

Dynamische nadelige effecten van trillingsreducerende maatregelen

Aanvulling Maatregelcatalogus spoortrillingen



Dynamische nadelige effecten van trillingsreducerende maatregelen

Aanvulling Maatregelcatalogus spoortrillingen

dr.ir. P. Holscher

11200206-000

Titel

Dynamische nadelige effecten van trillingsreducerende maatregelen

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
ProRail Moreelsepark 3 3511 EP Utrecht	11200206-000	11200206-000-GEO-0003- jvm	49

Trefwoorden

Trillingshinder, spoorwegen, trillingsreducerende maatregelen, literatuur

Samenvatting

Als omwonenden hinder ervaren van trillingen die door treinverkeer veroorzaakt worden, kunnen trillingsreducerende maatregelen wenselijk zijn. Om het ontwerpen van trillingsreducerende maatregelen te faciliteren heeft ProRail een Maatregelcatalogus spoortrillingen opgesteld, waarin de ontwerper verschillende basisinformatie voor het ontwerp van een maatregel kan vinden.

Uit de ervaring met trillingsreducerende maatregelen blijkt dat de effectiviteit van maatregelen regelmatig afwijkt van de verwachting. Dit is voor ProRail reden geweest om zogenaamde dynamische neveneffecten van maatregelen op te nemen in de Maatregelcatalogus.







Dit rapport geeft op basis van literatuuronderzoek en basis dynamica modellen inzicht in mogelijke oorzaken van afwijkend gedrag van trillingsreducerende maatregelen. Per groep maatregelen wordt aangegeven hoe de neveneffecten in de Maatregelcatalogus spoortrillingen voor de groep optreden. Meer in het algemeen wordt geadviseerd om de onzekerheid die in dynamische berekeningen aanwezig is expliciet in de beoordeling van maatregelen mee te nemen.

In hoofdstuk 8 is een uitgebreide samenvatting gegeven van deze rapportage. Deze samenvatting is geschreven voor niet-specialisten.

Referenties

Offerte Deltares: 11200206-000-GEO-0001-gbh dd. 28 oktober 2016

Opdracht ProRail: 3143938 dd. 06.02.2017

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	april 2017	dr.ir. P. Holscher		ir. drs. J. van Ruijven		ir. drs. J. van Ruijven	
2	mei 2017	dr.ir. P. Holscher		ir. J.C. Landwehr		ir. drs. J. van Ruijven	

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Aanpak	1
1.4	Leeswijzer	2
2	Inleiding voor niet-specialisten	3
2.1	Inleiding	3
2.2	Begrippen snelheid en frequentie	3
2.3	Trillingen van treinverkeer	4
2.4	Werkingsprincipes van trillingsreducerende maatregelen	5
2.5	Modelleren van spoortrillingen en trillingsreducerende en	5
2.6	Onverwachte dynamische effecten	6
3	Werkingsprincipes en groepsindeling	7
3.1	Inleiding	7
3.2	Maatregelen aan de bronzijde	7
3.2.1	Verkleining van de excitatie	7
3.2.2	Wijzigingen van het excitatie systeem	8
3.3	Invloed overdracht	10
3.4	Maatregelen bij de ontvanger	10
3.5	Samenvatting	11
4	Review literatuur Maatregelcatalogus spoortrillingen	12
4.1	Inleiding	12
4.2	Globale scan	12
4.2.1	Aanpak	12
4.2.2	Conclusie	12
4.3	Maatregelen aan de bron	13
4.3.1	Invloed verende materialen bij spoor in ballast	13
4.3.2	Algemene vergelijking trillingsreducerende maatregelen in het spoor	14
4.3.3	Metten efficiëntie maatregelen aan het spoor met kunstmatige excitatie	14
4.3.4	Stijfheid van de ballast en voorbeeld twee-massa-veer systeem	15
4.3.5	Trillingen bij een wissel	16
4.3.6	Slab track en floating slab track	17
4.4	Maatregelen in de bodem	18
4.4.1	Numerieke vergelijking trillingsreducerende constructies in de ondergrond	18
4.4.2	Ontwerp en effectiviteit van trillingsreducerende constructies	18
4.4.3	Energie beschouwing	19
4.5	Maatregelen aan het pand	20
5	Analyse maatregelen	21
5.1	Inleiding	21
5.2	Maatregelen aan de bron	21
5.2.1	Verkleinen excitatie / aanbrengen extra buigstijfheid	21
5.2.2	Verlagen verticale stijfheid	22
5.2.3	Toevoegen van massa aan spoorconstructie	23

5.3	Maatregelen aan de overdracht	24
5.3.1	Stijve trillingswand als 1-D element	24
5.3.2	Een wand van EPS als 1-D element	25
5.4	Maatregelen aan het pand	27
5.4.1	Stijfheid vloeren en wanden	27
5.4.2	Verende opleggingen	29
6	Keteninvloed en onzekerheden	31
6.1	Inleiding	31
6.2	Keteninvloed	31
6.3	Sommatie van twee trillingen	31
6.3.1	Theorie	31
6.3.2	Voorbeeld toepassing 1: korte wand	34
6.3.3	Voorbeeld toepassing 2: vloer resonantie	36
6.4	Afmetingen pand en afstand tot de bron	36
6.5	Betrouwbaarheid berekeningen	38
6.6	Opmerking over demping	40
7	Conclusies en aanbevelingen	42
7.1	Conclusies	42
7.2	Aanbevelingen voor de Maatregelcatalogus spoortrillingen	43
7.3	Algemene aanbeveling	45
8	Samenvatting voor de niet-specialist	46
	Bijlage(n)	
A	Referenties	A-1
B	Overzicht documenten in de maatregel catalogus	B-1
C	Mogelijk relevante aspecten	C-1
C.1	Rand effecten	C-1
C.2	Niet-lineariteiten	C-1
C.3	De gebruikte schaal	C-1
C.4	Kritische treinsnelheid	C-1
C.5	Gelaagde bodem	C-1
D	Overzicht maatregelen in de Maatregelcatalogus spoortrillingen	D-1

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Als gevolg van de maatschappelijke aandacht voor trillingen door treinverkeer hebben het Ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM) en ProRail initiatieven genomen om zorgen en bezwaren van omwonenden beter af te handelen. Eén van deze acties is het opstellen van een Maatregelcatalogus om maatregelen ter beperking van trillinghinder van het spoor en de mogelijkheden voor toepassing daarvan in de praktijk in beeld te brengen. Deze Maatregelcatalogus spoortrillingen (1) is in 2015 aan het ministerie van IenM aangeboden met daarbij een aanbeveling voor vervolgonderzoek (2). De aanbevelingen zijn onderverdeeld in de rubrieken “Instrumenten” en “Onderzoek en ontwikkeling”. Voor twee van de aanbevelingen binnen de rubriek “Onderzoek en ontwikkeling, nl. voorstel 7 “Neveneffecten van trillingsmaatregelen” en voorstel 8 “(On-)bekende nadelen van de inzet van trillingsreducerende maatregelen”, is aan Deltares gevraagd invulling te geven middels opdracht 3143938 d.d. 06-02-2017 gebaseerd op de Deltares offerte met kenmerk 11200206-000-GEO-0001 d.d. 28 oktober 2016.

Door Deltares zijn 2 rapportages opgeleverd die aansluiten bij de eerder genoemde aanbevelingen:

- Dynamische neveneffecten van trillingsreducerende (dit rapport).
- Niet-dynamische nadelige effecten van trillingsreducerende maatregelen maatregelen (gerapporteerd in Deltares document 11200206-000-GEO-0003).

Dit rapport richt zich op de dynamische neveneffecten van trillingsreducerende maatregelen. Dit zijn onverwachte effecten waardoor trillingsreducerende maatregelen minder effectief of juist effectiever zijn dan verwacht.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van het onderzoek is:

- Het opstellen van overzichtslijsten met te beschouwen neveneffecten voor de maatregelen uit de Maatregelcatalogus spoortrillingen.
- Kwalitatieve invulling van neveneffecten t.b.v. een aanvulling op de Maatregelcatalogus spoortrillingen.

1.3 Aanpak

De basis van de aanpak is de bron-pad-doel benadering, die ook in de Maatregelcatalogus gebruikt is. De volgende stappen worden doorlopen:

- 1 De maatregelen uit de catalogus worden op basis van hun werkingsprincipe in groepen ingedeeld.
Resultaat: groepsindeling maatregelen en basale beschrijving werking principes.
- 2 Per groep beoordelen van de (in de catalogus beschikbare) literatuur en eventuele nieuwe verzamelde literatuur.
Resultaat: overzicht cases uit literatuur met benodigde details (o.a. afmetingen, materiaal eigenschappen, rekenmethodes).
- 3 Op basis van het werkingsprincipe van de maatregel wordt aangegeven onder welke voorwaarden een maatregel kan werken en wat er mogelijk gebeurt als niet aan de

voorwaarden voldaan is. In deze fase wordt de maatregel als losstaand element beschouwd.

Resultaat: inzicht in de toepasbaarheid van maatregelen in verschillende situaties.

- 4 Tot slot wordt nagegaan hoe een maatregel in het totale dynamische systeem kan reageren en welke bijdrage en bedreiging dit kan geven voor de effectiviteit van een maatregel.

Resultaat: aanvulling inzicht in de toepasbaarheid van maatregelen in verschillende situaties.

1.4 Leeswijzer

Het rapport heeft de volgende opbouw:

Hoofdstuk 2 geeft een inleiding op de problematiek. Deze is zo opgesteld dat deze ook leesbaar is voor een lezer die geen specialist in het onderwerp van dit rapport. Enkele basis begrippen worden behandeld en de gedachtegang achter de gangbare modellering wordt toegelicht. Ten slotte wordt op basis van deze algemene uitwerking in dit hoofdstuk het begrip “onverwachte dynamische effecten” beschreven.

In hoofdstuk 3 worden de in de catalogus opgenomen maatregelen gegroepeerd op basis van het werkingsprincipe. De verwachting is dat maatregelen met hetzelfde werkingsprincipe als identiek behandeld kunnen worden.

De maatregelen catalogus bevat een uitgebreide literatuurlijst. Alle literatuur is kort bekeken en gerubriceerd op basis van bruikbaarheid voor het onderzoek dat in dit rapport wordt beschreven in paragraaf 4.2. Op basis van deze beoordeling is een beperkte keuze nader beoordeeld in de overige paragrafen in hoofdstuk 4.

In hoofdstuk 5 worden de maatregelen afzonderlijk per groep verder beoordeeld. Dit gebeurt aan de hand van basis mechanicamodellen. Deze zijn niet bedoeld om prognoses mee uit te voeren. Het idee is dat de modellen toelichten welke aspecten een rol spelen bij een maatregel en waarom de verschillen tussen de prognoses met geavanceerde modellen en de werkelijkheid onverwacht groot zijn. Geavanceerde modellen bevatten een integrale aanpak met alle aspecten. Deze lenen zich daarom beter om prognoses te doen, maar juist minder om de basale aspecten toe te lichten.

In hoofdstuk 6 worden een aantal overige aspecten behandeld. Het betreft o.a. de gevolgen van het feit dat trillingen door het hele systeem bron-pad-ontvanger lopen en een aantal bijzondere aspecten.

Het rapport sluit af met de conclusies en aanbevelingen. In hoofdstuk 7 zijn deze in overeenstemming met de aanpak in de hoofdstukken 4 tot en met 6 uitgewerkt. In hoofdstuk 8 is een samenvatting voor de niet-specialist opgenomen, als vervolg op hoofdstuk 7.

2 Inleiding voor niet-specialisten

2.1 Inleiding

De theorie die in dit rapport wordt beschreven, veronderstelt dat de lezer bekend is met de basisbegrippen van de dynamica, hoe de trillingen ontstaan en zich verplaatsen, welke technieken bestaan om daar technisch iets over te zeggen en hoe trillingsreducerende maatregelen werken. Deze kennis zal bij vele lezers niet aanwezig zijn. Daarom wordt dit hoofdstuk toegevoegd. Het probeert in algemene bewoordingen de trillingsproblematiek te beschrijven. Vervolgens beschrijft het de effecten die met trillingsreducerende maatregelen worden nagestreefd en waarom de nagestreefde effecten soms niet behaald worden.

2.2 Begrippen snelheid en frequentie

In dit rapport wordt het begrip snelheid op verschillende wijzen gebruikt. Het is noodzakelijk hier goed onderscheid tussen te maken:

- **Golfsnelheid:** De golfsnelheid is de snelheid waarmee een verstoring zich door de bodem beweegt. Voor een materiaal is de golfsnelheid min of meer een constante, dat wil zeggen de verstoring beweegt zich met een constante snelheid door de bodem. Voor grond ligt de golfsnelheid in de orde van 100-2000 m/s (400-8000 km/uur).
- **Trillingssnelheid:** De trillingssnelheid is de maximale snelheid waarmee het materiaal trilt, dat wil zeggen heen en weer beweegt. De trillingssnelheid is afhankelijk van de sterkte van de trillingsbron en de afstand tot de trillingsbron. Deze varieert dus in de bodem. De trillingssnelheden die in dit rapport gegeven zijn, liggen in de orde van 0.1 - 10 mm/s (let op de eenheid mm/s = millimeter per seconde; de golfsnelheid is dus orde 1000 keer groter dan de trillingssnelheid).
- **Rijsnelheid:** dit is de snelheid waarmee de trein rijdt. Deze wordt meestal uitgedrukt in km/u (kilometers per uur). Meestal rijden treinen met een snelheid van 80-160 km/u, alleen de hogesnelheidstreinen gaan sneller tussen de 200 km/u (nieuwe IC treinen) tot 300 km/u (Thalys). Voor berekeningen is snelheid per uur een lastige eenheid, en wordt meestal gebruik gemaakt van een snelheid in meters/seconde (m/s). Standaard treinen rijden dan 20-45 m/s (80-160 km/u komt overeen met 22-44 m/s) en hogesnelheidstreinen tussen de 56-83 m/s.

Het verschil tussen golfsnelheid en trillingssnelheid kan het beste uitgelegd worden door het met geluid te vergelijken. Geluid plant zich in de lucht voort met een golfsnelheid van ongeveer 300 m/s. De trillingssnelheid neemt af met de afstand tot de bron: vlak bij een harde geluidsbron kan gehoorschade ontstaan, verder weg is het geluid waarneembaar en heel ver weg uitgestorven. Maar overal is de golfsnelheid 300 m/s.

Als een trein, de bodem of een vloer trilt, gaat deze heen en weer. Dit kan langzaam of snel gebeuren. Dit wordt beschreven met het begrip frequentie. De eenheid van frequentie is Herz (Hz). Dit getal geeft het aantal trillingen per seconde weer. Zo is bijvoorbeeld 4 Hz een trilling waarbij een punt 4 keer per seconde op en neer gaat. Laagfrequente trillingen hebben een lage frequentie, het aantal trillingen per second is laag. Een voorbeeld van een laagfrequente trilling is een hoog gebouw dat heen en weer zwaait. Meestal is dit één of tweemaal per seconde (1 à 2 Hz). Hoogfrequente trillingen hebben een hoge frequentie, het aantal trillingen per seconde is hoog. Een voorbeeld van een hoog frequente trilling in de spoorwegbouw is de trilling die ontstaat uit de opbouw van de spoorbaan met ondersteuning door dwarsliggers.

Als deze 60 cm uit elkaar liggen en de trein rijdt 140 km/u, dan geeft dit een frequentie van 65 Hz. De in dit rapport besproken trillingen liggen in het gebied tussen de 1 Hz en 100 Hz.

Vaak wordt frequentie uitgedrukt in toeren per minuut (tpm). Bijvoorbeeld de toeren teller in de auto (2400 tpm = 40 Hz) en een wasmachine met 155 tpm = 25 Hz.

De trillingsnelheid bepaalt in belangrijke mate of een trilling schadelijk is. De mate van hinder of schadelijkheid kan nog afhangen van de frequentie.

Voor frequentie geldt dat deze tijdens de golfvoortplanting niet veel wijzigt. Een hoge toon in een muziekinstrument (b.v. een sopraan) is verder weg ook een hoge toon. Een lage toon (b.v. een tenor) is verder weg ook een lage toon. Bij het beoordelen van trillingen wordt vaak gebruik gemaakt van frequentieranges, in plaats van specifieke frequenties. Deze ranges worden ook wel frequentiebanden genoemd.

2.3 Trillingen van treinverkeer

Treinen genereren trillingen, die in een gebouw voor mensen voelbaar kunnen zijn. Een voelbare trilling kan hinderlijk zijn. Dit is een aanleiding om trillingen te voorkomen of te reduceren.

De trillingen bij treinverkeer ontstaan vooral wanneer treinen over een oneffen spoor rijden. Deze snelheid is de rijsnelheid van de trein, uitgedrukt in kilometer/uur. Voorbeelden van oneffenheden zijn wissels, isolatielassen in het spoor en variaties in eigenschappen van de fundering van het spoor. De massa van de trein is traag, dat wil zeggen dat deze de oneffenheid in het spoor niet zo snel kan volgen. Maar het spoor dwingt de massa de oneffenheid (gedeeltelijk) wel te volgen. Hierdoor ontstaan kortdurende grote krachten op de trein. Naast spooroneffenheid zijn er nog andere bronnen van trillingen, waaronder de variatie in de onderbouw en de ondergrond en wielonrondheid.

De grootte van de krachten hangt af van veel toevalligheden: de grootte van de oneffenheid, maar ook het gewicht van de trein (leeg/vol, goederen of personen), de eigenschappen van de trein (type trein) en de rijsnelheid. Door de interactie tussen de diverse delen van de trein (wagenbak, draaistellen en wielen en de schokdempers daar tussen) en de eigenschappen van de rails en de bodem, worden krachten met bepaalde frequenties sterker gegenereerd dan andere frequenties. In het algemeen geven treinen krachten met veel verschillende frequenties (breedbandig spectrum).

De eerder genoemde kracht werkt niet alleen op de trein(wielen) maar ook op de bodem (volgens het principe actie = reactie). Hierdoor ontstaan trillingen in de constructie en de bodem. Deze trillingen lopen door de bodem naar de panden in de omgeving. Een belangrijk aspect hierbij is dat er in de bodem verschillende soorten golven ontstaan, die verschillen in de mate waarin de golf afneemt en ieder een eigen loopsnelheid (golfsnelheid) hebben. Op harde grondlagen kunnen reflecties ontstaan, vergelijkbaar met het intense licht ten gevolge van een reflectie van het zonlicht in het raam van een overbuurman. De golven die bij een pand aankomen, kunnen elkaar versterken of juist verzwakken. Dit verschijnsel heet interferentie.

Een gebouw bestaat meestal uit vloeren, wanden of kolommen. De trillingen in de bodem brengen deze elementen in trilling. Ook hier kunnen interferenties ontstaan. Als trillingen elkaar versterken heet dit resonantie, als trillingen elkaar verzwakken heet dit uitdoving. Een bekend voorbeeld van resonantie is schommelen: door steeds op het juiste moment de

schommel een zetje te geven, kun je met weinig kracht een hele grote uitslag bereiken. Juist de trillingen die resonantie in de vloeren veroorzaken zijn de oorzaak van de trillingshinder.

De hinder zelf kan op verschillende manieren ontstaan. Als de vloeren trillen, kunnen personen die de ruimte aanwezig zijn deze trillingen voelen. Een ander gevolg kan zijn dat de trillende muren of vloeren geluid gaan maken, een lage bromtoon. Dit is afgestraald geluid. Soms kunnen mensen dit geluid horen. Ook kunnen de trillingen andere voorwerpen in trilling brengen, waardoor deze hoorbaar gaan rammelen. Een gevoelde trilling of waargenomen geluid kan als hinderlijk worden ervaren. Of een trilling of geluid als hinderlijk ervaren wordt hangt af van de sterkte van de trilling en het geluid, maar ook van verschillende persoonlijke factoren zoals verwachtingspatroon en activiteit. De gebruikte normwaarden gaan uit van niveaus die in het algemeen niet als hinderlijk ervaren worden en houden soms rekening met de omstandigheden, bijvoorbeeld de dag en nacht periode.

2.4 Werkingsprincipes van trillingsreducerende maatregelen

Er zijn verschillende manieren om de trillingen in een pand te beïnvloeden:

- Het verkleinen van de oneffenheid. De grootte van de oneffenheid is de laatste jaren sterk gereduceerd door betere fundering en beter onderhoud. Dit heeft naast de invloed op de trillingen in de panden, ook veel invloed op het reizigerscomfort en de beperking slijtage van trein en spoor.
- Het verschuiven van de overheersende frequenties in de belasting. Hierbij moet gedacht worden het aanpassen van de eigenschappen van de rails of de fundering. In principe kan men ook denken aan aanpassingen aan de treinen, maar die geven mogelijk op andere locaties weer problemen. Als de trein andere frequenties genereert dan die waarbij de vloer trilt, kan dit positief uitwerken. Aanpassingen aan de treinen zijn in dit rapport niet verder beschouwd.
- Het verschuiven van de resonantiefrequenties in de vloeren. Zolang deze maar voldoende afwijken van de overheersende frequentie in de belasting, kan dit goed werken.
- Het tegenhouden van de golven in de bodem. Dit is vergelijkbaar met een geluidscherm langs een snelweg, maar dan in de grond.
- Een gebouw als het ware loskoppelen van de bodem via een flexibele funderingsconstructie.

De werkingsprincipes van de maatregelen in de Maatregelcatalogus spoortrillingen zijn in hoofdstuk 3 verder uitgewerkt.

2.5 Modelleren van spoortrillingen en trillingsreducerende maatregelen

Om de trillingen in een pand te bepalen wordt meestal een benadering gebruikt die uitgaat van de drie mechanismes die hieronder beschreven zijn:

- Een trillingsbron (bevat spoor, trein en fundering).
- Een voortplantingsmodel (bevat de bodemeigenschappen).
- Een gebouwmodel (bevat de fundering en constructie van het gebouw).

Bij de trillingsbron worden de belangrijkste delen van de trein (wagenbak, draaistellen en wielen en de schokdempers daar tussen), de spoorconstructie en de fundering in trilling gebracht door de oneffenheid van de trein. Er moet rekening gehouden worden met verschillende type treinen die (in de toekomst kunnen) passeren, de treinsnelheid, de (variaties in) oneffenheid. De dynamische eigenschappen van de fundering worden bepaald door de dikte van het

baanlichaam en de samenstelling van de van nature aanwezige ondergrond. Elk wiel van de trein functioneert als trillingsbron.

In de bodem lopen verschillende soorten golven die allemaal een eigen golfsnelheid en afname karakteristiek hebben. Op materiaal overgangen kunnen reflecties optreden. In elk punt van de bodem wordt het netto resultaat bepaald door alle golven die van alle bronnen naar het beschouwde punt lopen. Sommige trillingen versterken elkaar, andere werken elkaar juist tegen.

Een gebouw wordt in trilling gebracht via de fundering. Door de constructie gaan ook verschillende golven lopen. Op de verbindingen tussen constructiedelen treden ook hier reflecties op. Een belangrijk verschil met golven in de bodem is dat in een gebouw de sterkte van de golven minder snel afneemt. Daardoor kunnen golven elkaar veel meer versterken. Dit verschijnsel wordt resonantie genoemd.

Van de bodem (en dus ook de fundering van het spoor) en het gebouw zijn de eigenschappen niet nauwkeurig bekend. Een zand laag kan in verschillende periodes afgezet zijn, waardoor de stijfheid niet overal dezelfde is. Ook is de dikte van een laag niet overal gelijk, bijvoorbeeld als de laag in een geulenstelsel of delta gelegen heeft.

In gebouwen geldt iets vergelijkbaars. Stijfheid van een gebouw kan in de tijd wijzigen, door bijvoorbeeld microscheuren, verbouwingen, zettingen van de fundering. Een resonantiefrequentie van een vloer kan niet exact worden bepaald als niet goed bekend is in welke mate de muren de buiging van de vloeruiteinden tegenhouden.

Bij de berekening van een vloer wordt een principieel verschil tussen dynamica en statica zichtbaar. Bij statica is het mogelijk om extreme waarden te schatten: de statische doorbuiging van de vloer is maximaal als de muren niets doen. De dynamische doorbuiging van de vloer is maximaal als de frequentie in het aangeboden signaal overeenkomt met de resonantie frequentie van de vloer. Maar de resonantie frequentie van de vloer hangt mede af van de mate waarin de muren meewerken. Zowel te veel meewerken als te weinig meewerken levert dan een kleinere trilling in de vloer op.

Ten slotte moet nog aandacht worden besteed aan het ketengedrag van het systeem: De trillingen die in het spoor gegenereerd worden, lopen door de bodem naar het gebouw, brengen het gebouw in trilling en daardoor de vloeren. In een berekening van dit systeem kan in elke stap een afwijking van de werkelijkheid optreden. Deze kleine afwijkingen kunnen later relatief grote gevolgen hebben als deze elkaar in de keten versterken.

2.6 Onverwachte dynamische effecten

Onverwachte dynamische effecten treden op als een maatregel anders reageert dan op basis van een berekening of eerdere ervaring verwacht werd. Het basisidee hierbij is dat deze afwijkingen ontstaan doordat de referentiesituatie (berekening of eerdere ervaring) in relatief weinig verschillen, maar dat deze kleine verschillen onverwacht grote gevolgen hebben. Dit rapport tracht mogelijke kleine verschillen op te sporen en aan te geven waarom deze grote gevolgen kunnen hebben.

3 Werkingsprincipes en groepsindeling

3.1 Inleiding

De catalogus bevat verschillende maatregelen die een vergelijkbaar werkingsprincipe hebben. In dit hoofdstuk worden de werkingsprincipes kort besproken en de verschillende maatregelen met een vergelijkbaar werkingsprincipe gegroepeerd. Een overzicht van de maatregelen in de catalogus is opgenomen in bijlage D. In dit rapport wordt voor de maatregelen de codering gebruikt zoals deze ook in de Maatregelcatalogus spoortrillingen wordt aangehouden.

De werking van een maatregel kan uitgedrukt worden als de verhouding van het trillingssnelheid in de situatie met de maatregel en het trillingssnelheid zonder de maatregel

$$R_{effect} = \frac{v_{met\ maatregel}}{v_{zonder\ maatregel}} \quad (0.1)$$

Met:

- v Het trillingssnelheid [mm/s].
 R De effectiviteit [-].

Als een maatregel effectief is, dan is het trillingssnelheid met de maatregel kleiner dan zonder de maatregel, zodat de verhouding kleiner dan 1 is.

Deze waarde kan ook op een logaritmische schaal bepaald worden. De berekening luidt dan

$$RL_{eff} = -10 \log(R_{effect})^2 \quad (0.2)$$

met RL_{eff} de effectiviteit in dB (decibel). Het minteken in deze formule geeft aan dat een afname van het trillingssnelheid een positief getal geeft. Opgemerkt wordt dat een halvering van het trillingssnelheid een effectiviteit van 6 dB geeft.

3.2 Maatregelen aan de bronzijde

In de Maatregelcatalogus spoortrillingen zijn baan en materieel onderscheiden. In dit rapport zijn deze samengenomen omdat deze vanuit mechanisch oogpunt identiek zijn. Met andere woorden: de bron is hier gedefinieerd als de wiel-rail-fundering interactie.

Bij de bron zijn in beginsel twee typen maatregelen mogelijk:

- Verkleining van de excitatie amplitude.
- Wijziging van het excitatie systeem.

3.2.1 Verkleining van de excitatie

Het slijpen van het wiel (in profiel houden) of het vlakker maken van het spoor (onderhoud rails) zijn voorbeelden van het eerste type maatregel, waarbij oneffenheden worden beperkt en de excitatie amplitude kleiner wordt.

Maatregelen aan het materieel (tussen haakjes het maatregelnummer in de Maatregel-catalogus spoortrillingen):

- In profiel houden van de wielen (1.01).

Maatregelen aan de baan:

- Wissel verplaatsen (2.12).
- Verbetering aansluiting kunstwerk in het kader van vermindering trillingshinder (2.13).
- Onderhoud rails (2.14).
- Spoor voegloos maken (2.15).
- Aanvullend onderhoud ballastbed (tamping) (2.16).

Het verplaatsen van het wissel kan lokaal een reductie betekenen, maar als het wissel elders geplaatst wordt kunnen daar hogere trillingen ontstaan. De overige maatregelen hebben een reducerend effect. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat dit effect beperkt blijft tot het frequentiegebied dat wordt bepaald door de golflengtes in het systeem en de rijsnelheid van de trein.

3.2.2 Wijzigingen van het excitatie systeem

De trillingen bij treinverkeer ontstaan primair door de interactie tussen de wielen en de rails, zie ook paragraaf 2.3. De krachten die de treinwielen op het spoor uitoefenen (en dus de grootte van de trillingen in de omgeving) worden vooral bepaald door de dynamische interactie tussen de trein (de wagenbak, de draaistellen en de assen) en de spoorconstructie (rails, dwarsliggers, ballast en ondergrond). Dit geheel wordt gemakshalve hier het excitatiesysteem genoemd.

Het aanbrengen van een stijvere veer in een systeem is een voorbeeld van het tweede type maatregel in het excitatie systeem. Een dergelijke maatregel leidt tot een andere frequentie-inhoud van de belasting, waardoor voor sommige frequenties een verlaging, maar voor andere frequenties een verhoging van de excitatie kan optreden.

De spoorconstructie bestaat in beginsel uit twee buigstijve spoorrails die op een constructie op de ondergrond liggen. Deze constructie spreidt de belasting en voert de verticale krachten uit de trein naar beneden af.

Er zijn in beginsel drie parameters waaraan belangrijke wijzigingen kunnen worden aangebracht:

- 1 De (buig-)stijfheid van de constructie.
- 2 De verticale stijfheid van de constructie.
- 3 De massa (massatraagheid) van de constructie.

In een dynamisch systeem is het niet eenvoudig om stijfheid en massa onafhankelijk te variëren. Meestal wordt een hoge stijfheid bereikt door een materiaal met hoge dichtheid toe te passen (beton, staal) en wordt een laag met een lage stijfheid bereikt door een materiaal met een lage dichtheid toe te passen. Daarom wordt in onderstaande alleen onderscheid gemaakt tussen maatregelen waarbij de nadruk ligt op de buigstijfheid en de nadruk op de verticale stijfheid.

Nadruk op verticale stijfheid:

Ballastmatten (2.01).
Afveren rails met railklemmen op beton plaat (2.02).
Under Sleeper Pads (2.09).
Wide Sleeper Track (2.10).
Geogrid (2.11).

Dit zijn allemaal maatregelen die vooral invloed hebben op de stijfheid van onderdelen in de spoorconstructie. Soms wordt ook beperkte massa toegevoegd. Bij onderstoppen (tamping = de dichtheid van de ballast onder de dwarsligger verbeteren) is meestal ook sprake van een verbetering van de spoorligging

Nadruk op de buigstijfheid:

Slab track (2.03).
Floating slab track (2.04).
Beton plaat onder ballastbed met ballastmat (2.05).
Beton plaat onder ballastbed met isolatiemateriaal onder dwarsliggers (2.06).
Zettingsvrije plaat (2.07).
Ladder Track (2.08).

De eerste vier maatregelen betreft het toevoegen van platen, die op de bodem liggen. De zettingsvrije plaat is ook een plaatvormige constructie, maar dan gefundeerd op palen. Ladder track bestaat uit twee liggers onder de spoorstaven die op regelmatige afstand verbonden zijn om de spoorbreedte te behouden. Hierdoor is de buigstijfheid van het spoor hoger dan van de rails alleen. Het is bijvoorbeeld beschreven in (3). Naast een aanzienlijke wijziging in de buigstijfheid wordt veelal ook een aanzienlijke massa aan de constructie toegevoegd.

Overweging voor het lange termijn effect van maatregelen in het excitatie systeem

Er moet hier rekening gehouden worden dat aanpassingen aan het spoor op lange termijn een aanzienlijke invloed kunnen hebben op de ligging van het spoor. Met name het toevoegen van buigstijfheid kan worden opgevat als een betere fundering van het spoor. Het kan een reductie excitatie-amplitude geven (paragraaf 3.2.1).

In beide constructies wordt extra flexibiliteit aangebracht. Bij maatregelen met de nadruk op de verticale stijfheid is de invloed van de stijfheid op de eigenfrequenties meestal beperkt. De nadruk van deze maatregel ligt dan op het verkleinen van de krachten die de rail op de ondergrond uitoefent. Spoorconstructies met een hoge buigstijfheid is vaak heel stijf. Deze grote stijfheid heeft tot gevolg dat kleine oneffenheden grote krachten op de fundering geven. Toepassing van flexibele materialen is noodzakelijk om ervoor te zorgen dat de ondersteuning van de rails niet te stijf wordt voor het treinverkeer. Dit reduceert dan wel de krachten op de ondergrond, maar vermoedelijk ligt de nadruk op de reductie van de oneffenheid en (door de aanwezige plaatmassa) ook op de andere frequentieoverdracht.

Om onderscheid te maken tussen de vermindering van de excitatie door de oneffenheden wordt gesproken van vermindering van de excitatie oneffenheden, terwijl het verlagen van de verticale stijfheid vermindering van de excitatie krachten wordt genoemd in Tabel 3.1.

3.3 Invloed overdracht

“Maatregelen in de overdracht” (in de Maatregelcatalogus spoortrillingen) betreft trillingsreducerende maatregelen die aan de rand of buiten het baanlichaam worden uitgevoerd. Het primaire doel van deze maatregel is dat de trillingen die wel gegenereerd worden ter plaatse van de spoorbaan het pand waar de hinder ervaren wordt niet bereiken.

De eerste groep maatregelen zijn schermen in de bodem. Praktisch gesproken zijn er twee maatregelen mogelijk: een heel stijf element in de bodem of een heel slap element in de bodem plaatsen (ten opzichte van de stijfheid van de bodem). Een belangrijke variatie kan zijn de plaats waar de constructie geplaatst wordt:

- Nabij het spoor (bijna een bronmaatregel).
- Ergens in het midden (typische pad maatregel).
- Nabij de woning (bijna een object maatregel).

Stijve schermen:

OTC betonscherm in bodem (3.01).

Slappe schermen:

- OTC open sleuf in bodem (3.04).
- OTC open sleuf met keerwanden (3.05).
- OTC beklede keerwand (3.08).

De maatregelen 3.05 en 3.08 bestaan uit een combinatie van een slap en een stijfelement. Deze zijn in dit overzicht als slap element opgenomen, aangezien wordt verwacht dat het slappe deel de grootste bijdrage aan de trillingsreducerende werking heeft.

De tweede groep maatregelen betreft relatief ondiepe maatregelen, die dicht bij het maaiveld optreden:

- Trillingscherm L-wand in talud (3.03).
- Steiler maken spoortalud (3.06).
- Spoorsloot / waterpartij (3.07).

Mogelijk moet ook maatregel 3.02 hier genoemd worden:

- OTC Polystyreen scherm in bodem bij woning (3.02).

3.4 Maatregelen bij de ontvanger

“Maatregelen bij de ontvanger” (in de Maatregelcatalogus spoortrillingen) betreft maatregelen in of nabij het pand waar het te hoge trillingssnelheid optreedt. Er kan dan gedacht worden aan maatregelen in het pand zelf, maar ook aan de interactie tussen grond en constructie (de aanstoting van het pand).

Constructie zelf:

- Verstijven vloeren en wanden (bestaande woningen) (4.01).

Aanstoting:

- Fundering op trilling-isolatie (Hoewel deze lijkt op de maatregelen in de overdracht) (4.02).

3.5 Samenvatting

In onderstaande tabel zijn de verschillende maatregelen uit de Maatregelcatalogus spoortrillingen gerelateerd aan het onderdeel in de keten. Daarnaast is het bijbehorend werkingsprincipe benoemd.

Maatregel	Aanpak	Werkingsprincipe
Bron		
1.01, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15, 2.16	beperken van oneffenheden	kleinere excitatie
2.01, 2.02, 2.09, 2.10, 2.11	aanpassen verticale stijfheid	verminderen excitatie krachten andere overdracht / frequenties
2.03, 2.04, 2.05, 2.06, 2.07, 2.08 ...	aanpassen buigstijfheid	verminderen excitatie oneffenheid andere overdracht / frequenties
Overdracht		
3.01	Scherp stijf	reflectie
3.02, 3.04, 3.05, 3.08	Scherp slap	reflectie
3.02, 3.03, 3.06 en 3.07	Maaiveld maatregelen	reflectie
Ontvanger		
4.01	stijvere constructie	lagere overdracht/ andere frequenties
4.02	funderings-isolatie	andere grond/constructie interactie

Tabel 3.1 Overzicht groepsindeling maatregelen uit de catalogus

4 Review literatuur Maatregelcatalogus spoortrillingen

4.1 Inleiding

De literatuur waarop de maatregelen catalogus gebaseerd is, is eerst globaal bekeken. Dit is beschreven in paragraaf 4.2

Op basis van deze globale scan is een aantal rapporten geselecteerd en nader bestudeerd. Het doel is inzicht te krijgen in de toegepaste berekeningsmethode en om aan de hand van de resultaten mogelijke neveneffecten te detecteren en hun invloed te beoordelen. In dit hoofdstuk worden de rapporten behandeld onder de maatregel waarop zij zich primair richten. Deze zijn beschreven in de overige paragrafen in dit hoofdstuk, waarbij zoveel mogelijk getracht is de documenten ordenen naar de plaats waar de trillingsreducerende maatregel wordt uitgevoerd: de baan, de bodem of het gebouw.

4.2 Globale scan

4.2.1 Aanpak

Bij de globale scan is nagegaan welke aspecten in elke referentie behandeld worden en in hoeverre het betreffende document van belang is voor de vraagstelling in dit rapport. Deze aanpak is gekozen omdat er is sprake van een uitgebreide literatuurlijst en de beschikbare documenten sterk van karakter verschillen.

Om de documenten te ordenen is een spreadsheet gemaakt. Bijlage B geeft de volledige spreadsheet. Deze is alfabetisch geordend op naam van het document in de folder. Hierin is verder geen systematiek aanwezig. In de spreadsheet is voor elk document aangegeven:

- De titel van het document.
- Het type document b.v.: (advies-)rapport, productblad, beschrijving, artikel.
- De auteurs van het document, waarbij de nadruk ligt op hun 'natuurlijke' rol in het advies en ontwikkelingsproces: universiteit, adviesbureau, leverancier. Hierbij zijn partijen die bekend verondersteld zijn, bij hun naam genoemd (b.v. TNO, ProRail).
- Het onderwerp van het document.
- De eerste indruk van de bruikbaarheid van het document voor dit onderzoek naar onverwachte dynamische aspecten.

4.2.2 Conclusie

De conclusie van de review van de gebruikte literatuur voor de Maatregelcatalogus spoortrillingen is dat met name de onderzoeksrapporten uit de EU projecten Rivas en CargoVibes relevante informatie bevatten. Dit zijn onderzoeksrapporten waarin mogelijk relevante referenties zijn opgenomen. Wellicht zijn er naderhand interessante publicaties in de wetenschappelijke literatuur geweest, die hierop verder werken. Daarnaast zijn de parameterstudies voor Utrecht en Arnhem waardevol, omdat dit twee praktische cases betreft die systematisch uitgewerkt zijn. De onderzoeksrapporten zijn van belang omdat zij verschillende (goed gedocumenteerde) berekeningsvarianten onderling vergelijken of de berekeningen met metingen vergelijken.

Tijdens het beoordelen van de beschikbare documenten is een aantal ideeën en aspecten gevonden die relevant zijn voor dit onderzoek.

4.3 Maatregelen aan de bron

4.3.1 Invloed verende materialen bij spoor in ballast

Faure en Bongini (4) rapporteren een uitgebreid numeriek onderzoek naar de invloed van verende materialen onder de spoorstaaf (Under Rail Pad URP) of de dwarsligger (Under Sleeper Pad USP). Faure en Bongini maken onderscheid tussen de situatie van een verend materiaal onder de spoorstaaf maar boven de zogenaamde base plate (Under Rail Pad) en onder de base plate (Under Baseplate Pad). Vaak worden deze verschillen niet onderscheiden en wordt er gesproken van Railpad. Het betreft spoor in ballast. Daarbij besteden zij ook aandacht aan de invloed van de massa van het draaistel, de stijfheid van de ballast en de stijfheid van de bodem. Het rapport is een samenvatting van de twee rapporten van de KU-Leuven en de BAM (Berlijn), die als bijlagen in (4) opgenomen zijn.

In het eerste deel van de parameterstudie (zonder trillingsreducerende maatregelen) maken Faure en Bongini onderscheid tussen de lage frequentie range en de hoge frequentie range en de overgangsfrequentie. Interessant is dat zij bij de invloed van stijfheid melden dat een lagere stijfheid van de bodem de trillingen in de lager frequentierange omhoog gaan en in de hoge frequentie range omlaag gaan. Hierbij wordt nog opgemerkt dat de berekeningen gemaakt zijn met relatief hoge stijfheden voor west Nederland.

Bij gelaagde bodem wordt het berekende effect van de maatregel al snel onoverzichtelijk. Voor lage frequenties lijkt er weinig te veranderen, voor hoge frequenties wordt het resultaat onduidelijk genoemd.

De invloed van de ballast-stijfheid lijkt vooral invloed te hebben op de overgang tussen laag en hoog frequent. Hoge frequenties worden kleiner.

Daarna wordt de invloed van URP en USP als trillingsreducerende maatregel beoordeeld. Voor URP wordt gevonden dat de stijfheid van de URP bij frequenties onder de 20 Hz geen enkele invloed heeft. Voor hogere frequenties wordt bij een stijvere URP een lagere overdracht gevonden, maar er worden wel aanzienlijk meer hogere frequenties doorgegeven. Dit gedrag leidt tot een reductie van trillingen in de frequentie range van 40-50 Hz, maar een toename van de trillingen boven de 60 Hz. Het gedrag van een constructie met USP is erg vergelijkbaar met URP. Hoewel Faure en Bongini wel enig verschil zien, lijkt het toch vooral grootte van de stijfheid van belang en niet de precieze plaats waar deze aangebracht wordt.

Samenvattend

Onderdeel: maatregelen in de baan.

Aanpak: aanpassen stijfheid spoorconstructie.

Werkwijze: numerieke analyse met uitwerking van invloed stijfheid/gelaagdheid bodem en ballast, under rail pads en under sleeper pads.

4.3.2 Algemene vergelijking trillingsreducerende maatregelen in het spoor

In het rapport (5) beschrijft Terno praktijkervaringen met verschillende maatregelen aan het spoor. Zowel spoor in ballast als spoor op slab-track worden beschouwd. De beschrijvingen geven duidelijk aan dat er resonantie frequenties gevonden worden en ook frequentie-intervallen met een duidelijke trillingsreducerende werking. Vaak wordt het één-massa-veer systeem als voorbeeld genomen. Bij de eigenfrequentie treedt versterking op, bij hogere frequenties reductie van de overdracht. Een twee-massa-veer systeem heeft twee eigenfrequenties, waarbij versterking optreedt. Tussen deze frequenties kan een relatief grote reductie behaald worden. Ballast spoor op een betonnen plaat is een voorbeeld van een systeem waar typische twee eigenfrequenties een rol kunnen spelen. Het frequentie-interval waar demping optreedt, is vaak vrij smal, zodat er rekening gehouden moet worden dat relatief kleine wijzigingen relatief grote gevolgen kunnen hebben.

Opvallend in (5) is wel de constatering dat de meeste demping bereikt wordt bij relatief hoge frequenties. Hierbij moet de vraag opgeworpen worden welke oorzaak de gevonden afnames hebben. Het toevoegen van extra verende elementen in de constructie leidt tot het optreden van (gedempte) eigenfrequenties, maar omdat de massa in het systeem klein blijft, blijven de frequenties waarin deze systemen werken hoog. Pas boven de eigenfrequenties gaat een dergelijk systeem voor alle frequenties werken.

Samenvattend

Onderdeel: maatregelen in de baan.

Aanpak: aanpassen stijfheid en zwaardere fundering.

Werkwijze: praktijk ervaringen, diverse maatregelen in spoorconstructie en de fundering, zowel slabtrack als ballastspoor.

4.3.3 Meten efficiëntie maatregelen aan het spoor met kunstmatige excitatie

Om de werkelijke efficiëntie van een maatregel op basis van metingen te bepalen, moet verondersteld worden dat de excitatie niet wijzigt. Hiervoor is het noodzakelijk dat de trillingsmetingen gemiddeld worden over veel treinen en moet er een objectief bronsignaal bepaald worden (bijvoorbeeld de kracht op het spoor of de kracht uit de dwarsligger op de ballast). De meeste rapportages (bijvoorbeeld (6) en (5)) geven niet duidelijk aan hoe hier mee omgegaan wordt.

Het artikel van Wenzel en Geier (7) geeft een toepassing van de inzet van een Vibroscan. De Vibroscan en een toepassing zijn beschreven in (8). Met de Vibroscan kan een harmonisch trillingssignaal gegenereerd worden.

Wenzel en Geier hebben de Vibroscan toegepast op een constructie van een verend gefundeerde plaat in een spoortunnel in Oostenrijk, dus de plaat wordt gedragen door de tunnel lining in vermoedelijk bodem. Zij vergelijken de berekende overdracht met de gemeten overdracht. Wenzel en Geier vergelijken in hun artikel (7) de "insertion loss", maar daarvoor moeten de overdracht voor en na de constructie gemeten zijn, en dat blijkt niet uit hun publicatie. De verschillen tussen de meting en de berekening loopt op tot 10 dB (dus ongeveer een factor 3).

Samenvattend

Onderdeel: maatregelen aan het spoor.

Aanpak: zwaardere fundering.

Werkwijze: numerieke beoordeling i.s.m. trillingsmetingen voor en na de maatregel met kunstmatige excitatie, parameterstudie.

4.3.4 Stijfheid van de ballast en voorbeeld twee-massa-veer systeem

In rapport (5) wordt door Terno voor de stijfheid van ballast verwezen naar de onderzoeken van Herron et al (9). Zij vinden een relatief grote frequentie-afhankelijkheid in de stijfheid van ballast in het gebied tussen de 100 en 700 Hz. De afleiding hiervan lijkt echter onjuist. Figuur 4.1 geeft een schematische schets van het meetsysteem. Dit is een typisch twee-massa-veer systeem. Herron et al leiden de kracht in de ballast af uit de versnelling van de base-massa m_{base} . Omdat de stijfheid van de bedding van de base niet meegenomen is in de beschouwing, is deze kracht onjuist geschat. Ook wordt mogelijke resonantie van deze massa niet beschouwd.

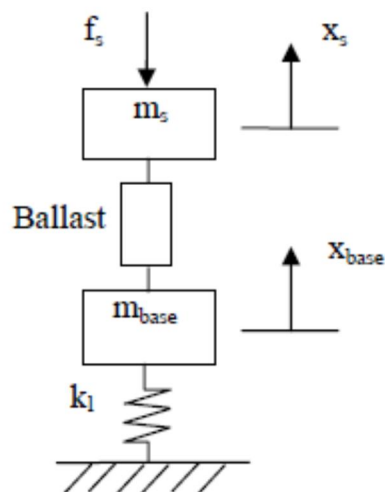


Figure 2. Simple model of the measurement rig.

Figuur 4.1 Typisch voorbeeld twee massa-veer systeem, ontleend aan (9)

De bewegingsvergelijking van de base-massa luidt

$$m_{base} \ddot{u}_{base} = k_{ballast} (u_{sleeper} - u_{base}) + k_1 u_{base} + c_{ballast} (\dot{u}_{sleeper} - \dot{u}_{base}) + c_1 \dot{u}_{base} \quad (0.3)$$

Herron et al verwaarlozen de term $k_1 u_{base}$ volledig en ook de dempingstermen. Gezien het feit dat zij bij de frequentie 150 Hz een vreemde variatie in de stijfheid vinden, lijkt het erop dat hier een eigenfrequentie van het systeem optreedt. Dan zijn de dempingstermen en de stijfheid van de oplegging van de base van belang.

Het meten van de dynamische stijfheid van ballast blijkt lastig te zijn. De door Herron et al gegeven invloed van de frequentie lijkt op een onjuiste interpretatie van de meting te berusten. Het gedrag van een twee-massa-veer systeem is in de literatuur te vinden, voor het ongedempt systeem is het ook uitgewerkt in (10).

Onzekerheid in de stijfheidsparameters moet wel in de beschouwingen betrokken worden. Een significante afwijking in de werkelijke stijfheid kan grote gevolgen hebben voor de efficiëntie van een maatregel, vooral als deze berust op de locatie van een 'lokale' lage waarde van de overdracht. Net als resonantie pieken zijn dergelijke lokale minima gevoelig voor de stijfheid van een systeem.

Dit effect maakt ook inzichtelijk waarom in sommige cases een lagere stijfheid werkt, en in andere cases een hogere frequentie werkt: de eigenfrequentie moet af bewegen van de belasting-frequentie. Als de belasting breedbandig is, heeft het wijzigen van een eigenfrequentie nauwelijks zin, dan moet er eerder gedacht worden aan een hogere demping.

Samenvattend

Onderdeel: maatregelen in de baan.

Aanpak: aanpassen stijfheid.

Werkwijze: laboratoriumexperiment, parameterbepaling stijfheid ballast.

4.3.5 Trillingen bij een wissel

Müller evalueert in het Rivas rapport (11) het dynamisch gedrag van een wissel. Het rapport trekt een aantal belangrijke conclusies:

- Het exacte wiel profiel is van belang. Samen met de een goed gekozen stijfheid van de rail pads kan dit een aanzienlijke reductie van de dynamische krachten op het wissel geven.
- Er wordt wel gewaarschuwd dat kleine variaties in geometrie van het puntstuk en de stijfheid van de ondergrond grote invloed kunnen hebben. Dit maakt optimalisatie lastig en er moet gelet worden op mogelijke gevolgen op langere termijn. Vermoeiing wordt genoemd, maar vermoedelijk ook profiel wijzigingen door slijtage of zetting. Dit suggereert ook dat er na verloop van tijd een toenemende variatie in trillingssnelheid gevonden zal worden.
- Opvallend detail is dat een verdubbeling van de rijsnelheid (160-230 km/h) in het algemeen leidt tot een relatief kleine toename van de dynamische kracht op het wissel (fig. 2.22 in (11)). Bij lagere snelheden (40-80 km/h) lijkt het effect veel groter orde factor 4 (fig. 2.34 in (11)).
- zachte rail pads (d.w.z. rail pads met een lage stijfheid) geven een aanzienlijke reductie van de krachten op de dwarsliggers.
- opvallend is de grote invloed van de boogstraal van het wissel in gemiddelde zin. Echter, ook hier is de variatie erg groot. Zie figuur 2.29a in (11), bijvoorbeeld de twee wissels in Rufferswil, waarbij GI1 geen versterking geeft en GI2 een 15 dB versterking (d.w.z. een factor 6 keer groter) geeft.
- De trillingen van een wissel nemen wel sneller af met de afstand dan bij de vrije baan. Dit is verklaarbaar doordat het een puntbron betreft.
- Ervaring bij Bern suggereert dat een sleuf vlak naast het wissel veel efficiënter is dan de typische bronmaatregel slijpen van het spoor. De grote efficiëntie van de sleuf suggereert dat de afstand tussen de bron en de sleuf een belangrijke rol speelt in de efficiëntie van de sleuf.

Samenvattend

Onderdeel: maatregelen in de baan.

Aanpak: verkleining excitatie.

Werkwijze: numerieke analyse en veldmetingen, excitatie mechanisme in een wissel.

4.3.6 Slab track en floating slab track

Auersch heeft een numerieke parameterstudie uitgevoerd naar invloed van de belangrijkste parameters bij slab track (12). De analyse is volledig uitgevoerd in het frequentie domein, Auersch beoordeelt alleen transfer functies.

Voor 'gewone' slab track geeft Auersch aan dat:

- De buigstijfheid van de plaat alleen invloed heeft op de spreiding van de belasting onder de plaat, maar niet op de gesommeerde kracht onder de plaat.
- De massa van de plaat heeft wel invloed op de gesommeerde kracht onder de plaat, waarbij voor lage frequenties de kracht toeneemt en voor hoge frequenties de kracht afneemt (omslag punt in de berekeningen bij ongeveer 20 Hz).
- Bij een homogene bodem is een beperkte frequentie afhankelijkheid zichtbaar voor verschillende stijfheden van de bodem. Bij gelaagde bodem treedt een sterkere frequentie afhankelijkheid op. Auersch beschouwt een dunne laag van 1 m. De mogelijke invloedsfactoren zijn de dikte van het baanlichaam en de dikte van de slappe lagen.
- De andere verdeling van de krachten op de bodem onder de plaat leiden nabij het spoor wel tot lagere trillingen in de omgeving, maar ook tot een langzamere afname met de afstand, zodat op 30 m er nauwelijks verschil zichtbaar is.

Bij 'floating' slab track vindt Auersch:

- Bij lage frequenties (onder de 30 Hz) treedt grote opslinging van de overgedragen gesommeerde kracht op, terwijl bij hoge frequenties sterke demping optreedt
- Naast de massa van de plaat en de stijfheid van de tussen laag, speelt ook de stijfheid van de ondergrond hierbij een rol.
- Deze frequentie afhankelijkheid komt ook weer terug in de trillingen in de omgeving, zodat voor de lage frequenties een hogere amplitude gevonden wordt en voor de hoge frequenties een lagere amplitude.
- Ook hier (bij floating slab track) is de afname met afstand van de trillingen kleiner, zodat op 30 m weinig verschil zichtbaar is voor de lage frequenties. Voor de hoge frequenties is het verschil aanzienlijk groter.

De belangrijkste conclusies zijn:

- De effecten van (floating) slab track wordt vooral bepaald door de massa en stijfheid tussen de liggers.
- De betere kracht verdeling door de ligger geeft alleen nabij het spoor een reductie van de trillingen.
- De extra verende laag bij een floating slab track leidt tot versterking van de lage frequenties en reductie van de hoge frequenties.

Samenvattend

Onderdeel: maatregelen in de baan.

Aanpak: aanpassen stijfheid en zwaardere fundering.

Werkwijze: invloed constructie en gevoeligheid voor parameters met numerieke analyse en parameterstudie.

4.4 Maatregelen in de bodem**4.4.1 Numerieke vergelijking trillingsreducerende constructies in de ondergrond**

Voor de vernieuwing van de stations in Utrecht en Arnhem heeft Movares systematisch berekeningen uitgevoerd voor verschillende trillingsreducerende maatregelen in de overdracht door de bodem, zie referenties (13) en (14). De techniek bestaat uit het corrigeren van metingen op basis van de verhouding tussen de berekende overdracht in de meetsituatie en de identieke situatie met een trillingsreducerende maatregel. De beoordeelde maatregelen zijn wanden met verschillende afmetingen en eigenschappen. Deze rapporten geven de resultaten van de eindige elementenberekeningen in het frequentiedomein. In het prognose rapport dat onderdeel is van deze onderzoeksserie (15), staat aangegeven dat het model in het frequentiedomein rekent. Hierbij wordt aan het einde van de berekening de vertaling naar het tijdsdomein uitgevoerd. Movares geeft aan dat als een gemeten signaal als uitgangspunt voor de analyse wordt gebruikt, een betrouwbaarheid orde 10% voor het signaal in een gewijzigde situatie wordt bereikt. D.w.z. dat de berekende maatgevende trillingsnelheid op basis van het signaal dat in de toekomstige situatie gemeten zal gaan worden, maximaal 10% afwijkt van de berekende waarde.

In deze rapporten zijn verschillende uitvoeringen van maatregelen (bijvoorbeeld een betonnen wand met verschillende dieptes en diktes) berekend voor twee verschillende bodemprofielen. De resultaten geven aan dat het dempend effect voor frequenties boven de 10 Hz aanwezig lijkt te zijn, maar onder deze frequenties erg variabel is. Vooral het optreden van hoge pieken en diepe dalen in de efficiëntie curves (bijvoorbeeld Figuur III-28 in (13)). Dergelijke extreme waarden kunnen ontstaan door relatief kleine verschuivingen in de frequentie response van de twee vergeleken situaties. Daarmee is in dit frequentiegebied het resultaat mogelijk gevoelig voor onzekerheden in de modellering.

Samenvattend

Onderdeel: overdacht in de bodem.

Aanpak: numerieke beoordeling i.s.m. trillingsmeting.

Werkwijze: parameterstudie.

4.4.2 Ontwerp en effectiviteit van trillingsreducerende constructies

In het kader van Rivas heeft een onderzoeksteam onder leiding van Lombaert (van de KU-Leuven) de effectiviteit van trillingsreducerende wanden nader beoordeeld (6). Zij beoordelen zachte wanden, jet grouting wanden, damwand planken en massa's langs het spoor. Deze laatste staat niet in de Maatregelcatalogus spoortrillingen. In het rapport zelf geven de auteurs een algemene beschouwing met betrekking tot het ontwerp, in de bijlage wordt voor elke besproken maatregel een case uitgewerkt. Hiervoor gebruiken zij steeds hetzelfde vaste formaat. Elke maatregel is numeriek uitgewerkt voor een andere bodem, waardoor de resultaten van de maatregelen onderling moeilijk vergelijkbaar zijn.

De zachte wand is 3 m diep, 5 cm dik en bestaat uit een veerkrachtig materiaal, de elasticiteitsmodulus is ongeveer 1% van de elasticiteitsmodulus van de grondlaag. Het scherm staat 8 m uit het hart van het eerste spoor, feitelijk in de teen van de spoordijk (hoogte 2 m).

Voor frequenties onder de 30 Hz is er een zeer beperkt effect, bij een frequentie boven de 50 Hz is het effect ongeveer 8 dB. De schuifgolfsnelheid in de toplaag is 200 m/s, dus de schuifgolflengte is 6.7 m bij 30 Hz en 4 m bij 50 Hz. Dit wekt de indruk dat het scherm pas effectief wordt bij golflengtes orde de lengte van het scherm. De werking is wel vrijwel onafhankelijk van de afstand.

De case studie voor de jet grout kolommen beschouwt een situatie met een wand op ongeveer 16 m vanaf het spoor. De wand is 7.5 m diep. Opvallend is dat de stijve laag op 10 m begint, zodat er rekening gehouden moet worden met mogelijke reflecties op deze laag onder de wand door. De beschouwde trein had een belangrijke frequentie bij ongeveer 25 Hz. De golflengte bij deze frequentie is orde 6 m, zodat de wand voor deze frequentie redelijk lijkt te voldoen. De berekeningen zijn uitgevoerd met een model voor vlakke vervormingen (2D).

De gemeten en berekende efficiëntie van de wand voor de afstanden 14 (voor de wand), 18 en 32 m worden vergeleken. Het algemene beeld is dat de gemeten afname wat groter is dan de berekende afname. In dit specifieke geval werd de afname in de band onder de 25 Hz redelijk voorspeld, maar in de band boven de 25 Hz was de fout orde 6 dB (dus een factor 2). Verder is een sterke afstandsafhankelijkheid zichtbaar en is de efficiëntie voor lage frequenties (in dit geval tot 8 Hz) klein. Hierbij wordt opgemerkt dat de bodemeigenschappen bepaald zijn op basis van sonderingen en zogenaamde SASW metingen, waarbij de stijfheidparameters van de bodem getuned worden op de resultaten van een dynamische responsie meting. Dit is betrouwbaarder dan een bepaling alleen op basis van sonderingen.

Het ontwerp voor een damwand gaat uit van planken die afwisselend 12 en 18 m diep staan. De wand staat 5.6 m vanuit het spoor. Interessant resultaat is dat de experimentele afnames bepaald worden voor twee verschillende type treinen, waarbij verschillen tot 10 dB tussen de treinen optreden. Het lijkt erop dat dit vooral verschillen in bronbelasting zijn (andere trein, andere wielen, andere spoorgeometrie?) en minder de invloed van de constructie weergeeft dan verwacht. Omdat de afwisselende wandlengte niet in een vlak vervormingsmodel te vatten is zijn de berekeningen uitgevoerd met wandlengte 12 m en wandlengte 18 m, in de veronderstelling dat de werkelijkheid hier tussen in moet liggen. De conclusie luidt dat de werking van een wand afneemt met de afstand tot de wand en dat 'vergelijkbare trends als in de metingen waarneembaar zijn'.

De invloed van een zware gestapelde muur van 4 m hoog en 1 m dik wordt alleen numeriek uitgewerkt. Hierbij lijkt de eigenfrequentie van de massa op de bodem (als stijfheid) een belangrijke rol te spelen. Alleen vlak boven de eigenfrequentie van dit systeem treedt reductie op. Deze neemt snel met afstand tot de muur weer af. Het lijkt erop dat de massa voor de hogere frequenties als reflector gaat werken, maar dat de golven die onder de massa doorlopen verder weg weer aan maaiveld komen.

Samenvattend

Onderdeel: overdacht in de bodem.

Aanpak: stijf scherm, slap scherm, maaiveld maatregel.

Werkwijze: numerieke beoordeling i.s.m. trillingsmetingen voor en na de maatregel, parameterstudie.

4.4.3 Energie beschouwing

De mechanische energie die niet uitstraalt door mitigerende maatregel moet ergens naar toe. Dit kan dissiperen (omzetting naar niet-mechanische vorm van energie) of op een andere manier uitstralen. Dissipatie in de constructie kan dan tot extra onderhoud leiden door b.v.

vermoeiing. Een trillingsscherm dat trillingen reflecteert leidt tot grotere trillingen aan de bronzijde van het scherm. In de numerieke studie voor Rivas (6) besteedt Lombaert hier aandacht aan. Er wordt vlak voor de wand een beperkte toename van het trillingssnelheid geconstateerd, maar verder weg van de wand (aan de andere kant van het spoor) is deze invloed niet zichtbaar.

Samenvattend

Onderdeel: maatregelen in overdracht.

Aanpak: stijf scherm.

Werkwijze: numerieke analyse en veldmetingen, bepaling gereflecteerde energie.

4.5 Maatregelen aan het pand

In de catalogus zijn slechts weinig documenten voor maatregelen in het gebouw aanwezig. Hoofdzakelijk betreft het een Delft Clusterrapport (16) en enkele afdrukken van formulieren die in de database zelf opgenomen zijn. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door het feit dat in bestaande gebouwen trillingsreducerende maatregelen slecht uitvoerbaar zijn en dat in nieuwbouw dit een aspect is dat niet door de spoorbeheerder maar door de initiatiefnemer van de bouw opgepakt wordt. De state of the art studie van Hemsworth (17) bevestigt dit impliciet. Het overzichtsartikel van Spencer en Nagarajaiah (18) geeft aan dat actieve dempingssystemen vooral toegepast worden voor aardbevingsbelastingen en windbelastingen en relatief grote (hoge) gebouwen.

Het rapport (16) bevat een overzicht van mogelijkheden en toepassingen. Alle beschreven technieken bestaan uit opleggingen onder het gebouw of een enkele keer een vloer. De gebouwopleggingen komen vooral voort uit de technologie om een gebouw tegen een aardbeving te beschermen. Vloeren en kleinere constructies betreffen meestal het beschermen van gevoelige processen tegen externe trillingen op juist het afschermen van de omgeving tegen lokale trillingengeneratoren.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen 'bearings', 'mountings' en 'springs', waarbij niet duidelijk wordt wat het verschil is. Het lijkt erop dat een 'bearing' een oplegging is die naast een zekere stijfheid ook een grote demping meebrengt, terwijl 'mountings' en 'springs' weinig demping geven.

In dit kader is het verschil tussen demping en isolatie interessant, zie bijvoorbeeld (19):

- Isolatie is het verminderen van de koppeling tussen de bron en het object.
- Demping betekent het dissiperen van mechanische (trillings-) energie.

Het principe van alle systemen berust op het toevoegen van een heel flexibel element tussen de bodem en het object (vloer of gebouw). Het rapport bevat weinig concrete resultaten van de isolatieactiviteiten.

Het laatste hoofdstuk bevat een beschrijving van de op dat moment beschikbare rail systemen, waarbij van verende materialen gebruik gemaakt wordt.

Samenvattend

Onderdeel: maatregelen in gebouw.

Aanpak: funderingsisolatie.

Werkwijze: literatuuronderzoek naar materiaal parameters.

5 Analyse maatregelen

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de maatregelen afzonderlijk per werkingsprincipe beoordeeld. Dit gebeurt aan de hand van basis mechanicamodellen. Aan de hand van deze modellen wordt verduidelijkt waardoor verschillende onzekerheden en neveneffecten ontstaan. Daarnaast worden de resultaten van de literatuur review in hoofdstuk 0 gebruikt.

Aan het eind van iedere paragraaf wordt een suggestie gedaan voor een aanvulling in de Maatregelcatalogus spoortrillingen.

5.2 Maatregelen aan de bron

Bij de bron zijn drie basis maatregelen beschikbaar:

- Verkleinen excitatie.
- Wijzigen excitatie systeem, door:
 - Verlagen van de verticale stijfheid.
 - Aanbrengen van extra buigstijfheid.

Het verkleinen van de excitatie en het aanbrengen van extra buigstijfheid zijn aan elkaar gekoppeld. Deze zullen daarom in de eerste paragraaf samen behandeld worden. Daarna wordt meer aandacht besteed aan het verlagen van de verticale stijfheid (tweede maatregel).

5.2.1 Verkleinen excitatie / aanbrengen extra buigstijfheid

De studie van Auersch (12) geeft aan dat een verhoging van de buigstijfheid vooral invloed heeft op de spreiding van de krachten onder de spoorconstructie en niet op de grootte van de kracht. Daardoor heeft een buig-stijvere spoorconstructie alleen effect in de nabije omgeving van het spoor.

Het is aannemelijk dat een grotere buigstijfheid leidt tot een betere spoorligging en minder oneffenheid door o.a. zakkingen, variatie in de bodem en slijtage. De fundering heeft geen invloed op lassen die technisch noodzakelijk zijn, bijvoorbeeld voor elektrische isolatie. Dat leidt ook tot een lager trillingsnelheid. Dit aspect is niet gevonden in de beoordeelde literatuur. Mogelijk is de reductie van de spooroneffenheid een belangrijke bijdrage aan de trillingsreductie op grotere afstand.

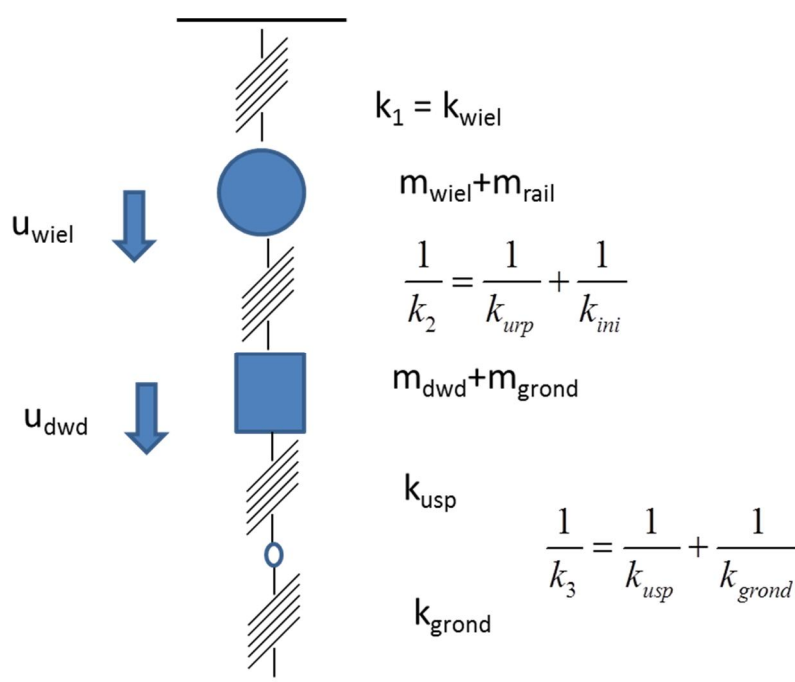
Toevoegen aan Maatregelcatalogus

- Het vergroten van de buigstijfheid van de spoorconstructie heeft op zichzelf een spreidend effect op de belasting van het spoor op de ondergrond. Dit is op korte afstand waarneembaar als trillingsreductie, maar deze reductie neemt af bij toenemende afstand. Aan dit type maatregel kan dan moeilijk een vaste reductie toegekend worden, op grote afstand zal deze kunnen tegenvallen.
- Om de invloed van maatregelen goed in te schatten moet serieus gedacht worden aan 3-D eindige elementen methodes, waarbij de spoorstaaf en de as-massa worden meegenomen.

5.2.2 Verlagen verticale stijfheid

Figuur 5.1 geeft een modellering voor de wiel-rail-bodem interactie die bruikbaar is om een aantal neven effecten op dit onderwerp nader toe te lichten. De figuur toont een basismodel voor de beweging van het wiel (gemodelleerd als massa) en de dwarsligger (ook gemodelleerd als massa) en hun onderliggende interactie. In deze figuur zijn uitsluitend veerelementen getekend, maar daar horen ook dempers bij. Vooral de reactie van de bodem wordt meer door de impedantie van de bodem dan de stijfheid van de bodem bepaald. Ook het gedrag van de wielophanging wordt in belangrijke mate door de impedantie bepaald. Er is een beperkte frequentie-range verondersteld door de beweging van de draaistellen (en dus ook de wagenbak) niet mee te nemen.

Het model zelf is ongeschikt om prognoses mee te maken. Dit heeft verschillende achtergronden: de frequentie range waarin het model geldig is, is beperkt. Een spoorconstructie bestaat uit een buigstijf element (de spoorrails) op een verende en dempende ondersteuning. Deze wordt vaak gemodelleerd als een verende ondersteunde ligger. Dit is niet correct in dit model opgenomen. Zie verder bijvoorbeeld de studie van Auersch (12), die besproken is in paragraaf 4.3.6. Daar bleek dat de massa van de verschillende elementen en de stijfheid tussen de elementen maatgevend te zijn. De buigstijfheid van de elementen spelen een kleinere rol en de effecten daarvan treden vooral op op kortere afstand tot het spoor.



Figuur 5.1 Basismodellering voor wiel-rail-bodem interactie

Wat deze figuur wel duidelijk maakt, is de mogelijke invloed en neveneffecten van stijfheid toevoeging onder de rails (railpad, in dit geval is een onder rail pad URP verondersteld) en de dwarsligger (under sleeper pads USP).

Bij het toevoegen van een USP, wordt de stijfheid k_3 onder de dwarsligger lager. Er is hier sprake van een serie systeem. Om de stijfheid k_3 wezenlijk te verlagen moet de stijfheid van de USP in vergelijkbare orde zijn van de stijfheid van de grond. Overigens, een dergelijke

keuze leidt dan tot een wezenlijke verlaging van de stijfheid van de onderconstructie, en de vraag is of dat bij een slappe ondergrond wel wenselijk is.

Bij het toevoegen van een railpad, wordt de stijfheid tussen de rails en de dwarsligger in het algemeen wel aanzienlijk lager, want de stijfheid is in beginsel groot als er geen elastisch materiaal in de railklem aanwezig is.

Dit model laat zien dat voor de lage frequenties de plaats van het verende element niet relevant is: bij lage frequenties wordt het systeemgedrag gedomineerd door de stijfheid. Bij hogere frequenties kan wel enig verschil verwacht worden. Dat verschil kan aanzienlijk worden als het systeem belast wordt in de buurt van de eigenfrequenties. Het oorspronkelijke systeem werkt primair als één-massa-veer systeem, waarbij de rails en het wiel redelijk als enkele massa functioneren. Maar, bij hogere frequenties brengt de extra veerstijfheid een extra vrijheidsgraad in het systeem, omdat de beweging van de spoorstaaf en het wiel en de dwarsligger kunnen gaan verschillen. Bij die frequenties wordt het systeemgedrag anders. Of de trillingen groter of kleiner worden, hangt in belangrijke mate af van de belasting-frequentie ten opzichte van de eigenfrequenties.

De waarde van de stijfheid k_{grond} wordt bepaald door de stijfheid van de hele grondconstructie onder de dwarsdragers. Deze stijfheid wordt in belangrijke mate bepaald door het baanlichaam, maar ondanks de spanningsverspreiding in de ondergrond kunnen bij een dun baanlichaam op slappe ondergrond de stijfheid van de ondergrond een rol spelen, zie (20). Auersch (12) geeft aan dat de reactie wordt beïnvloed door de aanwezigheid van een stijve laag onder een slappe laag. In dat geval wordt de veerstijfheid van de onderste veer groter (veer stijver) terwijl er minder (uitstralingsdemping) optreedt (dempingsconstante wordt kleiner).

De precieze ligging van de eigenfrequenties wordt bepaald door de volledige systeemeigenschappen, dus ook de aanwezige stijfheid van de bodem en de daarin aanwezige gelaagdheid. Om het effect van dergelijke maatregelen te berekenen moet ook rekening gehouden worden met de effecten op de spreiding in de spoorstaaf. Een lagere stijfheid betekent naast een lagere kracht in de bodem, maar ook een groter gebied waarover de kracht spreidt, zie studie Auersch (12).

Toevoegen aan Maatregelcatalogus

- Het toevoegen van een dempende laag onder een dwarsligger bij een baan op slappe bodem heeft nauwelijks effect.
- Het aanbrengen van een dempende materiaal onder de rails heeft meer kans van slagen, maar geeft wel een reductie van de laagfrequente stijfheid en dus vergroting van de indrukking. Tevens heeft dit meer invloed op de reactie van het wiel en daardoor mogelijk de rijeigenschappen van de trein.

5.2.3 Toevoegen van massa aan spoorconstructie

Het model in Figuur 5.1 leent zich om na te gaan wat de invloed van het aanbrengen van extra massa in/onder de constructie is. Bijvoorbeeld door het verhogen van de massa van de dwarsdrager. Hierdoor wordt de eigenfrequentie lager en omdat het meestal om redelijk gedempte systemen gaat worden er minder trillingen gegenereerd. Massa toevoegen heeft vooral zin om de eigenschappen van het systeem aanzienlijk te wijzigen in samenhang met toegevoegde stijfheid/flexibiliteit.

Een aantal maatregelen, bijvoorbeeld het toepassen van een langere dwarsligger of bredere dwarsdrager, of het wijzigen van de afstand tussen de dwarsdragers, heeft zowel invloed op

de massa in het spoor als op de stijfheid in de constructie. Aangezien de eigenfrequenties van het systeem worden bepaald door de verhouding tussen massa en stijfheid, is de eerste indruk dat dergelijke maatregelen een beperkt effect op de eigenschappen zullen hebben.

Toevoegen aan Maatregelcatalogus

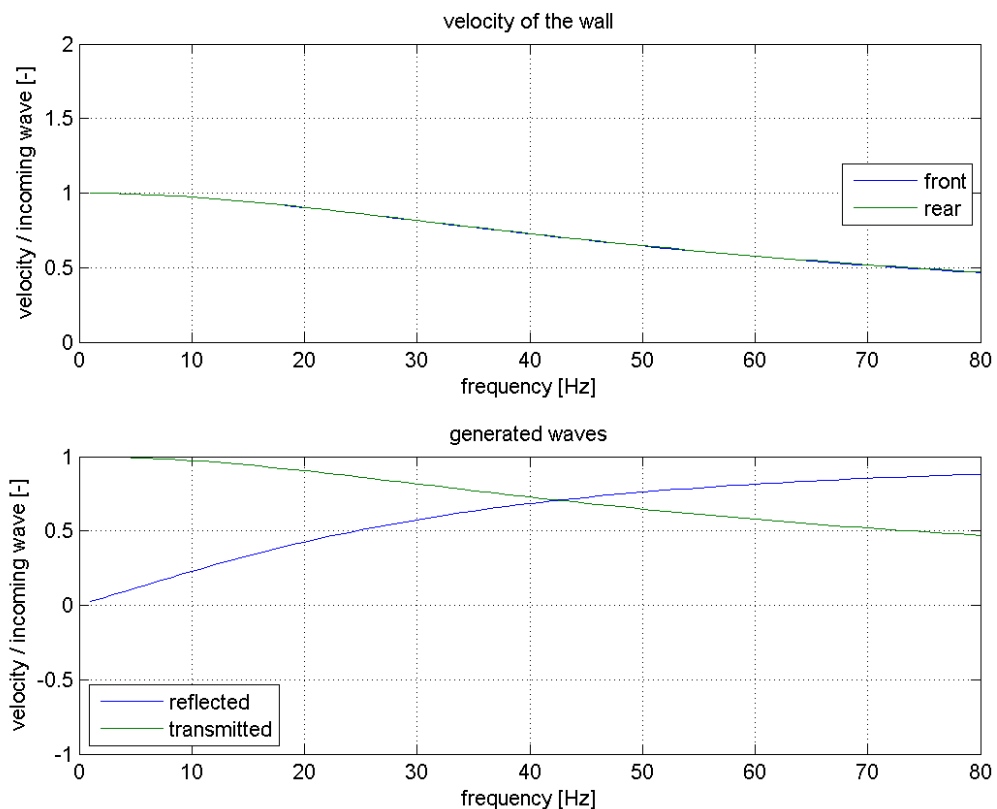
- Uitsluitend massa aan een bestaande conventionele spoorlijn toevoegen leidt tot een beperkte verschuiving van de eigenfrequenties en nauwelijks tot een reductie van trillingen.

5.3 Maatregelen aan de overdracht

5.3.1 Stijve trillingswand als 1-D element

In het algemeen wordt gesteld dat een wand golven reflecteert. Om na te gaan of dit idee volledig is, is de situatie van een stijf of slap element dat een lopende golf reflecteert in de één-dimensionale golftheorie uitgewerkt. De aanpak is ontleend aan (10).

Het hier als voorbeeld geanalyseerde probleem bestaat uit een betonnen wand met dikte 1 m. De bodem heeft een impedantie van 320×10^3 Ns/m en golfsnelheid 200 m/s. De betonnen wand heeft een impedantie van 8485×10^3 Ns/m en golfsnelheid 3635 m/s. Figuur 5.2 toont de berekende trillingsamplitude als functie van de frequentie. De bovenste figuur toont de snelheid van de voorkant en de achterkant van de wand. Deze zijn vrijwel identiek, zodat de wand vrijwel als starre massa werkt.



Figuur 5.2 Betonnen wand 1 m berekend volgens 1-D golftheorie

De onderste figuur toont de gereflecteerde (reflected) en doorgelaten (transmitted) golf. De doorgelaten golf is identiek aan de beweging van de wand, want dit is in dit model immers de enige mogelijke excitatie van de grond achter de wand. De doorgelaten golf neemt langzaam af met toenemende frequentie. De gereflecteerde golf neemt langzaam toe met de frequentie.

Hoewel dit beeld met enige moeite terug te vinden is in de berekeningen, zijn de verschillen tussen de 2-D berekening en de hier getoonde 1-D berekening aanzienlijk. Een belangrijk aspect hierbij is de beperkte lengte van de wand, zodat de 1-D som pas geldig is als de golflengte kleiner is dan de lengte van de wand. De 1-D berekeningen laten echter zien dat bij een frequentie van 30 Hz de betonnen wand een reductie van 20% geeft.

In berekeningen wordt vaak een hogere efficiëntie gevonden, bijvoorbeeld (13) en (6). Dit suggereert dat er meer aspecten een rol spelen dan alleen de reflectie van de golven tegen de wand. Hierbij kan gedacht worden aan de volgende aspecten:

- In invallende Rayleigh-golf (oppervlakte golf) gaat gepaard met elliptische beweging (horizontale en verticale verplaatsingen). Deze beweging gaat ook gepaard met rekken, bijvoorbeeld extensie in verticale richting. Bij een stijve wand zal dit patroon alleen leiden tot een gemiddelde verplaatsing. Dan speelt mogelijk de axiale stijfheid van de wand een belangrijke rol.
Een betonnen wand (golfsnelheid 3600 m/s) met lengte 18 m heeft een eerste axiale eigenfrequentie bij 50 Hz. Dan gaat bij 50 Hz dit effect mogelijk verloren en treedt er minder demping van de golf op.
- Omdat de amplitude van horizontale bewegingen niet constant zijn bij de golfpassage kunnen dergelijke effecten ook optreden voor de buigresonanties. Deze liggen naar verwachting lager dan de axiale frequenties.
- Opgemerkt wordt dat de wand in de grond geen opslingering zal vertonen, omdat de demping van een ingebedde fundering hoog is. Het effect zal bestaan uit het verminderen van de effectiviteit van de wand voor de betreffende eigenfrequenties.

Twee andere aspecten die uit de meer-dimensionale golftheorie komen moeten ook genoemd worden:

- Er zal scattering van golven optreden: dat wil zeggen dat de wand als trillingsbron gaat functioneren en dus golven in alle richtingen gaat uitstralen. De interferentie van deze golven leidt mogelijk tot de variatie in verschillende waarnemingspunten.
- Onder de voet van de wand zal breking van golven optreden, een effect dat waarschijnlijk samenhangt met de scattering die hierboven genoemd is. Het leidt ook tot een extra golf, met alle mogelijke bijbehorende interferentie patronen.

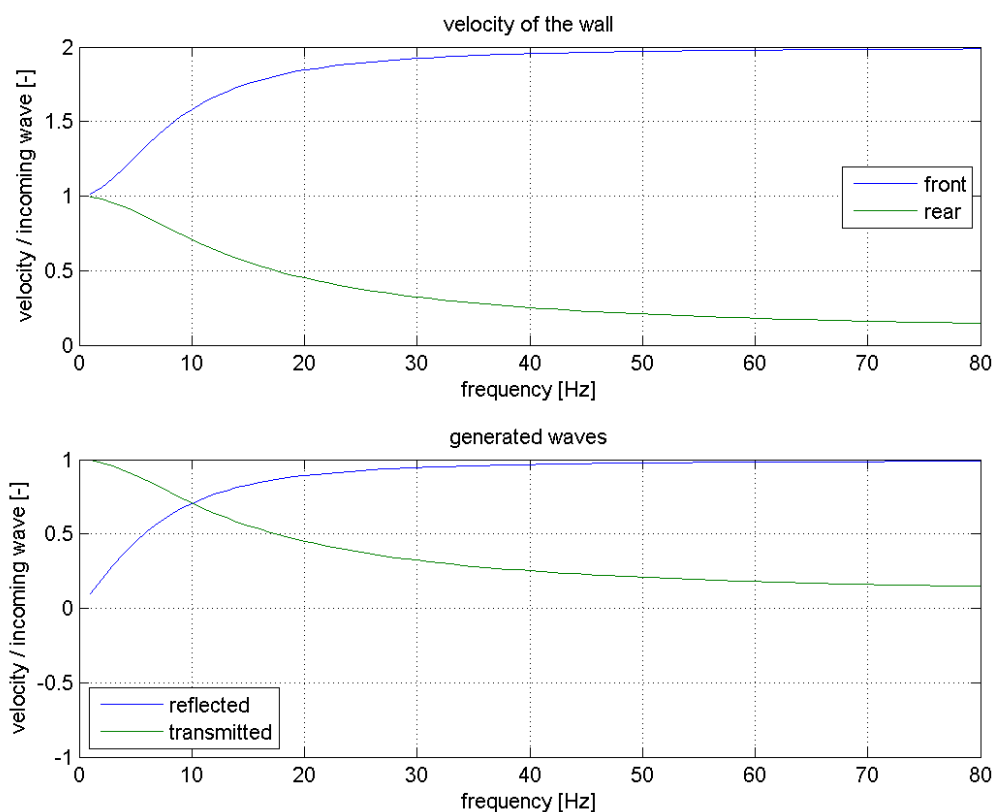
Toevoegen aan Maatregelcatalogus

- De effectiviteit van een stijve wand hangt niet alleen af van de lengte, maar ook van de mate waarin de wand het golfpatroon van de oppervlaktegolf verstoort. Daarvoor is voldoende buigstijfheid nodig. Frequenties waarbij de wand in resonantie komt moeten voldoende hoog liggen.

5.3.2 Een wand van EPS als 1-D element

Om een lichte wand te bekijken is uitgegaan van EPS (Expanded Polystyreen) als materiaal. De stijfheid is 10^6 N/m² en de dichtheid is 40 kg/m³. De golfsnelheid is dus 500 m/s en de impedantie 20^3 Ns/m. Deze is geplaatst in dezelfde bodem als de betonnen wand in de

voorgaande paragraaf. Figuur 5.3 geeft de resultaten van het 1-D golfmodel als functie van de belasting-frequentie.



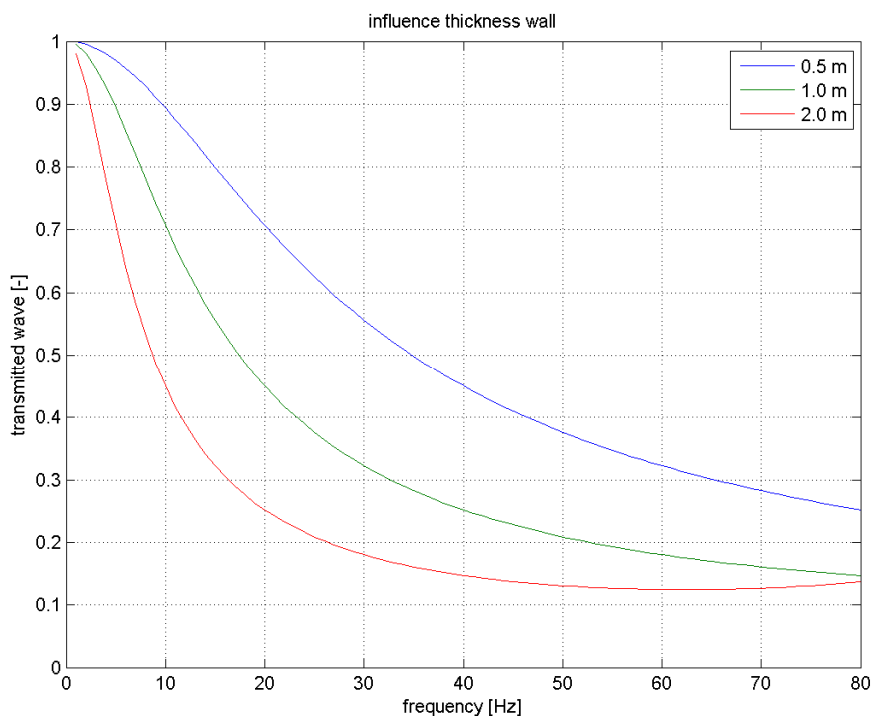
Figuur 5.3 EPS wand dikte 1 m berekend met 1-D golf theorie

Voor hogere frequenties gaat de bodem aan de voorzijde van de wand het gedrag met vrij uiteinde vertonen: de amplitude verdubbelt. De wand geeft weinig doorgelaten golven. Dit effect valt overigens weg als de EPS wand in resonantie komt. Door de lage golfsnelheid treedt dit pas op bij 250 Hz (wanddikte 1 m). Bij een dikkere wand treedt dit op bij een lagere frequentie (bijvoorbeeld dikte 5 m dan is de frequentie 50 Hz). Bij de resonantiefrequentie worden de golven zonder demping doorgegeven.

De amplitude afname van golven achter de wand wordt in het lagere frequentiegebied bepaald door de dikte van het EPS, als de diepte van de wand zodanig is dat deze de volledige golf kan tegenhouden. Figuur 5.4 laat dit effect zien. Bij een frequentie van 20 Hz reduceert een wand van 0.5 m tot 70% van de inkomende golf, terwijl een wand van 2 m dikte reduceert tot 25%. In de bodem is de golfsnelheid 200 m, dus de golflengte bij 20 Hz 10 m. Wil het scherm een Rayleigh-golf afvangen, moet het dus zo'n 15 m diep steken.

Bij een bodemprofiel met bijvoorbeeld een stijve toplaag, kan er mogelijk een extra effect optreden als alleen de stijve laag onderbroken wordt. Vice versa kan dit ook betekenen dat in een profiel met een slappe toplaag de wand minder effectief is. Opgemerkt wordt dat een dergelijke wand mogelijk niet stabiel is in slappe bodem. Een toepassing waarbij een kortere wand vlak voor een pand geplaatst wordt lijkt meer voor de hand te liggen. Hiermee is enige ervaring opgedaan.

Terzijde: in de figuur is voor de 2 m dikke wand bij 70 Hz zichtbaar dat de doorgelaten golf weer oploopt. Dit effect ontstaat doordat de 2 m dikke wand een eigenfrequentie heeft van 125 Hz. De maximale afname wordt bereikt bij de halve frequentie, in dit geval dus 62.5 Hz.



Figuur 5.4 Invloed wanddikte bij EPS scherm. Het effect dat (oppervlakte) golven deels onder het scherm door kunnen lopen is in deze figuur niet opgenomen.

Toevoegen aan Maatregelcatalogus

- De effectiviteit van een slappe wand hangt niet alleen af van de lengte, maar ook van de dikte. Bij dikke wanden zit hier mogelijk een optimum in.

5.4 Maatregelen aan het pand

5.4.1 Stijfheid vloeren en wanden

Het is van belang te constateren dat vloeren eigenfrequenties hebben. Vaak treedt juist bij die frequenties hinderproblemen op, als deze frequenties vanuit de bodem-excitatie aangeslagen worden. Omdat de vloeren een relatief kleine dempingsmaat hebben, zijn de resonantie pieken smal en kunnen kleine wijzigingen in het excitatie systeem veel invloed hebben.

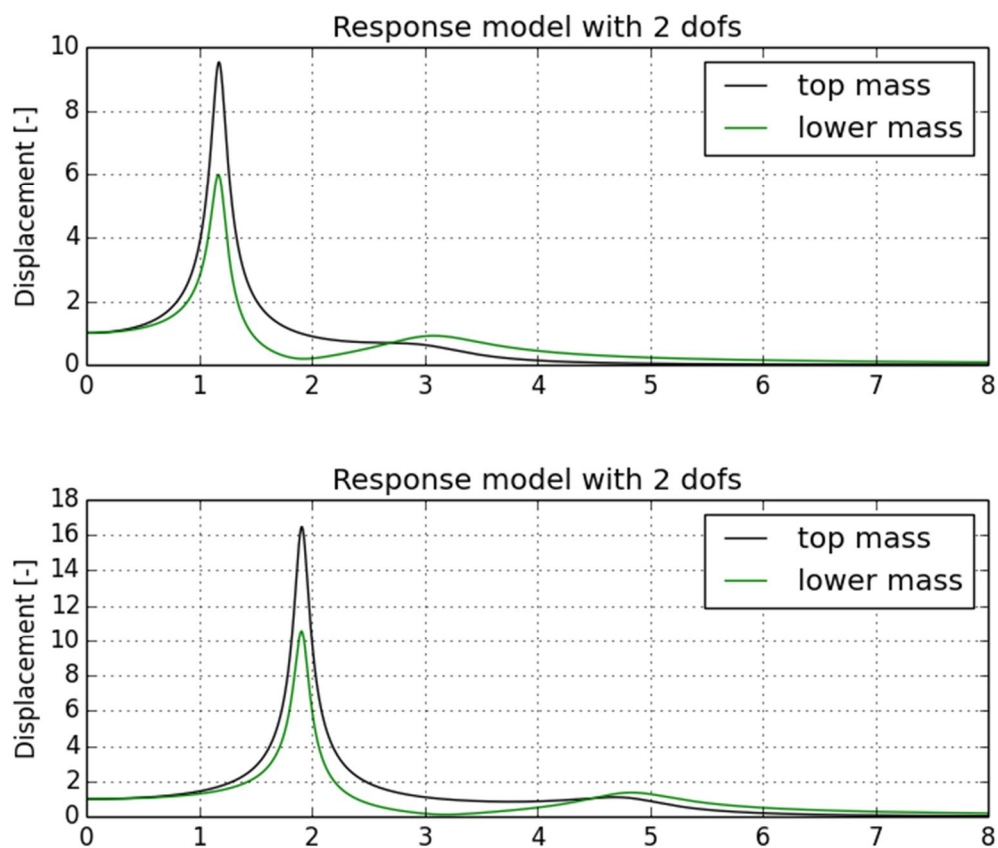
Bij het dimensioneren van maatregelen bij de bron of het pad moet er dus voor gezorgd worden dat de frequenties juist voor die eigenfrequenties effectief zijn. Deze gedachtegang maakt analyses in het frequentie domein van maatregelen relevanter.

Figuur 5.5 geeft een voorbeeld van een licht gedempt (viskeuze demping, dempingsmaat orde 10%) twee massa veer systeem dat wordt verstijfd. De amplitude op de verticale as is genormeerd op de opgelegde bodemtrilling. Op de horizontale as staat de opgelegde frequentie. In de oorspronkelijke situatie (bovenste figuur) treedt bij de frequentie van 2 Hz duidelijk verzwakking op, ongeveer 15% van het aangeboden signaal wordt doorgegeven. In de verstijfde constructie (onderste figuur) treedt bij deze frequentie versterking met een factor

10 op. Dit geeft aan dat een frequentie die in het gebouw slecht zichtbaar is, maar wel in het aangeboden signaal aanwezig is, in een versterkt gebouw (of een ander stijver gebouw) grote amplitudes kan geven.

N.a.v. de resultaten van dit voorbeeld kunnen nog twee opmerkingen gemaakt worden:

- De resultaten voor de onderste massa zijn in dit opzicht gevoeliger voor het beschreven effect dan de bovenste massa.
- Veel systemen worden beschreven als één massa veersysteem. Voor een beperkte frequentieband is dat meestal wel juist, maar dit voorbeeld laat zien dat bij de tweede eigen-frequentie weinig demping (of zelfs versterking) kan optreden.



Figuur 5.5 Overbrenging bodemtrillingen (transfer functies) naar twee-massa-veer systeem (frequentie op horizontale as, amplitude op verticale as is genormeerd op de aangeboden bodemtrilling) bovenste figuur uitgangspunt, onderste figuur stijfheid 2.8 maal groter

Een verstijfde constructie geeft in het algemeen een kleinere statische vervorming en een hogere eigenfrequentie dan de slappere constructie. Dat betekent dat hogere frequenties in de belasting een belangrijkere rol gaan spelen.

Daarbij moet rekening gehouden worden met de demping, die meestal afneemt. Dit volgt uit de dempingsmaat ζ van het één-massa-veersysteem:

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (0.4)$$

waarin m de massa, c de demping en k de stijfheid is. Als de stijfheid k vergroot wordt zonder dat de demping c groter wordt, wordt de dempingsmaat kleiner. Ook als de grotere stijfheid tot een hogere massa leidt, wordt de dempingsmaat kleiner, terwijl de invloed op de eigenfrequentie $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$ door de grotere massa minder wordt. Een kleinere dempingsmaat betekent dat het systeem bij de hogere eigenfrequentie een grotere opslingering geeft. Deze grotere opslingering is wel de opslingering van de statische vervorming, die kleiner wordt door de grotere stijfheid.

Een aspect dat bij de modellering als één-massa-veer systeem niet vergeten mag worden dat een vloer ook hogere eigenfrequenties heeft (de boventonen). Ook deze worden hoger bij verstijving van de constructie. Als deze naar een frequentiegebied schuiven waar relatief veel trillingen gegenereerd worden, kan dit de efficiëntie sterk reduceren.

Tussen deze eigenfrequenties zitten meestal gebieden waar sprake is van uitdoving. Ook die verschuiven bij verstijving van de constructie. Dit kan tot gevolg hebben dat frequentie die in de oorspronkelijke meting op de vloer nauwelijks zichtbaar zijn (omdat ze toevallig uitgedoofd worden) vele malen sterker worden.

Als alternatief voor het verstijven kan natuurlijk ook gedacht worden aan het aanbrengen van extra (passieve) demping in een vloer als blijkt dat de demping in de vloer erg klein is.

Een aspect waar mogelijk rekening gehouden moet worden is het risico van geluidsafstraling. Als in een pand constructie onderdelen een andere stijfheid krijgen heeft dit gevolgen voor de eigenfrequenties van alle vloeren en wanden. Zo kan als voorbeeld een stijvere vloer aanleiding geven tot een hogere eigenfrequentie van een wand, waardoor het uitgestraalde geluid in het hoorbare frequentiegebied komt.

Toevoegen aan Maatregelcatalogus

- Voorafgaand aan de simulaties moet frequentie-inhoud van de belasting uit bodem afzonderlijk bepaald worden.
- Er moet aandacht worden besteed aan de uitdovingsfrequenties van de bestaande constructie waaraan gemeten is (als er sprake is van een bestaande constructie).
- Er moet inzicht worden gegeven in de (hogere) eigenfrequenties van zowel de bestaande als de vernieuwde verstijfde constructie.
- Rekeninghouden met mogelijke invloed op andere constructie delen i.v.m. hoorbaar geluidsafstraling.

5.4.2 Verende opleggingen

Om het afveren van een pand te beoordelen, wordt het pand vaak gemodelleerd als star lichaam op een verende oplegging. Een star lichaam heeft echter zes vrijheidsgraden, en het afgeveerde systeem heeft daardoor ook zes eigenfrequenties als star lichaam. Voor een doorsnede loodrecht op het spoor zijn het drie vrijheidsgraden: horizontale translatie, verticale translatie en rotatie. De horizontale translatie en de rotatie zijn gekoppelde vrijheidsgraden. Er moet voor gezorgd worden dat deze eigenfrequenties alle voldoende laag liggen en/of voldoende gedempt zijn.

Een aspect dat hierbij beschouwd moet worden is de rotatietrilling die kan ontstaan als de voorzijde van een pand met een andere fase belast wordt dan de achterzijde van een pand. Het extreem wordt gevonden als de voorzijde en achterzijde in tegenfase zijn (d.w.z. de

voorzijde gaat omhoog terwijl de achterzijde omlaag beweegt). Dit treedt op als de gebouwdiepte gelijk is aan de halve golflengte

$$\frac{1}{2}\lambda = \frac{1}{2}\frac{c}{f} = L \rightarrow f = \frac{1}{2}\frac{c}{L} \quad (0.5)$$

Met L gebouwdiepte en c de golfsnelheid in de bodem. Bij het ontwerp moet dus worden beoordeeld of de eigenfrequentie die hoort bij de rotatietrilling niet overeenkomt met deze frequentie. Door een gunstige of juist ongunstige samenloop van pandafmeting en golfsnelheid in de bodem lijkt het voorstelbaar dat een maatregel die in een situatie goed uitpakte, in een andere situatie juist slecht uitpakt.

Toevoegen aan Maatregelcatalogus

- Bij toepassing van afgeveerd gebouw op een verende oplegging moeten alle drie (of zes) eigen-frequenties (inclusief de bijbehorende demping) worden bepaald.
- Bij de beoordeling van de efficiëntie van de maatregel moet de fase verschuiving van de excitatie van de verschillende opleggingen bij de eigenfrequenties worden beschouwd.

6 Keteninvloed en onzekerheden

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk verschuift de aandacht van de specifieke maatregelen naar de beschouwing van het systeem als geheel. Dit is een belangrijk aspect, want de onzekerheid in prognoses van effecten wordt voor een belangrijk deel veroorzaakt door de interactie in de keten.

Daarna wordt in dit hoofdstuk aandacht besteed aan het gedrag van de onzekerheden in dynamische systemen en aan de gevolgen van de sommatie van verschillende golven, in zowel de bodem als de interactie tussen de bodem en een pand.

6.2 Keteninvloed

De trillingssnelheid in een locatie in een pand wordt theoretisch in het frequentiedomein (ω is hoekfrequentie) bepaald uit

$$v(\omega) = H_{\text{gebouw}}(\omega)H_{\text{bodem}}(\omega)H_{\text{baan}}(\omega)Y(\omega)F(\omega) \quad (0.6)$$

Dit noemen we in dit rapport de voortplantingsketen. Hierin zijn:

$F(\omega)$ de belasting uit het spoor.

$Y(\omega)$ de admittantie van het spoor, die aangeeft hoe hard het spoor trilt onder de belasting.

$H(\omega)$ de overdrachtsfuncties van de baan, de bodem en het gebouw.

$v(\omega)$ de trillingssnelheid in het gebouw.

ω de hoekfrequentie ($\omega = 2\pi f$, met f de frequentie in Hz).

In de praktijk worden vaak verschillende componenten gezamenlijk uitgerekend, e.e.a. afhankelijk van de beschikbare software.

Deze formule geeft aan dat voor elke frequentie het eindresultaat ontstaat door een reeks vermenigvuldigingen. Als voor een bepaalde frequentie ω veel van de factoren groot zijn levert dit een grote trilling op. Maar, de onnauwkeurigheden en onzekerheden in een modellering planten zich ook in deze keten voort. Dat betekent dat onzekerheden in elk deelmodel invloed kunnen hebben op de onzekerheid het eindresultaat.

Onzekerheden sommeren volgens de wortel van de kwadraten van de afzonderlijke onzekerheden. Dit betekent dat als de grootste onzekerheid uit één factor gereduceerd wordt, de totale onzekerheid slechts beperkt afneemt. Daarnaast kunnen correlaties die ontstaan doordat sommige parameters in verschillende factoren gebruikt worden, de situatie versterken.

6.3 Sommatie van twee trillingen

6.3.1 Theorie

We zien vaak relatief grote afwijkingen in het frequentiedomein. Dit kan voor een deel wiskundig verklaard worden door de interferentie tussen twee golven te bekijken. De waargenomen trilling bestaat dan uit de sommatie van twee golven met dezelfde frequentie te beschouwen

$$v(t) = v_1 \sin(\omega t) + v_2 \sin(\omega t + \varphi) \quad (0.7)$$

Hierin zijn v_1 en v_2 twee amplitudes, ω een gegeven hoekfrequentie, t de tijd en φ de fasehoek tussen de twee signalen. Dit is de situatie in een meetpunt wanneer twee golven met min of meer gelijke amplitude uit verschillende richtingen interfereren, maar treedt ook op als twee golven elkaar inhalen (bijvoorbeeld de S-golf en de R-golf uit dezelfde bron).

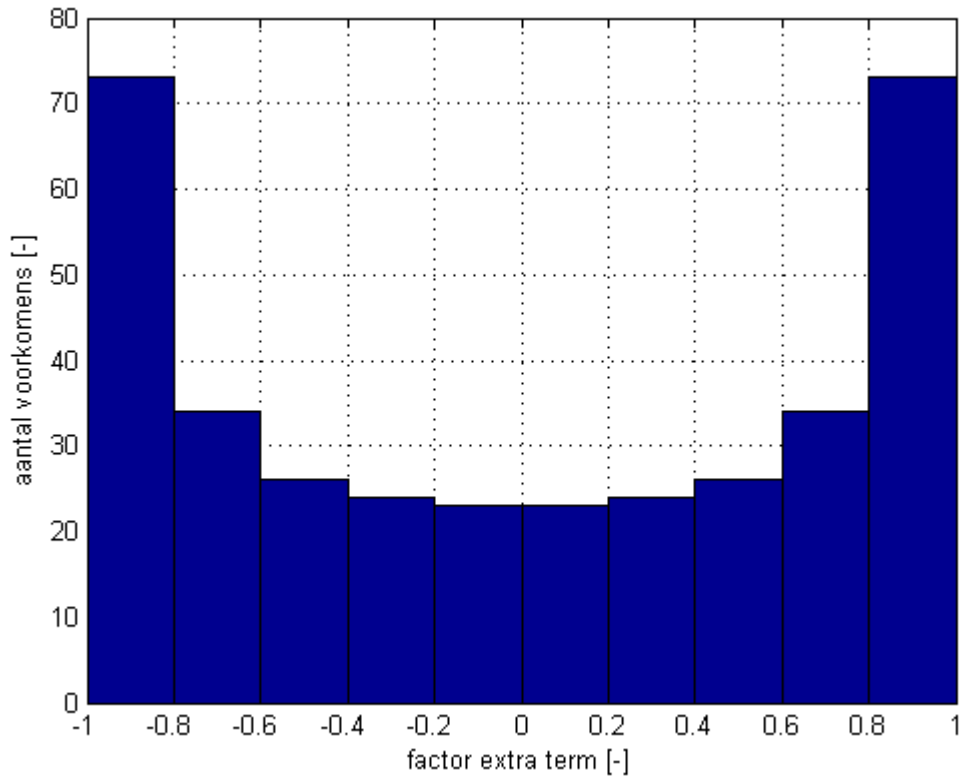
De vergelijking voor de trilling $v(t)$ kan uitgewerkt worden tot een enkele sinus term:

$$\begin{aligned} v(t) &= v_1 \sin(\omega t) + v_2 \sin(\omega t) \cos \varphi + v_2 \cos(\omega t) \sin \varphi \\ &= [v_1 + v_2 \cos \varphi] \sin(\omega t) + v_2 \sin \varphi \cos(\omega t) \\ &= \sqrt{(v_1^2 + 2v_1 v_2 \cos \varphi + v_2^2)} \sin(\omega t + \psi) \end{aligned} \quad (0.8)$$

In eerste instantie gaat het om de amplitude, de fasehoek ψ (van het gesommeerde signaal) is niet interessant voor een enkele harmonische golf. De amplitude hangt naast de amplitudes van de twee interfererende golven (v_1 en v_2), nog af van de fasehoek φ (de fasehoek tussen de beide interfererende signalen). De fasehoek φ kan opgevat worden als een stochast, met een continue verdeling tussen -180 en 180 graden ($-\pi$, $+\pi$). Als dit ingevoerd wordt, wordt voor de verdeling van de term $2 v_1 v_2 \cos \varphi$ Figuur 6.1 gevonden.

Deze figuur moet als volgt worden gelezen: Op de horizontale as staat een mogelijke waarde van de extra term, uitgerukt in een interval, bijvoorbeeld tussen de 0.4 en 0.6. Voor dit interval wordt (op de verticale as) afgelezen: ongeveer 26 voorkomens. Het betreft 360 punten, de berekening is uitgevoerd voor elke graad van φ . De kans dat de term $2 v_1 v_2 \cos \varphi$ tussen de 0.4 en 0.6 ligt is dan $26/360 \cdot 100 = 7.2\%$.

De maximale waarde wordt relatief vaak gevonden, in 40% van de gevallen is de term $2 v_1 v_2 \cos \varphi$ groter dan 0.8 of kleiner dan -0.8. Dat wil zeggen: de extreme waarden komen relatief vaak voor.

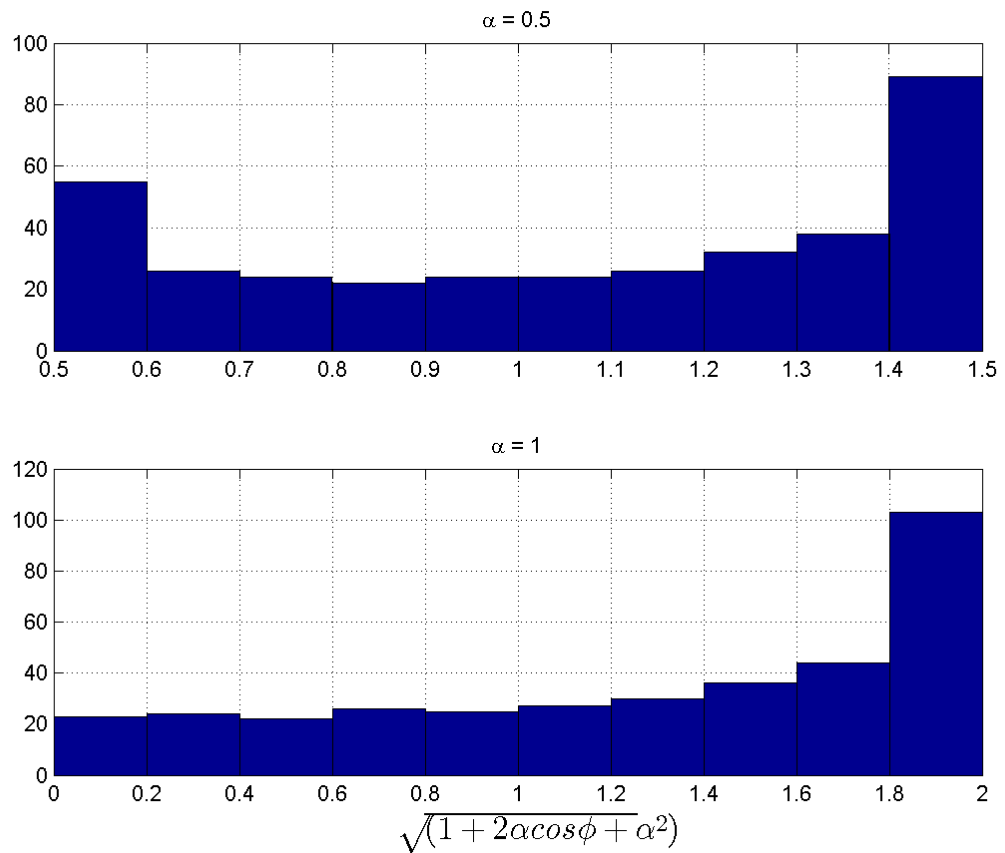


Figuur 6.1 Kansverdeling voor extra term in vergelijking (0.8) beschouwd over 360 gevallen

Een dimensieloze vorm wordt verkregen door te stellen $\hat{v}_2 = \alpha \hat{v}_1$ met $\alpha > 0$. Dan volgt

$$\frac{v(t)}{\hat{v}_1} = \sqrt{(1 + 2\alpha \cos \varphi + \alpha^2)} \sin(\omega t + \psi) \quad (0.9)$$

Voor twee situaties is deze formule uitgewerkt: voor $\alpha=0.5$ d.w.z. er worden twee signalen gesommeerd waarbij de tweede de helft van het eerste signaal is, en voor $\alpha=1.0$, d.w.z. de situatie waarin beide signalen even groot zijn. Figuur 6.2 toont het resultaat.



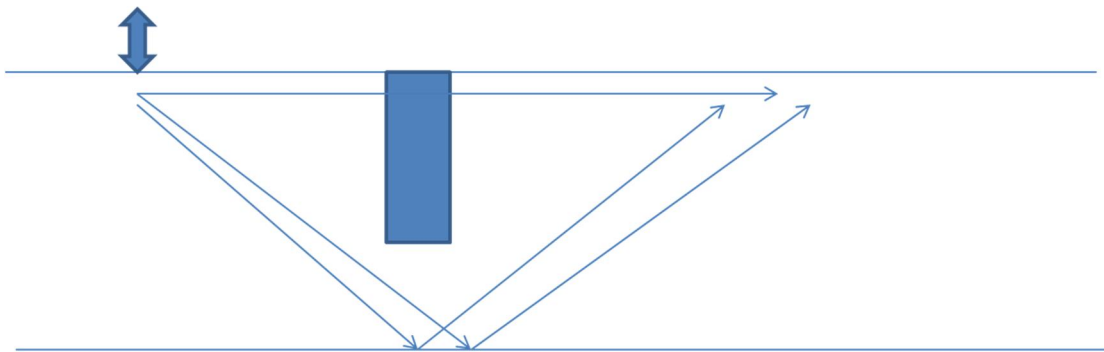
Figuur 6.2 Kansverdeling voor de sommatie van twee signalen met onbekende fasehoek ϕ

Deze figuur moet als volgt worden gelezen: Op de horizontale as staat een mogelijke waarde van de trillingsnelheid, uitgerukt in een interval, bijvoorbeeld tussen de 1.4 en 1.6. Voor dit interval wordt (op de verticale as) afgelezen: ongeveer 43 voorkomens. Het betreft 360 punten, de berekening is uitgevoerd voor elke graad van ϕ . De kans dat de trillingsnelheid term tussen de 1.4 en 1.6 ligt is dan $43/360 \cdot 100 = 11.9\%$.

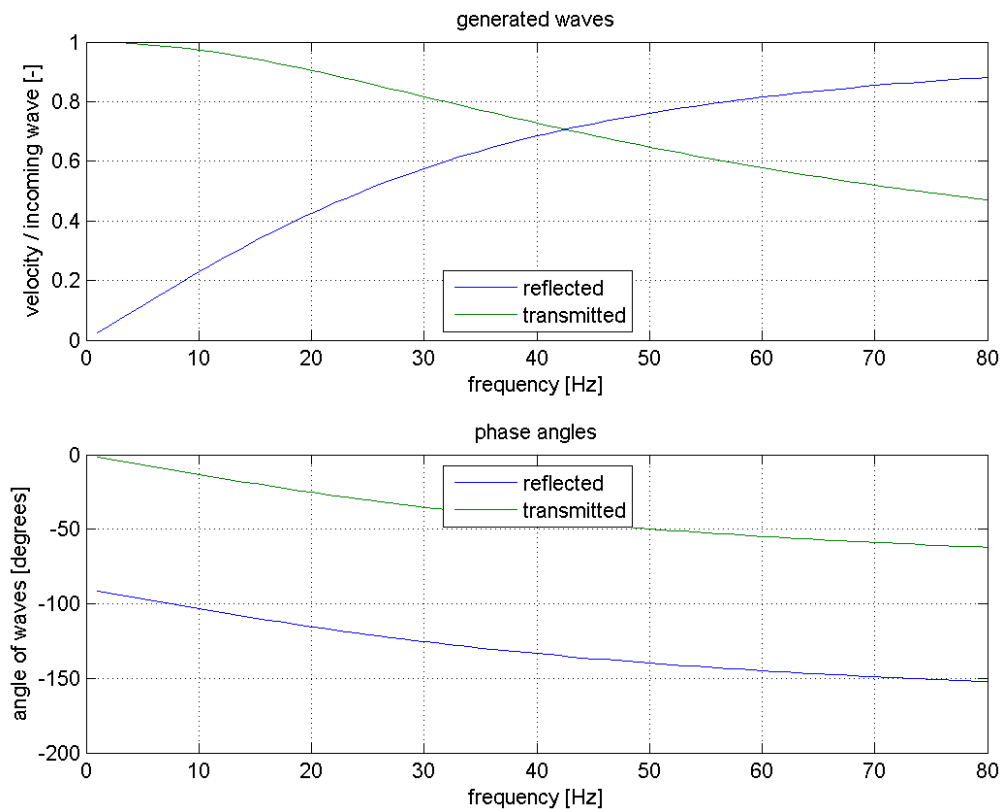
Concluderend wordt gesteld dat de trillingen in een punt in de bodem ontstaan door samengaan van verschillende golven die in het punt arriveren. Naast de amplitude van de golven, speelt ook de fase van de golven een rol. Een trillingsreducerende maatregel verandert niet alleen de amplitude van een golf, maar ook de fase. Dit kan een rol spelen bij de werkelijke efficiëntie. Hierbij komen de extreme gevallen waarbij de golven elkaar of verzwakken of juist versterken vaak voor.

6.3.2 Voorbeeld toepassing 1: korte wand

Als voorbeeld kan de situatie Figuur 6.3 worden beschouwd. Het betreft een wand in een bodem die bestaat uit een slappe laag op een heel dikke stijve laag. De wand steekt niet tot de stijve laag. De wand heeft daarom geen invloed op de golven die op de stijve onderlaag reflecteren, maar wel op de golven die door de wand lopen. Voor de betonnen wand is ook de faseverschuiving van de golven uitgerekend, zie Figuur 6.4.



Figuur 6.3 Golven onder een wand door



Figuur 6.4 Amplitude en fase van de golven voor en achter een betonnen wand

In Figuur 6.4 gaat het over de fase van de doorgelaten golf (de groene lijn). Voor lage frequenties is de fase verschuiving klein, voor hoge frequenties neemt deze af tot -90° . Deze waarde ontstaat omdat voor hoge frequenties de wand als starre massa gaat functioneren. Terzijde wordt opgemerkt dat dit gerelateerd is aan het effect dat in (6) beschreven wordt.

De grafiek geeft duidelijk aan dat er naast een afname van de amplitude ook een fase verschuiving optreedt. Omdat onbekend is welke fase er op het immisiepunt oorspronkelijk aanwezig was, is ook onbekend wat daar de invloed van is. Maar statistisch gezien zal er

relatief vaak sprake zijn van sommaties die tot relatief hoge of juist relatief lage amplitudes aanleiding geven.

De amplitude term $\sqrt{(1 + 2\alpha \cos \varphi + \alpha^2)}$ uit vergelijking (0.9) geeft de mogelijkheid de extreme invloed hiervan te onderzoeken. De gereflecteerde golf wordt golf v_1 genoemd, omdat deze niet wijzigt door het aanbrengen van de wand. De directe golf (wordt dus golf v_2) is bijvoorbeeld tweemaal zo groot is als de gereflecteerde golf ($\alpha=2$). Als de twee golven 90° uit fase zijn (dus $\cos\varphi=0$), dan is de amplitude $\hat{v} = 2.23\hat{v}_1$. Als de directe golf door het plaatsen van een wand halveert, dan zijn beide golven even groot ($\alpha=1$). De fasehoek is dan 60° , zie Figuur 6.4, dit treedt op bij 70 Hz. $\cos\varphi$ is dan gelijk aan -0.5 of $+0.5$. Voor $+0.5$ is nieuwe amplitude $\hat{v} = \sqrt{3}\hat{v}_1 = 1.73\hat{v}_1$. Dit komt overeen met een reductie van 22%. Voor -0.5 is de nieuwe amplitude gelijk aan 1, wat overeenkomt met een reductie van 55%.

6.3.3 Voorbeeld toepassing 2: vloer resonantie

Indien een vloer op twee steunpunten geëxciteerd wordt door een verplaatsing van de beide steunpunten, kan resonantie optreden als de frequentie in de belasting overeenkomt met de resonantiefrequentie. De trilling midden in de vloer kan dan worden beschreven met de vergelijking

$$\hat{v}_m e^{i\omega t} = H_r \hat{v}_1 e^{i\varphi_1} e^{i\omega t} + H_r \hat{v}_2 e^{i\varphi_2} e^{i\omega t} \quad (0.10)$$

Waarin:

- \hat{H}_r De versterkingsfactor bij resonantie.
- \hat{v}_j De excitatie in punt j .
- φ_j De faseverschuiving van de excitatie in punt j .

Dit is in principe precies dezelfde vergelijking als in vergelijking (0.7), alleen in het complexe domein geschreven. Dit houdt in dat bij vloerresonanties hetzelfde verschijnsel kan optreden als hierboven beschreven: fase verschuivingen kunnen het effect van een maatregel versterken of verzwakken.

Toevoegen aan Maatregelcatalogus

- De invloed van mogelijke faseverschuivingen tussen de afgevangen golven en de andere golven moet als onzekerheid in de trillingsprognoses meegenomen worden. Dit geldt zowel voor golven in de bodem als voor golven in het gebouw.

6.4 Afmetingen pand en afstand tot de bron

Een pand wordt geëxciteerd door de trillingen in de bodem in alle contactpunten tussen het pand en de bodem. Uit metingen blijkt dat de trillingen aan de verschillende hoeken van een pand aanzienlijk kunnen verschillen. Door een maatregel voor één punt (bijvoorbeeld het punt dicht bij het spoor) te optimaliseren, kan het resultaat afwijken van de verwachting, omdat de trillingen op andere punten van het pand minder afnemen of zelfs toenemen.

Een oorzaak van deze effecten is het interfereren van golven, zoals besproken in paragraaf 6.3. Als voorbeeld kan de golven onder een wand door gekozen worden, zie Figuur 6.5.

Door het plaatsen van een korte wand reduceert de rechtstreekse golf in amplitude, maar verandert ook de fase. Dit houdt in dat de interferentie met de golven die onder de wand door

lopen via b.v. reflectie op een stijve laag, met een andere golf interfereren. Dit kan veroorzaken dat de reductie van de trillingssnelheid op twee punten kan verschillen.

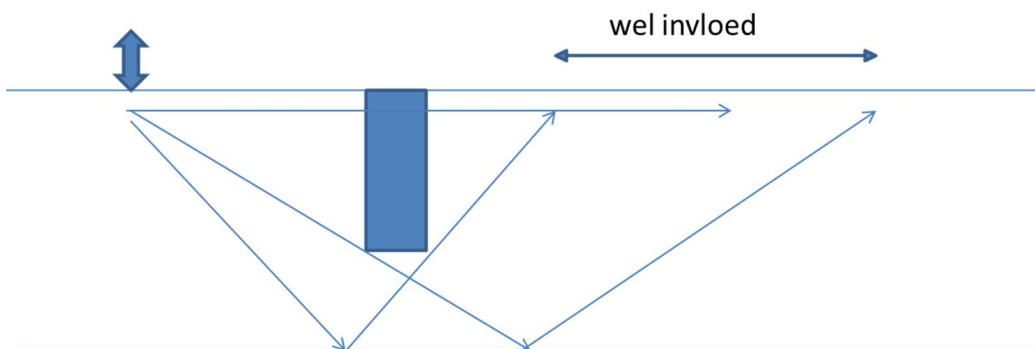
Dergelijke effecten kunnen ook optreden als de afstand van een rij panden langs het spoor niet constant is.

De vraag is in hoeverre dit een realistisch scenario is. De vraag die beantwoordt moet worden is over welke afstand de fase tussen de twee golven 180° kan verschillen. Dit is het verschil tussen een hele of een halve golflengte in de afgelegde weg.

Dit wordt uitgewerkt voor een numeriek voorbeeld. Voor slappe bodem kunnen we uitgaan van een golfsnelheid van 80 m/s. Bij een frequentie van 12 Hz is de golflengte $\lambda = 6.7$ m. Stel dat de reflecterende laag op 9 m diepte ligt. De lengte van het pad van de gereflecteerde golf op 16 m afstand is dan 24.1 m. Als in een vergelijkbare case de reflecterende laag op 7 m diepte ligt, wordt de lengte van het pad van de gereflecteerde golf 21.3 m. Het verschil tussen beide cases is al bijna een halve golflengte. Dat geeft aan dat een dergelijke variatie in diepte van de reflector een halve golflengte kan schelen, wat het verschil tussen versterking of uitdoving kan betekenen.

Een ander aspect is het feit dat de gereflecteerde golf al in belang toeneemt als de directe golf door een scherm gereduceerd wordt. Stel dat de gereflecteerde golf 40% van de directe golf is. De amplitude is voor de situatie van volledige versterking $\sqrt{(1^2+0.4^2)} = 1.08$ maal de oorspronkelijke amplitude van de directe golf. Als de directe golf nu met 70% gereduceerd wordt is de uiteindelijke amplitude (weer voor de situatie van volledige versterking) $\sqrt{(0.3^2+0.4^2)} = 0.50$ maal de oorspronkelijke amplitude van de directe golf. De waargenomen reductie is dus net boven de 50%. De faseverschuiving die een wand oplevert (zie Figuur 6.4) is hierbij niet meegenomen, maar kan de effectiviteit verbeteren of verslechteren.

Er wordt volledigheidshalve nog opgemerkt dat de gereflecteerde golven zelf ook weer kunnen reflecteren op de wand. Dit leidt dan tot plotselinge twee sprongen in het effect van de wand: de meest nabije sprong als de reflecties van de grondlaag op de wand stuiten en de meest verre als de inkomende golven als zij voor dat zij de stijve laag bereiken al op de wand stuiten. Figuur 6.5 geeft een toelichting voor deze situatie. Op de randen van het invloedsgebied kunnen bij sterke reflecties duidelijk verschillende effecten optreden.



Figuur 6.5 Beperkt invloedsgebied van gereflecteerde golven die onder een wand door kunnen lopen

Voor praktische toepassingen betekent dit dat de effectiviteit van een korte wand mede afhankelijk is van de reflectie eigenschappen van de diepe laag, de diepte van deze laag en ook van de positie van de fundering van het pand. Het kan bijvoorbeeld verschil maken wanneer

een pand geheel of gedeeltelijk in de invloedzone van gereflecteerde trillingen staat. Het hangt sterk van de specifieke situatie af of de het verwaarlozen van dit aspect in een prognose aanleiding geeft tot een overschatting op onderschatting van de effectiviteit van de maatregel.

Toevoegen aan Maatregelcatalogus

- De gelaagdheid van de bodem en de stijfheid van diepere lagen kunnen invloed hebben op de effectiviteit van een maatregel.
- De effectiviteit van afschermingsmaatregelen kan beïnvloed worden door de afstand en de afmetingen van het pand.

6.5 Betrouwbaarheid berekeningen

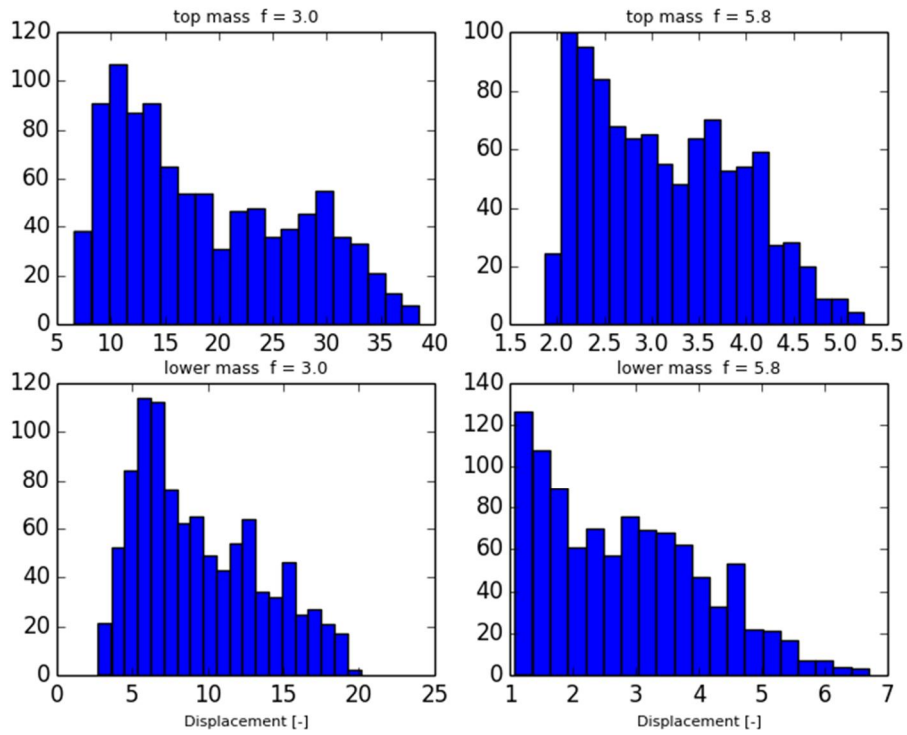
Aan de hand van een probabilistisch model kan toegelicht worden waarom dynamische berekeningen onbetrouwbaar kunnen zijn.

Uitgegaan wordt van een licht gedempt twee-massa-veer systeem, zie bijvoorbeeld Figuur 4.1 en Figuur 5.1. De precieze eigenschappen zijn hier niet zo van belang. De eigenfrequenties van het systeem liggen rond de 3 en 6 Hz. Het systeem wordt belast door een sinusvormige beweging van de bodem. In een Monte Carlo simulatie worden nu de beide stijfheden en dempingsconstanten gevarieerd, door deze te trekken uit een uniforme verdeling die tussen de 75% en 125% van de oorspronkelijke waarde liggen. Er zijn 1000 berekeningen gedaan. Voor elk systeem zijn de amplitudes van beide massa's bepaald voor een frequentie range van 1-8 Hz.

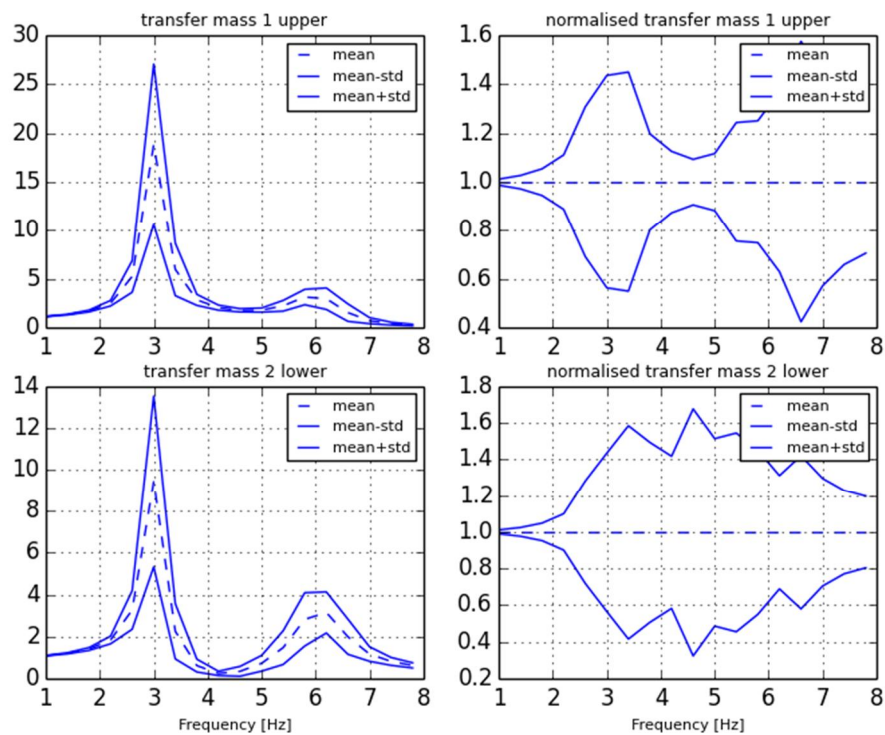
De amplitude van de beide massa's wordt uitgedrukt in de waarde ten opzichte van de grootte van de opgelegde trilling. Formeel zijn de overdrachtsfuncties bepaald. Deze zijn dimensieloos, maar voor het begrip kan de amplitude in mm worden gelezen als de opgelegde amplitude 1 mm is.

Figuur 6.6 geeft het resultaat van de berekeningen in de vorm van het histogram. Dit histogram geldt voor de genoemde frequenties, die in de buurt van de eigenfrequenties liggen. Voor dit licht gedempte systeem heeft het histogram een karakteristieke asymmetrische vorm.

Bij een variatie van $\pm 25\%$ in stijfheid en demping treden voor een gegeven frequentie variaties in overdracht op van een orde 2.



Figuur 6.6 Histogram van de amplitude voor twee eigenfrequenties. Op de horizontale as staat de amplitude van de massa, verticaal staat het aantal keer dat de amplitude voorkomt in 1000 trekkingen



Figuur 6.7 Overdrachtsfuncties: horizontaal de frequentie, verticaal de opslingering

Figuur 6.7 geeft de overdrachtsfuncties als functie van de frequentie. De gestreepte lijn is het gemiddelde van alle berekeningen. De resonantie pieken zijn in de figuren duidelijk zichtbaar. In de figuren zijn ook de standaard afwijking aangegeven: de twee getrokken lijnen zijn de lijnen met plus of min één standaard afwijking. Dat betekent dat ongeveer 70% van de berekeningen tussen deze twee lijnen ligt. In de rechter figuren is dezelfde informatie gegeven, maar nu genormeerd op de overdracht.

Het blijkt dat de variatie in de resultaten frequentie afhankelijk is. Met name in de omgeving van de resonantie-frequenties is de spreiding groot. Dat is ook wel te verwachten: door de variatie van de stijfheid varieert de plaats van de resonantie piek, door de variatie van de demping varieert ook de opslingering ter plaatse van de resonantie frequentie.

Dit betekent dat de juiste parameter keuze essentieel is.

Toevoegen aan Maatregelcatalogus

- De gevoeligheid van berekeningen voor de parameter bepaling moet beschouwd worden.

6.6 Opmerking over demping

Om de responsie van een systeem zoals gegeven in Figuur 5.1 te berekenen, moeten de juiste parameters ingevoerd worden. De massa's en stijfheden zijn meestal redelijk bekend, maar bij de demping moet opgelet worden of er viskeuze of hystereze demping gebruikt moet worden.

De relatie tussen hystereze demping en viskeuze demping is (10), hoewel in de literatuur ook een factor $1/2\pi$ gevonden wordt, bijvoorbeeld (21)

$$D = \frac{\Delta E}{4\pi E} = \frac{c\omega}{2k} = \pi \frac{cf}{k} \quad (0.11)$$

Met:

k	statische stijfheid [N/m].
c	viskeuze dempingsconstante [Ns/m].
ω	hoek frequentie [rad/s].
E	de opgeslagen elastische energie [J].
ΔE	de per cyclus gedissipeerde energie [J].
f	frequentie [Hz].

In bijvoorbeeld (22) wordt voor de railpad damping een 'loss factor' gegeven. Dit houdt in dat uitgegaan wordt van hystereze demping. Voor de ballast en ondergrond wordt ook een 'loss factor' gegeven, maar deze demping betreft vooral uitstralingsdamping en deze is duidelijk viskeus van aard.

Voor analytische oplossingen in het frequentie domein en oplossingen in het tijdsdomein die gebaseerd zijn op Fourier transformaties is dit geen principieel probleem, maar voor tijdsintegratie is dit niet oplosbaar. In dat geval moet overwogen worden een equivalente viskeuze demping voor het hystereze materiaal te kiezen, die zodanig gekozen wordt dat bij de resonantie pieken de juiste demping terug gevonden wordt.

Deze equivalente viskeuze demping is maar voor één frequentie correct. Dit betekent dat voor andere resonantie pieken, de werkelijke demping hoger of lager ligt. Hystereze demping is voor lage frequenties problematisch omdat de statische limiet niet wordt bereikt. Viskeuze

demping is voor hoge frequenties problematisch als deze in een belastingsterm voorkomt, omdat de belasting dan blijft toenemen. Railoneffenheid wordt veelal als een dergelijke belastingsterm ingevoerd.

Materiaal demping is meestal hystereze demping, terwijl uitstralingsdemping typisch viskeuze demping is. Dit is vooral van belang voor ontwerp en controle berekeningen, maar een juiste interpretatie van de aard van de demping is ook wenselijk voor bijvoorbeeld de keuze van een dempingsmateriaal in de spoorconstructie of in een gebouwfundering.

Het gebruik van demping vereist vaak keuzes van de ontwerper. Het is voor de beoordeling van de maatregel en het verder detailleren van een maatregel van belang dat expliciet gemaakt wordt hoe de keuzes gemaakt zijn.

Opgemerkt wordt dat voor verschillende materialen de stijfheid ook afhangt van de frequentie van de belasting. Dit geldt onder andere voor klei en verschillende kunststoffen. Ook hiervoor moeten expliciet gemaakt worden welke keuzes er worden gemaakt.

Toevoegen aan Maatregelcatalogus

- Het onderscheid tussen viskeuze demping en hystereze demping moet expliciet worden gemaakt. Er moet aangegeven worden welk type demping in de berekeningen gebruikt is en hoe de beide types aan elkaar gerelateerd zijn.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

De effectiviteit van trillingsreducerende maatregelen is lastig op voorhand te bepalen en er is vaak sprake van (onverwachte) neveneffecten.

De doelstelling van deze rapportage is:

- Het opstellen van overzichtslijsten met te beschouwen neveneffecten voor de maatregelen uit de Maatregelcatalogus spoortrillingen.
- Het geven van een kwalitatieve invulling van neveneffecten t.b.v. een aanvulling op de Maatregelcatalogus spoortrillingen.

Om bovenstaande doelstelling in te vullen zijn op basis van de literatuur en een aantal sterk vereenvoudigde modelleringen mogelijke neveneffecten van voorgestelde maatregelen besproken. De trillingen die treinen veroorzaken worden bepaald door alle elementen in de keten van de trillingsbron ter plaatse van de trein-spoor-fundering interactie, de voortplanting van trillingen door de bodem en de reactie van een pand op de trillingen in de bodem. De vereenvoudigde modellen die in dit rapport zijn toegepast, kunnen opgevat worden als onderdelen van deze keten bron-pad-gebouw.

De overzichtslijsten zijn geven in de hoofdstukken 5 en 6. Samenvattend spelen de volgende neveneffecten een rol:

- Het systeem van trein en spoorbaan kan worden beschouwd als discreet (massa-veer) systeem. Literatuur en de vereenvoudigde modellen laten zien dat bij dergelijke systemen de ligging van de eigenfrequenties en de mate van demping een overheersende rol spelen voor het ontstaan van trillingshinder. De kans op (onverwachte) neveneffecten in de bronbeschrijving wordt groter als er resonanties ontstaan.
- De bodem kan beschouwd worden als een continue systeem. Bij een continue systeem treedt altijd interferentie op, waarbij de trilling in een locatie wordt bepaald door het resultaat van golven die via verschillende golfpaden de locatie bereiken. De kans op (onverwachte) neveneffecten in de bodembeschrijving wordt groter als verschillende golven elkaar versterken.
- Het gebouw kan als een continue systeem worden beschouwd, maar door de geringe afname van de lopende golven kunnen er resonanties ontstaan, waardoor het de eigenschappen krijgt die typisch zijn voor een discreet systeem. De kans op (onverwachte) neveneffecten in de gebouwbeschrijving wordt groter als er resonanties ontstaan.
- De kans op (onverwachte) neveneffecten in de gehele keten wordt groter als eigenfrequenties of versterking in de componenten in de voortplantingsketen (bron-bodem-gebouw) overeenkomen of de demping klein is. Dat zijn juist de situaties waarin trillingshinder waarschijnlijk is.
- Interferentie en resonantie zijn gevoelig voor de precieze parameters in een systeem. Voor een berekening van de efficiëntie van een maatregel betekent dit dat relatief beperkte modelleer onnauwkeurigheden relatief grote gevolgen kunnen hebben. Voor de algemene beoordeling van een maatregel op basis van eerdere ervaringen betekent dit dat relatief beperkte verschillen grote gevolgen kunnen hebben. Dit uit zich

bijvoorbeeld in op het eerste gezicht onverwachte kansverdelingen in probabilistische berekeningen: Interfererende golven blijken relatief vaak uitdoving of versterking te geven (zie paragraaf 6.3) en de relatief grote onzekerheid in de uitkomsten rondom de eigenfrequenties (zie paragraaf 6.5).

Tabel 7.1 geeft een samenvattend overzicht van de verschillende dynamische neveneffecten geordend per aanpak. De linker kolom is overgenomen van de middelste kolom van Tabel 3.1 (pagina 11). In die tabel kan de relatie met de maatregelen en de werkingsprincipes gevonden worden.

Aanpak	Mogelijke neveneffecten
Bron	
beperken van oneffenheden	eigenlijk geen
aanpassen verticale stijfheid	extra stijfheid onder de dwarsligger heeft het weinig effect
	extra stijfheid heeft geen effect bij lage frequenties
aanpassen buigstijfheid	spreidt belasting, werkt alleen dichtbij het spoor
	extra massa leidt tot andere eigenfrequentie, gaat mogelijk verkeerde kant op
Overdracht	
Scherm stijf	buigstijfheid speelt een rol bij verstoring golfpatroon
	resonanties in de wand kunnen effect verlagen
	bij van golven die elkaar eerst uitdoven treedt dit niet meer op (of veel minder)
Scherm slap	stijfheid en dikte geven bij hogere frequenties minder effect
	bij van golven die elkaar eerst uitdoven treedt dit niet meer op (of veel minder)
Maaiveld maatregelen	werkzaam over beperkte afstand achter de maatregel
	golven lopen onder de maatregel door
	trillingen variëren over de diepte van een pand
Gebouw	
stijvere constructie	frequenties die oorspronkelijk uitgedoofd worden doen dat niet meer door de maatregel
	hogere frequenties treden op
	geluidafstraling gaat een rol spelen
funderings-isolatie	rotatie beweging speelt een rol
	trillingen variëren over de diepte van een pand

Tabel 7.1 Overzicht mogelijke neveneffecten

7.2 Aanbevelingen voor de Maatregelcatalogus spoortrillingen

Deze paragraaf geeft aan hoe de bevindingen in de maatregelen catalogus kunnen worden verwerkt.

De trillingsreducerende maatregelen kunnen in een aantal groepen worden ingedeeld (zie ook Tabel 3.1 op pagina 11):

- 1 Bronmaatregelen.
 - 1.1 Vermindering verplaatsingsexcitatie.
 - 1.2 Betere onderbouw: verbetering ligging, vermindering krachtsexcitatie en overdracht
- 2 Maatregelen in de overdracht.
 - 2.1 Stijve wand.

- 2.2 Flexibele wand.
- 2.3 Maaiveld maatregel.
- 3 Maatregel in het gebouw.
- 3.1 Stijvere constructie.
- 3.2 Funderings-isolatie.

- Aanbevolen wordt deze indeling in de Maatregelcatalogus zichtbaar te maken en te gebruiken voor de bepaling van neveneffecten.

De aanbevelingen voor het verminderen van de dynamische neveneffecten zijn vaak vergelijkbaar voor verschillende maatregelen. Daarom wordt hier een algemeen beeld van de hoofdpunten geschetst

- De maatregel om de fundering van het spoor te verbeteren leidt meestal tot een betere spoorligging en dus minder excitatie door oneffenheden, maar mogelijk tot grotere excitatie krachten door de grotere stijfheid van de constructie. Aanbevolen wordt dit aspect expliciet mee te nemen.
- Door de maatregelen aan de bron (zoals het aanbrengen van extra stijfheid) verschuiven eigenfrequenties. Tevens kunnen er door een maatregel wijzigingen ontstaan in het systeem, waarbij gedacht moet worden aan het ontstaan van eigenfrequenties, waarbij het systeem rondom de eigenfrequenties heel ander gedrag gaat vertonen. Aanbevolen wordt de verschuiving van de eigenfrequenties duidelijk te schetsen voor deze maatregel.
- Bij berekeningen van trillingen moeten rekening houden met de onzekerheid in de parameters. Hierbij moet met realistische onzekerheidsmarges worden gewerkt. Deze kunnen gebaseerd worden op schattingen van de onzekerheid in de gekozen parameters of op basis van uitgebreide vergelijking van prognoses met metingen.
- Het strekt tot aanbeveling niet alleen de verschillen in overdracht te bekijken, maar ook de beide overdrachten zelf. Als een aangenomen bodemprofiel in één bepaalde frequentierange weinig trillingen doorlaat, is een hoge reductie of versterking al snel bepaald. Een dergelijke 'bandstop' moet dan wel in de gemeten signalen op de locatie zichtbaar zijn.
- Ondergrondse wanden geven pas bij hoge frequenties de waargenomen reflectie van de golven. De indruk bestaat dat er een ander mechanisme werkzaam is, dat leidt tot extra efficiëntie bij de stijve wand. Een slappe wand lijkt op basis van de 1-D golftheorie efficiënter, maar mist waarschijnlijk de extra bijdragen die een stijve wand genereert. Voor een efficiënt buigstijf scherm moet de stijfheid zodanig zijn dat deze daadwerkelijk als stijf opgevat mag worden.
- Omdat de resulterende trillingen in een pand ontstaan door de sommatie van verschillende golven, moet de trillingsreducerende factor van een maatregel niet voor één punt berekend worden, maar voor het gehele gebied waar het pand contact heeft met de grond.

7.3 Algemene aanbeveling

Om beter inzicht in de onzekerheden te krijgen wordt aanbevolen om in het kader van concrete projecten meer aandacht aan te besteden aan de aspecten die in dit rapport zijn besproken. Het betreft hierbij de betrouwbaarheid van prognoses voor het dynamische systeem dat in paragraaf 6.2 beschreven is, waarbij alle relevante frequenties moeten worden beschouwd om te komen tot een trillingssnelheid die met de normwaarde kan worden vergeleken.

Het betreft hierbij de combinatie van verschillende vakgebieden (probabilistische analyse, railbouwkunde en grond- en constructiedynamica). Het meenemen van onzekerheden en betrouwbaarheid in prognoses van de effecten van trillingsreducerende maatregelen vereist een validatie van dergelijke modellen. Dat vraagt mogelijk om uitgebreidere data-inwinning dan in huidige praktijk het geval is. Door het opbouwen van ervaring met maatregelen en prognoses, is op termijn verbetering te verwachten.

8 Samenvatting voor de niet-specialist

Als omwonenden hinder ervaren van trillingen die door treinverkeer veroorzaakt worden, kunnen trillingsreducerende maatregelen wenselijk zijn. Om het ontwerpen van trillingsreducerende maatregelen te faciliteren heeft ProRail een Maatregelcatalogus spoortrillingen opgesteld, waarin de ontwerper verschillende basisinformatie voor het ontwerp van een maatregel kan vinden.

Uit de ervaring met trillingsreducerende maatregelen blijkt dat de effectiviteit van maatregelen regelmatig afwijkt van de verwachting. Dit is voor ProRail reden geweest om zogenaamde dynamische neveneffecten van maatregelen op te nemen in de maatregelen catalogus.

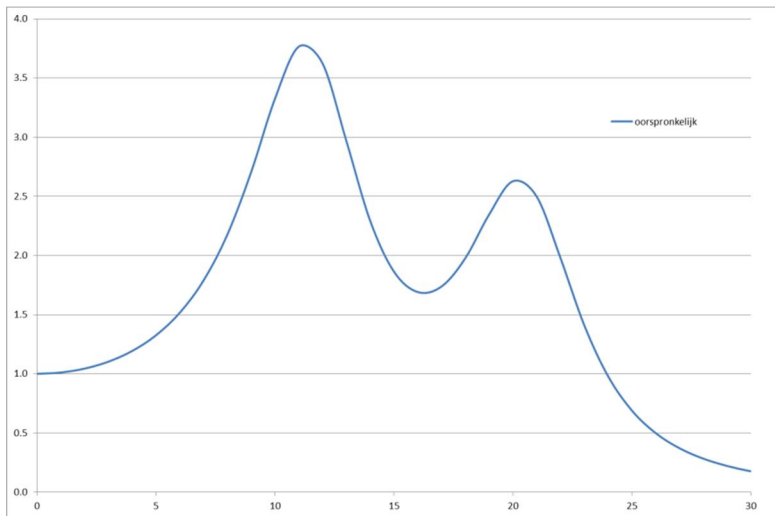
Dit rapport geeft op basis van literatuuronderzoek en basis dynamica modellen inzicht in mogelijke oorzaken van afwijkend gedrag van trillingsreducerende maatregelen. Per groep maatregelen wordt aangegeven hoe de neveneffecten in de Maatregelcatalogus spoortrillingen voor de groep optreden.

In dit rapport zijn vier activiteiten gerapporteerd:

- 1 Alle maatregelen uit de Maatregelcatalogus spoortrillingen zijn beoordeeld op het fysische werkingsprincipe: de vraag waarom de maatregel leidt tot een reductie van het trillingsniveau in de omgeving of een pand. Maatregelen die een heel verschillende praktische uitvoering hebben, kunnen een vergelijkbaar werkingsprincipe hebben. Maatregelen die hetzelfde werkingsprincipe hebben, zullen vaak vergelijkbare dynamische neveneffecten hebben.
- 2 Artikelen en rapporten die gebruikt zijn voor het opstellen van de Maatregelcatalogus spoortrillingen en die van belang leken voor het beoordelen van de dynamische neveneffecten, zijn bestudeerd en samengevat. Hierdoor ontstaat een beeld wat er vanuit wetenschap en literatuur over de verschillende maatregelen bekend is.
- 3 De keten tussen trillingsbron (het spoor) en de ontvanger van trillingen (een gebouw) is beschouwd. Op basis van vereenvoudigde modelleringen is voor iedere component in deze keten (trillingsbron, voortplanting door de bodem en ontvanger van de trillingen) aangegeven welke aspecten bijdragen aan het ontstaan van neveneffecten en hoe hieraan aandacht besteed kan worden in de Maatregelcatalogus spoortrillingen.
- 4 Onzekerheden in de keten tussen trillingsbron en ontvanger zijn besproken. Hierbij is aandacht besteed aan de samenloop van twee trillingen in de bodem en het optreden van versterking en resonantie, zoals dat bijvoorbeeld in een gebouw kan optreden.

Om te begrijpen hoe onverwachte dynamische neveneffecten kunnen ontstaan en wat er aan gedaan kan worden, hier wordt eerst de keten trillingsbron– voortplanting– responsie van het gebouw beschouwd. Iedere component heeft verschillende frequentiebanden waarin de trillingen beter of juist minder goed doorgegeven worden. Figuur 8.1 toont een schets van het belang (op de verticale as) van verschillende frequenties (op de horizontale as). Er zijn in dit voorbeeld twee pieken zichtbaar, zodat in die frequentieranges de trillingen goed doorgegeven worden.

Trillingsproblemen ontstaan vaak op locaties waar frequentie banden die trillingen goed doorgeven min of meer samenvallen. Verschillende componenten hebben dan een piek in dezelfde frequentierange.

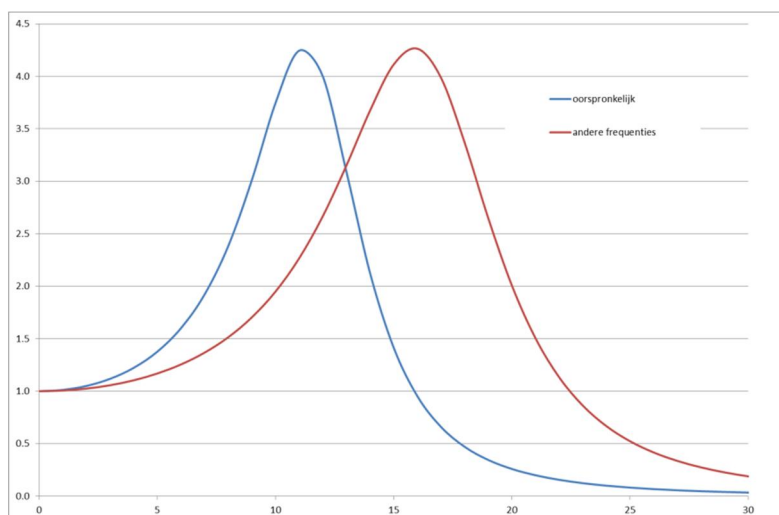
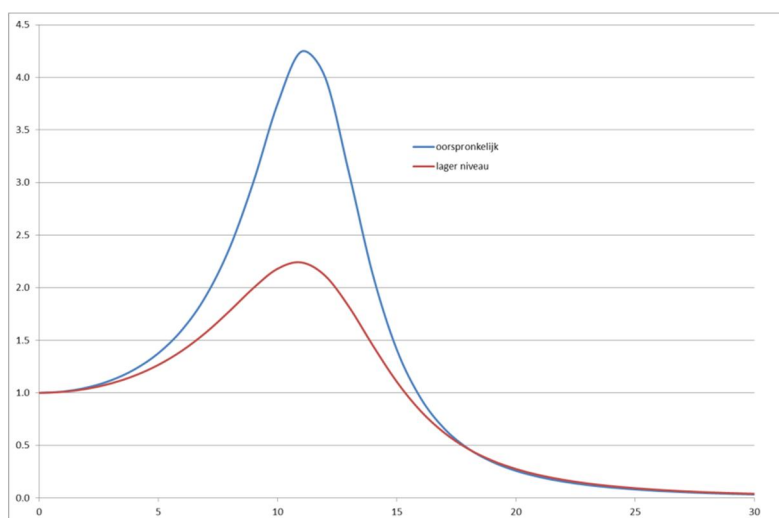


Figuur 8.1 Frequentieranges met grotere en minder grote bijdrage

Om trillingen te reduceren bestaan twee strategieën: of de trillingen worden in één component verlaagd, of de frequentieranges waarin de trillingen goed worden doorgegeven moeten worden verschoven in een component. Figuur 8.2 geeft dit schetsmatig weer. De bovenste figuur geeft de situatie waar het gelukt is de overdracht voor alle frequenties te verlagen. De onderste figuur geeft de situatie waarbij de frequentie verschoven is. Het probleem hierbij is vaak dat maatregelen in verschillende frequentieranges verschillende effecten kan hebben. Ofwel: een maatregel kan trillingen in een bepaalde frequentierange reduceren en in een andere frequentierange juist beter doorgeven, zoals in de onderste figuur van Figuur 8.2.

De verklaring van de soms onverwachte neveneffecten in één component kan bestaan uit:

- Aanpassingen aan de spoorconstructie of de fundering van de spoorconstructie leiden tot een belasting die niet zoveel lager is, maar waarbij wel andere frequentieranges overheersen. Als dit een frequentierange is waarin de andere componenten de trillingen niet goed doorgeven is dit een goede maatregel. Het kan ook zo zijn dat in de andere component de frequentie ook goed doorgegeven wordt. Het effect is dan veel minder.
- In de bodem moet rekening gehouden worden met versterking en uitdoving van verschillende golven. Deze kunnen elkaar versterken of verzwakken. Als een maatregel in een belangrijke frequentierange één golf wegvangt, die een andere golf versterkt, dan werkt de maatregel goed. Maar als dezelfde maatregel ook een golf in een nadere frequentierange wegvangt die een andere golf uitdooft, is het effect van dezelfde maatregel veel minder. Doordat de uitdoving in die frequentierange verdwenen is, ontstaat er een sterkere trilling dan voorheen.



Figuur 8.2 Mogelijke strategieën om de trillingen te reduceren in een component. Bovenste figuur algemene verlaging van de trillingen, onderste figuur verschuiving van de overheersende frequentieband

Deze effecten kunnen veroorzaken dat een maatregel die op de een locatie prima werkte, op een andere locatie veel minder effect heeft.

Bij de prognoses van de effectiviteit van trillingsreducerende maatregelen worden de verschillende componenten in een keten aan elkaar gekoppeld. De frequentieranges waarin trillingen beter of minder goed doorgegeven worden zijn gevoelig voor een juiste parameterkeuze. En juist die parameters zijn vaak niet goed te bepalen. Het gevolg kan zijn dat de gevolgen van relatief kleine afwijkingen door het gedrag van de totale keten een onverwacht grote afwijking kan veroorzaken. Een bijzonder aspect hierbij is dat deze onzekerheid vooral van belang is rondom de frequentieranges waarin de versterking van de trillingen maximaal is. Dit speelt een belangrijke rol in de berekeningen van de trillingen die het gebouw doorgeeft en verklaard waarom prognoses soms onverwacht kunnen tegenvallen.

Het rapport doet een aantal aanbevelingen hoe deze effecten en de onzekerheden beter in de beschouwing binnen spoorprojecten betrokken kunnen worden. In het algemeen wordt geadviseerd om de onzekerheid die in dynamische berekeningen aanwezig is expliciet in de beoordeling van maatregelen mee te nemen.

A Referenties

1. **Grontmij.** *Maatregelcatalogus spoortrillingen, Samenvattend overzicht.* Utrecht : ProRail , 2016. GM-0175097 rev D2.
2. **ProRail.** *Vervolg onderzoeksprogramma trillinghinder spoor.* s.l. : ProRail, 2015. EDMS #3745060-v1.
3. **Ma, M., et al., et al.** *Mitigation Measure – sleeper system solutions – Part (A).* s.l. : CargoVibes, 2013. ACPO-GA-2011-266248.
4. **Faure, B. and Bongini, E.** *Results of the Parameter Studies and Prioritization for Prototype Construction for Ballasted Track.* s.l. : Rivas, 2012. SCP0-GA-2010-265754.
5. **Terno, H. and al., et.** *State of the art review of mitigation measures on track.* s.l. : Rivas, 2011. SCP0-GA-2010-265754.
6. **Lombart, G. et al.** *Design guide and technology assessment of the transmission mitigation measures.* s.l. : Rivas, 2013. SCPO-GA-2010-265754.
7. **Wenzel, H. and Geier, R.** *Noise and attenuating measures for modern railway superstructures .* *Euronoise.* 2001.
8. **Steinhauser, P. and Steinhauser, W.** *Vibration immission forecast by means of train equivalent synthetic vibration experiments.* *Matec web of conferences.* 2015.
9. **Herron, D., Jones, C., Thompson, D. and Rhodes, D.** *Characterising the high-frequency dynamic stiffness of Railway ballast.* *16th international congress on sound and vibration.* 16, 2009.
10. **Hölscher, P.** *Soil dynamics in urban areas.* Delft : Delft University of Technology, 2015. reader soil dynamics course.
11. **Müller, R. et al.** *Description of the vibration generation mechanism of turnouts and the development of cost effective mitigation measures.* s.l. : Rivas, 2013. SCP0-GA-2010-265754.
12. *The dynamic force transfer of slab tracks and floating slab tracks and teh corresponding ground vibrations.* **Auersch, L.** Leuven BE : s.n., 2011. Proc. of the 8th international conference on structural dynamics Eurodyn 2011. pp. 820-827.
13. **Movares.** *Trillingsonderzoek Sporen in Utrecht.* Utrecht : Movares, 2014. D79-PBO-KA-1400062.
14. —. *Trillingsonderzoek sporen in Arnhem.* Utrecht : Movares, 2014. D79-PBO-KA-1400063.
15. —. *Trillingsonderzoek sporen in Arnhem, meetresultaten en predicties in gebouwen.* Utrecht : Movares, 2014. D79-PBO-KA-1400061.
16. **Koopman, A., Garito, C.** *Maatregelen aan bouwwerken ten aanzien van trillingen afkomstig van railverkeer.* Delft, NL : Delft Cluster, 2002. 01.05.02.
17. *Reducing groundborn vibrations: a state of the art.* **Hemsworth.** 3, 2000, Journal of Sound and Vibration, Vol. 21, pp. 703-709.
18. *State of the Art of Structural Control.* **Spencer, B.F. and Nagarajaiah, S.** 2003, Journal of structural engineering.
19. *Vibration isolation and damping.* *MI partners.* [Online] [Cited: 03 22, 2017.] http://www.mi-partners.nl/vibration_isolation_and_damping.
20. **Hölscher, P. et al.** *Betuwe route statische indrukking en golfvoortplanting.* Delft : GeoDelft / Deltares, 1996. 352960.
21. *The loss factor as a measure of mechanical damping.* **Carfagni, M., Lenze, E. and Pierini, M.** pp. 580-584.

22. **de Vos, P. and al, et.** *Final report on the reference track design for vibration characterisation of vehicles including draft measurement guideline for vehicle homologation.* s.l. : Rivas, 2013. WP1_D1.8 no 265754.
23. **den Adel, H.** *Betuwroute, Statische indrukking en golfvoortplanting, deel 3b.* Delft : Grondmechanica Delft, 1996. CO-352960/37.

B Overzicht documenten in de maatregel catalogus

	type (rapport, artikel, produktblad)	auteur	onderwerp	eerste beschouwing <u>voor dit project</u>
035.pdf	artikel	universiteit	rail frame	meldt alleen meting
131022-ME-327725 Productblad T2-Holle ondergrondse wanden.pdf	productblad	onbekend (Betuwe route?)	holle wand in pad	bevat nuttige referenties (El Naggar)
131022-ME-327725 Productblad T3-Betonnen trillings scherm.pdf	productblad	onbekend	betonnen wand	bevat nuttige referenties
131028-TvE-327725 Productblad O4-Fundatie demping.pdf	productblad	onbekend	maatregel in fundering	algemeen
20122368-01 (Rapport).pdf	rapport	ir buro	invloed rijsnelheid	nuttige data
20122368-03 (Notitie).pdf	notitie	ir buro	invloed rijsnelheid	lijkt niet van belang
20-Vibration Isolation by Floating Slab Track Systems.pdf	product blad	buro trillingen algemeen	floating slab	geen extra info in dit document
3.1 Notitie trillingen Zuidasdok.pdf	notitie/ samenvatting	ir buro	ontwerp onderzoek trillingen zuidas	weinig extra info
3.3 Floating Slab Zuidasdok.pdf	notitie			deels chinees weglaten
40.pdf	artikel	advies bureau	massa veer systeem in rails	bevat meting Opslinngering hoge frequenties
5.21-Betrouwbaarheid trillingspredicties nr-04.pdf	(DC) rapport	TNO	maatregelen in gebouw	mikt op aardbevingen
5.21-Betrouwbaarheid trillingspredicties nr-05 deel2.pdf	(DC) rapport	TNO	spoor systemen	afstudeerverslag
7-2 OV SAAL Maatregelen korte termijn, Traject Weesp-Lelystad, trillingen aanvullend onderzoek.pdf	OV Saal	ir buro	metingen huidige situaties	geen extra info in dit document mbt de vraagstelling
Annex I productbladen deel I.pdf	productblad	ProRail	railmaatregelen	gericht op geluid
b. Trillingsonderzoek Twentelijn[1].pdf	adviesrapport	ir bureau	trillingen twentelijn	metingen, prognoses discussie maatregelen (spoor hoogfrequent)
Ballastmat maatregel 202 Secutex.pdf	produktblad	leverancier	ballastmat	voorbeelden en een meting, werkt alleen hoogfrequent
Ballastmat maatregel 204 SystemeGroetz BsoMk.pdf	produktblad	leverancier	ballastmat	aleen toepassingschets
breitschwelle en.pdf	produktblad	leverancier	brededwarsslijper	alleen voorbeeld, betere spoorligging geclaimed
Catalogus maatregel NL Delta-L CDM-CHR.pdf	catalogus beschrijving	ProRail, adviesbureau	afveermateriaal voor gebouw	claimt een meting
Catalogus maatregel NL Delta-L CDM-CHR-BOX.pdf	catalogus beschrijving	ProRail, adviesbureau	afveermateriaal voor gebouw	claimt een meting
Catalogus maatregel NL Delta-L CDM-SEB.pdf	catalogus beschrijving	ProRail, adviesbureau	afveermateriaal voor gebouw	claimt een meting
Catalogus maatregel NL Delta-L CDM-VHS.pdf	catalogus beschrijving	ProRail, adviesbureau	afveermateriaal voor gebouw	claimt een meting
CDM-CHR.pdf	produktblad	leverancier	afveermateriaal voor gebouw	geen extra info
CDM-CHR-BOX.pdf	produktblad	leverancier	afveermateriaal voor gebouw	geen extra info
CDM-SEB.pdf	produktblad	leverancier	afveermateriaal voor gebouw	geen extra info
CDM-VHS.pdf	produktblad	leverancier	afveermateriaal voor gebouw	geen extra info
D 2.6 mitigation performance data sheets.pdf	rapport Cargovibes	ir bureau	overzicht	berekenignen voor spoor en wave barriere, parameterstudie
D0105 USAL revision.pdf	rapport Cargovibes	universiteit	evaluatie trillingen	uitsluitend beoordeling
D0202 APT M24(1).pdf	rapport Cargovibes	ir bureau	maatregelen aan trein en spoor	
D0203 APT M24 revision1.pdf	rapport Cargovibes	ir bureau	barriers	berekeningen, validatie met metingen 3 sites. invloed barriers
D0204B CDM M18.pdf	rapport Cargovibes	leverancier	barrier	beschrijft proef, aanmaken soil sample
D0205 APT M18.pdf	rapport Cargovibes	ir bureau	invloed barrier en methodes efficiëntie te bepalen	berekening en meting
D0207 APT M24 v02.pdf	rapport Cargovibes			
D0208 CDM M18.pdf	rapport Cargovibes			
D0301 APT M27.pdf	rapport Cargovibes			

D0302A BJTU M30.pdf	rapport Cargovibes	universiteit	laddertrack	meting op kort proefspoor naast lab	
D0302B CDM M30(1).pdf	rapport Cargovibes	leverancier	undersleeper pads and H-beam (spoor)		
D0303 TNO M29.pdf	rapport Cargovibes	TNO	barrier	berekeningen, alleen nabije barrier werkt en metingen à la Arnhem: resonantie achter wand	
D0603 APT M36.pdf	rapport Cargovibes			??	
D1.10-Description of test procedures based on laboratory tests and field tests including validation.pdf	rapport RIVAS	instituten	testprocedures & validatie	uitvoeren shaker testen om overdacht te bepalen, bevat veel meetdata	
D1.11-Benchmark test for soil properties including recommendations for standards and guidelines.pdf	rapport RIVAS	instituten	transferfuncties	vooral gemeten op drie sites	
D1.12-Vibration reduction for reference cases.pdf	rapport RIVAS	diverse ir buro's	ontwerp maatregelen voor realistische cases		
D1.8-Final report on the reference track design for vibration characterization of vehicles including draft measurement guideline for vehicle homologation.pdf	rapport RIVAS	diverse praktisch	invloed voertuig ontwerp op trillingen		openen via internet, klik hier
D1.9-Report giving the decrease of exposure and annoyance associated with each mitigation measure developed in WP2 to 5 for typical ground building configurations.pdf	rapport RIVAS	diverse	numerieke studie, vergelijkingen: frequentie inhoud speelt rol	10 maatregelen, drie bodemprofielen, 3 gebouwen, 4 trillingsmaten. nuttig	klik hier, kan alleen via internet
D2.7-Definition of wheel maintenance measures for reducing ground vibration.pdf	rapport RIVAS	diverse	wielonderhoud als maatregel	niet zo belangrijk	
D2.9-Validation of wheel maintenance measures on the rolling stock for reduced excitation of ground vibration.pdf	rapport RIVAS		wielonderhoud als maatregel	overgeslagen is validatie	
D3.1 Maintenance Limits wheel & rail surface.pdf	rapport RIVAS		bronmaatregelen		
D3.12-Ground Vibration from switches - numerical and experimental tests for identification of the main influencing sources and factors.pdf	rapport RIVAS	sncf	trillingen bij wissels	metingen en simulaties, diverse maatregelen aan het wissel beoordeeld	
D3.13-Guidelines for mitigation measures on ballasted track curves switches and slab track update.pdf	rapport RIVAS	diverse	maatregelen in het spoor	betreft een ontwerp richtlijn, vooral samenvattend	
D3.6-Description of the vibration generation mechanism of turnouts and the development of cost effective mitigation measures V3.pdf	rapport RIVAS	diverse	trillingen bij wissels	diverse maatregelen in het veld beproefd	
D3.7-Results of Lab test for ballasted track mitigation measures final.pdf	rapport RIVAS	diverse	lab proef spoormaatregelen	goed beschreven, verschil trein passage vs dynamische proef	
D3.8-Measurement report about a new undersleeper test track in a curve.pdf	rapport RIVAS	diverse	testtrack in bocht	grote veldproef, verschillende maatregelen in het spoor (USP) vergeleken, let op de variatie	
D4.1-Report defining scope and constraints of numerical parametric study.pdf	rapport RIVAS	KULeuven	numerieke studie, vergelijkingen met metingen voorzien	goede aanpak, relevant, maar resultaten missen	misschien hier research gate
D4.6-Design guide and technology assessment of the transmission mitigation measures.pdf	rapport RIVAS	diverse	design guide voor diverse barriers	mogelijk nuttige discussie	
D5.4-Optimised mitigation measures and their parameters.pdf	rapport RIVAS	diverse	wiel onrondheid	metingen discussies en maatregelen	
D5.5-Guideline for the Design of Vehicles Generating Reduced Ground Vibration.pdf	rapport RIVAS	diverse	maatregelen aan het voertuig: ontwerp en onderhoud	vat eerdere resultaten samen	
D79-PBO-KA-1300835 Hoofdrapport (versie 0.13, met bijlages).pdf	adviesrapport tbv MER OTB	ir bureau (Movares)	overzichtsrapportage	project Utrecht gericht, erg algemeen	
D79-PBO-KA-1400005 Hoofdrapport trillingsonderzoek TB SiU v1.0 tcm318-350220.pdf	adviesrapport tbv MER OTB	ir bureau (Movares)	algemeen	alleen discussie op project Utrecht gericht	
D79-PBO-KA-1400006 Hoofdrapport trillingsonderzoek TB SiA v1.0 tcm318-350211.pdf	adviesrapport tbv MER OTB	ir bureau (Movares)	algemeen	alleen discussie op project Arnhem gericht	

D79-PBO-KA-1400060 Meetrapport trillingsonderzoek TB SiU v1.0 tcm318-350222.pdf	adviesrapport tbv MER OTB	ir bureau (Movares)	metingen bestaande situaties	alleen discussie op project Utrecht gericht	
D79-PBO-KA-1400061 Meetrapport trillingsonderzoek TB SiA v1.0 tcm318-350212.pdf	adviesrapport tbv MER OTB	ir bureau (Movares)	metingen bestaande situaties	alleen discussie op project Arnhem gericht	
D79-PBO-KA-1400062 Maatregelenrapport trillingsonderzoek TB SiU v1.0 tcm318-350221.pdf	adviesrapport tbv MER OTB	ir bureau (Movares)	diverse opties met fem doorgerekend een case	nuttig voor frequentie afhankelijkheid	
D79-PBO-KA-1400063 Maatregelenrapport trillingsonderzoek TB SiA v1.0 tcm318-350213.pdf	adviesrapport tbv MER OTB	ir bureau (Movares)	diverse opties met fem doorgerekend een case	nuttig voor frequentie afhankelijkheid	
DenBosch3 3 trillingen gepubliceerd.pdf Embedded rail.pdf	advies produktblad	TNO leverancier, Balfour Beatty	meting en beoordeling embedded rail	discussie over mogelijke maatregelen weinig specifiek, verwijst naar metingen	
Embedded rail 2.pdf	produktblad	leverancier, CDM	embedded rail	weinig specifiek, heel erg kort	
Embedded.pdf	produktblad	leverancier, CDM	embedded rail	weinig specifiek, heel erg kort	
ERS-HR-ENGLISH.pdf	produktblad	leverancier, Edilon	embedded rail	weinig specifiek, kort	
Floating slab mats.pdf	produktblad	leverancier, CDM	floating slab	weinig specifiek, heel erg kort	
Floating slab pads.pdf	produktblad	leverancier, CDM	floating slab op pads	weinig specifiek, heel erg kort	
Floating slab pads 2.pdf	produktblad	leverancier, CDM	floating slab op pads	weinig specifiek, heel erg kort	
FULLTEXT01.pdf	afstudeerverslag	KTH zweden	slabtrack	specifiek op soorten en gedrag slabtrack, weinig info trillingen	
GANTREX-035-Grout.pdf	produktblad	leverancier,	kunststof materiaal	niet relevant	
GANTREX-040-SW-Grout.pdf	produktblad	leverancier,	grout materiaal	niet relevant	
GANTREX-080-Grout-Non-Standard.pdf	produktblad	leverancier,	grout materiaal	niet relevant	
GANTREX-Epoxy-Rapide-Non-Standard.pdf	produktblad	leverancier,	grout materiaal	niet relevant	
GANTREX-Resin-EPG.pdf	produktblad	leverancier,	kunststof materiaal epoxy resin	niet relevant	
Geogrid.pdf	krantenartikel	de ingenieur / arcadis	overgangsconstructie	niet relevant	
Glickman-G-The-Benefits-and-Limitations-of-Floating-Slab-Track.pdf	presentatie conferentie	adviesbureau	invloed slabtrack op trillingsuitbreiding	geeft mooi invloed van de opslingering weer	
Introduction-to-Grout-and-Resin.pdf	produktblad	leverancier,	kunststof materiaal epoxy resin	niet relevant	
juli2013 2021.pdf	produktblad	leverancier, Fugro	EPS scherm	claimen mogelijke reductie info over de catalogus	
matcat toelichting.pdf	produktblad	leverancier Getzner	mass-spring systems onder spoor	Leuke uitleg, aanwezige systemen	
MFS Gesamtbrochure E.pdf	produktblad	leverancier Getzner	mass-spring systems onder spoor	Leuke uitleg, aanwezige systemen	
MS04-53.pdf	congresartikel	instituut BAM Auersch	slabtrack en trillingen, berekeningen	geeft risico bij gelaagde bodem	
NL-Algemeen-2011.pdf	produktblad	leverancier tensor	gebruiksmogelijkheden geogrid	niet zo relevant	
ontwerp zettingsvrije plaats hsl-projectdeel zhm-196-1363181673452694337.pdf	krantenartikel	cement	zettingsvrije plaat	geen toegevoegde waarde	misschien geotechnische aspecten
Productblad CDM-VHS CDM-83 125x125mm v7.pdf	produktblad	leverancier, CDM	kunststof	informatie over frequentie afhankelijkheid en niet-lineariteit, materiaal specifiek	
Productblad CDM-VHS CDM-83 87x87mm v7.pdf	produktblad	leverancier, CDM	kunststof	informatie over frequentie afhankelijkheid en niet-lineariteit, materiaal specifiek	
ProRail(2008)Trillingen en LF Geluid 2008.pdf	adviesrapport	instituut TNO	trillingen en LF geluid	blijft algemeen, meer introductie en overzicht wie wat waar	
Rapportage PHS trillingen definitief.pdf	adviesrapport	ir bureau, arcadis	consequenties PHS voor trillingen, inventarisatie	gebruikt alleen globale info voor uitwerking in rapport	

RIVAS SCpO-GA-2010-265754.pdf	rapport RIVAS	diverse	meetprotocol voor verschuivende dynamische variabelen	onzekere relevantie, mogelijk wel info over valkuilen bij meting en interpretatie
RIVAS CHALMERS WP2 D2 5 FINAL.pdf	rapport RIVAS	diverse	meten van spoorruwheid	niet zo relevant
rivas cstb wp1 d1 4 v03 assesment human response.pdf	rapport RIVAS	diverse	review standaards en proeven voor gevoeligheid personen	niet zo relevant
rivas cstb wp1 d1 6 v04 procedures exposure annoyance.pdf	rapport RIVAS	diverse	vergelijking vier prognosemodellen en meetprotocol	nuttig, geeft onzekerheden aan
rivas db wp1 d1 2 annex v04 measuring influencing parameters.pdf	rapport RIVAS	diverse	meetprotocol voor vrije veld trillingen	lijkt niet echt nuttig
rivas db wp1 d1 5 v05 definition hotspots.pdf	rapport RIVAS	diverse	definitie cases	typisch Rivas project document
rivas satis wp1 d1 7 final.pdf	rapport RIVAS	diverse	parameter ranges	typisch Rivas project document
RIVAS SNCF WP3 D3 5 V04.pdf	rapport RIVAS	diverse	beschrijving testsite SNCF	weinig info:
RIVAS UIC WP5 D5 1 V02 final 01.pdf	rapport RIVAS	diverse	maatregelen aan materieel, numerieke analyse	nuttig voor materieel maatregelen
rivas uic wp3 d3 1 v01-3 final.pdf	rapport RIVAS	diverse	maatregelen in het spoor, vnl numeriekuitgewekt	geeft opslingeren in LF banden
rivas wp 13 d 11 v06.pdf	rapport RIVAS	diverse	bepaling dynamische grondeigenschappen	niet van belang (geeft geen info over betrouwbaarheid etc)
RIVAS WP3 Del 3.2.pdf	rapport RIVAS	diverse	parameterstudie numeriek	dit rapport bevat drie parameter analysis voor de problematiek, SNCF, KUL en BAM. Lijkt erg nuttig
RIVAS-wp3-d3-3 H.pdf	rapport RIVAS	diverse	parameterstudie numeriek slabtrack	variatie in stijfheid rails, plaat opleggingen van plaat en spoor, lijkt nuttig
RockDelta Vibration Isolation brochure - UK - MAIL.pdf	produktblad	leverancier Rockdelta	kunststof voor ballastmat en ondersleeperpad	enkele specifieke gegevens, o.a. lange termijn gedrag
Schwellensolebroschre E.pdf	produktblad	leverancier, Getzner	sleeper pads	enkele specifieke gegevens, o.a. lange termijn gedrag
tb NL.IMRO.0344.BPVSJJPWESTHOVSTAT-0301 9.pdf	adviesrapport	ir bureau Mavoers	beoordeling situatie nabij station Uts CS	bevat enkele fem berekeningen van maatregelen
Technical Solutions for Track Substructure.pdf	produktblad	leverancier Angst & Pfister	kunststofmaterialen in spoorconstructies	niet van belang
Themenblatt LCC EN.pdf	produktblad	leverancier, Getzner	sleeper pads	met onder sleeper pads blijft het spoor van betere kwaliteit
TR 11 p3-5.pdf	produktblad	leverancier, Pandrol	Vanguard rail fastener	bevat meting in metro tunnel, niet zo belangrijk
TR02 p3-5.pdf	produktblad	leverancier, Pandrol	Vanguard rail fastener	bevat meting in metro tunnel, niet zo belangrijk
Trillingsmaatregel ballastmat Secutex.pdf	produktblad	leverancier	kunststof materiaal in baanbouw	bevat meetresultaat spoorkrachten
Trillingsonderzoek%20amersfoort%2012feb%20versie%200%20inclusief%20bijlagen.pdf	adviesrapport	ir buro (Royal Haskoning)	vrije kruising Amersfoort	op basis van metingen in Amf en de tunnel bij Best zijn prognoses uitgevoerd, geeft geen info voor dit project
trk ballast.pdf	produktblad	leverancier, Tiflex	ballastmat	5 dB versterking bij 20 Hz
Under sleeper pads.pdf	produktblad	leverancier, CDM	ondersleeper pads	geen extra info
USM Broschre EN.pdf	produktblad	leverancier, Getzner	ballastmat	geen extra info

C Mogelijk relevante aspecten

Tijdens het beoordelen van de literatuur kwamen de volgende aspecten nog in de aandacht. Deze zijn hier samengebracht zodat later nagegaan kan worden of deze nog behandeld moeten worden.

C.1 Rand effecten

Aan de rand van een maatregel kunnen andere effecten optreden. Dat betekent dat er daar hogere trillingssnelheids kunnen optreden.

C.2 Niet-lineariteiten

Geavanceerde berekeningen: materiaal eigenschappen moeten worden afgestemd op metingen in het frequentie domein: dus een benadering.

Bij grote belastingen kunnen materialen andere eigenschappen krijgen. Dit treedt vooral op bij de situatie onder de treinbelasting. Verder weg worden de dynamische belastingen steeds lager, en is de verwachting dat de invloed van niet-lineariteit minder wordt

C.3 De gebruikte schaal

In de geluidswereld wordt vaak de dB schaal gebruikt, dit is een logaritmische schaal. In de trillingen wereld vaak een lineaire schaal gebruikt. Het Delft Cluster onderzoek gaf aan dat de logaritmische meer geschikt is om de onzekerheden in prognoses te beschrijven. Dit heeft echter ook consequenties voor de betrouwbaarheidsberekeningen: deze moeten als de prognose niet uitgedrukt wordt in dB, met een logaritmische kansverdeling worden uitgevoerd.

C.4 Kritische treinsnelheid

De kritische treinsnelheid van een baanvak zal niet snel bereikt worden, maar mogelijk kunnen slappe lagen wel worden belast met een bewegende belasting die dicht bij de laagste golfsnelheid ligt. Deze effecten worden in de meeste modellen niet bekeken, maar kunnen in het geval van een drastische snelheidsverhogen wel een rol gaan spelen.

C.5 Gelaagde bodem

De werkelijke laagscheidingen in de grond zijn mogelijk minder scherp en minder vlak dan in een numeriek model verondersteld wordt. In een gelaagde bodem is de snelheid van de Rayleigh golf frequentie afhankelijk (dispersief).

D Overzicht maatregelen in de Maatregelcatalogus spoortrillingen

Uit het document (1) zijn de beschikbare maatregelen overgenomen.

Nr.	Naam	pag.
1	Maatregelen aan het materieel	9
1.01	In profiel houden van de wielen	10
2	Maatregelen aan de baan	11
2.01	Ballastmatten	12
2.02	Afveren rails met railklemmen op beton plaat	13
2.03	Slab track	14
2.04	Floating slab track	15
2.05	Beton plaat onder ballastbed met ballastmat	16
2.06	Beton plaat onder ballastbed met isolatiemateriaal onder dwarsliggers	17
2.07	Zettingsvrije plaat	18
2.08	Ladder Track	19
2.09	Under Sleeper Pads	20
2.10	Wide Sleeper Track	21
2.11	Geogrid	22
2.12	Wissel verplaatsen	23
2.13	Verbetering aansluiting kunstwerk i.h. k. v. vermindering trillingshinder	24
2.14	Onderhoud rails	25
2.15	Spoor voegloos maken	26
2.16	Aanvullend onderhoud ballastbed (tamping)	27
3	Maatregelen in de overdracht	28
3.08	OTC beklede keerwand (1)	29
3.01	OTC betonscherm in bodem	30
3.02	OTC Polystyreen scherm in bodem bij woning	31
3.03	Trillingscherm L-wand in talud	32
3.04	OTC open sleuf in bodem	33
3.05	OTC open sleuf met keerwanden	34
3.06	Steiler maken spoortalud	35
3.07	Spoorsloot / waterpartij	36
4	Maatregelen bij de ontvanger	37
4.01	Verstijven vloeren en wanden (bestaande woningen)	38
4.02	Fundering op trillingsisolatie	39

Tabel D.1 Overzicht maatregelen in catalogus

noot (1): deze maatregel heeft een vreemd nummer, omdat deze ontbreekt in de inhoudsopgave van (1), waar deze tabel op is gebaseerd