



Uniform meetprotocol IBS Trillingen

ProRail

Verbindt. Verbetert. Verduurzaamt.

Documentgegevens	
Eigenaar	Seppe Hoogzaad, ProRail
Opsteller	Pieter Boon, We-Boost
Kenmerk	4113977
Versie	3.0
Datum	26 april 2024
Onderwerp	Meetprotocol trillingen Innovatieprogramma Bronaangepak Spoortrillingen (IBS)
Status van het document	Definitief

Woordenlijst

Treintype	Categorietype van trein vanuit benamingen QuoVadis-stations, voor reizigerstreinen wordt dat als volgt vereenvoudigd: <table> <tr> <th>Treintype</th><th>Types in QuoVadis-data</th></tr> <tr> <td>VIRM</td><td>EMU VIRM VI, EMU VIRM IV, EMU VIRM ABv / PC DDM</td></tr> <tr> <td>FLIRT</td><td>EMU FLIRT II, EMU FLIRT III, EMU FLIRT IV, EMU FLIRT V</td></tr> <tr> <td>GTW</td><td>EMU/DMU GTW 2/6, EMU/DMU GTW 2/8</td></tr> <tr> <td>SLT</td><td>EMU SLT IV, EMU SLT VI</td></tr> <tr> <td>SNG</td><td>EMU SNG III, EMU SNG IV</td></tr> <tr> <td>DDZ</td><td>EMU DDZ IV, EMU DDZ VI, EL Lok mDDM</td></tr> <tr> <td>ICM</td><td>EMU ICM III, EMU ICM IV</td></tr> <tr> <td>ICNG</td><td>EMU ICNG V, EMU ICNG VIII</td></tr> <tr> <td>ICR</td><td>PC ICR</td></tr> <tr> <td>SGM</td><td>EMU SGM_II, EMU SGM_III</td></tr> <tr> <td>PROTOS</td><td>EMU PROTOS</td></tr> <tr> <td>THALYS</td><td>EMU Thalys</td></tr> <tr> <td>EUROSTAR</td><td>EMU Velaro Eurostar</td></tr> <tr> <td>ICE</td><td>EMU ICE</td></tr> <tr> <td>MAT64</td><td>EMU Mat 64 II</td></tr> <tr> <td>NMBS</td><td>EMU MS NMBS Klassiek, EMU MS75, EMU MS80</td></tr> <tr> <td>LINT</td><td>DMU LINT</td></tr> <tr> <td>DM90</td><td>DMU DM90</td></tr> </table> Voor overige treinen (goederentreinen, onderhoudstreinen, locomotieven) per beladingsklasse (waarbij wagontype wel dient te worden vastgelegd): <table> <tr> <th>Beladingsklasse</th><th>Gemiddelde aslast</th></tr> <tr> <td>A</td><td>Minder dan 18.0 ton</td></tr> <tr> <td>B</td><td>16.0 tot 18.0 ton</td></tr> <tr> <td>C</td><td>18.0 tot 20.0 ton</td></tr> <tr> <td>D</td><td>20.0 tot 22.5 ton</td></tr> <tr> <td>E</td><td>22.5 tot 25.0 ton</td></tr> </table>	Treintype	Types in QuoVadis-data	VIRM	EMU VIRM VI, EMU VIRM IV, EMU VIRM ABv / PC DDM	FLIRT	EMU FLIRT II, EMU FLIRT III, EMU FLIRT IV, EMU FLIRT V	GTW	EMU/DMU GTW 2/6, EMU/DMU GTW 2/8	SLT	EMU SLT IV, EMU SLT VI	SNG	EMU SNG III, EMU SNG IV	DDZ	EMU DDZ IV, EMU DDZ VI, EL Lok mDDM	ICM	EMU ICM III, EMU ICM IV	ICNG	EMU ICNG V, EMU ICNG VIII	ICR	PC ICR	SGM	EMU SGM_II, EMU SGM_III	PROTOS	EMU PROTOS	THALYS	EMU Thalys	EUROSTAR	EMU Velaro Eurostar	ICE	EMU ICE	MAT64	EMU Mat 64 II	NMBS	EMU MS NMBS Klassiek, EMU MS75, EMU MS80	LINT	DMU LINT	DM90	DMU DM90	Beladingsklasse	Gemiddelde aslast	A	Minder dan 18.0 ton	B	16.0 tot 18.0 ton	C	18.0 tot 20.0 ton	D	20.0 tot 22.5 ton	E	22.5 tot 25.0 ton
Treintype	Types in QuoVadis-data																																																		
VIRM	EMU VIRM VI, EMU VIRM IV, EMU VIRM ABv / PC DDM																																																		
FLIRT	EMU FLIRT II, EMU FLIRT III, EMU FLIRT IV, EMU FLIRT V																																																		
GTW	EMU/DMU GTW 2/6, EMU/DMU GTW 2/8																																																		
SLT	EMU SLT IV, EMU SLT VI																																																		
SNG	EMU SNG III, EMU SNG IV																																																		
DDZ	EMU DDZ IV, EMU DDZ VI, EL Lok mDDM																																																		
ICM	EMU ICM III, EMU ICM IV																																																		
ICNG	EMU ICNG V, EMU ICNG VIII																																																		
ICR	PC ICR																																																		
SGM	EMU SGM_II, EMU SGM_III																																																		
PROTOS	EMU PROTOS																																																		
THALYS	EMU Thalys																																																		
EUROSTAR	EMU Velaro Eurostar																																																		
ICE	EMU ICE																																																		
MAT64	EMU Mat 64 II																																																		
NMBS	EMU MS NMBS Klassiek, EMU MS75, EMU MS80																																																		
LINT	DMU LINT																																																		
DM90	DMU DM90																																																		
Beladingsklasse	Gemiddelde aslast																																																		
A	Minder dan 18.0 ton																																																		
B	16.0 tot 18.0 ton																																																		
C	18.0 tot 20.0 ton																																																		
D	20.0 tot 22.5 ton																																																		
E	22.5 tot 25.0 ton																																																		
Treincategorie	Treintype per spoor, met een maximale snelheidsvariatie van +/- 5%. Ga hierbij uit van de volgende snelheidsklassen die indien nodig uitgebreid kunnen worden: <table> <tr> <th>Snelheidsrange</th><th>Veel voorkomende snelheid</th></tr> <tr> <td>< 39,0 km/uur</td><td></td></tr> <tr> <td>39.0 - 43.0 km/h</td><td>40 km/h</td></tr> <tr> <td>43.0 - 47.4 km/h</td><td></td></tr> <tr> <td>47.4 - 52.3 km/h</td><td></td></tr> <tr> <td>52.3 - 57.6 km/h</td><td></td></tr> <tr> <td>57.6 - 63.5 km/h</td><td>60 km/h</td></tr> <tr> <td>63.5 - 70.0 km/h</td><td></td></tr> <tr> <td>70.0 - 77.2 km/h</td><td></td></tr> <tr> <td>77.2 - 85.1 km/h</td><td>80 km/h</td></tr> <tr> <td>85.1 - 93.9 km/h</td><td></td></tr> <tr> <td>93.9 - 103.5 km/h</td><td>100 km/h</td></tr> <tr> <td>103.5 - 114.1 km/h</td><td></td></tr> <tr> <td>114.1 - 125.8 km/h</td><td>120 km/h</td></tr> <tr> <td>125.8 - 138.7 km/h</td><td></td></tr> </table>	Snelheidsrange	Veel voorkomende snelheid	< 39,0 km/uur		39.0 - 43.0 km/h	40 km/h	43.0 - 47.4 km/h		47.4 - 52.3 km/h		52.3 - 57.6 km/h		57.6 - 63.5 km/h	60 km/h	63.5 - 70.0 km/h		70.0 - 77.2 km/h		77.2 - 85.1 km/h	80 km/h	85.1 - 93.9 km/h		93.9 - 103.5 km/h	100 km/h	103.5 - 114.1 km/h		114.1 - 125.8 km/h	120 km/h	125.8 - 138.7 km/h																					
Snelheidsrange	Veel voorkomende snelheid																																																		
< 39,0 km/uur																																																			
39.0 - 43.0 km/h	40 km/h																																																		
43.0 - 47.4 km/h																																																			
47.4 - 52.3 km/h																																																			
52.3 - 57.6 km/h																																																			
57.6 - 63.5 km/h	60 km/h																																																		
63.5 - 70.0 km/h																																																			
70.0 - 77.2 km/h																																																			
77.2 - 85.1 km/h	80 km/h																																																		
85.1 - 93.9 km/h																																																			
93.9 - 103.5 km/h	100 km/h																																																		
103.5 - 114.1 km/h																																																			
114.1 - 125.8 km/h	120 km/h																																																		
125.8 - 138.7 km/h																																																			

	138.7 - 152.9 km/h	140 km/h
	152.9 - 168.6 km/h	
	168.6 - 185.8 km/h	
	> 185.8 km/h	
Effect	Afname van de trillingssnelheid als gevolg van een maatregel	
Invoegverlies	Effect van een maatregel op het equivalente krachtsspectrum	

Inhoud

Woordenlijst	3
Inhoud	5
1 Doel en toepassingsgebied	7
1.1 Aanleiding van dit meetprotocol	7
1.2 Doel van dit meetprotocol	7
1.3 Toepassingsgebied van dit meetprotocol	7
1.4 Leeswijzer	9
2 Voorbereiding van een meting	10
2.1 Doel van de meting	10
2.2 Keuze van de meetlocatie	11
2.3 Locatie en aantal meetpunten	13
2.3.1 Locaties van meetpunten	13
2.3.2 Aantal meetpunten	16
2.4 Eisen aan apparatuur	18
2.5 Meetomstandigheden	20
3 Uitvoering van een meting	22
3.1 Plaatsing van apparatuur	22
3.2 Meetduur	24
3.3 Vastleggen van treingegevens	25
4 Verwerking van data	26
4.1 Verwerking van ruwe data	26
4.1.1 Verwerken van tijdssignalen	26
4.1.2 Verwerken van overige data	28
4.1.3 Interpolatie van data	28
4.2 Vaststellen van effect maatregel	28
4.2.1 Effectbepaling volgens procedure 1	29
4.2.2 Effectbepaling volgens procedure 2	29
4.2.3 Gecombineerde methode (procedure 1 en 2)	30
4.2.4 Vergelijken van maatregелеffecten tussen locaties	30
4.3 Omgaan met onzekerheden	31
5 Rapportage	33
5.1 Eisen aan rapportage	33
5.2 Eisen aan grafieken en tabellen	35
5.3 Eisen aan data-opslag en format	36
6 Bijlagen	38
7 Literatuuropgave	39
Bijlage 1 Meetjournaal	40
Bijlage 2 Metingen i.h.k.v. OURS-model van RIVM	41
Bijlage 3 Detailoverzichten per metingstype	43
Metingen aan treinen	43
Metingen aan of in het spoor	44
Metingen op maaiveld	45
Metingen aan een gebouw	46
Metingen in een gebouw	47
Metingen met kunstmatige trillingsbron	48

Bijlage 4 Achtergrondinformatie aantallen treinen	49
Bijlage 5 Bepalingsmethode V_{max}, B_{ts}	51
Bijlage 6 Meten met een kunstmatige trillingsbron	64

1 Doel en toepassingsgebied

1.1 Aanleiding van dit meetprotocol

Al jarenlang wordt gebruik gemaakt van metingen om de trillingen van bijvoorbeeld treinverkeer in beeld te brengen. ProRail heeft hiervoor een checklist laten opstellen om die metingen op een meer uniforme wijze te laten verlopen¹. Deze checklist is opgesteld voor metingen waarbij beoordeeld wordt volgens de Beleidsregel trillinghinder spoor (Bts). Deze metingen worden uitgevoerd in het kader van bijvoorbeeld Tracébesluiten, MER-procedures of provinciale inpassingsplannen (waarbij de effecten op hinder in woningen centraal staan). Die checklist geeft kaders, maar er is ook bewust ruimte gelaten voor de inbreng van kennis uit ingenieursbureaus, opdat die hun specifieke kennis in kunnen zetten. Dit levert een variatie in aanpak op, die het lastiger maakt om metingen onderling te vergelijken en de resultaten breder te gebruiken, zoals in het kader van kennisontwikkeling (analyses op metadata) of de validatie van bronmodellen. In het kader van de Innovatieagenda Bronaankpak Spoortrillingen (IBS) is daarom de wens ontstaan om metingen en uitkomsten daarvan verder te uniformeren, opdat deze breder (her)bruikbaar en reproduceerbaar zijn. Belangrijk uitgangspunt hierbij is dat bij het opstellen van een dergelijke uniforme aanpak zoveel als mogelijk wordt aangesloten op internationaal gangbare uitgangspunten, en alleen waar dat noodzakelijk is om pragmatisch en uitvoerbaar te werken, hiervan wordt afgeweken. Dit maakt eventuele internationale uitwisseling van resultaten eenvoudiger.

1.2 Doel van dit meetprotocol

Doel van dit document is het voorzien in een zoveel mogelijk gestandaardiseerde aanpak en minimumeisen voor het voorbereiden, uitvoeren, analyseren en rapporteren van trillingsmetingen ten behoeve van kennisontwikkeling en en/of de validatie van modellen. Dit document is opgesteld met de volgende hoofd- en subdoelen:

1. Een **gestandaardiseerde aanpak** voor trillingsmetingen definiëren, met als belangrijke onderdelen:
 - a. Een goede onderzoeksmethode, gebaseerd op een hypothese en onderzoeksvraag, met een aanpak afgestemd op de gewenste nauwkeurigheid
 - b. Een vaste standaardaanpak voor metingen zodat deze reproduceerbaar zijn
 - c. De inzet van kwalitatief hoogstaande apparatuur
 - d. Eenduidig interpreteerbare resultaten, die ook voor toekomstige onderzoeken zijn her te gebruiken
 - e. Een pragmatische, werkbare uitvoering van metingen
2. Een vaste methode voor het **achterhalen van het effect van maatregelen** definiëren

Dit document is opgesteld voor verschillende doelgroepen, waaronder onderzoekspartijen, ingenieursbureaus, meetbedrijven en ProRail als doorgaans opdrachtgevende partij.

1.3 Toepassingsgebied van dit meetprotocol

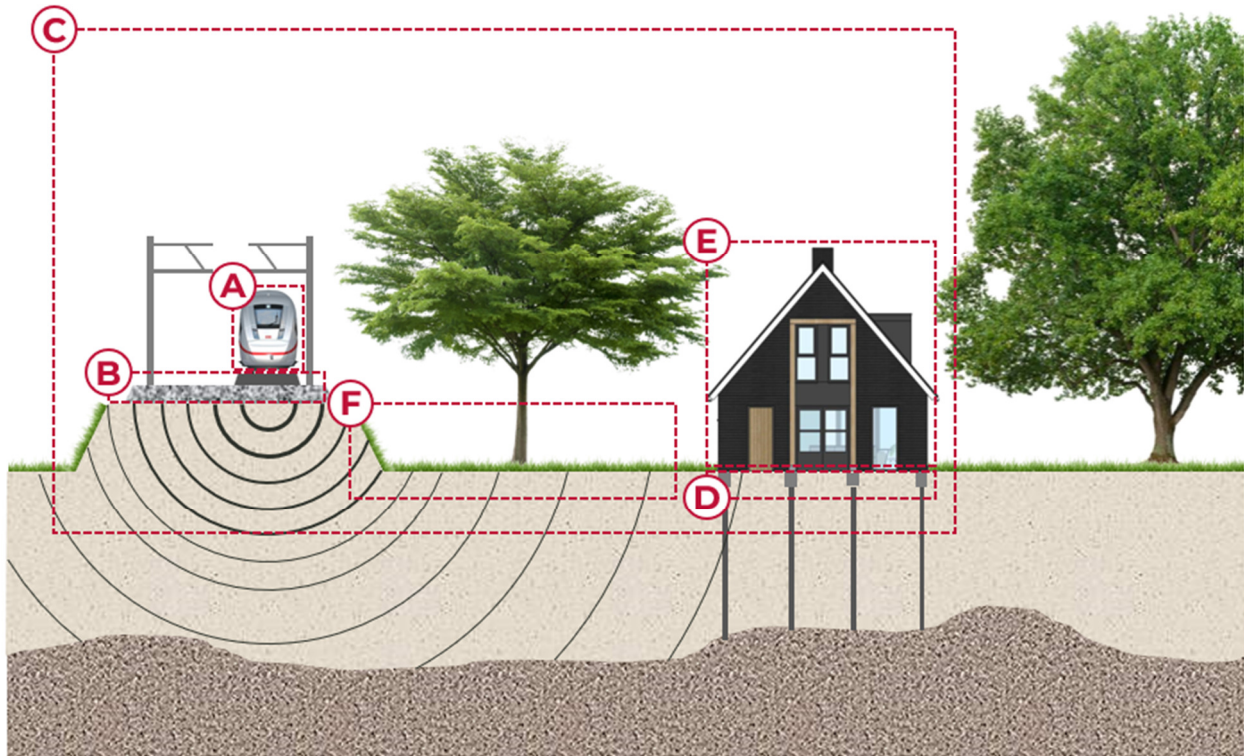
Op basis van de doelen van dit meetprotocol, zoals gedefinieerd in paragraaf 1.2, kan het toepassingsgebied van dit meetprotocol worden geformuleerd. Globaal zijn zes verschillende onderzoeksdoelen te definiëren voor trillingsmetingen:

1. Vaststellen of de richtlijnen voor **trillingshinder** in gebouwen niet worden overschreden
2. Vaststellen of de richtlijnen voor **trillingsschade** aan gebouwen niet worden overschreden
3. Vaststellen wat het **effect van een maatregel** is (aan treinen, het spoor, in de bodem of aan gebouwen)
4. Vaststellen van de **bronsterkte** van de trillingen van treinverkeer
5. Vaststellen van de **trillingseigenschappen van gebouwen**

¹ ProRail (2018)

6. Vaststellen van de **bodemeigenschappen** (hoe dempen trillingen uit met de afstand, hoe is de bodem opgebouwd, geofysisch onderzoek)

De achterliggende onderzoeksvragen kunnen met verschillende types metingen worden beantwoord. We maken daarbij onderscheid in zes types metingen op verschillende locaties in het systeem van trillingsbron (aan de trein of het spoorstelsel), overdracht (in de bodem) en ontvanger (in of aan het gebouw), zie Figuur 1.



Figuur 1 Demarcatie van metingtypes, letters corresponderen met letters in Tabel 1

Welk type meting geschikt is voor welk onderzoeksdoel is weergegeven in Tabel 1. Voor sommige combinaties van doel en metingstype is al **wel** sprake van uniforme eisen (denk aan het uitvoeren van metingen om de hinder in een woning vast te stellen), maar voor veel combinaties nog **niet**.

Tabel 1 Matrix met doelen vs. meetlocaties/metingtypes

	A. Aspotmetingen	B. Spoormetingen	C. Maaiveldmetingen	D. Funderingsmetingen	E. Woningmetingen	F. Excitator of valgewicht
1. Toetsen richtlijn trillingshinder in gebouwen				Bts	SBR B, Bts	
2. Toetsen richtlijn trillingsschade aan gebouwen				SBR A	SBR A	
3. Vaststellen effect_maatregel						
4. Vaststellen bronsterkte trillingen treinverkeer			2			2
5. Vaststellen trillingseigenschappen gebouw			2	2	2	3
6. Vaststellen bodemeigenschappen						

² Voor metingen t.b.v. OURS is er een protocol van het RIVM (2020) beschikbaar.

³ In principe mogelijk, maar een gebouw kan anders reageren op de trillingen die meer vanuit de bodem komen dan op de trillingen die meer oppervlakkig, vanuit bijvoorbeeld een valgewicht of excitator komen.

Het toepassingsgebied van dit meetprotocol is vooral die metingtypes waarvoor nog geen sprake is van uniforme richtlijnen en/of eisen, dus de **rood** gearceerde vakjes in Tabel 1. Voor de **geel** gearceerde vakjes in Tabel 1 verwijzen we naar de betreffende documenten^{4,5,6}.

Het toepassingsgebied van dit meetprotocol is daarom de **rood** gearceerde vakjes in Tabel 1. Belangrijk hierbij is dat dit document vooral is opgesteld voor het uitvoeren van metingen om nauwkeurig de effecten van een maatregel vast te stellen en in het kader van het opstellen van een SpoorTrillingenEmissieModel (STEM). Het moment wordt daarnaast aangegrepen om informatie die tot nu toe (internationaal en nationaal) is verzameld, samen te voegen en een opzet te maken voor een generiek meetprotocol, dat breed inzetbaar is bij door ProRail uitgevraagde metingen. Hierbij is gezocht naar een zo breed mogelijke consensus tussen de verschillende (soms tegenstrijdige) bronnen, met een voorkeur om zoveel mogelijk aan te sluiten bij internationale afspraken. Om de integraliteit en uitwisselbaarheid van onderzoeken zo veel mogelijk te borgen, worden ook de andere, **geel** gearceerde metingdoelen kort toegelicht, en wordt een relatie gelegd met het protocol voor het rekenmodel OURS van het RIVM (2020). Tenslotte, afwijken van dit meetprotocol is onder voorwaarden toegestaan, mits gemotiveerd en in overleg.

1.4 Leeswijzer

Dit document is zodanig opgezet dat het bruikbaar is als gebruiksaanwijzing bij het opzetten van een meting. Het volgt daarom in chronologische volgorde het meetproces: van de voorbereiding van een meting (in hoofdstuk 2) via de uitvoering van een meting (in hoofdstuk 3) naar de verwerking van data (in hoofdstuk 4) en tenslotte de rapportage (in hoofdstuk 5). Hierbij zijn de volgende herkenningspunten aangehouden:

1. Eisen en wensen zijn genummerd, zodat unieke verwijzingen mogelijk zijn. Eisnummering werkt als volgt: hoofdstuknummer.eisnummer.subletter, dus bijv. **1.3.13.c** is de 13^e eis uit hoofdstuk 1, paragraaf 3. De subletter c verwijst in dit geval naar een subeis. Eisen zijn als volgt weergegeven in de tekst (met onderscheid tussen eisen en wensen):

x.x.x	Eis, altijd van toepassing
--------------	----------------------------

x.x.x	Wens, kan van toepassing worden verklaard. Het verdient de voorkeur om hier rekening mee te houden in het onderzoek.
--------------	--

2. Verwijzingen of motivaties achter keuzes zijn weergegeven in voetnoten. Zo is de relatie tussen eis en motivatie op dezelfde pagina terug te vinden. Indien een uitgebreidere motivatie nodig werd geacht, dan is deze in een bijlage van dit document opgenomen.
3. Conform Tabel 1 onderscheiden we zes types metingen. Waar nodig maken we bij de eisen onderscheid tussen deze metingtypes.
4. In veel gevallen wordt verwezen naar literatuur of normen, een lijst met gebruikte bronnen en literatuur is opgenomen aan het einde van dit document. Bronnen worden als volgt geciteerd: *Opsteller (jaar)*.

⁴ Bts: Beleidsregel trillinghinder spoor (2014), te raadplegen via: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0031466/2014-03-27>

⁵ SBR A: SBR Trillingsrichtlijn A: Schade aan bouwwerken:2017, te raadplegen via: https://www.crow.nl/downloads/pdf/kennisbank/2019/sbr_trillingsrichtlijn_deel_a_2017.aspx

⁶ SBR B: SBR Trillingsrichtlijn B: Hinder voor personen in gebouwen:2002/2006, via: <https://www.crow.nl/online-kennis-tools/kennismodule-funderingen-en-trillingen>

2 Voorbereiding van een meting

2.1 Doel van de meting

Het uitvoeren van een meting is nooit een doel op zich: trillingsmetingen worden gebruikt om meer inzicht te krijgen in bijvoorbeeld de ervaren hinder, de brontrillingen van een bepaald type trein of het effect van een maatregel. Om te komen tot een rationeel onderbouwde meetopzet is het *waarom* van de meting relevant. Een goede hypothese is daarbij onmisbaar: door vooraf goed na te denken over het gewenste eindresultaat (wat willen we wel, en wat niet weten), wordt het eenvoudiger om een goede meetaanpak op te stellen. De hypothese beïnvloedt namelijk keuzes over *wat* je gaat meten, *waar*, *wanneer* en *hoeveel* je wilt meten⁷.

In deze paragraaf geven we enkele handvatten om te komen tot een goede hypothese.

1. Start met het definiëren van een goede hoofd- of onderzoeksvraag. In een goede onderzoeksvraag komen vaak een oorzaak en een gevolg voor, bijvoorbeeld:

Wat is het effect van een ballastmat op de trillingen van treinen?

2. Definieer, bijvoorbeeld op basis van eerder onderzoek, welke parameters *mogelijk* invloed hebben op de hoofdp parameter (in dit geval de trillingen van treinen). Bijvoorbeeld:

Uit literatuuronderzoek blijkt dat het effect van een ballastmat afhankelijk zou kunnen zijn van:

- Het type trein
- De rijsnelheid van de trein
- De bodem of ondergrond
- De spoorconstructie
- De afstand tot het spoor
- Het type ballastmat

3. Definieer per mogelijke relatie een hypothese, die in ieder geval bevat (1) wat je onderzoekt, (2) welke parameter je onderzoekt en (3) wat de verwachte uitkomst is. Mogelijke hypothesen bij dit onderzoek zijn dan:

- Het type trein: een ballastmat heeft meer effect op reizigerstreinen, want die wekken meer hoogfrequente trillingen op, frequenties waarop een ballastmat meer invloed heeft.
 - o Onderzoek het effect voor meerdere **types treinen**.
- De rijsnelheid van de trein: een ballastmat heeft meer effect op de trillingen bij een hogere rijsnelheid, want treinen wekken meer hoogfrequente trillingen op naarmate ze harder rijden.
 - o Onderzoek het effect voor meerdere **rijsnelheden**.
- De bodem of ondergrond: een ballastmat heeft meer effect op de trillingen op zandbodems, want vooral op stijvere bodemtypes komen hoger frequente trillingen voor.
 - o Onderzoek het effect op meerdere **bodemtypes**.
- De spoorconstructie: een ballastmat kan alleen worden toegepast bij spoor in ballast.
 - o Geen onderzoek voor nodig.
- De afstand tot het spoor: een ballastmat heeft meer effect op korte afstand tot het spoor, want daar komen hogerfrequente trillingen voor en is het nabijheidsveld van de trillingen (quasi-statische aslast) belangrijker.
 - o Onderzoek het effect op meerdere **afstanden tot het spoor**.
- Het type ballastmat: een zachtere ballastmat heeft meer effect op de trillingen.
 - o Onderzoek het effect voor meerdere **types ballastmatten**

⁷ Hölscher (2003)

4. Vervolgens kan, op basis van aspecten als tijd (planning en doorlooptijd), kosten, gewenste nauwkeurigheid van het eindresultaat de onderzoeksopzet worden ingekaderd, waarbij één of meerdere hypothesen in het onderzoek gaan worden onderzocht. Op basis daarvan kan de uiteindelijke onderzoeksvraag worden ingekaderd en bijgesteld, bijvoorbeeld tot:

Is er een significant verschil in effect van een ballastmat type B op zandbodems tussen verschillende treintypes?

- Verschilt dat effect per afstand?
- Is dat effect afhankelijk van de rijsnelheid?

Hierbij worden parameters als (1) type ballastmat, (2) type bodem niet meer onderzocht om de scope van het onderzoek te beperken. Met deze onderzoeksvraag kan een duidelijke meetopzet worden gekozen en gecontracteerd.

2.2 Keuze van de meetlocatie

Ook het kiezen van een goede meetlocatie is cruciaal. Immers, variaties in spoorconstructie, spoorligging, bodem en opbouw van de omgeving kunnen leiden tot meer onzekerheid in de metingen. Bij voorkeur voldoet een meetlocatie aan de volgende eigenschappen:

2.2.1 Een testsectie in het spoor dient bij voorkeur aan de volgende eisen te voldoen⁸:

2.2.1.a De testsectie is bij voorkeur langer dan 100 meter. Binnen 50 meter aan weerszijden van het onderzoekspunt zijn bij voorkeur geen significante invloedsfactoren aanwezig, zoals ES-lassen (als doorgaand spoor moet worden onderzocht), overwegen, bruggen of duikers

2.2.1.b De boogstraal van de testsectie is bij voorkeur groter dan 1000 meter.

2.2.2 Een onderzoeksgebied op maaiveld voldoet bij voorkeur aan de volgende eisen⁹:

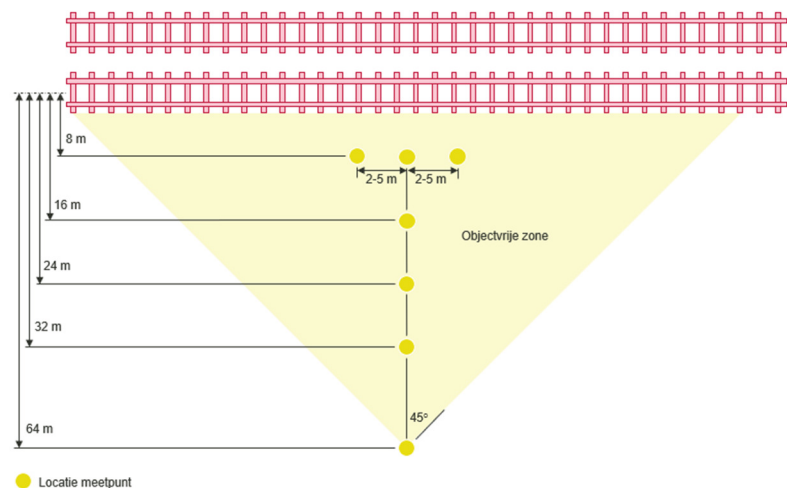
2.2.2.a Hoogteverschillen tussen spoor en maaiveld zijn bij voorkeur kleiner zijn dan 1 meter.

2.2.2.b Sloten of obstakels tussen spoor en meetpunten dienen te worden vermeden.

2.2.2.c Binnen een hoek van 45 graden met de loodlijn op het spoor vanuit de meest ver van het spoor gelegen meetpunten geldt een objectvrije zone, die bij voorkeur voldoet aan de volgende wensen, zie figuur hiernaast:

- De maximale hoogteverschillen zijn niet groter dan 1 meter
- De bodemopbouw is homogeen
- Er is geen bebouwing aanwezig
- Er is geen hoge begroeiing aanwezig

De aanwezigheid van obstakels beïnvloedt de nauwkeurigheid en bruikbaarheid van de meting. Indien toch obstakels aanwezig zijn, dan dient hier in de interpretatie van de resultaten rekening mee te worden gehouden.



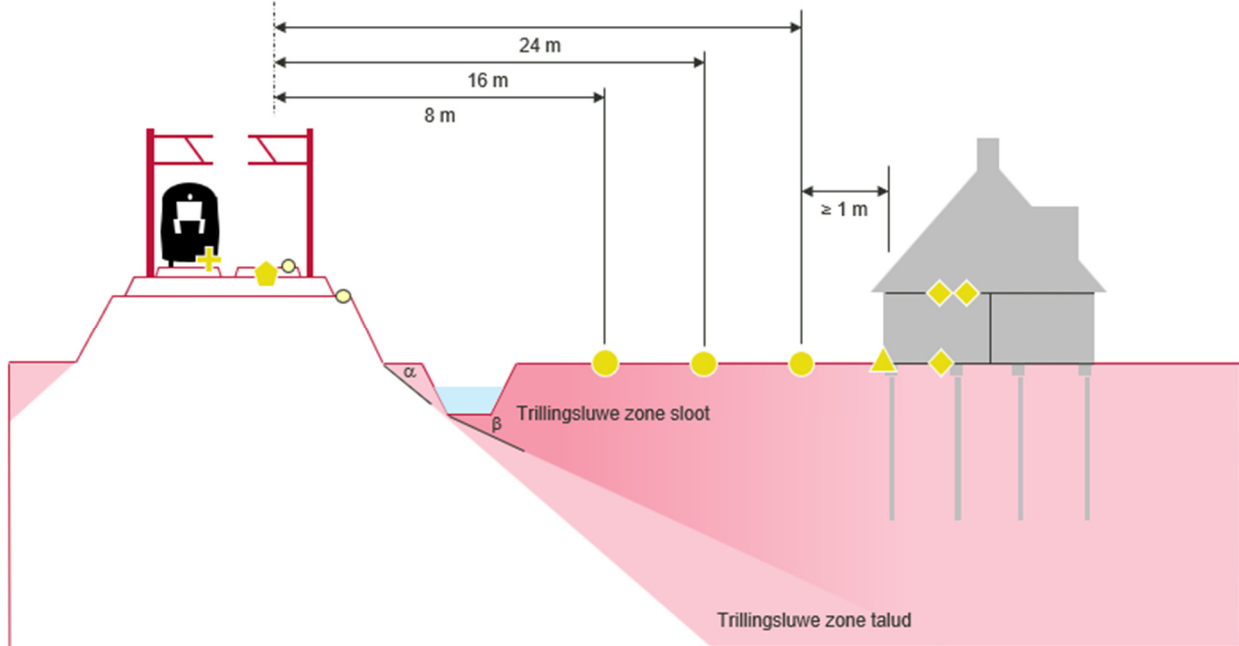
⁸ RIVAS Deliverables D1.2 (2011) en D1.11 (2013), en ISO14837-1 (2005), -32 (2015) en -31 (2017), Garburg (2019), FTA (2018), eis is van toepassing bij vaststellen effect maatregel. Uitzonderingen hierop zijn uiteraard situaties waarbij juist het effect van deze invloeden moet worden vastgesteld. Als hiervan wordt afgeweken, dan is het belangrijk dat het resultaat of toepassingsbereik van het gemeten effect helder wordt ingekaderd (bijvoorbeeld dat dit alleen geldt voor bepaalde situaties)

⁹ RIVAS Deliverables D1.2 (2011) en D1.11 (2013), en ISO14837-31 (2017), Garburg (2019), FTA (2018), RIVM (2020) en ervaringen van experts, eis is van toepassing bij vaststellen effect maatregel of bronsterkte van de trillingen

Voor al deze wensen geldt dat het toegestaan is om hiervan af te wijken, maar daarbij dient wel te worden aangegeven wat de verwachte effecten op het resultaat zijn van deze afwijkingen. Naarmate de afwijkingen groter zijn (wat in de praktijk in de Nederlandse situatie veelvuldig zal voorkomen), zullen de onzekerheden in de resultaten groter zijn. Bij het bespreken van de onzekerheden in het rapport dient dit te worden toegelicht.

Vanzelfsprekend wordt van bovenstaande afgeweken als het doel van de meting juist is om bijvoorbeeld het effect van een ES-las, wissel of sloot vast te stellen, of als juist in een situatie met een verhoogd talud moet worden gemeten.

Bij de keuze van een meetlocatie dient rekening te worden gehouden met zogenaamde trillingsluwe zones, zones waarin de verspreiding van de trillingen zich anders gedraagt doordat de trillingen deels worden afgeschermd door objecten (zoals een sloot) of anders de bodem in worden geleid (zoals bij een talud), zie Figuur 2. De afschermhoeken α en β en de mate van afscherming zijn afhankelijk van de hoogte van het talud, de afmetingen van het obstakel in de bodem, de bodemopbouw en trillingsfrequentie.



Figuur 2 Trillingsluwe zones

Voor situaties met trillingsluwe zones gelden de volgende eisen:

2.2.3	Bij metingen waarbij sprake is van een obstakel tussen spoor en meetpunten, of een verhoogd talud (> 1 meter hoogteverschil tussen spoor en meetpunten), gelden de volgende eisen:
2.2.3.a	Een meting aan de bronsterkte van de trillingen is alleen geldig voor die specifieke situatie qua taludhoogte, obstakelafmetingen en bodemopbouw, tenzij hiervoor wordt gecorrigeerd. Correctie hiervoor is uitsluitend toegestaan door gebruik te maken van de lijnimpedantie uit een kunstmatige trillingsbron, zie paragraaf 4.2.4.
2.2.3.b	Een relatieve vergelijking (bijv. een nul- en eindmeting) van trillingsniveaus is wel mogelijk, mits de vergelijking op exact dezelfde locatie wordt uitgevoerd.

Verder is van belang dat de eigenschappen van de meetlocatie op de juiste manier worden vastgelegd. Eisen hieraan zijn opgenomen in hoofdstuk 5.

2.3 Locatie en aantal meetpunten

2.3.1 Locaties van meetpunten

Een algemeen overzicht met meetposities voor alle types metingen is weergegeven in Figuur 4^{10,11,12,13,14}. Hierbij gelden de volgende eisen voor de locaties van de meetpunten:

2.3.1	Meetpunten dienen te voldoen aan de in Figuur 4 gegeven posities. Afwijkingen in de positie in het horizontale vlak zijn toegestaan, met een maximum van 1 meter.
2.3.2	Bij meetpunten aan een object van beton, metselwerk, asfalt of elementenverharding geldt dat deze een minimaal grondvlak van 5 m ² moet hebben. Bij een bouwwerk geldt een minimale hoogte van 1.50 meter.
2.3.3	Voor metingen aan treinen geldt dat de versnellingsopnemers zo star mogelijk dienen te worden aangebracht aan de aspoten van de trein ¹⁵ .
2.3.4	Voor metingen aan of in het spoor gelden de volgende eisen:
2.3.4.a	Meetpunten dienen te worden aangebracht aan de spoorstaaf of dwarsligger. Meetpunten in ballast of op het schouwpad dienen vanuit het perspectief van reproduceerbaarheid en betrouwbaarheid te worden vermeden.
2.3.4.b	Indien tegelijk ook op maaiveld wordt gemeten, dan moeten de meetpunten in het spoor symmetrisch zijn aangebracht rond de meetpunten op maaiveld (met een maximale afwijking van 1 meter).
2.3.5	Voor metingen op maaiveld gelden de volgende eisen:
2.3.5.a	Breng altijd meetpunten aan op veelvouden van 8 meter: 8, 16, 24, 32, 48 en 64 (en evt. 125) meter van hart spoor. Het benodigde aantal meetpunten is afhankelijk van het doel en de gewenste nauwkeurigheid. Wanneer op meer afstanden output is gewenst, dan kunnen extra tussenpunten worden geplaatst op afstanden van 4, 12, 20, 40, 80 en 100 meter. Let op de volgende uitzonderingen: - De meetraai dwars op het spoor mag gemotiveerd worden ingekort. Bijvoorbeeld als geen trillingen of significante effecten meer worden verwacht op afstanden van meer dan 30 meter, dan mogen de meetpunten op meer dan 30 meter worden weggelaten). - Bij emissiemetingen in het kader van het aanvullen van de emissiedatabase van het rekenmodel OURS, zijn aanvullende meetpunten benodigd. Het gaat dan om een grid van 3 x 3 meetpunten op onderlinge afstanden van 25 meter, met de eerste meetpunten op 25 meter van de middellijn tussen de twee meest nabij gelegen sporen, zie Bijlage II.
2.3.5.b	In meersporige situaties gelden de afstanden uit 2.3.5.a voor elk te onderzoeken spoor.
2.3.5.c	Bij het dichtst bij het spoor gelegen meetpunt (doorgaans op 8 meter) dienen minimaal 3 meetpunten te worden aangebracht, waarbij de extra (verificatie)meetpunten zijn geplaatst op 2 tot 5 meter van het referentiepunt op 8 meter. Test de variatie tussen de meetpunten door bij de eerste treinpassage het trillingspectrum (tertsbandspectrum) te vergelijken tussen deze meetpunten. Indien de variatie in trillingen voor dezelfde treinpassage bij enige frequentie groter is dan 5 dB (45%), dan dient het meetpunt te worden verplaatst.
2.3.5.d	Voor het vaststellen van een bronsignaal mag de afstand tussen spoor en meetpunten niet kleiner zijn dan 8 meter, en niet groter dan 25 meter. Let op: voor metingen i.h.k.v. OURS gelden andere afstanden, zie Bijlage II.

¹⁰ RIVAS Deliverable D1.2 (2011) en ISO14837-31 (2017), waarin veelvouden van 8 meter worden gehanteerd voor metingen op maaiveld. In ISO14837-31 (2017) wordt optioneel ook de afstand van 125 meter tot het spoor nog gehanteerd. Generiek is het advies om logaritmische veelvouden te hanteren (bijv. 8, 16, 32 en 64 meter), o.b.v. RIVAS Deliverable D1.11 (2013).

¹¹ RIVAS Deliverable D1.11 (2013) voor de eisen aan metingen met een kunstmatige bron (MASW en SASW)

¹² RIVAS Deliverables D1.2 (2011) en D1.11 (2013), en ISO14837-1 (2005), -32 (2015) en -32 (2017), Garburg (2019) en FTA (2018) voor metingen in het spoor en metingen met een kunstmatige trillingsbron

¹³ De SBR A (2017) en SBR B (2006) voor metingen aan en in woningen

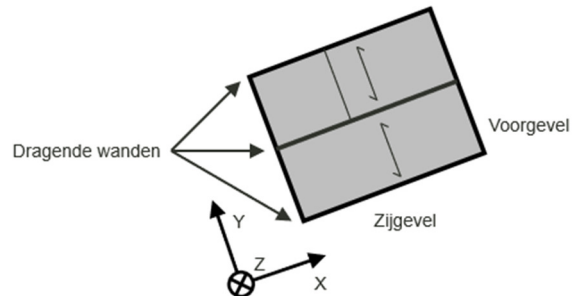
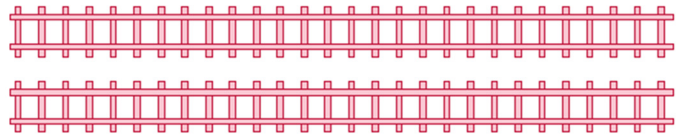
¹⁴ Input en ervaringen van experts. Met name de keuze van referentiemeetpunten komt hieruit voort. Metingen op maaiveld blijken lastig reproduceerbaar, omdat deze gevoelig zijn voor de exacte plaatsing, daarom heeft fixatie aan een vast object sterk de voorkeur.

¹⁵ Bij het meten van trillingen in treinen gaat het in dit geval niet om metingen in het kader van comfortniveaus in treinen, maar de emissie van trillingen richting de omgeving. In het algemeen wordt daarom zo dicht mogelijk bij de wielen van de treinen gemeten, zodat de invloeden van afveersystemen in de trein de meetresultaten niet beïnvloeden. Voor metingen aan treinen gaan we daarom uit van het meten van de aspotversnelling.

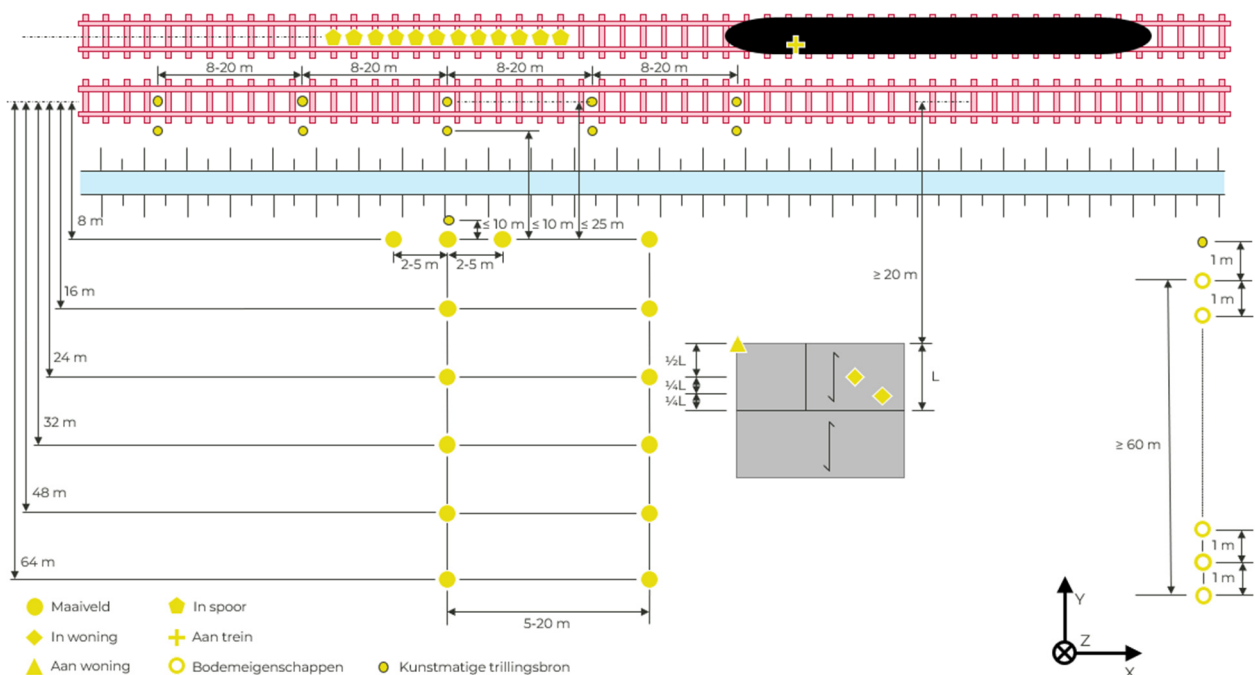
2.3.5.e	Voor het vaststellen van de afname van de trillingen met de afstand (afnamecurve trillingen) gelden de volgende eisen: - De grootste afstand tussen meetpunten is 10 meter. Afhankelijk van de situatie kan in dit geval worden afgeweken van de vereisten uit 2.3.5.a (veelvouden van 8 meter). - Een minimumaantal van 4 meetpunten, vaak is een groter aantal meetpunten nodig voor een betrouwbare vaststelling van deze afnamecurve, zie paragraaf 2.3.2.
2.3.5.f	Eventuele extra meetraaien (om de nauwkeurigheid te verhogen) dienen op minimaal 5, en op maximaal 20 meter afstand te worden geplaatst (parallel aan het spoor), om variaties in de bodem en het bronspectrum te beperken.
2.3.5.g	Voor het bepalen van een zogenaamde lijnbronoverdracht of het bepalen van de bodemcorrectie, bijvoorbeeld om het effect van een maatregel op meerdere locaties met elkaar te vergelijken, dienen excitatiepunten te worden aangebracht conform de volgende eisen: - Voer de excitatie met de kunstmatige trillingsbron uit in het ballast, tussen de dwarsliggers. Als dat niet mogelijk is, is het schouwpad een alternatief. Als ook dat niet mogelijk is, doe het dan op maaiveld, zo dicht mogelijk bij het spoor. - Gebruik altijd meerdere excitatiepunten voor het bepalen van een lijnbronoverdracht: de lengte van het traject met excitatiepunten dient altijd groter te zijn dan 2.5 keer de afstand tussen het verst weg gelegen meetpunt en het spoor. - Hanteer een afstand tussen de 8 en 20 meter (ca. lengte van een wagon) tussen de excitatiepunten.
2.3.6	Voor metingen aan de constructie van een gebouw gelden de volgende eisen:
2.3.6.a	De SBR A (2017) is leidend. Afhankelijk van het doel van het onderzoek kan worden gekozen voor meetpunten op basis van een beperkte, indicatieve of uitgebreide meting.
2.3.6.b	Bijvoorbeeld voor gebouwmetingen in het kader van het aanvullen van de H_{gebouw} -database van het rekenmodel OURS zijn aanvullende meetpunten benodigd, zie Bijlage II.
2.3.6.c	De afstand tussen gebouw en spoor is bij voorkeur groter dan 20 meter ¹⁶ .
2.3.7	Voor metingen in een gebouw gelden de eisen uit de SBR B (2006). Afhankelijk van het doel van het onderzoek kunnen meer of minder meetpunten nodig zijn. Bijvoorbeeld voor gebouwmetingen in het kader van het aanvullen van de H_{gebouw} -database van het rekenmodel OURS zijn aanvullende meetpunten benodigd, zie Bijlage II. Verder geldt dat in het kader van onderzoeksprojecten wordt aanbevolen om minimaal ook aan een star, reproduceerbaar punt (liefst aan de fundering) te meten.
2.3.8	Voor metingen aan de bodemeigenschappen gelden de volgende eisen:
2.3.8.a	Voor het bepalen van de bodemopbouw met de MASW of SASW techniek gelden de volgende eisen: - Voer de excitatie met de kunstmatige trillingsbron uit in het ballast, tussen de dwarsliggers. Als dat niet mogelijk is, is het schouwpad een alternatief. Als ook dat niet mogelijk is, doe het dan op maaiveld, zo dicht mogelijk bij het spoor. Voor het bepalen van de bodemeigenschappen is een excitatie buiten de spoorzone mogelijk. - De maximale afstand tussen meetpunten mag maximaal 1 meter bedragen - De maximale afstand tussen de impactlocatie en het meest dichtbijgelegen meetpunt mag maximaal 1 meter bedragen. - Het meetbereik (minimale afstand tussen impactlocatie en verst weggelegen meetpunt) bedraagt minimaal 60 meter - MASW heeft de voorkeur boven SASW: MASW is nauwkeuriger en geeft een bodemprofiel tot grotere diepte. - De meting mag worden gesplitst, d.w.z., dat bij een tekort aan meetpunten in meerdere sessies kan worden gemeten. In alle gevallen geldt dat de afstand tussen de meetpunten maximaal 1 meter mag zijn.
2.3.8.b	Voor het vaststellen van de afname van de trillingen met de afstand (afnamecurve trillingen) gelden de volgende eisen: - De maximale afstand tussen het impactpunt en het eerste meetpunt is 10 meter. Bij meetpunten in het spoor mag hiervan worden afgeweken, en is de maximale afstand 25 meter. - Verder zijn de eisen uit 2.3.5.e van toepassing
2.3.8.c	Voor het bepalen van een zogenaamde lijnbronoverdracht of het bepalen van de bodemcorrectie , bijvoorbeeld om het effect van een maatregel op meerdere locaties met elkaar te vergelijken, dient de volgende procedure te worden gehanteerd: - Voer de excitatie met de kunstmatige trillingsbron uit in het ballast, tussen de dwarsliggers. Als dat niet mogelijk is, is het schouwpad een alternatief. Als ook dat niet mogelijk is, doe het dan op maaiveld, zo dicht mogelijk bij het spoor. - Gebruik altijd meerdere excitatiepunten: de lengte van het traject met excitatiepunten dient altijd groter te zijn dan 2.5 keer de afstand tussen het verst weg gelegen meetpunt en het spoor.

¹⁶ Op sommige bodems zijn met name laagfrequente trillingsgolven op kortere afstand tot het spoor nog onvoldoende ontwikkeld. Daarom wordt deze minimumafstand geadviseerd.

	- Hanteer een afstand tussen de 8 en 20 meter (ca. lengte van een wagon) tussen de excitatiepunten. Het onderzoek kan worden herhaald voor alle sporen, houdt in alle gevallen de afstanden aan tussen excitatiepunt en meetpunten conform Figuur 4.
2.3.8.d	Bij emissiemetingen in het kader van het aanvullen van de emissiedatabase van het rekenmodel OURS, zijn aanvullende meetpunten benodigd. Het gaat dan om een grid van 3 x 3 meetpunten op onderlinge afstanden van 25 meter, met de eerste meetpunten op 25 meter van de middellijn tussen de twee meest nabijgelegen sporen, zie Bijlage II. Steeds op 1 meter afstand van dit grid wordt de excitatie uitgevoerd, bij alle 9 punten.
2.3.9	Bij metingen dient in principe de volgende tekenafspraken te worden aangehouden: - X-as: parallel aan het spoor - Y-as: dwars op het spoor - Z-as: verticaal Bij metingen in of aan een gebouw moeten de assen van het gebouw worden gevolgd, zie de figuur hiernaast¹⁷: - X-as: parallel aan dragende wanden - Y-as: loodrecht op dragende wanden (meestal parallel aan voorgevel) - Z-as: verticaal In sommige gevallen is het niet mogelijk om de draagricting nauwkeurig vast te stellen, in dat geval dient dit duidelijk te worden vastgelegd en geldt de volgende as indeling: - X-as: zo parallel mogelijk aan het spoor, hoek ten opzichte van spoor moet groter zijn dan 45 graden - Y-as: zo loodrecht mogelijk op het spoor, hoek ten opzichte van spoor mag niet groter zijn dan 45 graden - Z-as: verticaal



Figuur 3 X-, Y- en Z-richting bij meting in of aan gebouw



Figuur 4 Schematisch totaaloverzicht met meetpunten, detailoverzichten en toelichting per type meting zijn opgenomen in Bijlage III

¹⁷ Hier is voor gekozen om aan te sluiten bij het RIVM-model OURS, maar ook om bijvoorbeeld overdrachten in gebouwen eenduidig vast te kunnen stellen in bijv. X- en Y-richting.

2.3.2 Aantal meetpunten

Het benodigde minimumaantal meetpunten is afhankelijk van het doel van de meting en de gewenste nauwkeurigheid. In dit meetprotocol wordt deze bepaling van het minimumaantal meetpunten toegelicht aan de hand van het uitgangspunt dat minimaal tertsbandspectra moeten worden vastgelegd. Bij een hogere gewenste nauwkeurigheid (tijdssignalen of smalbandige Fourierspectra) kan een groter aantal meetpunten nodig zijn. Een aantal aandachtspunten bij het vaststellen van het aantal meetpunten:

1. Het nauwkeurig vaststellen van een absoluut trillingsniveau is lastiger naarmate de meetpunten zich verder van de bron vandaan bevinden, omdat met toenemende afstand van de bron de grootte van en het aantal onzekerheden toeneemt. Bij gelijke gewenste nauwkeurigheid is dan een groter aantal meetpunten nodig dan wanneer dichtbij het spoor wordt gemeten.
2. Anderzijds, de onzekerheden zijn vaak groter bij hogere frequenties: vooral voor het nauwkeurig vaststellen van hoogfrequente fenomenen (laagfrequent geluid, invloed van overwegen, ES-lassen en wissels) of dichtbij het spoor kan daarom een groot aantal meetpunten nodig zijn om de gewenste nauwkeurigheid te halen.
3. In de onzekerheid kunnen vier aspecten worden onderscheiden:
 - a. Variaties in de **meetketen**. Deze zijn conform **2.4.1.f** begrensd op 10%. Bij een herhaalmeting met exact dezelfde apparatuur kan deze onzekerheid worden gereduceerd tot richting 0%.
 - b. Variaties in de **trillingsbron**. Denk dan niet alleen aan variaties in snelheid, tussen treinen onderling, maar ook in ondersteuning van de ene op de andere dwarsligger, verschillen in spoorligging en bij maatregelen ook variaties in het effect van de maatregel. Bij deze onzekerheid speelt ook tijd (veroudering) en weer (invloed van temperatuur en neerslag op elastische componenten in het spoorstelsel en op de spoorstaafspanning) een rol. Bij een herhaalmeting kan deze onzekerheid worden beperkt door bijvoorbeeld te corrigeren voor verschillen in spoorligging (of te meten bij een vergelijkbare onderhoudstoestand), en te meten bij vergelijkbare meteorologische omstandigheden.
 - c. Variaties in het overdrachtsmedium, de **bodem**. Dit zijn voornamelijk ruimtelijke variaties (door verschillen in zowel de toplaag als de diepere bodemlagen), maar ook tijdsvariaties kunnen een rol spelen (denk aan de invloed van langdurige droogte op de grondwaterstand en de uitdroging van bijvoorbeeld kleilagen). Bij een herhaalmeting kan deze onzekerheid worden beperkt door te meten bij vergelijkbare omstandigheden (denk hierbij aan omstandigheden zoals het weer, grondwaterstanden, etc.).
 - d. Variaties in de **ontvanger**, de locatie waar het meetpunt of de trillingsopnemer staat. Dit gaat niet alleen om verschillen tussen gebouwen onderling (in constructieve eigenschappen), maar ook om variaties binnen een gebouw. Op maaiveld speelt hier vooral de plaatsing van de trillingsopnemer een grote rol, bij meten aan een trein of het spoor speelt ook het onderhoud een rol. Bij een herhaalmeting kan deze onzekerheid worden beperkt door te meten op exacte dezelfde posities, met dezelfde fixatie van de opnemers.

Om het minimumaantal benodigde meetpunten, in lijn met bovenstaande aandachtspunten, vooraf te definiëren, gelden de volgende eisen (hier uitgewerkt voor een situatie waarbij tertsbandspectra nodig zijn, uitgewerkt in mm/s (dus niet in dB)):

2.3.10 Om het betrouwbaarheidsinterval te bepalen (o.b.v. de onderzoeksvraag, bijv. een standaardafwijking van maximaal 3 dB in het effect van een maatregel, of een betrouwbaarheidsinterval van +/- 2 dB voor het gemiddelde tertsbandspectrum) dient als volgt te werk worden gegaan¹⁸.

2.3.10.a Bereken foutmarges in mm/s, en werk deze pas bij de laatste stap om naar dB's.¹⁹

2.3.10.b Ga bij de berekeningen uit van lognormaal verdeelde data²⁰.

¹⁸ RIVAS Deliverables D1.2 (2011) en D1.11 (2013), en ISO14837-1 (2005), -32 (2015) en -32 (2017), Garburg (2019) en FTA (2018).

¹⁹ De benoemde CV-coëfficiënten zijn gebaseerd op een referentieschaal van mm/s, niet op een referentieschaal van dB's.

²⁰ Bij trillingen wordt doorgaans aangenomen dat deze lognormaal verdeeld zijn: trillingssterktes zijn een natuurlijk proces (vaak lognormaal verdeeld) en zijn nooit negatief. Dit is in lijn met bevindingen in de praktijk, en sluit aan bij de SBR B-richtlijn en de bepalingmethode uit de Beleidsregel trillinghinder spoor (Bts).

2.3.10.c Bepaal de totale variatiecoëfficiënt CV van de resultaten met behulp van de indicatieve waarden uit Tabel 2, of specifieke informatie indien voor handen. De standaardafwijking σ van de bijbehorende lognormale verdeling kan nu als volgt worden bepaald:

$$\sigma = \sqrt{\ln(1 + CV^2)}$$

Of, in dB (en dus in een normale verdeling):

$$\sigma_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \left(e^{\sqrt{\ln(1 + CV^2)}} \right)$$

(1)

Tabel 2 dient als volgt te worden gebruikt:

1. Bepaal de totale variatiecoëfficiënt CV voor absolute metingen (bijv. vaststellen bronsterkte) als volgt, waarbij variatiecoëfficiënten dienen te worden gecombineerd conform **4.3.3** (vergelijking (17)):
 - a. Gebruik een variatiecoëfficiënt CV voor de trillings**bron** op basis van de informatie uit paragraaf 3.2.
 - b. Gebruik een variatiecoëfficiënt CV van 0.1 voor de onzekerheid in het meetsysteem, tenzij kan worden gemotiveerd dat de onzekerheid in het meetsysteem lager is.
 - c. Gebruik de variatiecoëfficiënt CV voor **positie** uit Tabel 2, voor de locatie van het betreffende immissiepunt. Deze coëfficiënt geeft aan hoe groot de variatie is als op dezelfde ondergrond, maar enkele meters naar links of rechts, eenzelfde meetpunt wordt geplaatst (denk in hetzelfde gebouw bijvoorbeeld, of op dezelfde betonplaat).
 - d. Gebruik, wanneer robuuste uitspraken moeten worden gedaan over de betrouwbaarheid van het bronniveau, ook de variatiecoëfficiënten CV voor **tijd** (die de processen als spooronderhoud, veroudering en meteorologische invloeden (neerslag, temperatuur, zoninstraling) beschrijft) en **locatie** (die bijvoorbeeld de variatie tussen verschillende onderbouwconstructies van het spoor, bodemtypes en gebouwen beschrijft).
2. Bepaal de totale variatiecoëfficiënt CV voor herhaalmetingen (bijv. vaststellen effect maatregel) als volgt, waarbij variatiecoëfficiënten dienen te worden gecombineerd conform **4.3.3** (vergelijking (17)):
 - a. Gebruik een variatiecoëfficiënt CV voor de trillings**bron** op basis van de informatie uit paragraaf 3.2.
 - b. Gebruik een variatiecoëfficiënt CV van 0.0 voor de onzekerheid in het meetsysteem, mits hetzelfde meetsysteem op dezelfde locatie wordt gebruikt. Gebruik anders een variatiecoëfficiënt van 0.1 voor de onzekerheid in het meetsysteem, tenzij kan worden gemotiveerd dat de onzekerheid in het meetsysteem lager is.
 - c. Gebruik de variatiecoëfficiënt CV voor **herplaatsing** uit Tabel 2 voor de locatie van het betreffende immissiepunt. Deze coëfficiënt geeft aan hoe groot de variatie is als op dezelfde locatie een meetpunt op dezelfde manier wordt aangebracht.
 - d. Gebruik, als er niet wordt gemeten onder dezelfde meteorologische omstandigheden en spoorligging, ook de variatiecoëfficiënt CV voor **tijd** uit Tabel 2.
 - e. Gebruik eventueel een **extra variatiecoëfficiënt** CV voor de variatie in het effect van de maatregel, op basis van bijvoorbeeld literatuurgegevens.

Tabel 2 Indicatieve variatiecoëfficiënt per type meting, gebaseerd op meetervaringen (ref mm/s). Let op: bij vastleggen in tertsbandfrequenties is de energie per frequentie minder, en kunnen de variatiecoëfficiënten hoger zijn²¹

Locatie meetpunt	Variatiecoëfficiënt CV			
	Tijd	Positie	Locatie	Herplaatsen
Aan trein	0.40	0.25	0.55	0.03
Aan spoor (dwarsligger of spoorstaaf)	0.60	0.30	0.50	0.05
Aan spoor (in ballast)	0.80	0.65	1.10	0.55
Op maaiveld (asfalt)	0.40	0.08	0.60	0.03
Op maaiveld (elementenverharding)	0.50	0.12	0.65	0.05
Op maaiveld (vrije veld)	0.85	0.40	0.75	0.30
Aan fundering	0.40	0.06	0.85	0.02
In woning (op vloer)	0.50	0.35	1.00	0.05

2.3.10.d Bepaal de inverse van de tweezijdige Student t's verdeling, voor het aantal meetpunten n en het gewenste betrouwbaarheidsinterval P (vaak 90%):

²¹ Variatiecoëfficiënten zijn op basis van meetervaringen, en zijn indicatief. Gemotiveerd gebruiken van andere waarden die meer recht doen aan specifieke situaties is toegestaan.

<

2.4 Eisen aan apparatuur

De benodigde apparatuur voor een meting volgt uit het doel van de meting en de keuze van de meetlocaties. Generiek geldt dat het mogelijk moet zijn om met de beoogde meetapparatuur antwoord te geven op het onderzoeksdoel. Voor herbruikbaarheid en reproduceerbaarheid van de meetdata worden de volgende minimumeisen en -wensen aan de apparatuur gesteld:

2.4.1	Trillingsmeters dienen te voldoen aan onderstaande eisen:
2.4.1.a	Type sensor ²² : - Versnelling - Snelheid, mits ondergrens van de meetfrequentie hoger is dan 1 Hz. Niet toegestaan bij metingen aan treinen²³
2.4.1.b	Meetbereik ²⁴ : - Versnellingsopnemer: 60 µm/s² – 30 m/s². Voor metingen aan treinen geldt bovengrens van 10g (horizontaal) en 70g (verticaal)²⁵ - Snelheidsopnemer: 10 µm/s – 50 mm/s
2.4.1.c	Meetfrequentie 1 tot 80/100/250 Hz, afhankelijk van doel meting. Ondergrens van 1 Hz kan optioneel worden verlaagd naar 0.1 Hz
2.4.1.d	Sample frequentie: ≥ 10 keer hoogste meetfrequentie ²⁶

²² ISO14837-31 (2017), verplaatsingsmeters zijn, gezien de lagere gevoeligheid, niet geschikt. Ook piezometers zonder temperatuurcorrectie mogen niet worden gebruikt.

²³ ISO14837-31 (2017)

²⁴ SBR A (2017), par. 7.2 en SBR B (2006), bijlage 1, maximum van beide, maar ondergrens met factor 2 verlaagd t.b.v. onderzoeken

²⁵ UIC prEN13749

²⁶ SBR A (2017), par. 7.5

2.4.1.e	Kalibratie: 2-jaarlijks ²⁷
2.4.1.f	Nauwkeurigheid ²⁸ : - Maximale afwijking 10%²⁹ - DAC minimaal 16 bits A/D converter - Bij metingen aan treinen is laag-gevoelige sensor (0.1 V/g) of gevoelige sensor (1 V/g of 10 V/g) met groot meetbereik nodig
2.4.1.g	Opnemers: 3D, orthogonaal. Voor metingen op dwarsliggers en aan treinen zijn ook 1D-opnemers toegestaan (verticale trillingen)
2.4.1.h	EMC-interferentie is niet toegestaan ³⁰
2.4.1.j	Output: minimaal hoogfrequent tijdssignaal (met sample frequentie conform 2.4.1.d)
2.4.2	Kunstmatige trillingsbronnen dienen te voldoen aan onderstaande eisen:
2.4.2.a	Voor het vaststellen van de mate van trillingsdemping (invoegverlies) van maatregelen in de spoorbaan dient, bij gebruik van een kunstmatige trillingsbron, DIN SPEC 45673-3 (2014) ³¹ te worden gehanteerd. In afwijking hierop gelden de volgende eisen: - Voor een harmonische aanstoting dient een ondergrens van 2 Hz te worden gehanteerd, in afwijking van de DIN SPEC 45673-3 par. 4.1.3 (waar over 5 Hz wordt gesproken)³². - Voor het uitvoeren van de trillingsmetingen waarbij gebruik wordt gemaakt van een kunstmatige trillingsbron, geldt dat het voorliggende meetprotocol leidend is boven de DIN SPEC 45673-3. - Voor de meet- en evaluatiemethode geldt dat het voorliggende meetprotocol leidend is boven de DIN SPEC 45673-3 - Een kunstmatige trillingsbron mag uitsluitend gebruikt worden voor het bepalen van het effect van trillingsmaatregelen als de quasi-statische belasting van het spoor (de bewegende massa van de trein die het spoor indrukt) niet relevant is voor de trillingen in de omgeving, dus bij een stijve baanconstructie³³.
2.4.2.b	MASW/SASW (hamer) ³⁴ : - Minimumgewicht 5 kg - Minimaal 20 klappen per locatie - Accelerometer op hamer, conform 2.4.1
2.4.2.c	Valgewicht ^{35,36} : - Minimumgewicht 50 kg

²⁷ SBR A (2017), par. 7.4

²⁸ SBR A (2017), par. 7.5

²⁹ Deze eis sluit het gebruik van piezometers met hoge temperatuurgevoeligheid uit.

³⁰ UIC prEN13749

³¹ DIN SPEC 45673-3 " *Mechanische Schwingungen – Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen – Teil 3: Messtechnische Ermittlung der Einfügungsdämmung im eingebauten Zustand (Versuchsaufbau und Betriebsgleis)* April 2014. In deze DIN-norm worden zowel de meet- als evaluatiemethode bij toepassing van een kunstmatige trillingsbron gespecificeerd. Tevens worden voorbeelden gegeven van mogelijk in te zetten kunstmatige trillingsbronnen.

³² Deze ondergrens is aangescherpt om de Nederlandse situatie, met een relatief slappe baan waarin relatief lage frequenties vaak een belangrijk aandeel hebben in de excitatie tussen voertuig en baan. Het frequentiebereik van de kunstmatige trillingsbron dient hierop aan te sluiten.

³³ In de DIN SPEC 45673-3 (2014) is als toepassingsgebied opgenomen dat een kunstmatige trillingsbron vooral geschikt is om een relatieve vergelijking met trillingsreducerende maatregelen uit te voeren. Een kunstmatige trillingsbron is daarbij geschikt om de dynamische excitatie op te wekken zoals deze optreedt tijdens treinpassage (o.a. als gevolg van spooronregelmatigheden, stijfheidsvariëaties in de ondersteuning van het spoor en wielastvariëaties). Echter, de kunstmatige trillingsbron is niet of slechts deels bruikbaar als simulatie van de quasi-statische belasting van passerende treinen (de zogenoemde 'moving load').

In situaties waarin de quasi-statische belasting van het spoor (de bewegende massa van de trein die 'de baan' indrukt) maatgevend is voor de trillingen in de omgeving, moet kritisch worden gekeken naar het gebruik van een kunstmatige trillingsbron. Bij een relatief slap baanlichaam speelt de quasi-statische belasting van het spoor een belangrijke rol, en wordt dit afgeraden. Dit komt overeen met bevindingen in praktijksituaties in Nederland, waar blijkt dat het bepalen van het effect van een maatregel bij frequenties onder de 5 Hz niet goed mogelijk is met een kunstmatige trillingsbron. Zie voor meer informatie Bijlage 6.

³⁴ FINE2 (2022), resolutie opnemers op maaiveld is nodig om nauwkeurige bepaling bodemeigenschappen te krijgen.

Minimumaantal klappen kan hoger zijn.

³⁵ Garburg (2019), ProRail (2018) en We-Boost (2020).

³⁶ Valgewicht is minder geschikt voor slappe bodems en laagfrequent geluid (vooral geschikt voor 10 – 40/60 Hz).

	- Impuls: $\geq 500 \text{ Ns}^{37}$, instelbaar in stappen van 100 Ns ($\pm 25\%$). (OURS $\geq 1000 \text{ Ns}$ instelbaar in stappen van 300 tot 1000 Ns) - Ondergrond³⁸: stalen plaat, 0.25 tot 1.00 m^2. (OURS: $\geq 1.00 \text{ m}^2$, grotere plaat is evenredig grotere impuls) - Aantal metingen per impulsstap: ≥ 2. (OURS: ≥ 6) - Accelerometer op valgewicht, conform 2.4.1. (OURS: krachtplaat met ≥ 3 krachtdozen onder valgewicht ook toegestaan. Verder 4 extra sensoren rondom voetplaat op 1 meter van rand, afwijkende eisen t.o.v. 2.4.1: versnellingsopnemer meetbereik: $12.5 \mu\text{m/s}^2$ (1 Hz) – 10 m/s^2 (80 Hz), snelheidsopnemer meetbereik: $2 \mu\text{m/s}$ (1 Hz) – 20 mm/s (80 Hz), sample frequentie $\geq 1000 \text{ Hz}$, minimaal 8 seconden meetduur, inclusief 1 seconden pre-trigger)
2.4.2.d	Excitator ³⁹ : - Frequentiebereik: 3 tot 250 Hz (stapgrootte 1 Hz ($\pm 10\%$)) - Verankerd aan bodem - Accelerometer op voetplaat, conform 2.4.1.
2.4.3	Eventueel ingezette videoregistratie-apparatuur dient te voldoen aan de volgende minimumeisen, zodat beelden ook herkenbaar zijn en bredere inzetbaar:
2.4.3.a	Framerate $\geq 10 \text{ fps}^{40}$
2.4.3.b	Resolutie $\geq 640 \times 480$ pixels, trein op meest dichtbijgelegen spoor moet minimaal $1/3$ van hoogte beeld vullen (≥ 160 pixels) ⁴¹
2.4.3.c	Synchronisatieverschil met overige apparatuur ≤ 0.1 seconde ⁴²
2.4.4	Eventueel ingezette snelheidsregistratieapparatuur moet de snelheid met een maximale onzekerheid van ± 2 procent vastleggen ⁴³
2.4.5	Eventueel ingezette apparatuur om GPS- of RD-coördinaten vast te leggen, mag een maximale onzekerheid van ± 0.1 meter hebben.
2.4.6	Eventueel ingezette registratie-apparatuur in het spoor (om de exacte passagetijdstippen van treinen te koppelen aan trillingsregistraties dient te voldoen aan de volgende eisen:
2.4.6.a	Synchronisatieverschil met overige apparatuur ≤ 0.1 seconde
2.4.6.b	EMC-interferentie is niet toegestaan

2.5 Meetomstandigheden

De weersomstandigheden kunnen invloed hebben op de trillingen van het spoorstelsel. Zo is het gedrag van elastische componenten (ballastmatten, onder sleeper pads, railpads) en spoorstaven bijvoorbeeld afwijkend en niet-representatief bij lage temperaturen. Voor de meetomstandigheden gelden de volgende eisen en wensen:

2.5.1	Meetomstandigheden dienen representatief te zijn voor het onderzoeksdoel. Met representatief wordt hier bedoeld op een situatie die overeenkomt met de beoogde gebruikssituatie.
--------------	--

³⁷ Te lage impuls en te laag gewicht geeft vooral bij slappe bodems te weinig trillingen. Garburg (2019) heeft 220 Ns , We-Boost (2020) heeft 500 Ns , ProRail (2018) heeft 1500 Ns , RIVM (2020) heeft 1000 Ns , maar beide laatste impulswaarden zijn praktisch lastig haalbaar.

³⁸ Stalen plaat is bedoeld voor spreiden impact. Daarnaast ook zand of dunne rubberen mat gebruiken om impact te spreiden. Afmetingen stalen plaat o.b.v. eerdere meetprotocollen (ProRail (2018) heeft $\geq 1 \text{ m}^2$, Garburg (2019) 1 m^2 , RIVM (2020) heeft 1 m^2 , We-Boost (2020) heeft $0.25 - 1 \text{ m}^2$). Grote stalen plaat is niet altijd toepasbaar, daarom zijn kleinere afmetingen ook toegestaan. Bij slappe ondergrond grotere plaat gebruiken, in dat geval is ook een evenredig grotere impuls nodig.

³⁹ Eisen excitator o.b.v. benodigde onderzoek, verankering aan bodem is essentieel om stuiten te voorkomen. Vooral geschikt voor frequenties $> 20 \text{ Hz}$.

⁴⁰ Ervaringsgetal, bij lagere fps is het voor repeterende treinen (bijv. identieke goederenwagens, reizigerstreinen) op hogere snelheid niet meer mogelijk om onderscheid te maken naar rijrichting

⁴¹ Ervaringsgetal, lagere resolutie of beeldvulling zorgt voor onvoldoende bruikbaarheid van beelden

⁴² Ervaringsgetal, nodig voor goede koppeling met bijv. trillingen

⁴³ Voertuigen moeten kunnen worden ingedeeld in snelheidscategorieën met $\pm 5\%$, grotere afwijking dan 2% zorgt voor te grote onzekerheid i.r.t. die 5% . RIVM (2020) benoemt 3% onzekerheid als toegestaan.

2.5.2	Voor de meteocondities op het moment van de meting gelden de volgende eisen, tenzij wordt gemotiveerd dat deze meteocondities representatief zijn (conform 2.5.1) voor de beoogde gebruikssituatie ⁴⁴ :
2.5.2.a	De buitentemperatuur mag niet lager zijn dan 0°C. Bij temperaturen onder het vriespunt is het gedrag van elastische componenten en spoorstaven afwijkend.
2.5.2.b	De meting mag niet worden uitgevoerd bij sneeuw (sneeuw, gebroken of gesloten sneeuwdek) en ijs. Ook hier geldt dat het gedrag van het spoor afwijkend is, aanvullend kan ook de bodem anders reageren onder deze omstandigheden.
2.5.2.c	Herhaalmetingen dienen zoveel mogelijk te worden uitgevoerd bij gelijke omstandigheden (t.o.v. de nulmeting) ten aanzien van (1) temperatuur, (2) neerslag en (3) doorlopend neerslagtekort. Bij het plannen van de nulmeting dient hier rekening mee te worden gehouden
2.5.3	Bij nieuw spoor geldt dat metingen pas mogen worden uitgevoerd als het spoor minimaal 4 weken in gebruik is, én door minimaal 1 miljoen ton statische aslast is bereden ⁴⁵ .
2.5.4	Bij aanpassingen aan het spoor (bijv. onderhoud, gewijzigde spoorconstructie of -onderdelen daarvan) geldt dat het effect van de ingreep pas goed kan worden vastgesteld als het spoor minimaal 4 weken in gebruik is, én door minimaal 1 miljoen ton statische aslast is bereden ⁴⁶ . Dit is met name relevant bij het toepassen van RIVAS-methode 2, zie paragraaf 4.2.2.

⁴⁴ RIVAS Deliverable D1.2 (2013) en ISO14837-31 (2017)

⁴⁵ RIVAS Deliverable D1.2 (2013)

⁴⁶ RIVAS Deliverable D1.2 (2013)

3 Uitvoering van een meting

3.1 Plaatsing van apparatuur

De plaatsing van meetapparatuur heeft veel invloed op de resultaten, betrouwbaarheid en reproduceerbaarheid van de meting. Daarom worden hier de volgende eisen aan gesteld:

3.1.1	Voor de fixatie van apparatuur om trillingen te registreren (versnellings- of snelheidsopnemer) gelden de volgende eisen:
3.1.1.a	Voor trillingsopnemers aan een trein (aspot) dient de trillingsopnemer te worden vastgezet met een boutverbinding. Indien dat niet mogelijk is, dan zijn ook lijm, epoxy of magneten toegestaan, mits passend binnen de eisen t.a.v. veiligheid ⁴⁷ .
3.1.1.b	Voor trillingsopnemers aan het spoor gelden de volgende eisen ⁴⁸ : - Voorkeur is fixeren aan dwarsliggers of spoorstaaf, m.b.v. lijm of epoxy (dwarsligger) of magneten (spoorstaaf). - Vermijd aanbrengen in ballast of op schouwpad, i.v.m. slechte reproduceerbaarheid. Indien toch nodig, houd hier dan rekening mee bij het aantal meetpunten - Los plaatsen van sensoren (zonder fixatie, dus uitsluitend zwaartekracht) is niet toegestaan, door hoge versnellingen raken sensoren los en zijn metingen niet representatief
3.1.1.c	Voor trillingsopnemers op maaiveld gelden de volgende eisen ⁴⁹ : - Ingraven volgens onderstaande procedure: - o Indien sprake is van vegetatie, een losse of aangepaste toplaag: toplaag (> 20 cm) verwijderen, voor slappe bodems is het verstandig om dieper aan te brengen. - o Ondergrond vlak maken, niet beroeren, liever ook geen zand voor egalisatie aanbrengen. Als toch moet worden geëgaliseerd, dan bij voorkeur sneldrogend gips of snelbeton gebruiken. Bij gebruik van water minimaal 15 minuten aanhouden tussen aanbrengen water en sensor. Verder geldt: ▪ Indien gebruik wordt gemaakt van gips of snelbeton: sensor fixeren met bijenwas of lijm. Alleen op grote afstand van het spoor (> 50 meter) is zwaartekracht toegestaan, op kortere afstand moet worden aangetoond dat de horizontale trillingen zonder fixatie representatief zijn⁵⁰. ▪ Indien gebruik wordt gemaakt van de van nature aanwezige beton: sensor dient voorzien te zijn van een bodemplaat met minimaal 3 pinnen van elk bij voorkeur 30 cm lang⁵¹. Pinnen dienen in 1 beweging volledig te worden aangebracht in de bodem. Indien dit niet lukt, de poging herhalen op een naastgelegen plek⁵². Alleen bij bodems met veel grind en puin is het toegestaan om zonder pinnen te werken⁵³. - o Geen grond naast/op sensor om ongewenste invloeden te vermijden. Indien volledig ingraven gewenst is (dus dat de sensor onzichtbaar achterblijft op maaiveld, of om bijvoorbeeld inwatering te voorkomen), maak dan gebruik van een overkluising die de sensor niet raakt, hier kan grond op worden aangebracht⁵⁴.

⁴⁷ UIC prEN13749

⁴⁸ FTA (2018) en RIVAS deliverable D1.11 (2011)

⁴⁹ ISO14837-1 (2005), ISO14837-31 (2017), RIVM (2020), RIVAS deliverable D1.2 (2011) en ervaringen van diverse bureaus. ISO14837-1 (2005) noemt 300 mm lange stalen pinnen, afhankelijk van grondcondities. ISO14837-31 (2017) noemt een minimumlengte van 80 mm. In sommige programma's, zoals FINE2 (2022), wordt zonder pinnen gewerkt, maar dit geeft vooral in horizontale richting vaak afwijkingen. FTA (2018) vereist fixatie voor horizontale trillingen. RIVM (2020) geeft aan dat 1 pin niet is toegestaan, maar biedt wel de mogelijkheid om zonder pinnen te werken.

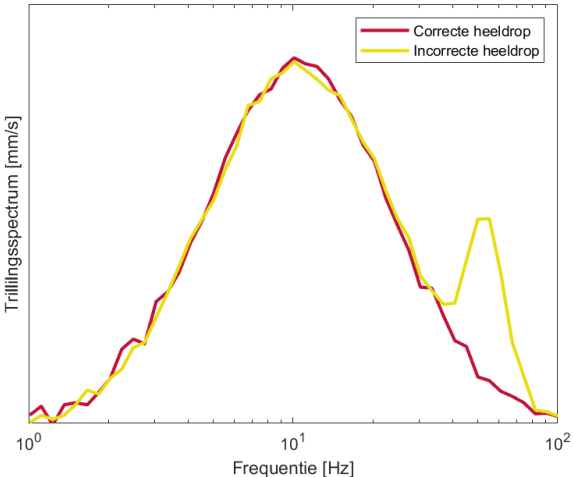
⁵⁰ Op kortere afstand zijn vooral de horizontale trillingen anders mogelijk niet representatief.

⁵¹ Afwijken naar kortere pinlengte tot minimaal 10 cm. lang is toegestaan. Algemene stelregel is dat bij slappere bodemtypes (veen, slappe klei) langere pinnen de voorkeur hebben (dus 30 cm), en bij stijvere bodemtypes (zand) kortere pinnen omdat het risico op de aanwezigheid van grind en steentjes dan de kans op een instabiele plaatsing vergroot.

⁵² Indien niet in 1 beweging wordt aangebracht, of niet volledig wordt aangebracht, dan kan er ruimte ontstaan tussen sensor en bodem waardoor onwenselijke rotaties optreden. Bevindingen uit praktijkonderzoek.

⁵³ Bij puin en grind is er de mogelijkheid dat één van de pinnen anders op een hard element (grind of puin) komt te rusten, waardoor onwenselijke rotaties optreden. Bevindingen uit praktijkonderzoek.

⁵⁴ Eis komt voort uit wens van maximale reproduceerbaarheid, en vermijden van extra resonanties. In principe zou een sensor met gelijke massa en stijfheid als de grond (maar betekent per grondtype een andere sensor) en daarop grond de meest realistische

	- Alternatief is op stabiele verharding (asfalt of elementenverharding), fixeren met bijenwas of lijm. Alleen op grote afstand van het spoor (> 50 meter) is zwaartekracht toegestaan, op kortere afstand moet worden aangetoond dat de horizontale trillingen zonder fixatie representatief zijn.
3.1.1.d	Voor trillingsopnemers aan de constructie van een gebouw gelden de volgende eisen⁵⁵: - Fixatie is toegestaan met bouten, schroeven of borgmoeren (alleen handvast aangedraaid is onvoldoende) of magneet. - Alternatief is gebruik maken van beugels, of op een vloer op fixeren met bijenwas of lijm. Alleen op grote afstand van het spoor (> 50 meter) is zwaartekracht toegestaan, op kortere afstand moet worden aangetoond dat de horizontale trillingen zonder fixatie representatief zijn. - Voor alle types bevestiging geldt dat de eigenfrequentie van de ophanging hoger moet zijn dan 1.5 maal de maximale meetfrequentie. Frequentie kan worden vastgesteld m.b.v. signaaltest (3.1.2).
3.1.1.e	Voor trillingsopnemers in een gebouw gelden de volgende eisen⁵⁶: - Fixatie is toegestaan met schroeven, magneet, bijenwas, lijm, epoxy, dun dubbelzijdig tape of zwaartekracht. Zwaartekracht zonder fixatie is toegestaan op grote afstand van het spoor (> 50 meter), op kortere afstand moet worden aangetoond dat de horizontale trillingen zonder fixatie representatief zijn. - Op lichte vloeren en vloeren met een isolerende tussenlaag (hout, laminaat, parket, PVC, zeil en lineoleum) voorbelasten met minimaal 30 kg op minder dan 50 cm van de sensor. - Op vloeren met een zachte vloerbedekking (tapijt) gebruikmaken van de hulpconstructie zoals beschreven in bijlage 4 van de SBR B-richtlijn, pinnen doordrukken tot op harde vloer.
3.1.2	Een signaaltest is verplicht voor alle meetpunten⁵⁷. Hiervoor zijn twee procedures: (1) een heeldrop test en een (2) hamertest, die dienen te voldoen aan de volgende eisen:
3.1.2.a	De procedure voor een heeldrop test is als volgt: - Ga op maximaal 2 meter afstand van het meetpunt op de tenen staan, en laat uzelf vervolgens stevig neerkomen op de hielen. - Toets of er sprake is van horizontale resonanties in het trillingsspectrum boven de 10 Hz (tot de van toepassing zijnde maximale meetfrequentie van 80, 100 of 250 Hz), zie de figuur hiernaast. Indien ja: meetpunt verplaatsen of beter fixeren. Indien nee: test minimaal 2 keer herhalen. 
3.1.2.b	Soms geeft een heeldrop test te weinig signaal (bijvoorbeeld bij een meting aan de fundering), en kan een hamertest worden gebruikt. De procedure is als volgt: - Sla met een rubberen hamer op maximaal 50 centimeter afstand van het meetpunt op de fundering (laag bij de grond). - Toets of er sprake is van horizontale resonanties in het trillingsspectrum boven de 10 Hz (tot de van toepassing zijnde maximale meetfrequentie van 80, 100 of 250 Hz), zie de figuur bij 3.1.2.a. Indien ja: meetpunt verplaatsen of beter fixeren. Indien nee: test minimaal 2 keer herhalen.
3.1.2.c	Resultaten van de signaaltest behoeven niet te worden vastgelegd in een rapportage.

resultaten moeten geven, maar uit praktijkmetingen blijkt dat naarmate meer grond wordt beroerd, de reproduceerbaarheid verslechtert. Het terug aanbrengen van grond zal altijd resulteren in een andere situatie dan ongeroerde grond, ook al wordt de grond aangestampd of met water verdicht. Bovendien zal dit per meetbureau verschillend worden uitgevoerd, waardoor de reproduceerbaarheid wordt beperkt. Zolang de ingraafdiepte beperkt is (< 50 cm) zijn de trillingen door de toplaag ook minder relevant i.r.t. de trillingen die in een gebouw worden ervaren: de fundering is ook altijd op minimaal 50 cm diepte geplaatst. Daarom is, in lijn met de ISO14837-31 (2017), ervoor gekozen om het niet toe te staan om grond op de sensoren aan te brengen.

⁵⁵ SBR A (2017), paragraaf 8.6 en bijlage 2 (voor bevestiging op vloerbedekking).

⁵⁶ SBR B (2006), paragraaf 8.3 en meetervaringen.

⁵⁷ Op basis van praktijkervaringen.

- 3.1.3** Voor meetstations t.b.v. **meteogegevens** (denk aan temperatuur, wind, zoninstraling en neerslag) geldt dat deze zo dicht mogelijk bij de trillingsbron dienen te worden geplaatst, zodanig dat meteogegevens gelijk zijn aan die op de locatie van de trillingsbron.
- 3.1.4** Voor meetstations t.b.v. **grondwaterstanden** geldt dat deze zo dicht mogelijk bij de trillingsbron dienen te worden geplaatst, zodanig dat de grondwaterstanden en stijghoogtes gelijk zijn aan die op de locatie van de trillingsbron.

3.2 Meetduur

De duur van een meting heeft eveneens invloed op de nauwkeurigheid van de meting. De minimaal vereiste meetduur is afhankelijk van het doel van de meting (wil je een gemiddeld trillingsspectrum vaststellen, of juist een 95%-bovengrens) en het gewenste betrouwbaarheidsinterval. Voor metingen i.h.k.v. het vaststellen van overschrijdingen van de richtlijnen voor trillingsschade (de SBR A-richtlijn) en trillingshinder (de SBR B-richtlijn of de Bts), kennen die richtlijnen eisen aan de meetduur. Voor onderzoeksprojecten geldt dat het vereiste minimumaantal treinpassages afhankelijk is van de beoogde output en het betrouwbaarheidsinterval. Zoals eerder aangegeven wordt in dit meetprotocol, op basis van ervaringen in projecten, gekozen voor het minimaal vastleggen van tertsbandspectra. Voor de minimaal vereiste meetduur geldt dat bij hogere gewenste nauwkeurigheid (tijdssignalen of smalbandige Fourierspectra) een langere benodigde meetduur nodig kan zijn. Omdat het voor veel metingen nodig is om vooraf een meetduur te kunnen bepalen, geven we hieronder aan hoeveel treinen indicatief moeten worden gemeten om het gemiddelde tertsbandspectrum (zie Tabel 4) en de 95%-bovengrens van het tertsbandspectrum (zie Tabel 5) over alle frequenties met voldoende nauwkeurigheid vast te stellen⁵⁸. De meetduur is daarbij afhankelijk van hoe nauwkeurig de testgroepen met treinen zijn gedefinieerd, maar ook van de spoorligging (bij puntbronnen of een slechte spoorligging kunnen meer treinen nodig zijn om het beoogde betrouwbaarheidsinterval te halen).

Tabel 4 Variatiecoëfficiënt CV (ref mm/s) voor 90%-betrouwbaarheidsinterval om gemiddeld trillingsspectrum te bepalen in situatie met normale spoorligging. **Rood** gearceerd aantallen die in principe niet mogen worden gebruikt.

Aantal treinen	Alle treinen bij elkaar	Per klasse en spoor	Per klasse en spoor, snelheidsvariatie +/- 5%	Testtrein, snelheidsvariatie +/- 5%
5	0.75	0.31	0.20	0.10
10	0.42	0.18	0.12	0.06
20	0.28	0.12	0.08	0.04
50	0.17	0.07	0.05	0.02
100	0.12	0.05	0.03	0.02
200	0.08	0.04	0.02	0.01
500	0.05	0.02	0.02	0.01
1000	0.04	0.02	0.01	0.01

Tabel 5 Variatiecoëfficiënt CV (ref mm/s) voor 90%-betrouwbaarheidsinterval om 95%-bovengrens van trillingsspectrum te bepalen, of gemiddeld trillingsspectrum in de buurt van puntbronnen of bij slechte spoorligging. **Rood** gearceerd aantallen die in principe niet mogen worden gebruikt.

Aantal treinen	Alle treinen bij elkaar	Per klasse en spoor	Per klasse en spoor, snelheidsvariatie +/- 5%	Testtrein, snelheidsvariatie +/- 5%
5	1.18	0.62	0.42	0.17
10	0.62	0.36	0.25	0.10
20	0.39	0.23	0.16	0.07
50	0.24	0.14	0.10	0.04
100	0.16	0.10	0.07	0.03
200	0.11	0.07	0.05	0.02

⁵⁸ Zie Bijlage IV voor achtergrondinformatie over een analyse op meetdata.

Aantal treinen	Alle treinen bij elkaar	Per klasse en spoor	Per klasse en spoor, snelheidsvariatie +/- 5%	Testtrein, snelheidsvariatie +/- 5%
500	0.07	0.04	0.03	0.01
1000	0.05	0.03	0.02	0.01

Met het aantal treinen en het verwachte aantal passages per categorie (o.b.v. verkeersgegevens) kan een inschatting worden gemaakt van de benodigde meetduur, en dit aantal treinen kan worden meegenomen in het bepalen van de onzekerheid van het effect van een maatregel.

Let op dat met name als er restricties zijn in de snelheid (bijv. optrekkende of afremmende treinen) en voor al die snelheidscategorieën het snelheidseffect dient te worden vastgesteld, de meetduur sterk kan oplopen.

Voor (het vaststellen van) de meetduur gelden verder de volgende aandachtspunten:

- 3.2.1** Een klasse is gedefinieerd als een treintype per spoor. Voor goederentreinen geldt een klasse-indeling op basis van statische aslast, in groepen van maximaal 2.5 ton variatie in gemiddelde statische aslast per trein.
- 3.2.1.a** Bij gebruiken van aslastklassen dient te worden aangesloten bij de klassenopdeling in de **Woordenlijst**.
- 3.2.2** Het minimumaantal treinpassages is afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid, maar mag niet minder bedragen dan 10 treinen (per klasse/per klasse per spoor, met maximaal +/- 5% snelheidsvariatie per klasse)⁵⁹. Alleen bij testtreinen mag er een kleiner aantal passages worden gehanteerd, omdat het dan om 1 specifieke trein gaat.
- 3.2.2.a** Bij gebruiken van snelheidsklassen dient te worden aangesloten bij de klassenopdeling in de **Woordenlijst**.
- 3.2.3** Voor het vaststellen van degeneratieve processen (denk aan veroudering van het spoor, effect van spooronderhoud of het effect van bepaalde maatregelen) dient de meetduur te worden afgestemd op de tijdsduur van het degeneratieve proces. Bij (een deel van) de meetpunten zal dan een tijdsduur van minimaal een jaar nodig zijn.

3.3 Vastleggen van treingegevens

Veel treingegevens kunnen achteraf worden opgevraagd bij ProRail. Dit dient te gebeuren via de contactpersoon bij ProRail, via materieelimpact@prorail.nl. Bij het opvragen van gegevens dient het volgende te worden opgevraagd, zie Tabel 6. Op deze manier kan het Meetjournaal (zie 5.1.2) worden gekoppeld aan treinnummers.

Tabel 6 Op te vragen gegevens na meting

Benodigde data	Gecombineerde QV-PAB-data voor virtueel QuoVadis-station op onderstaande dienstregelpunten, inclusief treinnummers en gerealiseerde passagetijden in seconden.
Dienstregelpunten	Geef hier de namen van de dienstregelpunten, deze zijn openbaar in te zien via https://www.arcgis.com/apps/mapviewer/index.html?layers=91a07cce7e4445c8aa7f7c741dd6af0a . Geef de afkorting van het dienstregelpunt door.
Periode	Geef begin- en eindtijd door.

⁵⁹ Eisen lopen sterk uiteen in de literatuur. FTA (2018) spreekt over 4 tot 10 treinen per klasse per spoor. Een klasse is een specifiek type treinen (bijv. sprinter, intercity, hogesnelheidstrein, goederentrein). De DIN4150-2:1999 (1999) spreekt over 5 treinen per klasse per spoor, met klasse identiek gedefinieerd als in FTA (2018). ISO14837-31 (2017) spreekt ook over 5 treinen per klasse, maar geeft aanvullend aan dat langer meten nodig is als de variatie groter is dan +/- 2dB (+/- 20%). Voor voldoende zekerheid zijn 15 treinen per categorie nodig. ISO14837-31 (2017) maakt geen onderscheid tussen sporen. RIVAS Deliverable D1.2 (2011) gaat verder, en vereist minimaal 6 treinen bij een vaste testtrein, omdat hier in principe geen variatie in zit, en minimaal 10 treinen per klasse per spoor, zolang de maximale snelheidsvariatie binnen een klasse niet groter is dan 5%. Voor goederentreinen dienen 20 treinen per spoor te worden gemeten, maar wordt geen onderscheid in klassen gemaakt. RIVM (2020), in het protocol t.b.v. OURS, eist minimaal 50 treinen per type om een bronsignaal vast te stellen en minimaal 25 reizigerstreinen voor het bepalen van de overdracht in een gebouw. Bts (2014) spreekt over 50 treinen per categorie, waarbij een categorie is gedefinieerd als goederen- of reizigerstreinen. Onderscheid naar type, spoor of snelheid wordt hierbij niet gemaakt. Hier zijn de strengste eisen (o.b.v. RIVAS Deliverable D1.2 (2011)) aangehouden, deze komen overeen met een redelijke onzekerheidsmarge.

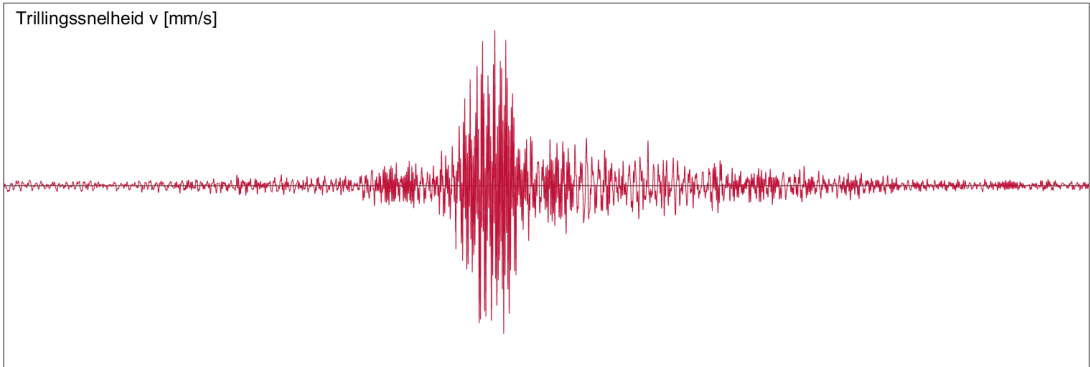
4 Verwerking van data

4.1 Verwerking van ruwe data

De volgende subparagrafen bevatten eisen aan de verwerking van ruwe data en interpolatie.

4.1.1 Verwerken van tijdssignalen

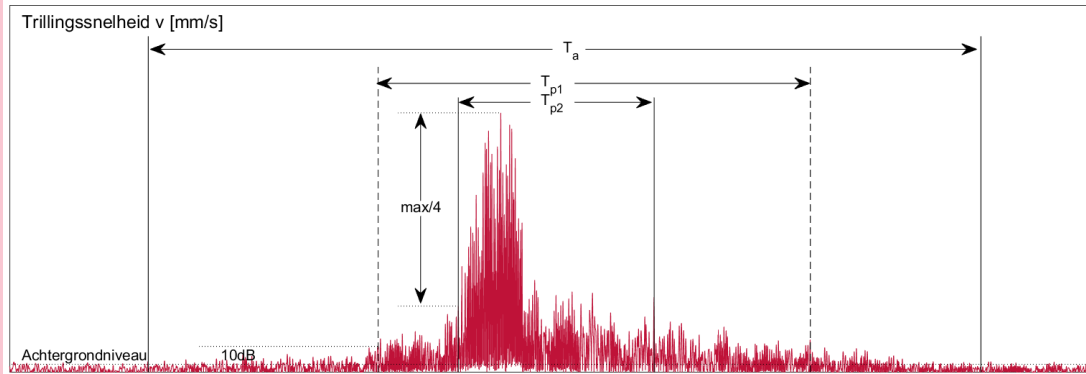
Verwerking van tijdssignalen dient te worden uitgevoerd volgens onderstaande eisen:

4.1.1	Transformeer de ruwe meetdata om naar een snelheidssignaal:
4.1.1.a	Bij meten met accelerometers : (1) verwijder DC offset, (2) pas calibratiefactoren toe, (3) integreer de signalen numeriek naar een snelheidssignaal en (4) pas een filter toe conform bijlage B1 van de SBR A (2017), met de grenzen van het filter op het meetbereik.
4.1.1.b	Bij meten met snelheidsmeters : (1) verwijder DC offset, (2) pas calibratiefactoren toe en (3) pas een filter toe conform bijlage B1 van de SBR A (2017), met de grenzen van het filter op het meetbereik.
4.1.1.c	Bij meten met verplaatsingsmeters : (1) pas calibratiefactoren toe, (2) differentieer de resultaten numeriek naar een snelheidssignaal en (3) pas een filter toe conform bijlage B1 van de SBR A (2017), met de grenzen van het filter op het meetbereik.
4.1.2	Verwijder stoorsignalen uit de meting. Dat mag op 2 manieren: - Handmatig, door tijdssignaal of frequentiespectrum te bekijken en events met extreme schokken (in het tijdssignaal) of extreme waarden bij zeer lage frequenties (bijv. rond 1 Hz) of zeer hoge frequenties (bijv. boven de 80 Hz) te markeren als vervuiling. De meest voorkomende verstoringen zijn lopen (repetierend patroon in tijdssignaal, veel trillingsenergie bij hoge frequenties), stationair draaiende machines (constant aanwezige frequentie, repetierend patroon in tijdssignaal of scherpe piek in frequentiespectrum) en wegverkeer (korte passages in tijdssignaal, in frequentiespectrum hoge trillingen rond 10 Hz, vrijwel geen energie bij lage frequenties tenzij op zeer korte afstand tot de weg) - Filtering mag ook door middel van een algoritme dat getraind is op het herkennen van treinpassages.
4.1.3	Selecteer events (bijvoorbeeld treinpassages) op basis van de parameters T_p en T_o^{60}: - T_p, de passagetijd, de tijd van de passage waarin de amplitude van het tijdssignaal (bij meer dan 1 meetrichting het maximum over alle meetrichtingen) groter is dan $\frac{1}{4}$ van de maximale absolute amplitude (of de omhullende amplitude) óf 10 dB (een factor 3.16) groter dan de achtergrondtrillingen. - T_a, de analysetijd, de lengte van het tijdssignaal waarbij de trillingen hoger zijn dan de achtergrondtrillingen. Voor een specifiek voorbeeld is dat hieronder uitgewerkt. Een trillingssignaal in mm/s is hieronder weergegeven: Trillingssnelheid v [mm/s] 

⁶⁰ RIVAS Deliverable D1.2 (2011), paragraaf 3.8

Om de passagetijd T_p te bepalen moet als volgt te werk worden gegaan:

- Neem de absolute waarde van het snelheidssignaal
- Bepaal hiervan het achtergrondniveau (maximale amplitude van de trillingen terwijl er geen trein passeert).
- Selecteer het punt waarbij het trillingssignaal tijdens een treinpassage voor het eerst en voor het laatst 10 dB (ongeveer een factor 3.16) boven het achtergrondniveau uitkomt. De tijd hiertussen is T_{p1} .
- Selecteer het punt waarbij het trillingssignaal tijdens een treinpassage voor het eerst en voor het laatst hoger is dan een kwart van het maximum van het trillingssignaal. De tijd hiertussen is T_{p2} .
- De tijd T_p is de langste periode van T_{p1} of T_{p2} ⁶¹. In de figuur hieronder is T_p gelijk aan T_{p1} .
- De tijd T_a is niet scherp gedefinieerd. Gebruikelijk is om 5 of 10 seconden rondom T_p vast te leggen.



4.1.4 Bij meerdere meetpunten op meerdere afstanden dient de procedure uit **4.1.3** per meetpunt te worden uitgevoerd. Hierdoor kan per meetpunt en per treinpassage een andere waarde voor T_p ⁶² ontstaan.

4.1.5 Voer een FFT (Fourier Transformatie) uit op het tijdssignaal. Normalisatie dient zodanig te zijn dat deze voldoet aan:

$$\int |v(f)|^2 df = \int v(t)^2 dt \quad (4)$$

Hierbij is v de trillingssnelheid, f de frequentie en t de tijd.

Optioneel, alleen wanneer gebruik wordt gemaakt van fft-spectra of tertsbandspectra.

4.1.6 Reduceer het FFT-signaal naar een tertsbandspectrum (1/3 octaafbandspectrum), zowel in mm/s als in dB (ref $1 \cdot 10^{-9}$ m/s) conform de NEN-EN-IEC61260. In afwijking van RIVAS Deliverable D1.2 (2011) wordt de voorkeur gegeven aan het definiëren van het niveau L_v over de periode T_p , of over de 5 seconden rond de $V_{eff,max}$ -waarde (conform de Bts (2014)). De reden is dat met name de definitie van de achtergrondruis verschillen kan opleveren tussen bureaus, hier is geen vastomlijnde definitie van. Over de periode T_p is de definitie als volgt:

$$L_v(f) = 20 \log_{10} \frac{v(f)}{v_0} \text{ dB} \Big|_{T_p} \quad (5)$$

Hierbij is $v(f)$ het tertsbandspectrum in m/s, v_0 het referentieniveau in $1 \cdot 10^{-9}$ m/s en T_a en T_p zoals hierboven gedefinieerd. Bij aansluiten op de Bts (2014) (5 seconden rond $V_{eff,max}$) wordt bovenstaande vergelijking als volgt geschreven:

$$L_v(f) = 20 \log_{10} \frac{v(f)}{v_0} \text{ dB} \Big|_{T_{V_{eff,max}-2.5sec}}^{T_{V_{eff,max}+2.5sec}} \quad (6)$$

In bepaalde gevallen kan ook de seconde rond het maximum relevant zijn, deze kan ook met vergelijking (6) worden bepaald.

⁶¹ Deze twee methodes zijn gekozen omdat de gebruikelijke RIVAS-methode ertoe leidt dat in treinen met een dominante locomotief niet het gehele signaal wordt beschouwd, dus dat wagons onterecht buiten beschouwing worden gelaten. In dat geval zal de procedure waarbij 10 dB boven de achtergrondruis moet worden meegenomen als T_p voorkomen dat een deel van de passage niet wordt meegenomen.

⁶² Op grotere afstand van het spoor zal deze procedure leiden tot een grotere T_p dan op korte afstand tot het spoor. Maar omdat we vooral frequentie-afhankelijk kijken, vergelijken we op deze manier wel de trillingsenergie van de gehele passage steeds met elkaar. Verder is relevant dat, als meer naar de piek van het signaal wordt gekeken, in **4.1.6** ook een procedure is omschreven om het trillingsspectrum in de 5 seconden rond het maximum te beschouwen. Het is duidelijk dat beide procedures (over T_p of over de 5 seconden rond het maximum) tot andere uitkomsten van bijvoorbeeld de afstandsdeamping kunnen leiden. Afhankelijk van de situatie kan de T_p - of juist de 5 seconden-procedure het beste bruikbaar zijn. Licht dit in ieder geval toe in de rapportage.

Let op: bij het bepalen van verhoudingen tussen meerdere meetpunten dient de periode waarover $L_v(f)$ wordt bepaald gelijk te zijn voor alle gesynchroniseerde signalen.

Optioneel, alleen wanneer gebruik wordt gemaakt van fft-spectra of tertsbandspectra.

4.1.2 Verwerken van overige data

Verwerking van andere data dan zoals beschreven in paragraaf 4.1.1 dient te worden uitgevoerd volgens onderstaande eisen:

4.1.7 Voor het verwerken van metingen i.h.k.v. het RIVM-model OURS dient te worden uitgevoerd conform het RIVM-meetprotocol (2020) en de bijbehorende Matlab-bestanden. In dat protocol wordt toegelicht hoe emissie-, bodemimpedantie- en H_{gebouw} -metingen dienen te worden verwerkt. Voor het verwerken van de emissie- en bodemimpedantiemetingen zijn Matlab-scripts beschikbaar op <https://github.com/rivm-syso/OURS>.

4.1.8 MASW en SASW data dient te worden verwerkt conform Miller (1999), Song (1989), Park (1998) en Luo (2008)

4.1.3 Interpolatie van data

In bepaalde gevallen kan het nodig zijn om meetdata te interpoleren tussen meetpunten, om bijvoorbeeld op een andere locatie dan gevraagd het effect van een maatregel vast te kunnen stellen. Bedenk hierbij altijd dat dit ten koste gaat van de nauwkeurigheid van de resultaten. Eisen aan deze interpolatie zijn als volgt:

4.1.9 Interpolatie dient plaats te vinden met behulp van de Barkanvergelijking, die er in complete vorm als volgt uit ziet⁶³:

$$v(r, f) = v_0(r_0, f) \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^{n(f)} \cdot e^{-\frac{2\pi f \zeta(f)}{V_R(f)}(r-r_0)} + a(f) \cdot \sin(b(f) \cdot r + c(f)) \cdot r^{d(f)} \quad (7)$$

Hierin is $v(r, f)$ het tertsbandspectrum van een treinpassage als functie van de frequentie f op afstand r , v_0 het tertsbandspectrum op de referentie-afstand r_0 , r_0 de referentie-afstand (bijvoorbeeld 8, 16 of 24 meter), n de geometrische spreiding, ζ de dempingsratio van de bodem, V_R de Rayleigh golfsnelheid en a , b , c en d zijn coëfficiënten. Alle parameters zijn afhankelijk van de frequentie f . De tweede term in deze vergelijking wordt vaak genegeerd, is vooral van invloed op kortere afstand van het spoor en kan alleen voldoende nauwkeurig worden ingeschat als de afstand tussen meetpunten niet groter is dan 2 meter.

4.1.10 De coëfficiënten uit vergelijking (7) dienen per frequentie te worden bepaald met behulp van de kleinste kwadratenmethode.

4.1.11 Vergelijking (7) is alleen geldig binnen het bereik van de meetpunten. Extrapolatie buiten het meetgebied leidt tot een forse toename in de onzekerheid.

4.1.12 De parameters a , b , c en d kunnen verschillen per treintype, vergelijking (7) dient daarom per treintype te worden bepaald.

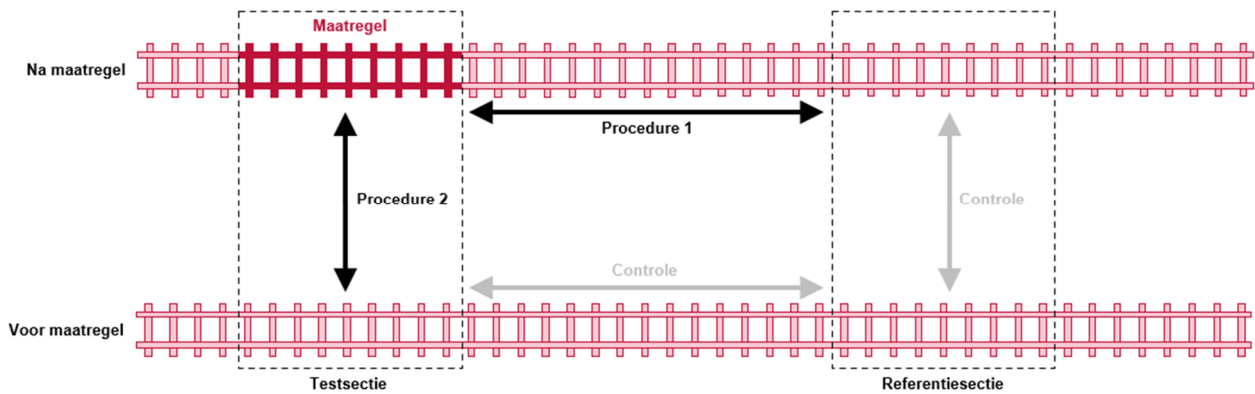
4.1.13 Vergelijking (7) moet frequentie-afhankelijk worden toegepast, anders zijn de resultaten te grof.

4.2 Vaststellen van effect maatregel

Voor het vaststellen van het effect van een maatregel in of naast het spoor, dient gebruik te worden gemaakt van de procedures uit RIVAS Deliverable D1.2 (2011). Hierbij zijn twee methodes mogelijk, procedure 1 en procedure 2, zie ook Figuur 5.

- Procedure 1: meten aan meetpunten op een zo goed mogelijk vergelijkbare plek zonder maatregel, en deze situatie vergelijken met de situatie met maatregel
- Procedure 2: meten aan meetpunten op exact dezelfde plek, met en zonder maatregel, en deze situaties met elkaar vergelijken.

⁶³ Barkan (1962) en empirische onderzoeken



Figuur 5 Procedures uit RIVAS Deliverable D1.2 (2011)

Deze procedures worden in de volgende paragrafen toegelicht. Door de procedures te combineren, kan het effect van een maatregel nauwkeuriger worden vastgesteld.

4.2.1 Effectbepaling volgens procedure 1

Procedure 1 is te gebruiken wanneer er geen verandering heeft plaatsgevonden in de referentiesectie tussen de voor- en nameting. Bij procedure 1 worden twee secties met elkaar vergeleken. De eisen voor het gebruik van procedure 1 zijn als volgt:

4.2.1	Procedure 1 mag alleen worden toegepast als de test- en referentiesectie vergelijkbaar zijn. Dat wil zeggen: vergelijkbaar qua spoorligging en -constructie, rijnsnelheid en bodemopbouw. Voor verschillen in bodemopbouw kan eventueel worden gecorrigeerd volgens de procedure in paragraaf 4.2.4.
4.2.2	Het effect van een maatregel moet <u>per treinpassage</u> worden bepaald met behulp van de volgende vergelijking: $\Delta L_v^{na}(f) = L_v^{testsectie,na}(f) - L_v^{referentiesectie,na}(f) \quad (8)$ In literatuur wordt ook vaak gebruik gemaakt van de term invoegverlies (insertion loss), deze is gelijk aan $-\Delta L_v^{na}(f)$.
4.2.3	Het effect en de onzekerheidsmarge van het effect van de maatregel dient te worden bepaald per treincategorie (d.w.z. per treintype, per spoor en per snelheids categorie met +/- 5% variatie). Middeling vindt plaats op basis van een lognormale verdeling.

4.2.2 Effectbepaling volgens procedure 2

Bij procedure 2 wordt het effect van de maatregel alleen in de testsectie bepaald, door per treintype te middelen over alle gemeten passages in de situatie voor en na aanbrengen van de maatregel. De eisen voor het gebruik van procedure 2 zijn als volgt:

4.2.4	Bij het gebruik van procedure 2 dienen de tertsbandspectra eerst te worden gemiddeld per treincategorie. Middeling vindt plaats op basis van een lognormale verdeling.
4.2.5	Het effect van een maatregel moet worden bepaald met behulp van de volgende vergelijking: $\Delta L_v(f) = L_v^{testsectie,na}(f) - L_v^{testsectie,voor}(f) \quad (9)$ In literatuur wordt ook vaak gebruik gemaakt van de term invoegverlies (insertion loss), deze is gelijk aan $-\Delta L_v(f)$.
4.2.6	Het effect en de onzekerheidsmarge van het effect van de maatregel dient te worden bepaald per treincategorie (d.w.z. per treintype, per spoor en per snelheids categorie met +/- 5% variatie). Middeling vindt plaats op basis van een lognormale verdeling.

4.2.3 Gecombineerde methode (procedure 1 en 2)

In de praktijk is vrijwel altijd sprake van veranderingen tussen voor- en nasituatie: de weersomstandigheden zijn anders, spoorgebruik kan verschillen en onderhoud aan treinen of het spoor kan anders zijn. In die gevallen is een gecombineerde methode nodig. Bij de gecombineerde methode gelden de volgende eisen:

4.2.7	Om het effect van een maatregel te bepalen dienen de volgende vergelijkingen per trein te worden gebruikt, om te corrigeren voor verschillen in bijvoorbeeld spoorligging of bodemdemping tussen de meting voor en na:
	$\Delta L_v^{na}(f) = L_v^{testsectie,na}(f) - L_v^{referentie,na}(f) \quad (10)$
	$\Delta L_v^{voor}(f) = L_v^{testsectie,voor}(f) - L_v^{referentie,voor}(f) \quad (11)$
	Vervolgens kan het effect van de maatregel worden bepaald met de volgende vergelijking:
	$\Delta L_v(f) = \Delta L_v^{na}(f) - \Delta L_v^{voor}(f) \quad (12)$
	In literatuur wordt ook vaak gebruik gemaakt van de term invoegverlies (insertion loss), deze is gelijk aan $-\Delta L_v(f)$.
4.2.8	Het effect en de onzekerheidsmarge van de maatregel dient te worden bepaald per treincategorie. Middeling vindt plaats op basis van een lognormale verdeling.

4.2.4 Vergelijken van maatreeleffecten tussen locaties

Het effect van een maatregel kan verschillen van locatie tot locatie. Om het effect tussen locaties onderling te vergelijken, is het gebruik van een kunstmatige trillingsbron nodig (bijv. een harmonische excitator of een valgewicht). Hiermee kunnen de resultaten worden gecorrigeerd op basis van verschillen in de lijnbronoverdracht tussen twee locaties, om een zogenaamd invoegverlies van een maatregel te bepalen op basis van verschillen in krachtsspectrum. Voor deze methode gelden de volgende eisen⁶⁴:

4.2.9	Bij het verwerken van data van een harmonische excitator gelden de volgende eisen:
4.2.9.a	Verzamel de gesynchroniseerde tijdsignalen van de opnemers conform 4.1.1
4.2.9.b	Convolueer de meetresultaten met een harmonisch signaal (finetunen op de frequentie o.b.v. minimalisatie van kleinste kwadraten fout) om de signal-to-noise-ratio te verbeteren
4.2.9.c	Verwerk de resultaten verder conform 4.1.3 t/m 4.1.5
4.2.10	Bij het verwerken van data van een valgewicht (kunstmatige trillingsbron) gelden de volgende eisen:
4.2.10.a	Verzamel de gesynchroniseerde tijdsignalen van de opnemers conform 4.1.1
4.2.10.b	Pas stacking toe o.b.v. minimalisatie van de kleinste kwadraten fout om de signal-to-noise ratio te verbeteren
4.2.11	Bepaal de puntbronoverdrachten T_p van het excitatiepunt naar het immissiepunt met de volgende vergelijking:
	$T_p(x_k, x_1, f) = 10 \log_{10} \frac{ v(x_1, f)/F(x_k, f) ^2}{H_0^2} \quad (13)$
	Hierin is H_0 een referentiewaarde, gelijk aan $10^{-9} \text{ m s}^{-1} \text{ N}^{-1}$, f is de frequentie, F is de impactkracht in N en v is de gemeten trillingssnelheid in m/s op een punt x_1 , terwijl de kracht wordt aangebracht op punt x_k .
4.2.12	Bepaal de lijnbronoverdracht T_L van de serie excitatiepunten naar een immissiepunt met de volgende vergelijking:
	$T_L(x_1, f) = 10 \log_{10} \frac{\int_0^L v(x_1, f)/F(x_k, f) ^2 dx_k}{H_0^2 L_0} \quad (14)$
	Hierin is L_0 de lengte tussen het eerste en laatste impactpunt in meters.
4.2.13	Bepaal het krachtsspectrum met de volgende vergelijking:

⁶⁴ FTA (2018) en RIVAS Deliverable D1.2 (2011)

	$F_{eq}(f) = L_v(x_1, f) - T_L(x_1, f)$ (15)
4.2.14	Bepaal het effect van de maatregel met vergelijking (10), (11) en (12), waarbij L_v wordt vervangen door F_{eq} uit vergelijking (15).

4.3 Omgaan met onzekerheden

Voor metingen aan en in gebouwen gaan de SBR A-richtlijn (2017), de SBR B-richtlijn (2006) en de Bts (2014) in op hoe om te gaan met onzekerheden. Voor onderzoeksprojecten gelden onderstaande eisen:

4.3.1	Te allen tijde dient te worden uitgegaan van een lognormale verdeling voor alle statische parameters in het mm/s-domein (en dus een normale verdeling in het dB-domein), tenzij gemotiveerd kan worden dat sprake is van een andere verdeling.														
4.3.2	Omdat sprake is van een lognormale verdeling van de trillingssnelheid of acceleratie, dienen onzekerheden ook op basis van lognormale verdelingen te worden gecombineerd. Rekenregels voor het combineren van lognormale verdelingen: - Vermenigvuldigen met een constante: als de variabele X lognormaal verdeeld is volgens $Lognormal(\mu, \sigma^2)$, dan geldt dat αX lognormaal is verdeeld volgens $Lognormal(\mu + \ln(\alpha), \sigma^2)$ voor $\alpha > 0$ - Reciproke (omgekeerde): als de variabele X lognormaal verdeeld is volgens $Lognormal(\mu, \sigma^2)$, dan geldt dat $1/X$ lognormaal is verdeeld volgens $Lognormal(-\mu, \sigma^2)$ - Macht: als de variabele X lognormaal verdeeld is volgens $Lognormal(\mu, \sigma^2)$, dan geldt dat X^α lognormaal is verdeeld volgens $Lognormal(\alpha\mu, \alpha^2\sigma^2)$ voor $\alpha \neq 0$ - Vermenigvuldigen van twee onafhankelijke variabelen: als de variabelen X_1 en X_2 lognormaal verdeeld zijn, dan is het product van de twee verdelingen opnieuw lognormaal verdeeld $Lognormal(\mu_1 + \mu_2, \sigma_1^2 + \sigma_2^2)$ - Delen van twee onafhankelijke variabelen: als de variabelen X_1 en X_2 lognormaal verdeeld zijn, dan is de ratio van de twee verdelingen opnieuw lognormaal verdeeld $Lognormal(\mu_1 - \mu_2, \sigma_1^2 + \sigma_2^2)$ - Optellen of aftrekken van twee onafhankelijke variabelen: als de variabelen X_1 en X_2 lognormaal verdeeld zijn, dan is het verschil of de som van beide variabelen niet meer lognormaal verdeeld. Er zijn analytische formules om de onzekerheid te bepalen, een alternatief is om dit te doen o.b.v. MonteCarlo-analyse voor een voldoende grote N (aantal runs)														
4.3.3	Om de totale variatiecoëfficiënt CV te bepalen, dient gebruik te worden gemaakt van de volgende algemene vergelijking: $u(y) = \sqrt{\sum_{k=1}^n \left(\frac{df}{dx_k} \right)^2 u(x_k)^2} \quad (16)$ Hierin is $u(y)$ de standaardafwijking in resultaat y, $u(x_k)$ de standaardafwijking in bijdrage x_k, f de functie waarmee het eindresultaat wordt bepaald op basis van gemeten invoerwaarden x_k en n het totaal aantal invoerwaarden. Deze kan als volgt worden herschreven voor de standaardafwijking σ: $\sigma_{totaal} = \sqrt{\sum_{k=1}^n \sigma_k^2}$ Of, met behulp van vergelijking (1) voor de waarde van CV: $CV_{totaal} = \sqrt{\sum_{k=1}^n \ln(1 + CV_k^2)}$ Ter illustratie is hieronder een fictief rekenvoorbeeld opgenomen. <table> <tr> <th>Onderdeel</th><th>Variatiecoëfficiënt CV</th></tr> <tr> <td>Meetketen</td><td>0.10</td></tr> <tr> <td>Aantal meetpunten</td><td>0.50</td></tr> <tr> <td>Aantal treinpassages</td><td>0.20</td></tr> <tr> <td>Plaatsing meetpunten</td><td>0.30</td></tr> <tr> <td>Tijd</td><td>0.50</td></tr> <tr> <td>Totale onzekerheid</td><td>0.76</td></tr> </table>	Onderdeel	Variatiecoëfficiënt CV	Meetketen	0.10	Aantal meetpunten	0.50	Aantal treinpassages	0.20	Plaatsing meetpunten	0.30	Tijd	0.50	Totale onzekerheid	0.76
Onderdeel	Variatiecoëfficiënt CV														
Meetketen	0.10														
Aantal meetpunten	0.50														
Aantal treinpassages	0.20														
Plaatsing meetpunten	0.30														
Tijd	0.50														
Totale onzekerheid	0.76														

4.3.3.a	Vergelijking (17) kan voorafgaand aan een meting worden gebruikt om het aantal meetpunten te bepalen (zie hiervoor paragraaf 2.3.2 voor een uitgewerkt voorbeeld).
4.3.3.b	Vergelijking (17) kan na afloop van een meting worden gebruikt om uitspraken te doen over de onzekerheden in bijvoorbeeld het effect van een maatregel. Hierbij geldt dat voor niet onderzochte onzekerheden gebruik dient te worden gemaakt van de default waarden uit Tabel 2 en Tabel 4.
4.3.3.c	Als een gemiddeld trillingsspectrum wordt gerapporteerd, dan dient de onzekerheid te worden gerapporteerd in de vorm van een betrouwbaarheidsinterval in dB.
4.3.3.d	Als het effect van een maatregel wordt gerapporteerd, dan dient de onzekerheid te worden gerapporteerd in de vorm van een standaardafwijking in dB.

5 Rapportage

5.1 Eisen aan rapportage

Deze paragraaf bevat eisen aan de rapportage en presentatie van de resultaten. Voor de eisen aan de data is gekeken naar zo min mogelijk voorschrijven, maar tegelijkertijd voldoen aan de zogenaamde FAIR-principes (Wilkinson, 2016). Hierbij is als uitgangspunt gehanteerd dat data die achteraf kan worden vastgelegd, ook achteraf moet worden vastgelegd, omdat op die manier een meer gestandaardiseerde manier van vastleggen mogelijk is, met zo min mogelijk kans op interpretatieverschillen.

Voor de eindrapportage gelden de volgende eisen:

5.1.1 De rapportage dient een vaste opzet te hebben, met minimaal de volgende onderdelen⁶⁵:

1. Samenvatting, met daarin in ieder geval de aanleiding, onderzoeksvraag en conclusies van het onderzoek
2. Inleiding, met de volgende paragrafen:
 - a. Aanleiding van het onderzoek: waarom wordt het onderzoek uitgevoerd?
 - b. Doel van het onderzoek: wat is de onderzoeksvraag of hypothese?
 - c. Leeswijzer: welke informatie is waar te vinden in het rapport?
3. Situatie en uitgangspunten. Dit hoofdstuk dient minimaal een beschrijving van de meetlocatie te bevatten (waar is het onderzoek uitgevoerd, en waarom daar, ondersteund met plattegronden en kaartmateriaal van de onderzoekslocatie(s)), maar ook gegevens van bijvoorbeeld aantallen treinen, treintypes, snelheden en de bodem. Verder krijgen in dit hoofdstuk ook de uitgangspunten van het onderzoek, en eventueel informatie vanuit eerdere onderzoeken een plaats.
4. Werkwijze. Dit hoofdstuk bevat de opzet van het meetonderzoek met locaties en aantal meetpunten, gebruikte apparatuur, inclusief randapparatuur en gehanteerde meetduur. Verder wordt hier beschreven met welke methode de resultaten zijn bepaald (bijvoorbeeld het effect van een maatregel, of de bronsterkte van treinen).
5. Resultaten van het onderzoek. Dit hoofdstuk bevat de resultaten, ondersteund met tabellen en grafieken conform 5.2.1 t/m 5.2.5. Hier dient duidelijk antwoord te worden gegeven op de onderzoeksvraag.
6. Conclusies en aanbevelingen, met de volgende paragrafen:
 - a. Conclusies
 - b. Aanbevelingen

Bijlagen met detailinformatie, zoals foto's van de meetopstelling en detailresultaten die hoofdstuk 4 ondersteunen

5.1.2 Bij elke meting dient een meetjournaal te worden opgeleverd, wat tenminste de onderdelen uit onderstaande tabel bevat. Elk meetpunt dient in een afzonderlijk Excelbestand te worden aangeleverd, hoewel de eerste twee onderdelen (Algemeen en Project) generiek zijn voor het hele project. Het format voor dit meetjournaal is bij ProRail beschikbaar.⁶⁶

Onderdeel	Opnemen	Doel/toelichting
Algemeen	Bedrijfsnaam	Naam uitvoerend bedrijf, voor eventuele latere vragen
	Naam contactpersoon	Contactpersoon uitvoerend bedrijf
	E-mail contactpersoon	Contactgegevens uitvoerend bedrijf
	Telefoon contactpersoon	Contactgegevens uitvoerend bedrijf
Project	Projectnaam	Naam project, t.b.v. navragen extra informatie
	Projectnummer	Nummer project, t.b.v. navragen extra informatie

⁶⁵ Dit zijn minimumvereisten, hoofdstukindeling mag niet worden gewijzigd, paragraafindeling in hoofdstuk 2, 3 en 4 staat vrij.

⁶⁶ Achteraf opvraagbare data is niet opgenomen in dit overzicht, in lijn met het uitgangspunt voor rapportage. Denk hierbij aan gegevens over spooronderhoud, bodemopbouw en QuoVadis-gegevens. In bepaalde gevallen kan het wel nodig zijn om de onderhoudsstatus van het spoor nauwkeuriger te bepalen (bijv. vlak voor en vlak na een ingreep), dan dient dit vanzelfsprekend wel te worden gerapporteerd.

	Bedrijfsnaam opdrachtgever	Naam bedrijf opdrachtgever, t.b.v. toestemming gebruik data
	Naam contactpersoon opdrachtgever	Contactpersoon opdrachtgever, t.b.v. toestemming gebruik data
Meetlocatie	Nummer meetpunt	Volgnummer, startend bij 1
	Tijdstip metingen	T _{start} tot T _{end} , voor achterhalen aantallen treinen, sporen, bovenbouw, spoor kwaliteit, rijnsnelheid, treintypes
	Coördinaten meetpunt	RD-coördinaten van het meetpunt
	Locatie meetpunt	Aspot, midden dwarsligger, uiteinde dwarsligger, spoorstaaf, ballast, schouwpad, maaiveld, verharding asfalt, verharding klinkers, verharding tegels, fundering, vloer
	Type bevestiging	Zwaartekracht, ingegraven met pin, ingegraven zonder pin, lijm/epoxy, bijenwas, schroef, pin, magnetisch
	Eventuele bijzonderheden	Tekstueel, bijv. stoorbronnen, afwijkende sensorplaatsing, etc.
Trein	Treintype	Type waaraan meting is uitgevoerd, conform QuoVadis-benamingen. Bij goederenwagons wagentyperingen (zoals bijv. SNGS) vastleggen.
	Asnummer	Volgnummer in trein van as waar sensor aan is bevestigd
Spoor	Type dwarsligger	NS90, 14-002, duoblok, hout of overig
Gebouw	Type fundering	Op staal, palen
	Type draagconstructie	Kalkzandsteen, beton, houtskelet, stalen spanten
	Gemeten verdieping	Nummer, begane grond is 0
	Bouwkundige status	Conform SBR A 2017, dus gevoelig, niet-gevoelig
	Monumentale status	Conform SBR A 2017, dus monumentale status, geen monumentale status
	Oriëntatie stijve richting gebouw	Hoek tussen Y-richting meting en richting van dragende wanden/wandschijven
Vloer	Type vloer	Hout, ribcassette, kanaalplaat, breedplaat, polyplaat
	Afwerking vloer	Tapijt, laminaat, parket, tegels, zeil
Kunstmatige trillingsbron	Type bron	MASW, SASW, excitator, valgewicht

Daarnaast dient per meetpunt de volgende informatie te worden aangeleverd, indien metingen aan treinpassages worden verricht:

Onderdeel	Format	Doel/toelichting
Datum	YYYYMMDD hh:mm:ss	Datum en tijd van de passage van de trein
Treintype	Tekst	Bepalen o.b.v. QuoVadis-data, volgens tabel in Woordenlijst
Identificatienummer	Getal	Treinnummer, o.b.v. QuoVadis- of PAB-data. Unieke waarde per dag.
Spoor	Tekst of getal	O.b.v. BBMS-data
Snelheid	Getal	Snelheid in km/h van de trein
Duur	Getal, seconden	Duur van de treinpassage, tijd van T_p
Tijdsignaal	Tekst	Bestandsnaam van bestand met tijdsignaal, zie 5.3.3.
Overige info	Tekst	Bestandsnaam van bijv. foto of video-bestand
V _{effmax}	Getal, dimensieloos	Trillingssterkte conform SBR B, alleen bij SBR B-meting
V _{rms,5sec}	Getal, dimensieloos	Trillingssterkte conform memo LA.131001a.M04 van 13 april 2018 (zie Bijlage 5) alleen bij SBR B- of Bts-meting

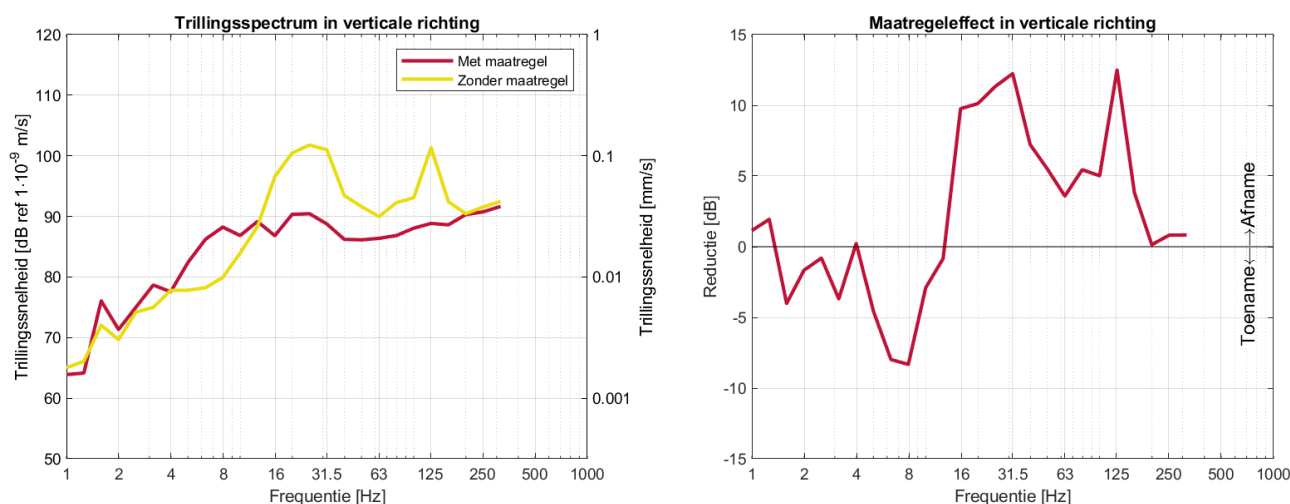
V_{top}	Getal, mm/s	Trillingssnelheid conform SBR A, alleen bij SBR A-meting
f_{dom}	Getal, Hz	Dominante frequentie conform SBR A, alleen bij SBR A-meting

5.2 Eisen aan grafieken en tabellen

Voor de presentatie van tabellen en grafieken gelden de volgende eisen⁶⁷:

5.2.1	Trillingsspectra worden altijd gepresenteerd in zowel dB (ref $1 \cdot 10^{-9}$ m/s) als in mm/s conform Figuur 6.
5.2.2	De horizontale x-as van grafieken dient logaritmisch verdeeld te zijn en het volledige meetbereik af te dekken conform Figuur 6.
5.2.3	De resultaten van meetpunten en treincategorieën worden in ieder geval ook als losse grafieken opgenomen (d.w.z. de resultaten van 1 treintype per spoor per snelheids categorie voor maximaal 1 meetpunt per grafiek).
5.2.4	Effecten van maatregelen worden als volgt gepresenteerd:
5.2.4.a	Als invoegverlies in dB, indien bepaald op basis van de equivalente bronkracht conform 4.2.14 . Soms is een omrekening naar procenten zinvol. Omrekening naar effect in procenten conform vergelijking (18).
	$effect(\%) = 100\% \cdot \left(1 - 10^{\frac{effect(dB)}{20}}\right) \quad (18)$
5.2.4.b	Als effect in dB, indien bepaald op trillingssnelheid conform 4.2.7 . Omrekening naar effect in procenten conform vergelijking (18). Let op: het effect in dB is negatief conform 4.2.7 als de trillingen afnemen door een maatregel.
5.2.4.c	Indien meerdere treintypes of meerdere snelheids categorieën zijn gemeten, dan dienen deze afzonderlijk te worden geanalyseerd, gerapporteerd en geduid, omdat het effect van een maatregel kan verschillen per treintype en rijsnelheid.
5.2.5	Een positief effect of invoegverlies duidt op een afname van de trillingen door de maatregel, een negatief effect of invoegverlies op een toename van de trillingen door de maatregel conform Figuur 6.
5.2.6	In de rapportage dient de onzekerheid waarmee uitspraken worden gedaan, helder te worden beschreven. Deze onzekerheid dient in dB te worden gerapporteerd. Onzekerheden dienen in ieder geval te worden gerapporteerd van de volgende onderdelen: - Kwalitatief: onzekerheden in de metingen, gerelateerd aan meetomstandigheden: was het weer representatief? - Kwalitatief: onzekerheden in het treinbeeld: was het aantal treinen, het type treinen en de snelheid van de treinen representatief? - Kwalitatief: onzekerheden in de spoorligging: was de spoorligging representatief? - Kwantitatief: onzekerheden in het effect van de maatregel per frequentie in tabel- of grafiekvorm.

⁶⁷ RIVAS Deliverable D1.11 (2013)



Figuur 6 Weergave van trillingsspectra (links) en het effect van een maatregel (rechts, hier getoond zonder onzekerheid)

5.3 Eisen aan data-opslag en format

Voor de eisen aan datalevering geldt ProRail de wens heeft om op termijn te komen tot een vaste, database-achtige structuur. Daarom wordt voorlopig gewerkt met een zogenaamd no-regret format, een open format wat eenvoudig is om te zetten naar een database-achtige structuur. De eisen aan deze aan te leveren data zijn als volgt:

5.3.1	De mapstructuur dient te zijn zoals in de figuur hiernaast: onder de projectnaam is per meetpunt een afzonderlijke map aangemaakt. Elke map bevat de volgende informatie: - Meetjournaal van het betreffende meetpunt (Excel-bestand), conform 5.1.2 - Losse .mat-files, conform 5.3.2 en 5.3.3	
5.3.2	Data dient te worden aangeleverd in open format -.mat-bestand (-v7.3) per event, dit type bestand is ook in Python (met scipy) te openen en op te slaan. ProRail werkt momenteel aan een database om meetdata op te slaan, waarbij deze kan worden ingevoerd via een interface. Zodra dit operationeel is, kan het zijn dat deze eis 5.3.2. wijzigt.	
5.3.3	Per event (bijvoorbeeld een treinpassage of slag met een valgewicht) dient een bestand te worden opgeleverd, wat voldoet aan de volgende eisen:	
5.3.3.a	Bestandsnaam met format yyyyymmdd_HHMMSS.mat, dus een event wat begint op 23 februari 2022 13:15:23 heeft de volgende bestandsnaam: 20220223_131523.mat	
5.3.3.b	Elk bestand bevat de volgende informatie: - TRACE – gekalibreerd, hoogfrequent snelheidssignaal in mm/s. Bij metingen aan treinen versnellingsignaal in mm/s². Afmetingen: double, lengte x 3. Hierbij is de volgorde: X-as, Y-as en Z-as. Bij gebruik van een sensor met minder kanalen, betekent dit dat de niet gemeten kanalen leeg zijn. Bevat minimaal de lengte van T_p (zie 4.1.3.). - TIME – tijdsvector in ms. Afmetingen: double, lengte x 1. De lengte van de vector TIME moet hetzelfde zijn als de lengte van de matrix TRACE - T0 – tijdstempel van eerste sample. Afmetingen: string (format conform ISO8601 yyyy-mm-dd HHMMSSFFFF, 1 x 1 - FS – meetfrequentie in Hz. Afmetingen: integer, 1 x 1 - TRATYPE – treintype, volgens de treintype-indeling uit de begrippenlijst (vereenvoudiging van QuoVadis-data), voor goederentreinen wagontypes toevoegen. Afmetingen: string, 1 x 1. <i>Alleen als treinen zijn gemeten</i> - TRACK – bereden spoor, conform spooridentificatie uit BBMS-data. Afmetingen: string, 1 x 1. <i>Alleen als treinen zijn gemeten</i> - SPEED – snelheid van de trein in km/h. Afmetingen: double, 1 x 1. <i>Alleen als treinen zijn gemeten</i> - LOC – locatie van meetpunt. Afmetingen: double, lengte x 3 (X, Y en Z-coördinaten). <i>Alleen als aspotversnelling is gemeten, mag ook o.b.v. postprocessing zijn, vaak wordt positie met minder hoge frequentie vastgelegd, dan dient deze</i>	

vector achteraf o.b.v. interpolatie te worden vastgesteld. Anders is de lengte van deze matrix identiek aan de lengte van de vector *TIME* en de matrix *TRACE*

6 Bijlagen

Dit document bevat de volgende bijlagen:

1. Bijlage 1: meetjournaal
2. Bijlage 2: metingen i.h.k.v. OURS-model van RIVM
3. Bijlage 3: detailoverzichten per metingtype
4. Bijlage 4: achtergrondinformatie aantallen treinen
5. Bijlage 5: bepalingmethode $V_{\max, \text{Bts}}$
6. Bijlage 6: meten met een kunstmatige trillingsbron

7 Literatuuropgave

SBR A (2017)	SBRCURnet, 2017, <i>SBR Trillingsrichtlijn A: Schade aan bouwwerken: 2017</i>
SBR B (2006)	Stichting Bouwresearch, 2006, <i>SBR richtlijn deel B, hinder voor personen in gebouwen</i>
ISO14837-1 (2005)	NEN/ISO, 2005, <i>Mechanical vibration - Ground-borne noise and vibration arising from rail systems - Part 1: General guidance</i>
ISO14837-31 (2017)	NEN/ISO, 2017, <i>Mechanical vibration - Ground-borne noise and vibration arising from rail systems - Part 31: Guideline on field measurements for the evaluation of human exposure in buildings</i>
ISO14837-32 (2015)	NEN/ISO, 2015, <i>Mechanical vibration - Groundborne noise and vibration arising from rail systems - Part 32: Measurement of dynamic properties of the ground</i>
RIVAS D1.2 (2011)	Asmussen, B. et al, 2011, <i>Protocol for free field measurements of mitigation effects in the project RIVAS for WP2,3,4,5</i> , RIVAS Deliverable D1.2
RIVAS D1.11 (2013)	Verbraken, H. et al, 2013, <i>Benchmark tests for soil properties, including recommendations for standards and guidelines</i> , RIVAS Deliverable D1.11
Miller (1999)	Miller, R. D., J. Xia, C. B. Park, and J. M. Ivanov, 1999, Multichannel analysis of surface waves to map bedrock: The Leading Edge, 18, 1392-1396
Luo (2008)	Luo, Y. H., J. H. Xia, R. D. Miller, Y. X. Xu, J. P. Liu, and Q. S. Liu, 2008, <i>Rayleigh-wave dispersive energy imaging using a high-resolution linear Radon transform</i> : Pure and Applied Geophysics, 165, 903-922
Song (1989)	Song, Y. Y., J. P. Castagna, R. A. Black, and R. W. Knapp, 1989, <i>Sensitivity of near surface shear wave velocity determination from rayleigh and love waves</i> : 59th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 8, 509-512
Park (1998)	Park, C. B., R. D. Miller, and J. Xia, 1998, <i>Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record</i> 68th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1377-1380.
Barkan (1962)	Barkan, D.D., 1962, <i>Dynamics of bases and foundations</i> , McGraw Hill Co., New York
RIVM (2022)	Kok, A.Y. et al, 2022, <i>Single calculation model for railway vibrations, Background document with detailed description of the workings of the calculation model</i>
FTA (2018)	Federal Transit Administration, 2018, <i>Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual</i> , FTA Report No. 0123
JCGM (2008)	JCGM 100:2008, 2008, <i>GUM 1995 with minor corrections, Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement</i>
Wilkinson (2016)	Mark D. Wilkinson; Michel Dumontier; IJsbrand Jan Aalbersberg; et al., 15 March 2016, <i>The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship</i> . Scientific Data. 3 (1): 160018
Garburg (2019)	Rudiger Garburg et al., 2019, <i>Investigation of vibration mitigation by concrete trough with integrated under balls mats for surface-railways</i> , IWRN13,
ProRail (2018)	Meetjournaal.xlsx en meetprotocol
We-Boost (2020)	P.M. Boon, 2020, <i>Proef Brabantroute, Monitoringsplan USP's Oisterwijk</i> , WBD1916, versie 1.4
FINE2 (2022)	Haike Brick, 2022, <i>Draft of FINE2 report</i> (via ProRail)
RIVM (2020)	Arnaud Kok et al., 2020, <i>Gebruik rekenmodel spoortrillingen</i>
Hölscher (2003)	Hölscher, dr. ir. P. et al, 2003, <i>HerMes: The rational monitoring evaluation system</i> , Final report (2003)

Bijlage 1 Meetjournaal

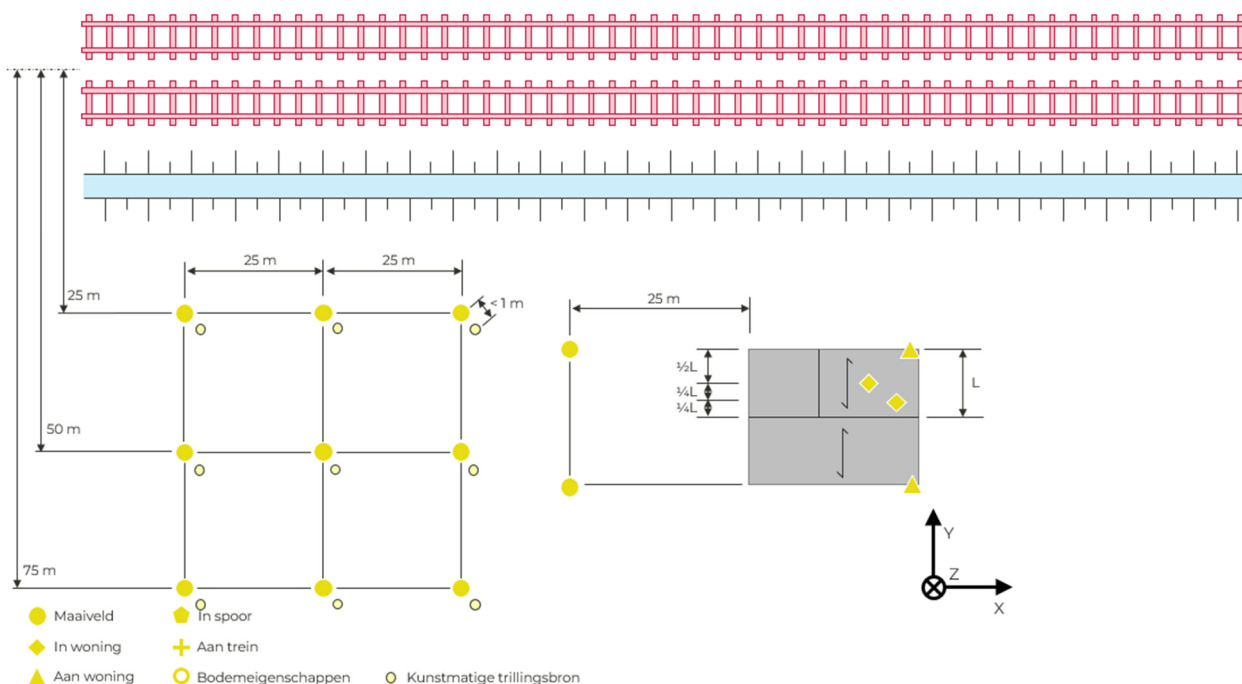
Bij dit meetprotocol hoort een meetjournaal, een Excel-bestand waarin de gegevens van de metingen dienen te worden vastgelegd conform **5.1.2**. Hieronder is een weergave opgenomen van het Meetjournaal (versie 2.0).

[illegible]

Bijlage 2 Metingen i.h.k.v. OURS-model van RIVM

Voor het RIVM-rekenmodel OURS wordt een afwijkende positie van meetpunten gehanteerd, zie RIVM (2020). Deze meetposities zijn samengevat weergegeven in Figuur 7. Belangrijke afwijkingen ten opzichte van de eisen die in dit meetprotocol worden gehanteerd, zijn:

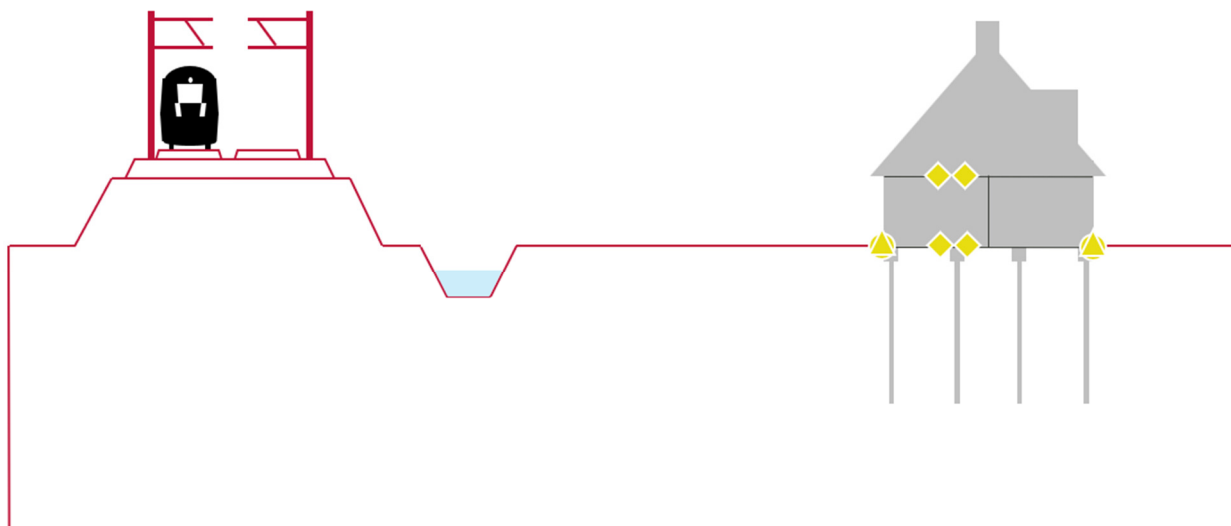
1. Afstanden tot het spoor zijn gerelateerd aan het midden tussen de twee meest nabijgelegen sporen
2. Meetpunten zijn gepositioneerd op andere afstanden (geen veelvouden van 8 meter), maar op 25 meter tussenafstand, in een 3x3-grid



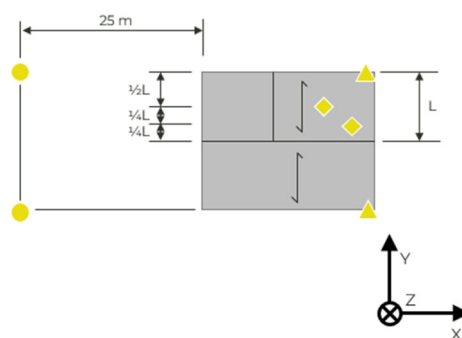
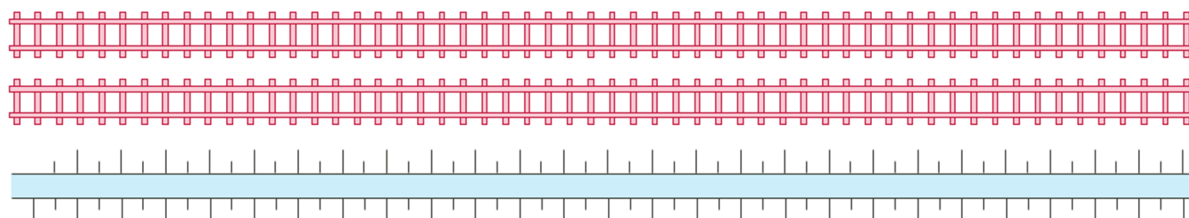
Figuur 7 Positionering van meetpunten conform RIVM (2020) t.b.v. metingen i.h.k.v. OURS

Bij **gebouwmetingen** in het kader van het aanvullen van de H_{gebouw} -database van het rekenmodel OURS, zijn andere meetpunten benodigd, zie Figuur 8 en Figuur 9. Het gaat om de volgende meetpunten:

1. Twee meetpunten aan de fundering van het gebouw (conform 2.3.6), dus aan een hoek van twee dragende muren. Een meetpunt aan de voorzijde (spoorzijde), een meetpunt aan de achterzijde van het gebouw. Maximaal 25 cm boven maaiveld. Alternatief is aan de binnenzijde van de woning, op dezelfde locatie.
2. Twee meetpunten op maaiveld, op 25 meter afstand van de woning, ter hoogte van de funderingspunten, vanuit het spoor gezien naast de woningen (conform 2.3.5).
3. Twee meetpunten op de begane grondvloer, midden en op een kwart van de overspanning (conform 2.3.7).
4. Twee meetpunten op de hoogst bewoonde verdiepingvloer, midden en op een kwart van de overspanning (conform 2.3.7).



Figuur 8 Meetpunten rond, aan en in een woning voor een H_{gebouw} -meting ten behoeve van het rekenmodel OURS, zij aanzicht



- | | |
|--------------|-----------------------------|
| ● Maaiveld | ◆ In spoor |
| ◆ In woning | + Aan trein |
| ▲ Aan woning | ○ Bodemeigenschappen |
| | ○ Kunstmatige trillingsbron |

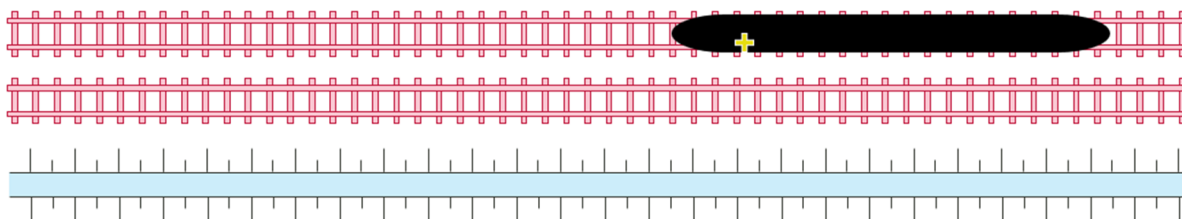
Figuur 9 Meetpunten rond, aan en in een woning voor een H_{gebouw} -meting ten behoeve van het rekenmodel OURS, bovenaanzicht

Bijlage 3 Detailoverzichten per metingtype

Deze bijlage bevat detailoverzichten per type meting, te gebruiken bij het inrichten van meetlocaties.

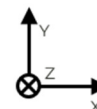
Metingen aan treinen

Een overzicht met de meetlocaties is weergegeven in Figuur 10, zie voor de eisen paragraaf 2.3 en 3.1.



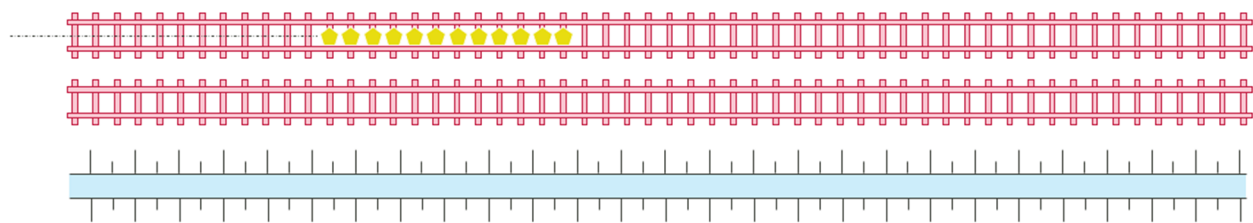
- | | |
|--------------|-----------------------------|
| ● Maaiveld | ◆ In spoor |
| ◆ In woning | + Aan trein |
| ▲ Aan woning | ○ Bodemeigenschappen |
| | ○ Kunstmatige trillingsbron |

Figuur 10 Meetposities aan treinen



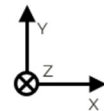
Metingen aan of in het spoor

Een overzicht met de meetlocaties is weergegeven in Figuur 11, zie voor de eisen paragraaf 2.3 en 3.1.



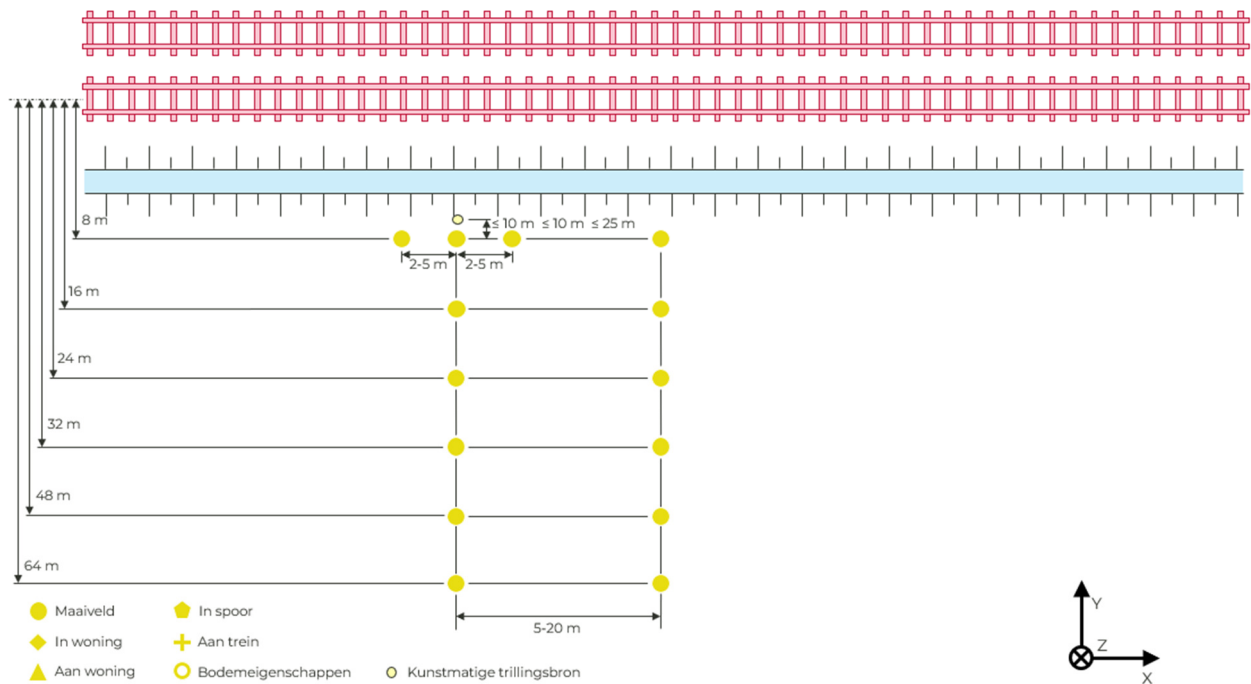
- Maaiveld
- ◆ In woning
- ▲ Aan woning
- In spoor
- + Aan trein
- Bodemeigenschappen
- Kunstmatige trillingsbron

Figuur 11 Meetposities aan of in het spoor



Metingen op maaiveld

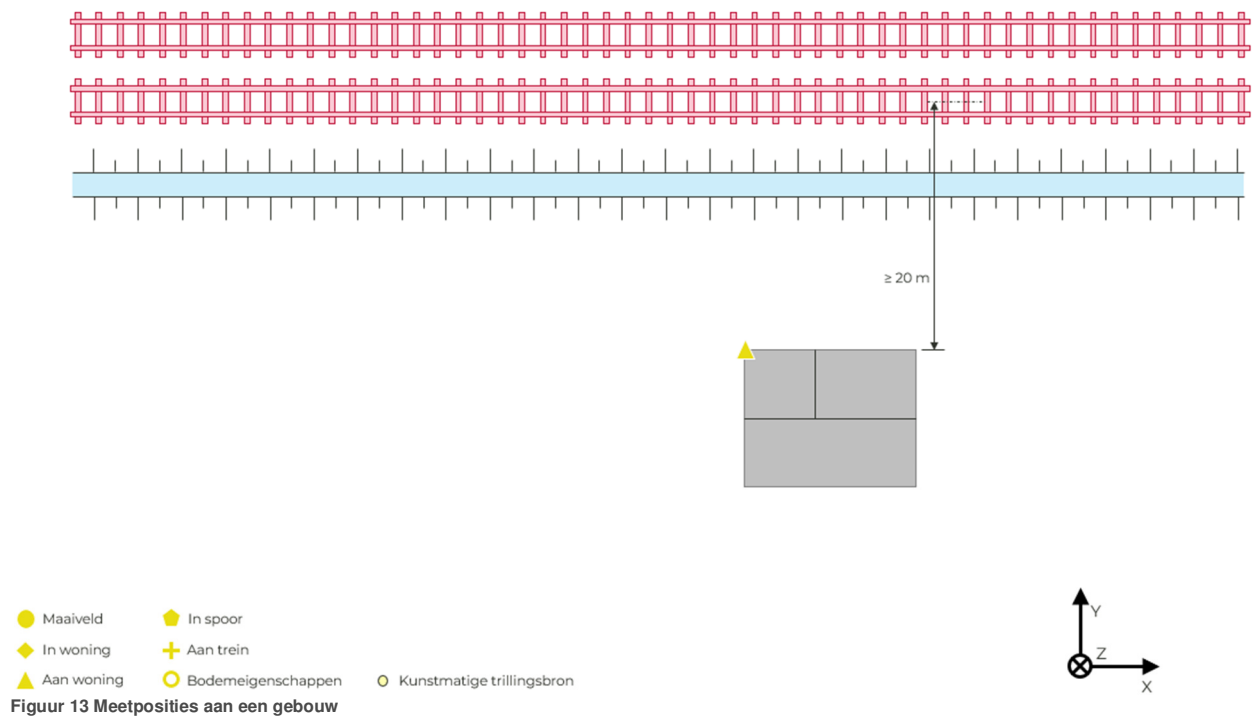
Een overzicht met de meetlocaties is weergegeven in Figuur 12, zie voor de eisen paragraaf 2.3 en 3.1.



Figuur 12 Meetposities op maaiveld

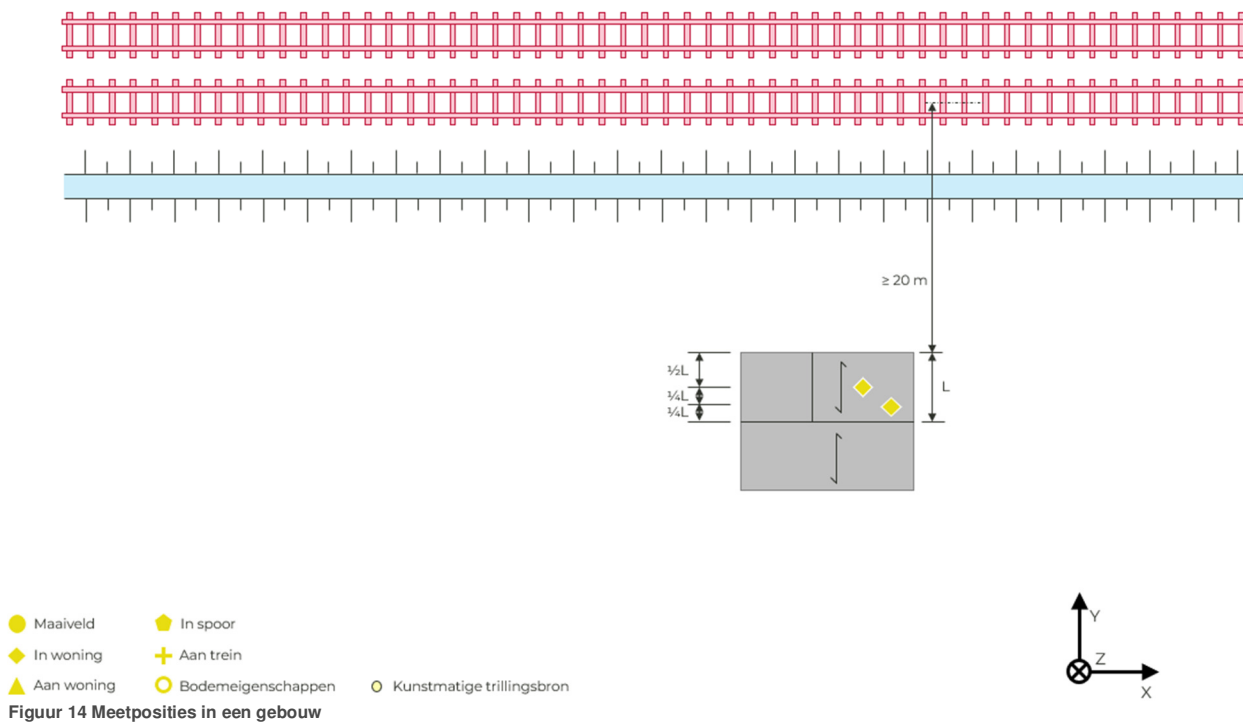
Metingen aan een gebouw

Een overzicht met de meetlocaties is weergegeven in Figuur 13, zie voor de eisen paragraaf 2.3 en 3.1.



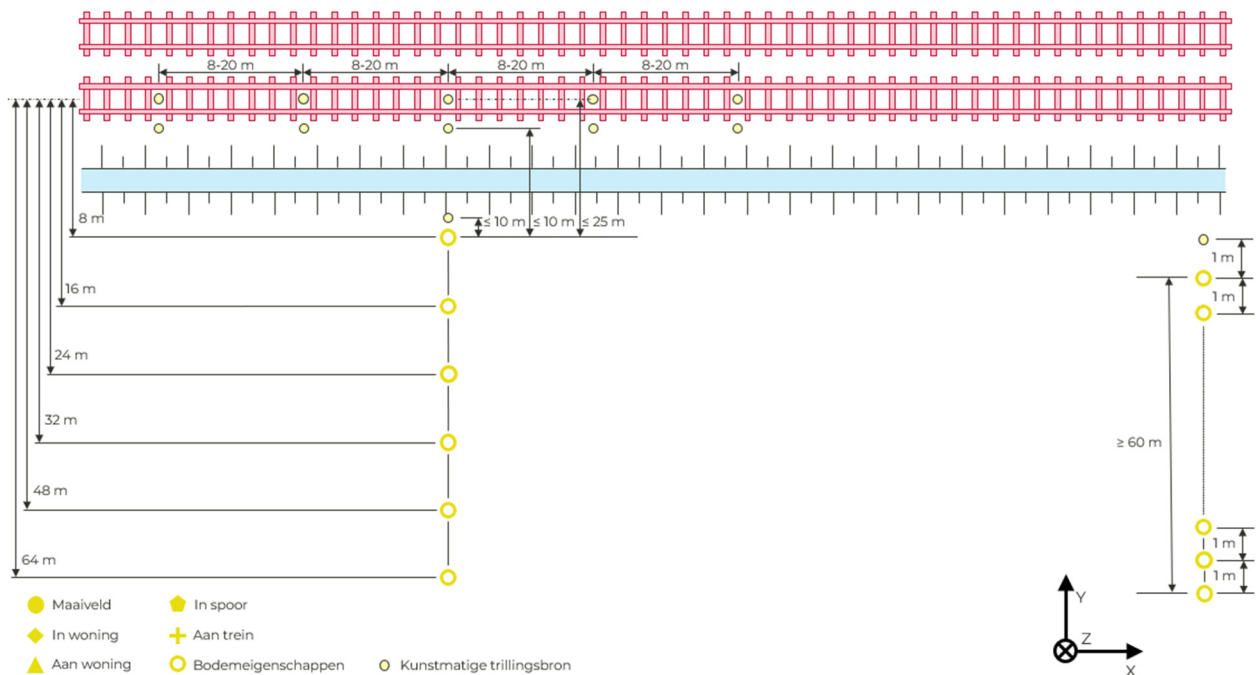
Metingen in een gebouw

Een overzicht met de meetlocaties is weergegeven in Figuur 14, zie voor de eisen paragraaf 2.3 en 3.1.



Metingen met kunstmatige trillingsbron

Een overzicht met de meetlocaties is weergegeven in Figuur 15, zie voor de eisen paragraaf 2.3 en 3.1.



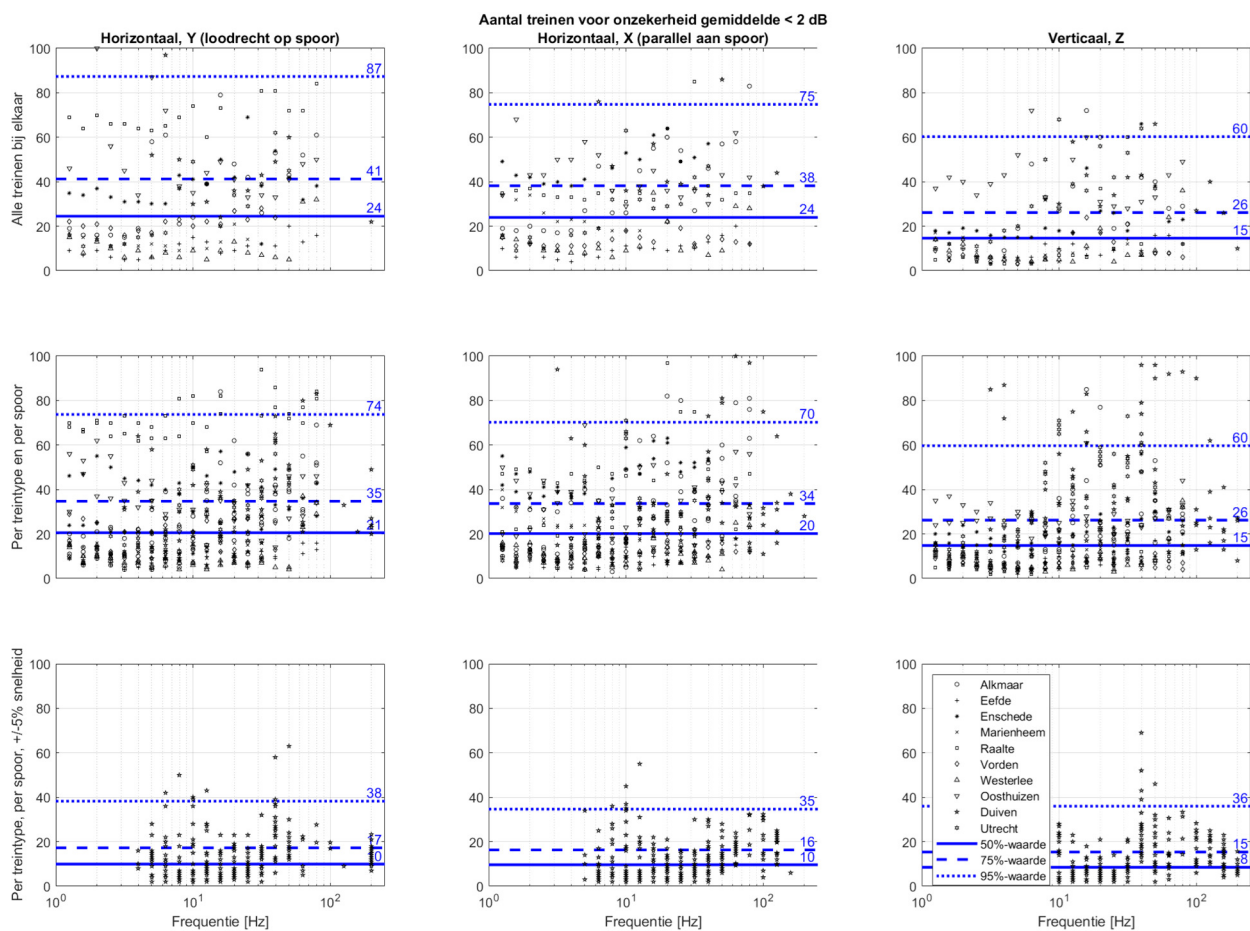
Figuur 15 Meet- en excitatieposities bij metingen met kunstmatige trillingsbron

Voor metingen met een kunstmatige trillingsbron maken we onderscheid tussen verschillende types metingen:

1. Metingen om een punt- of lijnbronoverdracht te bepalen. De meetopstelling hiervoor is links in Figuur 15 weergegeven. De meetopstelling bestaat uit meerdere excitatiepunten in het spoor of op het schouwpad, en meerdere meetpunten op maaiveld in een raai loodrecht op het spoor. Meting kan ook worden uitgevoerd voor andere sporen, houdt in dat geval ook het stramien van 8-16-24-... meter aan.
2. Metingen om de bodemeigenschappen vast te stellen, doorgaans met de MASW of SASW-techniek. De meetopstelling hiervoor is rechts weergegeven in Figuur 15, en bestaat uit een excitatielocatie en meerdere meetopnemers die maximaal 1 meter uit elkaar staan.

Bijlage 4 Achtergrondinformatie aantallen treinen

Het aantal benodigde treinen voor een meting is afhankelijk van het gewenste betrouwbaarheidsinterval en de bijbehorende onzekerheid van het onderzoek. Ter illustratie is een aantal metingen op diverse locaties in Nederland geanalyseerd. Hierbij is steeds gekeken naar hoeveel treinen nodig zijn (o.b.v. MonteCarlo-simulatie) om het betrouwbaarheidsinterval van het gemiddeld trillingsspectrum lager te laten zijn dan een bepaalde waarde (conform vergelijking (3), waarbij in dit geval n het aantal treinen is). Voor het betrouwbaarheidsinterval van ± 2 dB (20%) uit de ISO14837-31 (2017) ziet dat eruit als in Figuur 16. Hierbij is per tertsbandfrequentie het aantal treinen uitgezet binnen een bepaalde categorie op een bepaalde locatie wat nodig is om het 90 procent betrouwbaarheidsinterval niet groter te laten zijn dan ± 2 dB. Dit is weergegeven voor het betrouwbaarheidsinterval om het gemiddeld trillingsspectrum te bepalen (dan is het aantal benodigde treinen het laagst), voor de 75%-waarde en de 95%-waarde van het trillingsspectrum. Bij de 95%-waarde is een groter aantal treinen nodig, wat logisch is omdat deze waarde sterker samenhangt met uitschieters.



Figuur 16 Benodigd aantal treinen per frequentie om ± 2 dB onzekerheid in het gemiddelde te krijgen. Boven bij alle treinen bij elkaar, midden voor alle treinen per klasse (conform Bts en ISO14837), en onder per klasse met een maximale snelheidsvariatie van $\pm 5\%$. Het aantal benodigde treinen voor ± 2 dB onzekerheid is in blauw weergegeven (om gemiddeld trillingsspectrum, 75%-waarde van trillingsspectrum en 95%-waarde van trillingsspectrum met 90 procent betrouwbaarheidsinterval vast te stellen). Op de verticale as het aantal treinen wat nodig is om de onzekerheid kleiner dan of gelijk aan ± 2 dB te laten zijn.

In deze figuur valt een aantal zaken op:

- Naarmate een klasse nauwkeuriger is gespecificeerd (zoals in RIVAS Deliverable D1.2 (2011)) zijn minder treinpassages nodig om de vereiste nauwkeurigheid te halen
- In verticale richting is vaak een lager aantal treinpassages nodig om de vereiste nauwkeurigheid te halen.

- Bij hoge frequenties is een groter aantal treinpassages nodig om de vereiste nauwkeurigheid te behalen. Uit een T-toets blijkt dit echter niet significant te zijn.

Bijlage 5 Bepalingsmethode $V_{max,Bts}$

Deze bijlage bevat de meest actuele versie van de bepalingmethode voor $V_{max,Bts}$, gebaseerd op het memo LA.131001a.M04 van 13 april 2018.

Memo

Aan: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Van: Koopman, A. , Ostendorf, C.
Kopie:

Datum: 13 april 2018

Project: Herziening BTS
Kenmerk: LA.131001a.M04

Doelstelling

Voorstel voor bepaling van V_{max} , als bijlage bij de BTS: $V_{max,BTS}$.

Het gaat hier om een bepalingsmethode, die bestaat uit een meetmethode en een naverwerkingsmethode.

De meetmethode beschrijft hoe bij treinverkeer per pand van elke gebeurtenis een trillingsniveau ($V_{eff,max}$) wordt gemeten en hoe lang moet worden gemeten.

De meetmethode schrijft NIET voor hoe bijvoorbeeld panden worden geselecteerd of aan welke eisen de meetapparatuur moet voldoen. ProRail heeft een checklist voor trillingsmetingen, die daarvoor gebruikt kan worden.

De naverwerkingsmethode beschrijft hoe uit de vergaarde data de beoordelingsmetriek¹ $V_{max,BTS}$ alsmede de reproduceerbaarheid (R) van $V_{max,BTS}$ moet worden bepaald en hoe de toetswaarden worden bepaald.

Uitgangspunten

- Beoordeeld wordt het maximale niveau in een week, conform de metriek V_{max} van de SBR richtlijn B ($V_{max,stat}$).
- De meetmethode en de naverwerkingsmethode zijn gebaseerd op die van de SBR maar verder uitgebreid en verfijnd met het doel de reproduceerbaarheid te vergroten.
- Er worden geen treinpassages als "outliers" weggegooid.
- Wel kan het voorkomen dat een gemeten gebeurtenis hoger uitvalt dan de $V_{max,BTS}$. N.B.: dit was ook al het geval bij de $V_{max,stat}$.
- Om zeker te stellen dat ook van de enkele procenten sterke gebeurtenissen (vaak door goederentreinen) voldoende wordt gemeten dient, conform de SBR, ten minste een week te worden gemeten.
- De bepalingsmethode geeft aan wat de reproduceerbaarheid van de meting is, uitgedrukt als onzekerheidspercentage in het resultaat. Een binnen enkele maanden uitgevoerde tweede meting onder verder gelijkblijvende omstandigheden zal met een kans van 95% een resultaat opleveren dat minder dan het onzekerheidspercentage afwijkt van de eerste meting.
- Gestreefd wordt naar een onzekerheid van 10%. Bij de belangrijke grenswaarde 0,4 is de onzekerheid dan in de orde van de afrondingsfout. Voor het, door middel van een voor-en nameting, toetsen of er sprake is van een toename van meer dan 30% is het ook van belang dat de onzekerheid in elk van die metingen niet te groot is.

¹ Een "metriek" is een maat voor een grootheid. De grootheid is in dit geval "trillingen". Een grootheid is te beschrijven met allerlei metrieken, zoals in dit geval: maximale versnellingsamplitude, amplitude, gemiddelde uitwijking, etc. In plaats van het woord "metriek" wordt vaak, minder accuraat, "meetgrootheid" of zelfs "grootheid" gebruikt.

- Als de onzekerheid na een week meten nog steeds groter is dan 10% kan er voor worden gekozen de meetduur te verlengen, waardoor de onzekerheid kleiner wordt (en het resultaat nog wat zal veranderen).
- Wanneer de onzekerheid groter is dan 10% maar de meting niet wordt voortgezet wordt de onzekerheid verrekend in de toetswaarden.

Begrippen

Metriek	Eenheid	Betekenis	Afronding
V _{max}	[-]	Hoogste gemeten waarde van V _{eff} (t) conform SBR B	nvt
V _{max,stat}	[-]	Hoogste waarde van V _{eff} (t), bepaald conform de statistische methode van de SBR B	nvt
V _{max,BTS}	[-]	Hoogste waarde van V _{eff} (t), bepaald conform de hier beschreven naverwerkingsmethode	1 of 2 (afh. gebouwfunctie)
V _{eff} (t)	[-]	Effectieve trillingssnelheid op tijdstip t, conform SBR B	3
V _{eff,max}	[-]	Hoogste waarde van V _{eff} (t) van een gebeurtenis, over alle meetrichtingen van een meetpunt	3
V _{eff,max,j}	[-]	Hoogste waarde van V _{eff} (t) van een gebeurtenis, van een meetrichting j van een meetpunt	3
V _{eff,max,j,band}	[-]	Hoogste waarde van V _{eff} (t) van een gebeurtenis, van een meetrichting j van een meetpunt, per octaafband	3
V _{eff,max,band}	[-]	Hoogste waarde van V _{eff} (t) van een gebeurtenis, over alle meetrichtingen van een meetpunt, per octaafband	3
V _{rms,5s,j}	[-]	Root-mean-square over 5 seconden van V _{eff} (t) in richting j, waarbij de 5 seconden symmetrisch rond de gemeten V _{eff,max,j} liggen	3
Q	[-]	Verhouding van het trillingsniveau bij de nameting ten opzichte van dat bij de voormeting ("de toename")	Eind: 0 Reken: 1
F _{dom}	[Hz]	Dominante frequentie van een meetpunt, zijnde de dominante frequentie van de dominante richting	0
H _{gebouw,band}	[-]	Overdrachtsfactor tussen fundering en vloerpunten, per band	1
top50%		De verzameling met de 50% hoogste waarden van een verzameling	nvt
#top50%	[-]	Aantal waarden in de top50%	0
#meetdagen	[-]	Totaal aantal dagen dat op het funderingspunt gemeten is	1
μ	[-]	Gemiddelde van log(V _{eff,max})	3
σ	[-]	Standaard deviatie van log(V _{eff,max})	3
β	[-]	Betrouwbaarheidscoëfficiënt	3
R	[%]	De reproduceerbaarheid, uitgedrukt als de onzekerheid in V _{max,BTS}	Eind: 0 Reken: 1
t ⁻¹		De inverse van Student's cumulatieve verdelingsfunctie	nvt

Meetmethode

De metingen worden verricht conform SBR B.

In uitbreiding op de SBR B wordt de volgende aanpak gehanteerd:

- Per gebeurtenis die een treinpassage betreft wordt het treintype vastgelegd (goederen versus reizigers, eventueel ook een nadere specificatie).
- Per gebeurtenis die een treinpassage betreft wordt, per meetrichting j , de metriek $V_{rms,5s,j}$ bepaald door de root-mean-square te nemen over 5 seconden van $V_{eff}(t)$ van die meetrichting symmetrisch rondom het tijdstip dat $V_{eff,max,j}$ optreedt voor dat meetpunt en in die richting.
- Uit $V_{rms,5s,j}$ wordt een $V_{eff,max,j}$ berekend volgens de formule:

$$V_{eff,max,j} = 1,95 \cdot V_{rms,5s,j}$$

Naast de gekozen meetpunten conform SBR B kan ook een triaxiaal meetpunt op de fundering van het pand worden aangebracht, conform de "indicatieve methode" van SBR A. Dit meetpunt kan worden gebruikt als referentiepunt voor de toekomst en als controlepunt ter identificatie van stoortrillingen. Dit meetpunt kan ook worden gebruikt als fundatiepunt tijdens de meting (zie Optie 2 hieronder).

Voor de meetpunten wordt één van de twee volgende opties gekozen:

- Optie 1: lang meten op de vloer. Bij deze optie is geen bepaling van Hgebouw nodig.
 - o Van alle gebeurtenissen met een gemeten $V_{eff,max} \geq 0,05$ worden de berekende $V_{eff,max,j}$ en berekende $V_{eff,max}$ vastgelegd in een meetjournaal.
 - o Gedurende ten minste 7x24 uur wordt op alle meetpunten gemeten en zo lang als nodig is om per treintype 50 passages vast te leggen met een maximale meetperiode van 4 weken.
 - o Gebeurtenissen die niet een treinpassage betreffen, zoals lopen in woningen en wegverkeer, worden uit de dataset verwijderd.
 - o Verwijderde gebeurtenissen met een $V_{eff,max}$ van 25% of meer van V_{max} (volgens SBR) van deze 7x24 uur worden apart vastgelegd en gerapporteerd, met aanduiding van mogelijke bron.
- Optie 2: lang meten op de fundering. Bij deze optie is een bepaling van Hgebouw nodig.
 - o Er wordt aanvullend op het meetpunt op de vloer een triaxiaal meetpunt op de fundering van het pand aangebracht, conform de "indicatieve methode" van SBR A.
 - o Gedurende 24 uur wordt op alle meetpunten gemeten.
 - o Van alle gebeurtenissen met een gemeten $V_{eff,max} \geq 0,02$ worden de berekende $V_{eff,max,j}$ in een meetjournaal vastgelegd, tezamen met de bijbehorende tijdsignalen.
 - o Gebeurtenissen die niet een treinpassage betreffen, zoals lopen in woningen en wegverkeer, worden uit de dataset verwijderd.
 - o Verwijderde gebeurtenissen met een $V_{eff,max}$ van 25% of meer van V_{max} (SBR) van deze 24 uur worden apart vastgelegd en gerapporteerd, met aanduiding van mogelijke bron.
 - o Van de resterende gebeurtenissen worden de hoogste 50% geselecteerd, waarvan uit de tijdsignalen per meetrichting steeds een duur van 5 seconden van $V_{eff}(t)$ wordt

- gekozen, symmetrisch gelegen rondom het tijdstip waarop de gemeten $V_{eff,max}$ het hoogste is.
- Het 5 seconden tijdsignaal wordt door een octaafbank gehaald met middenfrequenties 2 t/m 63 Hz, waarna daarna de $V_{eff,max,j,band}$ wordt bepaald.
 - Per octaafband wordt van elk meetpunt dat meer dan één meetrichting heeft de dominante richting bepaald. Dit is de meetrichting met de meeste top50%-gebeurtenissen.
 - Per gebeurtenis en per octaaf wordt de verhouding bepaald tussen enerzijds $V_{eff,max,j}$ voor de dominante richting van een vloerpunt (of $V_{eff,max}$ van een uniaxiaal meetpunt) bij die octaafband en anderzijds $V_{eff,max,j}$ voor de dominante richting van het fundatiepunt bij die octaafband. Per vloerpunt wordt het gemiddelde over de gebeurtenissen bepaald en vastgelegd als overdrachtsfactoren $H_{gebouw,band}$.
 - Van alle gebeurtenissen met een $V_{eff,max} \geq 0,02$ worden de $V_{eff,max,j}$, de $V_{eff,max}$ en de dominante frequentie f_{dom} vastgelegd.
 - Gedurende ten minste 7x24 uur wordt aan het funderingspunt gemeten en zo lang als nodig is om per treintype 50 passages vast te leggen met een maximale meetperiode van 4 weken.
 - Niet spoorgerelateerde gebeurtenissen, zoals wegverkeer, worden uit de dataset verwijderd.
 - Per gebeurtenis wordt $V_{eff,max}$ van een vloerpunt bepaald door $V_{eff,max}$ van de fundering te vermenigvuldigen met $H_{gebouw,band}$ waarbij die octaafband wordt gekozen waarin f_{dom} valt.
 - De gebruikte overdrachtsfactoren, met frequentie van voorkomen in de gebeurtenissen, worden gerapporteerd.
 - Conform de naverwerkingsmethode van deze bepalingmethode wordt de reproduceerbaarheid R van elk van de meetpunten bepaald. In geval optie 1 is gehanteerd wordt R ook per meetrichting bepaald.
 - Indien $R \leq 10\%$ dan is er voldoende gemeten. Indien $R > 10\%$ dan wordt besloten of de meting wordt verlengd of dat toetswaarden worden verzwaard conform de naverwerkingsmethode van deze bepalingmethode. Aangezien R per meetpunt of meetrichting wordt bepaald en de naverwerkingsmethode tevens de te toetsen $V_{max,BTS}$ oplevert per meetpunt of -richting ligt het in de rede verlenging alleen te overwegen indien meetpunten of -richtingen met een hoge $V_{max,BTS}$ een $R > 10\%$ hebben.

N.B. ProRail hanteert een checklist voor trillingsmetingen waarin bepalingen zijn opgenomen voor onder andere de volgende aspecten van de meetmethoden.

- aantal meetpunten per gebouw
- meetduur
- eisen aan meetapparatuur
- bevestiging trillingsopnemer
- definitie assen trillingsopnemers
- treingegevens
- meetjournaal
- opslag meetgegevens

N.B. ProRail heeft voor het meetjournaal een sjabloon welke dient om de meetresultaten en metadata uniform vast te leggen, als bijlage bij rapportages.

Naverwerkingsmethode

De naverwerkingsmethode leidt tot de berekening van $V_{max,BTS}$ die getoetst kan worden aan de streef- en grenswaarden voor V_{max} uit de Beleidsregel trillinghinder spoor (Bts).

De naverwerkingsmethode maakt onderscheid tussen reizigerstreinen en goederentreinen. Voor beide treintypen dient de naverwerkingmethode afzonderlijk doorlopen te worden en een afzonderlijke $V_{max,BTS}$ te worden berekend. Bij de beoordeling moeten de $V_{max,BTS}$ waarden voor beide treintypen voldoen aan de streef- of grenswaarde uit de Bts. Als maar voor één treintype wordt voldaan, dan geldt dat voor de betreffende onderzoekslocatie niet wordt voldaan aan de Bts.

De dataset bestaat uit de berekende waardes voor $V_{eff,max,j}$ (dus per meetpunt en per richting een waarde) voor een reeks aan gebeurtenissen, treinpassages betreffende. Bij keuze voor optie 2 is voor de meetpunten anders dan het referentiepunt op een fundatie geen waarde per richting beschikbaar maar een waarde voor het meetpunt. Dit is tevens het geval bij uniaxiale meetpunten bij optie 1. In de volgende stappen moet voor dergelijke meetpunten $V_{eff,max,j}$ gelezen worden als $V_{eff,max}$.

Per treintype worden de volgende stappen ondernomen.

- Er wordt vastgesteld op grond van hoeveel meetdagen de verzameling berekende $V_{eff,max,j}$ waardes tot stand is gekomen: #meetdagen
- De gebeurtenissen met een berekende $V_{eff,max} \geq 0,02$ op het funderingspunt worden geselecteerd. Indien er niet voor gekozen is een funderingspunt te hanteren wordt de selectie bepaald op grond van een meetpunt op de laagst beschikbare verdieping met als criterium voor de berekende $V_{eff,max} \geq 0,05$.
- Een willekeurig minder streng criterium (hoger dan 0,02 c.q. 0,05) is toegestaan maar kan leiden tot een langere benodigde meetduur.
- Per meetpunt wordt het aantal treinen bepaald: #treinen
- Van de berekende $V_{eff,max,j}$ wordt de natuurlijke logaritme genomen: $\ln(V_{eff,max,j})$.
- Van de $\ln(V_{eff,max,j})$ worden het gemiddelde μ bepaald:

$$\mu = \text{gemiddelde } \{ \ln(V_{eff,max,j}) \}$$

- De betrouwbaarheidscoëfficiënt β wordt vastgesteld volgens de formule:

$$\beta = t^{-1} [1 - (\#meetdagen / 7) / \#treinen ; \#treinen - 1]$$

- Hieruit wordt $V_{\max,BTS}$ per meetpunt en, indien van toepassing, per meetrichting bepaald volgens de formule:

$$V_{\max,BTS} = \exp(\mu + 0,3 \cdot \beta);$$

- Reproduceerbaarheid R wordt per meetpunt en, indien van toepassing, per meetrichting bepaald volgens de formule

$$R = 100\% \cdot 0,3 \cdot \sqrt{(4 / \#treinen + 0,01)}$$

- De toetswaarde voor $V_{\max,BTS}$ bedraagt:

$$\begin{array}{ll} V_{\max,BTS} & \text{indien } R \leq 10\% \\ (1+R/100\%) \cdot V_{\max,BTS} & \text{indien } R > 10\% \end{array}$$

- De toename van $V_{\max,BTS}$ is een verhouding tussen de meetwaarde van een nameting ten opzichte van die van een voormeting. Voor die toename hanteert de Bts een criterium van 1,3. De verhouding wordt in deze bepalingmethode aangeduid met Q . Indien Q kleiner is dan 1 dan is er sprake van een afname. Q wordt bepaald aan de hand van de volgende formule:

$$Q = V_{\max,BTS_{na}} / V_{\max,BTS_{voor}}$$

$V_{\max,BTS_{voor}}$ en $V_{\max,BTS_{na}}$ zijn hierbij de uit respectievelijk de voor- en de nameting bepaalde $V_{\max,BTS}$ -en (dus *zonder* de voor de toetswaarde te gebruiken correctiefactor $(1+R/100\%)$).

- Voor de toetsing van Q dient de onzekerheid R_Q over die toename te worden bepaald volgens de formule:

$$R_Q = \sqrt{(R_{voor}^2 + R_{na}^2)}$$

- De toetswaarde voor Q bedraagt:

$$\begin{array}{ll} Q & \text{indien } R_Q \leq 14\% \\ (1+ R_Q /100\%) \cdot Q & \text{indien } R_Q > 14\% \end{array}$$

Toetsing geschiedt met de nauwkeurigheid waarmee de criteria zijn geformuleerd, maar daarbij dienen fouten door dubbele afronding te worden voorkomen.

- Tussenresultaten (meetwaardes, percentages, etc.) worden afgerond en opgeslagen met tenminste 3 significante cijfers.
- Bij toetsing wordt een toetswaarde eerst afgerond naar de meest significante decimaal van het toetsingscriterium.
- Deze afronding geldt ook bij de verschillende selectiecriteria in de meet- en naverwerkingsmethode.

Toelichting algemeen

De Beleidsregel Trillinghinder Spoor (BTS) definieert in artikel 1 de beoordelingsmetriek V_{max} . In de bijlage bij artikel 1 wordt beschreven hoe in een situatie de waarde van deze metriek dient te worden bepaald. Daarbij worden gedeeltes van de SBR Richtlijn B van toepassing verklaard. Voor het bepalen van V_{max} wordt verwezen naar onderhavige memo. De bepalingmethode in deze memo wijkt op een aantal punten af van SBR Richtlijn B. Het resultaat van de bepalingmethode wordt om die reden, voor de duidelijkheid, als $V_{max,BTS}$ aangeduid. Belangrijke afwijkingen ten opzichte van de SBR zijn de volgende.

- Er wordt de mogelijkheid geboden om een groot deel van de meting te laten uitvoeren op een "funderingspunt" (bijvoorbeeld buiten aan de gevel), in plaats van midden op vloeren in woonkamers en slaapkamers. Er wordt beschreven hoe de meetprocedere en de naverwerking dan moet plaatsvinden. Dit is toegevoegd om een langere meetduur te faciliteren. De aanpak is eerder toegepast in onder andere het trillingsonderzoek ten behoeve van het Tracébesluit voor Sporen in Den Bosch.
- De reproduceerbaarheid "R" dient te worden bepaald. Dit is de bandbreedte (als percentage van $V_{max,BTS}$) waarin een nieuwe meting, binnen enkele maanden uitgevoerd onder verder gelijkblijvende omstandigheden, met grote waarschijnlijkheid zal vallen. Deze kwantificering is met name van nut bij latere beoordelingen wanneer moet worden vastgesteld in welke mate er sprake is van een toename.
- De SBR richtlijn biedt een procedure om de toetsingswaarde statistisch te bepalen, die in de praktijk ook veel wordt gebruikt. Deze statistische methode is in de nieuwe bepalingmethode verder uitgewerkt. De methode bepaalt, conform de SBR, de "hoogste waarde in een week" en levert bovendien een kwantificering van de reproduceerbaarheid.
- Deze nieuwe statistische methode gaat uit van een meetduur van 1 week en minimaal 50 treinen binnen een bepaalde categorie, bijvoorbeeld goederentreinen. Als minder dan 50 treinen in een week kunnen worden gemeten, dan kan de meetduur verlengd worden tot maximaal 4 weken. Langer meten dan 4 weken geeft onverklaarde variaties in de trillingssterkten en leidt niet tot een betere reproduceerbaarheid. Daarom is de meetduur begrensd tot maximaal 4 weken. Indien binnen deze meetperiode nog steeds geen 50 treinen binnen een categorie zijn gemeten, dan kan de berekening van $V_{max,BTS}$ worden uitgevoerd met het gemeten aantal treinen. Dat zal dan leiden tot een minder goede reproduceerbaarheid. Dat past bij het lage aantal treinen in de meetduur.
- De toetsingswaarde wordt niet per dagdeel (dag, avond of nacht) vastgesteld, en wel om de volgende redenen. Ten eerste is het zo dat treinen zeer zelden kunnen worden vastgepind op een dagdeel: een maatgevende, sterke trillingen veroorzakende trein die tijdens de meting overdag passeert kan een dag, een maand of een jaar later 's nachts (of, voor reizigerstreinen, in de randen van de nacht) passeren. Ten tweede is voor een aparte toetsingswaarde in de nacht een zeer langdurige meting nodig, gesteld een gewenste reproduceerbaarheid van 10%. Het niet bepalen, maar wel beoordelen, per dagdeel was bij toepassing van de SBR bij railinfraprojecten overigens ook al vrij gebruikelijk. Overigens sluit de aangepaste BTS een aparte bepaling per dagdeel niet geheel uit. Als kan worden aangetoond dat bepaalde specifieke, maatgevende, treinen nu en in de

toekomst nooit in de nacht (met de strengste toetsingswaarden) zullen rijden, kan er alsnog voor worden gekozen om een aparte toetsingwaarde voor de nacht te bepalen met uitsluiting van deze treinen. Daarvoor hoeven slechts deze treinen uit de dataset te worden gehaald, waarna wederom de statistische verwerking wordt gedaan en reproduceerbaarheid wordt gecontroleerd (en de meetduur misschien nog wordt verlengd).

Toelichting naverwerkingsmethode

Om de verwerking van de meetresultaten te verduidelijken is een schema opgenomen en een getallenvoorbeeld. Het schema laat de verschillende bewerkingen van het meetsignaal zien (bijvoorbeeld de SBR weging) en de stappen die in het verwerkingsproces moeten worden genomen. In het schema en getallenvoorbeeld zijn de stoorsignalen al verwijderd.

In het getallenvoorbeeld is uit praktisch oogpunt gekozen voor 1 meetrichting en 10 gebeurtenissen. Hiermee kan eenvoudig de berekening volgens de naverwerkingsmethode worden gecontroleerd. Iedere stap uit de methode is inzichtelijk gemaakt.

Wijzigingen ten opzichte van versie 26 februari 2014

Teneinde de herhaalbaarheid van een Vmax-bepaling te verbeteren, is een aantal wijzigingen doorgevoerd. De onderbouwing hiervan en de verbetering die dit oplevert, is beschreven in rapport LA.160620.R01.

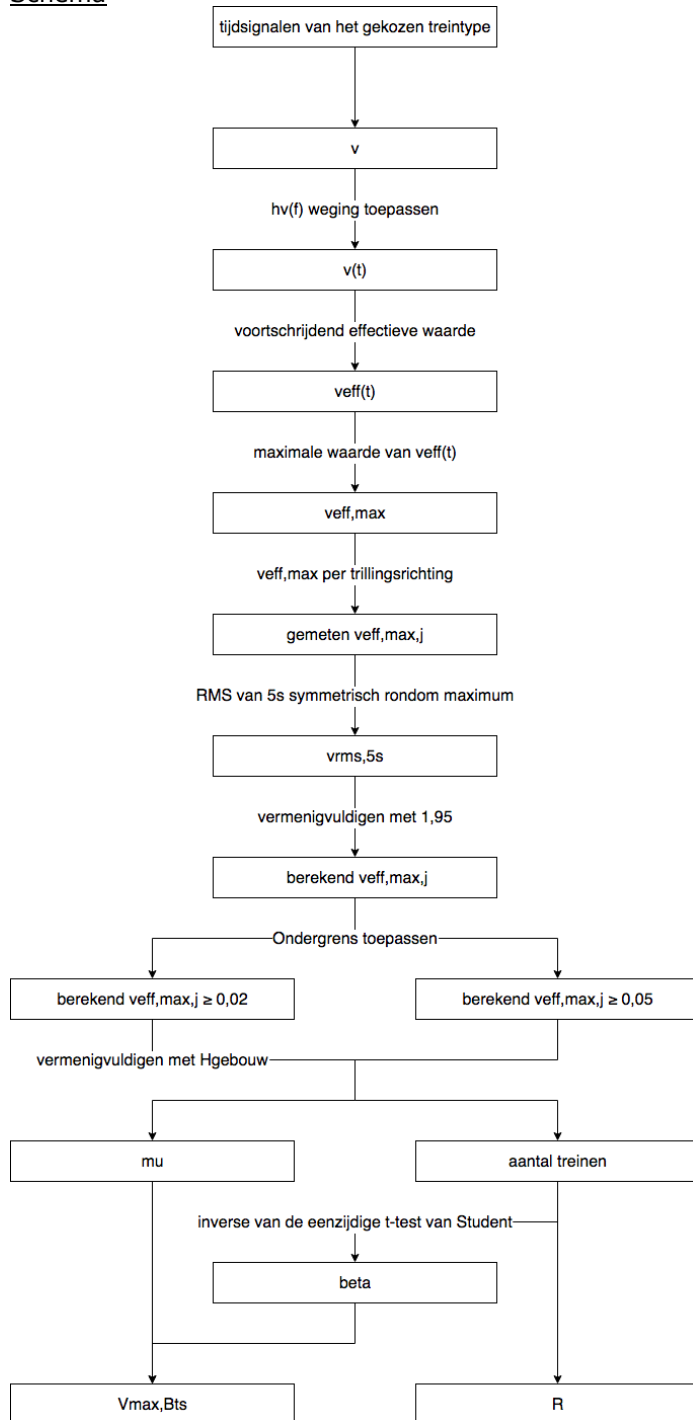
- Introductie van $V_{rms,5s}$. Berekening hiervan is een tussenstap in de meetmethode.
- De naverwerking wordt per treintype uitgevoerd.
- Er vindt geen iteratie meer plaats in het bepalen van de statistische parameters (de verwerking per treintype heeft dit vervangen).
- Er wordt geen standaard deviatie meer bepaald. Deze is vastgezet op de waarde 0,3 (het gebruik van $V_{rms,5s}$ als tussenstap heeft dat mogelijk gemaakt).
- De uitdrukking voor R is veranderd en heeft alleen nog het aantal treinen waaraan gemeten is, per treintype, als variabele (dit is het gevolg van het vastzetten van de standaard deviatie).
- In R is een extra onzekerheid opgenomen (de term 0,01 onder het wortelteken) die een variatie van week tot week representeert die niet te verklaren is uit de gemeten treinen, waardoor R beter de herhaalbaarheid van het meetresultaat representeert.

Verder is er, ter illustratie, een schema en een getallenvoorbeeld toegevoegd.

Tot slot wordt er nu verwezen naar twee tools die de bepaling van Vmax verder ondersteunen:

- Een checklist, van ProRail
- Een sjabloon meetjournaal, van ProRail

Schema



Getallenvoorbeeld

Als voorbeeld zijn tien passages van hetzelfde treinsoort geselecteerd. De meetduur is zeven dagen en er is op de vloer gemeten. Uit de gemeten tijdsignalen is $v_{rms,5s}$ berekend voor de x-richting. Deze waarden staan in onderstaande tabel.

Bestand	$v_{rms,5s,x}$
17124112	0,052
17124115	0,025
17124116	0,012
17124123	0,095
17124129	0,063
17124132	0,017
17124135	0,021
17124141	0,038
17124142	0,055
17125002	0,083

Voor iedere $v_{rms,5s,j}$ wordt $v_{eff,max,j}$ uitgerekend volgens:

$$v_{eff,max} = 1,95 \cdot v_{rms,5s}$$

Dit levert de volgende waarden op:

Bestand	Berekende $v_{eff,max,x}$
17124112	0,101
17124115	0,049
17124116	0,023
17124123	0,185
17124129	0,123
17124132	0,033
17124135	0,041
17124141	0,074
17124142	0,107
17125002	0,162

Nu wordt de ondergrens toegepast. Omdat het meetpunt zich op de vloer bevindt, is de ondergrens van 0,05 aangehouden. De waarden van $v_{eff,max,x}$ zijn eerste afgerond op 2 decimalen (aantal

decimalen selectie criterium) en vervolgens geselecteerd. Dan blijven de volgende gebeurtenissen over:

Bestand	veff,max,x
17124112	0,101
17124115	0,049
17124123	0,185
17124129	0,123
17124141	0,074
17124142	0,107
17125002	0,162

Vanuit deze selectie worden μ en β berekend. Eerst μ :

$$\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \ln v_{eff,max,j,i}$$

Bestand	veff,max,x	ln(veff,max,x)
17124112	0,101	-2,293
17124115	0,049	-3,016
17124123	0,185	-1,687
17124129	0,123	-2,096
17124141	0,074	-2,604
17124142	0,107	-2,235
17125002	0,162	-1,820

$$\mu = -2,250$$

En daarna β :

$$\beta = t^{-1} \left(1 - \frac{\frac{\text{aantal meetdagen}}{7}}{\text{aantal treinen}} \right) | \text{aantal treinen} - 1$$

Waarvoor geldt dat t^{-1} de inverse van de cumulatieve distributiefunctie van Student is. In Excel dient de functie T.INV te worden gebruikt.

Met als uitkomst:

$$\beta = 1,172$$

Als laatste worden $V_{\max,Bts}$ en R uitgerekend volgens:

$$V_{\max,Bts} = e^{\mu+0,3\cdot\beta}$$

En ingevuld:

$$V_{\max,Bts} = e^{-2,250+0,3\cdot 1,172} = 0,150$$

En vervolgens voor R:

$$R = 0,3 \cdot \sqrt{\frac{4}{aantal\ treinen}} + 0,01 \cdot 100\%$$

En ingevuld:

$$R = 0,3 \cdot \sqrt{\frac{4}{7}} + 0,01 \cdot 100\% = 22,875\%$$

Omdat R groter is dan 10% bedraagt de toetswaarde voor $V_{\max,BTS}$: 0,1845.

Voor de beoordeling is de eindwaarde voor $V_{\max,BTS}$ afhankelijk van het aantal cijfers achter de komma van de grenswaarden. Dit betekent over het algemeen 1 cijfer behalve voor A1 in de dag- en nachtperiode in de gebouwcategorie "onderwijs, kantoor en bijeenkomst" in de nieuwe situatie. In die categorie geldt dat $V_{\max,BTS}$ op 2 decimalen moet worden afgerond omdat de streefwaarde in de BTS is gespecificeerd met 2 cijfers achter de komma.

Dus voor de gebouwcategorie wonen in een nieuwe of bestaande situatie wordt de toetswaarde voor $V_{\max,BTS}$ van 0,1845 afgerond tot 0,2.

Voor de beoordeling van $V_{\max,BTS}$ aan A1 in de categorie "onderwijs, kantoor en bijeenkomst" in de nieuwe situatie wordt de waarde van 0,1845 afgerond tot 0,18. Als getoetst moet worden aan A2 in deze categorie, dan bedraagt de afgeronde waarde 0,2.

De waarde voor R in deze voorbeeldberekening wordt afgerond tot 23%.

Bijlage 6 Meten met een kunstmatige trillingsbron

Deze bijlage bevat een rapport van Dekra Rail over de toepassing van een kunstmatige trillingsbron. Het betreft een rapport van 25 maart 2024.

DEKRA RAIL

IBS Addendum Meetprotocol en specificaties kunstmatige trillingsbron

Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen

25 maart 2024



IBS Addendum Meetprotocol en specificaties kunstmatige trillingsbron

Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen

Opdrachtgever : ProRail Assetmanagement
Adres : De Inktpot, Moreelsepark 3
: 3511 EP Utrecht

Uw kenmerk : 4110221 d.d. 21-11-2023

Ons kenmerk : DR/24/230443/004

Auteur(s) : dr. ing. Martin Hiensch, ing. Leendert Vermeulen


Onderzoek : dr. ing. Martin Hiensch, ing. Leendert Vermeulen

Referent : ing. Marco van de Bovenkamp


Vrijgave : dr. ing. Martin Hiensch


Datum : 25 maart 2024

Versie : 2.0 definitief

Executive summary

On behalf of the research programme to mitigate railway induced vibrations at the source (Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen IBS), ProRail requires a specification of an artificial vibration source and an addendum to the ProRail uniform measurement protocol (Uniform Meetprotocol Trillingen UMT) for its application to test the effectiveness of proposed vibration reducing measures. ProRail has asked DEKRA to draw up these specifications, starting with a desk study.

The aim of the work is, on the one hand, to specify the artificial vibration source, in such a way that this leads to a uniform description. On the other hand, in providing a standardized approach as much as possible and the minimum requirements for preparing, carrying out, analyzing and reporting vibration measurements with use of an artificial vibration source.

Findings

From this study, the existing DIN SPEC 45673-3 (2014) was identified to be directly applicable for the ProRail application. This DIN standard specifies both the measurement and evaluation methods when using an artificial vibration source.

From the substantive assessment carried out, it is concluded that to determine the degree of vibration damping (insertion loss) of measures in the railway, when using an artificial vibration source, DIN SPEC 45673-3 (2014) must be used. However, the Dutch situation, with a relatively weak track structure, results in relatively low frequencies making an important contribution to excitation between vehicle and track. The frequency range of the artificial vibration source must match this. This leads to the following addition: where DIN SPEC 45673-3 (2014) uses a lower limit of 5 Hz for a harmonic excitation, a lower limit of 2 Hz is preferred for the Dutch situation.

The ProRail Uniform Vibration Measurement Protocol (UMT) is leading for the method of carrying out vibration measurements using an artificial vibration source. Where the measurement and evaluation method of DIN SPEC 45673-3 (2014) deviates from the UMT, the latter must be followed.

Scope of application

DIN SPEC 45673-3 (2014) states that an artificial vibration source is particularly suitable for carrying out a relative comparison with vibration-reducing measures. An artificial vibration source is suitable for generating the dynamic excitation that occurs during train passage (including as a result of track irregularities, stiffness variations in the track support and wheel load variations). However, the artificial vibration source is not or only partially useful as a simulation of the quasi-static load of passing trains (the so-called 'moving load').

In situations where the quasi-static load on the track (the moving mass of the train pressing the substructure) is decisive for the vibrations in the environment, the use of an artificial vibration source must be critically examined.

Inhoudsopgave

Executive summary	2
Inhoudsopgave	3
1 Inleiding	4
2 Doelstelling	4
3 Leeswijzer	4
4 Specificaties voor het uitvoeren van trillingsmetingen in NL	5
4.1 Algemeen	5
4.2 Reeds aanwezige internationale normeringen en informatie	5
4.2.1 Verwijzingen in het ProRail IBS Uniform Meetprotocol Trillingen (UMT)	5
4.2.2 Relevante (aanvullende) normeringen en informatie uit deskstudie	5
4.3 Toepasbaarheid voor de Nederlandse situatie	7
5 Specificaties voor een kunstmatige trillingsbron in de spoorbaan in NL	8
5.1 Baanbelasting / trillingen kenmerkend voor de Nederlandse situatie	8
5.1.1 Goederenwagons (type Falns met Y25 draaistel)	9
5.1.2 Locomotieven	10
5.1.3 Reizigersmaterieel	11
5.1.4 Bevindingen simulaties samengevat	11
5.2 Aanvullende specificaties specifiek voor de Nederlandse situatie	12
6 Lijst van verkrijgbare kunstmatige trillingsbronnen	12
7 Conclusie	12
8 Tekstvoorstel voor addendum aan UMT	13
Literatuur	15
Bijlage 1: Lijst van kunstmatige trillingsbronnen en leveranciers	16

Revisie overzicht

Versie	Status	Datum	Beschrijving	Auteur
		19-01-2024	Initiële versie	Leendert Vermeulen
0.1	Concept	31-01-2024	Na collegiale review	Martin Hiensch
2.0	Definitief	25-03-2024	Na review ProRail	Martin Hiensch

1 Inleiding

In het kader van Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen (IBS) heeft ProRail behoefte aan een meetprotocol voor de uitvoering van trillingsmetingen en een specificatie voor een kunstmatige trillingsbron. Bij de trillingsmetingen dient een kunstmatige trillingsbron te worden toegepast, welke wordt ingezet op een spoorbaan (laboratorium en/of schaalonderzoek ligt buiten de scope van deze opdracht).

De uit te voeren trillingsmetingen conform deze specificaties zijn beperkt tot het vaststellen van de effectiviteit van maatregelen om trillingsniveaus te verminderen.

Voor het opstellen van de specificatie voor het uitvoeren van trillingsmetingen in Nederland heeft DEKRA Rail op basis van reeds bestaande Europese normeringen en regelgeving en het ProRail IBS Uniform Meetprotocol Trillingen versie 2.0 31 augustus 2022 (hierna UMT, zie [1]) onderzocht hoe deze reeds aanwezige informatie aansluit bij de specifieke Nederlandse praktijk. Waar nodig zijn aanpassingen en/of aanvullingen opgesteld. De specificatie voor de uitvoering van trillingsmetingen in Nederland, waarbij de kunstmatige trillingsbron wordt toegepast, dient als addendum op het ProRail UMT.

Voor het opstellen van de specificatie van een kunstmatige trillingsbron heeft DEKRA Rail een deskstudie en een marktstudie uitgevoerd. Naar nu blijkt bestaat er reeds een DIN-normering voor kunstmatige trillingsbronnen. Waar nodig zijn aanpassingen en/of aanvullingen opgesteld, die specifiek geldend zijn voor de Nederlandse situatie.

Ook is geïnventariseerd wat er aan kunstmatige trillingsbronnen beschikbaar is in de Europese markt op dit moment (peildatum januari 2024). Dit om partijen die de effectiviteit van hun maatregelen moeten aantonen een praktisch (maar niet uitputtend) eerste overzicht te kunnen bieden van beschikbare apparatuur.

2 Doelstelling

De doelstelling van dit document is tweeledig.

Een zoveel mogelijk gestandaardiseerde aanpak en minimumeisen voor het voorbereiden, uitvoeren, analyseren en rapporteren van trillingsmetingen met een kunstmatige trillingsbron om het effect van maatregelen vast te stellen.

Specificeren van de kunstmatige trillingsbron, zodanig dat dit leidt tot een uniforme beschrijving voor partijen die de effectiviteit van hun maatregelen moeten aantonen.

3 Leeswijzer

De aanpak en de resultaten voor het opstellen van de aanvullende specificaties voor het uitvoeren van trillingsmetingen in NL zijn beschreven in hoofdstuk 4.

De aanpak en de resultaten voor het opstellen van de aanvullende specificaties voor een kunstmatige trillingsbron in NL zijn beschreven in hoofdstuk 5. Een lijst van mogelijk in te zetten kunstmatige trillingsbronnen is opgenomen in hoofdstuk 6. De conclusie is opgenomen in hoofdstuk 7 waarna het tekstvoorstel voor het addendum is verwoord in hoofdstuk 8.

4 Specificaties voor het uitvoeren van trillingsmetingen in NL

4.1 Algemeen

Het met ProRail afgesproken vertrekpunt is het ProRail UMT. Voor het opstellen van de specificaties voor het uitvoeren van trillingsmetingen met gebruikmaking van een kunstmatige trillingsbron is met behulp van een deskstudie relevant geachte normeringen en informatie gezocht die mogelijk een aanvulling zijn op het ProRail UMT. Hierbij is tevens rekening gehouden met de mogelijk specifieke Nederlandse situatie,

In de navolgende paragrafen in dit hoofdstuk zijn deze onderzochte bronnen beschreven en zijn eventuele aanvullende specificaties opgesomd.

4.2 Reeds aanwezige internationale normeringen en informatie

4.2.1 Verwijzingen in het ProRail IBS Uniform Meetprotocol Trillingen (UMT)

In het UMT zijn al diverse normeringen aangehaald, zie [1]. Deze worden in het voorliggende document niet verder genoemd of uitgewerkt.

4.2.2 Relevante (aanvullende) normeringen en informatie uit deskstudie

4.2.2.1 Algemeen

Vastgesteld is dat het UMT al zeer compleet is met daarin vele relevante verwijzingen naar andere regelgeving en documenten. Er is door DEKRA Rail evenwel gezocht naar mogelijk aanvullende informatie en relevante specificaties. De aanpak en gevonden aanvullingen worden in de paragrafen hieronder beschreven.

4.2.2.2 Aanpak bepaling mogelijk aanvullende specificaties

Tijdens de deskstudie zijn we gestoten op een DIN specificatie die direct van toepassing lijkt op het in de studie beoogde inzetgebied. Het betreft DIN SPEC 45673-3, 'Mechanical vibration – Resilient elements used in railway tracks – Part 3: Experimental evaluation of insertion loss of mounted track system (in a test rig and in situ) – April 2014 [2].

Het betreft de specificatie van een meetprocedure waarmee, gebruikmakend van een kunstmatige trillingsbron, in het spoor toegepaste maatregelen kunnen worden beoordeeld op trillingsdemping. In [2] is tevens een beschrijving opgenomen van mogelijk in te zetten kunstmatige trillingsbronnen, zie ook hoofdstuk 5 in het voorliggende document.

Voor de wijze van uitvoering en uitwerking van de trillingsmetingen verwijst [2] naar de normserie DIN 45672 (*DIN 45672 wordt niet genoemd in het ProRail UMT*):

Die Normenreihe DIN 45672 'Schwingungsmessung an Schienenverkehrswegen' besteht aus folgenden Teilen:

- *Teil 1: Messverfahren für Schwingungen – feb. 2018 (Measuring method for vibration) [3]*
- *Teil 2: Auswerteverfahren – nov. 2020 (Evaluation method) [4]*

Binnen het IBS programma bestaat de sterke wens tot uniformiteit ten aanzien van de wijze van uitvoering van trillingsmetingen. Mede hiertoe is het IBS Uniform Meetprotocol (UMT) opgesteld.

Voor de beantwoording van de vraag of voor uitvoering van de wijze van de trillingsmetingen vanuit [2] direct naar het UMT kan verwijzen is een verschil-analyse uitgevoerd tussen [3] en het UMT.

In de DIN45672-1 [3] zijn de specificaties gegeven voor 4 type metingen, te weten:

- A. H5 Messungen zur Beurteilung der Immission;
- B. H6 Messungen zur Beweissicherung;
- C. H7 Ermittlung einer Einfügungsdämmung;
- D. H8 Messungen als Grundlage für Immissionsprognosen;

In het UMT [1] zijn 6 type metingen / doelen genoemd, te weten:

- 1. Vaststellen of de richtlijnen voor trillingshinder in gebouwen niet worden overschreden;
- 2. Vaststellen of de richtlijnen voor trillingsschade aan gebouwen niet worden overschreden;
- 3. Vaststellen wat het effect van een maatregel is (aan treinen, het spoor, in de bodem of aan gebouwen);
- 4. Vaststellen van de bronsterkte van de trillingen van treinverkeer;
- 5. Vaststellen van de trillingseigenschappen van gebouwen;
- 6. Vaststellen van de bodemeigenschappen (hoe dempen trillingen uit met de afstand, hoe is de bodem opgebouwd, geofysisch onderzoek).

Voor de bepaling van de delta tussen het UMT en de DIN 45672-1 is vooralsnog gekozen voor een vergelijking tussen DIN 45672-1 H7 Ermittlung einer Einfügungsdämmung en UMT-meting type 3.

Opmerking:

In de DIN 45672-1 wordt voor apparatuur te gebruiken bij immissie-metingen (UMT- meting type 5) verwezen naar de DIN 45669-1, deze wordt in het ProRail UMT niet genoemd.

4.2.2.3 Gevonden relevante delta t.b.v. aanvullende specificaties

Uit de gedetailleerde vergelijking voor bepaling van de delta tussen het ProRail UMT en de DIN 45672-1 is gebleken dat het UMT meer uitgebreid, gedetailleerd en compleet is in vergelijking met de DIN 45672-1. Dit geldt met name voor de meetlocaties, de meetpunten, de passagesnelheden, het aantal passages en het meetjournaal/protocol.

De opvallende overeenkomsten en mogelijk relevante aanvulling vanuit [3] op de UMT specificaties zijn:

- 1) *H 4 Für allgemeine Anwendungen sind eine untere Terzmittenfrequenz von 4 Hz und eine obere Terzmittenfrequenz von 250 Hz zu wählen;*
- 2) *H7.1.1 Das Links/rechts-Messverfahren kann bei Betriebsgleisen angewandt werden, Aufgrund der im Allgemeinen unterschiedlichen Untergrundverhältnisse an den gewählten Messquerschnitten müssen bei diesem Verfahren die Übertragungsadmittanzen des Baugrunds gemessen werden, Hierzu sind Messungen mit direkter Anregung des Untergrunds durchzuführen. Die Anregung des Untergrunds muss hierbei an den betrachteten Querschnitten gleichartig erfolgen.*
Wat in DIN45672-1 "Links – Rechts Verfahren" en "Vorher – Nachher" wordt genoemd heet in het UMT respectievelijk "Procedure 1" en "Procedure 2". Tot zelfs de te gebruiken formules zijn in beide documenten overeenkomstig;
- 3) *H7.6 Gleiszustand.*
Bei Messungen nach dem Vorher/nachher-Verfahren wird in der Regel ein erneuerungsbedürftiger Altoberbau gegen einen neuen Oberbau ausgetauscht. Insofern

enthält dieses Messverfahren auch immer die Verbesserung des Oberbauzustands. Für die weitergehende Beurteilung der Messergebnisse ist der Oberbauzustand vorher/nachher zu beschreiben. Die Nachmessung ist frühestens 6 Wochen nach Aufnahme des Regelbetriebs durchzuführen.

In het UMT wordt voor nieuw spoor als “Wens” nummer 2.5.3 minimaal 4 weken aangehouden.

Een minimale tijdspanne bij Procedure 2 in het UMT is niet genoemd. Hiervoor zou de DIN45672-1 gevolgd kunnen worden.

Opmerking:

Een van de doelstellingen binnen het EU research programma RIVAS (Railway Induced Vibration Abatement Solutions) is de ontwikkeling en verificatie van procedure voor het bepalen van trillingsdemping (invoeg-verlies) bij het gebruik van een kunstmatige trillingsbron. RIVAS deliverable D1.10 [6], waarin dit deelonderzoek is vastgelegd, heeft als basis gediend voor de in 2014 uitgekomen herziene versie van [2]. In de huidige versie van het UMT wordt [6] niet genoemd.

4.3 Toepasbaarheid voor de Nederlandse situatie

In [2] is als ‘Anwendungsbereich’ opgenomen dat een kunstmatige trillingsbron vooral geschikt is om een relatieve vergelijking met trillingsreducerende maatregelen uit te voeren. Een kunstmatige trillingsbron is daarbij geschikt om de dynamische excitatie op te wekken zoals deze optreedt tijdens treinpassages (o.a. als gevolg van spooronregelmatigheden, stijfheidsvariaties in de ondersteuning van het spoor en wiellastvariaties). Echter de kunstmatige trillingsbron is niet of slechts deels bruikbaar als simulatie van de quasi-statische belasting van passerende treinen (de zogenoemde ‘moving load’).

In situaties waarin de quasi-statische belasting van het spoor (de bewegende massa van de trein die ‘de baan’ indrukt) maatgevend is voor de trillingen in de omgeving, moet kritisch worden gekeken naar het gebruik van een kunstmatige trillingsbron. Bij een relatief slap baanlichaam speelt de quasi-statische belasting van het spoor een belangrijke rol.

5 Specificaties voor een kunstmatige trillingsbron in de spoorbaan in NL

Binnen [2] worden zowel de uit te voeren trillingsmetingen als evaluatiemethode bij toepassing van een kunstmatige trillingsbron gespecificeerd. Tevens worden voorbeelden gegeven van mogelijk in te zetten kunstmatige trillingsbronnen.

Het frequentie- en krachtbereik van een kunstmatige trillingsbron dient aan te sluiten bij dat welke in de praktijk door passerend materieel wordt opgewekt en ingeleid in het spoor (de emissie). Onderzocht is in hoeverre de uitgangspunten binnen [2] aansluiten op de Nederlandse situatie. Hiertoe is voor de Nederlandse situatie het optredend frequentiebereik beoordeeld aan de hand van respectievelijk (a) eerder binnen het IBS uitgevoerde voertuig-baan simulaties [8, 9] en (b) eerder uitgevoerde metingen in de Nederlandse spoorbaan. Aansluitend is vastgesteld in hoeverre de Nederlandse situatie aansluit bij die welke als uitgangspunt geldt voor de opgestelde DIN-specificatie [2].

Opmerking: van aanstoting naar trillingshinder.

Het is voor ieder type baanlichaam en ieder type ondergrond/bodem belangrijk te weten welke grondtrillingen kritisch zijn, dus in welk frequentiebereik deze trillingen worden doorgevoerd. Hoe slapper de bodem, hoe lager de kritische frequentie naar verwachting zal zijn. Omdat er voor de Nederlandse situatie nog onvoldoende bekend is over de eigenschappen van de ondergrond en deze op iedere locatie sterk kan variëren, is nog onvoldoende bekend welke aan het spoor opgelegde frequenties (Emissie) daadwerkelijk leidt tot hinderlijke trillingen in de omgeving (Immissie). Bij de inzet van een kunstmatige bron zal er daarom ook aandacht moeten zijn voor de excitatie bij lage frequenties. Dit is in de volgende paragraaf verder onderzocht en beschreven.

5.1 Baanbelasting / trillingen kenmerkend voor de Nederlandse situatie

Om inzicht te krijgen in het effect van verschillende voertuigvarianten op de trillingen in het spoor, zijn binnen het IBS voertuig dynamica simulaties uitgevoerd. In deze voertuig dynamica simulaties, die zijn uitgevoerd m.b.v. MBS (Multi Body Simulation) software, rijden treinen virtueel over een spoor en worden de hierbij optredende voertuigreacties (wiel-railkrachten) berekend. De toegepaste baanmodellen betreffen een theoretisch spoor met spoorligging conform ERRI B176 en een gemeten spoorligging op locatie Schalkwijk (op dit spoor van ca. 1 km lengte rijden zowel goederen- als reizigerstreinen).

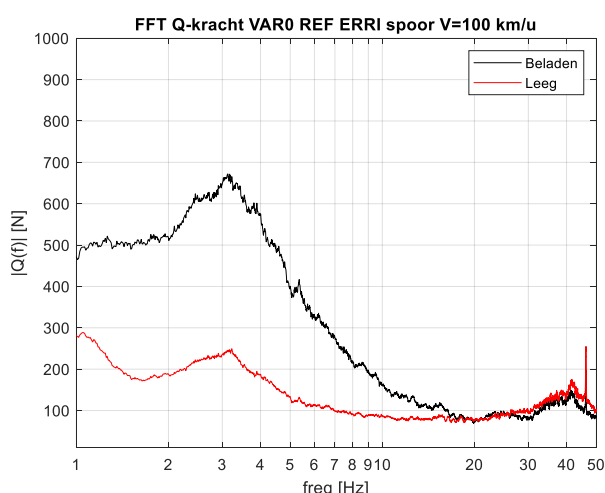
Van het theoretisch spoor is de spoorligging (spooronregelmaticheden) opgesteld conform de methode gedefinieerd in ERRI rapport B176, waarbij deze verder is aangepast aan het kwaliteitsniveau van het Nederlandse spoor. Dit spoor stoot het voertuig breedbandig aan. De ondergrond van het ERRI baanmodel is gemodelleerd als relatief stijf. Voor Schalkwijk is de ondergrond gemodelleerd als relatief slap (stijfheid gehalveerd t.o.v. het ERRI spoormodel). Van de simulatieresultaten, zijn de verticale krachten in het wiel-rail contact (Q-krachten) gebruikt. Hiervan is door middel van FFT-analyse (Fast Fourier Transform) de gemiddelde frequentiespectra bepaald. Doordat er gemiddeld wordt over alle assen wordt een inzicht verkregen dat het meest representatief is voor het materieel.

Binnen rapportage [8] zijn de resultaten vastgelegd die, met betrekking tot de beoordeelde referentie-situatie, als kenmerkend kan worden verondersteld voor de Nederlandse situatie in

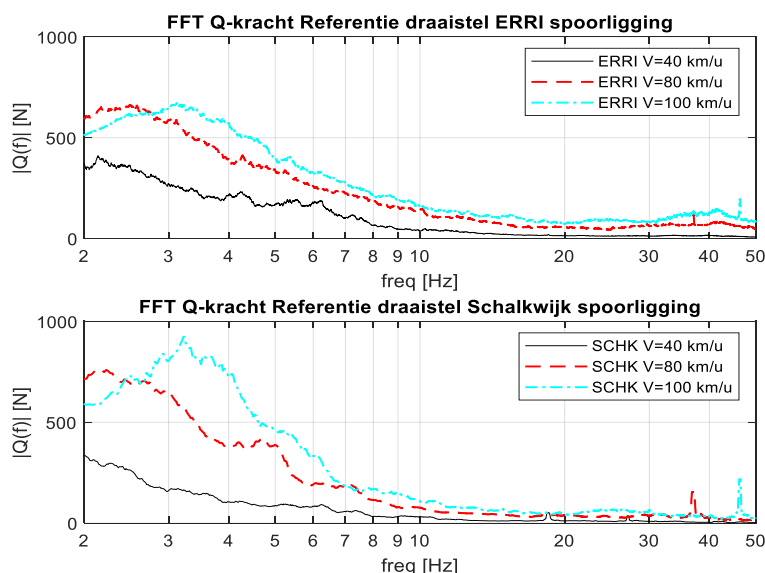
relatie tot goederenwagens. Binnen rapportage [9] zijn de resultaten vastgelegd voor diverse typen NS reizigersmaterieel als ook locomotieven.

5.1.1 Goederenwagen (type Falns met Y25 draaistel)

Figuur 1 toont de gemiddelde FFT-spectra van de Q-krachten voor de simulaties met het referentie draaistel (Falns) in combinatie met het baanmodel ERRI, bij een snelheid van 100 km/u. De donkere lijn. De maximale kracht treedt op bij een frequentie van ca. 3 Hz. De verhoging van het krachtniveau rond de frequentie van 3 Hz is afkomstig van de eigenfrequentie waarbij de bak + draaistel in de primaire vering beweegt. Figuur 2 laat zien dat voor de situatie Schalkwijk (gemeten spoorligging met relatief slappe ondergrond) de maximale kracht hoger ligt dan voor het ERRI spoor, deze bedraagt bij een rijnsnelheid van 100 km/u ca. 1 kN.



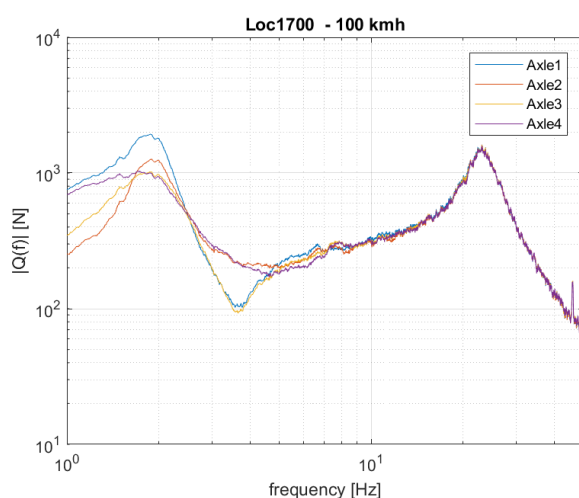
Figuur 1: Gemiddelde FFT-spectra van de Q-krachten per as uit de simulaties met ERRI spoorligging [8].



Figuur 2: Invloed van de snelheid op het Q-krachten niveau per as van het referentie draaistel Y25, voor de ERRI en Schalkwijk spoorligging [8].

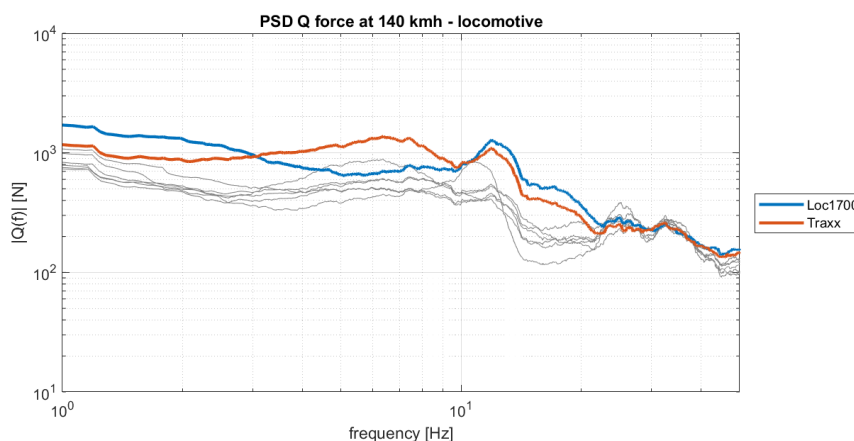
5.1.2 Locomotieven

Figuur 3 toont de resultaten voor de Loc1700 in combinatie met het ERRI spoor. Deze figuur laat duidelijk twee pieken zien in de overdracht. Een piek bij een frequentie van ca 2 Hz en een piek bij ca 22 Hz. Een dergelijke vorm van de PSD is kenmerkend voor een voertuig met twee veerniveaus: een primaire vering en een secundaire vering. De piek bij 2 Hz hoort bij de verticale eigenfrequentie van de bak op de secundaire vering. De piek laat zien dat deze beweging resulteert in een verhoogd niveau van de wiel-rail krachten bij deze frequentie. De piek bij 22 Hz hoort bij de verticale beweging van het wielstel en spoor ten opzichte van de primaire vering. Ook deze beweging zorgt voor een verhoging van de wiel-rail krachten.



Figuur 3: PSD Loc1700 bij 100 km/u (ERRI spoor) [9].

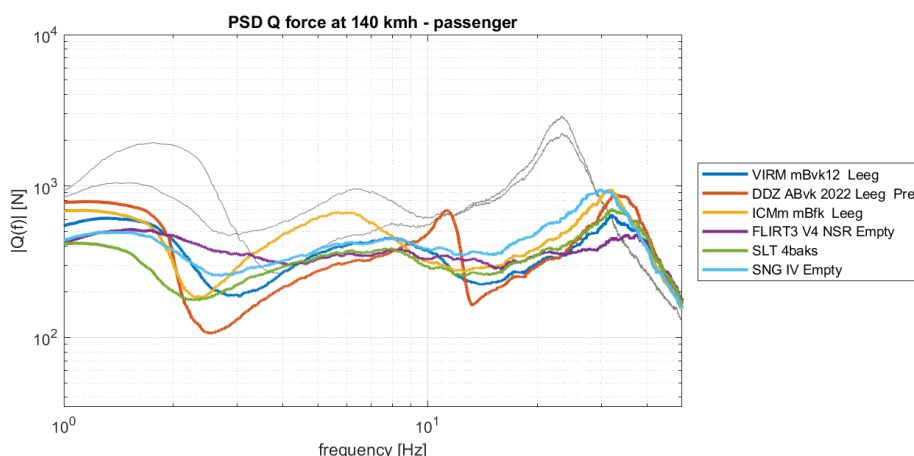
Het praktijkspoor bij Schalkwijk (figuur 4) laat vooral zien dat de bijdrage bij golflengten kleiner dan 3 m, en overeenkomstige frequenties, lager is dan bij het ERRI spoor. Dit resulteert vooral in een lagere dynamische belasting bij hogere frequenties. Het effect hiervan is onder andere dat de dominante trillingen van de locomotieven tussen de 10 Hz en 30 Hz hier vrijwel geen rol spelen.



Figuur 4: PSD Loc1700 en TRAXX bij 140 km/u (Spoorligging Schalkwijk) [9].

5.1.3 Reizigersmaterieel

De dynamische belasting loopt snel terug boven de frequentie van 1 Hz. Daarna is de belasting vrij constant tot een frequentie van de 20 Hz. Rond ca 30 Hz treedt dan weer een lichte verhoging op. Deze karakteristiek hangt sterk samen met de dynamische eigenschappen. De belasting rond 1 Hz hangt samen met de verticale eigenfrequentie van de bak. Deze ligt bij reizigersmaterieel vrijwel altijd rond de 1 Hz. De relatief hoge belasting rond 20 Hz hangt wordt veroorzaakt door de verticale eigenfrequentie van het wielstel en spoorstaaf in de primaire vering. Ook die is voor de verschillende typen reizigersmaterieel behoorlijk gelijk.



Figuur 5: Dynamische belasting ERRI spoor - reizigersmaterieel - 140 km/u (de grijze lijnen betreft de uitvoer voor twee type locomotieven) [9].

5.1.4 Bevindingen simulaties samengevat

De algemene ervaring is dat in de praktijk beladen goederenmaterieel de hoogste trillingsoverlast geeft. Ten aanzien van het verschil tussen de verschillende voertuigtypen (bij gelijke snelheid) zien we de volgende kenmerken:

- Uit de simulatieresultaten is gebleken dat voor alle baanmodellen het Q-krachten niveau van de beladen goederenwagens significant boven die voor de lege goederenwagens ligt bij frequenties onder de 20 Hz. Bij hogere frequenties is er nauwelijks verschil tussen leeg en beladen. De resultaten van de beladen wagen zijn daarmee maatgevend ten opzichte van lege wagens.
- Voor locomotieven treedt de maximale kracht op bij een frequentie van ca. 2 Hz.
- Voor goederenwagens treedt de maximale kracht op bij een frequentie van ca. 3 Hz.

Per frequentiegebied valt op:

- Tot een frequentie van ca 5 Hz resulteren de beladen goederenwagens ook t.o.v. de locomotieven en reizigerstreinen in de hoogste dynamische belasting per as. waarbij tussen de 2 Hz en 4 Hz de belasting van beladen goederenwagens duidelijk hoger is dan die van reizigersmaterieel. Dit hangt samen met de beweging van bak inclusief zware belading in de primaire vering.
- Tussen de ca 5 Hz en 10 Hz leveren de locomotieven en de beladen goederenwagen met het standaard Y25 draaistel de hoogste belasting. Trillingen in dit frequentiegebied worden veroorzaakt door de verticale beweging van het draaistel in de primaire vering.

- Bij frequenties tussen de ca 10 Hz en 30 Hz leveren de locomotieven de hoogste dynamische belasting per as. Deze hangt samen met bewegingen van het zware wielstel in de primaire vering. De belasting per as van de reizigerstreinen en goederenwagens zijn vergelijkbaar en liggen op een aanzienlijk lager niveau.
- Boven de 30 Hz neemt de dynamische belasting snel af en is deze vergelijkbaar voor de verschillende typen voertuigen. Wel zien we in dit bereik de specifieke frequentie ten gevolge van de dwarsliggerafstand terug komen als een flinke belastingspiek. Bij 80 km/u en 100 km/u zijn deze frequenties respectievelijk 37 Hz en 46 Hz.

5.2 Aanvullende specificaties specifiek voor de Nederlandse situatie

De simulatieresultaten voor de Nederlandse situatie, waarbij een relatief slappe baan is gesimuleerd, duiden erop dat relatief lage frequenties een belangrijk aandeel hebben in excitatie tussen voertuig en baan. Dit houdt in dat, ons inziens, het frequentiebereik van de kunstmatige trillingsbron dient te worden vergroot, ten opzichte van de DIN norm. Waar [2] voor een harmonische aanstoting een ondergrens hanteert van 5 Hz (par. 4.1.3) heeft voor de Nederlandse situatie een ondergrens van 2 Hz de voorkeur.

6 Lijst van verkrijgbare kunstmatige trillingsbronnen

Op basis van het marktonderzoek uitgevoerd via zoekresultaten op het internet en de beschikbare DIN normen is een lijst opgesteld, zie Bijlage 1.

7 Conclusie

In het kader van Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen (IBS) heeft ProRail behoefte aan een meetprotocol voor de uitvoering van trillingsmetingen en een specificatie voor een kunstmatige trillingsbron. ProRail heeft DEKRA gevraagd een specificatie op te stellen waarbij gestart is met een deskstudie. Tijdens de deskstudie is de reeds bestaande DIN SPEC 45673-3 (2014) [2] gevonden die direct toepasbaar lijkt voor de door ProRail toepassing.

In deze DIN norm [2] worden zowel de meet- als evaluatiemethode bij toepassing van een kunstmatige trillingsbron gespecificeerd. Uit de uitgevoerde inhoudelijke beoordeling wordt geconcludeerd dat IBS voor specificatie van een kunstmatige trillingsbron gebruik kan maken van DIN SPEC 45673-3 (2014).

Voor de wijze van de uitvoering van de trillingsmetingen met kunstmatige trillingsbron geldt dat het huidige ProRail Uniform Meetprotocol Trilling (UMT) gevolgd kan worden.

Specificatie kunstmatige trillingsbronnen

De norm DIN SPEC 45673-3 “Mechanische Schwingungen – Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen – Teil 3: Messtechnische Ermittlung der Einfügungsdämmung im eingebauten Zustand (Versuchsaufbau und Betriebsgleis)” April 2014 beschrijft o.a. de toepassing van een kunstmatige trillingsbron, in Duits “Ersatzanregung”, zie [2].

In deze DIN norm [2] worden zowel de meet- als evaluatiemethode bij toepassing van een kunstmatige trillingsbron gespecificeerd. Tevens worden voorbeelden gegeven van mogelijk in te zetten kunstmatige trillingsbronnen.

Deze DIN norm [2] sluit goed aan bij de gestelde doelstelling voor het specificeren van een kunstmatige trillingsbron voor trillingsmetingen in NL. In deze DIN norm zijn resultaten verwerkt uit het eerder uitgevoerde Europese onderzoek “RIVAS” in 2013.

Aanvullend is beoordeeld of en zo ja op welke aspecten er als gevolg van de specifieke Nederlandse situatie een aanvulling vereist is op [2] . Hieruit komt één belangrijke aanpassing naar voren:

- De simulatieresultaten voor de Nederlandse situatie, waarbij een relatief slappe baan is gesimuleerd, duiden erop dat relatief lage frequenties een belangrijk aandeel hebben in excitatie tussen voertuig en baan. Dit houdt in dat o.i. het frequentiebereik van de kunstmatige trillingsbron te worden vergroot. Waar [2] voor een harmonische aanstoting een ondergrens hanteert van 5 Hz (par. 4.1.3)) heeft voor de Nederlandse situatie een ondergrens van 2 Hz de voorkeur.

Meetmethode

DIN SPEC 45673-3 [2] verwijst voor de wijze van uitvoering van de trillingsmetingen naar DIN 45672-1 [3]. De vraag stelt zich of, vanuit de wens naar uniformiteit binnen het IBS programma, voor de wijze van uitvoering van de trillingsmetingen mogelijk direct naar het IBS Uniform Meetprotocol Trillingen (UMT) kan worden verwezen. Voor de beantwoording van deze vraag is een verschil-analyse uitgevoerd tussen beide documenten. Uit de gedetailleerde vergelijking is gebleken dat het UMT meer uitgebreid, gedetailleerd en compleet is in vergelijking met de DIN 45672-1. Dit geldt met name voor de meetlocaties, de meetpunten, de passagesnelheden, het aantal passages en het meetjournaal/protocol. Een directe verwijzing naar het UMT is daarmee mogelijk.

Aanvullend is beoordeeld of en zo ja op welke aspecten er mogelijk een aanvulling op het UMT is vereist wanneer als gevolg van de inzet van het UMT in plaats van [3]. Hieruit komt slechts één verschil naar voren: [3] stelt dat de effectmeting op zijn vroegst 6 weken na het begin van het normale bedrijf mag worden uitgevoerd, het UMT stelt hiervoor 4 weken. Ons voorstel is de zes weken van [3] te volgen.

8 Tekstvoorstel voor addendum aan UMT

Voor het vaststellen van de mate van trillingsdamping (invoegverlies) van maatregelen in de spoorbaan dient, bij gebruik van een kunstmatige trillingsbron, DIN SPEC 45673-3 (2014) te worden gehanteerd (met als aanvulling hierop *)). In deze DIN norm [2] worden zowel de meet- als evaluatiemethode bij toepassing van een kunstmatige trillingsbron gespecificeerd. Tevens worden voorbeelden gegeven van mogelijk in te zetten kunstmatige trillingsbronnen.

Voor de wijze van de uitvoering van de trillingsmetingen waarbij gebruik gemaakt wordt van een kunstmatige trillingsbron geldt dat het ProRail Uniform Meetprotocol Trillingen (UMT) leidend is. Daar waar de meet- en evaluatiemethode van [2] afwijkt van het UMT die laatstgenoemde te worden gevolgd.

*) De Nederlandse situatie, met een relatief slappe baan, resulteert erin dat relatief lage frequenties een belangrijk aandeel hebben in excitatie tussen voertuig en baan. Het frequentiebereik van de kunstmatige trillingsbron dient hier op aan te sluiten. Waar [2] voor een harmonische aanstoting een ondergrens hanteert van 5 Hz (par. 4.1.3) heeft voor de Nederlandse situatie een ondergrens van 2 Hz de voorkeur.

Toepassingsgebied

In [2] is als 'Anwendungsbereich' opgenomen dat een kunstmatige trillingsbron vooral geschikt is om een relatieve vergelijking met trillingsreducerende maatregelen uit te voeren. Een kunstmatige trillingsbron is daarbij geschikt om de dynamische excitatie op te wekken zoals deze optreedt tijdens treinpassage (o.a. als gevolg van spooronregelmatigheden, stijfheidsvariaties in de ondersteuning van het spoor en wiellastvariaties). Echter, de kunstmatige trillingsbron is niet of slechts deels bruikbaar als simulatie van de quasi-statische belasting van passerende treinen (de zogenoemde 'moving load').

In situaties waarin de quasi-statische belasting van het spoor (de bewegende massa van de trein die 'de baan' indrukt) maatgevend is voor de trillingen in de omgeving, moet kritisch worden gekeken naar het gebruik van een kunstmatige trillingsbron. Bij een relatief slap baanlichaam speelt de quasi-statische belasting van het spoor een belangrijke rol.

Literatuur

- [1] ProRail Uniform Meetprotocol IBS Trillingen, WBD2021-055 versie 2.0 31 augustus 2022 Definitief, inclusief alle daarin vermelde normen;
- [2] DIN SPEC 45673-3 “ Mechanische Schwingungen – Elastische Elementen des Oberbaus von Schienenfahrwegen – Teil 3: Messtechnische Ermittlung der Einfügungsdämmung im eingebauten Zustand (Versuchsaufbau und Betriebsgleis) April 2014;
- [3] DIN 45672-1:Schwingungsmessung an Schienenverkehrswegen – Teil 1: Messverfahren für Schwingungen, Februar 2018;
- [4] DIN 45672-2:Schwingungsmessung an Schienenverkehrswegen – Teil 2: Auswerteverfahren, November 2020;
- [5] DIN 45669-1 Measurement of vibration immissions - Part 1: Vibration meters - Requirements and tests;
- [6] RIVAS_db_wpl_d1_10_test_procedures_V_1.0_final (07-05-14), version 1.0, Final 31-12-2013, Description of test procedures based on laboratory tests and field tests including validation (Deliverable D1.10);
- [7] R. Garburg, D. Heiland, M. Mistler; Determination of Insertion Losses for Vibration Mitigation Measures in Track by Artificial Vibration Excitation, Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems pp 237–244 (2015)
- [8] DEKRA Rail: IBS ‘Trillingsvriendelijk Goederenmaterieel - Simulaties t.b.v. bureaustudie draaistelconfiguratie’ DR/21/210496/005, 22 april 2023, 1.0 definitief.
- [9] RICARDO: IBS ‘Simulaties van trillingsbelasting op het spoor’ Reference: SII/TR/6913/03-839617. 18 april 2024.

Bijlage 1: Lijst van kunstmatige trillingsbronnen en leveranciers

Nr.	Firma	Land	Productnaam	Link website
1	DIN SPEC 45673-3:2014-04 Anhang C (informativ) biedt een overzicht van een aantal kunstmatige trillingsbronnen (voorbeelden C1 t/m C7). Onderstaand zijn de harmonische en hydraulische trillingsbronnen opgenomen als genoemd in [2].			
2	MÜLLER BBM	Duitsland	DYNAQ® Imbalance exciter (from 5 Hz)	Betreft C4 uit [2] MBBM Folder DYNAQ en.pdf (muellerbbm.com)
3	Heiland & Mistler	Duitsland	Butterfly® Force and velocity controlled shaker (from 0,1 Hz)	Betreft C6/7 uit [2] Excitation Systems - Baudynamik Heiland & Mistler GmbH - www.baudynamik.de
4	SERCEL	Frankrijk	Nomad 65 Neo All-terrain broadband vibrator (from 5,4 Hz)	Betreft C8 uit [2] Nomad 65 Neo Sercel