeel toe te voegen aan een scenario met een empirische bronbeschrijving. Zoals Barkan wordt gebruikt om empirische bodemoverdrachtsmetingen te abstraheren, te ordenen en te duiden, zo kunnen fysische bronbeschrijvingen worden gebruikt om de kwaliteit van bronempirie te verhogen en voorspellingen mogelijk te maken voor die combinatie van factoren waarvoor geen empirie bestaat. Het ook redelijk scorende TRINT is dan mogelijk meer geschikt dan Leuven omdat deze eenvoudiger verbetering van de bronbeschrijving toelaat en omdat deze reeds een bibliotheek aan Nederlandse situaties (treinen, banen, bodems) bevat. De kruistabel levert geen verdere scenario's meer op.

4.4.5 *Stamboom*

Tenslotte is er de stamboom als mogelijke bron van scenario's. Terwijl de kruistabel alleen huidige modellen en methodieken beschrijft, is in de stamboom te zien hoe deze zich verhouden tot elkaar en tot externe invloeden en ontwikkelingen. Te zien is dat "VibraDyna" een bekend recept is, loot aan dezelfde tak die buitenlandse uniforme rekenmodellen NVM (Denemarken) en VIBRA (Zwitserland) heeft opgeleverd. "SRM-T" is jonger, een verdere ontwikkeling. "Hybride" komt nog niet voor maar is een logische vervolgstap. "Kookboek" valt in feite geheel buiten de stamboom, het is dan ook geen model.

De nieuwste ontwikkelingen, blijkt uit de literatuurscan en ook uit de stamboom, gaan over stochastische in plaats van fysische modellering. Van relatief ouderwetse regressiemethoden tot neurale netwerken en *machine learning* aan toe. Daarop gebaseerde modellen zijn onder de noemer "Lissabon" in de kruistabel verschenen, maar deze scoort daar slecht. Dat heeft te maken met het feit dat dergelijke modellen dermate getraind zijn voor hun specifieke situatie dat deze per definitie niet naar de Nederlandse situatie zijn over te zetten. Dat neemt niet weg dat de stochastische aanpak op zichzelf kansrijk is, omdat deze empirische methoden verbetert en empirie nog steeds domineert in de screening modellen en de nu gekozen scenario's. SRM-T is bijvoorbeeld geoptimaliseerd met ANOVA (een statistische techniek) en doet betrouwbaarheidsuitspraken. Movares is bezig ook VibraDyna met een dergelijke techniek te verbeteren. We voegen daarom nog een vijfde scenario toe, genoemd naar een andere stochastische techniek die het midden houdt tussen regressie en neurale netwerken. De werkelijk te kiezen techniek zal onderwerp van onderzoek zijn in het scenario: "**Random Forest**", een nieuw te bouwen statistisch model.

4.5 **Scenario's**

Van de scenario's wordt in de komende subparagrafen beschreven wat het eindplaatje is van het model, welke stappen moeten worden ondernomen om dit eindplaatje te bereiken, hoeveel tijd dit naar verwachting gaat kosten (met een onzekerheid in de orde van een factor 1,5) en wat het model gaat opleveren voor de verlaging van de onderzoeks- en uitvoeringslasten.

De kwaliteit van het resulterend model wordt daarmee impliciet meegenomen (een slecht model zal worden gecompenseerd door ruimere veiligheidsmarges en daardoor verhoogde kosten voor vervolgonderzoek). Het kwaliteitsaspect 'transparantie', waarin de modellen sterk verschillen, wordt wel apart behandeld. Tot slot wordt

een inschatting gegeven van de kans van slagen van een scenario, de kans dat een product wordt opgeleverd dat een aanmerkelijke verbetering betekent t.o.v. de huidige praktijk.

De huidige onderzoekstijd voor de screeningfase wordt geschat op gemiddeld ongeveer 4 maanden (na opdrachtverlening aan een bureau), met een variatie daarop van enkele maanden.

De mogelijke besparingen van de modellen uit de scenario's en de aanloopkosten van een scenario zijn in dit onderzoek slechts globaal te schatten. Een gedegen kostenanalyse kent vele facetten en die valt buiten de scope van dit – voornamelijk technisch-inhoudelijke – onderzoek. Er wordt daarom gewerkt met kosten in 3 globale categorieën: weinig (+); matig (++); veel (+++). Dit is niet bedoeld als een zuiver lineaire schaal. Ter referentie houden we voor de gemiddelde onderzoekskosten in huidig trillingsonderzoek (++) aan. Voor de gedetailleerde fase is dat een vergelijkbaar bedrag, dus (++) . Alle scenario's hebben gemeen dat overige onderzoekslasten zoals de *beheersing* van de doorlooptijd van de screeningfase en de lasten die de huidige praktijk van uitgebreide metingen voor omwonenden betekent zo goed als geëlimineerd worden. De scenario's zijn daar niet onderscheidend in, deze voordelen zijn ingebakken in de keuze voor een modelmatige screening.

De scenario's hebben ook gemeen dat er geen besparing is op de uitvoeringslasten. Net als in de huidige praktijk zal – ook bij inzet van een screening model – het besluit tot het nemen van (kostbare) maatregelen altijd kunnen worden gebaseerd op nadere, gedetailleerde, zo betrouwbaar mogelijke onderzoeken. Voorwaarde daarvoor is wel dat de regelgeving (met name: de Bts) toelaat dat besluitvorming plaatsvindt op basis van andere (gedetailleerdere) modellen dan het screening model. Indien regelgeving het screeningmodel ook voor het ontwerp en de afweging van maatregelen zou aanwijzen is, in verband met de ingebakken conservativiteit, een toename van uitvoeringslasten te verwachten, tenzij het screeningmodel op het niveau van een gedetailleerd model wordt gebracht. Dit laatste vormt geen onderdeel van de scenario's.

4.5.1

Vaste elementen in elk scenario

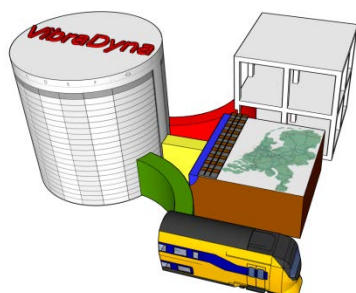
Alle in dit hoofdstuk beschreven scenario's hebben nog een aantal vaste elementen gemeen.

1. Treinvariatie. De onzekerheid die dat introduceert wordt aangepakt door de introductie van de tussengrootheid V_{rms} . Daartoe zal een onderzoek moeten worden uitgevoerd om een eenduidige relatie tussen deze grootheid en de beoordelingsgrootheden V_{max} en V_{per} te bepalen op grond van spoorgebruik. Het model zal vervolgens alleen V_{rms} voorspellen. Dit onderzoek zal steunen op voorgaand onderzoek hiernaar (CargoVibes, SRM-T) en lopend onderzoek (ProRail-project Verkenning Herziening V_{max} Bts).
2. Woningvariatie. De onzekerheid die dat introduceert wordt aangepakt door de introductie van H_{gebouw} met vastgestelde waarden (mogelijk als functie van enkele eenvoudig te bepalen gebouwenkenmerken). De introductie van H_{gebouw} in het meetvoorschrift dat aan de Bts hangt is mede hiervoor bedoeld: intussen is in tal van projecten H_{gebouw} bepaald en gerapporteerd voor vele typen woningen. Met een metastudie op deze

- resultaten kan H_{gebouw} nu worden vastgelegd en gebruikt in modellen. Het deelmodel Bever kan hier een rol in spelen.
3. Naast H_{gebouw} , die opslinging en demping in het gebouw an sich beschrijft (waarbij de vloeren een voorname rol spelen) is er nog de bodem-gebouw interactie, ook wel gekarakteriseerd als $H_{\text{fundering}}$. Hoe $H_{\text{fundering}}$ gemodelleerd moet gaan worden zal in het gekozen scenario onder de loep worden genomen. De sterkten en zwakten van het scenario zullen richting geven aan de oplossing. Mogelijkheden voor de modellering van $H_{\text{fundering}}$ zijn bijv. FEM, Bever en empirie.
 4. Validatie. Alle voorgestelde modellen behoeven validatie. Dat geldt dus ook zeker voor de empirische modellen. Naast de metingen die in veel gevallen nodig zijn om modellen te vullen zijn er dus ook metingen nodig om de modellen te controleren. Aangezien er intussen, door uitgebreide metingen in de afgelopen jaren, veel metingen al beschikbaar zijn zou validatie de vorm kunnen hebben van het toepassen van het model in die oude situaties (postdictie) en vergelijking met meetresultaten toentertijd. Dat kan uiteraard niet als het model gebaseerd is op de metingen (zoals bij het empirische model VibraDyna). Overigens is te voorzien dat de rijkdom aan beschikbare meting onvoldoende geschikt zal zijn voor die andere meettaak: het vullen van modellen. Voor het vullen zijn waarschijnlijk metingen nodig die volgens nauwkeurige voorschriften (zoals het SRM-T protocol) zijn uitgevoerd.
 5. GIS/GUI. De scenario's leiden (met één uitzondering) tot een model, geïmplementeerd in een rekenhart, dat voor een gegeven woning bij een gegeven afstand tot een gegeven spoor bij gegeven spoorgebruik trillingsgrootheden genereert. Zoals bij geluid SRM door particuliere bedrijven is voorzien van een GUI (graphical user interface), eventueel in de vorm van een GIS-laag (geografisch informatie systeem) om snel een heel gebied te beschouwen, zo zal het rekenhart uiteindelijk ook in een GIS/GUI opgenomen moeten gaan worden, voor vlot gebruik. Het trillings-"model" GeoVibration is in feite niet anders dan zo'n GIS/GUI schil en ligt dus als het ware al klaar voor de komst van een rekenhart. Het trillingsmodel VibraDyna is een rekenhart dat op dit moment wordt gekoppeld aan het GIS/GUI programma WinHavik. De GIS/GUI stap hoeft dus geen ingrijpende stap te zijn en kan worden overgelaten aan de markt.

4.5.2 De 5 scenario's in detail

4.5.2.1 VibraDyna



Dit scenario draait om een bestaand model waaraan wat gesleuteld gaat worden. Het model is nu niet vrij beschikbaar dus de eerste stap zal zijn om tot afspraken te komen met de ontwikkelaar en huidige eigenaar over de afkoop van de ontwikkelingskosten van het Vibradyna-rekenhart en van het intellectuele eigendom.

Vervolgens dient een onafhankelijke beoordeling van de geschiktheid van het model te worden gemaakt. Dat

kan op verschillende manieren gebeuren, bijvoorbeeld door auditing, controle en beoordeling van de gehanteerde rekenregels, verificatie en validatie. Aandacht zal er ook moeten zijn voor hoe om is gegaan met een bekende bottleneck voor empirische modellen: het *mapping* probleem (vertaling van o.a. baan en bodem naar de invoeropties van het model).

Wat betreft bodeminformatie heeft de gebruiker van VibraDyna de keus uit locatiespecifieke gegevens (metingen) of informatie uit een Movares-database van ca. 250 metingen door heel Nederland. Een koppeling naar bodemdatabanken van derden, zoals GeoTOP, wordt ook voorzien. Het model wordt gevalideerd met behulp van metingen van andere partijen dan Movares (althans geen metingen die gebruikt zijn voor de ontwikkeling van dit model). Dit kan leiden tot bijstelling of uitbreiding van de rekenregels 'onder de motorkap'. Als het rekenmodel kwalitatief voldoende is bevonden, dient de modelschematisering, het toepassingsbereik, de gebruikte rekenregels en tabellen met parameterwaarden op transparante wijze te worden beschreven in een rekenvoorschrift. Nadat de juiste werking van het rekenhart is getest, kan het model vrijgegeven worden voor gebruik.

Resultaat

De **onderzoekslast** kan naar verwachting met (++) per project afnemen. De screenende fase (nu met dure metingen) zal reduceren tot een bureaustudie: (+). Het gedetailleerde onderzoek zou kunnen worden verminderd tot (+) omdat een beter screening model gemiddeld een krappere contour voor nader onderzoek oplevert.

De huidige versie van VibraDyna is in het geheel niet **transparant**. In dit scenario zal dit flink worden aangepakt: er zullen beschrijvingen moeten komen, openheid van zaken worden gegeven. Van de *verwerking* van de empirie waarop het model gebaseerd is, is te verwachten dat dat voldoende inzichtelijk wordt. De empirie zelf, de metingen, de manier waarop die uitgevoerd zijn, de omstandigheden e.d., zal mogelijk onvoldoende boven water komen. De reden voor deze verwachting is dat in de huidige meetpraktijk nog te weinig goed wordt vastgelegd of nader onderzocht. Een zeer belangrijke parameter (nl. bron van trillingen), de *spooroneffigheid* ten tijde van de meting, kan sterk variëren maar wordt niet als controle-variabele c.q. metadata onderzocht en vastgelegd. De transparantie van het eindresultaat van dit scenario, in termen van in hoeverre straks in een project een modeluitkomst is uit te leggen en te toetsen, blijft dus beperkt.

Aanloop

De **aanloopkosten** bevatten een lastig in te schatten component: de kosten voor de verwerving bij de huidige eigenaar (Movares). Er zijn ontwikkelingskosten gemaakt en er is mogelijk sprake van IP (intellectual property). Het leeuwendeel van de empirie is weliswaar in projecten in opdracht van ProRail verzameld maar het is niet duidelijk of ProRail naast verwerkte data ook recht heeft op ruwe data (tijdgeschreven bestanden). Hetzelfde geldt voor de ontwikkeling van het model, waaronder de verwerking van de empirie e.d.: naar verwachting is dat voor een groot deel in het kader van projecten in opdracht van ProRail en overheden tot stand gekomen maar dat betekent niet dat deze daarop rechten kunnen doen gelden. Sowieso is er, volgens Movares, sprake van eigen investeringen in empirie en in

onderzoek naar betere naverwerking. Parallel aan de verwerving zal Movares een inspanning moeten verrichten om het model zo uitgebreid mogelijk te beschrijven en te verantwoorden. Deze kosten zal Movares ook in rekening willen brengen.

Na het maken van afspraken over de verwerving dient een validatie plaats te vinden. Gedacht kan worden aan een meetinspanning vergelijkbaar met een screeningsmeting voor een project. Dat ligt wat betreft kosten in de categorie (++).

Indien validatie aantoont dat het model voldoende betrouwbaar is, moet met nog een laatste activiteit het model compleet worden gemaakt. Dat gaat om het verzamelen van empirie rond enkele fysische factoren die nog te onzeker zijn. De kosten daarvoor kan worden geschat op (+).

De **aanlooptijd** kan scherp zijn. De eerste stap zou zijn om een principe akkoord te bereiken met Movares. Daarna zou de validatie, de rapportage en de verdere onderhandeling parallel kunnen plaatsvinden. Zodra validatie en rapportage een gunstig eindoordeel afgeeft zou tot een overeenkomst over kunnen worden overgegaan en de metingen voor de ontbrekende factoren kunnen plaatsvinden. Dit zou, op z'n gunstigst, een doorlooptijd van een half jaar kunnen hebben.

Gezien het gebrek aan huidige transparantie en verantwoording en onze twijfels over de kwaliteit van de empirie, de grondstof van het model, schatten we de **kans van slagen** van dit scenario op 50%. Een risico is dat de validatie grote spreiding oplevert. Die spreiding zal in het modelresultaat als veiligheidsfactor worden verwerkt (ter voorkoming van te veel *false negatives* c.q. het duperen van te veel gehinderden). Een grote veiligheidsfactor leidt tot een ruime onderzoekscontour voor nader, gedetailleerd onderzoek, met alle kosten van dien. *Worst case* levert het model geen verbetering op t.o.v. de scopingcontour.

4.5.2.2 Hybride



Twee ideeën uit de workshop, het trillingsregister en NL 3D FEM, worden samengevoegd tot een hybride model. Dit komt neer op: de rijkdom aan gegevens die er is, moeten we gaan gebruiken. Dit vullen we aan met metingen.

Dit doen we niet steeds opnieuw in een project, maar dat organiseren we eenmalig centraal.

Net als in veel andere milieumodellen gebeurt, zoals in verkeerslawaaimodellen, wordt aan de bron gemeten en aan de overdracht gerekend. Bronnen zijn vaak te complex en te stochastisch om aan rekenen, dat geldt ook voor treintrillingen. Overdrachten zijn juist vaak lastig in te meten maar wel redelijk te berekenen. In termen van reproduceerbaarheid (de variatie die optreedt als je verschillende onderzoekers dezelfde opdracht geeft) lijkt een dergelijke hybride aanpak ook bij treintrillingen optimaal. Het is de essentie van het NL 3D FEM idee, waarnaast het idee van het trillingsregister op de beheersing van de brongegevens inzoomt.

Er wordt een trillingsregister samengesteld dat de bronnen beschrijft. Dat trillingsregister bestaat uit twee delen. Het eerste deel is een vastlegging, per meter spoor, van de parameters die de bronsterkte beïnvloeden: type treinen en hun passagefrequentie, type spoor, de kwaliteit van de spoorligging, etc. Dit register hoeft niet van de grond af

te worden opgebouwd, het kan aanhaken op het reeds bestaande "geluidregister spoor". Vereenvoudigde vormen zijn mogelijk, waarbij de beschrijving meer globaal is (bijvoorbeeld per 50 meter en met minder info over treintypes) of waarbij het register niet eenmalig tot stand komt (en vanaf dan onderhouden wordt), maar per project wordt ingevuld. In ieder geval zal het register slechts een klein deel van het spoor hoeven te bestrijken: alleen daar waar nu bebouwing binnen een zekere afstand van het spoor ligt of daar plannen voor zijn. Van groot belang is wel dat spoorligging, zoals die nu halfjaarlijks wordt ingemeten, inclusief wissels en lassen e.d. in het register terecht komt. Daarmee wordt een belangrijke verbetering bereikt t.o.v. de andere modellen/scenario's. Tevens levert dat mogelijke, goedkope, maatregelen: inzicht in en daardoor aanpak van "hotspots" in de spoorbaan en inzicht in en daarmee oplossing door spoorverbetering in verband met spoorvernieuwing in het kader van het project.

Het tweede onderdeel van het trillingsregister is een bronbestand. Zoals bij geluid worden verschillende treintypes "ingemeten". Gezien de rol van baan en de bodem op het ontstaan van trillingen (interactie) zal daar rekening mee moeten worden gehouden, gedeeltelijk door in meer situaties metingen uit te voeren en gedeeltelijk door dit te verrekenen. SRM-T vormt hier een (geverifieerde) basis voor en benodigde meetprotocollen. Het trillingsregister combineert het bronbestand (meting onder goed beschreven omstandigheden) met de gegevens over de lokale omstandigheden tot lokale bronsterktes. Dit "combineren" is een rekensom die statistisch (à la SRM-T) of fysisch (bijv. met TRINT) vorm kan worden gegeven.

De andere pijler van het hybride model, het novum waardoor een dergelijk model niet eerder dan nu tot stand kon komen, is de beschikbaarheid van een bodembestand met, voor trillingsonderzoek, voldoende nauwkeurigheid: GeoTOP. Dit bestand is door TNO ontwikkeld op grond van de door TNO beheerde geotechnische database DINO. Met GeoTOP gegevens kan geautomatiseerd een FEM model van een bodem worden gebouwd en gerund. De resolutie en nauwkeurigheid van GeoTOP is weliswaar minder groot dan een FEM model aankan (en dus wenselijk is) maar veel beter dan er in andere trillingsmodellen aan bodembeschrijving voorhanden is.

GeoTOP en het trillingsregister vormen samen een vaste, unieke beschrijving, parametrisering van de omstandigheden. Deze is zelfs van een dermate niveau dat deze bij nader, gedetailleerd onderzoek niet verder verbeterd hoeft of kan worden.

Voor het hybride model dient er wel een rekenhart te worden ontwikkeld. Dit bestaat uit twee delen: een die de gegevens uit het trillingsregister combineert tot bronsterktes en een die de gegevens van GeoTOP omzet in een FEM-model en dit model draait met de gegeven bronsterktes. Het FEM-rekenhart zal geen bestaande commerciële code moeten zijn, want dat zou tal van problemen introduceren. Het FEM-rekenhart is dedicated, embedded (toegesplitst op spoortrillingen) en draait op een gewone pc. Dit lijkt een grote uitdaging maar anno 2016 is dat niet langer bijzonder.

Zoals het trillingsregister maatregelen al in de screening fase binnen beeld brengt (spooronderhoud e.d.), zo maakt het FEM-rekenhart mogelijk dat bepaalde veelvoorkomende maatregelen, zoals sloten, sleuven en diepwanden, als standaard optie in de berekening mee worden genomen. Via een open toegang tot het rekenhart zou het

model ook geschikt zijn voor gedetailleerd onderzoek. Op die manier worden ook bureaus die nu niet over middelen beschikken om gedetailleerd onderzoek uit te voeren (en dat zijn de meeste) er ook toe in staat gesteld.

Samengevat dienen in dit scenario de volgende acties te worden ondernomen.

- Opbouwen van een trillingsregister, o.a. door voeding uit geluidregister en uit spoorliggingregister. Overleg hierover met de beheerder van het geluidregister (IenM) en spoorliggingsdatabank (ProRail).
- Vullen van het bronbestand van het trillingsregister door het uitvoeren van een aantal veldmetingen conform het SRM-T protocol.
- Bouwen van een rekenhart: bronmodule (vrij klein) en FEM module (complexer)
- Koppeling van bronmodule met trillingsregister.
- Koppeling van FEM module met GeoTOP, overleg hierover met TNO.
- Inbouwen van maatregelen.
- Verificatie van het resulterende model
- Validatie van het model, bijv. aan de hand van reeds beschikbare metingen.

Resultaat

De **onderzoekslast** kan naar verwachting aanzienlijk (+++) per project afnemen. De screenende fase zal reduceren tot een bureaustudie: (+). Het gedetailleerde onderzoek zou kunnen ook flink kunnen worden beperkt omdat ten eerste de screening veel nauwkeuriger is, omdat ten tweede meteen al de meest nauwkeurige bron- en bodemgegevens beschikbaar zijn en ten derde omdat het model zelf al voor veel gedetailleerd onderzoek voldoende geschikt zal zijn.

Tegenover de reductie van de onderzoekslasten staat overigens wel een **vaste jaarlijkse kostenpost** voor het onderhoud aan het trillingsregister. In feite gaat het om kosten die anders tot op zekere hoogte ook worden gemaakt, in het kader van het project, waarin immers ook informatie moet worden vergaard voor de prognoses. In dit geval is de informatiekwaliteit en –kwantiteit hoger, wat gunstig is voor de onderzoekslasten, maar dat wel een vaste kostenpost oplevert. Er wordt aangehaakt bij bestaande registers dus het onderhoud betreft vooral de koppeling. Ordegrootte is (+) per jaar.

Het model zal in grote mate **transparant** zijn: gebaseerd op open trillingsregister en een open bodemregister met een goed beschreven rekenhart. Totaal transparant kan het echter niet worden genoemd omdat een numerieke berekening, zoals FEM, nu eenmaal een zeker 'black box' gehalte heeft.

Aanloop

De **aanloopkosten** kunnen flink zijn. Naast de validatiemetingen die in alle scenario's van orde (++) zullen zijn, zijn metingen nodig om het bronbestand te vullen. Deze zijn zullen ook in de categorie (++) vallen. Dan is er het bouwen van het trillingsregister en van rekenhart en de koppeling met GeoTOP, met het geluidregister en met het spoorliggingsbestand. Ook dit zal in de kostencategorie (++) liggen.

De **aanlooptijd** schatten we op 1,5 jaar. Veel activiteiten kunnen parallel plaatsvinden maar het kritieke pad loopt via de metingen: pas na de bronmetingen kan het model worden afgerond en geverifieerd waarna de validatiemetingen kunnen starten.

De **kans op slagen** van dit scenario schatten we op 80%. Het is kwalitatief het beste model, mede omdat veel aandacht uitgaat naar de invoerdata (trillingsregister en GeoTOP) dus zodra het tot stand komt zijn de krapste contouren en dus de laagste onderzoekslasten denkbaar, maar de koppeling met de leveranciers van de invoerdata kan een achilleshiel blijken.

4.5.2.3 SRM-T



SRM-T is beoogd als empirisch model, dus gevoed met metingen, maar is nu een numeriek model, gevoed met resultaten van FEM en TRINT. In dit scenario wordt het oorspronkelijk plan van BET-

Verkeer, de onderzoekscommissie die SRM-T tot stand heeft gebracht, verder uitgevoerd en voltooid. Dat betekent dat nog enkele "grote metingen" worden uitgevoerd om de empirische database te vullen. De grote meting die toentertijd reeds is uitgevoerd zal worden verwerkt en aan de database worden toegevoegd. Het model zal nog moeten worden uitgebreid met de mogelijkheid voor puntbronnen, zoals wissels, lassen, spoorwegovergangen en landhoofden. Tenslotte zal, met behulp van de ANOVA studie die op SRM-T is uitgevoerd, een mapping procedure moeten worden ontworpen om de keuze voor baan en bodem in elke situatie eenduidig te maken. Dat kan de vorm hebben van een landkaart waar per meter of decameter spoor de keuze wordt vastgelegd, eenmalig te baseren op bijvoorbeeld gegevens van GeoTOP en het geluidregister.

Resultaat

De **onderzoekslast** kan naar verwachting met ordegrrootte (++) per project afnemen. De screeningsfase reduceert tot een bureaustudie terwijl door de hogere betrouwbaarheid van de screening de contouren dermate scherper worden dat minder gedetailleerd onderzoek nodig is. Het model kent een hoge mate van **transparantie**. De kern is een duidelijke rekenregel met een database gevuld met een beperkt aantal, goed gedocumenteerde en volgens een nauw omschreven protocol uitgevoerde metingen.

Aanloop

De **aanloopkosten** worden geschat op (+++). Dit betreft naast de validatiemetingen nog enkele grote metingen om de empirische database te vullen. Daarnaast zal een landkaart moeten worden gemaakt aan de hand van externe bronnen.

De **aanlooptijd** schatten we op 1 jaar. Het kritieke pad loopt via de metingen: pas als de empirische database is gevuld kunnen de validatiemetingen starten.

De **kans op slagen** van dit scenario schatten we op 75%. De totstandkoming kent weinig risico's, maar de resulterende nauwkeurigheid zou lager dan gewenst kunnen zijn. Zoals bij alle

empirische modellen is de zwakheid dat beschikbare gedetailleerde informatie over de situatie (trein, baan en bodem) niet direct kan worden ingevoerd maar vereenvoudigd moet worden (mapping).

4.5.2.4 Kookboek



Kookboek is een idee dat tot stand kwam in de workshop. Het komt voort uit de huidige onderzoekspraktijk. De observatie is dat elk bureau zijn eigen weg zoekt en dat in elk project ook een iets andere weg wordt gevonden. Het voorstel is om dit te

structureren, om voor te schrijven in welke situatie welke methode dient te worden gehanteerd. In dit scenario wordt dus geen model opgeleverd, maar een *methodiek*, zie §2.1. Daarbij is er de uitdaging om de voorgeschreven methoden alleen te baseren op beschikbare informatie, en niet, zoals nu gewoon is, te laten leunen op *in situ* metingen (metingen op de onderzoekslocatie). Aangezien wat beschikbaar is sterk kan verschillen is er behoefte aan duidelijke voorschriften ("recepten") uitgaande van het type informatie ("ingrediënten").

Deze zal leiden tot meer uniformiteit tussen bureaus, maar verschillen in resultaten zullen zeker blijven optreden. Het kookboek zal ook leiden tot een vermindering van de onderzoekslast in de screenende fase, aangezien metingen nu worden vermeden.

Om tot een kookboek te komen hoeven, vergeleken met andere scenario's, geen grote aanvangskosten te worden gemaakt. De volgende stappen zouden moeten worden ondernomen:

- Inventarisatie van uitgevoerde onderzoeken: welke informatie was beschikbaar, hoe is daar mee om gegaan. Aangezien de huidige screeningpraktijk vooral steunt op metingen zal deze inventarisatie naar verwachting onvoldoende opleveren om een kookboek mee te vullen.
- Inventarisatie van huidige informatiebronnen die nog niet (of nauwelijks) worden benut. Voorbeelden: geluidregister, GeoTOP en spoorliggingsbestand.
- Matching van informatiebestanden met modellen, zoals in dit rapport geïnventariseerd.
- Opstellen kookboek.

Resultaat

De **onderzoekslast** kan naar verwachting met (+) per project afnemen. De screeningsfase reduceert tot een bureaustudie maar wel een meer complexe bureaustudie aangezien geen kant-en-klaar model beschikbaar is. De resultaten zullen weliswaar uniformer zijn dan in de huidige praktijk maar niet beter. Mogelijk zelfs slechter omdat niet langer gebruik wordt gemaakt van insitu metingen. De contouren zullen dus niet krappere worden en er is geen besparing te verwachten op de lasten in de gedetailleerde fase.

Een onderzoekslast die ook veel minder afneemt dan bij andere scenario's is die van de doorlooptijd. Met kant-en-klare modellen kan in 2 weken een eerste screening worden doorlopen (die in praktijk langer

kan duren door overleg, presentatie en scopewijziging e.d.) maar in dit scenario zal ook tijd nodig zijn voor het kiezen en klaarzetten/bouwen van modellen en voor het rapporteren van de onderbouwing daarvan. De methodiek kent een beperkte **transparantie**. Het kookboek zelf moge duidelijk zijn, het zal "stalinistisch" zijn in het voorschrijven van een aanpak, maar het werkelijke binnenhalen van invoer en uitvoeren van rekenwerk gebeurt in de aan te wijzen modellen die buiten de controle van de overheid staan. Dit zou overigens te verbeteren zijn door middels het kookboek transparantie van in te zetten modellen te eisen. Blijft dat het kookboek een getrapte aanpak betekent die in wisselende projecten wisselend uitpakt waardoor trillingsrapporten specialistischer dan gewenst zullen blijven.

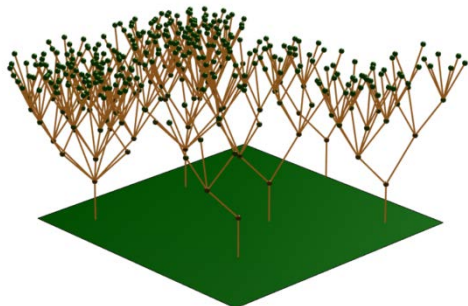
Aanloop

De **aanloopkosten** zijn gering (+). Er worden geen validatiemetingen uitgevoerd, geen rekenharten geschreven en geen registers aangeboord. Het geheel is een verkenning, eindigend in een rapport.

De **aanlooptijd** schatten we op 0,5 jaar.

De **kans op slagen** van dit scenario schatten we op 60%. De totstandkoming kent weinig risico's, maar de resulterende nauwkeurigheid zou lager dan gewenst kunnen zijn. Mogelijk zal het niet korter, goedkoper en/of beheerster zijn dan de huidige meetpraktijk.

4.5.2.5 Random Forest



Empirische modellen zoals SRM-T en VibraDyna steunen op veel metingen waarop een globale fysische schematisering wordt gefit (Barkan, equivalente lijnkracht e.d.). In die fit wordt uiteraard statistiek bedreven op een eenvoudig (lineaire regressie) tot complexer (bijv. ANOVA) niveau. Indien voldoende betrouwbare

empirie beschikbaar is kan de fysische schematisering achterwege blijven en een puur stochastische benadering worden gekozen. Een voorbeeld daarvan zijn netwerken, zoals neurale netwerken en *Bayesian believe nets*, die worden getraind met empirie. Recente vormen daarvan, zoals *deep learning* en *random forest*, zijn zeer succesvol en worden bijv. in alledaagse apps gebruikt voor herkenning (spraak, gezicht, etc.) en bij grote bedrijven en instituties voor datamining. In dit scenario wordt daarom zwaar ingezet op het verzamelen van zoveel mogelijk empirie. De metadata van de empirie is daarbij even belangrijk als de trillingsniveaus zelf want vormen de invoerkant, de x-as, van de training. Veel bestaande empirie zal daarom waarschijnlijk niet bruikbaar zijn. Er zullen veel metingen nodig zijn. De metingen per stuk niet zo uitgebreid te zijn zoals die bijvoorbeeld zijn voorzien voor Hybride en SRM-T, maar er zijn er wel zeer veel van nodig. Parallel aan de metingen zal een studie moeten worden uitgevoerd naar welke stochastische benadering het meest geschikt is. Dit scenario heet "Random Forest" maar het is op voorhand niet duidelijk of dit ook de meest geschikte kandidaat is.

Resultaat

De **onderzoekslast** kan naar verwachting met (++) per project afnemen. De screeningsfase reduceert tot een bureaustudie. De te bereiken kwaliteit zal naar verwachting niet beter zijn dan de huidige meetpraktijk dus een reductie in de kosten voor detailed onderzoek is niet te verwachten. In potentie is een kwaliteit haalbaar vergelijkbaar met bijvoorbeeld "hybride" maar dat zou een vergelijkbare inspanning aan nieuwe datacollectie vragen als nu bij hybride wordt gemobiliseerd vanuit reeds bestaande databanken (geluidregister, spoormetingen, GeoTOP).

Een stochastisch model kent een beperkte **transparantie**. Het is de ultieme black box. Transparant is alleen de wijze waarop het model tot stand is gekomen, het netwerk model, de trainingsdata.

Aanloop

De **aanloopkosten**, inclusief validatie, worden geschat op (+++). Er zal een groot aantal metingen moeten worden uitgevoerd, met veel aandacht voor de metadata (beschrijving van de omstandigheden).

De **aanlooptijd** wordt geschat op 1,5 jaar.

De **kans op slagen** van dit scenario schatten we op 70%. Mogelijk blijkt dat onvoldoende detail kan worden bereikt in trainingsdata (te verzamelen empirie), bijvoorbeeld door onzeker blijvende factoren als bodembeschrijving en spoorkwaliteit waardoor het model "grijs" blijft cq. geen antwoord kan geven op vragen, cq. altijd dezelfde ruime contour afgeeft. Het is nog niet te voorzien hoeveel meetinspanning het kost om het model tot leven te brengen. Overigens zal het hoogst waarschijnlijk wel mogelijk zijn om daar wel in een vrij vroeg stadium van het project door middel van een soort poweranalyse een beeld van te krijgen.

4.5.3 *Samenvatting van de scenario's*

Naam	VibraDyna
Samenvatting	Product van Movares kopen, valideren en verder verbeteren
Ingrediënten, reeds beschikbaar	Brondatabase trainen Movares, bodemclassificatie obv DINOLOket of GeoTOP (of metingen), H_{gebouw} classificatie. Frequentie-afhankelijke Barkanvergelijking voor de overdracht.
Ingrediënten, toe te voegen	Validatie en verificatie. Gedetailleerde beschrijving en onderbouwing modelaanpak en schematisering is nodig, alsmede beschrijving onderliggende meetgegevens brondatabase. Optioneel wordt het rekenmodel aangepast zodat niet de V_{max} maar de V_{rms} wordt berekend aan de gevel.
Acties/planning	Verwerving (afkoop rechten?). Beoordeling geschiktheid kan pas werkelijk plaatsvinden na beschrijving, verificatie en validatie. De aanlooptijd is circa 0,5 jaar.
Te bereiken kwaliteit/betrouwbaarheid	Geschikt voor screening. Vanwege het feit dat een beoordeling nog niet mogelijk is, is op voorhand niet zeker of de beoogde kwaliteit haalbaar is.
Aanloopkosten	Afkopen van investeringen van Movares in hun rekenmodel. Deze kosten zijn niet bekend. Validatie: (++) . Verbetering fysische factoren: (+).
Besparing uitvoeringslasten	Onderzoekslasten, screening: (++) , detailed: (+) (minder false positives) Maatregelkosten: geen besparing

Naam	Hybride
Samenvatting	Metten aan de bron, rekenen aan de overdracht. Gebaseerd op recent verschenen bodemdatabase en nog op te bouwen verzameling bronmetingen.
Ingrediënten, reeds beschikbaar	Bodemdatabase GeoTOP (van TNO-DINO); principe van de bodemafhankelijke bronkarakterisering met bijbehorend meetprotocol (zie SRM-T)
Ingrediënten, toe te voegen	Database aan gemeten bronnen (bron = trein + spoorbaan) FEM/BEM rekenkern ter berekening van de bodemoverdracht en evtl. trillingsmaatregelen, gebruik makend van GeoTOP
Acties/planning	Opvullen database aan bronnen d.m.v. metingen. Maken van een FEM/BEM rekenkern. De aanlooptijd is circa 1,5 jaar.
Te bereiken kwaliteit/betrouwbaarheid	Geschikt voor screening en gedetailleerd (maatregelen-) onderzoek
Aanloopkosten	(+++), inclusief validatie

Naam	Hybride
Besparing uitvoeringslasten	Onderzoekslasten, screening: (++) , detailed: (++) (minder false positives, screeningmodel ook geschikt voor een deel van de detailed onderzoeken) Maatregelkosten: geen besparing

Naam	SRM-T
Samenvatting	SRM-T vullen met metingen en bodem-fundering onderdeel toevoegen. Valideren.
Ingrediënten, reeds beschikbaar	Bron- en bodemdatabase (mediaan en spreiding) op basis van 7 typisch Nederlandse bodemconfiguraties, 6 baanconfiguraties, 3 snelheidregimes en 6 treintypes. Reken- en meetrichtlijn o.a. ter aanvulling van de database. Beschrijving van het model.
Ingrediënten, toe te voegen	Overdracht bodem-gebouw. Er is behoefte aan meer inputresolutie wat betreft bodemconditie (zie kwaliteitseis "Domein"). Hoewel reeds toegepast en gevalideerd in een enkele case, is er behoefte aan meer validatie.
Acties/planning	Validatie m.b.v. metingen. Uitbreiden database met een groot aantal bodemcondities. De aanlooptijd is circa 1,0 jaar.
Te bereiken kwaliteit/betrouwbaarheid	SRM-T kan uiteindelijk voldoen alle kwaliteitseisen.
Aanloopkosten	(+++), inclusief validatie
Besparing uitvoeringslasten	Onderzoekslasten, screening: (++) , detailed: (+) (minder false positives) Maatregelkosten: geen besparing

Naam	Kookboek
Samenvatting	Geen model maar een <i>methodiek</i> (zie de definitie in §2.1). Onderzoekslast neemt niet af, kwaliteit neemt wel toe. Weinig aanloopkosten.
Ingrediënten, reeds beschikbaar	Deze aanpak behelst het vastleggen en structureren van de bestaande praktijk waarbij per situatie wordt afgewogen welke (empirische) methode of modellering geschikt is. Als er bijvoorbeeld onvoldoende sonderingsgegevens zijn, worden overdrachtmetingen gepland. Daarbij wordt van rijdende treinen of een valgewicht gebruik gemaakt. Soms kan Barkan worden ingezet, soms wordt een FEM aanpak meer geschikt bevonden.
Ingrediënten, toe te voegen	Belangrijkste ingrediënt is om kaders of richtlijnen te schrijven waarmee op voorhand duidelijk is welk type onderzoek in een projectgebied nodig is.

Naam	Kookboek
Acties/planning	Beschrijving kaders en kwaliteitseisen. Beschrijving toegestane methodieken. De aanlooptijd is circa 0,5 jaar.
Te bereiken kwaliteit/betrouwbaarheid	In grote lijnen gelijk aan de huidige praktijk, dus wisselend, en dit zal bureau-afhankelijk zijn.
Aanloopkosten	(+), geen validatie
Besparing uitvoeringslasten	Onderzoekslasten, screening: (+), detailed: geen besparing (minder false positives maar ook meer false negatives want geen metingen ter plekke) Maatregelkosten: geen besparing

Naam	Random Forest
Samenvatting	End2end empirisch model, opgewerkt met de nieuwste statistische technieken. Black box statistisch model, vergelijkbaar met neurale netwerk, die wordt gevoed met alle beschikbare empirie en nog te verzamelen empirie.
Ingrediënten, reeds beschikbaar	Resultaten van trillingsonderzoeken uit het verleden, bijvoorbeeld die beschikbaar via ProRail.
Ingrediënten, toe te voegen	Statistisch model Aanvullende metingen (end2end empirie vereist een zeer grote dekking van alle mogelijke combinaties van omstandigheden)
Acties/planning	Verzamelen meetrapporten. Inregelen van het statistisch model. Uitvoeren van aanvullende metingen. De aanlooptijd is circa 1,5 jaar.
Te bereiken kwaliteit/betrouwbaarheid	Het model zal ongeveer zo goed zijn als de huidige screening aanpak, aangezien meetdata uit de huidige onderzoekspraktijk wordt gebruikt en geen kennis wordt toegevoegd.
Aanloopkosten	(+++)
Besparing uitvoeringslasten	Onderzoekslasten, screening: (++), detailed: geen besparing Maatregelkosten: geen besparing

In Tabel 5 zijn de belangrijkste aspecten uit de scenariobeschrijvingen samengevat.

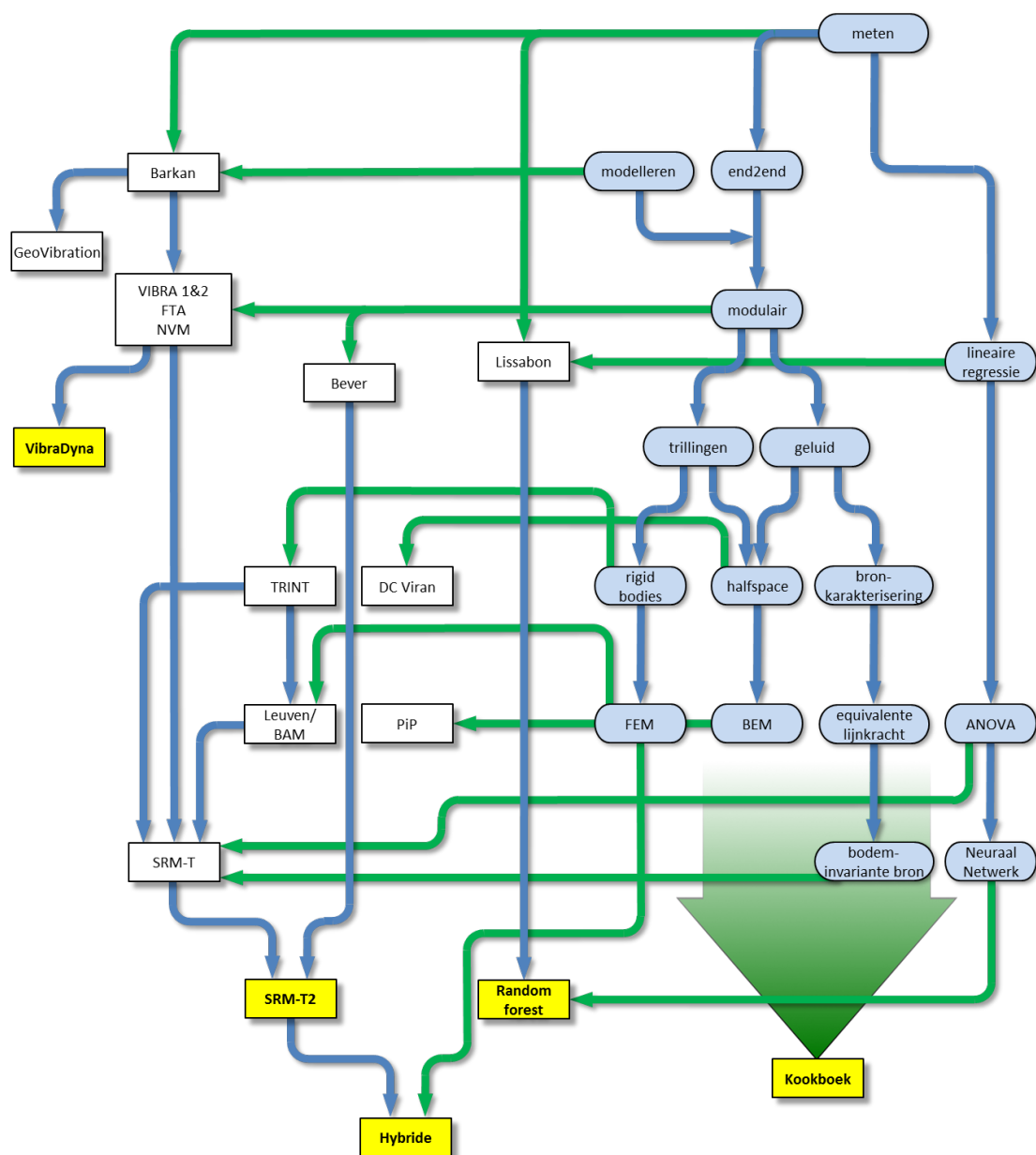
Tabel 5 Overzicht ontwikkelingsaspecten en perspectieven van de scenario's.

scenario	aanloopkosten [k€]	aanloop-tijd [jaar]	besparing op onderzoekskosten [k€]	onderzoekstijd [week]	bureau onafhankelijkheid [%]	succeskans [%]	transparantie [%]
VibraDyna	(++)	0,5	(++)	2	100	50	50
Hybride	(+++)	1,5	(+++)	2	100	80	80
SRM-T	(+++)	1	(++)	2	100	75	90
Kookboek	(+)	0,5	(+)	6	50	60	30
Random Forest	(+++)	1,5	(++)	2	100	70	30

De kosten (+, ++, +++) zijn bedoeld om onderlinge vergelijking mogelijk te maken. Hetzelfde geldt voor de besparingen (+, ++, +++) . De categorie (++) is als referentie bedoeld: de onderzoekskosten voor trillingen in een gemiddeld spoorproject (tracébesluit).

4.6 Stamboom uitgebreid met scenario's

De scenario's kunnen worden ingepast in de stamboom van rekenmodellen uit §3.7. Dit is weergegeven in Figuur 22.



Figuur 22 Stamboom rekenmodellen, uitgebreid met de vijf scenario's.

5 Advies

5.1 Optiek end-user

Voor de end-user (de overheid) is een aantal criteria te benoemen, terug te voeren op de formulering van de opdracht aan RIVM. Met een multicriteria-analyse zijn de scenario's te scoren en onderling te vergelijken. De gehanteerde criteria zijn de volgende (met tussen haakjes de weegfactor die door ons is toegekend).

AK: Aanloopkosten (1)

AT: Aanlooptijd (1)

OT: Onderzoekslast, in tijd (4)

KK: Kans dat scenario beoogde kwaliteit oplevert (3)

TR: Transparantie model in gebruik (4)

OL: Onderzoekslasten, naast kosten ook de lasten voor de omgeving (5)

BO: Bureaunafhankelijkheid (5)

Verantwoording: vermindering van de onderzoekslast en de introductie van bureauafhankelijkheid zijn expliciete voorwaarden en daarom als zwaarst gewogen. Onder onderzoekslasten worden in eerste instantie de directe kosten en lasten bedoeld (zie §2.1), maar de huidige lange en niet goed voorspelbare doorlooptijd van trillingsonderzoek en het effect op een project maakt dat ook de factor tijd meeweging verdient. Omdat trillingsonderzoek wat betreft doorlooptijd op het kritieke pad zit, is dit voor de spoorbeheerder een belangrijk aspect.

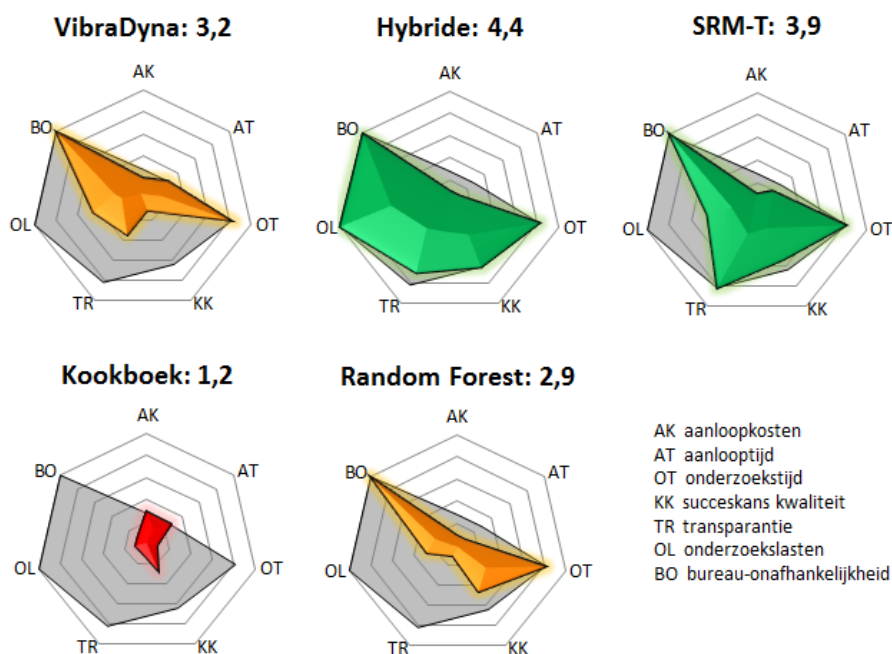
Voor een model van overheidswege is voldoende transparantie van belang. Dit is niet expliciet gevraagd en wordt daarom gewogen met 4 i.p.v. 5. De aanloopkosten en -tijd zijn uiteraard ook van belang maar zijn naar verwachting veel geringer dan de te besparen kosten in tijd en geld bij projecten en krijgen dus een zeer bescheiden weging. Dat een scenario onverhoopt mislukt (een model komt bijv. op aspecten niet door een validatie) is wat dat betreft van groter belang.

De scenario's zijn op deze criteria op relatieve wijze gescoord. Daartoe zijn de waarden per criterium uit Tabel 5 eerst lineair geschaald naar waarden tussen 0,1 en 1,0, waarbij het laagst scorende scenario de score 0,1 krijgt en het hoogst scorende scenario 1,0 krijgt. De optelling van de scores, onder toepassing van de weegfactoren van 1 tot 5, geeft de eindscore. Deze gewogen scores zijn in Figuur 23 afgebeeld in een spider-plot, waarbij de grijze achtergrond de maximale mogelijk score voor elk criterium aangeeft, zoals bepaald door de weegfactor.

Het Hybride-model komt als beste uit deze beoordeling, op enige afstand gevolgd door SRM-T. In VibraDyna, dat als derde eindigt, zijn de (onbekende) verwervingskosten niet zijn meegeteld in de aanloopkosten. De eindvolgorde is echter niet gevoelig voor deze onbekende kosten, vanwege de wegingsfactor 1 voor AK.

Het voordeel van Hybride ten opzicht van SRM-T ligt vooral in de verwachte verlaging van de onderzoekslasten. Dat komt doordat het Hybride-model, behalve als screeningmodel, ook geschikt zal zijn voor

(en beter zal aansluiten op) een deel van de gedetailleerde onderzoeken waarin maatregelen worden gedimensioneerd.



Figuur 23 De resultaten van het scenario-onderzoek. De ééngetalsscore staat telkens in de titel.

5.2 Optiek lead-user

Het voorkeursscenario, vanuit de optiek van de onderzoeker, is die met de titel "Hybride".

Het scenario heeft een aantal voordelen:

- Het sluit aan bij de praktijk van andere milieu-aspecten, zoals geluid. Bronnen worden ingemeten en opgenomen in een register. Daarop kan bronbeleid worden gevoerd en de regelmatige (vaak jaarlijkse) wijzigingen in exploitatie kan er in worden verwerkt. De overdracht naar de omgeving wordt berekend.
- Het is in potentie het meest nauwkeurige model, wat betekent dat al veel duidelijk wordt in de screeningfase en er minder onderzoek nodig is in de (veel duurdere) gedetailleerde fase. Dat scheelt geld en tijd.
- Het is het meest geschikte model om al in de screening fase maatregelen te overwegen.
- Het heeft de potentie om als gedetailleerd model te worden gebruikt, waardoor meer ingenieursbureaus in staat zullen zijn ook die onderzoeksfase uit te voeren, wat scheelt in doorlooptijd en geld.
- Het is in feite een direct product van de workshop, een fusie van de ideeën van twee van de drie groepjes die werkten aan een optimaal en haalbaar scenario (met daarin o.a. Deltares, Movares, DGMR, M+P, Fugro en DPA-CH).

Het scenario is niet eerder in de sector vanzelf tot stand gekomen, om de volgende twee redenen:

- Het opstellen van een bronbestand vraagt een grote voorinvestering. De eerdere poging tot een screening model, SRM-T, eindigde precies op dat punt (en gaat sindsdien door het leven als een model dat niet met metingen maar met berekeningen is gevuld).
- Met de komst van GeoTOP (van TNO) is het voor het eerst mogelijk om eenvoudig, goedkoop en eenduidig te beschikken over bodemdata van voldoende nauwkeurigheid. Dit is cruciaal voor spoortrillingmodellen. De beste manier om met deze informatierijkdom om te gaan is deze te gebruiken als invoer voor een numeriek model (wat gebeurt in het Hybride scenario).

Het scenario vraagt wel een voorinvestering:

- Er zullen op korte termijn flink wat metingen moeten worden verricht, om het bronregister op te bouwen. Mogelijk kan daarbij gebruik worden gemaakt van de rijkdom aan metingen die in het kader van projecten al is verzameld.
- Er zal een rekenhart moeten worden geschreven, met een koppeling naar GeoTOP.

Andere scenario's scoren hiermee vergeleken minder.

- VibraDyna. Voordeel hiervan is dat het snel beschikbaar kan zijn maar er kleven een aantal nadelen aan. Het model is niet transparant en waarschijnlijk niet voldoende nauwkeurig. Bovendien moet het worden verworven van Movares. Validatie en rapportage vormen uiteraard onderdeel van het VibraDyna-scenario maar de kans is aanmerkelijk dat de gewenste kwaliteit niet wordt gehaald in verband met onduidelijkheid rond de metingen waarop dit model is gebaseerd.
- SRM-T. Voordeel hiervan is ook de onmiddellijke, en vrije, beschikbaarheid. Maar het model is in zijn huidige vorm nog niet geheel klaar en ook nog niet gevalideerd. Hybride is in feite te beschouwen als een SRM-T++ en dus beter. SRM-T gaat in ieder geval het fysische raamwerk en de meetprotocollen voor Hybride leveren.
- Kookboek. Voordeel is de haalbaarheid ervan en de geringe aanloopkosten. Nadeel is dat er geen grote stap mee wordt gedaan. Er komt geen model. Bovendien kan blijken dat het bereikte resultaat onvoldoende kwaliteitsverbetering oplevert, bijv. omdat het niet goed mogelijk blijkt gemeenschappen te ontstijgen en voldoende precies te zijn.
- Random Forest. Voordeel is de overzichtelijkheid van de aanloop. Er zijn dus weinig aanlooprisico's. Nadelen zijn dat geen verbetering van de betrouwbaarheid is te verwachten (ten opzichte van de huidige onderzoekspraktijk) en dat het model hoewel in opzet transparant in gebruik een black box is.

5.3 Vervolgstappen

Zodra een keuze is gemaakt voor een scenario kan het "losse eindje", het onderzoek naar het modelleren van H_{gebouw} , de overdracht van fundering naar vloer, worden gestart. De scenariokeuze zal de aanpak van die overdracht namelijk sterk beïnvloeden. H_{gebouw} kan bijvoorbeeld het karakter krijgen van een simpele vaste factor, integraal onderdeel

worden van de Random Forest of een dedicated sub-model worden. Dat onderzoek, en de uitwerking daarvan tot een afgerond, bruikbaar model van H_{gebouw} , kan gelijktijdig met de uitvoering van het scenario plaatsvinden en gelijktijdig klaar zijn. Het nu uitgevoerde onderzoek heeft immers al veel kennis en informatie opgeleverd die daar relevant voor is. Naast H_{gebouw} zijn er nog enkele andere acties, zoals beschreven in §4.5.1. Het gaat bijvoorbeeld om de introductie van V_{rms} . Een verkenning hiervan, door enkele ingenieurbureaus in opdracht van ProRail, is al in uitvoering. Rond de ingebruikname van het model speelt nog de validatie en het beschikbaar komen van GUI's. Validatie zal kunnen uitlopen, maar hoeft ingebruikname niet te vertragen. Een GUI is niet strikt noodzakelijk en kan worden overgelaten aan de markt. In geval van keuze voor "Hybride" zien de vervolgstappen er als volgt uit.

Tabel 6 Samenhang van scenario met de tevens uit te voeren acties

	pre	kwartalen						7de	8ste
		1ste	2de	3de	4de	5de	6de		
Hybride scenario									
V_{rms}									
verkenning Hgebouw									
modellering Hgebouw									
validatie									
GUI (door derden)									
		start							ingebruikname

5.4 Risico-analyse

Zowel vanuit de optiek van de leaduser als van de enduser verdient "Hybride" de voorkeur. Uitvoering van dit scenario zal naar verwachting na 1,5 jaar een model opleveren dat aan de gestelde eisen voldoet. Wat zijn nu de risico's in dit scenario? Hieronder volgt een eerste risico-inventarisatie. Daarbij wordt voor ieder (negatieve) effect, de kans erop benoemd, met vervolgens een beschrijving van de maatregelen waarmee het risico kan worden bestreden.

De kansen worden uitgedrukt in een range van 10 tot 30% en zijn vooral bedoeld om relatieve significantie aan te geven. Dat de risico's niet met grotere percentages worden geschat geeft weer dat we het scenario zien als een engineering opdracht en niet als een onderzoeksopdracht. Het scenario is haalbaar bij gestelde beschikbaarheid van tijd en middelen.

Indien tot uitvoering van dit scenario over wordt gegaan, zal het op te stellen Plan van Aanpak de risico's en hun maatregelen in meer detail moeten beschouwen en behandelen.

- Aanlooptijd te lang: more research needed
 - De aanlooptijd, vanaf besluit tot start, is geschat op 1,5 jaar. Dit kan uitlopen.
 - Kans daarop is 20%
 - Er liggen geen grote onderzoeksvragen, de bouw van het model ligt in de sfeer van de engineering. Daar waar in dit vakgebied nog grote vragen liggen, nl. de bronmechanismen, worden deze vermeden door de bronnen in te meten i.p.v. te

- modelleren. Project moet worden opgezet en aangestuurd als een ontwerpproject, niet als een onderzoeksproject. Het betreft echter niet een standaard softwareproject, dus domeinkennis moet wel in de lead zijn om te zorgen dat er na 1,5 jaar een bruikbaar product wordt geleverd.
- Metingen voor bronregister te duur/te lang
 - Het inmeten van de treinen, voor het vullen van het bronregister, ligt op het kritieke pad; metingen zullen moeten worden aanbesteed; de aanbesteding kan een opdracht opleveren die langer duurt en/of duurder is dan voorzien.
 - Kans daarop is 30%
 - Uitvraag zo veel mogelijk naar voren halen; tijd en geld als randvoorwaarde stellen en data voor de database als resultante; indien nodig meting later voortzetten ter vervolmaking van de database.
 - Validatiemetingen niet op tijd af
 - Validatiemetingen liggen op het kritieke pad
 - Kans daarop is 30%
 - Validatie initieel baseren op oude metingen (postdicties) en validatie onderdeel maken van eerstkomende projecten waarin model wordt toegepast
 - Niet alle bronnen (treinen, wissels, etc.) voldoende ingemeten
 - Er zijn veel treintypes en subbronnen, welke onder wisselende omstandigheden moeten worden ingemeten (combinaties van banen en treinen, verschillende treinsnelheden, etc.)
 - Kans daarop is 30%
 - Zie risico "metingen te lang/te duur". In ieder geval gebruik maken van resultaten van de proef "gedifferentieerd rijden" van 2016 (over effect treinsnelheid)
 - FEM rekenhart werkt niet
 - FEM rekenhart is geen eenvoudig model maar een complexe numerieke code op het niveau van bestaande software zoals Diana en ANSYS. I.t.t. deze commerciële codes kan het rekenhart worden toegespitst op een hele specifieke geometrie en fysica. Maar het dient nog wel gebouwd te worden.
 - Kans daarop is 10%
 - Eisen aan bouw: kennis van zowel FEM als van dynamica en treintrillingen. RIVM zal zeer dicht op dit onderdeel moeten zitten in verband met kennisborging en transparantie.
 - Koppeling met GeoTOP lukt niet
 - GeoTOP vormt een onmisbaar element maar het is nu onbekend hoe het in elkaar zit en hoe het te bevragen is.
 - Kans daarop is 10%
 - Communicatie met bouwers (TNO) zo vroeg mogelijk opzetten. Eisen aan interfacing formuleren en dan TNO GeoTOP daarop laten aanpassen.
 - Geluidregister-invoer niet te automatiseren
 - Het trillingregister bevat info vergelijkbaar met het geluidregister. Aangezien voor het geluidregister een infrastructuur bestaat is het handig het trillingsregister daar "achter" te koppelen.

- Kans daarop is 20%
- Communicatie met beheerders geluidregister zo vroeg mogelijk opstarten. Eisen aan interfacing formuleren en dan die beheerders de benodigde aanpassingen laten doen.
- Na 1,5 jaar wel rekenhart, geen GUI/GIS
 - Scenario richt zich op bouw model, de gebruikersinterface laten we over aan de markt. Die moet daar dan wel tijdig mee klaar zijn.
 - Kans daarop is 30%
 - Rekenhart ook standalone bruikbaar laten zijn. Vroegtijdig met GUI/GIS bouwers interfacing afspreken en alfa's en beta's draaien.
- Model niet nauwkeurig genoeg
 - Uit de validatie en verificatie moet blijken wat de resolutie van het model is. Hoe scherp kan de contourafstand worden gegeven bij een gegeven acceptatie van false negatives. Als zo'n veilige contourafstand veelal op, bijvoorbeeld, 150 meter of verder komt, is het model mislukt.
 - Kans daarop is 20%
 - Zo vroeg mogelijk in het project het stochastisch model ontwikkelen (waarmee aan resultaten een bandbreedte wordt toegekend) om de dominante bron van onnauwkeurigheid te bepalen. Voor die bron nadere studie verrichten indien noodzakelijk. Alternatief is grotere kans op false negatives accepteren. Anders project beëindigen.
- Aanloopkosten te hoog
 - In het project zullen enkele aanbestedingen plaatsvinden, die mogelijk duurder uitvallen dan begroot.
 - Kans daarop is 30%
 - Voldoende ruim begroten. Gezien de grote terugverdienfactor is het belangrijk bij aanbesteding voldoende gewicht te geven aan kwaliteitsaspecten. Een lagere kwaliteit van het model kan immers leiden tot hogere uitvoeringskosten bij spoorprojecten.

5.5 Impact

Vooruitgang ten opzichte van huidige praktijk.

1. **Introductie** van een voor iedereen beschikbaar, uniform rekenmodel. In de huidige praktijk is er geen uniform rekenmodel in gebruik. De rekenmodellen die er zijn worden alleen door de respectievelijke ontwikkelaars gebruikt en de meeste partijen die trillingsonderzoek uitvoeren beschikken feitelijk niet over een model en doen daarom noodgedwongen vooral veel metingen (en fitten daar achteraf een eenvoudige formule op).
2. **Reductie** van de onderzoekslasten. De uitgebreide, langdurige en dure meetcampagnes die nu onderdeel vormen van trillingsonderzoek komen te vervallen.

Wat betekent dit, en voor wie?

- Voor omwonenden: meer **rechtsgelijkheid**. De kwaliteit van het onderzoek is nu veel minder afhankelijk van de kennis en mogelijkheden van het IB die een onderzoek uitvoert.

Onderzoeksverslagen zullen ook eenduidiger en transparanter zijn en dus beter te beoordelen zijn.

- Voor ProRail: **trillingsonderzoek niet langer op het kritieke pad** bij het opstellen van een (O)TB. De focus van onderzoek zal bovendien verschuiven van het vinden van knelpunten naar het oplossen ervan en dat zal nu vroeger in een project mogelijk worden.
- Voor IenM: een **besparing op de onderzoekskosten** van spoorprojecten. Wel komt er vaste kostenpost voor terug: die voor het onderhoud aan het model. Per saldo kan dit worden terugverdiend afhankelijk van de grootte van de besparingen op metingen.
- Voor ingenieursbureaus: een vermindering van de omzet (want geen dure meetcampagnes meer) en een meer 'level playing field'. **De aard van het werk verschuift** van metingen en analyses naar bureaustudies.
- Voor RIVM en/of ProRail: **een taak erbij**, om de registers en het model te beheren.

6 Literatuur

- [1] S. G. Koroma, D. J. Thompson, M. F. Hussein en E. Ntotsios, „A mixed space-time and wavenumber domain model for predicting ground vibration from surface railway tracks,” in *Compdyn2015*, Crete, 2015.
- [2] A. Colaço, P. A. Costa, P. Amado-Mendes en L. Godinho, „A numerical procedure to evaluate vibrations and re-radiated noise in buildings generated by railway traffic,” in *EuroRegio2016*, Port, 2016.
- [3] P. Lopes, J. F. Ruiz, P. A. Costa, L. M. Rodríguez en A. S. Cardoso, „Vibrations inside buildings due to subway railway traffic. Experimental validation of a comprehensive prediction model,” *Science of the Total Environment*, vol. 568, pp. 1333-13343, 2016.
- [4] D. P. Connolly, G. Kouroussis, A. Giannopoulos, O. Verlinden, P. K. Woodward en M. C. Forde, „Assessment of railway vibrations using an efficient scoping model,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 58, pp. 37-47, 2014.
- [5] D. P. Connolly, G. Kouroussis, P. K. Woodward, A. Giannopoulos, O. Verlinden en M. C. Forde, „Scoping prediction of re-radiated ground-borne noise and vibration near high speed rail lines with variable soils,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 66, pp. 78-88, 2014.
- [6] H. E. M. Hunt, M. F. M. Hussein, S. Jones en K. A. Kuo, „Ground-borne vibration from underground railways: some commonly-made modelling assumptions and their associated inaccuracies and uncertainties,” in *Proceedings of the Institute of Acoustics & Belgium Acoustical Society*, Ghent, 2010.
- [7] G. Paneiro, F. O. Durão, M. Costa e Silva en P. Flacão Neves, „Prediction of ground vibration amplitudes due to urban railway traffic using quantitative and qualitative field data,” *Transportation Research Part D*, vol. 40, pp. 1-13, 2015.
- [8] G. Kouroussis en O. Verlinden, „Prediction of railway ground vibrations: Accuracy of a coupled lumped mass model for representing the track/soil interaction,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 69, pp. 220-226, 2015.
- [9] G. Kouroussis, G. Gazetas, I. Anastasopoulos, C. Conti en O. Verlinden, „Discrete modelling of vertical track-soil coupling for vehicle-track dynamics,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 31, pp. 1711-1723, 2011.
- [10] G. Lombaert, P. Galvin, S. François en G. Degrande, „Quantification of uncertainty in the prediction of railway induced ground vibration due to the use of statistical track unevenness data,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 333, pp. 4232-4253, 2014.
- [11] D. Thompson, „Railway noise and vibration: The use of appropriate models to solve practical problems,” in *The 21st International Congress on Sound and vibration*, Beijing, 2014.
- [12] F. Rossi, „Soil vibration by high speed trains: an evaluation

method," in *6th International Symposium on Transport Noise and Vibration*, St. Petersburg, 2002.

- [13] R. Mueller en A. Ziegler, „Validation of prediction methods for vibration and groundborne noise of railways," in *Internoise2010*, Lisbon, 2010.

Bijlage A – Lijst van afkortingen en begrippen

Bts	Beleidsregel trillinghinder spoor
BEM	Boundary Element Method
COB	Centrum voor Ondergronds Bouwen
dB	eenheid voor trillingsniveau, in dit rapport enkel in relatieve zin gebruikt, dus als verschilwaarde tussen twee situaties.
<i>End-user</i>	de uiteindelijke beneficiary van het rekenmodel. In dit geval is dat de rijksoverheid
FEM	Finite Element Method (Eindige Elementen Methode, een numerieke rekentechniek)
FDM	Finite Difference Method, variant op FEM
FVM	Finite Volume Method, variant op FEM
FPvE	Functioneel Programma van Eisen, zie Hoofdstuk 2
GIS	Geografisch informatiesysteem, generieke software om locatiegebonden informatie weer te geven en geografisch te bewerken
GUI	Graphical user interface, het voor de gebruiker zichtbare en beïnvloedbare deel van een computerprogramma.
<i>Lead-user</i>	directe gebruiker van het rekenmodel, die het trillingsonderzoek uitvoert en het rekenmodel bedient
<i>Metadata</i>	Gegevens over de meet situatie die horen bij de verkregen meetresultaten, bijvoorbeeld de typering en selectie van events, de wijze waarop en omstandigheden waaronder meetresultaten zijn verkregen
MER	Milieueffectrapportage
<i>Onderzoekslast</i>	Kosten en lasten van trillingsonderzoek tot aan het tracébesluit, zie §2.1
PHS	Programma Hoogfrequent Spoorvervoer
<i>Rekenmethode</i>	Generieke methode voor het berekenen van trillingen, zie Bijlage B
<i>Rekenmodel</i>	(Software)implementatie voor de berekening van spoortrillingen, bestaande uit (delen van) generieke methoden
RENVIB II	een projectnaam, tevens modelaanpak
Rmg	Reken- en meetvoorschrift geluid
RMS	Root mean square (kwadratisch gemiddelde): tijdgemiddelde (effectieve) waarde van een fluctuerend signaal, in dit geval van een trilling
SBR	Stichting Bouwresearch
SEA	Statistical Energy Analysis
SFEM	Stochastic Finite Element Method, een bijzondere vorm van FEM
TB	Tracébesluit
<i>Scoping</i>	In een trillingsonderzoek is dat de eerste fase: het vaststellen van het onderzoeksgebied; dit is meestal een (voldoende ruim gekozen) afstandscoutour, die geen rekening houdt met detailinformatie over spoorgebruik en woningconstructie. Zie ook <i>screening</i> .

<i>Screening</i>	In een trillingsonderzoek is dat de onderzoeksfase waarin (binnen het tijdens de <i>scoping</i> bepaalde onderzoeksgebied) op basis van detailinformatie over spoorgebruik, bodem en gebouwen de toetsing aan de trillingsnormen plaatsvindt
<i>Stochast</i>	een stochast is een toevalsvariabele, zie §3.4 voor uitleg over stochastiek
<i>Uitvoeringslast</i>	Som van onderzoekslasten en kosten voor trillingsmaatregelen, zie §2.1

Bijlage B – Beschrijving methoden

In deze bijlage worden de numerieke/semi-analytische methoden behandeld, die ter simulatie van spoorse trillingen ingezet kunnen worden voor de deelsystemen. Dit betreft deels methoden die gangbaar zijn in het vakgebied spoortrillingen, en deels methoden die elders worden toegepast maar nog niet voor spoortrillingen.

Fysische achtergrond

Het pad dat trillingen afleggen wordt in de theoretische beschrijving vaak opgedeeld in drie delen, namelijk de bron, het transmissiemedium en de ontvanger.

De modellering van de ontvanger, bijvoorbeeld een vloer in de woning, wordt in dit rapport niet verder behandeld.

De bron

De bron is het mechanisme waarmee de trillingsenergie in het transmissiemedium, de bodem, gestopt wordt. Doordat de bodem dynamisch belast wordt met krachten (bijv. de gewichtskracht van een voorbijrijdende trein), wordt deze dynamisch ingedrukt (deze belasting wordt echter *quasi-statisch* genoemd, omdat het een statische maar bewegende last betreft). De indrukking van de bodem leidt vervolgens tot het ontstaan van golven van allerlei typen (zie *Transport door het transmissiemedium*).

Het verplaatsen van de statische gewichts- of beter aslasten over de rails leidt dus tot dynamisch gedrag van de bodem. Men spreekt in dit geval ook van *moving loads*. Belangrijk hierbij is dat er verschil gemaakt wordt tussen sub- en superkritische treinsnelheden. Bij een superkritische treinsnelheid is deze, in tegenstelling tot een subkritische snelheid, groter dan de golfsnelheid in de bodem. De golfsnelheid is de snelheid waarmee de trillingsenergie in de bodem afgevoerd wordt. Er ontstaat dan een golffront zoals ook bekend is bij een supersonisch vliegtuig dat door de geluidsbarrière knalt. In Nederland ligt de kritische snelheid bij veenbodems rond 200 km/u.

Bovenop de quasistatische belasting van een *moving load*, kan trillingsenergie opgewekt worden door een groot aantal andere mechanismen. De oorzaak van deze mechanismen ligt in het feit dat de trein zich niet rechtlijnig beweegt. De trein kan versnellingen in verticale richting ervaren door onder andere:

- een onvlakke spoorligging,
- ruwe spoorstaven,
- wissels,
- dwarsliggers,
- vlakke plaatsen in de wielen,
- de wielruwheid, en
- de excentriciteit van de wielen.

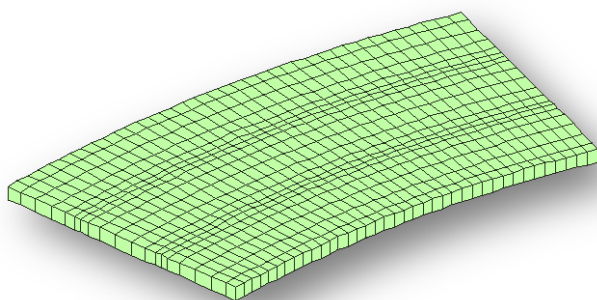
Elk mechanisme wordt gekenmerkt door een typisch frequentiebereik waarbinnen deze een typische hoeveelheid trillingsenergie opwekt. Niet alleen het mechanisme heeft invloed op het frequentiebereik en de hoeveelheid trillingsenergie, ook de trein zelf heeft daar invloed op. Zo is voor het comfort van de passagiers, de bak afgeveerd op 1,5Hz. De

vering werkt als een filter waardoor de bodem boven ongeveer 3Hz de trillingen van de bak niet meer ervaart. De locomotieven daarentegen hebben een stijvere afvering waardoor dit effect pas bij veel hogere frequenties optreedt. Zo zijn er ook niet-afgeveerde massa's (de zogenaamde *unsprung masses*). Een *unsprung mass* is bijvoorbeeld de as die de wielen verbindt (ongeveer 0,5 ton), of in sommige gevallen het aandrijfsysteem op de assen (tot wel 1 ton). De massa van deze *unsprung masses* leveren ongefilterd grote bijdragen aan de opgewekt trillingsenergie. Hoe groter deze massa's, hoe groter de trillingsenergie. Niet alleen het frequentiebereik, maar ook het geometrische bereik is sterk afhankelijk van het bronmechanisme. Zo is de aanwezigheid van een wissel slechts dicht bij het spoor merkbaar, terwijl de *moving loads* tot op veel grotere afstanden merkbaar kunnen zijn. Dat heeft onder andere te maken met het golftype dat het mechanisme produceert en met het frequentiebereik waarbinnen deze worden opgewekt. Driedimensionale golven hebben een grotere afstandsdeмпing dan tweedimensionale golven. Daarnaast ervaren hoogfrequente trillingen een grotere materiaaldeмпing per afgelegde afstand dan laagfrequente trillingen.

Transport door het transmissiemedium

Het transport van de trillingsenergie door het transmissiemedium gebeurt op basis van golfvoortplanting. Er bestaan verschillende golftypen die ieder een eigen transport-/golfsnelheid heeft. In sommige gevallen is de golfsnelheid zelfs frequentieafhankelijk. Met spreekt dan van dispersie.

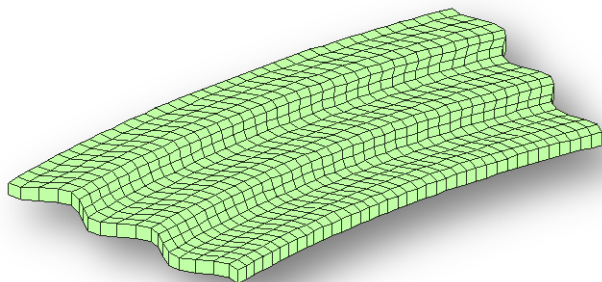
Zo bestaan er longitudinale golven. Bij dit type golven is de uitslag van de trilling in de golfvoortplantingsrichting. Dit is net zoals bij geluid dat zich min of meer verplaatst als verdichtingen en verdunningen door de lucht in de bewegingsrichting van trilling (zie Figuur B.1).



Figuur B.1 Schematisering van het longitudinale golf.

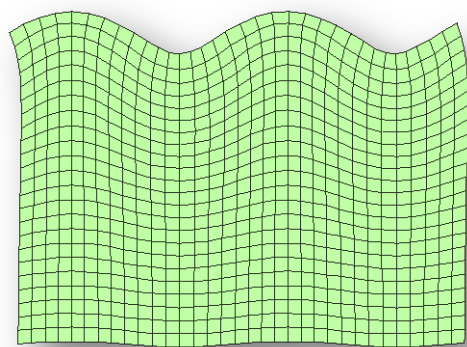
Bij transversale trillingen staat de uitwijking loodrecht op de voortplantings-richting van de golf, zoals de golfbeweging in een ééndimensionaal touw. Bij driedimensionale media zijn er ook drie- en tweedimensionale golven. De zogenaamde transversale golven in het horizontale vlak, de schuifgolven, hebben de meeste energie. Schuifgolven zijn dus geen geluid, maar kunnen wel weer losbreken bij contrastovergangen als geluid in lucht. Naast zogenaamde golven in drie dimensies, zijn er ook die in het twee dimensionale vlak bewegen en die hebben ook vaak de grootste energie. Schuifgolven zijn dus geen geluid,

maar kunnen wel weer losbreken bij contrastovergangen als geluid in lucht. Naast zogenaamde golven in drie dimensies, zijn er ook die in het twee dimensionale vlak bewegen en die hebben ook vaak de grootste energie (zie Figuur B.2).



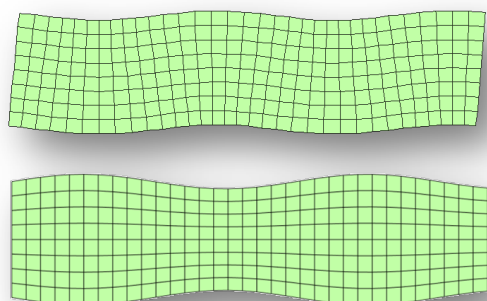
Figuur B.2 Schematisering van de 2D schuifgolf.

Doorgaans zijn de trillingen die gevoeld worden bij de ontvanger de grondrolgolven, of Rayleighgolven (zie Figuur B.3), dat zijn een type golven die zich aan of vlak bij het oppervlak van een vast medium voortplanten. Rayleighgolven bestaan uit zowel transversale als longitudinale componenten, die exponentieel afnemen in sterkte met de afstand tot het oppervlak. Ook geldt dat hoe groter de golflengte, hoe sneller ze reizen. Rayleigh golven bewegen min of meer in een twee dimensionaal vlak en hun energie neemt af met een over de wortel van de afstand tot de bron.



Figuur B.3 Schematisering van de Rayleigh golf.

Naast Rayleigh golven zijn er ook nog andere twee dimensionale golven zoals Love en Lamb golven die zich voortplanten binnen een grondlaag, een zogenaamde guided wave (zie Figuur B.4). Het effect van guided waves is het meest bekend bij glasvezelkabels waarbij het licht (als golf) door refractie gevangen blijft in de kabel.



Figuur B.4 Schematisering van de Lamb golf (boven: buiggolf, onder: compressiegolf).

Hiërarchie

De spoortrillingen in de woning ontstaan dus uit de interactie van trein en spoorconstructie en door het transport van de trillingen achtereenvolgens door het baanlichaam, de bodem en door de fundering van de woning. Op een zeer fundamenteel niveau kan het ontstaan en het transport van de trillingen op deeltjesniveau beschreven worden. Echter, een dergelijke beschrijving is zeer onpraktisch vanwege het aantal invoerparameters en de rekentijd. Een beschrijving van de trillingen op een minder gedetailleerd niveau is dus vereist.

In de praktijk is een zogenoemde continuümmechanische beschrijving van trillingen het meest gedetailleerde niveau. Op dit niveau worden trillingen gesimuleerd met numerieke methoden als *Finite Difference Method* (FDM), *Finite Volume Method* (FVM) en *Finite Element Method* (FEM).

Een hoge mate aan gedetailleerdheid impliceert vaak een lange rekentijd van de simulatie. Om de rekentijd te reduceren, wordt daarom vaak gebruik gemaakt van alternatieve numerieke methoden die gebaseerd zijn op vereenvoudigende aannamen, zoals Raytracing of de Barkan methode.

Hoewel de trillingsoverdracht van fundering naar vloer buiten deze onderzoeksfase valt, beschrijven we hier ook methoden waarmee met name het deelsysteem gebouw kan worden beschreven, zoals Superelementen en SEA.

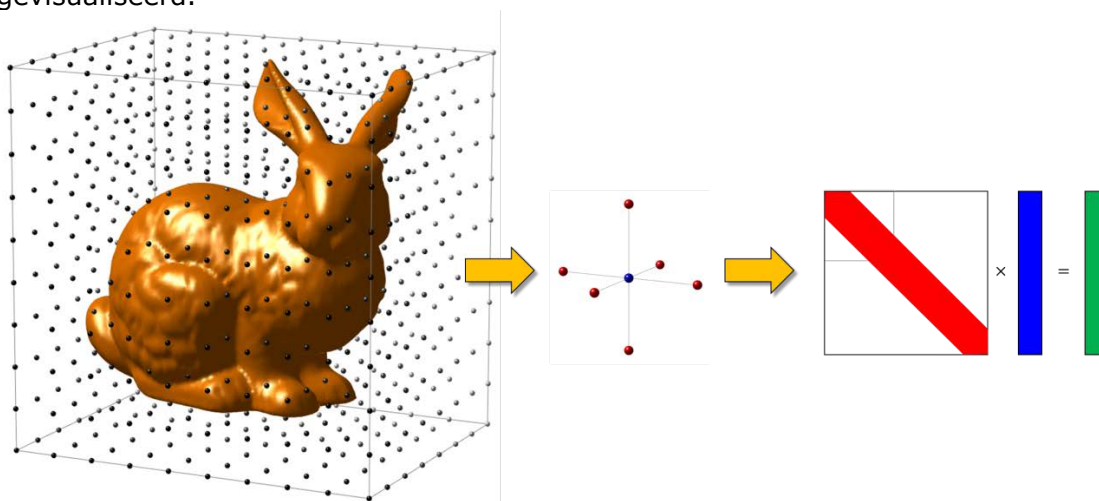
B.1 FDM

Generiek relateren differentiaalvergelijkingen (voor de beschrijving van continuümmechanische trillingen) de tijdelijke verandering van een grootte op een plek (bijvoorbeeld van de dichtheid, of van de verplaatsing) aan de variatie van dezelfde of een andere grootte rondom die plek. Iets specifieker, en zonder hier in wiskundige details te treden, luidt bijvoorbeeld de differentiaalvergelijking van de massabalans als volgt:

$$\dot{\rho} + \rho \nabla \cdot v = 0 \quad (1)$$

Hierin wordt de verandering van de dichtheid in de tijd $\dot{\rho}$ op een bepaalde plek in de ruimte gerelateerd aan snelheid v in de omgeving ∇ van die plek. Alles wat rechts van het gelijkheidsteken staan, 0 , wordt als bronterm beschouwd en symboliseert alles wat van buiten aan het systeem opgelegd wordt.

Het numerieke proces in een FDM simulatie wordt in Figuur B.5 gevisualiseerd.



Figuur B.5 Schematisering van het numerieke proces in een FDM model van een konijn

Eerst wordt de ruimte, waarvoor het model opgesteld wordt, gediscretiseerd. In het geval van FDM betekent dit dat er punten oftewel vertices in de ruimte gedefinieerd worden (zie Figuur B.5, links). Vervolgens wordt de verandering van de toestand in een punt (zie Figuur B.5, midden) volgens vergelijking (1) gerelateerd aan de toestand van de omgeving van dat punt (d.w.z. de toestand in de omliggende punten) en aan een eventuele bron. Door de relatie van ieder punt met zijn omliggende punten uit te schrijven, kan een systeem van vergelijkingen (zie Figuur B.5, rechts) opgesteld worden. Een dergelijk systeem bestaat uit een bekende matrix, een vector met onbekende waarden (dat zijn de op te lossen waarden in elk punt) en een vector met bekende brontermen. Door de matrix te inverteren en vervolgens te vermenigvuldigen met de bekende bronvector, kun de toestandsvector opgelost worden.

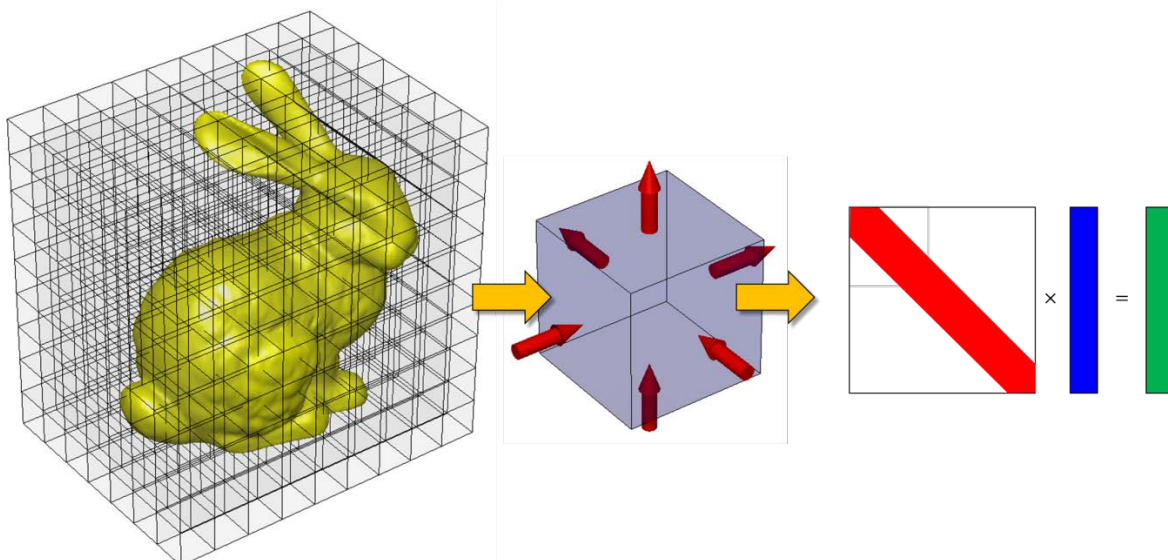
Het inverteren van de matrix kan een tijdrovend proces zijn, naarmate de matrix groter en meer gevuld is. De grootte van de matrix wordt bepaald door een aantal factoren, zoals de vereiste nauwkeurigheid van de simulatie, en de grootte van het te simuleren volume. Een andere belangrijke factor die van invloed is op de grootte van de matrix, is de maximale trillingsfrequentie waarvoor de simulatie moet gelden. Hoe hoger de trillingsfrequentie, hoe kleiner de golflengten en hoe dichter de vertices bij elkaar moeten liggen (en dus hoe meer punten vereist zijn). In het rechter deel van Figuur B.5 is grafisch aangegeven dat de matrix bij FDM meestal groot (de grootte van een kleine matrix wordt hierin met grijze lijnen aangegeven) en *sparse* is (d.w.z. de matrix is slechts op enkele plaatsen ongelijk nul. In dit geval wordt gesproken van een *bandmatrix*). Met de huidig gangbare pc's kunnen vergelijkingssystemen opgelost worden met een grootte in de orde van 1 miljoen.

B.2 FVM

Wanneer de differentiaalvergelijking, zie vergelijking (1), over een deelvolumen V (oftewel *Finite Volume*) van de totale ruimte geïntegreerd wordt (en na enige omvorming volgens de zogenaamde *divergentie theorie*), volgt een differentiaalvergelijking in onderstaande vorm

$$\dot{\rho}V + \rho \oint_S v \cdot n dS = 0 \quad (2)$$

Hierbij betekent $\oint_S v \cdot n dS$ een integraal over het oppervlak S van het deelvolumen V , en $v \cdot n$ is de invloed van de omgeving op het deelvolumen. In het geval van de massa balans symboliseert het rode gedeelte van de vergelijking de netto massa die het deelvolumen in- of uitstroomt. In de integrale vorm, zie vergelijking (2), wordt de toename van de massa in een deelvolumen, $\dot{\rho}V$, gerelateerd aan de netto massastroom $\rho \oint_S v \cdot n dS$ die via het oppervlak het volume in of uitstroomt.



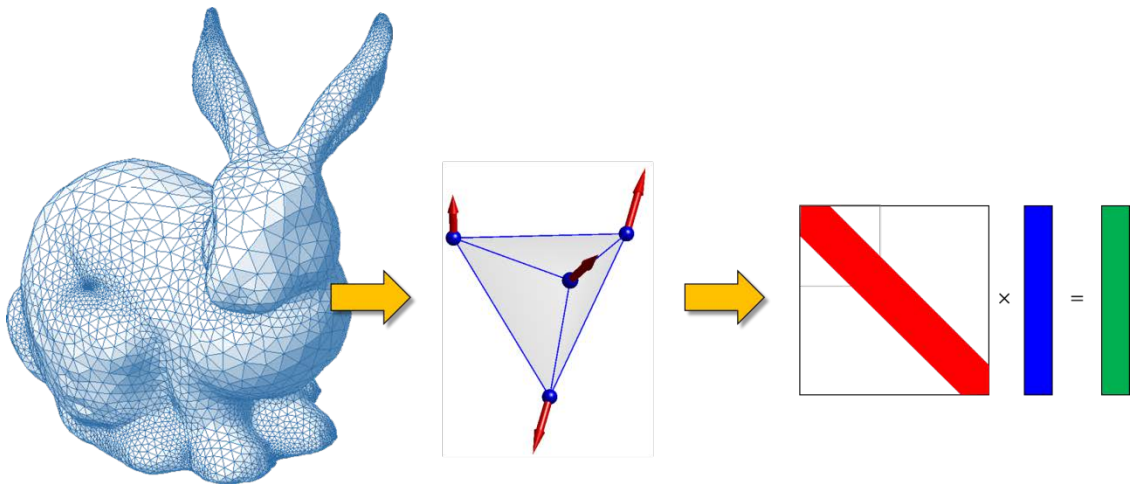
Figuur B.6 Schematisering van het numerieke proces in een FVM model van een konijn

Het numerieke proces in een FVM simulatie wordt in Figuur B.6 afgebeeld. Eerst wordt de ruimte, waarvoor het model opgesteld wordt, gediscretiseerd. In het geval van FVM betekent dit dat de ruimte in deelvolumes opgedeeld wordt (zie Figuur B.6, links). Vervolgens wordt de verandering van de toestand in een **deelvolumen** (zie Figuur B.6, midden) volgens vergelijking (2) gerelateerd aan de **invloed van de omgeving** op het deelvolumen (d.w.z. wat uit het naastgelegen deelvolumen wegstroomt, stroomt het onderzochte deelvolumen in) en aan een eventuele **bron**. Door de relatie van ieder deelvolumen met zijn omliggende deelvolumes uit te schrijven, kan een systeem van vergelijkingen (zie Figuur B.6, rechts) opgesteld worden. Ook nu bestaat een dergelijk systeem uit een grote en bekende **sparse matrix**, een **vector** met onbekende waarden (dat zijn de op te lossen waarden in elk volume) en een **vector** met bekende brontermen. Door de matrix te inverteren en vervolgens te vermenigvuldigen met de bekende bronvector, kun de toestandsvector opgelost worden.

B.3 FEM

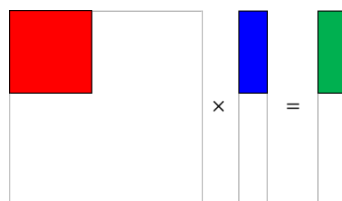
Bij zowel FDM en FVM wordt een gefixeerde ruimte gediscretiseerd. Dat betekent dat de discretisatie niet afhangt van de bewegingen en vervormingen van het te onderzoeken object. Een dergelijke methode wordt ook wel *Euler* beschrijving genoemd. Een Euler beschrijving is in het algemeen heel geschikt om vloeistofmechanica te simuleren. Het is ongebruikelijk, maar niet uitgesloten, om een dergelijke beschrijving te gebruiken bij de simulatie van vaste stoffen.

Vooral vanwege de aard van bewegingen van vaste stoffen, is het gebruikelijk om een zogenaamde *Lagrange* beschrijving toe te passen. Bij een dergelijke methode wordt niet de gefixeerde ruimte, maar het beweegbare volume van de onderzochte vast stof gediscretiseerd. De discretisatie beweegt dus als het ware mee met de vervormingen van de vaste stof. De methode wordt schematisch in Figuur B.7 weergegeven.



Figuur B.7 Schematisering van het numerieke proces in een FEM model van een konijn

Het te onderzoeken object wordt in kleine deelelementen opgedeeld. Dat zijn de zogenaamde *Finite Elements* (Ned.: Eindige Elementen). De eindige elementen hebben een eenvoudige vorm, en op grond van eenvoudige analytische dan wel numerieke berekeningen wordt voor elk element het systeem van mechanische vergelijkingen opgesteld (zie Figuur B.8).



Figuur B.8 Schematisering van het vergelijkingssysteem van een eindig element (een kleine maar volbezette matrix)

Om tot het systeem van vergelijkingen voor een eindig element te komen, wordt, elke mogelijke differentiaalvergelijking over het deelvolumen van een eindig element geïntegreerd en vervolgens tot één

arbeidsvergelijking samengevat. Het bijzondere hiervan is, dat uiteindelijk het systeem van vergelijkingen uit één type vergelijkingen bestaat (namelijk een arbeidsbalans) dat alle fysische aspecten bevat, die gesimuleerd worden (vervormingen, inertia, demping, verdichting, enz.). Bij FDM en FVM daarentegen bestaat het systeem van vergelijkingen uit meerdere typen, namelijk voor ieder fysisch aspect één.

Wanneer, ter vereenvoudiging, alleen het inertia effect (of massa balans) geanalyseerd wordt, resulteert vergelijking (1) uiteindelijk in de tweede wet van Newton, namelijk

$$Ma = F \quad (3)$$

massa keer versnelling is kracht. Deze vergelijking relateert dus de versnelling van elk hoekpunt (oftewel *knoop* of *node*) van een eindig element aan de krachten die op de knopen werken. Van elk element wordt het vergelijkingssysteem opgesteld en uiteindelijk voor elke knoop in één systeem geassembleerd. Uiteindelijk resulteert ook dit in een grote, maar *sparse* matrix (zie Figuur B.7, rechts).

Een ander belangrijk verschil tussen FEM en FDM/FVM is dat de laatstgenoemden het vergelijkingssysteem op lokaal niveau oplossen. Op een bepaald punt in de ruimte wordt de oplossing van de balansvergelijkingen zo goed mogelijk benaderd. Op globaal niveau echter, wordt niet per se voldaan aan de balansvergelijkingen. Bijvoorbeeld het totaal aan trillingsenergie dat van buiten in het model gestopt wordt, is niet per se gelijk aan het totaal aan trillingsenergie dat uiteindelijk in het systeem zit. Op lokaal niveau wordt het resultaat van de energiebalans zo goed mogelijk benaderd, maar alle kleine afwijkingen op lokaal niveau kunnen op globaal niveau tot grotere afwijkingen leiden. Bij FEM daarentegen wordt op globaal niveau de oplossing van de balansvergelijkingen zo goed mogelijk benaderd. Bij FEM hoeft dat op lokaal niveau dat niet per se het geval te zijn.

B.3.1 SFEM

Stochastic Finite Element Method (SFEM) is een bijzondere vorm van FEM, waarbij de onzekerheid van de invoerparameters en haar uitwerking op de resultaten in de simulatie meegenomen wordt. De meest gangbare manier om deze onzekerheid mee te nemen is door zogenaamde *Monte Carlo* simulaties uit te voeren, waarbij vooraf een groot aantal situaties gesimuleerd wordt. Bij het samenstellen van de populatie situaties wordt rekening gehouden met de kans van optreden. Elke situatie wordt doorgerekend en van alle resultaten wordt de verdeling gepresenteerd.

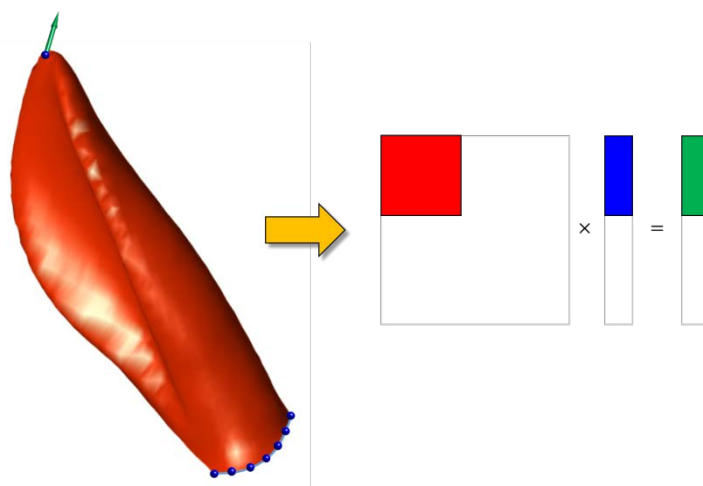
Het is duidelijk dat een Monte Carlo simulatie, afhankelijk van de stochastiek van de invoergegevens, een haast onpraktisch hoge doorlooptijd met zich mee kan brengen. Waar bij Monte Carlo de invoergegevens discreet en expliciet zijn, worden bij SFEM de invoergegevens als verdeling gedefinieerd (bijvoorbeeld als gemiddelde μ en spreiding σ). De differentiaalvergelijkingen en daarmee uiteindelijk het numerieke vergelijkingssysteem worden zo omgevormd dat zij deze verdelingen incorporeren. De uitkomst van het vergelijkingssysteem bevat uiteindelijk niet alleen een gemiddelde of verwachtingswaarde

(zoals dit bij standaard FEM het geval is), maar ook een verdelingsparameter.

Het voordeel van SFEM is dat slechts één simulatie uitgevoerd hoeft te worden. Het nadeel is echter, dat het aantal onbekenden (en daarmee de matrix van het vergelijkingssysteem) minimaal verdubbelt. Wanneer FEM ingezet wordt om bijvoorbeeld de trillingen in de bodem te simuleren, dan loopt men tegenwoordig nog vaak tegen praktische grenzen aan, zoals hardware (geheugen, processorcapaciteit) en doorlooptijd. Een verdubbeling van het aantal onbekenden betekent in sommige gevallen dat de simulatie niet uitvoerbaar is, of dat extra capaciteit bij rekencentra gekocht moet worden om de simulaties uit te voeren.

B.3.2 Superelementen

De methode van de superelementen kan gezien worden als onderdeel van FEM. Een superelement vertegenwoordigt een groter en complexer deel van het te modelleren object dan een eindig element.



Figuur B.9 Een superelement dat het gedrag van een groter deel van het object beschrijft en de schematisering van het daarbij behorende vergelijkingssysteem.

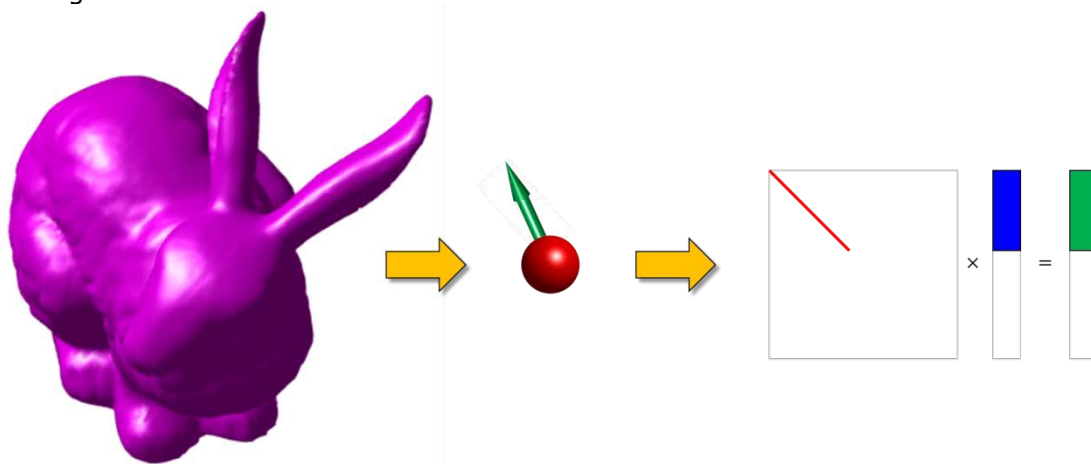
Een superelement wordt gebruikt om het aantal onbekenden in het systeem van vergelijkingen te reduceren, en dus om de **matrix** te verkleinen. Een superelement kan gebruikt worden, wanneer de (trillings-) toestand in slechts een aantal punten berekend hoeft te worden. Dergelijke punten kunnen krachtaangrijpingspunten zijn (i.e. punten met een **bronterm**) of punten die superelementen met ander super- of eindige elementen verbinden. Op overige posities in een superelement is de (trillings-) toestand niet van belang. Zo zou een superelement gebruikt kunnen worden om de trillingsverhouding tussen de fundering en een vloer in een gebouw te berekenen. Het superelement representeert dan het gebouw met knopen op de fundering en op de vloer. Op overige posities in het gebouw kunnen de trillingen niet, dan wel alleen met een rekenintensief nabewerkingsproces, berekend worden.

Het numerieke model dat de fysische interactie tussen de knopen van een superelement beschrijft kan in sommige gevallen analytisch bepaald worden, maar wordt eerder, en vooral in de complexere gevallen met behulp van een FEM analyse berekend.

Omdat het aantal knopen en dus ook het aantal onbekenden in een superelement beperkt is, is de matrix klein. Door de complexere interactie tussen de knopen, is de matrix echter wel volbezet (zie Figuur B.9, rechts).

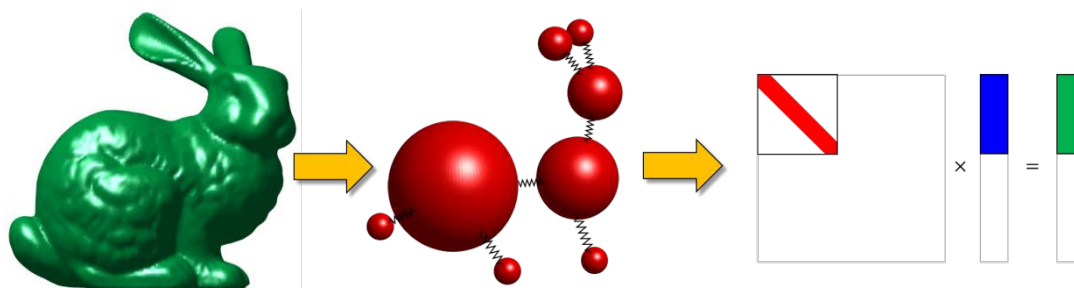
B.3.3 Rigid body

Een andere manier om het aantal vrijheidsgraden te beperken, is door aan te nemen dat het te onderzoeken object star, dus onvervormbaar, is. Bij trillingssimulatie kunnen dergelijke aannamen gedaan worden in bepaalde frequentiegebieden. Wanneer het te analyseren frequentiegebied lager is dan de frequenties waarvoor het object ontvankelijk is (i.e. de *resonantiefrequenties*), dan zal het object zich als star lichaam of *rigid body* gedragen (bijv. een treinwiel in het frequentiegebied van de bodemtrillingen). De FEM discretisatie, zoals afgebeeld in Figuur B.7, rechts, wordt dan gereduceerd tot een representatie door één knoop, met in het meest generieke geval zes onbekenden (nl. drie translaties en drie rotaties). Het model wordt daardoor beschreven door een zeer kleine matrix, die bij bepaalde symmetriën in het object verder alleen componenten op de diagonaal heeft (i.e. *diagonaalmatrix*, zie Figuur B.10). Het voordeel van een diagonaalmatrix, is dat haar inversie geen significante rekentijd in beslag neemt.



Figuur B.10 Een rigid body dat het gedrag van een van het object als een starre massa beschrijft en de schematisering van het daarbij behorende vergelijkingssysteem.

Vaak wordt een object uit een samenstel van rigid bodies opgebouwd (zie Figuur B.11). De wielen van een treinstel, bijvoorbeeld, gedragen zich weliswaar als een starre massa in het voor spoorse trillingen relevante frequentiegebied, maar vertonen wel dynamica t.o.v. het draaistel. Het wiel wordt daarom als starre massa, flexibel aan het draaistel gekoppeld. Het draaistel wordt wederom als starre massa flexibel aan de bak van de wagon gekoppeld. Een dergelijke flexibele koppeling wordt vaak als een veer gemodelleerd.



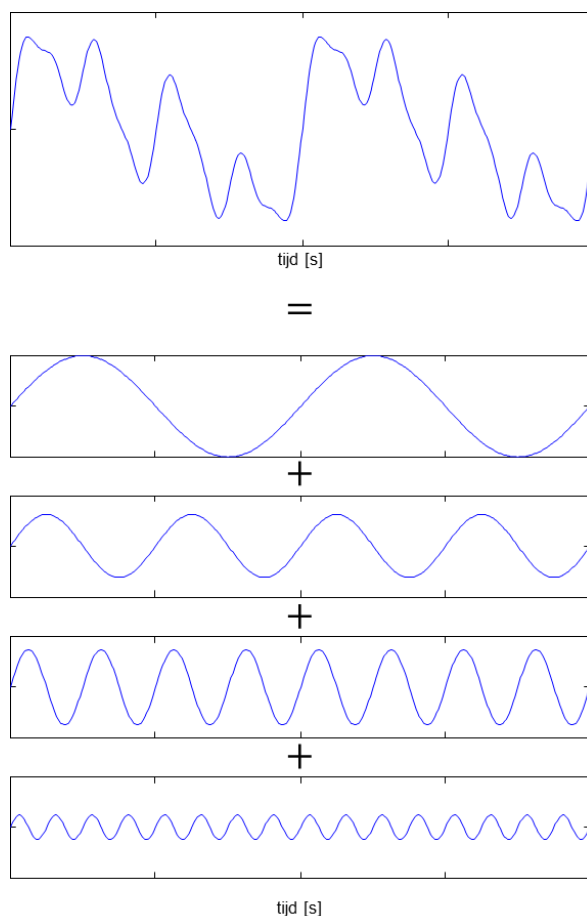
Figuur B.11 Een systeem van rigid bodies die onderling met veren aan elkaar gekoppeld zijn.

B.4 BEM

De numerieke methoden die tot nog toe beschreven zijn, zijn vooral (maar niet uitsluitend) bedoeld voor een beschrijving van de simulatie in het *plaats-tijd* domein (oftewel x,t -domein). Dat betekent dat de oplossing een antwoord op een bepaalde plaats met specifieke coördinaten en op een specifiek tijdstip geeft. Voor elke positie (of *node*) op elke tijdstip van de simulatie wordt een oplossing gegenereerd en opgeslagen.

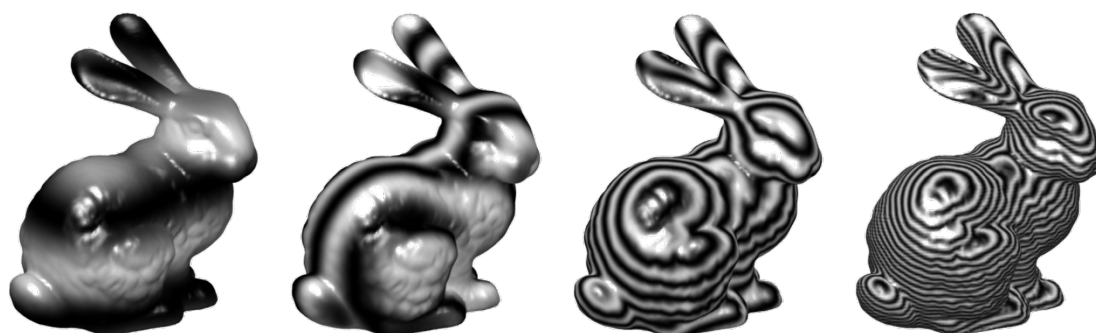
Dat geheel aan oplossingen kan ook anders beschreven worden, namelijk via een beschrijving in het golfdomein (oftewel k,ω -domein). Een trillingsveld (i.e. ruimtelijke en tijdelijke beschrijving van trilsnelheden) bijvoorbeeld, kan ontleed worden in een sommatie van golven met verschillende golfgetallen, k , en frequenties, ω . Volgens de stelling van Fourier kan elk tijdsignaal ontleed worden in een som van zogenaamde *sinus*-signalen met verschillende frequenties, amplitude en fase (zie Figuur B.12). Met de *frequentie* wordt het aantal keer dat een signaal per seconde op en naar gaat, bedoeld. Met *amplitude* wordt het verschil tussen de maxima en minima in het sinussignaal bedoeld, en met *fase* het beginpunt van de sinus in de tijd. De frequentieafhankelijkheid van de amplitude en fase in een signaal wordt ook wel *spectrum* genoemd.

Zoals de frequentie ω in relatie staat met de tijd t , zo staat het golfgetal k in relatie met de plaats x . In Figuur B.13 wordt een aantal golfvelden gevisualiseerd met een variërend golfgetal in de drie richtingen. Hoe groter het golfgetal,



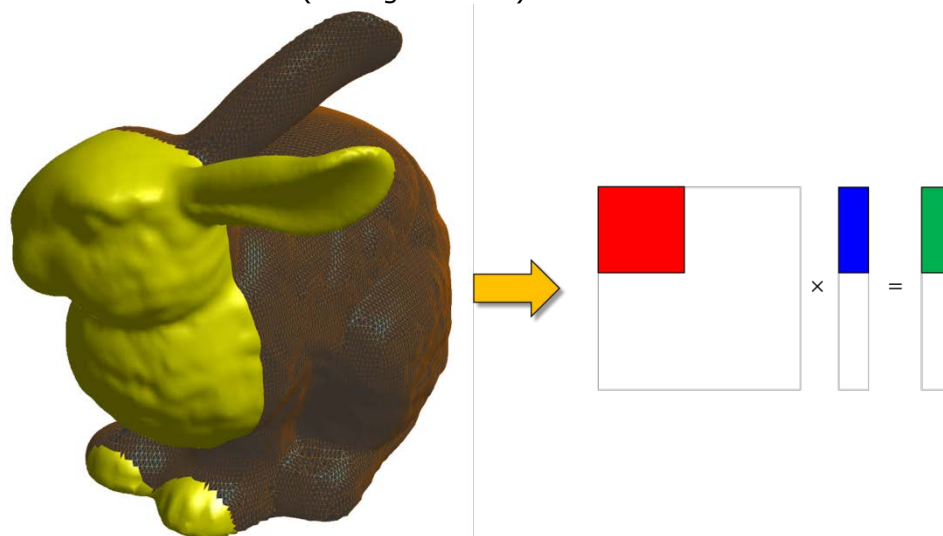
Figuur B.12 Het bovenste tijdssignaal kan volgens de stelling van Fourier ontleed worden in een som van sinus-signalen met verschillende frequentie.

hoe kleiner de golflengte λ is. Verder bestaat er, afhankelijk van het golfstype, een direct verband tussen het golfgetal en de frequentie. Samengevat, bestaat er dus de mogelijkheid om een trillingsveld (of welk type veld dan ook) uit te drukken in een som van golven, die ieder door slechts zes parameters beschreven kan worden, namelijk één amplitude, één frequentie, één fase en drie golfgetallen (in iedere richting één). Wanneer de oplossing van een simulatie in het k, ω -domein beschreven wordt, zijn de frequenties en de golfgetallen de op te lossen grootheden. Door het te analyseren frequentiedomein te beperken, kan het aantal onbekenden (en dus de grootte van de matrix) gereduceerd worden. Op basis van het k, ω -domein is een aantal (semi-) analytische en numerieke methoden ontwikkeld. Eén daarvan is BEM, de *Boundary Element Method*.



Figuur B.13 Visualisatie van een aantal golfvelden met toenemend golfgetal.

Als basis voor BEM dienen de differentiaalvergelijking zoals beschreven in bijlage B.1. Deze zijn omgeschreven naar een vorm die ook wel *golfvergelijking* genoemd wordt. Bij het opstellen van een BEM vergelijkingssysteem wordt gebruik gemaakt van zogenaamde *Helmholtz integraalvergelijkingen* (HIE) die op basis van de golfvergelijkingen de oplossing in elk punt in de ruimte geven als functie van de oplossing op de rand/oppervlak van de gemodelleerde ruimte. Het is daarom alleen noodzakelijk het oppervlak van de gemodelleerde ruimte te discretiseren (zie Figuur B.14).



Figuur B.14 Schematisering van een BEM model.

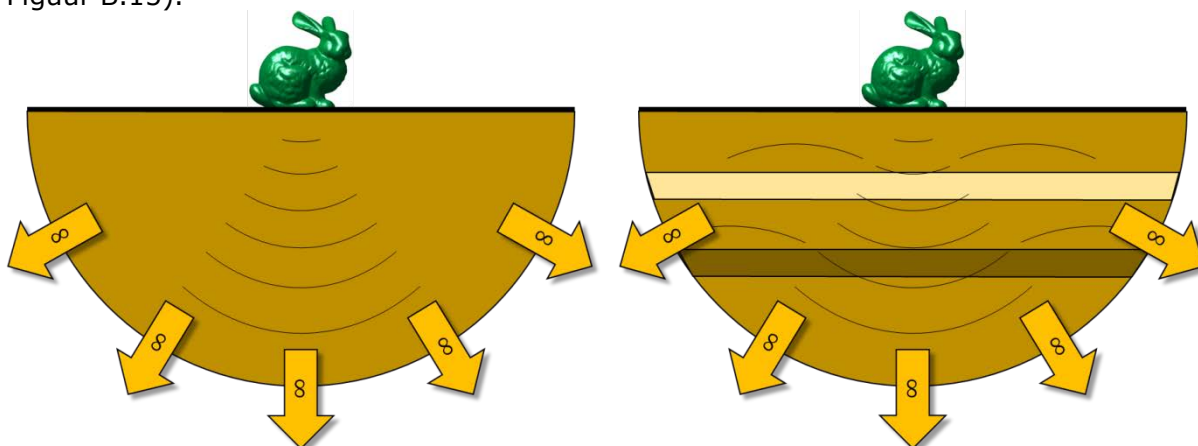
De onbekenden van het systeem zijn dan de oplossingen op het oppervlak van het model. De oplossingen in het door het oppervlak ingesloten volume, of in het volume (tot in het oneindige zelfs) buiten het gediscretiseerde oppervlak kunnen vervolgens met behulp van de HIE en de oplossingen op het oppervlak berekend worden. Wanneer zodoende de oplossing op het oppervlak gereconstrueerd worden, moeten daaruit de oplossingen van het vergelijkingssysteem tevoorschijn komen. Dit laatste wordt als randvoorwaarde aan het vergelijkingssysteem opgelegd, en dat levert een relatief klein vergelijkingssysteem op met een volbezette matrix (zie Figuur B.14, rechts).

Het voordeel van BEM t.o.v. de hierboven beschreven methoden (FDM, FVM en FEM) is dat niet het gehele volume, maar slechts het oppervlak

ervan gediscretiseerd hoeft te worden. Dat resulteert in aanzienlijk minder onbekenden en kleinere matrices wanneer het te modelleren volume groot is in verhouding tot de gesimuleerde golflengten. Het gemodelleerde volume kan zelfs oneindig groot gekozen worden, wat van pas komt bij de modellering van trillingsgolven in de lucht (i.e. geluid) of in de bodem. Echter, het opstellen van het vergelijkingssysteem duurt relatief lang t.o.v. de eerder genoemde methoden. Daarnaast wordt bij BEM principieel uitgegaan van homogene media. Inhomogeniteiten kunnen met extra gediscretiseerde oppervlakten gemodelleerd worden (een steen in gemodelleerde bodem kan als inhomogeniteit meegesimuleerd worden, door zijn oppervlak extra te discretiseren). Nadelig is dan echter dat het vergelijkingssysteem en de benodigde tijd voor het opstellen ervan, daardoor toenemen.

B.4.1 Analytische *halfspace*

Wanneer het te modelleren object een relatief eenvoudige geometrie betreft, kan het hierboven beschreven BEM vergelijkingssysteem analytisch opgesteld worden, en eventueel numeriek opgelost worden. Een voorbeeld van een simpele geometrie is een vlakke bodem (zie Figuur B.15).



Figuur B.15 Schets van een half-space model, links: homogeen, rechts: gelaagd.

Vaak wordt bij een half-space model van de bodem uitgegaan van een puntbelasting en van horizontale homogeniteit. Onder die aannamen kan aan het model axisymmetrie opgelegd worden, waardoor het aantal onbekenden uiteindelijk gereduceerd wordt tot één complexe grootte. Met *complex* wordt hier een reëel en een imaginair deel bedoeld. Een complexe grootte geeft niet alleen informatie over de grootte (de amplitude), maar ook over de fase van trilling.

Theoretisch gaat het model aan de onderkant tot in het oneindige. Deze aanname zorgt ervoor dat golven nergens gereflecteerd worden. Om een dergelijk randvoorwaarde in FDM, FVM of FEM te benaderen, moeten de grenzen van het gediscretiseerde volume ver verwijderd zijn van het punt waar de trillingen bestudeerd worden, hetgeen tot een onpraktisch groot model kan leiden. Er bestaan ook zogenaamde niet-reflecterende randcondities. Deze werken echter alleen perfect onder zeer beperkende voorwaarden.

In het algemeen is de bodem niet homogeen. De inhomogeniteit bestaat in het eenvoudigste geval uit horizontale lagen. Golven worden door

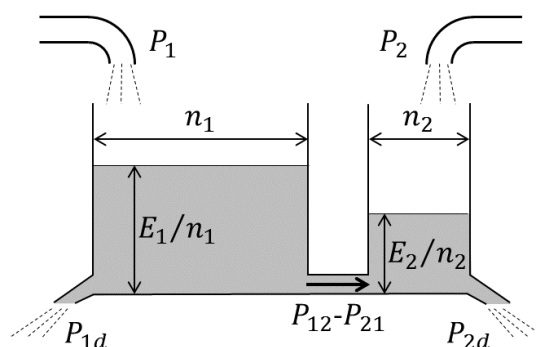
dergelijke lagen gereflecteerd of omgevormd tot andere typen golven. In het analytische half-space model kan de (perfect) horizontale gelaagdheid gemodelleerd worden. Per laag worden extra onbekenden (golffparameters) geïntroduceerd waar randvoorwaarden zodanig aan worden opgelegd dat tussen aangrenzende lagen continuïteit van mechanische spanningen en verplaatsingen heerst.

B.5 SEA

Statistical Energy Analysis (SEA) is oorspronkelijk ontwikkeld in de ruimtevaartindustrie om hoogfrequente trillingen in de huid van raketten en van de *payload* te voorspellen. Hoe hoogfrequenter de trillingen, hoe moeilijker deze met de voorheen beschreven methoden te voorspellen zijn. De voornaamste reden is dat de modellen onpraktisch groot worden. Daarnaast is de *modale dichtheid*, n , zo groot dat de exacte locaties van de resonanties moeilijk te voorspellen zijn. De resultaten hangen bij hoge frequenties daarom sterk af van de invoerdata die vaak moeilijk te bepalen is.

De modale dichtheid geeft aan hoeveel *resonantie-* of *eigenfrequenties* een systeem per frequentie heeft. Resonanties zijn specifieke frequenties van een systeem, waarbij het systeem gevoelig is voor trillingen.

Om toch betrouwbare voorspellen te doen bij hoge frequenties, gaat de SEA methode uit van een statische beschrijving van de modale dichtheden en van de energieverdelingen binnen het model. Het principe van SEA berust op het feit dat hoe groter de modale dichtheid van een object is, hoe ontvankelijker het is voor het opnemen van trillingsenergie. In Figuur B.16 wordt het principe van een SEA model weergegeven.

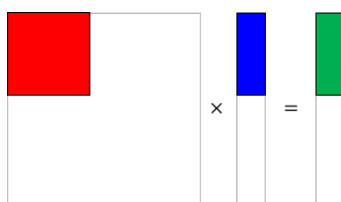


Figuur B.16 Schematisering van een SEA model.

In Figuur B.16 is een SEA model afgebeeld met twee subsystemen. Een subsysteem symboliseert een bepaald golfstype in een object (bijvoorbeeld een buig- of een schuifgolf in de vloer van een woning). Elk subsysteem wordt gesymboliseerd door een container die gevuld is met water. Het watervolume, E_1 of E_2 , in een container representeert de hoeveelheid trillingsenergie het subsysteem bevat. Beide containers staan in contact met elkaar en afhankelijk van de waterdruk stroomt het water (i.e. de trillingsenergie) van het ene naar het andere subsysteem. Hoe groter het oppervlak van de container is, hoe minder snel de waterdruk toeneemt met het watervolume. Het oppervlak representeert daarom de modale dichtheid van het subsysteem. Hoe groter het oppervlak is, hoe makkelijker de container water kan opnemen. Verder

kan elk subsysteem energie dissiperen, wat in Figuur B.16 gesymboliseerd wordt door het wegstromende water P_{1d} en P_{2d} . Daarnaast kan aan elk subsysteem van buiten energie toegevoegd worden wat in Figuur B.16 weergegeven wordt door de kraantjes met de volumestromen P_1 en P_2 .

De trillingsenergie per subsysteem kan omgerekend worden naar een trillingsamplitude. Om een SEA model op te stellen is het noodzakelijk de modale dichtheid per golftype, per modelonderdeel en per geanalyseerde frequentie te berekenen. Vaak gebeurt dit met analytische formules, soms gebeurt dit met numerieke methoden zoals FEM. Het meest gecompliceerd in het opstellen van een SEA model is de bepaling van de *koppelverliesfactoren*, die beschrijven afhankelijk van het energieverval ($E_1 - E_2$) bepaalt hoeveel energie van subsysteem 1 naar subsysteem 2 stroomt. De koppelverliesfactoren tussen twee systemen hangen af van de dynamische eigenschappen van de betreffende modelonderdelen en van de manier waarop zij aan elkaar gekoppeld zijn. Voor eenvoudige geometrieën kunnen de koppelverliesfactoren analytisch bepaald worden. Voor complexere bouwdelen en koppelingen worden de koppelverlies factoren bepaald met behulp van semi-analytische berekeningen op basis van een golfbeschrijving in het k, ω domein, dan wel met FEM-modellen. Wanneer uiteindelijk alle subsystemen beschreven zijn en via koppelverliesfactoren aan elkaar gekoppeld zijn, ontstaan een klein vergelijkingssysteem met een volle **matrix** (zie Figuur B.17). De **vector met onbekenden** bevat energieën. De **bronvector** bevat de hoeveelheid energie die per subsysteem ingevoerd wordt. De oplossing van het vergelijkingssysteem levert uiteindelijk een energieverdeling die per subsysteem uiteindelijk uitgedrukt kan worden in trillingsamplituden.

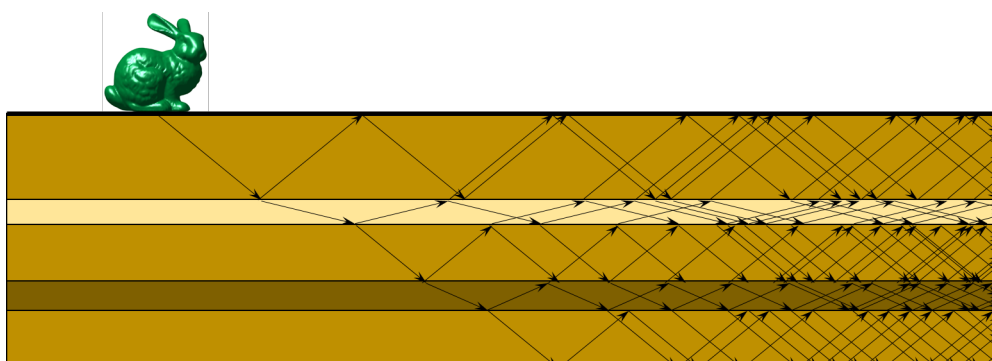


Figuur B.17 Schematisering van het vergelijkingssysteem van een SEA model

Zoals beschreven is SEA gebaseerd op de aanname dat trillingsenergie opgeslagen wordt in de resonanties van elk subsysteem. SEA modellen werken daarom goed bij hoge modale dichtheden, en dus bij relatief hoge frequenties. Daarom zijn, op een enkele uitzondering na, SEA modellen niet geschikt bij de trillingssimulatie van lage frequenties.

B.6 Raytracing

Fysisch gezien is *raytracing* (het volgen van stralen) de meest voor de hand liggende methode om trillingsgolven te simuleren. Vanaf de bron worden de golffronten door het medium gevolgd (zie Figuur B.18).

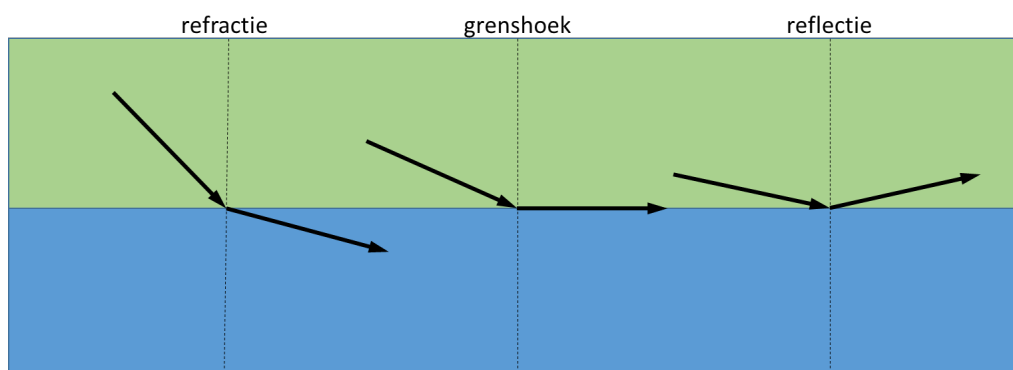


Figuur B.18 Schematische weergave van een raytracing simulatie

Elke pijl in Figuur B.18 representeert de normale vector op een golffront. In de afbeelding wordt bij de bron één golfrichting voor één frequentie gevolgd bij het transport door het medium "bodem". Wanneer de golf een bodemlaag of een ander significant object tegenkomt, wordt op basis van de materiaaleigenschappen berekend, welk deel van de inkomende golfenergie getransformeerd wordt in andere golftypen, welk deel gereflecteerd wordt en welk deel afgebogen wordt. Zodoende ontstaat per frequentie uit één golfrichting bij de bron een hoeveelheid aan golffronten van allerlei typen.

Grofweg bestaan er twee methoden waarop het golfgedrag bij een reflectie bepaald kan worden. Bij de typisch "fysica" aanpak wordt gekeken naar zogenaamde *impedantiesprongen*. De impedantie geeft de verhouding tussen trilsnelheid en kracht weer. Hoogimpedante materialen (i.e. dynamisch stijve materialen) laten kleine trilsnelheden zien bij een excitatie met hoge kracht, en vice versa bij laagimpedante materialen. In bijlage B.8 wordt de term *admittantie* toegelicht. Dat is de keerwaarde van de impedantie.

Hoe beter de impedantie overeenkomt tussen twee aangrenzende materialen, hoe beter een golf door de grens tussen beide materialen getransporteerd kan worden, met zo min mogelijk reflectie. Een bekend fenomeen dat verklaard wordt op deze "fysica" aanpak is de breking van licht tussen twee verschillende materialen (bijv. water en lucht, zie Figuur B.19).



Figuur B.19 illustratie van golfgedrag bij de overgang tussen twee media. Links: refractie, midden grensfrequentie en rechts reflectie

Het fenomeen wordt in de regel beschreven met de wet Snellius waarbij de verhouding tussen de lighthoeken berekend wordt op basis van de lichtsnelheid in beide media. Wanneer het fenomeen niet "licht" is maar "trillingsgolven", dan worden de golfsnelheden vaak uitgedrukt als functie van de impedanties. Echter, in tegenstelling tot licht, bestaan er verschillende trillingsgolftypen in de bodem (bijv. compressiegolven, schuifgolven, Rayleighgolven, enz.). Bij het bepalen van de refractie en reflectie van trillingsgolven moet dus rekening gehouden worden met de impedantie van de bodemlagen voor elk verschillend golftype. De tweede methode om het golfgedrag bij de overgang tussen media te bepalen, is een "engineering" aanpak, waarbij een klein vergelijkingssysteem opgesteld en opgelost wordt. Het vergelijkingssysteem is gebaseerd op de continuïteit van de trillingsgroottheden ter plekke van de begrenzing. Het gaat hierbij in de eerste plaats om de trilsnelheden: in beide mediums moet de trilsnelheid op de begrenzing gelijk zijn (anders ontstaan er bijvoorbeeld gaten in het continuüm). Daarnaast moet er op de begrenzing continuïteit van mechanische spanningen bestaan. Dat is een consequentie van de derde wet van Newton (actio is gelijk aan min reactio). Op basis van deze randvoorwaarden kan bepaald worden wat de verhouding moet zijn tussen de gerefracteerde en gereflecteerde golven van elk voorkomend type.

Het fenomeen dat principieel niet beschreven kan worden door raytracing is diffractie. Dit fenomeen speelt een rol wanneer een golf front op een ondoordringbaar object (i.e. met hoge impedantie) treft met een grootte in dezelfde orde als de golflengte zelf. De golf kan afbuigen, en vaak kunnen dergelijke objecten als een extra puntbron gezien worden. Hierdoor wordt het bijvoorbeeld onmogelijk om trillingsmaatregelen, zoals damwanden, met raytracing te modelleren.

Het berekenen van het golfgedrag bij de overgang tussen mediums is numeriek gezien geen tijdrovende taak. Echter, hoe verder het gesimuleerde ontvangpunt verwijderd is van de bron, hoe meer golfrichtingen bij de bron en reflecties van de golven doorgerekend moeten worden. Dat heeft een negatieve uitwerking op de vereiste rekentijd. Het uiteindelijke trillingsniveau bij de ontvangpositie wordt bepaald uit de som van alle inkomende golven. Een dergelijke simulatie is niet uit te drukken als vergelijkingssysteem zoals dat bij de voorgaande numerieke methoden is gedaan.

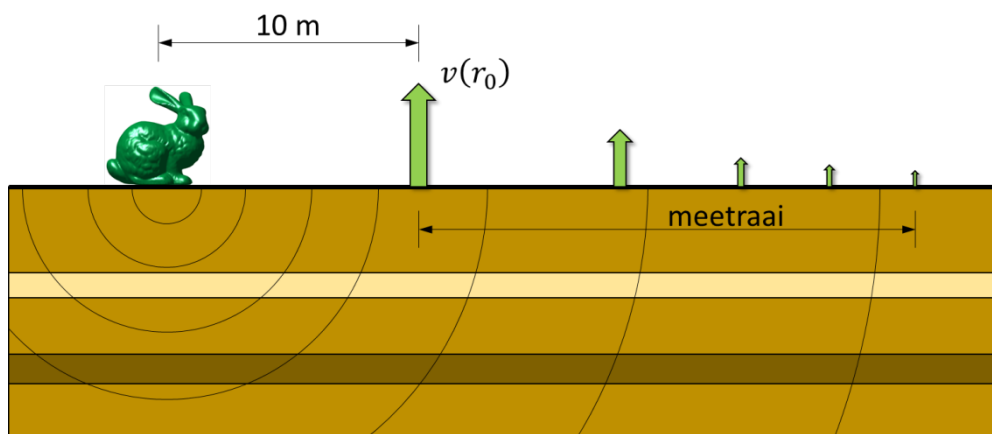
B.7 Barkan

De Barkan vergelijking is geen numeriek model dat een vergelijkingssysteem opstelt en oplost, maar slechts één semi-empirische vergelijking waarmee de trillingsoverdracht door de bodem geschat kan worden. In de Barkan vergelijking

$$v(r) = v(r_0) \left(\frac{r_0}{r}\right)^n e^{-\alpha(r-r_0)} \quad (4)$$

wordt de trillingsnelheid v op afstand r van de bron bepaald uit de trillingsnelheid op afstand r_0 , een geometrische demping n , en een materiaaldemping α .

Om de trillingsnelheid op een bepaalde positie te kunnen bepalen, zijn drie parameters nodig, namelijk de trillingsnelheid op een referentiepositie, de geometrische demping en de materiaaldemping.

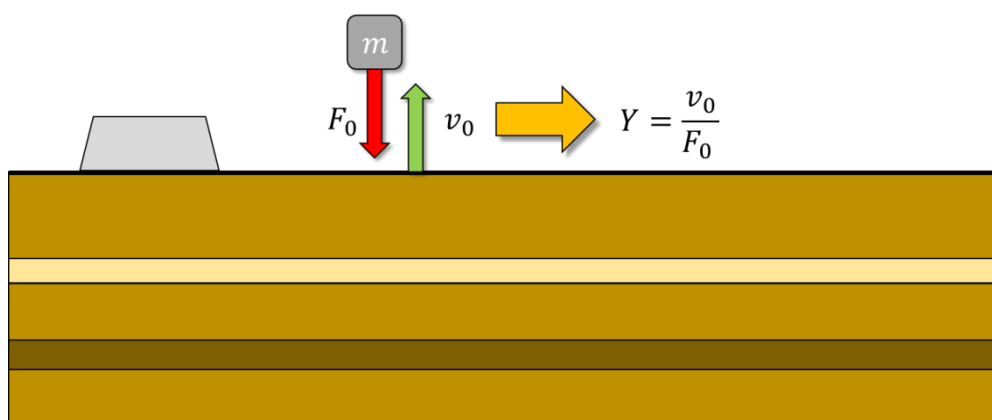


Figuur B.20 Barkan formule, bepaling van de invoerparameters

Wanneer de bodem in trilling gebracht wordt (zie Figuur B.20) kan de trillingsnelheid op een referentiepositie (minimaal 20m van de bron) gemeten worden. Met extra trillingsopnemers kunnen de trillingsnelheden in een meetraai op verschillende afstanden van de bron bepaald worden. Door de Barkan vergelijking (4) op de meetgegevens te fitten, kunnen de geometrische demping en de materiaaldemping bepaald worden. Vaak wordt daarbij aan de geometrische demping restricties opgelegd. Afhankelijk van het type golf (ruimtelijke golf versus oppervlaktegolf) en aard van de bron (punt- versus lijnbron) zou de geometrische dempingsfactor theoretisch tussen 0 en 2 moeten liggen. Deze factoren zijn gebaseerd op de vorm van het oppervlak waarover de trillingsenergie verdeeld wordt (bol, cirkel, lijn, cilinder). Het toepassen van de Barkan vergelijking is eenvoudig zodra de dempingsfactoren bekend zijn. Om die te bepalen, zijn er dus wel metingen nodig.

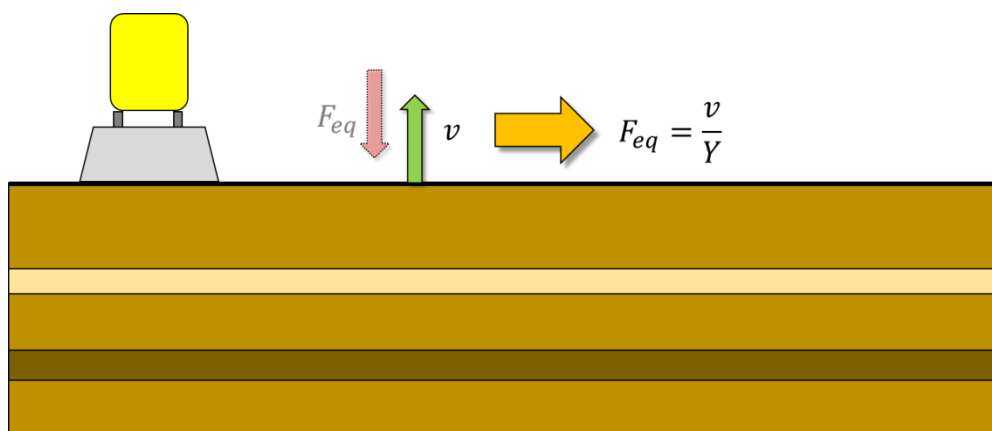
B.8 Equivalente lijnkracht

De equivalente lijnkracht is een empirische methode om de combinatie trein-spoorbaan als krachtbron te karakteriseren. Ten eerste wordt bij het onbelaste spoor een admittantiemeting uitgevoerd (zie Figuur B.21). Hiermee wordt de bodem met een valgewicht aangestoten en ter plekke de trillingsnelheid gemeten. Door de gemeten snelheidsspectrum (voor spectrum zie bijlage B.4) te "delen" door het gemeten krachtsspectrum, wordt de puntadmittantie Y op de plek van het valgewicht bepaald. Er vindt geen letterlijk deling van spectra plaats. Het resulterende admittantiespectrum kan echter wel gezien worden als de ratio tussen resulterende trillingsnelheid en excitatiekracht.



Figuur B.21 De eerste stap van de equivalente lijnkracht methode: de bepaling van de puntadmittantie

Vervolgens wordt er tijdens een treinpassage op dezelfde referentieplek als het valgewicht, het snelheidsspectrum gemeten. Dat snelheidsspectrum kan nu met behulp van de puntadmittantie omgerekend worden tot een equivalente kracht F_{eq} . Dat is een fictieve kracht die bij aanstoting op het referentiepunt tot dezelfde trillingssnelheden zou leiden als de passerende trein.



Figuur B.22 De tweede stap van de equivalente lijnkracht methode: de bepaling van de equivalente kracht uit de gemeten trillingssnelheid

De zo bepaalde equivalente kracht is dus een karakterisering van de specifieke trein die gepasseerd is. De equivalente kracht kan vervolgens in een bodemberekening gebruikt worden om de trillingen door de bodem te voorspellen.

Nadelig aan deze methode is in de eerste plaats dat metingen noodzakelijk zijn, en in de tweede plaats dat de treinkarakterisering bodem- en dus locatieafhankelijk is.

B.9 Beoordeling (deel)methoden

Onderstaande tabellen geven een kwalitatieve beoordeling (schaal: 1 'ongunstig' tot 5 'gunstig') van de beschreven (deel)modellen op de aspecten *toepasbaarheid* en *rekening*. Er is geen beoordeling gegeven (leeg vakje) als de methode niet toepasbaar is voor een bepaald deelsysteem - bijvoorbeeld met Barkan is alleen de bodemoverdracht te berekenen. Een korte rekening is belangrijk als er veel combinaties van

varianten of situaties moeten worden doorgerekend. Dit is mede bepalend voor de studiekosten en doorlooptijd van een onderzoek.

Er wordt per deelsysteem (Trein-Baan-Bodem-Woning) onderscheid gemaakt tussen 3 frequentiegebieden. Voor spoortrillingen is vooral het frequentiegebied tussen 5 en 50 Hz van belang.

Tabel B.1 kwalitatieve beoordeling toepasbaarheid en rekentijd

TOEPASBAARHEID	Trein			Spoorbaan			Bodem			Woning		
	< 20Hz	20-100Hz	> 100Hz	< 20Hz	20-100Hz	> 100Hz	< 20Hz	20-100Hz	> 100Hz	< 20Hz	20-100Hz	> 100Hz
Methode												
FDM				3	3	3	4	4	3	4	4	3
FVM				3	3	3	4	4	3	4	4	3
FEM	5	5	5	5	5	3	5	5	3	5	5	3
SFEM	5	5	5	5	5	3	5	5	3	5	5	3
Superelement	5	4	4	5	4	2	5	4	2	5	4	2
Rigid body	5	5	2	5	3	2	3	1	1	3	1	1
BEM	1	1	1	3	3	3	5	5	5	1	1	1
Halfspace				3	2	1	5	4	3			
SEA	1	1	3	1	1	2	1	1	1	1	3	5
Raytracing							2	4	5			
Barkan							4	3	2			
Equiv. Ijnkraft	3	3	3	3	3	3						

REKENTIJD	Trein			Spoorbaan			Bodem			Woning		
	< 20Hz	20-100Hz	> 100Hz	< 20Hz	20-100Hz	> 100Hz	< 20Hz	20-100Hz	> 100Hz	< 20Hz	20-100Hz	> 100Hz
Methode												
FDM				3	2	1	3	2	1	3	2	1
FVM				3	2	1	3	2	1	3	2	1
FEM	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1
SFEM	2	2	1	2	1	1	2	1	1	2	2	1
Superelement	3	3	2	3	3	2	3	2	1	3	2	1
Rigid body	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
BEM	2	1	1	2	1	1	4	3	2	3	2	1
Halfspace				4	4	4	4	4	4			
SEA	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Raytracing							4	3	3			
Barkan							5	5	5			
Equiv. Ijnkraft	5	5	5	5	5	5						

Bijlage C – Kruistabel

Deel 1

model	deelsystemen						enduser							
	trein	interactie	baan	interactie	bodem	interactie	fundering	screening	reeds beschikbare input	bestaand/ gewijzigd	nieuw	maatregel effect (nvt voor screening)	Bureau-onafhanke lijk	meetbare output
end2end-empirische aanpak								ja	actie nodig om database Vmax(trein,baan,bodem, gebouw) op te bouwen vraagt in principe a·b·c·d-etc. metingen	ja	ja	nee, niet echt	ja, mits vaste database en duidelijke "mapping"-regel	ja
modulair-empirische aanpak								ja	actie nodig om database van bronsterktes, overdrachten en interactiefactoren op te bouwen vraagt in principe a+b+c+d+etc. metingen	ja	ja	ja, alleen voor bestaande maatregelen	ja, mits vaste database en duidelijke "mapping"-regel	ja
VibraDyna								ja, voor bedoeld	database beschikbaar maar van onbekende kwaliteit en nog niet gestructureerd	ja	ja	standaard-maatregelen, maatwerk gebeurt buiten model met FEM	nu: niet, beoogd: wel	ja
SRM-T (modulair)								ja, voor bedoeld	database beschikbaar van berekende data, bedoeld om te vullen met gemeten waardes, is gedeeltelijk uitgevoerd	ja	ja	ja, voor bedoeld actie nodig om te implementeren	ja, mits duidelijker "mapping"-regel	ja
NVM en VIBRA (modulair)								ja, voor bedoeld	alleen voor Denemarken resp. Zwitserland, actie nodig voor NL	ja	ja	onbekend	ja, mits duidelijker "mapping"-regel	ja
DC-Viran								ja, voor bedoeld	ja	ja	ja	ja	ja, mits duidelijker "mapping"-regel	ja
Lissabon (regressie) en Edinburg-Mons (neuraal)								ja, voor bedoeld	alleen voor die landen, actie nodig voor NL	ja	ja	nee	ja	ja

model	deelsystemen							enduser						
Barkan										ja	ja	nee	ja, mits vaste database en duidelijke "mapping"-regel	ja
GeoVibration en Arcadis-Fugro en Momfer (meting+Barkan+gebouwfactor)								ja, in combinatie met metingen	ja	ja	ja	nee	ja, mits duidelijker "mapping"-regel	ja
Bever								ja	ja	ja	ja	ja	ja, mits duidelijker "mapping"-regel	ja
FEM etc.								wel bij bepaalde andere bronnen, in de vorm van 7 vaste bodem-overdrachten	actie nodig om database te bouwen	ja	ja	ja	ja (mits duidelijker mapping) indien vaste modelsjablonen neen indien geen sjablonen	ja
FEM-BEM Leuven								ja mits invoerdatabase beschikbaar komt	actie nodig om database te bouwen	ja	ja	ja	nee	ja
PIP								ja	actie nodig om database te bouwen	ja	ja	ja	nee	ja
TRINT (opvolger: Travist)								ja mits invoerdatabase beschikbaar komt	ja, maar update nodig	ja	ja	ja	ja (mits duidelijker mapping)	ja, maar niet makkelijk (model eindigt op interface)

dit deelsysteem zit in het rekenmodel
dit deelsysteem zit niet in het rekenmodel

voldoet
betreft wens, geen eis, dus niet beoordeeld

voldoet niet
voldoet deels niet

actie nodig
voldoet deels

Deel 2

model	leaduser								kwaliteit					
	treintype	treinsnelheid	treinfreq	Bovenbouwtype	onderbouwtype	wissels, etc.	Bodemgesteldheid		robuustheid	resolutie	Validatie	Verificatie	Transparantie	Betrouwbaarheid
end2end-empirische aanpak	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja		altijd ok	Problema-tisch (vraagt zeer grote database)	via bootstrapping database metingen	in feite niet nodig	slecht (in feite black box): computer doet interpolatie	hoe groter de database hoe beter
modulair-empirische aanpak	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja		altijd ok	problematisch (vraagt grote database)	via bootstrapping database metingen	interactie tussen modules dienen geverifieerd	redelijk goed: per onderdeel een database	naast grootte database hangt dit vooral af van hoe de interface tussen modules is geregeld
VibraDyna	ja	ja	ja	ja	Extern, via FEM	ja	ja		altijd ok	?	niets gepubliceerd, moet nog gebeuren	niets gepubliceerd, moet nog gebeuren	beschrijving ontoereikend	laag, vanwege onzekerheid over kwaliteit empirie
SRM-T (modulair)	ja, niet compleet	ja	ja	ja	ja	nee	ja		ok	geoptimaliseerd (bijv.: 3 treinsnelheden)	nee, was ooit gepland, moet nog gebeuren	ja, o.a. met analytisch model	methode redelijk beschreven, huidige database niet	Volgens toepassing "wonen langs het spoor": gemiddeld een goede voorspeller maar bij hoge niveaus mogelijk overschattend
NVM en VIBRA (modulair)	Buitenlandse types	ja	ja	ja	ja	ja	ja, buitenlandse bodems		altijd ok	?	ja	ja	methode redelijk beschreven	laag, vanwege onzekerheid over kwaliteit empirie
DC-Viran	ja, niet compleet	ja	ja	ja	ja	nee	ja		nee	ja	ja (behalve treinmodule)	ja	ja, uitgebreid in rapporten beschreven	redelijk
Lissabon (regressie) en Edinburg-Mons (neuraal)	buitenlandse types	ja	ja	ja	ja	?	ja, buitenlandse bodems		ok	geoptimaliseerd	niet, voorzover bekend	alleen intern	methodes redelijk beschreven, resulterend model is een black box	laag, vanwege onzekerheid over kwaliteit empirie en of de empirie voldoende "omsluitend" is

model	leaduser								kwaliteit					
	nvt	nvt	nvt	nvt	nvt	nvt	ja		nee	ja	ja, aandachts- punten bij gelaagde bodem zijn bekend	ja, aandachts- punten bij gelaagde bodem zijn bekend	ok	redelijk
Barkan	nvt	nvt	nvt	nvt	nvt	nvt	ja		nee	ja	ja, aandachts- punten bij gelaagde bodem zijn bekend	ja, aandachts- punten bij gelaagde bodem zijn bekend	ok	redelijk
GeoVibration en Arcadis-Fugro en Momfer (meting+Barkan+ gebouwfactor)	nvt	nvt	nvt	nvt	nvt	nvt	ja		?	?	?	?	beschrijving ontoe- reikend	laag, vanwege onzekerheid over kwaliteit empirie
Bever	nvt	nvt	nvt	nvt	nvt	nvt	ja		ja	ja	ja, voor BR	vergeleken met VROM model	niet	redelijk
FEM etc.	nee	nee	nee	ja	ja	nee	ja		nee	ja			ok	prima
FEM-BEM Leuven	Buiten- landse types	ja	nee	ja	ja	?	ja, maar niet teveel lagen		nee	ja	ja, en binnenkort opnieuw		ja, uitgebreid in lit beschreven	redelijk
PiP	buiten- landse types	ja	nee	ja	alleen tun- nels	nee	alleen homo- gene bodem?		?	ja	?	?	ja, uitgebreid in lit beschreven	redelijk
TRINT (opvolger: Travist)	ja, update nodig	ja	ja	ja	ja	Trav ist wel	ja		nee	ja	gevalideerd in aantal projecten	geverifieerd in aantal projecten	ja, inhoudelijke handleiding + database beschikbaar	redelijk

voldoet
betreft wens, geen eis, dus niet beoordeeld

voldoet niet
voldoet deels niet

actie nodig
voldoet deels

Deel 3

model	fysica, bron				fysica, interacties/invloeden							
	Spoor- geometrie	wissels, overgangen	moving load	variatie in en over passages	trein op bron	baan op bron	baanmaatregel en op bron	bodem op bron	bodemgesteld heid op overdracht	geometrie op overdracht	Bodemmaat- regelen op overdracht	fundering en draag- constructie op overdracht
end2end- empirische aanpak	ja	ja	ja	ja	ja	ja	impliceert metingen aan maatregelen, anders via ander model	ja	ja	ja, dus meer- dere afstande n meten	impliceert metingen aan maatregelen, anders via ander model	ja
modulair- empirische aanpak	ja	ja	ja	ja	ja, maar indien hier interface dan interactie- factor nodig	ja, maar indien hier interfac e dan interacti e-factor nodig	impliceert metingen aan maatregelen, anders via ander model	ja, maar indien hier interface dan interactie- factor nodig	ja	ja, via Barkan bijv.	impliceert metingen aan maatregelen, anders via ander model	ja, maar indien hier interface dan interactie- factor nodig
VibraDyna	ja	ja	ja	ja	ja	ja	gaat extern via FEM oid	ja	ja	ja, via Barkan	gaat extern via FEM oid	ja
SRM-T (modulair)	ja	nee	ja	ja	ja, aantal treintypes beschik- baar	ja, aantal baantypes beschik- baar	nee	ja, interactie- term be- schikbaar	ja, 7 bodems beschik- baar	ja	nee	nee
NVM en VIBRA (modulair)	ja	?	nee	ja	ja	ja	?	nee	ja	ja	?	ja
DC-Viran	ja	nee	ja	in pas sa ges	ja	nee, wel baan op overdra cht	ja	nee	ja	ja	nee, alleen een sleuf	fundering niet

model	fysica, bron					fysica, interacties/invloeden							
	Lissabon (regressie) en Edinburg-Mons (neuraal)	ja	?	in principe wel maar treedt niet echt op in die landen		ja		ja	ja	?	ja	ja	ja
Barkan	nvt	nvt	nvt	nvt		nvt	nvt	nvt	nvt	ja	ja	nee	nee
GeoVibration en Arcadis-Fugro en Momfer (meting+Barkan+gebouw-factor)	nvt	nvt	nvt	nvt		nvt	nvt	nvt	nvt	ja	ja	nee	ja
Bever	nvt	nvt	nvt	nvt		nvt	nvt	nvt	nvt	nee	nee	nee	ja, is focus
FEM etc.	nee	nee	ja	ja		indien trein in model	indien gecombineerd met treinmodel	indien gecombineerd met treinmodel	indien gecombineerd met treinmodel	ja	ja	ja	ja
FEM-BEM Leuven	ja	nee	nee	ja		ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nee
PiP	ja	nee	nee	ja		ja	ja	ja	ja	ja	ja	?	?
TRINT (opvolger: Travist)	ja	Travist	ja	ja		ja	ja	ja	ja	nvt	nvt	nvt	nvt

voldoet
betreft wens, geen eis, dus niet beoordeeld

voldoet niet
voldoet deels niet

actie nodig
voldoet deels

Deel 4

model	beoordeling			
	geschiktheid nu	haalbaarheid voor scenario	score (geschikt x haalbaar)	in scenario gebruiken?
end2end- empirische aanpak	2	2	4	
modulair- empirische aanpak	3	3	9	
VibraDyna	4	4	16	ja
SRM-T (modulair)	3	5	15	ja
NVM en VIBRA (modulair)	2	3	6	
DC-Viran	2	4	8	
Lissabon (regressie) en Edinburg-Mons (neuraal)	1	4	4	
Barkan	3	3	9	
GeoVibration en Arcadis-Fugro en Momfer (meting+Barkan+gebouwfactor)	2	2	4	
Bever	4	5	20	ja (alleen gebouw)
FEM etc.	5	4	20	ja
FEM-BEM Leuven	3	4	12	
PiP	4	1	4	
TRINT (opvolger: Travist)	3	4	12	

minimaal haalbaar	1	1	1
maximaal haalbaar	5	5	25

Bijlage D – Literatuurscan, shortlists

Er zijn twee shortlists van publicaties. Deze zijn het resultaat van een geautomatiseerde scan aangevuld met een handmatige selectie. De eerste langere lijst bevat "relevante en zeer interessante" publicaties. De tweede, kortere lijst bevat "overige relevante" publicaties. De weergegeven samenvattingen zijn afkomstig van de oorspronkelijke publicaties.

Anish, K. P., et al. (2015). *An impedance model approach to predicting train-induced vibrations in buildings C3 - Structures Congress 2015 - Proceedings of the 2015 Structures Congress, American Society of Civil Engineers (ASCE)*.

In major cities around the world, urbanization and rising land prices have been driving an increase in real estate development adjacent to, and above in many cases, railway lines and other transportation corridors. Structure-borne sound and vibrations from traffic can be annoying to human occupants; if high, they can also be disruptive to operation of manufacturing facilities, medical facilities, and research laboratories. As awareness of structure-borne sound and vibration issues grow among owners, designers, and building occupants, there is a corresponding increase in demand for cost effective sound and vibration predictions and mitigation. This research describes the development and verification of an analytical model of vibration transmission in an existing four-story building in Boston that is based on the floor and column impedances where they are attached. Using geometric properties, the authors defined the dynamic behavior of the test structure in terms of column impedances (modeled as finite, wave propagating rods) and floor impedances (modeled as energy dissipating, infinite plates). Researchers performed impact hammer tests as means of verifying the floor impedances, and also collected shaker and train-induced vibration measurements near the test column. The authors highlight several aspects of this modeling approach, and discuss the effectiveness of using this approach to predict the vibration response of buildings subject to ground-borne vibrations.

Auersch, L. and S. Said (2015). "Comparison of different dispersion evaluation methods and a case history with the inversion to a soil model, related admittance functions, and the prediction of train-induced ground vibration." *Near Surface Geophysics* **13**(2): 127-142.

Ground vibrations due to different technical sources are analysed in theory and experiment for the dispersion of Rayleigh waves and the admittance spectra. Both tasks are theoretically based on the same concept: The admittance function in frequency-wavenumber domain yields the dispersion as its maxima, and the admittance function in space domain is obtained by integrating it over the wavenumbers. On the experimental side, many signal processing methods have been applied to many sites and have been developed by the authors in the last 35 years, i.e., time-domain methods, including the cross-correlation method, and frequency-domain methods such as the spectral analysis of surface waves with two or multiple sensors, the

wavenumber-transform method, and the spatial autocorrelation method. All methods are presented by their basic formula and by at least one example site. Different sensor arrays and deterministic and stochastic sources have been tested for the spatial autocorrelation method and the wavenumber-transform method at several sites. In addition, all frequency-domain methods are presented for a specific layered site comparing their quality. The evaluated dispersion curves are very similar, but a somewhat higher frequency range has been found for the fastest method, i.e., the multi-sensor spectral-analysis-of-surface-waves method. The theoretical solutions have been used for the inversion of the measured dispersion to the soil profile of the specific layered soil. The theoretical soil model has subsequently been used to predict the ground vibration spectra of hammer and railway excitation that exhibit a good agreement with the corresponding measurements. Thus, the contribution shows the benefit of active and passive seismic methods for the prediction of railway vibration, including a new version of the spatial autocorrelation method for technical vibrations. On the other hand, technical and namely railway vibrations are considered a seismic source for the exploration of near surface soils. © 2015 European Association of Geoscientists & Engineers.

Connolly, D. P., et al. (2014). "Assessment of railway vibrations using an efficient scoping model." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **58**: 37-47.

Vibration assessments are required for new railroad lines to determine the effect of vibrations on local communities. Low accuracy assessments can significantly increase future project costs in the form of further detailed assessment or unexpected vibration abatement measures. This paper presents a new, high accuracy, initial assessment prediction tool for high speed lines. A key advantage of the new approach is that it is capable of including the effect of soil conditions in its calculation. This is novel because current scoping models ignore soil conditions, despite such characteristics being the most dominant factor in vibration propagation. The model also has zero run times thus allowing for the rapid assessment of vibration levels across rail networks. First, the development of the new tool is outlined. It is founded upon using a fully validated three dimensional finite element model to generate synthetic vibration records for a wide range of soil types. These records are analysed using a machine learning approach to map relationships between soil conditions, train speed and vibration levels. Its performance is tested through the prediction of two independent international vibration metrics on four European high speed lines and it is found to have high prediction accuracy. A key benefit from this increased prediction accuracy is that it potentially reduces the volume of detailed vibration analyses required for a new high speed train line. This avoids costly in-depth studies in the form of field experiments or large numerical models. Therefore the use of the new tool can result in cost savings. © 2013 Elsevier Ltd.

Connolly, D. P., et al. (2014). "Scoping prediction of re-radiated ground-borne noise and vibration near high speed rail lines with variable soils." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **66**: 78-88.

This paper outlines a vibration prediction tool, ScopeRail, capable of predicting in-door noise and vibration, within structures in close proximity to high speed railway lines. The tool is designed to rapidly predict vibration levels over large track distances, while using historical soil information to increase accuracy. Model results are compared to an alternative, commonly used, scoping model and it is found that ScopeRail offers higher accuracy predictions. This increased accuracy can potentially reduce the cost of vibration environmental impact assessments for new high speed rail lines. To develop the tool, a three-dimensional finite element model is first outlined capable of simulating vibration generation and propagation from high speed rail lines. A vast array of model permutations are computed to assess the effect of each input parameter on absolute ground vibration levels. These relations are analysed using a machine learning approach, resulting in a model that can instantly predict ground vibration levels in the presence of different train speeds and soil profiles. Then a collection of empirical factors are coupled with the model to allow for the prediction of structural vibration and in-door noise in buildings located near high speed lines. Additional factors are also used to enable the prediction of vibrations in the presence of abatement measures (e.g. ballast mats and floating slab tracks) and additional excitation mechanisms (e.g. wheelflats and switches/crossings). © 2014 Elsevier Ltd.

Gjelstrup, H., et al. (2016). "Probabilistic empirical model for train-induced vibrations." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings* **169**(8): 563-573.

A novel model for predicting railway-induced vibrations nuisance and structure-borne noise in nearby dwellings exposed to railway-traffic is described in this paper. The model is based on partitioning the transmission path from the railway to a building into different steps through the track system, ground, foundation and building – each characterised by a probabilistic approach towards adding frequency response functions obtained by statistical analysis of measurements obtained at various locations passed by the most common train types. The model output consists of an estimate of the acceleration level at a particular building floor, an estimate of the associated error and an estimate of the structure-borne noise level. The main new feature of the proposed approach in relation to existing empirical formulations is the probabilistic framework undertaken to estimate model errors as a function of the quality of the measured data and of the mathematical formulation developed to predict railway-induced vibration and noise levels. The paper first describes the general model formulation considered. Details of the measurement campaigns along with the associated data analyses for model development are then described. Finally, the mathematical formulation for calculating the model output is presented, and a comparison between model-based predictions and measurements is carried out to assess the performance of the model. © ICE Publishing: All rights reserved.

Hunt, H. E. M., et al. (2010). *Ground-borne vibration from underground railways: Some commonly-made modelling assumptions and their associated inaccuracies and uncertainties C3 - Proceedings of the Institute of Acoustics.*

Jia, P. F. and A. W. Yang (2013). A modified Davidenkov model for stiffness and damping characteristics of saturated clayey soils due to low-amplitude small-strain vibrations C3 - *Advanced Materials Research*. **680**: 166-171.

Railway track and nearby structures in the vicinity of high-speed railway are exposed to low-amplitude small-strain vibrations as high-speed railway traffic construction activities arise. These low-level dynamic events can lead to a non-linear softening behavior of the "elastic" stiffness and a considerable amount of energy dissipation in soils with a gradually increasing strain. The modelling of these non-linear behaviours are an important to predict lifetime and serviceability of existing structures in the vicinity of high-speed railway. An objective of this study is to develop validated computational models that can be used to perform stiffness and damping characteristics of saturated clayey soils due to low-amplitude small-strain vibrations. This paper provides an insight in the normalized shear modulus G/G_{max} and damping ratio D in relation with shear strain amplitude γ through free-vibration column test, and proposes a modified Davidenkov model. © (2013) Trans Tech Publications, Switzerland.

Koroma, S. G., et al. (2015). *A mixed space-time and wavenumber domain model for predicting ground vibration from railway tracks C3 - COMPDYN 2015 - 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, National Technical University of Athens.

In this paper, a mixed model for studying ground vibration generated from surface railway tracks is presented. A ballasted track with nonlinear resilient components is modelled in the time domain using the Finite Element method. The ground is modelled as a linear homogeneous half-space in the wavenumber domain for faster computation. The interaction between the track and the ground is incorporated into the track model through a lumped parameter model representing the vertical dynamic stiffness of the ground. The coefficients of the components of the lumped parameter model are obtained by curve fitting of the transfer function of the half-space for a load applied at its origin. The coupled equation of motion for the track/ground system is formulated with excitation from a stationary point load-consisting of static and dynamic parts acting at the centre of the rail. The coupled equation is solved by numerical integration. The calculated interaction forces at the ballast/ground interface from the space-time domain track model are Fourier transformed to the wavenumber domain and used as excitation to the ground model in order to calculate free-field surface vibration of the ground. Results are presented for the vertical dynamic stiffness for the ground, and for the track and ground displacement in the vicinity of the track and in the free-field. A comparative study between the mixed formulation with the lumped parameter model for the ground, and a fully coupled wavenumber domain model is conducted for linear parameters.

Using the fully coupled model as a benchmark, it is observed that the inclusion of the lumped parameter ground model in the track model gives good estimation of the transmitted forces, and hence ground vibration, both in the near and far fields. Finally, the effect of nonlinear track components is briefly investigated for different levels of static preload.

Kouroussis, G. and O. Verlinden (2015). "Prediction of railway ground vibrations: Accuracy of a coupled lumped mass model for representing the track/soil interaction." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **69**: 220-226.

Recent advances in railway-induced ground vibrations showed that the track/soil interaction plays an important role in the low frequency range. This paper contributes to the numerical analysis of train/track/foundation dynamics by presenting the accuracy of a coupled lumped mass (CLM) model devoted to the railway foundations and to the track/soil coupling. Following a summary of the background and the advantages of the CLM model, the coupling strategy is quantified through two application cases. Firstly, the dynamic track deflection is calculated for different railway lines considering various degrees of complexities of foundations. Then, the foundation responses are compared depending on whether detailed coupling is introduced or not. The benefit of the proposed model is emphasized by presenting free-field ground vibration responses generated by a tram and a high-speed train, obtained by a revisited two-step prediction model developed by the authors. © 2014 Elsevier Ltd.

Lombaert, G., et al. (2014). "Quantification of uncertainty in the prediction of railway induced ground vibration due to the use of statistical track unevenness data." *Journal of Sound and Vibration* **333**(18): 4232-4253.

Environmental vibrations due to railway traffic are predominantly due to dynamic axle loads caused by wheel and track unevenness and impact excitation by rail joints and wheel flats. Because of its irregular character, track unevenness is commonly processed statistically and represented by its power spectral density function or its root mean square (RMS) value in one-third octave bands. This statistical description does not uniquely define the track unevenness at a given site, however, and different track unevenness profiles matching the statistical description will lead to different predictions of dynamic axle loads and resulting ground vibration. This paper presents a methodology that allows quantifying the corresponding variability in ground vibration predictions. The procedure is derived assuming the geometry of the track and soil to be homogeneous along the track. The procedure is verified by means of Monte Carlo simulations and its usefulness for assessing the mismatch between predicted and measured ground vibrations is demonstrated in a case study. The results show that the response in time domain and its narrow band spectrum exhibit significant variability which is reduced when the running RMS value or the one-third octave band spectrum of the response is considered. © 2014 Elsevier Ltd.

Lopes, P., et al. (2016). "Vibrations inside buildings due to subway railway traffic. Experimental validation of a comprehensive prediction model." *Science of the Total Environment*.

The present paper focuses on the experimental validation of a numerical approach previously proposed by the authors for the prediction of vibrations inside buildings due to railway traffic in tunnels. The numerical model is based on the concept of dynamic substructuring and is composed by three autonomous models to simulate the following main parts of the problem: i) generation of vibrations (train-track interaction); ii) propagation of vibrations (track-tunnel-ground system); iii) reception of vibrations (building coupled to the ground). The experimental validation consists in the comparison between the results predicted by the proposed numerical model and the measurements performed inside a building due to the railway traffic in a shallow tunnel located in Madrid. Apart from the brief description of the numerical model and of the case study, the main options and simplifications adopted on the numerical modeling strategy are discussed. The balance adopted between accuracy and simplicity of the numerical approach proved to be a path to follow in order to transfer knowledge to engineering practice. Finally, the comparison between numerical and experimental results allowed finding a good agreement between both, fact that ensures the ability of the proposed modeling strategy to deal with real engineering practical problems. © 2015 Elsevier B.V.

Lurcock, D. E. J. and D. J. Thompson (2014). *Predicting groundborne railway noise and vibration in buildings: A comparison of measurements and methods C3 - Proceedings of the Institute of Acoustics*, Institute of Acoustics.

Mueller, R. and A. Ziegler (2010). *Validation of prediction methods for vibration and groundborne noise of railways C3 - 39th International Congress on Noise Control Engineering 2010, INTER-NOISE 2010*.

In Switzerland limit values of vibration and groundborne noise have to be respected for existing and new railway lines. Two Swiss prediction tools (VIBRA-1/-2, multilingual and used for different European standards) have been validated according to ISO 14837 and the Swiss directive. VIBRA-1 is a simple empirical model and VIBRA-2 a semi-empirical model based on source- and transfer-spectra (1/3rd octave). SBB also validated a new Swiss method (EMBE) to predict groundborne noise from floor-vibration and a method with artificial source to predict tunnel vibration. The main results are as follows: For both VIBRA-1 and -2 an accuracy of about factor 2 (6 dB) could be calculated in case of vibration. For groundborne noise the partial EMBE-method showed an accuracy of about factor 1.6 (4 dBA) and the VIBRA-1 method showed an accuracy of about factor 2 (6 dBA), so far the groundborne noise validation for VIBRA-2 is not yet performed. It can be concluded that VIBRA-1 and VIBRA-2 fulfil the requirements for "simple" prediction models and are suitable for a widespread use. Additionally, the EMBE-method appears suited for calculating groundborne noise from floor vibrations on open lines instead of groundborne noise measurements. The artificial source method for defining tunnel transmission spectra seems only promising if further systematic investigations are performed.

Nielsen, J. C. O., et al. (2015). "A hybrid model for prediction of ground-borne vibration due to discrete wheel/rail irregularities." *Journal of Sound and Vibration* **345**: 103-120.

A hybrid model for the prediction of ground-borne vibration due to discrete wheel and rail irregularities, such as wheel flats, dipped welds and insulated rail joints, is presented. The hybrid model combines the simulation of vertical wheel-rail contact force in the time domain, accounting for parametric excitation due to sleeper periodicity and impact excitation induced by loss of wheel-rail contact, and calculation of ground-borne vibration in the frequency-wavenumber domain considering a layered soil model. The model is demonstrated by investigating the influence of wheel flat size and vehicle speed on maximum vertical wheel-rail contact force and free field ground vibration. It is shown that magnitudes of impact load and ground vibration are increasing with increasing wheel flat length (and depth), but the influence of vehicle speed is not as evident. Higher vehicle speeds often lead to loss of wheel-rail contact and severe impact loads but the frequency content of such impact loads is shifted to higher frequencies which may be less significant for ground vibration. © 2015 Elsevier Ltd.

Paneiro, G., et al. (2015). "Prediction of ground vibration amplitudes due to urban railway traffic using quantitative and qualitative field data." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **40**: 1-13.

The growth of railway transport in urban areas has led to an increase in ground vibrations enhancing their negative environmental impact. Therefore is mandatory to predict and control ground vibrations. This work presents a methodology for the determination of prediction models of ground vibration amplitudes due to railway train circulation in urban environments. Using quantitative predictors (train speed and distance) and qualitative predictors (railway track type, dominant geology and building type), being the use of the latter predictors justified by the fact that, most frequently, quantitative parameters are very difficult to obtain in the urban environment due to their characterization. Thus, a detailed statistical study based on the proposal and validation of multiple linear regression models, is successfully applied in order to predict vibration amplitudes produced by railway train circulation, in the considered domain, as function of quantitative and qualitative predictors, easily obtained in field work. A multiple linear regression model for ground vibration prediction due to underground railway traffic has been presented for the Lisbon area. © 2015 Elsevier Ltd.

Real, J. I., et al. (2013). "Railway traffic induced vibrations: Comparison of analytical and finite element models." *Journal of Vibroengineering* **15**(4): 1701-1710.

The recent increase in the use of the railway and the establishment of more restrictive policies of harmful environmental effects of railway transport highlights the need to investigate ground vibrations related to trains. Therefore models to evaluate how this phenomenon affects have been performed. This article aims to expose both analytical and 3D-FE models and to compare theoretical formulation and results. Models have been calibrated and validated with real data. Furthermore, a simulation of the acceleration level of different

railway infrastructure elements has been achieved. ©
Vibroengineering.

Thompson, D. (2014). *Railway noise and vibration: The use of appropriate models to solve practical problems C3 - 21st International Congress on Sound and Vibration 2014, ICSV 2014*, International Institute of Acoustics and Vibrations.

Railways are an environmentally friendly means of transport that offer many advantages for sustainable development. However, noise and vibration remain a major reason for objections to new lines or network expansions. Railways will never be silent but, it is nevertheless important to reduce their noise and vibration as much as possible while not adding unnecessary cost or complication to their construction and operation. To achieve this it is essential to understand the sources of noise and vibration and the parameters that can influence them in order to propose cost-effective mitigation measures. Theoretical models are an important part of this process. Such models should be of sufficient detail to cover the most relevant parameters in a reliable way, but not over-complicated in order not to lose insight. This approach of developing appropriate models for the purpose of designing mitigation measures is illustrated through several examples related to rolling noise, aerodynamic noise and ground vibration.

Verbraken, H., et al. (2012). Verification of an empirical prediction method for railway induced vibration. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. **118**: 239-247.

The Detailed Vibration Assessment is an empirical procedure developed by the U.S. Federal Railroad Administration (FRA) for the prediction of railway induced vibration and re-radiated noise. The vibration velocity level in the free-field is predicted with a force density, characterizing the source, and a line transfer mobility, characterizing the transfer of vibration due to a line load. The line transfer mobility is determined with in situ measurements of transfer functions. The force density is obtained by subtracting the line transfer mobility from the vibration velocity level due to a train passage. It is assumed that the resulting force density can be used to predict the vibration velocity level at other sites with similar train and track characteristics. In this paper, the influence of the soil characteristics on the force density and the resulting vibration velocity level predicted with the FRA procedure is investigated. Numerical simulations are used to compute the vibration velocity level and the line transfer mobility at three sites with different soil characteristics. From these results, the force density due to a train passage is determined for each site. Finally, the three force densities are used to investigate the influence of the soil characteristics on the predicted vibration velocity level due to a train passage. © 2012 Springer.

De rest van de relevante literatuur:

Alexandrou, G., et al. (2014). "Modelling the effect of wheel flat on railway-induced ground vibrations." *Civil-Comp Proceedings* **104**.

One of the most important irregularities in low speed trains is a flat on a wheel of the vehicle since it can cause large dynamic impact forces. The first part of this paper aims to investigate the behaviour of the wheel-rail contact when the wheel has a flat irregularity and travels with constant speed. The modelling of wheel-rail interface has been done using a non-linear Hertzian contact. The second part of the study attempts to model the effects of the wheel flat on railways-induced ground vibration by employing a prediction scheme based on a two-step approach. The first subproblem concerns the interaction between the vehicle and the track. Results of the simulation, more specifically the ballast reactions, are used in a second subproblem where the free field ground response is computed using a full 3-D finite/infinite model of soil under the commercial software ABAQUS. Various analyses were conducted for different vehicle speeds and sizes of the wheel flat on the case of T2000 tram in Brussels. Results of the study showed that a small wheel flat can affect significantly the impact forces transferred to the ground even at low speeds. © Civil-Comp Press, 2014.

Alexandrou, G., et al. (2015). "A comprehensive prediction model for vehicle/track/soil dynamic response due to wheel flats." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* **230**(4): 1088-1104.

With the development of new lines and the increase of traffic on existing lines, the problem caused by railway-induced ground vibrations is becoming bigger and bigger. The present paper focuses on wheel flat modelling in prediction schemes which determine railway-induced ground vibrations and which have applications to urban tramways. A comprehensive flat spot model is developed and included in an existing vehicle/track model taking into account Hertz's contact law. The associated non-linear stiffness is calculated in a pre-processing step by solving the three-dimensional wheel/rail contact problem. A two-step approach for predicting ground vibrations, developed by the authors, is then applied, including the track/soil interaction through a foundation model and the ground wave propagation by means of a fully three-dimensional finite element model. Predicted results are presented, based on the T2006 tram and on the railway site of Haren (Belgium). A specific analysis is proposed for studying the vehicle dynamics on flexible tracks, and for calculating the effect provided by the wheel flat impact on the rail heads. Results related to the contact force between the wheel with a flat spot and the rail are presented. A series of periodic impacts are generated when the flat spot comes into contact with the rail head with magnitude depending on the track flexibility at the contact point. The key conclusions are discussed, based on the sensitivity analysis of the flat spot size and the train speed. Both parameters affect the critical speed of the vehicle/track system, defined as the speed where loss of contact occurs. The ground vibration levels were found to increase with speed and decrease with distance. © 2015 Institution of Mechanical Engineers.

Alves Costa, P., et al. (2016). "Prediction of vibrations due to underground railway traffic through a 2.5 D MFS-FEM approach." *Civil-Comp Proceedings* **110**.

Engineering problems involving soil vibration generated by transportation means have received particular attention from researchers, attempting to accurately reproduce field conditions and to predict the vibrational effects of trains or road vehicles. The particular case of vibration from underground trains is quite complex as a result of the vast dimensions of the domain. However, since the tunnel can be seen as a longitudinally invariant structure, a two and half dimensional approach can be applied, minimizing the computational requirements without losing the three-dimensional character of the problem. Following that approach, a global numerical strategy that allows simulating the vehicle-track-tunnel-soil interaction is proposed here. Tunnel-soil interaction is accounted by coupling the finite element method and the method of fundamental solutions, and this model can be then linked with a train-track interaction model, enabling simulation of the complete process of vibration propagation from the vehicle to the soil. The model is verified against reference solutions, and its application is illustrated for a practical engineering problem. The presented results indicate that the method can be accurate and quite competitive, when compared with other currently available models. © Civil-Comp Press, 2016.

Alves Costa, P., et al. (2011). *Experimental validation of a 2.5D FEM-BEM model for the assessment of vibrations induced by traffic C3 - ECCOMAS Thematic Conference - COMPDYN 2011: 3rd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering: An IACM Special Interest Conference, Programme.*

This paper presents two main parts, encompassing the experimental assessment and the numerical modelling of vibrations induced by railway traffic. Firstly, a global description of an experimental trial field developed in the Portuguese railway network is presented. In that trial field several tests were performed in order to obtain a reasonable mechanical characterization of the main elements involved in the process of generation and propagation of waves induced by traffic. So as to reach the proposed goal, a geotechnical characterization campaign was performed, including crosshole tests and specific tests to estimate the ground damping properties. Concerning the track properties, receptance tests and a campaign of measurement of irregularities were conducted. After the global characterization of the site and of the track, vibrations induced by the railway traffic were then measured both in the railway track and in the free-field. The results of the tests are used in the validation of a 2.5D FEM/BEM model developed by the authors. The model fully accounts for the dynamic interaction between the train, the track and the layered ground. The railway track and embankment, assumed to be invariant in the longitudinal direction, are modelled with 2.5D finite elements [1]. On the other hand, the layered ground below the embankment is simulated by a 2.5D boundary elements formulation. This formulation allows an efficient solution of the track-ground dynamic interaction problem in the frequency-wavenumber

domain, as recently explained by François et al. [2]. Regarding the modelling of the rolling stock, a multi-body model is adopted, where the main masses and suspensions of the train are incorporated. The study, involving experimental and numerical techniques, revealed to be very useful, allowing not only the experimental validation of the numerical model proposed by the authors, but also a deep understanding of the influence of several aspects who determine the problem's solution.

Alves Costa, P., et al. (2012). "Track-ground vibrations induced by railway traffic: In-situ measurements and validation of a 2.5D FEM-BEM model." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **32**(1): 111-128.

The first part of the paper includes a brief presentation of a 2.5 D FEM-BEM model, developed by the authors, which is able to lead with problems of vibrations induced by traffic including the train-track dynamic interaction. Then a global description of a test site developed on a stretch of the Portuguese railway network is presented. In that test site, several experiments were performed in order to obtain an appropriate mechanical characterization of the main elements involved in the process of generation and propagation of waves induced by traffic. After the characterization of the ground and the track, the vibrations induced by railway traffic were measured both on the railway track and on the free-field. Finally, some predicted results, obtained by the proposed numerical model, are compared with the measurements. The study performed reports the validation of the model proposed by the authors and, consequently, provides a deep understanding of the influence of several aspects which determine the solution to the problem. © 2011 Elsevier Ltd.

Amado-Mendes, P., et al. (2015). "2.5D MFS-FEM model for the prediction of vibrations due to underground railway traffic." *Engineering Structures* **104**: 141-154.

Vibrations induced by underground railway traffic have been receiving special attention from the technical and scientific communities, and different models for their prediction can be found in the literature. Since the tunnel can be seen as a longitudinally invariant structure, a 2.5D approach can be applied, minimizing the computational requirements without losing the 3D character of the problem. A global numerical strategy that allows simulating the vehicle-track-tunnel-soil interaction is proposed here. Tunnel-soil interaction is accounted by coupling the Finite Element Method and the Method of Fundamental Solutions. This model is then linked with a train-track interaction model, allowing to simulate the complete process of vibration propagation from the vehicle to the soil. The model is verified against reference solutions, and its application is illustrated for a practical engineering problem. The presented results indicate that the method can be quite accurate and competitive, when compared with other currently available models. © 2015 Elsevier Ltd.

Askarinejad, H. and M. Dhanasekar (2015). "A Multi-Body Dynamic Model for Analysis of Localized Track Responses in Vicinity of Rail Discontinuities." *International Journal of Structural Stability and Dynamics*.

Rail discontinuities are one of the main sources of wheel impact causing high levels of noise, vibration and stresses in railway track. Even though various multi-body train-track interaction models have been developed in the past decade, accurate modeling and analysis of the track dynamic behavior in the vicinity of rail discontinuities is rare in the literature. In this paper, formulation of a new explicit multi-body dynamic (MBD) model incorporating detailed wagon, wheel-rail subsystems and track containing a rail discontinuity (rail joint) is reported. The predictions of the localized track responses are validated using the data from two gapped rail joints in the field test. The validated model accurately determines the impact forces and dynamic responses. The simulation results provide valuable insight on the behavior of track in vicinity of a rail discontinuity, the sensitivity of the design parameters to the impact forces and the track dynamic responses currently unavailable in the literature. © 2016 World Scientific Publishing Company

Auersch, L. (2010). "Building response due to ground vibration - Simple prediction model based on experience with detailed models and measurements." *International Journal of Acoustics and Vibrations* **15**(3): 101-112.

Construction work, such as pile driving and soil compaction, or road and railway traffic excite nearby buildings, and the perceptible or audible vibration can be a nuisance for nearby inhabitants. A simplified building model has been created for these situations, which includes the effects of soil-structure interaction, the low-frequency amplification along the height of the building as well as the high-frequency reduction and the floor resonances. The model consists of one wall for all supporting structures (walls and columns) and one floor for each storey. The effect of different floor resonance frequencies is included in a stochastic procedure. The soil is modelled by a spring and a viscous damper, and the free-field amplitudes of the soil are applied under this soil element. The model can be calculated by transfer matrices or in a continuous wave-type version where an analytical solution can be evaluated numerically. The building response in the high-frequency (acoustic) region is calculated as mean values over wider frequency bands. The approach to an infinite building model can be found for these high frequencies and the corresponding soil-structure transfer can be described by the ratio of impedances at foundation level. The rules for choosing the parameters to obtain realistic results are derived from complex calculations -for example, for the stiffness and damping of building foundations - and many measurements as for the damping of floor resonances. The influences on the floor resonance from the soil (damping) and the supporting structure (detuning) are important. Some more effects will be discussed by the simplified and detailed models and by measurements to establish a good understanding of ground-induced building vibrations.

Auersch, L. (2012). *Train induced vibration of inhomogeneous soils - A prediction based on measured and calculated point-load solutions C3 - 19th International Congress on Sound and Vibration 2012, ICSV 2012.*

Vehicle, track and ground vibration as well as their interaction are considered in a combined finite-element boundary-element (FEBEM) approach. The layered soil is calculated in frequency wavenumber domain and the solution for fixed or moving point or track loads follow as wavenumber integrals. The soil results from the measurements and the detailed models are approximated by simple formula which are used for the prediction of train-induced ground vibration. The influence of the track and the soil on the train induced ground vibration is analysed by the detailed models. The ground vibrations strongly depend on the regular and random inhomogeneity of the soil. The regular layering of the soil yields a cut-on and resonance phenomenon while the random inhomogeneity yields a scattering of the axle impulses which proved to be important for high-speed trains. The attenuation with distance of the ground vibration due to the point-like excitations such as vibrator or hammer excitations and the train-track excitation are investigated and compared. All theoretical results are compared with measurements at conventional and high-speed railway lines.

Auersch, L. (2014). "The use and validation of measured, theoretical, and approximate point-load solutions for the prediction of train-induced vibration in homogeneous and inhomogeneous soils." *International Journal of Acoustics and Vibrations* **19**(1): 52-64.

The layered soil is calculated in the frequency wavenumber domain and the solutions for fixed or moving point or track loads follow as wavenumber integrals. The resulting point load solutions can be approximated by simple formula. Measurements yield the specific soil parameters for the theoretical or approximate solutions, but they can also directly provide the point-load solution (the transfer function of that site). A prediction method for the train-induced ground vibration has been developed, based on one of these site-specific transfer functions. The ground vibrations strongly depend on the regular and irregular inhomogeneity of the soil. The regular layering of the soil yields a cut-on and a resonance phenomenon, while the irregular inhomogeneity seems to be important for high-speed trains. The attenuations with the distance of the ground vibration, due to point-like excitations such as vibrator, hammer, or train-Track excitations, were investigated and compared. All theoretical results were compared with measurements at conventional and high-speed railway lines, validating the approximate prediction method.

Auersch, L. (2015). *Realistic axle-load spectra for the prediction of ground vibrations from rail traffic C3 - 22nd International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2015, International Institute of Acoustics and Vibrations.*

Train passages induce static and dynamic forces on the track, the train-induced vibrations propagate through the soil and excite neighbouring buildings. The problem of train vibrations is divided into the parts emission, which is the excitation by railway traffic (the present contribution), transmission, which is the wave propagation

through the soil [1], and immission, which is the transfer into a building [2]. - The calculation of the axle loads are based on the vehicle-track-soil interaction. This interaction uses the dynamic stiffness of the vehicle (the inertia of the wheelset) and the dynamic stiffness of the track-soil system. Based on various time consuming finite-element boundary-element calculations, an approximate track-soil model has been established [3]. The vehicle-track-soil analysis yields several transfer functions between the various geometric or stiffness irregularities and the axle loads of the train. Geometric irregularities of the vehicle (the wheels) and the track (rail surface and track alignment) are the simplest components. Geometric irregularities of the subsoil (trackbed irregularities) have to be transferred to effective irregularities at rail level. The bending stiffness of the track is filtering out the short-wavelength contribution. Stiffness irregularities occur due to random variations in the ballast or the subsoil, which must also be transferred to effective track irregularities, and due to the discrete rail support on sleepers. The axle loads due to the effective track errors from stiffness variations have their specific vehicle-track transfer function. - All necessary formula for the prediction of axle-load spectra will be presented. The prediction method is compared with axle-box measurements at a standard ballasted track. Moreover, ground vibration measurements at numerous sites are exploited for the axle-load spectra and the validation of the prediction method.

Auersch, L. and M. Maldonado (2011). "Vehicle-track-soil interaction and train-induced ground vibration. Complex modelling and experimental verifications." *European Journal of Computational Mechanics* **20**(5-6): 257-280.

This contribution presents models that are necessary to calculate the vibrations due to the passage of a train. The models allow to calculate the propagation of the waves and the receptances of the soil and the track. The layered soil and the coupling with the track are treated by a (double) integration in wavenumber domain. The dynamic stiffnesses of the track and vehicle are combined and the excitation forces due to the irregularities of the track and the wheel are calculated. Finally, these excitation forces are used to simulate the ground vibration of a passing train. All these models are validated by a number of different measurements at two sites in France and Germany. © 2011 Lavoisier, Paris.

Avillez, J., et al. (2015). "Ground response data capture for railway vibration prediction." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport* **168**(1): 83-92.

For new rail schemes, an environmental impact assessment is required to estimate the impact of vibration and propose mitigation measures. A method widely used for evaluating railway vibration mitigation is the detailed design procedures produced by the US Federal Transit Administration. Although used globally it is not widely used in the UK but has been specified within some UK light rail schemes. The Federal Transit Administration procedure characterises the ground through line source transfer mobility, which requires impact tests on the ground at multiple points along the proposed route. However, characterising ground dynamic behaviour through

line source transfer mobility is challenging, particularly in urban areas where access to a site to undertake measurements can be limited. Based on the Federal Transit Administration framework, this paper proposes a simplified methodology based on the results of sensitivity analysis of ground dynamic behaviour at ten urban sites within the same UK city. It also identifies some of the issues with the use of line source transfer mobility method in urban sites; one of the findings is that where there are difficulties in obtaining access, data analysis can be used to circumvent issues where a full line of impacts (required by the technique) cannot be obtained. © 2015, Thomas Telford Services Ltd. All rights reserved.

Benčat, J., et al. (2011). *Prediction models for building structure response arising from railway traffic C3 - Proceedings of the 13th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing.*

The prediction models for the ground-borne vibrations and the buildings structure dynamic response due to railway traffic have been introduced. For free-field dynamic response at the distance point (from railway track) and dynamic response of building structure calculation procedure is described in this paper. In the numerical model the soils are modelled as a viscoelastic halfspace, [1,2,3,6,7]. This model is used both for evaluation of the track-soil interaction forces as well as for prediction of the ground-borne vibrations. The numerical results in time domain are presented as the time histories damped amplitudes of the halfspace vibration at the distance. In frequency domain free-field response are presented via response spectra and frequency response function (FRF) of the viscoelastic soil medium, [6,8,9,10,11]. In the next step this functions are applied for building structure dynamic response calculation due to railway traffic via relevant computational building structure model. In the numeric - experimental model (NEM) are used experimentally measured soil vibration data near the railway track as an input data into viscoelastic halfspace. The free-field vibration at the distance prediction is calculated using spectral analysis procedure. In this model procedure, it is suggested to apply soil medium transfer function, elastic and attenuation soil parameters from experimental in situ test (impact-seismic method - ISM). Then the halfspace output data (output PSD) at the distance are calculated using the standard spectral analysis procedure, [4]. Finally, the building structure dynamic response at the distance calculation is performed using half-space output data (PSD, time history) as the input data into the building structure foundations. The case-study results regarding to dynamic response prediction of the new IBM Slovak Telecom - Data Centre (ST-DC) building in Bratislava due to expected traffic effects of the projected new railway traffic, as the part of the TEN - T (Trans European Network for Transport), are also described in the paper. © Civil-Comp Press, 2011.

Bencat, J. and D. Papán (2011). *Buildings structure response due to railway traffic prediction model C3 - 18th International Congress on Sound and Vibration 2011, ICSV 2011.*

The prediction models for the ground-borne vibrations and the buildings structure dynamic response due to railway traffic have been introduced. For free-field dynamic response at the distance (from railway track) and dynamic response of building structures in these calculation procedures is described in this paper. In the numerical model the soils are modelled as a viscoelastic halfspace. This model is used both for evaluation of the track-soil interaction forces as well as for prediction of the ground-borne vibrations. The numerical results in time domain are presented as the time histories damped amplitudes of the halfspace vibration at the distance. In frequency domain free-field response are presented via response spectra and frequency response function (FRF) of the viscoelastic soil medium. In the next step this functions are applied for building structure dynamic response calculation due to railway traffic via relevant computational building structure model.

Bian, X. C., et al. (2011). "A 2.5D finite element approach for predicting ground vibrations generated by vertical track irregularities." *Journal of Zhejiang University: Science A* **12**(12): 885-894.

Dynamic responses of track structure and wave propagation in nearby ground vibration become significant when train operates on high speeds. A train-track-ground dynamic interaction analysis model based on the 2.5D finite element method is developed for the prediction of ground vibrations due to vertical track irregularities. The one-quarter car model is used to represent the train as lumped masses connected by springs. The embankment and the underlying ground are modeled by the 2.5D finite element approach to improve the computation efficiency. The Fourier transform is applied in the direction of train's movement to express the wave motion with a wave-number. The one-quarter car model is coupled into the global stiffness matrix describing the track-ground dynamic system with the displacement compatibility condition at the wheel-rail interface, including the irregularities on the track surface. Dynamic responses of the track and ground due to train's moving loads are obtained in the wave-number domain by solving the governing equation, using a conventional finite element procedure. The amplitude and wavelength are identified as two major parameters describing track irregularities. The irregularity amplitude has a direct impact on the vertical response for low-speed trains, both for short wavelength and long wavelength irregularities. Track irregularity with shorter wavelength can generate stronger track vibration both for low-speed and high-speed cases. For low-speed case, vibrations induced by track irregularities dominate far field responses. For high-speed case, the wavelength of track irregularities has very little effect on ground vibration at distances far from track center, and train's wheel axle weights becomes dominant. © Zhejiang University and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.

Byrtus, M., et al. (2010). *On modelling and dynamical analysis of railway vehicles vibration C3 - Proceedings of ISMA 2010 - International Conference on Noise and Vibration Engineering, including USD 2010*, Katholieke Universiteit Leuven.

Methodology of complex dynamical railway vehicle modelling using the substructure method is presented. The railway vehicle can be generally decomposed into following subsystems: car body, bogie frames and individual wheelset drives. Substructures are mutually connected by primary and secondary suspensions. Complex rail vehicle model is used for dynamic response investigation to excitation caused by track irregularities and by irregular wheel profiles in frequency domain.

Cao, Y., et al. (2013). Railway traffic induced ground vibration and its prediction approaches. *Traffic induced Environmental Vibrations and Controls: Theory and Application*, Nova Science Publishers, Inc.: 348-386.

In this chapter, the ground vibration and the building vibration caused by railway trains are studied by theoretical analysis, numerical simulation and field tests. Based on vehicle dynamics, track dynamics and the Green's functions of subsoil, the train-track-subsoil dynamic interaction model is established, in which the influence of track structure and wave motion in the three-dimensional layered-soil on ground vibrations are taken into account. The characteristics of ground vibrations are analyzed by case studies and experimental results. Combining with the train-track-subsoil model, the road bed-subsoil-building dynamic interaction model is proposed by finite element method. Some laws of building vibrations are also summarized by results of field experiment. Based on the calculated results, the prediction formulae are proposed and validated by experimental results, which can be used to predict the ground vibration and building vibration. © 2013 by Nova Science Publishers, Inc. All rights reserved.

Cardona, J., et al. (2010). *A ground-borne vibration assessment model for rail systems at-grade C3 - 39th International Congress on Noise Control Engineering 2010, INTER-NOISE 2010*.

Due to the increasing number and kilometres of new railways lines, either high speed railway lines or commuter lines, as well as the increasing in human sensitivity versus ground-borne vibration generated for this mean of transport, a sustained growth in complaints due to the annoyance caused by railway vibrations has been detected. In order to predict the field vibrations caused by new railway lines in the project stage, which will be useful to design appropriate countermeasures, in the present work a ground-borne vibration model for rail systems at-grade developed by the authors is validated with experimental measurements in an existing commuter railway line. It checked that this model is a very useful tool to predict the vibration field that will be caused by a railway infrastructure in the planning stage of the project.

Chai, X., et al. (2015). "The prediction of railway vehicle vibration based on neural network." *Journal of Information and Computational Science* **12**(16): 5889-5899.

Vehicle vibration acceleration is an important parameter reflecting the state of track irregularities and the quality of wheel and rail contact. A model of predicting vehicle system based on Nonlinear Autoassociative time-series network with external input (NARX) Neural Network (NN) is established by using the vehicle dynamics model, which relates track irregularities to vehicle performance. To improve the prediction precision, the properties of the NN were investigated, and, thus, the number of time delay and hidden nodes were determined. The validation results of the simulation data from SIMPACK model show that the prediction output of NARXNN is highly relevant with target output with smaller Root Mean Square (RMS) error. Meanwhile, the model can well predict the vehicle vibration acceleration with a consistent result. The model was validated based on measured data, further proving that the proposed prediction model of NARX NN is able to predict the output of vehicle vibration acceleration with high precision. © 2015 by Binary Information Press

Chao, C., et al. (2011). *Prediction of ground vibration generated by vertical track irregularity using 2.D FEM C3 - Advances in Environmental Vibration - Proceedings of the 5th International Symposium on Environmental Vibration, ISEV 2011*, Science Press.

The track irregularities have been coupled into 2. 5D finite element model in the wave-number domain. At present, the smooth track could only be calculated but the track irregularities endanger the running safety and stability of the trains. The car body has been simplified into four mutual independence wheels with secondary suspension in the Cartrack-ground model. The embankment and ground were presented by employing a 2.5-dimensional finite element method. As an external force, the dynamic wheel-rail forces will be eliminated for stiffness matrixes coupled in the wave number domain. The dynamic response of the ground surface in the wave Clumber domain will be translated into time domain by IFFT. Frequency of track irregularities was a dominant frequency for train vibration and it would be greater as the speed grows.

Chen, F., et al. (2011). "Prediction and mitigation analyses of ground vibrations induced by high speed train with 3-dimensional finite element method and substructure method." *JVC/Journal of Vibration and Control* **17**(11): 1703-1720.

This paper focuses on the dynamic interactions between a Shinkansen viaduct and the nearby ground when a high speed train is running along the viaduct. Due to the characteristics of the structure-foundation-soil system, a substructure method is employed to divide the global system into two substructures: one consists of the superstructure of track girder and supporting piers, the other consists of the foundation and near ground. Both substructures have continuity conditions at the interfaces, i.e. deformation continuity and force continuity. The superstructures are modeled by 3-dimensional (3-D) beam elements with a structural procedure, while the substructure is analyzed through a pseudo 3-D axisymmetric finite element method. A field test was conducted in the near field of

the Shinkansen viaduct to examine the vibration level. The measurement data also help us to understand the wave motion influenced by the geometric properties of the structures and the moving train. Based on the field test results, a thorough interpretation is provided by analyzing both the structures and the soil. Further, computation simulation is conducted to investigate the vibrations in the ground to a wider extent. According to the nature of vibration, a combined countermeasure is proposed which involves the source motion control and the wave propagation obstruction. Satisfactory mitigation is achieved by the combined measure. © 2010 The Author(s).

Chen, Y. J., et al. (2015). "Development of automatic prediction model for ground vibration using support vector machine." *Journal of Vibroengineering* **17**(5): 2535-2546.

This study develops an automatic prediction model for ground vibration induced by Taiwan high-speed trains on embankments. Various field-measured ground vibration data comprise a database used for developing the prediction model. First, the main characteristics that affect the overall vibration level are established on the basis of measurement result database. These main influence factors include train speed, ground condition, measurement distance, and supported structure. A support vector machine (SVM) algorithm, which is a widely used classification model, is then adopted to predict the vibration level induced by high-speed trains on embankments. The measured and predicted vibration levels are compared to verify prediction model reliability. Analytical results show that the more the measured vibration data located in one vibration group is collected, the higher of the accuracy rate will be. Generally, the developed SVM model can reasonably predict ground vibration level in various frequency ranges. Prediction results are discussed in detail, and the methodology for developing the automatic ground vibration level prediction system is presented. © 2015, JVE INTERNATIONAL LTD.

Costa, P. A., et al. (2012). "Influence of train dynamic modelling strategy on the prediction of track-ground vibrations induced by railway traffic." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* **226**(4): 434-450.

This paper presents a study developed in order to identify the influence and relevance of the mechanical properties of the train in the prediction of vibrations induced by passenger railway traffic. Based on experimental data and numerical simulation, a discussion about the influence of the modelling strategy adopted for the train simulation is performed. Special emphasis is placed on the study of the influence of the unsprung and semi-sprung masses of the train on the train-track interaction mechanism. From the developed study it was found that the modelling strategy adopted for the train simulation is a key factor in the prediction of the free-field vibrations. Moreover, the accuracy of the prediction is considerably increased if the train simulation considers the unsprung and semi-sprung (bogies) masses of the train. © IMechE 2012.

Costa, P. A., et al. (2013). Vibrations induced by railway traffic: Prediction, measurement and mitigation. *Traffic induced Environmental Vibrations and Controls: Theory and Application*, Nova Science Publishers, Inc.: 49-88.

This chapter is about the vibrations induced by railway traffic, comprising the prediction models, its experimental validation and its application on the analysis of mitigation measures. Due to the specific aspects of this kind of problems, where very large domains need to be considered, a 2.5D approach is adopted in the developing of the numerical model. Moreover, the ability of the model for dealing efficiently with the train track-ground dynamic interaction is highlighted. After the description of the numerical model main characteristics, its ability for dealing with real situations is evaluated through the comparison between prediction and experimental results for a case study developed by the authors. The experimental activities performed in that case study are presented, being the measurements of the vibrations induced by the train passage compared with the predicted results. Finally, after the experimental validation of the numerical model, its potentialities are highlighted namely in the analysis of the efficiency of ballast matsolutions on the abatement of vibrations induced by traffic. © 2013 by Nova Science Publishers, Inc. All rights reserved.

Coulier, P., et al. (2013). *A numerical study of subgrade stiffening as a mitigation measure for railway induced vibrations through 2.5D and 3D FE-BE models C3 - ECCOMAS Thematic Conference - COMPDYN 2013: 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Proceedings - An IACM Special Interest Conference*, National Technical University of Athens.

This paper studies the efficiency of subgrade stiffening next to the track as a mitigation measure for railway induced vibrations. A computationally efficient two-and-a-half-dimensional (2.5D) methodology is first employed, assuming invariance of the geometry in the longitudinal direction. An analysis in the frequency-wavenumber domain reveals that an infinitely long block of stiffened soil next to the track can act as a wave impeding barrier. It is demonstrated that the wave impeding effect depends on the relation between the Rayleigh wavelength in the soil and the free bending wavelength in the block of stiffened soil, as the transmission of plane waves in the soil with a longitudinal wavelength smaller than the bending wavelength is hindered. This leads to a critical frequency from which this mitigation measure starts to be effective, depending on the stiffness contrast between the soil and the block of stiffened soil. The existence of a critical angle delimiting an area where vibration levels are reduced in case of harmonic excitation on the rail is also demonstrated. Fully three-dimensional (3D) calculations are finally performed to assess the vibration reduction efficiency if subgrade stiffening is only implemented along a finite length, indicating that the length of the block should be approximately two times the free bending wavelength of an infinitely long beam in order to ensure that a finite block can act as a wave impeding barrier.

Coulier, P., et al. (2014). "The influence of source-receiver interaction on the numerical prediction of railway induced vibrations." *Journal of Sound and Vibration* **333**(12): 2520-2538.

The numerical prediction of vibrations in buildings due to railway traffic is a complicated problem where wave propagation in the soil couples the source (railway tunnel or track) and the receiver (building). This through-soil coupling is often neglected in state-of-the-art numerical models in order to reduce the computational cost. In this paper, the effect of this simplifying assumption on the accuracy of numerical predictions is investigated. A coupled finite element-boundary element methodology is employed to analyze the interaction between a building and a railway tunnel at depth or a ballasted track at the surface of a homogeneous halfspace, respectively. Three different soil types are considered. It is demonstrated that the dynamic axle loads can be calculated with reasonable accuracy using an uncoupled strategy in which through-soil coupling is disregarded. If the transfer functions from source to receiver are considered, however, large local variations in terms of vibration insertion gain are induced by source-receiver interaction, reaching up to 10 dB and higher, although the overall wave field is only moderately affected. A global quantification of the significance of through-soil coupling is made, based on the mean vibrational energy entering a building. This approach allows assessing the common assumption in seismic engineering that source-receiver interaction can be neglected if the distance between source and receiver is sufficiently large compared to the wavelength of waves in the soil. It is observed that the interaction between a source at depth and a receiver mainly affects the power flow distribution if the distance between source and receiver is smaller than the dilatational wavelength in the soil. Interaction effects for a railway track at grade are observed if the source-receiver distance is smaller than six Rayleigh wavelengths. A similar trend is revealed if the passage of a freight train is considered. The overall influence of dynamic through-soil coupling in terms of power flow remains limited to 2 dB, but the insertion gain at particular locations can easily reach 10 dB. This is of the same order of magnitude as other sources of uncertainty in the numerical prediction of railway induced vibrations; this should hence be accounted for when performing vibration predictions. © 2014 Elsevier Ltd.

Crisi, F., et al. (2010). *Rail track modeling for soil-structure interaction analysis C3 - Transport Means - Proceedings of the International Conference*.

This paper presents a method for modelling the rail track system within a more complex analysis approach focused to analyze dynamic soil-structure interaction due to rail traffic and to evaluate the structural vibrations. The rail system is analyzed by using two different code model based on rigid body and finite element (FE) analysis respectively. The results of the former are used as input for the latter model to evaluate the dynamic interaction due to the train transit. The rail beam is discretized into a number of rigid bodies connected each other by beam elements, and linear springs, connected to the ground and depending on the mechanical characteristics of underground structures and soil. The results of

spring constant evaluation are presented and discussed within a case study.

Cui, K. and D. Lv (2016). "Experiment and simulation research of the ground-borne vibration for a high-speed train." *Journal of Vibroengineering* **18**(3): 1783-1797.

In order to study the effect of the operational loads on the ground-borne vibration of the high-speed train, a train-track coupling model with considering the vertical and horizontal effects is established and applied to calculate the impact of different operational speeds on vibration acceleration. As shown in the results, the vibration acceleration is largely affected by different frequencies generated from different train speeds. By means of an indoor dynamic triaxial test, the impact of different vibration frequencies of a train on soil body is simulated. And a large number of medium- and low-frequency vibration tests are conducted according to the settings of load form, drainage requirement and vibration number of train vibration loads. The experimental results are analyzed to study the effect of different frequencies on dynamic characteristics, and a dynamic strain-time calculation formula, that takes the frequency factor into consideration, is proposed. Meanwhile, the improved formula that considered frequency is substituted into the finite element model (FEM) of the train, so as to analyze the impact of different vibration frequencies on the settlement, is applied. As shown in the results, the proposed improved formula, that considered the frequency, is good at prediction. The effect of vibration efficiency on the engineering can be reflected by a simulated high-speed train model. Based on the simulation model, a reinforcement measure is conducted for the ground-borne, and it is calculated that the settlement is obviously reduced and the service time of the train ground-borne is increased. This paper can provide a reference for a theoretical research and engineering practice. © JVE INTERNATIONAL LTD.

Curcuruto, S., et al. (2012). *Propagation of vibration induced on track: Implementation of previsional models for low and high speed trains and comparison with experimental measurements C3 - 19th International Congress on Sound and Vibration 2012, ICSV 2012.*

In recent years, the topic of vibrations in homes and workplaces has grown in importance. In order to reduce the vibrations due to road and rail traffic, several actions can be implemented, some of which are economically very expensive. As a consequence, before implementing any mitigation measures, the availability of appropriate simulation tools able to characterize the effectiveness of the chosen solutions becomes more and more relevant. As part of this work, the development of a predictive software has been addressed, combined with experimental measurements, in order to assess with acceptable accuracy the vibration levels caused by rail transport - trams, low-speed and high-speed trains. Predictions are obtained by characterizing waves propagation through the ground by the mean of separate approaches for low and high velocity trains. In this paper the results achieved has been presented, as well as the future potential of the activity.

Degrande, G., et al. (2015). *Numerical, experimental and hybrid predictions of ground vibration produced by high speed railway traffic C3 - INTER-NOISE 2015 - 44th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, The Institute of Noise Control Engineering of the USA, Inc.

Vibrations induced by the passage of high speed trains are a major environmental concern. The aim of the present contribution is to provide a comprehensive overview of numerical, empirical, and hybrid methods for the prediction of ground vibrations produced by trains. Numerical prediction models are obtained by coupling idealized models for the train, the track, and the soil. Empirical models are based on an experimental characterization of the source strength and the vibration transmission. Compared with numerical models, they offer the advantage that vibration transmission is directly accounted for using measured transfer functions. However, source characterization may not be possible for new train or track types, nor for different soil conditions. It is shown how limitations of numerical and empirical methods can be overcome in a hybrid procedure, where computed and measured quantities are combined. Two new hybrid models are presented, and the model results are shown to be in good agreement with measurements from a high speed surface railway. © 2015 by ASME.

Dumitriu, M. (2016). "Numerical synthesis of the track alignment and applications. Part II: The simulation of the dynamic behaviour in the railway vehicles." *Transport Problems* **11**(2): 5-16.

This paper features a method of synthesizing the track irregularities by which the alignment may be analytically represented by a pseudo-stochastic function, as well as the implementation of such a method in the numerical simulation of the dynamic behaviour of the railway vehicles. The method described in Part I relies on the power spectral density of the track irregularities, as per ORE B 176 and the specifications included in UIC 518 Leaflet regarding the track's geometric quality. Part II shows the results of the numerical simulations regarding the lateral behaviour of the railway vehicle during the circulation on a tangent track with lateral irregularities, synthesized as in the method herein. These results point out many basic properties of the lateral vibration behaviour of the railway vehicle, a fact that demonstrates the efficiency of the suggested method.

El Kacimi, A., et al. (2013). "Time domain 3D finite element modelling of train-induced vibration at high speed." *Computers and Structures* **118**: 66-73.

The purpose of this paper is to investigate a 3D finite element (FE) coupled train-track model for the numerical modelling of the ground induced vibration due to the passage of a single high speed train locomotive. The track components such as the sleepers, the ballast and the subgrade are represented by 20 noded brick elements. The rail is modelled by using 3D beam-column elements. A quarter train model is coupled to the 3D railway track model, through the interaction points between the wheels and the rail, based on the nonlinear Hertzian contact theory. A damping model, based on Rayleigh damping approach, is used. The 3D FE model is capable of

simulating multi-layered ground and radiation damping by using viscous boundary conditions. Material nonlinearity, especially of the ballast and subgrade layers can be taken into account as appropriate. Numerical experiments are carried out, using the proposed 3D FE coupled train-track model, to study the train fundamental passing frequency effect on the dynamic railway track response for train speeds belonging to the subcritical, critical and supercritical ranges. The influence of the soil material damping is also investigated. The results clearly show an increase in track deflection with train speed. The material damping model allows a realistic prediction of the track vibration and train body dynamics at high speeds. © 2012 Elsevier B.V. All rights reserved.

François, S., et al. (2011). *A 2.5D coupled FE-BE methodology for the prediction of railway induced vibrations C3 - Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EUROLYN 2011*, University of Southampton, Institute of Sound Vibration and Research.

Ground vibrations induced by railway traffic are often studied by means of two-and-half dimensional (2.5D) models that are based on the longitudinal invariance of the track geometry. In this paper, a 2.5D methodology is used where the finite element method is combined with a boundary element method, based on a regularized boundary integral equation. In the formulation of the boundary integral equation, the Green's functions of a layered elastic halfspace are used, so that no discretization of the free surface or the layer interfaces is required. The methodology is applied to two cases. In the first case, two alternative models for a ballasted track on an embankment are compared. In the first model, the ballast and the embankment are modelled as a continuum using 2.5D solid elements, whereas a simplified beam representation is adopted in the second model. A very large difference is found for the free field mobility of both models, which demonstrates the need for detailed 2.5D modelling of the embankment. In the second case, the efficiency of a vibration isolating screen is studied. A vibration isolating screen is a soft or stiff wave barrier. Due to the impedance contrast between the isolating screen and the soil, incident waves are reflected. As a result, the vibration levels behind the screen are effectively reduced. Both examples demonstrate that the use of detailed 2.5D models result in a better insight in the mechanical behavior of the coupled soil-track system.

François, S., et al. (2012). *A 2.5D coupled FE-BE methodology for the prediction of railway induced vibrations. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. **118**: 367-374.

Ground vibrations induced by railway traffic are often studied by means of two-and-half dimensional (2.5D) models that are based on the longitudinal invariance of the track geometry. In this paper, a 2.5D methodology is used where the finite- element method is combined with a boundary-element method, based on a regularized boundary integral equation. In the formulation of the boundary integral equation, the Green's functions of a layered elastic half space are used, so that no discretization of the free surface or the layer interfaces is required. The methodology is applied to two cases. In the first case, two alternative models for a ballasted track on an

embankment are compared. In the first model, the ballast and the embankment are modeled as a continuum using 2.5D solid elements, whereas a simplified beam representation is adopted in the second model. A very large difference is found for the free field mobility of both models, which demonstrates the need for detailed 2.5D modeling of the embankment. In the second case, the efficiency of a vibration isolating screen is studied. A vibration isolating screen is a soft or stiff wave barrier. Due to the impedance contrast between the isolating screen and the soil, incident waves are reflected. As a result, the vibration levels behind the screen are effectively reduced. Both examples demonstrate that the use of detailed 2.5D models result in a better insight in the mechanical behavior of the coupled soil-track system. © 2012 Springer.

Galvín, P., et al. (2010). "A 2.5D coupled FE-BE model for the prediction of railway induced vibrations." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **30**(12): 1500-1512.

Ground vibrations induced by railway traffic at grade and in tunnels are often studied by means of two-and-half dimensional (2.5D) models that are based on a Fourier transform of the coordinate in the longitudinal direction of the track. In this paper, the need for 2.5D coupled finite element-boundary element models is demonstrated in two cases where the prediction of railway induced vibrations is considered. A recently proposed novel 2.5D methodology is used where the finite element method is combined with a boundary element method, based on a regularized boundary integral equation. In the formulation of the boundary integral equation, Green's functions of a layered elastic halfspace are used, so that no discretization of the free surface or the layer interfaces is required. In the first case, two alternative models for a ballasted track on an embankment are compared. In the first model, the ballast and the embankment are modelled as a continuum using 2.5D solid elements, whereas a simplified beam representation is adopted in the second model. The free field vibrations predicted by both models are compared to those measured during a passage of the TGVA at a site in Reugny (France). A very large difference is found for the free field response of both models that is due to the fact that the deformation of the cross section of the embankment is disregarded in the simplified representation. In the second case, the track and free field response due to a harmonic load in a tunnel embedded in a layered halfspace are considered. A simplified methodology based on the use of the full space Green's function in the tunnel-soil interaction problem is investigated. It is shown that the rigorous finite element-boundary element method is required when the distance between the tunnel and the free surface and the layer interfaces of the halfspace is small compared to the wavelength in the soil. © 2010 Elsevier Ltd.

Gao, G., et al. (2015). "Numerical prediction of ground vibrations induced by high-speed trains including wheel-rail-soil coupled effects." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **77**: 274-278.

A simplified analytical model including the coupled effects of the wheel-rail-soil system and geometric irregularities of the track is proposed for evaluation of the moving train load. The wheel-rail-soil

system is simulated as a series of moving point loads on an Euler-Bernoulli beam resting on a visco-elastic half-space, and the wave-number transform is adopted to derive the 2.5D finite element formulation. The numerical model is validated by published data in the literature. Numerical predictions of ground vibrations by using the proposed method are conducted at a site on the Qin-Shen Line in China. © 2015 Elsevier Ltd.

Germonpré, M., et al. (2016). "A periodic track model for the prediction of ground borne vibration due to parametric excitation." *Civil-Comp Proceedings* **110**.

This paper presents a two-step model for the prediction of ground-borne vibrations induced by parametric excitation. The axle loads are predicted first by solving the train-track interaction problem with an iterative sequential Dirichlet-Neumann algorithm. Next, the axle loads are applied on a three dimensional periodic coupled finite element-boundary element track model to predict the vibrations in the free field. This two-step model is illustrated by two case studies. First, the influence of parametric excitation due to the periodic rail supports is investigated by considering a train passing over a periodic track. It is found that when the wheel and rail unevenness is low, parametric excitation causes higher free field vibrations around the sleeper passing frequency and its multiples. In the second case study, a hanging sleeper is included in the track model, leading to higher free field vibrations at frequencies between the sleeper passing frequency and its multiples. © Civil-Comp Press, 2016.

Graham, J. M. (2015). *Predicting and mitigating ground-borne vibration transmission to elevated floor structures C3 - Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, Springer New York LLC.

Ground-borne vibration from road and rail sources is often a critical consideration for the functionality of research and healthcare facilities. Sensitive equipment can be isolated individually, but when improved vibration performance of the overall structure is required vibration must be mitigated before it enters the structure. To accomplish this, more comprehensive analysis methods must be considered. In the current case study a 12-storey hospital building containing microsurgical and surgical suites is under construction 15 m from a busy commuter and freight rail line. A neighbouring building located at a similar distance from the rail line was measured to have clearly perceptible vibration levels on elevated floors. In order to determine the vibration mitigation required for the new building, an extensive measurement plan was conducted to determine vertical and lateral soil propagation characteristics, a foundation model was constructed to determine soil-structure interaction properties and a finite element model of the building structure was constructed to determine vibration propagation to all floors in the building. The study shows how careful analysis and testing can lead to informed evaluation of various mitigation strategies to combat a very serious problem. © The Society for Experimental Mechanics, Inc. 2015.

Hussein, M., et al. (2015). "The use of sub-modelling technique to calculate vibration in buildings from underground railways." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* **229**(3): 303-314.

In this paper, a method is presented for the calculation of the vibration created in buildings by the operation of underground railways. The method is based on the sub-modelling approach which is used to couple a model of a building on a piled foundation to another model that calculates the vibration generated in the soil in underground railway tunnels. The method couples a building on a piled foundation to the soil at discrete points by satisfying equilibrium and compatibility requirements at those points. The method results in efficient numerical calculations. A two-dimensional frame made of beam elements is used to model the building and its piled foundation. The elements are formulated using a dynamic stiffness matrix which accounts for Euler-Bernoulli bending and axial behaviour. Vibrations created by a train moving in an underground tunnel are calculated using the well-known pipe-in-pipe (PiP) model. The model calculates the power spectral density (PSD) of the displacement in the soil. The excitation mechanism is the roughness of the rail and the PSD is calculated for a train moving on a floating-slab track in an underground railway tunnel for a stationary process. The current version of PiP accounts for a tunnel embedded in a half-space. The building frame is coupled in this paper at 90° to the tunnel's centreline. The main result of this paper illustrates the significant contribution of the building's dynamics to the displacement wave field received by the building. The example presented in this paper shows a decrease of more than 20-dB in the displacement PSDs at frequencies larger than 10 Hz when accounting for the change in this wave field. © IMechE 2013 Reprints and permissions: sagepub.co.uk/journalsPermissions.nav.

Jin, Q. and D. Thompson (2014). *Prediction of ground vibration from trains using a multi-body vehicle model coupled to A2.5d FE/BE model of the track and ground C3 - 21st International Congress on Sound and Vibration 2014, ICSV 2014*, International Institute of Acoustics and Vibrations.

Ground vibration from trains is a growing environmental problem, especially as the speed and traffic intensity of trains increase. In order to predict vibration, and the influence of vehicle, track and ground parameters, a detailed numerical model is required. A model of the track and ground is presented based on the wavenumber domain finite element/boundary element (FE/BE) method. This so-called 2.5D approach is more efficient than a fully three-dimensional approach. The wavenumber resolution required to achieve good predictions is shown to depend on frequency and the wave speed in the ground. However, for the rail receptance it is necessary to include sufficiently high wavenumbers to capture the static deflection shape. The vehicle is represented by a multi-body model which is coupled to the track through contact springs and excited by the surface roughness. The same roughness excites each wheel/rail contact with appropriate time delay. The effect of different levels of detail in the vehicle model is studied as well as the influence of coupling between the contact points through the track/ground

model. Results are presented for an example track and ground and they show good agreement with other modelling approaches.

Jin, W., et al. (2011). *Numerical simulation on ground vibration generated by subway train C3 - Advances in Environmental Vibration - Proceedings of the 5th International Symposium on Environmental Vibration, ISEV 2011*, Science Press.

The main objective of this study is to study ground vibration generated by subway train running in underground tunnel constructed in clay area. A so called 2.5D finite element method is adopted to simulate the wave generation and propagation in the tunnel structure and ground with the assumption of invariant geometry and material distribution along the tunnel. Finite element discretization is employed in cross section of the tunnel to represent the dynamic motions of the train-track-tunnel structure and the surrounding soil medium, and the train is simplified as a 1/4 car model. The load transfer from rail to floating slab and to tunnel structure is carefully dealt with. The three-dimensional responses of ground are obtained from the wave Clumber expansion by employing the inverse Fourier transform. Wave dissipation into far field is dealt with the silent boundary constructed with the frequency-dependent dashpots, which has been proved quite effective to absorb the outgoing waves from the inner finite element zone. The ground vibration features are revealed by illustrative case studies of a simple 1/4 car model moving along track at variable speeds, tunnel depth and thickness, the amplitude and wavelength of rail unevenness.

Jones, S. and H. Hunt (2012). "Predicting surface vibration from underground railways through inhomogeneous soil." *Journal of Sound and Vibration* **331**(9): 2055-2069.

Noise and vibration from underground railways is a major source of disturbance to inhabitants near subways. To help designers meet noise and vibration limits, numerical models are used to understand vibration propagation from these underground railways. However, the models commonly assume the ground is homogeneous and neglect to include local variability in the soil properties. Such simplifying assumptions add a level of uncertainty to the predictions which is not well understood. The goal of the current paper is to quantify the effect of soil inhomogeneity on surface vibration. The thin-layer method (TLM) is suggested as an efficient and accurate means of simulating vibration from underground railways in arbitrarily layered half-spaces. Stochastic variability of the soils elastic modulus is introduced using a KL expansion; the modulus is assumed to have a log-normal distribution and a modified exponential covariance kernel. The effect of horizontal soil variability is investigated by comparing the stochastic results for soils varied only in the vertical direction to soils with 2D variability. Results suggest that local soil inhomogeneity can significantly affect surface velocity predictions; 90 percent confidence intervals showing 8 dB averages and peak values up to 12 dB are computed. This is a significant source of uncertainty and should be considered when using predictions from models assuming homogeneous soil properties. Furthermore, the effect of horizontal variability of the

elastic modulus on the confidence interval appears to be negligible. This suggests that only vertical variation needs to be taken into account when modelling ground vibration from underground railways. © 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Jones, S., et al. (2012). "Prediction uncertainties and inaccuracies resulting from common assumptions in modelling vibration from underground railways." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* **226**(5): 501-512.

Underground railways produce significant ground-borne vibration that is reported to disturb people living or working near subways. Designers and engineers use numerical models to predict vibration levels so as to meet the increasingly strict vibration standards. These models commonly include simplifying assumptions to reduce the complexity and cost of the simulation. This paper reviews six commonly disregarded aspects of the underground railway environment and their respective effects on vibration prediction values: a second (twin) tunnel, piled foundations, track with discontinuous slabs, soil inhomogeneity, inclined soil layers, and irregular contact at the tunnel-soil interface. Results suggest that accounting for each of these simplifying assumptions can result in predictions that vary from the simplified cases by at least 5 dB and potentially up to 20 dB. This is a significant level of uncertainty and should be considered when estimating the predictive accuracy of numerical models using simplifying assumptions. © IMechE 2012.

Jones, S., et al. (2011). *Prediction inaccuracies and uncertainties associated with common assumptions in modelling vibration from underground railways C3 - Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURO-DYN 2011*, University of Southampton, Institute of Sound Vibration and Research.

Underground railways produce significant ground-borne vibration which is reported to disturb people living or working near subways. Designers and engineers use numerical models to predict vibration levels so as to meet the increasingly strict vibration standards. These models commonly include simplifying assumptions to reduce the complexity and cost of the simulation. This paper reviews four commonly disregarded aspects of the underground railway environment and their respective effects on vibration prediction values: the second (twin) tunnel, track with discontinuous slabs, soil inhomogeneity, and irregular contact at the tunnel-soil interface. Results suggest that accounting for each of these simplifying assumptions can result in predictions which vary from the simplified cases by at least ± 5 dB and potentially up to 20dB. This is a significant level of uncertainty and should be considered when estimating the predictive accuracy of numerical models using simplifying assumptions.

Kouroussis, G., et al. (2014). *Investigating the effect of wheel flat on railway traffic vibration using a numerical model C3 - 21st International Congress on Sound and Vibration 2014, ICSV 2014*, International Institute of Acoustics and Vibrations.

In railway vibration assessment, various phenomena intervene in the generation of ground vibrations. The use of a numerical tool to

model the vehicle dynamics has deeply changed the railway vehicle design. Among multiple advantages, this approach presents a natural way to design suspension elements and to treat complex contact behaviours, and allows the use of non-linear elements. This paper focuses on the modelling of wheel flat and its effect on vehicle/track interaction. Special attention is paid to the modelling of wheel/rail interface, using a non-linear Hertzian contact. Theoretical analysis of the wheel/rail contact is performed in order to compute the Hertzian coefficient. Regarding the ground vibration calculation, a two-step approach is used, separating the vehicle/track/foundation simulation to the ground wave propagation calculation. Successfully validated in the past, it allows focusing separately on the vehicle/track dynamics and the ground wave propagation. The potential of the proposed approach is illustrated by an analysis of the vibrations generated by T2000 tram in Brussels.

Kouroussis, G., et al. (2015). Prediction of railway-induced ground vibrations: The use of minimal coordinate method for vehicle modelling. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, Springer Verlag. **126**: 329-336.

This paper examines the combination of finite element method and multibody modelling to simulate the generation and propagation of ground vibration in the vicinity of railway networks. Based on the assumption that the source of vibrations lies at the wheel/rail contact, a multibody model of the vehicle is built using minimal coordinates, which leads to a system of pure ordinary differential equations, without constraint equations. Track and foundation dynamic equations are coupled to the vehicle's equation of motion, using non-linear Hertzian theory. From these results, the ballast reaction on the subgrade is used in a second subproblem where free field ground response is computed using the finite element software ABAQUS. © 2015 Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Kouroussis, G., et al. (2015). *Modelling the singular rail and wheel surface defect for predicting railway ground vibration C3 - 22nd International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2015*, International Institute of Acoustics and Vibrations.

When undertaking a railway vibration assessment, the presence of singular defects on the rail and wheel surfaces significantly affects the ground vibration level. The objective of this paper is to analyse the most common of these defects found on urban lines and to derive the equivalent wheel/rail contact stiffness and wheel position relative to the rail. Special attention is paid to the modelling of wheel/rail interface, using a non-linear Hertzian contact. Theoretical analysis of the wheel/rail contact is performed in order to compute the Hertzian coefficient. To calculate ground vibration levels, a fully 3D numerical prediction model is developed, based on a two-step approach, combining a multibody analysis of the vehicle and a finite element analysis of the track and the surrounding ground. An application is proposed, based on the AM96 trainset, largely used in Brussels Region (Belgium). High-vibration levels are predicted in the presence of these defects. A selection of simulation results are presented in order to compare the defect type and to analyse the effect of the vehicle speed.

Kouroussis, G., et al. (2015). "Modelling the environmental effects of railway vibrations from different types of rolling stock: A numerical study." *Shock and Vibration* **2015**.

This paper analyses the influence of rolling stock dynamics on ground-borne vibration levels. Four vehicle types (Thalys, German ICE, Eurostar, and Belgian freight trains) are investigated using a multibody approach. First, a numerical model is constructed using a flexible track on which the vehicles traverse at constant speed. A two-step approach is used to simulate ground wave propagation which is analysed at various distances from the track. This approach offers a new insight because the train and track are fully coupled. Therefore rail unevenness or other irregularity on the rail/wheel surface can be accurately modelled. Vehicle speed is analysed and the frequency spectrums of track and soil responses are also assessed to investigate different excitation mechanisms, such as carriage periodicities. To efficiently quantify train effects, a new (normalised) metric, defined as the ratio between the peak particle velocity and the nominal axle load, is introduced for a comparison of dynamic excitation. It is concluded that rolling stock dynamics have a significant influence on the free field vibrations at low frequencies, whereas high frequencies are dominated by the presence of track unevenness. © 2015 Georges Kouroussis et al.

Kouroussis, G., et al. (2013). "Investigating the influence of soil properties on railway traffic vibration using a numerical model." *Vehicle System Dynamics* **51**(3): 421-442.

This paper presents the influence of dynamic and geometrical soil parameters on the propagation of ground vibrations induced by external loads. The proposed approach is based on a three-dimensional model, focusing on realistic excitation sources like impulse loads and moving railway vehicles. For the latter, a complete vehicle/track model is developed. The simulation is performed in time domain, offering an interesting approach, compared with classic cyclic analyses. The ground is modelled initially as an elastic homogeneous half-space and additionally as a layered half-space. First, the effect of homogeneous soil properties on ground vibration is analysed. Soil stratification is then taken into account, using various configurations. Analysis reveals that as receiver distance increases ground wave reflection in a layered ground plays an important role in the reduction of ground surface motion. This effect is magnified when the phase velocity wavelength becomes large compared with the depth of the surface layer. © 2013 Taylor and Francis Group, LLC.

Kouroussis, G., et al. (2011). *Lumped mass model of vertical dynamic coupling of a railway track on elastic homogeneous or layered halfspace C3 - Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURO-DYN 2011*, University of Southampton, Institute of Sound Vibration and Research.

The mechanical model of track and foundation is presented in this paper, considering a lumped mass model for the soil. From the Lysmer Analog model, widely used for soil impedance characterisation, an extension is proposed considering the coupling between foundations, according to their contact area and distance.

The mass/spring/damper systems for the foundation are interconnected by other spring and damper elements. In order to take into account the wave propagation time lag, a negative "dashpot" term is used for the system coupling. A fitting in the frequency range [0-80Hz] is performed on the results obtained numerically with a finite-infinite element model. This numerical modelling is of interest in the time domain simulation, allowing the processing of 3D models of the soil. The fitting is performed, after a Fourier transform, with the help of general analytical relations considering globally the soil motion. The final model is combined with a discrete 2-layer model of the track, in order to present a simple compound track-soil model. The rail is materialized by an Euler-Bernoulli beam, discretely connected to the foundation by spring-damper systems with an intermediary lumped mass representing the sleeper. Calculated track receptances are compared with the results from other models, for the case of a Belgian site investigated in the past. The results show that both the frequency dependence of the dynamic subgrade stiffness and the motion attenuation are obtained with the proposed approach. A simplified representation of the subsoil can be therefore economically used for a vehicle-track model dedicated to the railway traffic induced vibrations.

Kouroussis, G., et al. (2011). *Prediction of environmental vibrations induced by railway traffic using a three-dimensional dynamic finite element analysis C3 - Proceedings of the 13th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing.*

This paper presents the modelling possibilities of a full tridimensional finite element approach for prediction of railway ground-borne vibrations. Non-reflecting boundaries are compared to classical ones, with the emphasis on the modelling of the soil wave propagation and reflection. Considering that the ground wave propagation is a transient problem, the time domain formulation is preferred. Rules about domain dimension and element size are clearly emphasized, in order to establish the best compromise between accuracy and numerical model heaviness. Typical results are presented, considering cases of homogeneous or layered halfspace, and illustrate the calculation of the structural response of a building during the passage of a tram at constant speed. © Civil-Comp Press, 2011.

Kouroussis, G., et al. (2013). "Prediction of ground vibrations induced by urban railway traffic: An analysis of the coupling assumptions between vehicle, track, soil, and buildings." *International Journal of Acoustics and Vibrations* **18**(4): 163-172.

This paper is concerned with the problem of ground vibrations induced by railway traffic and its modelling through a decoupled approach, using only the finite element modelling for evaluating the ground waves propagation. The vehicle/track dynamics is calculated separately. An important modelling aspect is undoubtedly the track/soil interaction, which can play an important role in the generation of seismic waves. To avoid excessive computational resources, a coupled lumped mass model (CLM model) of the soil has been recently developed and is considered in this study. The

influence of ballast and soil stiffnesses is presented, in order to confirm the range of validity of the CLM model. Combined with a discrete two layer model of the track, it offers the possibility of working with a simple compound track/soil model. A comprehensive analysis is provided to show the benefit of the finite element model with the proper radiation conditions at infinity, for analysing the structural response of a building located in the vicinity of the track. Focusing on typical results based on the tram of Brussels, the effects of track/soil and soil/structure coupling are investigated. Modal analyses of the vehicle and the building are presented in order to understand the effects of seismic wave amplification, especially when the source contains frequencies close to the natural frequencies of the building.

Kouroussis, G., et al. (2014). "Using three-dimensional finite element analysis in time domain to model railway-induced ground vibrations." *Advances in Engineering Software* **70**: 63-76.

For the prediction of ground vibrations generated by railway traffic, finite element analysis (FEA) appears as a competitive alternative to simulation tools based on the boundary element method: it is largely used in industry and does not suffer any limitation regarding soil geometry or material properties. However, boundary conditions must be properly defined along the domain border so as to mimic the effect of infinity for ground wave propagation. This paper presents a full three-dimensional FEA for the prediction of railway ground-borne vibrations. Non-reflecting boundaries are compared to fixed and free boundary conditions, especially concerning their ability to model the soil wave propagation and reflection. Investigations with commercial FEA software ABAQUS are presented also, with the development of an external meshing tool, so as to automatically define the infinite elements at the model boundary. Considering that ground wave propagation is a transient problem, the problem is formulated in the time domain. The influence of the domain dimension and of the element size is analysed and rules are established to optimise accuracy and computational burden. As an example, the structural response of a building is simulated, considering homogeneous or layered soil, during the passage of a tram at constant speed. © 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Kouroussis, G. and O. Verlinden (2013). "Prediction of railway induced ground vibration through multibody and finite element modelling." *Mechanical Sciences* **4**(1): 167-183.

The multibody approach is now recognized as a reliable and mature computer aided engineering tool. Namely, it is commonly used in industry for the design of road or railway vehicles. The paper presents a framework developed for predicting the vibrations induced by railway transportation. Firstly, the vehicle/track subsystem is simulated, on the basis of the home-made C++ library EasyDyn, by mixing the multibody model of the vehicle and the finite element model of the track, coupled to each other through the wheel/rail contact forces. Only the motion in the vertical plane is considered, assuming a total symmetry between left and right rails. This first step produces the time history of the forces exerted by the ballast on the foundation, which are then applied to a full 3-D FEM

model of the soil, defined under the commercial software ABAQUS. The paper points out the contribution of the pitch motion of the bogies and carriages which were neglected in previous publications, as well as the interest of the so-called coupled-lumped mass model (CLM) to represent the influence of the foundation in the track model. The potentialities of the model are illustrated on the example of the Thalys high-speed train, riding at 300 km h⁻¹ on the Belgian site of Mévergnies. © 2013 Author(s).

Kouroussis, G. and O. Verlinden (2014). *Numerical prediction of ground vibrations generated by domestic trains in brussels C3 - 21st International Congress on Sound and Vibration 2014, ICSV 2014*, International Institute of Acoustics and Vibrations.

With a little over one million residents, Brussels, capital of European Union, is a heavily urban territory, as are other major European capitals. The present paper focuses on the vibratory nuisances generated by domestic trains in the Brussels region. This problem is a major concern of inhabitant surrounding rail infrastructure and causes part of the delay in the Brussels RER network construction. One site is selected for the investigation of the main factors influencing high vibration levels. For the analysis, a fully 3D numerical prediction model is built, based on a two-step approach which combines a multibody analysis of the vehicle and a finite element analysis of the track and surrounding ground. The results are validated by in situ measurements. Uncovered high-vibration levels are primarily due to rail joints. Numerical simulations are also performed to quantify the beneficial effect of actions on the rail profile surface. Finally, the sensitivity of results to the train speed is discussed.

Kouroussis, G., et al. (2011). *Prediction of ground vibrations induced by railway traffic: An analysis of the modelling assumptions of vehicle and soil C3 - 18th International Congress on Sound and Vibration 2011, ICSV 2011*.

This paper is concerned with the problem of ground vibrations induced by railway traffic and its modelling. Three approaches, with increase of complexity, are presented. The first one is related to a semi-analytical solution of track/soil dynamics, with a set of moving constant loads defining the vehicle. The quasi-static track deflection is obtained using an infinite and uniform beam on a Winkler foundation, representing as a whole the stiffness of the railpad, ballast and subgrade. The soil is considered as homogeneous, and the solution of dynamic loads problem is described by the Green's functions formalism, offering a frequency analysis solution. The other models are based on a two-step approach, combining the multibody simulation (for the vehicle/track) and the finite/infinite element analysis (for the soil). It offers a more realistic description of the wheel contacts with the rail (Hertz's non-linear law). A two-layer configuration is chosen for the track. Two representations of the soil are considered, with a homogeneous halfspace or a layered medium for describing its dynamics, respectively. For both cases, the soil description is based on the finite element method. Specific conditions are applied at the domain border, including viscous boundary and surrounding by infinite elements. The simulation is performed in the

time domain and allows a faithful representation of the ground wave propagation. A practical example is proposed, based on the Thalys high-speed train and the three models are compared one by one with experimental results. Various phenomena linked to the vehicle dynamics and to the soil layering are described and the necessity of a global modelling is underlined in this research, taking into account all the subsystems (vehicle, track, soil).

Kouroussis, G., et al. (2012). "A two-step time simulation of ground vibrations induced by the railway traffic." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* **226**(2): 454-472.

Recent decades have been fertile in terms of development of vehicle dynamics simulations. But the usual applications dedicated to the train design rarely take into account ground vibrations. In order to assess the influence of vehicle dynamics on track deflection and therefore on ground wave propagation, the vehicle/track system must be studied globally. The track/soil coupling is first investigated, through various track/soil models. From there, a decoupled approach is proposed, which proves valid as far as the soil is sufficiently rigid with respect to the ballast. It works in two stages: the simulation of the vehicle/track subsystem provides in a first step the ground forces, considering the irregularities of the rail as the excitation mechanism. The resulting forces are then applied, in a second step, to the soil subsystem model. Two applications are presented, consisting of the passing of a tram over a local discontinuity and the passing of a high-speed train over a rough track. The results obtained show a good agreement with experimental measurements as well as the importance of the whole vehicle/track/soil dynamics on the level of ground vibration. © 2011 Authors.

Kozioł, P. (2015). "Vibrations of railway tracks modelled as a two layer structure." *Civil-Comp Proceedings* **108**.

Modelling of railway structures is of importance in recent investigations concerned with dynamic problems of rail transportation. The railway is usually modelled as one layer system described by the dynamic equation of a beam resting on a Winkler foundation or a two layer system consisting of two beams associated with rails and sleepers, connected by a viscoelastic layer. Experimental measurements show that introduction of nonlinear properties into such models might bring important information about the dynamic behaviour of realistic operational systems. In this paper, the problem of the dynamic response of an infinite double-beam system resting on a nonlinear viscoelastic foundation and subjected to a set of moving forces, being a representation of a railway track with a moving train, is considered. The theoretical model consists of the coupled nonlinear system of partial differential equations with homogeneous boundary conditions. The response of structure is obtained by applying the Galilean co-ordinate transformation and the Adomian's decomposition method combined with a collocation based approximation. The idea presented enables the small parameter approach to be overcome and reduces difficulties related to the direct calculation of the Fourier integrals. The applied approach using parameters taken from measurements carried out for a Polish

railway track during the passage of fast train Pendolino EMU-250 shows the ability of the method used to analyse parametrically the dynamic systems associated with transportation. The results obtained are relatively consistent with measurement data, which can be treated as a first step towards the validation of the semi-analytical wavelet based technique developed. This validation along with the solution obtained for the considered type of load representation are the main novelties of this paper. © Civil-Comp Press,2015.

Kuo, K. A., et al. (2015). Recent developments in the Pipe-in-Pipe model for underground-railway vibration predictions. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, Springer Verlag. **126**: 321-328.

The Pipe-in-Pipe (PiP) model is a fast-running model that calculates vibration levels from an underground railway within a layered halfspace. This model contains many simplifying assumptions, but its fast computation time makes it useful as an early design tool. Recent developments in PiP have focused on quantifying the effect of various features of the underground environment that are commonly disregarded in railway vibration models. We present a summary of the work done on seven such features: soil inhomogeneity; inclined soil layers; irregular contact at the tunnel-soil interface; track with discontinuous slabs; the presence of piled foundations; second (twin) tunnels; and sources of track roughness. All of these features can introduce inaccuracy of at least 5 dB into vibration predictions. Two examples of other uses of PiP are presented: a theoretical study of coupling effects between railways and buildings; and a manufacturer's investigation into the effects of track resilience. Current and future research directions are also discussed. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015.

Kuo, K. A., et al. (2016). "Hybrid predictions of railway induced ground vibration using a combination of experimental measurements and numerical modelling." *Journal of Sound and Vibration*.

Along with the rapid expansion of urban rail networks comes the need for accurate predictions of railway induced vibration levels at grade and in buildings. Current computational methods for making predictions of railway induced ground vibration rely on simplifying modelling assumptions and require detailed parameter inputs, which lead to high levels of uncertainty. It is possible to mitigate against these issues using a combination of field measurements and state-of-the-art numerical methods, known as a hybrid model. In this paper, two hybrid models are developed, based on the use of separate source and propagation terms that are quantified using in situ measurements or modelling results. These models are implemented using term definitions proposed by the Federal Railroad Administration and assessed using the specific illustration of a surface railway. It is shown that the limitations of numerical and empirical methods can be addressed in a hybrid procedure without compromising prediction accuracy. © 2016.

Kurzeck, B. and M. Hecht (2010). "Dynamic simulation of friction-induced vibrations in a light railway bogie while curving compared with measurement results." *Vehicle System Dynamics* **48**(SUPPL. 1): 121-138.

It is a frequently observed phenomenon that curving of railway vehicles can involve friction-induced oscillations. The study presented in this paper investigates vibrations with a frequency of 80Hz occurring at a light rail vehicle in Stuttgart in curves with radii between 50 and 200m. The aim of the investigation was to identify the oscillation and transmission mechanism, and the dominant parameters within this. As the cause could not be clearly identified from the measurements, a multi-body simulation in the time domain was used. The model consisted of both vehicle and track and considered the structural dynamics of the wheelset and bogie frame up to 200Hz. The system was modelled using the commercial MBS software SIMPACK. The identified model describes the oscillations observed at the real vehicle. The results proved to be useful in minimising the vibrations at the real vehicles. © 2010 Taylor & Francis.

Lee, J. H., et al. (2012). "A semi-analytical approach to predict ground vibration by identification of soil properties and train-transit loads." *Advances in Structural Engineering* **15**(6): 1013-1029.

Train-induced ground vibration problems have become an important subject, as the number of the high speed railroad construction projects rapidly increases worldwide. Various numerical approaches have been proposed and used for the prediction of the train-induced ground vibration. However, the estimation performance has not been satisfactory due to the difficulty in modeling the train-transit loads on railroad structures and the structure-soil interaction system, which are essential for the accurate prediction of ground vibration. In this study, a new semi-analytical method was proposed for the prediction of ground vibration and the evaluation of environmental vibration levels with simple measurements of the ground vibration on the surface. The proposed method does not need any analytical model for inputting the train load. Instead, it identifies the effective train loads acting on the railroad track structure based on the measured ground responses at several locations and the numerical model of the structure-soil interaction system through the identification of the properties of the soil layers. Then, the effective train load is utilized as an input to the structure-soil interaction problem to predict the ground vibrations and the environmental vibration levels of the structures. A finite and infinite element model was utilized to solve the wave propagation problem in the soil medium in the frequency domain. Field validations were carried out at a site where Korea high-speed trains run over an elevated bridge structure. The predicted ground accelerations were found to be in good agreement with the measured data.

Lombaert, G., et al. (2015). Ground-borne vibration due to railway traffic: A review of excitation mechanisms, prediction methods and mitigation measures. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, Springer Verlag. **126**: 253-287.

The aim of this paper is to provide a comprehensive overview of the

state of the art on railway-induced ground vibration. The governing physical mechanisms, prediction methods, and mitigation measures of ground-borne vibration are discussed, with focus on low frequency feelable vibration and the case of railway traffic at grade. In order to clarify the importance of quasi-static and dynamic excitation, the basic problems of a moving load with constant magnitude and harmonic magnitude are discussed first. Dynamic excitation due to wheel and track unevenness and parametric excitation is shown to be the dominant source of environmental vibration in most cases. Next, an overview of prediction methods for ground-borne vibration is given. The advantages and limitations of numerical methods, based on physical or mechanical models, and empirical models, derived from measured data, are discussed. Finally, the mitigation of railway-induced ground vibration is considered, where the focus goes to mitigation measures at source (wheel and rail unevenness, rolling stock, track) and measures on the transmission path (trenches and barriers, wave impeding blocks, subgrade stiffening, and heavy masses next to the track). In conclusion, a number of open points requiring further research is given. © 2015 Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Lombaert, G., et al. (2012). A comparison of predicted and measured ground vibrations due to high speed, passenger, and freight trains. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. **118**: 231-238.

In March 2008, the SNCF has launched a blind prediction test for railway-induced ground vibration. The aim was to compare predictions from different numerical models to measured ground vibrations at a site along the LGV Atlantique and a site along the Paris-Bordeaux line. Apart from vibration measurements, SNCF has also performed tests and collected data for the determination of the input parameters of the prediction models. Based on these input parameters, the free-field vibrations have been predicted by means of a numerical model that has been developed at K.U.Leuven. This model takes into account the dynamic interaction between the train, the track and the soil. The track geometry is assumed to be invariant with respect to the longitudinal direction, allowing for an efficient numerical solution of the dynamic track-soil interaction problem in the frequency-wavenumber domain. Although a good qualitative agreement has been obtained between the predicted and measured vibration velocities, the ratio between the predicted and measured running RMS values of the vibration velocity is sometimes as high as 3 or 5. © 2012 Springer.

Lopes, P., et al. (2015). *Vibrations in buildings due to railway traffic in tunnels: Modelling strategies and influence of soil stiffness C3 - COMPDYN 2015 - 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, National Technical University of Athens.

In this paper a numerical study about the influence of soil stiffness on the assessment of vibrations induced by railway traffic in tunnels is performed. A comprehensive numerical model is used to achieve the lumped objective, where the source of vibration (train-track interaction), the propagation of vibrations (tunnel-ground system)

and their reception (building close to the railway infrastructure) are simulated by a sub-structuring approach. It was found that the soil stiffness plays a relevant role on the mechanisms of propagation of vibrations through the ground as well as on the soil-structure interaction. Regarding the last topic, different approaches were attended for the inclusion of the SSI effects, namely a detailed boundary elements formulation and a simplified lumped-parameter model. The study performed revealed that the usage of lumped parameter models can be faced as a good option taking into account the compromise between accuracy of the solution and reduction of the computation effort.

Lopes, P., et al. (2013). *An efficient numerical model for the simulation of vibrations induced by railway traffic in tunnels C3 - Recent Advances in Environmental Vibration - Proceedings of 6th International Symposium on Environmental Vibration, ISEV 2013*, Tongji University Press.

In the present paper a numerical procedure is presented in order to allow an efficient simulation of the vibrations induced by traffic from the source to the receiver (building). The numerical model is divided into three distinct parts, comprising the simulation of rolling stock, the simulation of the tunnel-ground system and the simulation of the building. The solution is obtained by a compliance formulation between the three sub-systems, developed in the frequency domain. Regarding the simulation of the tunnel-ground system, which deals with unbounded domain problem, an efficient solution is developed using a 2.5D technique based on the finite elements method, and adopting perfect matched layers (PML's) for the treatment of the boundaries due to the truncation of the; finite elements mesh. On the other hand, the rolling stock is modeled using a multi-body approach, being the building simulated by a traditional 3D finite element approach.

Lopes, P., et al. (2013). Numerical modeling of vibrations induced in tunnels: A 2.5D FEM-PML approach. *Traffic induced Environmental Vibrations and Controls: Theory and Application*, Nova Science Publishers, Inc.: 133-166.

The simulation and study of problems related with vibrations induced by railway traffic in tunnels is a difficult and complex task. The semi-infinite character of the domain surrounding the tunnel associated to the 3-dimensional characteristics of the problem is one of the major causes of that complexity. An efficient and accurate solution for the simulation of the dynamic behavior of very long structures, i.e., railways, roads or tunnel, is proposed by using 2.5D techniques in the context of the finite elements method, and adopting perfect matched layers (PML's) for the treatment of the boundaries due to the truncation of the finite elements mesh. Since the resource to 2.5D FEM-PML approach is not very usual, the equations of the 2.5D PML are derived, highlighting the compatibility with the 2.5D FEM. After that brief presentation of the model, a range of validation examples are depicted, showing the accuracy of the model. By last, a parametric study is presented in order to evaluate the influence of some tunnel and ground properties in the vibrations assessed at the ground surface. © 2013 by Nova Science Publishers, Inc. All rights reserved.

Lopes, P., et al. (2014). "Numerical modeling of vibrations induced by railway traffic in tunnels: From the source to the nearby buildings." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **61-62**: 269-285.

In this paper, a numerical approach for the prediction of vibrations induced in buildings due to railway traffic in tunnel is proposed. The numerical method is based on a sub-structuring approach, where the train is simulated by a multi-body model; the track-tunnel-ground system is modeled by a 2.5D FEM-PML approach; and the building by resort to a 3D FEM method. The coupling of the building to the ground is established taking into account the soil-structure-interaction (SSI). The methodology proposed allows dealing with the three-dimensional characteristics of the problem with a reasonable computational effort. Using the proposed model, a numerical study is developed in order to better discern the impact of the use of floating slabs systems for the isolation of vibrations in the tunnel on the dynamic response of a building located in the surrounding of the tunnel. The comparison between isolated and non-isolated scenarios allowed concluding that the mats stiffness is a key parameter on the efficiency of floating slab systems. Furthermore, it was found that the selection of the stiffness of the mats should be performed carefully in order to avoid amplification of vertical vibrations of the slabs of the building. © 2014 Elsevier Ltd.

Minsili, L. S., et al. (2013). "Analytical model of underground train induced vibrations on nearby building structures in Cameroon: Assessment and prediction." *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies* **12**(23): 63-82.

The purpose of this research paper was to assess and predict the effect of vibrations induced by an underground railway on nearby-existing buildings prior to the construction of projected new railway lines of the National Railway Master Plan of Cameroon and after upgrading of the railway conceded to CAMRAIL linking the two most densely populated cities of Cameroon: Douala and Yaoundé. With the source-transmitter-receiver mathematical model as the train-soil-structure interaction model, taking into account sub-model parameters such as type of the train-railway system, typical geotechnical conditions of the ground and the sensitivity of the nearby buildings, the analysis is carried out over the entire system using the dynamic finite element method in the time domain. This subdivision of the model is a powerful tool that allows to consider different alternatives of sub-models with different characteristics, and thus to determine any critical excessive vibration impact. Based on semi-empirical analytical results obtained from presented models, the present work assesses and predicts characteristics of traffic-induced vibrations as a function of time duration, intensity and vehicle speed, as well as their influence on buildings at different levels.

Montalban, L., et al. (2015). "Study of the influence of sleepers' material on track dynamics through numerical simulations." *Journal of Vibroengineering* **17**(7): 3832-3843.

Different track typologies compel different dynamic behaviors. Thus, the sleepers' material can play a key role in the wheel-rail contact forces and vibration generation phenomena. Furthermore, this

situation can be increased if the vehicle speed is varied, accelerating track damages and maintenance operations. In order to assess the influence of sleepers' materials and vehicle speed on the vibration generation phenomenon, this paper develops a vehicle-track interaction model by means of a Finite Elements model in ANSYS commercial software. The numerical model is calibrated and validated with real data and then used to compare the different response of a ballasted track with concrete and wooden sleepers and accelerating and braking trains in both time and frequency domains. The results indicate the importance of sleepers' stiffness in the vibration generation phenomenon as well as the low sensitivity of vertical deflections to variations in the train speed. © 2015 JVE International Ltd.

Murray, B. J. (2012). Advantages of 3-D vibration and ground-borne noise model. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. **118**: 375-382.

Airborne noise models are widely used for railway systems and most of these are based on 3-D calculations. In contrast, vibration and ground-borne noise levels are more often calculated using a 2-D model, often in the form of a spreadsheet. This is probably because of the lack of commercially available 3-D vibration and ground-borne noise models and also the implication of widely accepted reports and guidelines that levels can be predicted accurately using 2-D models that is, not to say that the widely accepted reports and guidelines recommend 2-D models, but they are often written in a form that allows the conclusion that 2-D models will suffice. © 2012 Springer.

Naeimi, M., et al. (2015). "3D dynamic model of the railway wagon to obtain the wheel-rail forces under track irregularities." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics* **229**(4): 357-369.

Employing a dynamic model of the railway wagon in three dimensions, this paper presents the results of dynamic wheel-rail forces under the presence of track irregularities. A mathematical model of the wagon system is developed using dynamic equations of the components, taking into account the vertical (bounce), pitch and roll motions of the system. The model examines the dynamics of the wagon system under arbitrary rail irregularities. The spectra of rail surface irregularities are fed into the vehicle model to extract the time histories of dynamic forces between the wheel and the rail. Using the irregularity spectra of left/right rails, vibration of the wheelsets is studied for the bounce-roll motions. The dynamic contact forces between wheels and rails are determined for three examples of the measured irregularities. Moreover, three V-shape defects are modelled as examples of the singular defects on rail surface. The results of dynamic simulations confirm the large amounts of impact forces due to the presence of rail irregularities, particularly for the cases with much unevenness between the left/right profiles. © IMechE 2015.

Ntotsios, E., et al. (2015). *Predictions of the dynamic response of piled foundations in a multi-layered half-space due to inertial and railway induced loadings C3 - COMPDYN 2015 - 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, National Technical University of Athens.

In this paper, the dynamic pile-soil-pile interaction (PSPI) in a multi-layered halfspace is investigated for the prediction of the response of piled foundations due to railway vibrations. Two methods of modelling piled foundations in a multi-layered half-space are presented. The first is an efficient semi-analytical model that calculates the Green's functions of the multi-layered half-space soil using the thin layer and the dynamic stiffness matrix methods. The second is a fully-coupled model that utilises the boundary element (BE) method to simulate the soil, where the Green's functions are calculated using the ElastoDynamics Toolbox (EDT). The paper aims to investigate the accuracy and the efficiency of the semi-analytical model by comparing the predictions of the two methods. A set of comparisons is performed, including the driving point response of a single pile and the interaction between two piles. The comparisons reveal that, at most frequencies, the semi-analytical model can predict the driving point response and the dynamic interaction with acceptable accuracy and computational efficiency. The model is then used for predicting the response of a pile-group due to the vibration field generated by a railway in varying distance from the piles. The vibration field generated by the railway is modelled as the superposition of the response due to harmonic loadings generated at the wheel-rail interface and the vibration response is examined at different points on the free surface away from the piles. The comparisons highlight the efficiency and accuracy of the semi-analytical model and illustrate its practical application.

Otero, J., et al. (2012). "A mathematical model to study railway track dynamics for the prediction of vibration levels generated by rail vehicles." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* **226**(1): 62-71.

This article presents a mathematical model aimed at predicting wheel-rail contact vibration force arising from wheel profile irregularities. Prediction of vibrations caused by a passing train is a basic factor in environmental impact studies related to planning new railway lines. The prediction model is useful during the development of a project as it facilitates selection of the most suitable track for reducing vibration levels. This article presents the model, analyses the influence of the track base on the vibration-generating mechanisms, and compares the dynamic behaviour of the most widely used urban railway tracks. © Authors 2011.

Otero Yugat, J., et al. (2011). *Development of an analytical model to study railway track dynamics for the calculation of vibration levels arising from the passage of rail vehicles C3 - Proceedings of the 13th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*.

The present paper presents the development of a numerical model designed for the prediction of vibrations generated by wheel-rail contact, caused fundamentally by wheel profile irregularities. The

knowledge of vibration levels due to the passage of a train is important for the design and implementation of new underground railway tracings, especially for the study of the environmental impact and for the selection of a suitable fixation of the track. In some railway networks, the train moves along a track supported by an intermediate concrete slab. In this sense, an analytical wheel-rail model is presented, which includes the impedance and the dynamic behavior of the concrete slab, with the aim to determine the interaction of the slab with the track. The global model allows studying the vibrations generated due to the passage of a train, and investigating the influence of the components and railway fixations in the generation and attenuation of vibrations. © Civil-Comp Press, 2011.

Part, et al. (2013). A coupled FE-TLE model for the prediction of subway train-induced ground-borne vibrations C3 - Applied Mechanics and Materials. **256-259**: 1221-1225.

A coupled finite element-thin layer element (FE-TLE) model for the prediction of subway induced vibrations was developed. With this model, the soil-tunnel system is divided into two parts, i.e., the tunnel structure and layered soil with a tunnel type hole. The tunnel structure is simulated by finite elements and the layered soils with hole by thin layer elements. The model fully accounts for the dynamic interaction between the tunnel and the soil. The numerical models for train-induced ground-borne vibrations were validated by in-situ experiments. © (2013) Trans Tech Publications, Switzerland.

Ralbovsky, M. and K. Alten (2013). *Predicting vibration immission using train simulation: A combination of experimental and numerical solutions to assess railway-induced vibrations prior to construction C3 - 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2013, INTER-NOISE 2013: Noise Control for Quality of Life, OAL-Osterreichischer Arbeitsring fur Larmbekampfung.*

Rail-bound traffic is the most prominent source of traffic-induced vibration in buildings and can become particularly challenging in densely populated areas. While vibrations represent a problem for critical infrastructure such as medical facilities or sensitive equipment and machinery, ground-borne noise can pose an additional nuisance in residential areas. Threshold values for either parameter can be found in several national and international norms which recommend limit values for human exposure to noise and vibration in buildings. ISO 14837-1:2005 describes the types of approaches available for predicting these immissions and classifies them as either parametric (algebraic or numerical) or empirical, or a combination of both. The patented Train Simulation method is one of the latter (semi-empirical) approaches and relies on a combination of experimental in-situ measurements to determine a transfer spectrum, along with a numerical calculation of vibration transfer in the time domain; the response to train emission signals is added up at the immission point to predict the incident vibration. Since normative methods for evaluation of vibration exposure make use of time-domain signals, the predictions can be directly used for such evaluations.

Real, J. I., et al. (2012). "Analysis of vibrations in a modeled ballasted track using measured rail defects." *Journal of Vibroengineering* **14**(2): 880-893.

Vibrations generated by trains and transmitted to the ground and nearby structures are a known source of problems associated with railway transport. Therefore this phenomenon should be studied in detail to avoid a negative impact on the environment. Within this framework, the article develops an improved version of a previously published analytical model capable of predicting ground vibrations caused by the passing railway vehicles. The new features include a new formulation of the models with five layers of material and an enhanced load input process that takes into account actual rail defects data as well as the Hertz theory for the rail-wheel contact. The model is adapted to a conventional ballasted track in Solares (Spain) as well as calibrated and validated with data collected on site. Hence the model is proved to be able to properly reproduce vibrations for the case of varying track typologies, constituting a useful research and design tool. © VIBROENGINEERING. JOURNAL OF VIBROENGINEERING.

Real, J. I., et al. (2011). "Modeling wave propagation through an analytical surface model." *Journal of Vibroengineering* **13**(4): 829-843.

Nowadays there is a certain development in the use of railway, especially in the form of trams and underground lines in urban areas. Despite its many advantages, this kind of transport is a significant source of vibrations, which may affect residents and buildings near to the track. Wave transmission through the ground is therefore a phenomenon of particular interest. The object of this article is to formulate and test an analytical model of vibration propagation through the terrain surface. The model is based on the wave equation and takes into account wave scattering and reflection in the interfaces between different soil layers. A sensitivity analysis of its main parameters is carried out, and then a comprehensive set of simulations is made to test model performance and analyze factors such as load magnitude and velocity or soil configuration. The model has proved to be an interesting instrument to study the vibration phenomenon from a theoretical point of view and some improvements are proposed to turn it into a tool for engineers and designers. © Vibroengineering.

Real, J. I., et al. (2015). "Development of a vehicle-track interaction model to predict the vibratory benefits of rail grinding in the time domain." *Journal of Modern Transportation* **23**(3): 189-201.

Imperfections in the wheel-rail contact are one of the main sources of generation of railway vibrations. Consequently, it is essential to take expensive corrective maintenance measures, the results of which may be unknown. In order to assess the effectiveness of these measures, this paper develops a vehicle-track interaction model in the time domain of a curved track with presence of rail corrugation on the inner rail. To characterize the behavior of the track, a numerical finite element model is developed using ANSYS software, while the behavior of the vehicle is characterized by a unidirectional model of two masses developed with VAMPIRE PRO software. The overloads obtained with the dynamic model are applied to the

numerical model and then, the vibrational response of the track is obtained. Results are validated with real data and used to assess the effectiveness of rail grinding in the reduction of wheel-rail forces and the vibration generation phenomenon. © 2015, The Author(s).

Real, T., et al. (2015). "Train-induced vibration prediction in tunnels using 2D and 3D FEM models in time domain." *Tunnelling and Underground Space Technology* **49**: 376-383.

The purpose of this study is to develop a 3D numerical FEM model of a railway tunnel to predict railway induced vibrations, which is calibrated and validated with in situ measurements. After that, two different 2D FEM models are constructed following the same assumptions as in the 3D model but different methodologies to introduce the loads. The results from the different models are used to determine the existing differences among each type of model, and the scope of each one. Vertical accelerations are obtained from each model and compared among them, concluding that the 3D FEM models provide more accurate results with a longer calculation time and require huge computational requirements. © 2015 Elsevier Ltd.

Romero, A., et al. (2012). *Non-linear simplified approach for the prediction of ground-borne induced vibration by railway traffic C3 - International Conference on Noise and Vibration Engineering 2012, ISMA 2012, including USD 2012: International Conference on Uncertainty in Structure Dynamics*, Katholieke Universiteit Leuven.

Dynamic soil-structure interaction is concerned with the study of structures supported on flexible soils and subjected to dynamic actions. Methods combining the finite element method (FEM) and the boundary element method (BEM) are well suited to address dynamic soil-structure interaction problems. Hence, FEM-BEM models have been widely used. However, non-linear contact conditions and non-linear behaviour of the structures have not usually been considered in the analyses. This paper presents a 3D non-linear time domain FEM-BEM numerical model designed to address soil-structure interaction problems. The BEM formulation, based on element subdivision and the constant velocity approach, was improved by using interpolation matrices. The FEM approach was based on implicit Green's functions and non-linear contact was considered at the FEM-BEM interface. Two engineering problems were studied with the proposed methodology: the propagation of waves in an elastic foundation and the dynamic response of a structure to an incident wave field. © (2012) by the Katholieke Universiteit Leuven Department of Mechanical Engineering All rights reserved.

Sanayei, M., et al. (2014). "Measurement and prediction of train-induced vibrations in a full-scale building." *Engineering Structures* **77**: 119-128.

Buildings located close to transportation corridors experience structure-borne sound and vibration due to passing traffic which can be disruptive to operation of sensitive equipment in manufacturing, and medical facilities. Structure-borne sound and vibrations, when high may also be annoying to human occupants in residential, office, and commercial buildings. Hence, there is a growing need for cost effective sound and vibration predictions to evaluate the need for

mitigation. The research focuses on in-situ testing of a full-scale building for verification of a previously developed impedance-based methodology and to create a prediction model to study ground-borne vibrations in the test building. A mitigation methodology was also examined using the verified prediction model. Impedance modeling involves the propagation of axial waves through columns combined with the impedance of the intermediate floor slabs. The vibration transmission in the building was characterized and predicted using a single column model with attached floors. Train-induced floor vibrations in an existing four-story building in Boston were measured and compared with predictions of the impedance model. The impedance model predictions closely matched with the measured floor responses. A previously suggested mitigation method was investigated analytically using the impedance model. A thickened floor referred as the "blocking floor" was used on the lower elevation of the building and the reduction in vibration at the upper floors of the building was compared for various thicknesses of the blocking floor, to study its efficiency. The blocking floor has high impedance and reflects a major portion of the vibration transmitting in the columns preventing it from reaching the upper floors. The blocking floor was found to mitigate the transmission of ground-borne vibrations to upper floors. © 2014 Elsevier Ltd.

Saurenman, H. and E. Roulo (2014). *Use of a "hybrid" empirical/finite element approach for predicting groundborne vibration from rail systems C3 - INTERNOISE 2014 - 43rd International Congress on Noise Control Engineering: Improving the World Through Noise Control*, Australian Acoustical Society.

The finite element method (FEM) is widely used in various engineering fields to model complex structures. Applying FEM to predict groundborne vibration from rail systems has been tested, but always has been limited by difficulty in characterizing soil properties. The empirical method developed in the 1980s (often referred to as the "FTA method") remains the standard approach used in North America to perform detailed predictions of groundborne vibration and to determine the need for vibration mitigation measures. The FTA method is based on in-situ vibration propagation tests and is almost always found to provide more accurate predictions than even the most complex computer models. This paper describes a "hybrid" approach that uses data from vibration propagation testing to refine input parameters for an FEM model. The basic steps are (1) perform a standard vibration propagation test, (2) develop an FEM model of the test configuration using estimated soil properties, (3) "tune" the properties of the FEM model to optimize the correlation with the test results, and (4) modify the FEM model to be a tunnel in place of a borehole. The accuracy of this hybrid approach and other approaches for using FEM models to improve predictions of groundborne vibration will be discussed.

Sezer, S. and A. E. Atalay (2011). "Dynamic modeling and fuzzy logic control of vibrations of a railway vehicle for different track irregularities." *Simulation Modelling Practice and Theory* **19**(9): 1873-1894.

Safe and comfortable transportation of passengers and goods on railways can be achieved by solving the vibration problem. In this

study, the dynamic modeling of the full railway vehicle is used to perform vibration analysis in order to observe displacements and accelerations. The full railway vehicle model consists of 54 degrees of freedom which are defined by differential equations. Additionally, wheel-rail contact problem (i.e. creepage factors and hertzian spring stiffness of rails) is analyzed by finite element method. Dynamic modeling and vibration analysis are carried out using Matlab-Simulink software. Using the developed model, the car body vibrations, caused by a lateral and two vertical sinusoidal track irregularities, are controlled by fuzzy logic controllers placed between the car body and bogies. The fuzzy logic algorithm herein is used for realizing the active control of car body vibrations. The simulations of vibration analysis are obtained in time and frequency domains and compared with passive controlled status. The robustness of the designed controller is verified by simulations, carried out for the cases of car body mass variations. The results show the effectiveness of the proposed algorithm. © 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.

Triepaischajonsak, N. and D. J. Thompson (2015). "A hybrid modelling approach for predicting ground vibration from trains." *Journal of Sound and Vibration* **335**: 147-173.

The prediction of ground vibration from trains presents a number of difficulties. The ground is effectively an infinite medium, often with a layered structure and with properties that may vary greatly from one location to another. The vibration from a passing train forms a transient event, which limits the usefulness of steady-state frequency domain models. Moreover, there is often a need to consider vehicle/track interaction in more detail than is commonly used in frequency domain models, such as the 2.5D approach, while maintaining the computational efficiency of the latter. However, full time-domain approaches involve large computation times, particularly where three-dimensional ground models are required. Here, a hybrid modelling approach is introduced. The vehicle/track interaction is calculated in the time domain in order to be able to account directly for effects such as the discrete sleeper spacing. Forces acting on the ground are extracted from this first model and used in a second model to predict the ground response at arbitrary locations. In the present case the second model is a layered ground model operating in the frequency domain. Validation of the approach is provided by comparison with an existing frequency domain model. The hybrid model is then used to study the sleeper-passing effect, which is shown to be less significant than excitation due to track unevenness in all the cases considered. © 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Triepaischajonsak, N., et al. (2011). "Ground vibration from trains: Experimental parameter characterization and validation of a numerical model." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* **225**(2): 140-153.

Trains running on railway tracks on the surface of the ground or in tunnels induce vibrations in the ground which propagate away from the track. These may be experienced as feelable vibration or as audible rumbling noise in the buildings nearby, both of which are

difficult to control. As the properties of the ground differ widely between locations they must be characterized for a particular site in order to make reliable predictions. This article describes field measurements of the vibration at two sites with soft clay soil in Southern England. The properties of the ground material, including its layered structure, have been identified from comparisons between results of a layered ground model and measurements obtained using impact excitation. Presentation in the wavenumber-frequency domain is particularly helpful for this purpose. Measurements of vibrations from passing trains are then compared with predictions using a semianalytical model for ground vibration from trains and good agreement is found.

Verbraken, H., et al. (2010). *Development of a hybrid prediction method for railway induced Vibration C3 - Proceedings of ISMA 2010 - International Conference on Noise and Vibration Engineering, including USD 2010*, Katholieke Universiteit Leuven.

The Detailed Vibration Assessment is an empirical procedure developed by the U.S. Federal Railroad Administration (FRA) for the prediction of railway induced vibrations and re-radiated noise. The vibration velocity level in the free field is predicted with a force density, characterizing the source, and a line transfer mobility, characterizing the transfer of vibrations due to a line load. The line transfer mobility is determined with in situ measurements of transfer functions. The force density is obtained by subtracting the line transfer mobility from the vibration velocity level due to a train passage. It is assumed that the resulting force density can be used to predict the vibration velocity level at other sites with similar train and track characteristics. In this paper, the force density is calculated numerically by simulating the FRA procedure with a numerical method. The force densities are obtained by subtracting the line transfer mobility from the vibration velocity level, computed at three sites with different soil characteristics. Next, each force density is used for a prediction of the vibration velocity level at another site. It is shown that the influence of the soil characteristics on the force density and the predicted vibration velocity level is relatively large. When a prediction is needed at a certain site, the force density should therefore be determined at a site with similar soil conditions. In case that no appropriate force density can be determined experimentally, the force density can be computed numerically by simulating the FRA procedure, as demonstrated in this paper. The numerical force density can be combined with an experimental line transfer mobility, resulting in a hybrid numerical-experimental prediction of the vibration velocity level.

Verbraken, H., et al. (2010). *Assessment of an empirical prediction method for railway induced vibrations by numerical simulations C3 - Proceedings of the Institute of Acoustics*.

Verbraken, H., et al. (2011). *Numerical and empirical prediction methods for railway induced vibrations in buildings C3 - Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURO-DYN 2011*, University of Southampton, Institute of Sound Vibration and Research.

Ground borne vibration in buildings due to railway traffic is a major concern in densely built up areas. In practice, railway induced vibration is often predicted by means of empirical methods such as the Detailed Vibration Assessment developed by the U.S. Federal Railroad Administration (FRA). The vibration velocity level in a building is predicted based on a separate characterization of the source, the wave propagation and the receiver. They are characterized by a force density, a line transfer mobility and a coupling loss factor, respectively. While the line transfer mobility is determined directly with in situ measurements of transfer functions, the force density and the coupling loss factor are obtained indirectly. In this paper, a numerical model is used to simulate the experimental FRA procedure. The influence of the soil properties on the coupling loss factor is investigated by computing the coupling loss factor on three sites with different soil conditions. Each coupling loss factor is used to predict the vibration velocity level and the result is compared to a numerical prediction such that the accuracy of the procedure can be investigated. It turns out that the soil has a large influence on the coupling loss factor, as the reduction of the vibration velocity level between the free field and the foundation is affected by the relative stiffness of the building and the soil. Furthermore, the coupling loss factor strongly depends on the position of the point where it has been measured.

Verbraken, H., et al. (2011). *A numerical simulation of an experimental prediction method for railway induced vibration in buildings C3 - Advances in Environmental Vibration - Proceedings of the 5th International Symposium on Environmental Vibration, ISEV 2011*, Science Press.

Ground borne vibration in buildings due to railway traffic is a major concern in densely built up areas. In practice, railway induced vibration is often predicted by means of empirical methods such as the Detailed Vibration Assessment developed by the U. S. Federal Railroad Administration (FRA). The vibration velocity level in a building is predicted based on a separate characterization of the source, the wave propagation and the receiver. They are characterized by a force density, a line transfer mobility and a coupling loss factor, respectively. While the line transfer mobility is determined directly with in situ measurements of transfer functions, the force density and the coupling loss factor are obtained indirectly. They are influenced, however, by several parameters such as the dynamic soil properties. In this paper, the influence of the soil properties on the experimental determination of the coupling loss factor is investigated by means of a numerical simulation of the FRA procedure. The results show that the soil has a large influence on the coupling loss factor, as the reduction of the vibration velocity level between the free field and the foundation is affected by the relative stiffness of the building and the soil.

Verbraken, H., et al. (2011). *Verification of an empirical prediction method for ground borne vibrations in buildings due to high speed railway traffic C3 - ECCOMAS Thematic Conference - COMPDYN 2011: 3rd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering: An IACM Special Interest Conference, Programme.*

Ground borne vibration in buildings due to railway traffic is a major concern in densely built up areas. In practice, railway induced vibration is often predicted by means of empirical methods such as the Detailed Vibration Assessment developed by the U.S. Federal Railroad Administration (FRA). The vibration velocity level in a building is predicted based on a separate characterization of the source, the wave propagation and the receiver. They are characterized by a force density, a line transfer mobility and a coupling loss factor, respectively. While the line transfer mobility is determined directly with in situ measurements of transfer functions, the force density and the coupling loss factor are obtained indirectly. In this paper, a numerical model is used to simulate the experimental FRA procedure. The influence of the soil properties on the coupling loss factor is investigated by computing the coupling loss factor on three sites with different soil conditions. Each coupling loss factor is used to predict the vibration velocity level and the result is compared to a numerical prediction such that the accuracy of the procedure can be investigated. It turns out that the soil has a large influence on the coupling loss factor, as the reduction of the vibration velocity level between the free field and the foundation is affected by the relative stiffness of the building and the soil. Furthermore, the coupling loss factor strongly depends on the position of the point where it has been measured.

Verbraken, H., et al. (2011). "Verification of an empirical prediction method for railway induced vibrations by means of numerical simulations." *Journal of Sound and Vibration* **330**(8): 1692-1703.

Vibrations induced by the passage of trains are a major environmental concern in urban areas. In practice, vibrations are often predicted using empirical methods such as the detailed vibration assessment procedure of the Federal Railroad Administration (FRA) of the U.S. Department of Transportation. This procedure allows predicting ground surface vibrations and re-radiated noise in buildings. Ground vibrations are calculated based on force densities, measured when a vehicle is running over a track, and line source transfer mobilities, measured on site to account for the effect of the local geology on wave propagation. Compared to parametric models, the advantage of this approach is that it inherently takes into account all important parameters. It can only be used, however, when an appropriate estimation of the force density is available. In this paper, analytical expressions are derived for the force density and the line source transfer mobility of the FRA procedure. The derivation of these expressions is verified using a coupled finite elementboundary element method. © 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Verbraken, H., et al. (2012). "Experimental and numerical prediction of railway induced vibration." *Journal of Zhejiang University: Science A* **13**(11): 802-813.

In this paper, both measurements and numerical simulations of railway induced vibration are discussed. A measurement campaign has been carried out along the high-speed railway track in Lincen, Belgium. The experimental determination of transfer functions and vibration velocity during train passages are discussed. A numerical model is introduced to predict the transfer functions and the vibration velocity during train passages. The comparison of experimental and numerical results demonstrates the importance of accurate numerical models and input data. The results are obtained in the framework of the development of a hybrid prediction method, where numerical and experimental data can be combined to improve the prediction accuracy for railway induced vibration. © Zhejiang University and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012.

Verbraken, H., et al. (2015). The prediction of vibration transfer for railway induced ground vibration. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, Springer Verlag. **126**: 245-252.

The project Railway Induced Vibration Abatement Solutions (RIVAS) is carried out under the EU's Seventh Framework Programme for Research and aims at reducing the environmental impact of ground-borne vibration from railway traffic. Within the frame of the RIVAS project, an experimental procedure has been established to assess the efficiency of different mitigation measures for railway induced vibration. As an alternative to the experimental assessment, the performance of mitigation measures is often assessed relying on numerical simulations, which requires an accurate prediction of the vibration transfer. Benchmark tests are therefore carried out to investigate to what extent the vibration transfer can be predicted based on preliminary site investigation. In this paper, the results are presented for a site in El Realengo (Spain). First, the free field transfer functions are predicted based on a soil profile identified from geophysical tests. After updating of the material damping ratio, good prediction accuracy is obtained. Next, the track is included in the analysis. The track parameters strongly influence the track receptance and are therefore updated based on the measured track receptance under loaded conditions. The track – free field transfer functions are only slightly affected by the track parameters and are predicted accurately. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015.

Villot, M., et al. (2016). "Vibration emission from railway lines in tunnel – characterization and prediction." *International Journal of Rail Transportation*: 1-21.

A method for characterizing and predicting vibration emission from railway lines in tunnels is presented. The characterization method consists in measuring both the tunnel vibration response during train pass-by events and the tunnel effective mobility (mobility combining point and transfer mobilities), from which the line of uncorrelated forces characterizing the source can be calculated. The results from field measurements of commuter train operations are presented and improved using a numerical tunnel/ground model. The transfer of an existing situation to a new one is performed using two different

train/track/tunnel models. The situation change is expressed in terms of difference in the force density applied to the tunnel invert between the original and the new situation. The track models are first calibrated from the characterization field measurements and then used to estimate a given situation change. The results of the two models/procedures compare rather well, thus cross-validating the approaches. © 2016 Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group

Villot, M., et al. (2014). Prediction of railway induced vibration and ground borne noise exposure in building and associated annoyance. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, Springer Verlag. **126**: 289-296.

This paper presents the prediction model used in the European project RIVAS to evaluate the performances of the mitigation measures in reducing railway induced vibration and ground borne noise inside buildings. A robust empirical model (Vibra-2 from SBB) has been used, with the help of (i) a ground structure calculation model (MEFISSTO from CSTB) to estimate the effect of ground and building foundation changes on vibration immission, and (ii) building acoustics theory to estimate ground borne noise from floor vibration. The paper also presents the exposure descriptors and the associated exposure-response relationships chosen to evaluate the mitigation measures inside buildings in terms of attenuation of vibration and ground borne noise exposure and corresponding decrease of annoyance. Four exposure descriptors have been used: maximum values and equivalent values of both Wm-weighted vibration and A-weighted ground borne noise; an idealized exposure-response curve, the same for all descriptors has been retained, with target values deduced from existing exposure-response curves. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015.

Villot, M., et al. (2011). *Modeling a building response to railway vibration using a source-receiver approach C3 - Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2011*, University of Southampton, Institute of Sound Vibration and Research.

Railway lines are a very common source of environmental vibration often leading to human exposure to vibration in buildings. There is a need for methods to understand and predict the building response to such ground borne vibration sources. The method proposed is based on a source-receiver approach, where the "source" includes the excited surrounding ground and the building foundations, and the "receiver" is the building upper structure. The approach is applied to a 2D ground building configuration, where the "source" (ground and building foundations) is modeled in 2D 1/2 in order to get correct ground propagation and foundation vibration levels, using a FEM BEM ground/structure model. The building upper structure response is estimated using different models, all purely structural: FEM model, analytical beam model, and simplified model combining wave approach and SEA. The results presented in this paper show that the source-receiver method allows connecting the "source" to different model types of the building upper structure and gives rather comparable results except for the simplified model. The source receiver approach allows separating bending and longitudinal

excitations, which shows the dominance of longitudinal excitation in the vibration propagation to the upper floors of the multi storey building considered.

Villot, M., et al. (2010). *Modelling the influence of building types on the building response to railway vibration C3 - 39th International Congress on Noise Control Engineering 2010, INTER-NOISE 2010.*

A 2D BEM/FEM ground structure vibration interaction model is used to estimate the influence of building types on the building response to railway vibration. The results are expressed in terms of transfer function between free field ground vibration and building floor vibration. The ground/structure model is first experimentally validated from field measurements of ground and building vibration performed near railway and then used in a parametric study to evaluate the influence of floor thickness and span, as well as the thickness of buried walls and façades. Real railway ground signals are finally used to compare the results in terms of currently used vibration exposure indicators.

Wang, B., et al. (2012). Predicting the vehicle induced building vibration by multi-source fuzzy dynamic analysis C3 - Lecture Notes in Electrical Engineering. **148 LNEE**: 427-441.

The structure vibration induced by building base dynamic excitation often has harmful effect to the comfort of residents or the applicability of precise instrument inside. So, predicting the proposed building vibration is necessary. This paper presents a new method based on multi-source fuzzy finite element dynamic analysis to predict the building vibration caused by traffic loads of vehicles. The uncertain parameters of the dynamic function are the fuzzy sources including structural mass, stiffness, damping matrix and the excitation magnitude on the structure base. The fuzzy dynamic characteristics and frequency response function with multi-source fuzzy number are discussed. Finally, the example with fuzzy excitation on structure base is given. Some key steps of this method are contained: 1) the acquisition of the vibration acceleration data of the ground excitation, 2) the analysis of the one-third octave band power spectrum density of the test data, 3) the construction the fuzzy source membership functions of favorite center frequencies of the one-third octave band, 4) the construction of fuzzy finite element dynamic model of the building which residents complaining. 5) the analysis of the fuzzy membership function of finite element dynamic model response, 6) the overall weighted root-mean-square acceleration value in α -sublevel of fuzzy number by ISO2631-1,2 standard. © 2012 Springer-Verlag.

Wanming, Z., et al. (2010). "Prediction of high-speed train induced ground vibration based on train-track-ground system model." *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* **9**(4): 545-554.

The development of analysis on train-induced ground vibration is briefly summarized. A train-track-ground integrated dynamic model is introduced in the paper to predict the ground vibration induced by high-speed trains. Representative dynamic responses of the train-track-ground system predicted by the model are presented. Some major results measured from two field tests on the ground vibration

induced by two high-speed trains are reported. Numerical prediction with the proposed train-track-ground model is validated by the high-speed train running experiments. Research results show that the wheel/rail dynamic interaction caused by track irregularities has a significant influence on the ground acceleration and little influence on the ground displacement. The main frequencies of the ground vibration induced by high-speed trains are usually below 80 Hz. Compared with the ballasted track, the ballastless track structure can produce much larger train-induced ground vibration at frequencies above 40 Hz. The vertical ground vibration is much larger than the lateral and longitudinal components. © 2010 Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration and Springer Berlin Heidelberg.

Xia, H., et al. (2010). "Theoretical modeling and characteristic analysis of moving-train induced ground vibrations." *Journal of Sound and Vibration* **329**(7): 819-832.

An integrated train-track-subsoil dynamic interaction model of moving-train induced ground vibration is developed on the basis of vehicle dynamics, track dynamics and the Green's functions of subsoil. The model takes account of the vibrations of vehicle components, the quasi-static axle loads and the dynamic excitations between the wheels and track. The analyzed results from an example show that the ground vibration characteristics have a close relationship with train speed and soil properties; the dynamic responses excited by wheel-track irregularity have big influence on the high frequency components of ground vibration; with the increase of distance to the track, the ground acceleration has the tendency of decrease, and the relevance of acceleration curves and train excitation becomes less obvious; the intersections of moving load speed-lines and subsoil dispersion curves are some resonance frequencies that cause the amplification of ground vibrations; there exists a critical speed for moving train that is close to the minimum velocity of the Rayleigh's wave in the subsoil. © 2009 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Xu, Q., et al. (2015). "Comparison of 2D and 3D prediction models for environmental vibration induced by underground railway with two types of tracks." *Computers and Geotechnics* **68**: 169-183.

In this paper, two-dimensional (2D) and new types of three-dimensional (3D) prediction models of environmental vibrations induced by underground railways with a direct fixation track and steel spring floating slab track are developed and verified. The ground surface responses calculated by the 2D prediction models with various equivalent forces are compared with those calculated by the 3D prediction models. The numerical results show that (a) the ratio of the computational time by the 2D prediction models to that by the 3D prediction models is less than 1/600; thus, the 2D prediction models can quickly provide useful results; (b) the equivalent forces in the 2D prediction models are key and are recommended for use as the equivalent wheel-rail force and equivalent steel spring force averaged over a vehicle length for an underground direct fixation track and steel spring floating slab track, respectively; and (c) the accuracy of the 3D prediction models is

greater than that of the 2D prediction models; therefore, the 3D prediction models are required for absolute prediction due to their higher accuracy and applicability in a wider range of complex practical problems. © 2015.

Yang, Y. B., et al. (2010). *2.5D finite/infinite element approach for simulating train-induced ground vibrations C3 - AIP Conference Proceedings*.

The 2.5D finite/infinite element approach for simulating the ground vibrations by surface or underground moving trains will be briefly summarized in this paper. By assuming the soils to be uniform along the direction of the railway, only a two-dimensional profile of the soil perpendicular to the railway need be considered in the modeling. Besides the two in-plane degrees of freedom (DOFs) per node conventionally used for plane strain elements, an extra DOF is introduced to account for the out-of-plane wave transmission. The profile of the half-space is divided into a near field and a semi-infinite far field. The near field containing the train loads and irregular structures is simulated by the finite elements, while the far field covering the soils with infinite boundary by the infinite elements, by which due account is taken of the radiation effects for the moving loads. Enhanced by the automated mesh expansion procedure proposed previously by the writers, the far field impedances for all the lower frequencies are generated repetitively from the mesh created for the highest frequency considered. Finally, incorporated with a proposed load generation mechanism that takes the rail irregularity and dynamic properties of trains into account, an illustrative case study was performed. This paper investigates the vibration isolation effect of the elastic foundation that separates the concrete slab track from the underlying soil or tunnel structure. In addition, the advantage of the 2.5D approach was clearly demonstrated in that the three-dimensional wave propagation effect can be virtually captured using a two-dimensional finite/infinite element mesh. Compared with the conventional 3D approach, the present approach appears to be simple, efficient and generally accurate. © 2010 American Institute of Physics.

Yao, H. L., et al. (2015). "Prediction of Ground Vibration from High Speed Trains Using a Vehicle–Track–Ground Coupling Model." *International Journal of Structural Stability and Dynamics*.

The dynamically induced ground vibration from high speed trains (HSTs) is investigated using a semi-analytical vehicle–track–ground coupling model. A multi-body vehicle is adopted along with rail irregularity considered in the model. The soil is simulated as a saturated poroelastic half-space with two elastic layers. The coupling system is solved in the transformed domain by applying the Fourier transform, and the dynamic stiffness matrix method is used to deal with the layered soil. The time-domain solutions are obtained by the inverse fast Fourier transform (IFFT). The effects of the vehicle speed, observation location, rail irregularity, subgrade-bed stiffness, and vehicle type on the ground vibration are investigated thoroughly. The results show that all these factors can significantly affect the dynamically induced ground vibration. © 2016 World Scientific Publishing Company

Zhang, G. M., et al. (2013). The dividing frequency bands prediction method based on bornitz model for train-induced environmental vibration and its application C3 - *Advanced Materials Research*. **748**: 581-584.

The frequency component of ground vibration induced by train is complex. The propagating attenuation characteristics of ground vibration are dependent on frequency. A new prediction method based on Bornitz model for predicting the train-induced ground vibration is presented in this paper. This approach divides the frequency component into many small frequency bands according to one-third-octave. Then it predicts the vibration acceleration level VAL of each frequency bands based on Bornitz model respectively. Finally, the predicted value of Z-vibration level VLZ is computed by the predicted value of VAL and the corresponding frequency-weighting value C. The train-induced ground vibration was measured and predicted in Chengdu-Dujiangyan railway. The results of comparing the predicted value of VLZ with the measured value show that the prediction value of VLZ is 3.8dB less than the measured value in the prediction point of 25m away from the railway, where the vibration strength occur rebound. In other five prediction points the ground vibration predicted value are 1.3~3.1dB more than measured value. This study shows that using the prediction method presented in this paper for predicting train-induced ground vibration has good accuracy on the whole. © (2013) Trans Tech Publications, Switzerland.

Zhu, H. L., et al. (2013). Dynamic simulation of ballastless railway track system with local invalid sleepers C3 - *Applied Mechanics and Materials*. **423-426**: 1217-1220.

Considering local sleepers supported invalidly, the dynamic analysis is presented for ballastless railway track system subjected to moving loads. The track is modeled as an infinitely Euler-Bernoulli beam with Kelvin viscoelastic foundation. The restrain conditions of system change suddenly at unsupported sleepers. Numerical simulating was carried out by the finite element discrete and Newmark's- β method. Dynamic responses of system were analyzed in the case of single or multi-sleeper to be not working properly. Results show that the maximum value of displacement of track is going up 50% approximately due to an invalid sleeper occurring. The amplitude of vibration is two times increase when three sleepers to be hung up. Hence, there would be a bad effect on the vibration control of ballastless railway track system as some sleepers lose efficacy continuously. © (2013) Trans Tech Publications, Switzerland.

Zhu, M., et al. (2013). "Advanced stochastic modeling of railway track irregularities." *Advances in Mechanical Engineering* **2013**.

As an important interference source of railway vibration, track irregularity is studied in this paper. It is presented that irregularities in the vertical profile and alignment can be modeled as a Gaussian random process. The power spectral density (PSD) of the irregularity is calculated and discussed. By analyzing the model, level-crossing properties as well as peak statistics are studied and compared with the observed data. © 2013 Mengyi Zhu et al.

Zougari, A., et al. (2012). *Vibration response of a railway track obtained using numerical models based on FEM C3 - MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences.

In the last forty years, researchers have developed models of wheel-rail contact force in order to study vibrations and rolling noise caused by railway traffic. These models range from analytical models, who consider a single rail of a railway track in contact with a rigid wheel attached to the bogie by means of the primary suspension, to numerical models based on finite element methods, boundary element, and mixed methods. Unlike analytical models, numerical models allow us to characterize more precisely the different components of railway track structure and consider the interaction between the entire track and a complete vehicle wheel-set. The study of the elements constituting the set of the railway track, the wheel-set and the primary suspension, as well as the knowledge of their influence in vibration generation and transmission due to train passage is of great interest when evaluating the possible vibration effects in the railway surrounding areas. This paper presents a numerical model of the track structure based on the finite element method. It is devoted to the study of the vibration response caused by vertical forces applied at any location on the rails. The numerical results are compared with analytical results previously presented in the bibliography. © Owned by the authors, published by EDP Sciences, 2012.

RIVM

De zorg voor morgen begint vandaag