

WEBOOST

ProRail

UNIFORM MEETPROTOCOL IBS

TRILLINGEN





COLOFON

Auteur Pieter Boon
pieter@we-boost.nl
+31 6 10 03 94 54



Projectcode WBD2021-055
Versienr 2.0
Datum 31 augustus 2022
Status Definitief



Opdrachtgever ProRail B.V.



© We-Boost 2022

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van We-Boost.





INHOUD

Begrippenlijst	5
Verschillen t.o.v. vorige versie	7
1 Doel en toepassingsgebied	8
1.1 Aanleiding van dit meetprotocol	8
1.2 Doel van dit meetprotocol	8
1.3 Toepassingsgebied van dit meetprotocol	9
1.4 Leeswijzer	11
2 Voorbereiding van een meting	12
2.1 Doel van de meting	12
2.2 Keuze van de meetlocatie	13
2.3 Locatie en aantal meetpunten	15
2.4 Eisen aan apparatuur	24
2.5 Meetomstandigheden	26
3 Uitvoering van een meting	28
3.1 Plaatsing van apparatuur	28
3.2 Meetduur	30
4 Verwerking van data	33
4.1 Verwerking van ruwe data	33
4.2 Vaststellen van effect maatregel	35
4.3 Omgaan met onzekerheden	38
5 Rapportage en vastlegging	40
5.1 Eisen aan rapportage	40





5.2 Eisen aan grafieken en tabellen..... 42

5.3 Eisen aan data-opslag en format..... 43

6 Gebruikte bronnen 45

Bijlage I – Meetjournaal 47

Bijlage II – Metingen i.h.k.v. OURS-model van RIVM 48

Bijlage III – Detailoverzichten per metingtype..... 51

Bijlage IV – Achtergrondinformatie over aantallen treinen 59





BEGRIPPENLIJST

Treintype

Categorietype van trein vanuit benamingen QuoVadis-stations, voor reizigerstreinen wordt dat als volgt vereenvoudigd:

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

Voor overige treinen (goederentreinen, onderhoudstreinen, locomotieven) per beladingsklasse (waarbij wagontype wel dient te worden vastgelegd):

Beladingsklasse	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





Treincategorie
Effect
Invoegverlies

E	22.5 tot 25.0 ton
---	-------------------

Treintype per spoor, met een maximale snelheidsvariatie van +/- 5%
Afname van de trillingssnelheid als gevolg van een maatregel
Effect van een maatregel op het equivalente krachtsspectrum





VERSCHILLEN T.O.V. VORIGE VERSIE

Dit meetprotocol is op een aantal onderdelen gewijzigd ten opzichte van versie 1.0 (17 juni 2022):

- **Eis 2.3.9** is toegevoegd, waarin de oriëntatie van meetpunten in of aan gebouwen nader is toegelicht. Als gevolg hiervan is de eerdere eis 2.3.9 hernoemd in **2.3.10**
- **Eis 2.3.10.a:** formule is gecorrigeerd, hier was abusievelijk de formule voor de variantie in plaats van de standaardafwijking gegeven.
- **Eis 3.1.2** is hernoemd, was eerst eis 2.3.3 (foutieve nummering). Als gevolg hiervan zijn eisen 3.1.2 en 3.1.3. hernoemd in **3.1.3** resp. **3.1.4**
- **Eis 5.2.4** heeft een nadere duiding gekregen over hoe effect en invoegverlies van maatregelen in dB om te rekenen naar procenten.
- Nummering van de eisen in Bijlage II is aangepast.



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 Bronaanpak 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 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
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.

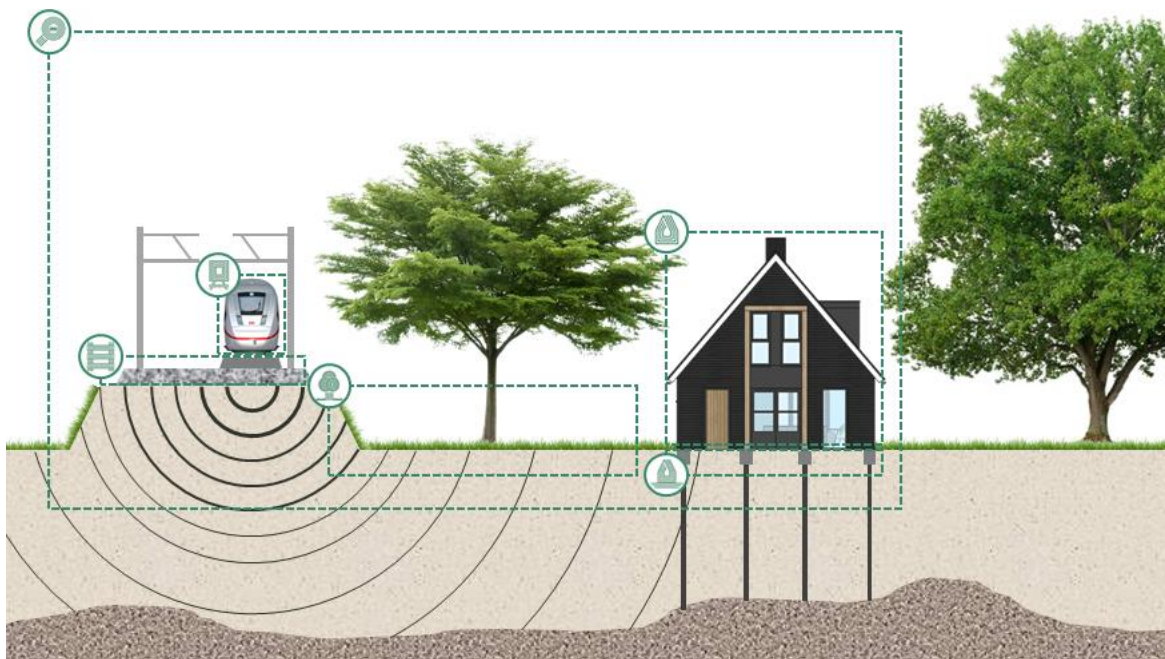
¹ ProRail (2018)

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
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

Welk type meting geschikt is voor welk onderzoeksdoel is weergegeven in Tabel 1. Voor sommige combinaties van doel en metingstype is al **we** 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

Doel onderzoek	Aspotmetingen	Spoormetingen	Maaiveldmetingen	Funderingsmetingen	Woningmetingen	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						

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

Het toepassingsgebied van dit meetprotocol is daarom de **grijs** 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

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.

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>



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, **groen** 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 herkenningpunten 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)*.



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: alleen door vooraf goed na te denken over mogelijk relevante effecten en de metingen op basis van die mogelijke effecten op te zetten, kan een onderzoek ook daadwerkelijk bijdragen aan kennisopbouw. De hypothese beïnvloedt keuzes over *wat* je gaat meten, *waar*, *wanneer* en *hoeveel* je wilt meten⁷. De allereerste stap moet daarom zijn het kiezen van een goede hypothese of onderzoeksvraag. Elementen die in elke onderzoeksvraag terug moeten komen:

1. Wat je wilt weten
2. Hoe nauwkeurig je dat wilt weten
3. Waarom je dat wilt weten

Een voorbeeld van een onderzoeksvraag, gebaseerd op de hypothese dat een ballastmat de trillingen van treinen vermindert, is:

Wat is met een betrouwbaarheidsinterval van 90 procent het effect van een ballastmat type B op de trillingen van treinen?

Deze vraag omvat wat we willen weten (het effect van een ballastmat type B op trillingen van locomotieven van type TRAXX) als hoe nauwkeurig we dat willen weten (betrouwbaarheidsinterval van 90%). Het waarom (motivatie) ontbreekt echter. Gevolg is dat de opzet en uitvoering van de meting heel breed kan zijn. Zo is bijvoorbeeld onduidelijk (1) bij welke snelheid/snelheden je dit wilt weten, (2) voor welke bodemtypes je dit wilt weten en (3) voor welke spoorconstructies je dit wilt weten. Door de motivatie toe te voegen, wordt de doelstelling scherper:

Treinen op hoge snelheid (> 100 km/h) zorgen op een zandbodembodem voor veel klachten over trillingen, met name bij spoor in ballast. Dit komt vooral door de hoogfrequente trillingen op zandbodems. Op basis van literatuur verwachten we dat een ballastmat voor die frequenties effectief is. We willen daarom onderzoeken of een ballastmat type B de trillingen minimaal voelbaar (> 30 procent) kan laten afnemen. De hoofdvraag van dit onderzoek luidt daarom: wat is met een betrouwbaarheidsinterval van 90 procent het effect van een ballastmat type B op de trillingen van treinen bij snelheden boven 100 km/h, op zandbodems en bij spoor in ballast?

Nu is helder af te kaderen wat je wilt meten, waar je dat gaat meten, wanneer je dat gaat meten en hoeveel je wilt meten (in aantal meetpunten en aantal treinpassages, bepalend voor de gewenste onzekerheidsmarge in het effect van de maatregel).

⁷ Hölscher (2003)

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 moet langer zijn dan 100 meter, binnen 50 meter aan weerszijden van het onderzoekspunt mogen geen significante invloedsfactoren aanwezig zijn⁹.

2.2.1.b De boogstraal van de testsectie moet groter zijn dan 1000 meter.

2.2.2 Een onderzoeksgebied op maaiveld moet aan de volgende eisen voldoen¹⁰:

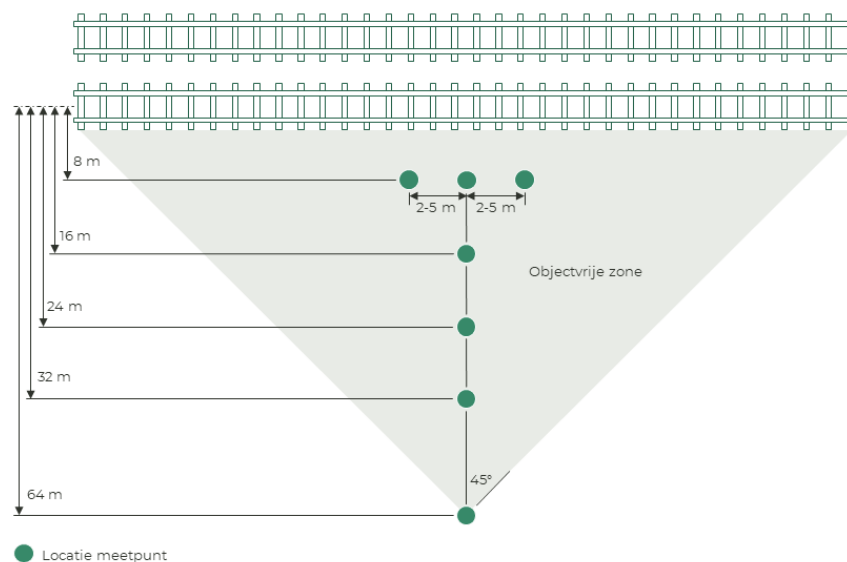
2.2.2.a Hoogteverschillen tussen spoor en maaiveld moeten kleiner zijn dan 1 meter.

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 moet voldoen aan de volgende eisen, 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.



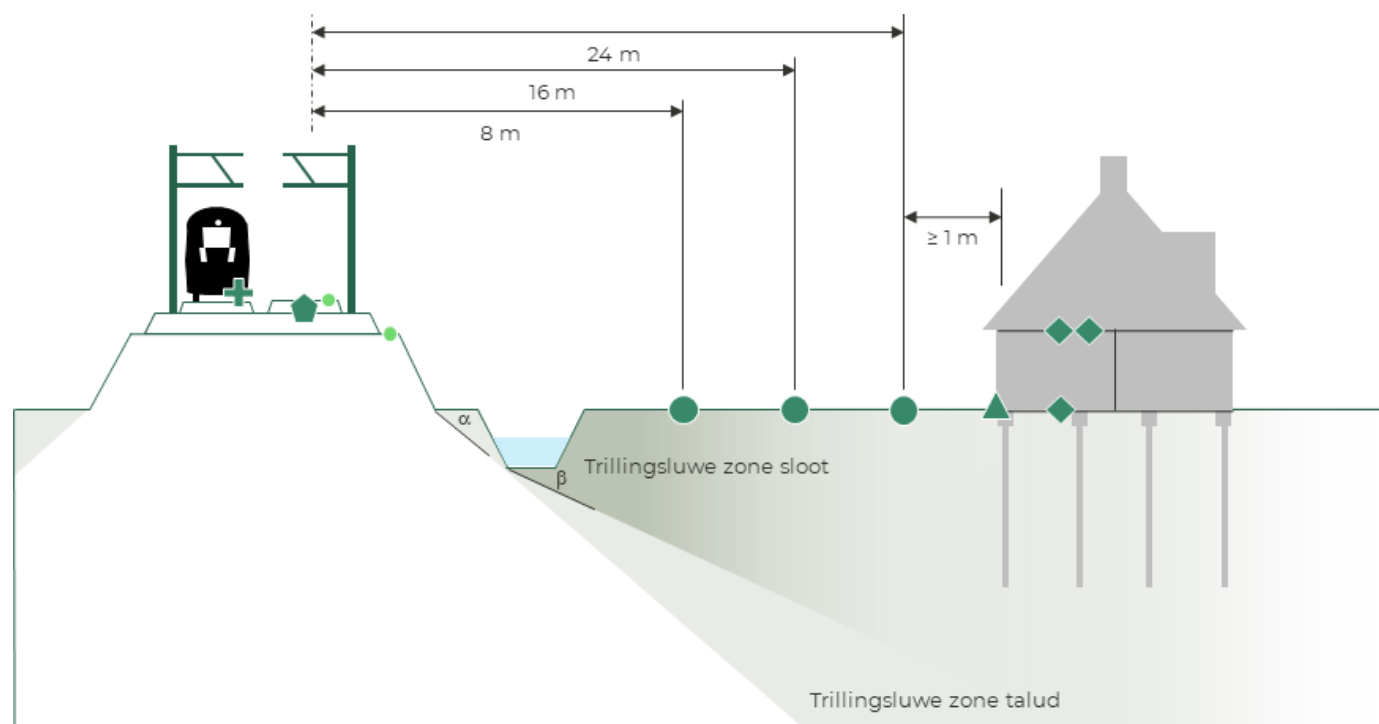
⁸ RIVAS Deliverables D1.2 (2011) en D1.11 (2013), en ISO14837-1 (2005), -32 (2015) en -31 (2017), Garburg (2019), FTA (2018), eis is van toepassing bij vaststellen effect maatregel. Uitzonderingen hierop zijn uiteraard situaties waarbij juist het effect van deze invloeden moet worden vastgesteld. Als 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 Voorbeelden zijn bijv. ES-lassen (als doorgaand spoor moet worden onderzocht), overwegen, bruggen of duikers

¹⁰ 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. Vanzelfsprekend wordt van bovenstaande afgeweken als het beoogde 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 conform 4.2.10 en 4.2.11 .
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^{11,12,13,14,15}. 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 dienen te worden aangebracht aan de aspotten van de trein ¹⁶ .
2.3.4	Voor metingen aan of in het spoor gelden de volgende eisen:

¹¹ 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).

¹² RIVAS Deliverable D1.11 (2013) voor de eisen aan metingen met een kunstmatige bron (MASW en SASW)

¹³ 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

¹⁴ De SBR A (2017) en SBR B (2006) voor metingen aan en in woningen

¹⁵ 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.

¹⁶ 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.



2.3.4.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).
2.3.4.c	Meetpunten dienen te worden aangebracht op alle te onderzoeken sporen.
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 het 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 trillingsspectrum (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.
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 conform 4.1.8 t/m 4.1.12.
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 eisen uit de SBR A (2017). Afhankelijk van het doel van het onderzoek kan worden gekozen voor meetpunten op basis van een beperkte, indicatieve of uitgebreide meting. 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.
2.3.7	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 (lieft 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 dichtbij gelegen 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.
- 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.

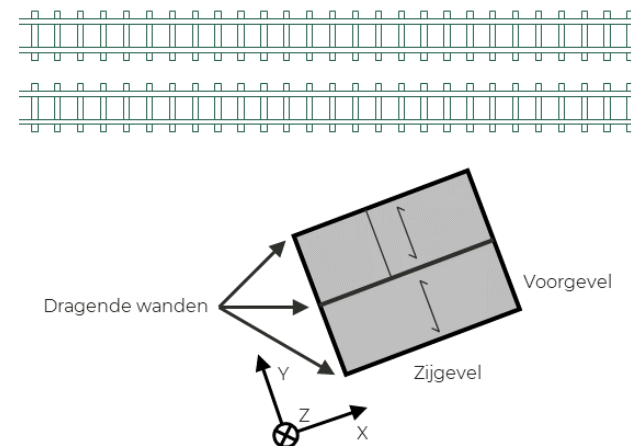
2.3.8.d Bij emissiemetingen in het kader van het aanvullen van de **emissiedatabase van het rekenmodel OURS**, zijn aanvullende meetpunten benodigd. Het gaat dan om een grid van 3 x 3 meetpunten op onderlinge afstanden van 25 meter, met de eerste meetpunten op 25 meter van de middellijn tussen de twee meest nabij gelegen 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:

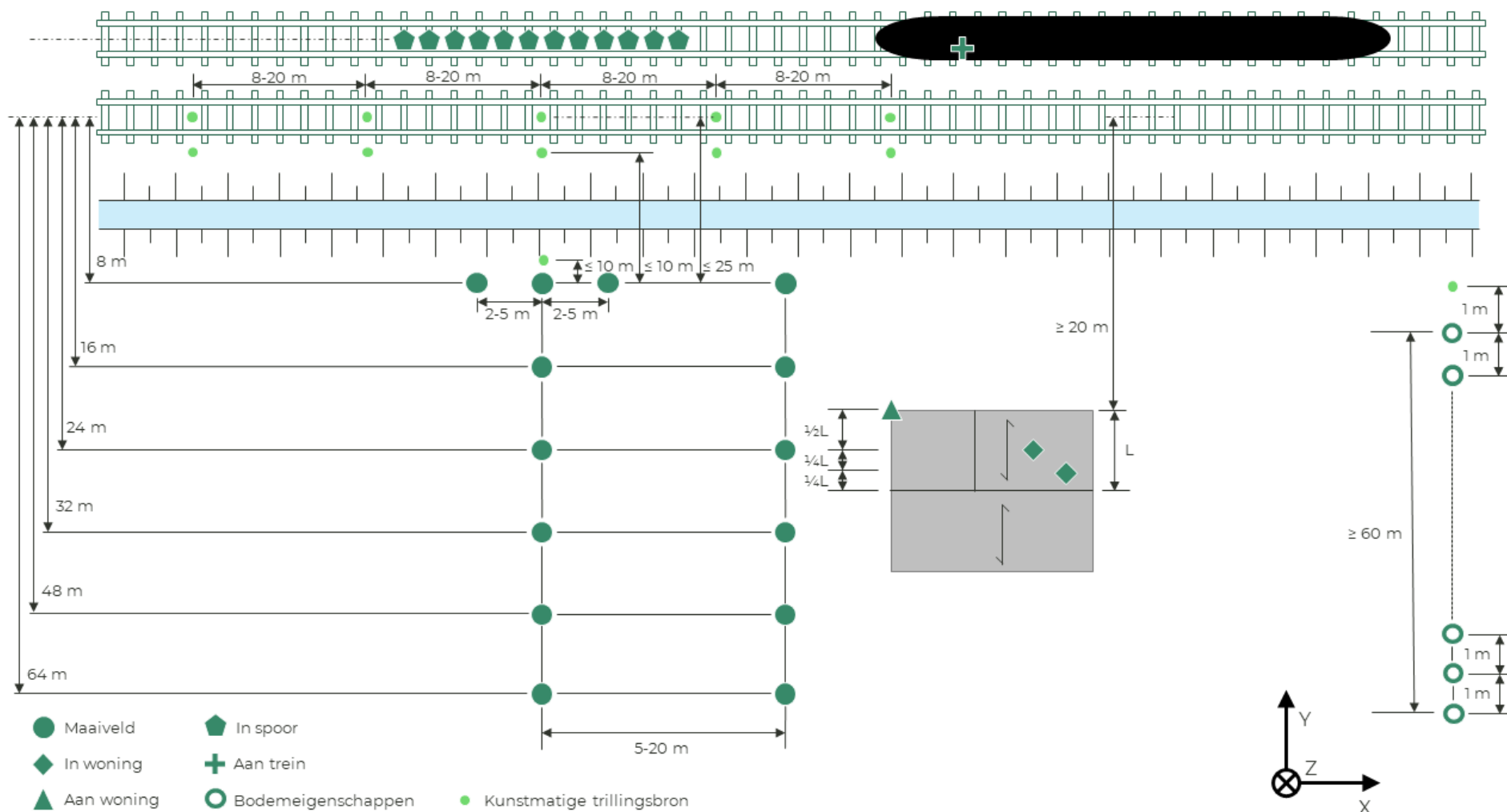
- X-as: parallel aan het spoor
- Y-as: dwars op het spoor
- Z-as: verticaal

Bij metingen in of aan een gebouw moeten de assen van het gebouw worden gevolgd, zie Figuur 3:

- X-as: parallel aan dragende wanden
- Y-as: loodrecht op dragende wanden (meestal parallel aan voorgevel)
- 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

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:

- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 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.
 - Anderzijds, de onzekerheden zijn vaak ook 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.
 - In de onzekerheid kunnen vier aspecten worden onderscheiden:
 - 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%.
 - 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.
 - 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 meteorologische omstandigheden.
 - 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 aantal meetpunten, in lijn met bovenstaande aandachtspunten, te definiëren, gelden de volgende eisen (hier uitgewerkt voor een situatie waarbij tertsbandspectra nodig zijn):

2.3.10

Om de gewenste onzekerheid te bepalen (o.b.v. de onderzoeksvraag, bijv. 10 procentpunt afwijking in het effect van een maatregel, of 20 procent onzekerheid in het gemiddelde tertsbandspectrum) dient als volgt te werk worden gegaan¹⁷:

2.3.10.a

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:

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

Tabel 2 dient als volgt te worden gebruikt:

- Bepaal de totale variatiecoëfficiënt voor absolute metingen (bijv. vaststellen bronsterkte) als volgt, waarbij variatiecoëfficiënten dienen te worden gecombineerd conform **4.3.3** (vergelijking 16):
 - Gebruik een variatiecoëfficiënt voor de trillings**bron** op basis van de informatie uit paragraaf 3.2.
 - Gebruik een variatiecoëfficiënt van 0.1 voor de onzekerheid in het meetsysteem, tenzij kan worden gemotiveerd dat de onzekerheid in het meetsysteem lager is.
 - Gebruik de variatiecoëfficiënt 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.
 - Gebruik, wanneer robuuste uitspraken moeten worden gedaan over de betrouwbaarheid van het bronniveau, ook de variatiecoëfficiënten 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 funderingen beschrijft).
- Bepaal de totale variatiecoëfficiënt voor herhaalmetingen (bijv. vaststellen effect maatregel) als volgt, waarbij variatiecoëfficiënten dienen te worden gecombineerd conform **4.3.3** (vergelijking 16):
 - Gebruik een variatiecoëfficiënt voor de trillings**bron** op basis van de informatie uit paragraaf 3.2.
 - Gebruik een variatiecoëfficiënt 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.
 - Gebruik de variatiecoëfficiënt 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.

¹⁷ RIVAS Deliverables D1.2 (2011) en D1.11 (2013), en ISO14837-1 (2005), -32 (2015) en -32 (2017), Garburg (2019) en FTA (2018).

- o Gebruik, als er niet wordt gemeten onder dezelfde meteorologische omstandigheden en spoorligging, ook de variatiecoëfficiënt voor **tijd** uit Tabel 2.
- o Gebruik eventueel een **extra variatiecoëfficiënt** 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 zijn

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

$$\beta = T^{-1}(P, n - 1) \quad (2)$$

2.3.10.c Bepaal de onzekerheid in het gemiddelde:

$$\text{Onzekerheid in gemiddelde} = 100\% \cdot e^{\beta \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}} - 1 \quad (3)$$

Om de bepaling van het aantal meetpunten te vergemakkelijken, is een tabel voor $P=90\%$ weergegeven in Tabel 3. Voor andere variatiecoëfficiënten kan deze eenvoudig worden berekend met bovenstaande vergelijkingen (2) en (3).

Tabel 3 Onzekerheid in gemiddelde voor 90% betrouwbaarheidsinterval, gegeven aantal meetpunten en variatiecoëfficiënt (ref mm/s)

# meetpunten	Variatiecoëfficiënt CV									
	0.01	0.02	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
2	2%	4%	11%	24%	38%	54%	71%	89%	110%	131%
3	1%	2%	6%	11%	18%	24%	31%	38%	45%	52%

4	1%	2%	4%	9%	13%	18%	22%	27%	32%	37%
5	1%	1%	3%	7%	11%	15%	18%	22%	26%	30%
6	1%	1%	3%	6%	9%	13%	16%	19%	23%	26%
7	1%	1%	3%	6%	8%	11%	14%	17%	20%	23%
8	1%	1%	3%	5%	8%	10%	13%	16%	19%	21%
9	0%	1%	2%	5%	7%	10%	12%	15%	17%	20%
10	0%	1%	2%	4%	7%	9%	11%	14%	16%	18%
15	0%	1%	2%	4%	5%	7%	9%	11%	13%	14%
20	0%	1%	1%	3%	5%	6%	8%	9%	11%	12%
25	0%	1%	1%	3%	4%	5%	7%	8%	9%	11%
30	0%	0%	1%	2%	4%	5%	6%	7%	8%	10%
35	0%	0%	1%	2%	3%	4%	6%	7%	8%	9%
40	0%	0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%

2.3.10.d Bepaal het aantal meetpunten dat nodig is om te voldoen aan de gewenste nauwkeurigheid van het onderzoek. Indien dat niet kan worden gehaald, onderzoek dan of het mogelijk is om bepaalde onzekerheden te verminderen. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van de hierboven gegeven algemene richtlijnen.

In onderstaand kader is een concreet voorbeeld uitgewerkt.

Bij een meting op maaiveld wordt het effect van een maatregel vastgesteld. De wens is om met een betrouwbaarheid van 90 procent aan te geven of de trillingen door de maatregel met 40 procent (+/- 10 procentpunt onzekerheid) afnemen. Nu geldt voor de verschillende variatiecoëfficiënten het volgende:

1. **Meetketen:** bij gebruik van hetzelfde meetsysteem: CV = 0.0
2. **Bron:** vanwege praktische restricties is het mogelijk om maximaal 10 treinen per klasse en per spoor te meten, met een snelheidsvariatie van +/- 5 procent, conform Tabel 4: CV = 0.2. Verder geldt een aanvullende variatie in effect van de maatregel op basis van literatuur: CV = 0.2
3. **Bodem:** identieke meteo- en onderhoudscondities: CV = 0.0
4. **Ontvanger:** herplaatsen van meetpunten op maaiveld, conform Tabel 2: CV = 0.3

De totale variatiecoëfficiënt is conform 4.3.3 (vergelijking 16) nu gelijk aan 0.41. Om met een betrouwbaarheid van 90 procent uitspraken te kunnen doen over of de maatregel tussen de 30 en 50 procent effect heeft (40 procent +/- 10 procentpunt), geldt dat in Tabel 3 moet worden gezocht naar de cel voor een CV-waarde van 0.41, en een onzekerheid van 25 procent (10 procentpunt / 40 procent). In dit geval zijn 6 meetpunten nodig op maaiveld. Een meetopstelling die voldoet aan de gewenste

betrouwbaarheid heeft in dit geval dus minimaal 6 meetpunten op vergelijkbare ondergrond en afstand tot het spoor nodig. Wanneer meteo- en onderhoudscondities niet vergelijkbaar zijn, neemt het aantal benodigde punten snel toe. Om het aantal meetpunten te beperken kan er voor worden gekozen om de meetpunten te laten staan (dan vervalt de onzekerheid van herplaatsing), om meer treinen te meten of te meten op een ander type ondergrond (asfalt bijvoorbeeld).

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 aan de apparatuur gesteld:

2.4.1	Trillingsmeters dienen te voldoen aan onderstaande eisen:
2.4.1.a	Type sensor ¹⁸ : • Versnelling • Snelheid, mits ondergrens van de meetfrequentie hoger is dan 1 Hz. Niet toegestaan bij metingen aan treinen¹⁹
2.4.1.b	Meetbereik ²⁰ : • Versnellingsopnemer: 60 $\mu\text{m/s}^2$ – 30 m/s^2. Voor metingen aan treinen geldt bovengrens van 10g (horizontaal) en 70g (verticaal)²¹ • Snelheidsopnemer: 10 $\mu\text{m/s}$ – 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 ²²
2.4.1.e	Kalibratie: 2-jaarlijks ²³
2.4.1.f	Nauwkeurigheid ²⁴ : • Maximale afwijking 10%²⁵ • 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)

¹⁸ ISO14837-31 (2017), verplaatsingsmeters zijn, gezien de lagere gevoeligheid, niet geschikt. Ook piezometers zonder temperatuurcorrectie mogen niet worden gebruikt.

¹⁹ ISO14837-31 (2017)

²⁰ 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

²¹ UIC prEN13749

²² SBR A (2017), par. 7.5

²³ SBR A (2017), par. 7.4

²⁴ SBR A (2017), par. 7.5

²⁵ Deze eis sluit het gebruik van piezometers met hoge temperatuurgevoeligheid uit.

2.4.1.h	Maximaal synchronisatieverschil tussen verschillende meetpunten: 1 sample op verwerkte data ²⁶
2.4.1.i	EMC-interferentie is niet toegestaan ²⁷
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	MASW/SASW (hamer) ²⁸ : • Minimumgewicht 5 kg • Minimaal 20 klappen per locatie • Accelerometer op hamer, conform 2.4.1
2.4.2.b	Valgewicht ^{29,30} : • Minimumgewicht 50 kg • Impuls: $\geq 500 \text{ Ns}^{31}$, instelbaar in stappen van 100 Ns (+/- 25%). (OURS $\geq 1000 \text{ Ns}$ instelbaar in stappen van 300 tot 1000 Ns) • Ondergrond³²: stalen plaat, 0.25 tot 1.00 m². (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.c	Excitator ³³ : • Frequentiebereik: 3 tot 250 Hz (stapgrootte 1 Hz (+/- 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:

²⁶ T.b.v. naverwerking bij inzet van meerdere systemen.

²⁷ UIC prEN13749

²⁸ FINE2 (2022), resolutie opnemers op maaiveld is nodig om nauwkeurige bepaling bodemeigenschappen te krijgen. Minimum aantal klappen kan hoger zijn.

²⁹ Garburg (2019), ProRail (2018) en We-Boost (2020).

³⁰ Valgewicht is minder geschikt voor slappe bodems en laagfrequent geluid (vooral geschikt voor 10 – 40/60 Hz).

³¹ 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.

³² 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 m², RIVM (2020) heeft 1 m², We-Boost (2020) heeft 0.25 – 1 m²). 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.

³³ Eisen excitator o.b.v. benodigde onderzoek, verankering aan bodem is essentieel om stuiteren te voorkomen. Vooral geschikt voor frequenties > 20 Hz.

2.4.3.a	Framerate ≥ 10 fps ³⁴
2.4.3.b	Resolutie $\geq 640 \times 480$ pixels, trein op meest dichtbij gelegen spoor moet minimaal 1/3 van hoogte beeld vullen (≥ 160 pixels) ³⁵
2.4.3.c	Synchronisatieverschil met overige apparatuur ≤ 0.1 seconde ³⁶
2.4.4	Eventueel ingezette snelheidsregistratieapparatuur moet de snelheid met een maximale onzekerheid van +/- 2 procent vastleggen ³⁷
2.4.5	Eventueel ingezette apparatuur om GPS- of RD-coördinaten vast te leggen, mag een maximale onzekerheid van +/- 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	Meetfrequentie 1 tot 80/100/250 Hz, afhankelijk van doel meting. Ondergrens van 1 Hz kan optioneel worden verlaagd naar 0.1 Hz
2.4.6.b	Sample frequentie: ≥ 10 keer hoogste meetfrequentie
2.4.6.c	Maximaal synchronisatieverschil tussen verschillende meetpunten: 1 sample op verwerkte data ³⁸
2.4.6.d	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, under 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.
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 ³⁹ :
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.

³⁴ 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

³⁵ Ervaringsgetal, lagere resolutie of beeldvulling zorgt voor onvoldoende bruikbaarheid van beelden

³⁶ Ervaringsgetal, nodig voor goede koppeling met bijv. trillingen

³⁷ Voertuigen moeten kunnen worden ingedeeld in snelheidscategorieën met +/- 5%, grotere afwijking dan 2% zorgt voor te grote onzekerheid i.r.t. die 5%. RIVM (2020) benoemt 3% onzekerheid als toegestaan.

³⁸ T.b.v. naverwerking bij inzet van meerdere systemen.

³⁹ RIVAS Deliverable D1.2 (2013) en ISO14837-31 (2017)



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 bereden⁴⁰.

⁴⁰ RIVAS Deliverable D1.2 (2013)

3 UITVOERING VAN EEN METING

3.1 PLAATSIING 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 ⁴¹ . |
| 3.1.1.b | Voor trillingsopnemers aan het spoor gelden de volgende eisen ⁴² : <ul style="list-style-type: none">• 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 ⁴³ : <ul style="list-style-type: none">• Ingraven volgens onderstaande procedure:<ol style="list-style-type: none">1. Toplaag (> 20 cm) verwijderen, voor slappe bodems is het verstandig om dieper aan te brengen.2. 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.3. In één beweging met minimaal 3 pinnen (> 10 cm lang) aanbrengen. Pinnen dienen volledig in de bodem te zijn aangebracht. In bodems met veel grind en puin is het toegestaan om zonder pinnen te werken.4. Geen grond naast/op sensor om ongewenste invloeden te vermijden. Indien volledig ingraven gewenst is, maak dan gebruik van een overkluizing die de sensor niet raakt, hier kan grond op worden aangebracht⁴⁴. |

⁴¹ UIC prEN13749

⁴² FTA (2018) en RIVAS deliverable D1.11 (2011)

⁴³ ISO14837-1 (2005), ISO14837-31 (2017), RIVM (2020) 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.

⁴⁴ 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 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



	• 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 zijn vooral de horizontale trillingen anders niet representatief.
3.1.1.d	Voor trillingsopnemers aan de constructie van een gebouw gelden de volgende eisen ⁴⁵ : • 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 eisen ⁴⁶ : • Fixatie is toegestaan met schroeven, magneet, bijenwas, lijm, epoxy, dun dubbelzijdig tape of zwaartekracht. Zwaartekracht zonder fixatie is uitsluitend 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 meetpunten ⁴⁷ . Hiervoor zijn twee procedures: (1) een heeldrop test en een (2) hamertest, die dienen te voldoen aan de volgende eisen:

aangestampt of met water verdicht. Bovendien zal dit per meetbureau verschillen. Zolang de ingraafdiepte beperkt is (< 50 cm) zijn de trillingen door de toplaag ook niet 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.

⁴⁵ SBR A (2017), paragraaf 8.6 en bijlage 2 (voor bevestiging op vloerbedekking).

⁴⁶ SBR B (2006), paragraaf 8.3 en meetervaringen.

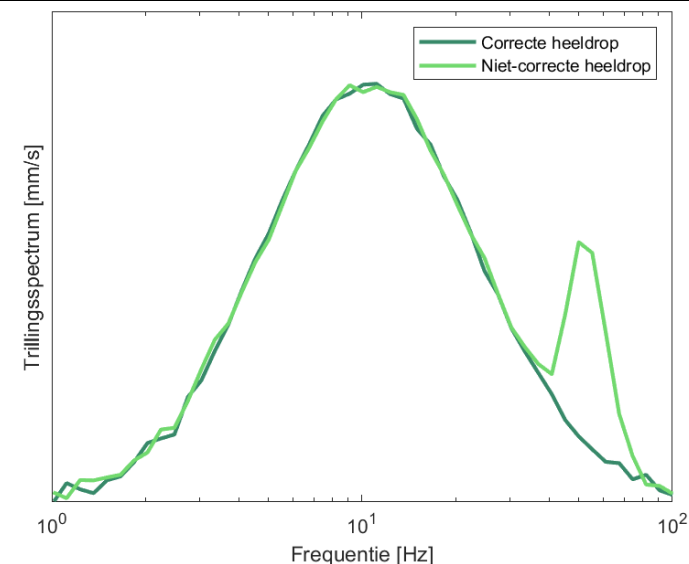
⁴⁷ Op basis van praktijkervaringen.



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. Die 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.

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 grote invloed op de nauwkeurigheid van de meting. De minimaal vereiste meetduur is afhankelijk van het doel van de meting en de gewenste nauwkeurigheid. 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 minimum aantal treinpassages afhankelijk is van de beoogde output en nauwkeurigheid. 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 hoe lang de meetduur moet zijn om een gemiddeld tertsbandspectrum over alle frequenties met voldoende nauwkeurigheid vast te stellen. De meetduur is daarbij afhankelijk van hoe nauwkeurig de testgroepen met treinen zijn gedefinieerd. Voor een aantal veelgebruikte groepen en nauwkeurigheidspercentages zijn de indicatief benodigde treinaantallen weergegeven in Tabel 4⁴⁸.

Tabel 4 Indicatief minimumaantal treinpassages voor bepaalde onzekerheid in gemiddelde resultaat. Dikgedrukt is de verwachtingswaarde (50%), voor hoge zekerheid (95%) moet de bovengrenswaarde worden aangehouden. In de onderste rij is een formule gegeven waarmee de gemiddelde onzekerheid (in procenten) kan worden berekend, gegeven een aantal treinen. Formule en tabel zijn indicatief.

Gewenste nauwkeurigheid	Alle treinen bij elkaar	Per klasse en spoor	Per klasse en spoor, snelheidsvariatie +/- 5%	Testtrein, snelheidsvariatie +/- 5%
0.1 dB (+/- 1%)	120 tot 530	110 tot 410	50 tot 225	17 tot 27
0.5 dB (+/- 5%)	90 tot 360	80 tot 290	35 tot 155	13 tot 21
1 dB (+/- 10%)	60 tot 250	55 tot 200	25 tot 100	10 tot 15
2 dB (+/- 20%)	25 tot 80	20 tot 70	10 tot 35	5 tot 8
3 dB (+/- 30%)	12 tot 40	10 tot 35	5 tot 15	3 tot 4
Gemiddeld onzekerheidspercentage	$-12 \cdot \text{LN}(\# \text{treinen}) + 61$	$-12 \cdot \text{LN}(\# \text{treinen}) + 56$	$-12 \cdot \text{LN}(\# \text{treinen}) + 49$	$-16 \cdot \text{LN}(\# \text{treinen}) + 48$

Met het aantal treinen en het verwachte aantal passages per categorie (o.b.v. verkeersgegevens) kan een inschatting worden gemaakt van de benodigde meetduur. Let op dat met name bij restricties in snelheidsvariatie de meetduur fors kan oplopen, snelheidsvariatiën komen vooral voor in de buurt van stations.

Voor (het vaststellen van) de meetduur gelden 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 maximale statische aslast per trein.

⁴⁸ Zie Bijlage IV voor achtergrondinformatie over een analyse op meetdata.



3.2.2 Het minimumaantal treinpassages is afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid, maar mag niet minder bedragen dan 10 treinen per klasse per spoor, met maximaal +/- 5% snelheidsvariatie per klasse. Dit komt overeen met een onzekerheid van ongeveer 20 procent⁴⁹.

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.

⁴⁹ 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 bron signaal 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:

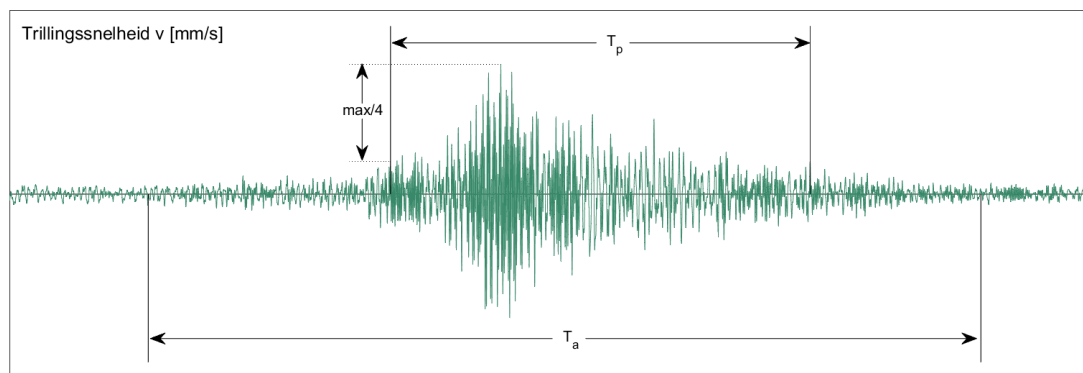
4.1.1.a Bij meten met **accelerometers**: (1) verwijder DC offset, (2) pas calibratiefactoren toe, (3) integreer de signalen numeriek naar een snelheidssignaal en (4) pas een filter toe conform bijlage B1 van de SBR A (2017), met de grenzen van het filter op het meetbereik.

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 Selecteer events (bijvoorbeeld treinpassages) op basis van de parameters T_p en T_o^{50} :

- T_p , de passagetijd, de tijd van de passage waarin de amplitude van het tijdssignaal groter is dan $\frac{1}{4}$ van de maximale absolute amplitude (of de omhullende amplitude), zie Figuur 5.
- T_a , de analysetijd, de lengte van het tijdssignaal waarbij de trillingen hoger zijn dan de achtergrondtrillingen.



Figuur 5 Definitie van T_p en T_o

⁵⁰ RIVAS Deliverable D1.2 (2011), paragraaf 3.8

- 4.1.3** Synchroniseer tijdssignalen met een maximale afwijking van 1 sample indien gebruik wordt gemaakt van meerdere meetpunten.
- 4.1.4** 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.

- 4.1.5** 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 vast omlijnde definitie van. Over de periode T_p is de definitie als volgt:

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

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:

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

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

- 4.1.6** Voor het verwerken van metingen i.h.k.v. het RIVM-model OURS dient te worden uitgevoerd conform het RIVM-metprotocol (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>.
- 4.1.7** 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:

4.1.8 Interpolatie dient plaats te vinden met behulp van de Barkanvergelijking, die er in complete vorm als volgt uit ziet⁵¹:

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

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.

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

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

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

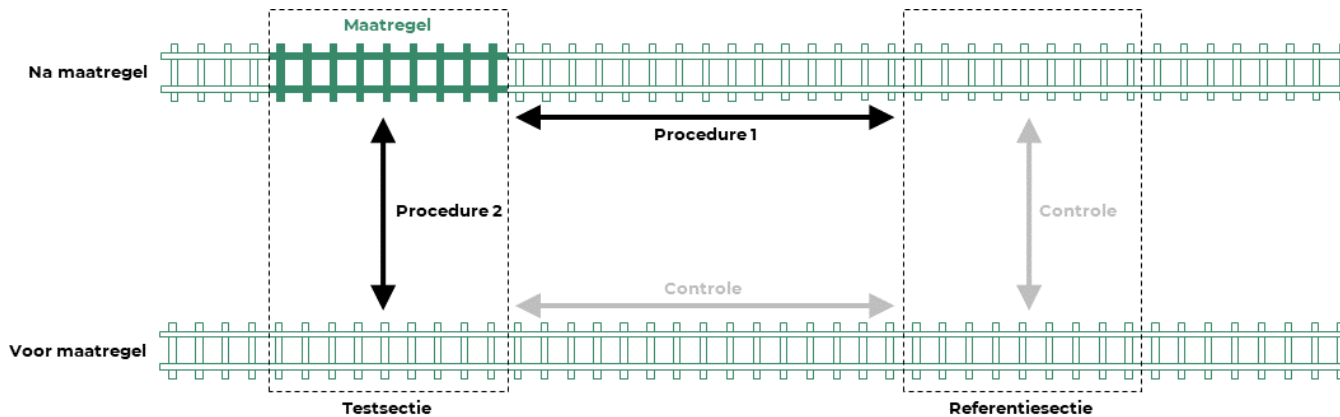
4.1.12 Vergelijking (7) moet frequentie-afhankelijk worden toegepast, anders zijn de resultaten te grof.

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 6.

- 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.

⁵¹ Barkan (1962) en empirische onderzoeken



Figuur 6 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.

4.2.2 Het effect van een maatregel moet worden bepaald met behulp van de volgende vergelijking:

$$\Delta L_v^{na}(f) = L_v^{testsectie,na}(f) - L_v^{referentiesectie,na}(f) \quad (8)$$

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:

$$\Delta L_v(f) = L_v^{testsectie,na}(f) - L_v^{testsectie,voor}(f) \quad (9)$$

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:

4.2.6 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:

$$\Delta L_v^{na}(f) = L_v^{testsectie,na}(f) - L_v^{referentiesectie,na}(f) \quad (10)$$

$$\Delta L_v^{voor}(f) = L_v^{testsectie,voor}(f) - L_v^{referentiesectie,voor}(f) \quad (11)$$

Vervolgens kan het effect van de maatregel worden bepaald met de volgende vergelijking:

$$\Delta L_v(f) = \Delta L_v^{na}(f) - \Delta L_v^{voor}(f) \quad (12)$$

4.2.7 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 maatregелеffecten 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 eisen⁵²:

⁵² FTA (2018) en RIVAS Deliverable D1.2 (2011)



4.2.8 Bij het verwerken van data van een harmonische excitator gelden de volgende eisen:

4.2.8.a Verzamel de gesynchroniseerde tijdsignalen van de opnemers conform **4.1.1**

4.2.8.b Convalueer 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

4.2.8.c Verwerk de resultaten verder conform **4.1.3** t/m **4.1.5**

4.2.9 Bij het verwerken van data van een valgewicht (kunstmatige trillingsbron) gelden de volgende eisen:

4.2.9.a Verzamel de gesynchroniseerde tijdsignalen van de opnemers conform **4.1.1**

4.2.9.b Pas stacking toe o.b.v. minimalisatie van de kleinste kwadraten fout om de signal-to-noise ratio te verbeteren

4.2.10 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_i , terwijl de kracht wordt aangebracht op punt x_k .

4.2.11 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.

4.2.12 Bepaal het krachtspectrum met de volgende vergelijking:

$$F_{eq}(f) = L_v(x_1, f) - T_L(x_1, f) \quad (15)$$

4.2.13 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 Ten allen tijde dient te worden uitgegaan van een lognormale verdeling voor alle statische parameters, tenzij gemotiveerd kan worden dat sprake is van een andere verdeling.

4.3.2

Omdat sprake is van een lognormale verdeling, dienen onzekerheden ook op basis van lognormale verdelingen te worden gecombineerd.

4.3.3

De totale variatiecoëfficiënt CV dient te worden vastgesteld met behulp van de volgende 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. Ter illustratie is hieronder een fictief rekenvoorbeeld opgenomen, de totale onzekerheid is de wortel van de som van de kwadraten van de individuele onzekerheden.

Onderdeel	Onzekerheid
Meetketen	10%
Aantal treinpassages	20%
Plaatsing meetpunten	30%
Tijd	50%
Totale onzekerheid	62%

4.3.3.a

Vergelijking (16) 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 (16) 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.

5 RAPPORTAGE EN VASTLEGGING

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 onderdelen⁵³:
- Samenvatting**, met daarin in ieder geval de aanleiding, onderzoeksvraag en conclusies van het onderzoek
- 1. 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?
 - 2. 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.
 - 3. 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).
 - 4. 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.
 - 5. 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

⁵³ Dit zijn minimumvereisten, hoofdstukindeling mag niet worden gewijzigd, paragraafindeling in hoofdstuk 2, 3 en 4 staat vrij.

5.1.2

Bij elke meting dient een meetjournaal te worden opgeleverd, wat tenminste de onderdelen uit Tabel 5 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.⁵⁴

Tabel 5 Aan te leveren gegevens

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
	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, spoorkwaliteit, rijsnelheid, 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	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

⁵⁴ 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.

	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

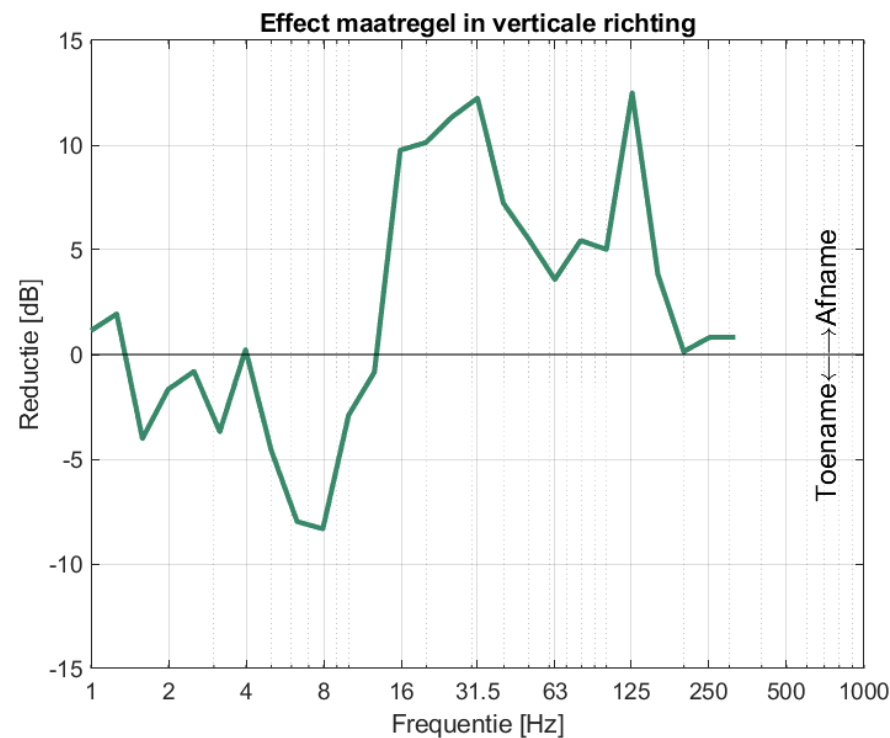
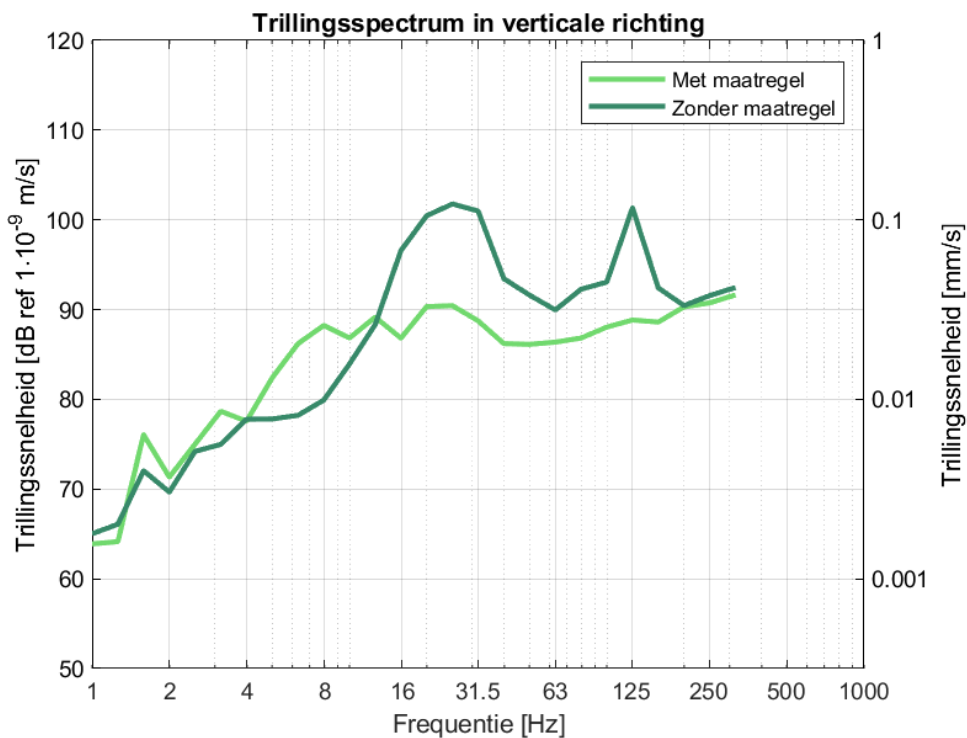
5.2 EISEN AAN GRAFIEKEN EN TABELLEN

Voor de presentatie van tabellen en grafieken gelden de volgende eisen⁵⁵:

- 5.2.1** Trillingsspectra worden altijd gepresenteerd in zowel dB (ref 1·10⁻⁹ m/s) als in mm/s conform Figuur 7.
- 5.2.2** De horizontale x-as van grafieken dient logaritmisch verdeeld te zijn en het volledige meetbereik af te dekken conform Figuur 7.
- 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 **4.2.12**. Omrekening naar effect in procenten conform vergelijking (17).
 - 5.2.4.b** Als effect in dB, indien bepaald op trillingssnelheid conform **4.2.1** t/m **4.2.7**. Omrekening naar effect in procenten conform vergelijking (17).
- 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 7.

$$effect(\%) = 1 - 10^{\frac{-effect(dB)}{20}} \quad (17)$$

⁵⁵ RIVAS Deliverable D1.11 (2013)



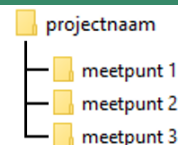
Figuur 7 Weergave van trillingsspectra (links) en het effect van een maatregel (rechts)

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.



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 yyyymmdd_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 versnellingssignaal in mm/s². Afmetingen: double, lengte x aantal kanalen • TIME – tijdsvector in ms. Afmetingen: double, lengte x 1 • 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 vector achteraf o.b.v. interpolatie te worden vastgesteld.</i>

6 GEBRUIKTE BRONNEN

- SBR A (2017) SBRCURnet, 2017, *SBR Trillingsrichtlijn A: Schade aan bouwwerken: 2017*
- SBR B (2006) Stichting Bouwresearch, 2006, *SBR richtlijn deel B, hinder voor personen in gebouwen*
- ISO14837-1 (2005) NEN/ISO, 2005, *Mechanical vibration - Ground-borne noise and vibration arising from rail systems - Part 1: General guidance*
- ISO14837-31 (2017) NEN/ISO, 2017, *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*
- ISO14837-32 (2015) NEN/ISOI, 2015, *Mechanical vibration - Groundborne noise and vibration arising from rail systems - Part 32: Measurement of dynamic properties of the ground*
- RIVAS D1.2 (2011) Asmussen, B. et al, 2011, *Protocol for free field measurements of mitigation effects in the project RIVAS for WP2,3,4,5, RIVAS Deliverable D1.2*
- RIVAS D1.11 (2013) Verbraken, H. et al, 2013, *Benchmark tests for soil properties, including recommendations for standards and guidelines, 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, *Rayleigh-wave dispersive energy imaging using a high-resolution linear Radon transform*: Pure and Applied Geophysics, 165, 903-922
- Song (1989) Song, Y. Y., J. P. Castagna, R. A. Black, and R. W. Knapp, 1989, *Sensitivity of near surface shear wave velocity determination from rayleigh and love waves*: 59th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 8, 509-512
- Park (1998) Park, C. B., R. D. Miller, and J. Xia, 1998, *Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record* 68th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1377-1380.
- Barkan (1962) Barkan, D.D., 1962, *Dynamics of bases and foundations*, McGraw Hill Co., New York
- RIVM (2022) Kok, A.Y. et al, 2022, *Single calculation model for railway vibrations, Background document with detailed description of the workings of the calculation model*
- FTA (2018) Federal Transit Administration, 2018, *Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual*, FTA Report No. 0123
- JCGM (2008) JCGM 100:2008, 2008, *GUM 1995 with minor corrections, Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*
- Wilkinson (2016) Mark D. Wilkinson; Michel Dumontier; IJsbrand Jan Aalbersberg; et al., 15 March 2016, *The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship*. Scientific Data. 3 (1): 160018
- Garburg (2019) Rudiger Garburg et al., 2019, *Investigation of vibration mitigation by concrete trough with integrated under balls mats for surface-railways*, IWRN13,



ProRail (2018)

Meetjournaal.xlsx en meetprotocol

We-Boost (2020)

P.M. Boon, 2020, *Proef Brabantroute, Monitoringsplan USP's Oisterwijk*, WBD1916, versie 1.4

FINE2 (2022)

Haike Brick, 2022, *Draft of FINE2 report* (via ProRail)

RIVM (2020)

Arnaud Kok et al., 2020, Gebruik rekenmodel spoortrillingen

Hölscher (2003)

Hölscher, dr. ir. P. et al, 2003, HerMes: The rational monitoring evaluation system, Final report (2003)





BIJLAGE I – MEET JOURNAAL

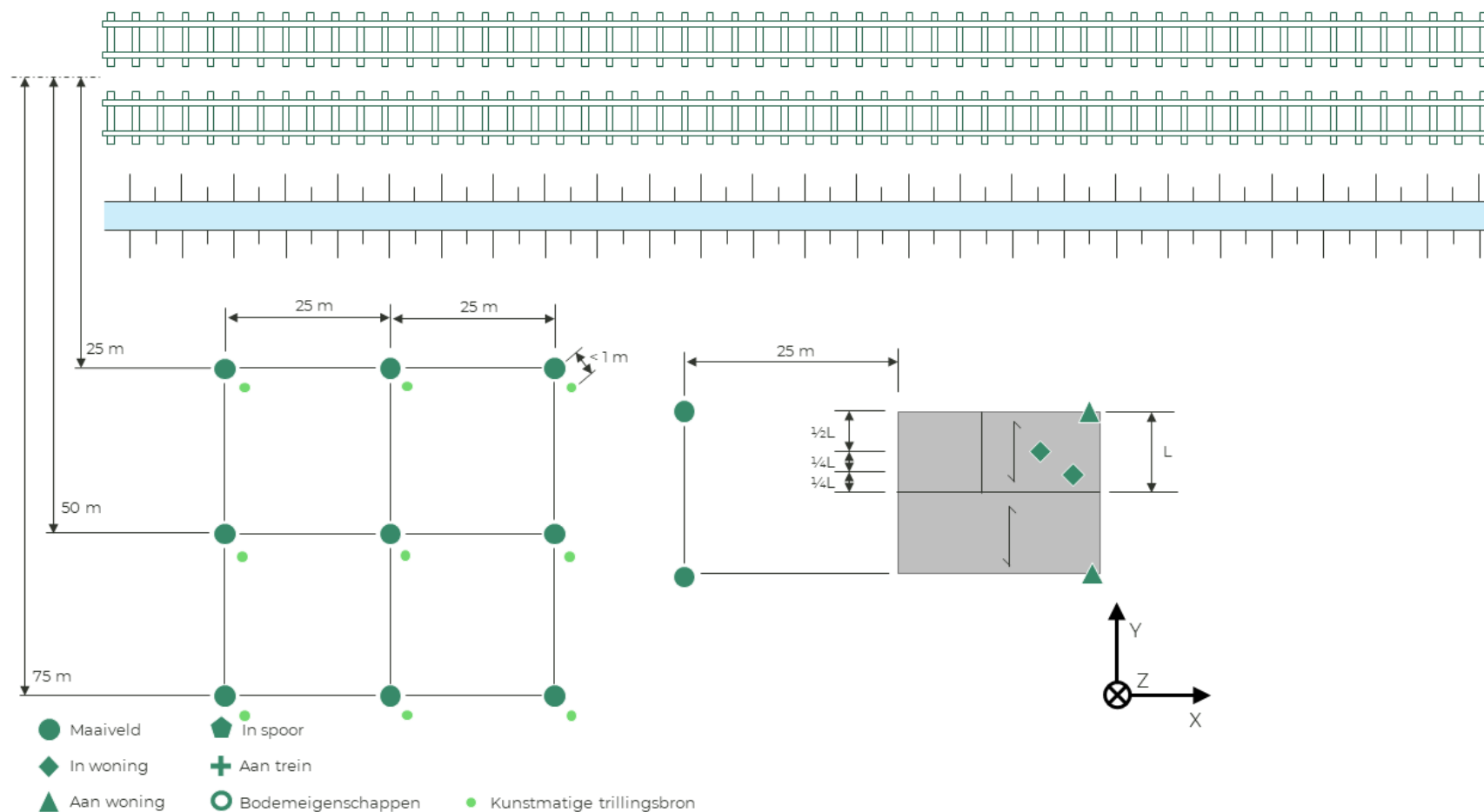
Bij dit meetprotocol hoort een meetjournaal, een Excel-bestand waarin de gegevens van de metingen dienen te worden vastgelegd conform **5.1.2.**



BIJLAGE II – 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 8. Belangrijke afwijkingen ten opzichte van de eisen die in dit meetprotocol worden gehanteerd, zijn:

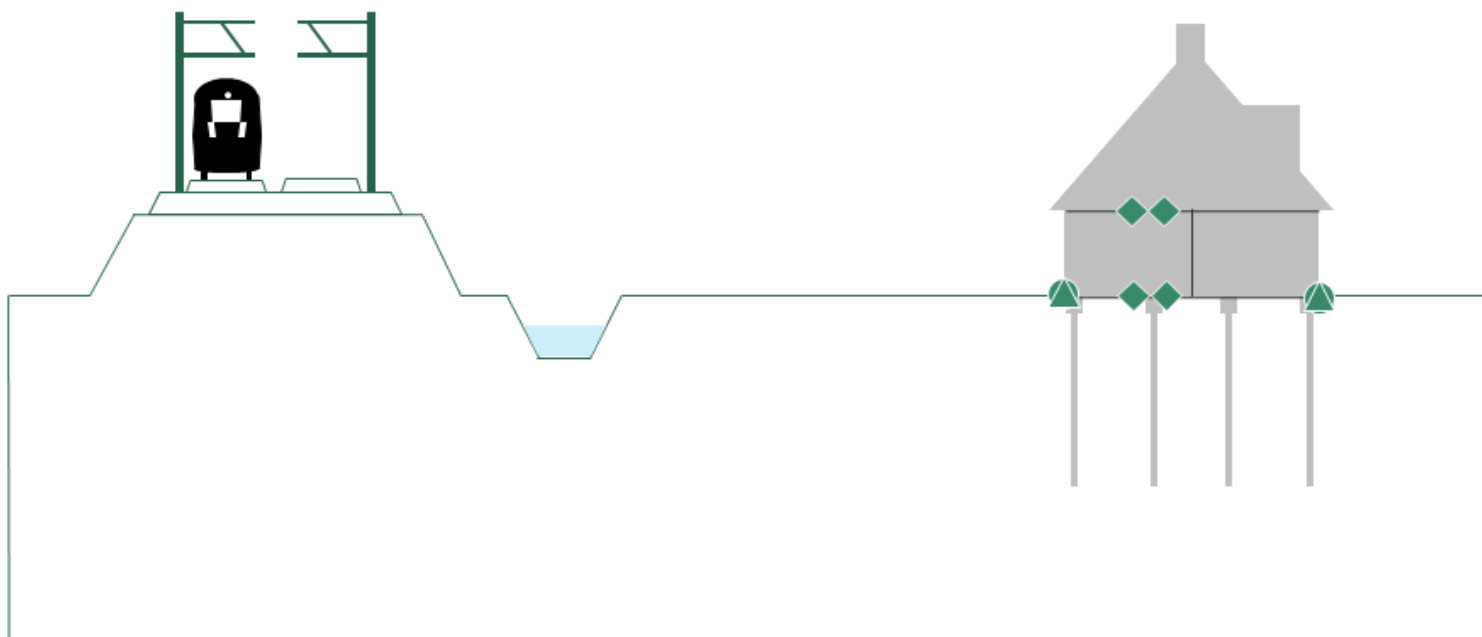
- 1 Afstanden tot het spoor zijn gerelateerd aan het midden tussen de twee meest nabij gelegen sporen
- 2 Meetpunten zijn gepositioneerd op andere afstanden (geen veelvouden van 8 meter), maar op 25 meter tussenafstand, in een 3x3-grid



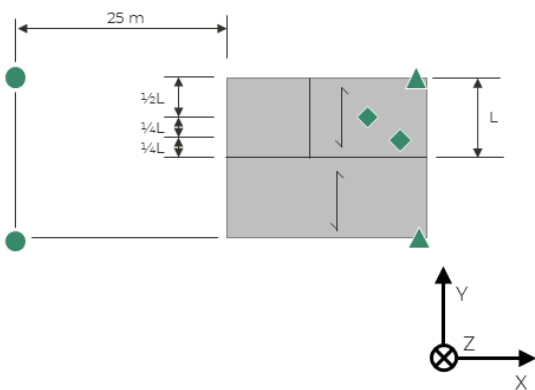
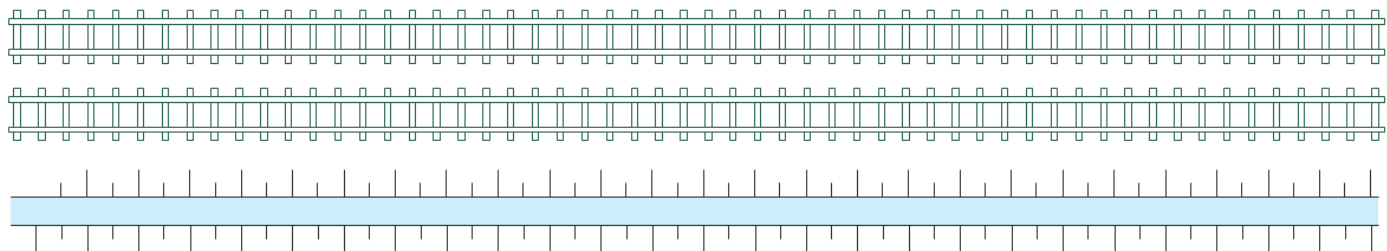
Figuur 8 Positionering van meetpunten conform RIVM (2020) t.b.v. metingen i.h.k.v. OURS

Bij **gebouwmetingen** in het kader van het aanvullen van de H_{gebouw} -database van het rekenmodel OURS, zijn andere meetpunten benodigd, zie Figuur 9 en Figuur 10. 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 9 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 10 Meetpunten rond, aan en in een woning voor een H_{gebouw} -meting ten behoeve van het rekenmodel OURS, bovenaanzicht



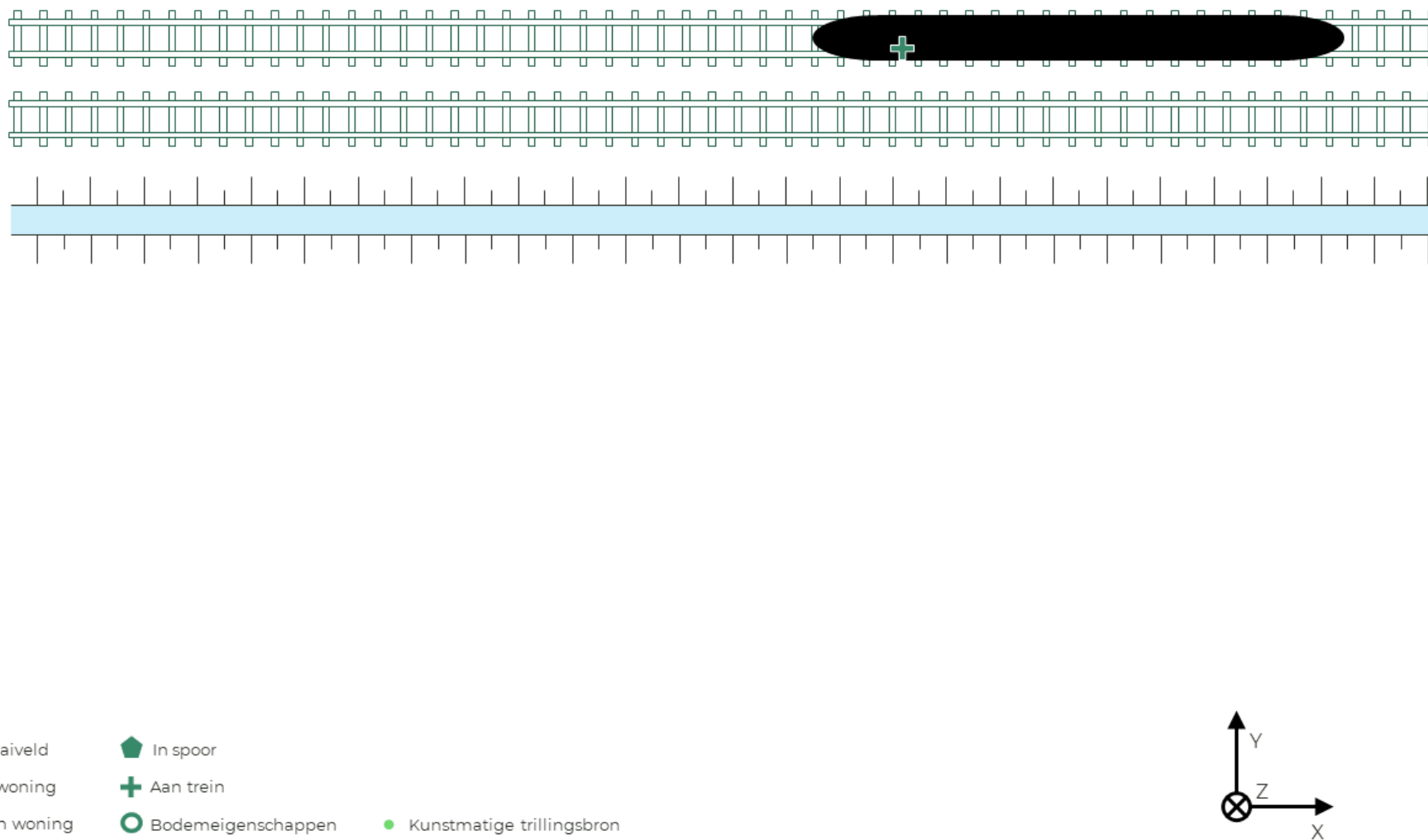
BIJLAGE III – DETAILOVERZICHTEN PER METINGTYPE

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



METINGEN AAN TREINEN

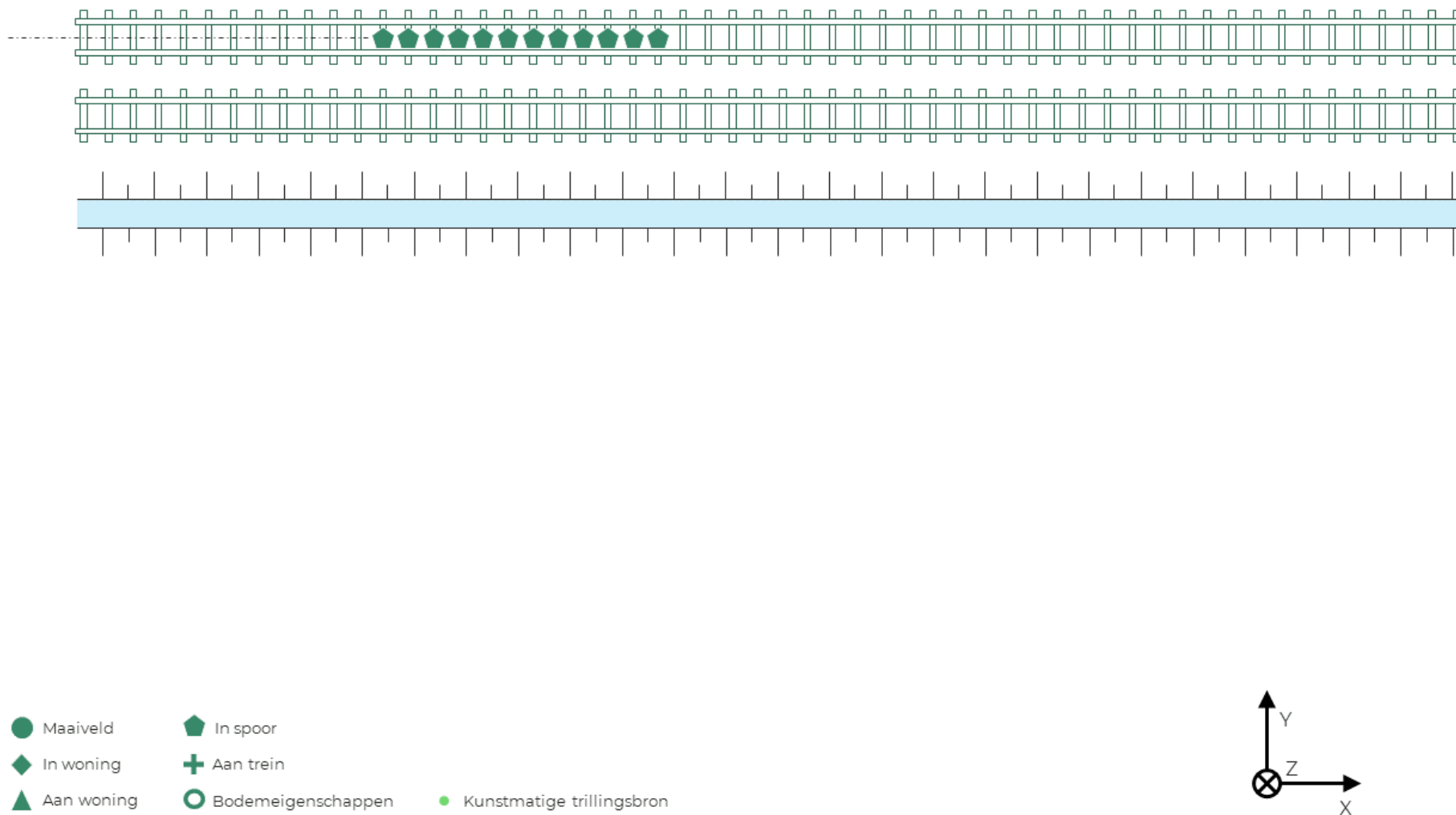
Een overzicht met de meetlocaties is weergegeven in Figuur 11, zie voor de eisen paragraaf 2.3 en 3.1



Figuur 11 Meetposities aan treinen

METINGEN AAN OF IN HET SPOOR

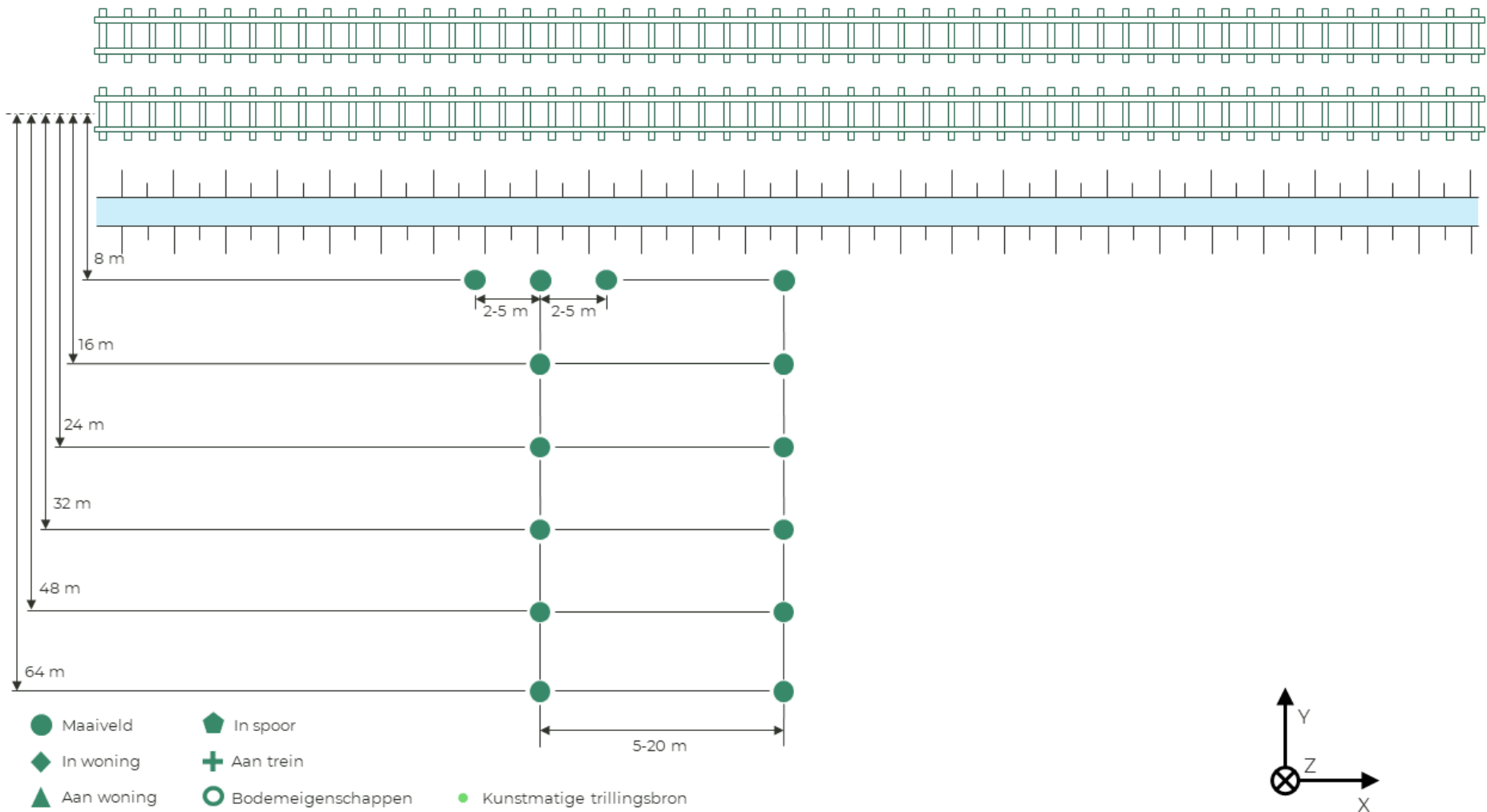
Een overzicht met de meetlocaties is weergegeven in Figuur 12, zie voor de eisen paragraaf 2.3 en 3.1.



Figuur 12 Meetposities aan of in het spoor

METINGEN OP MAAIVELD

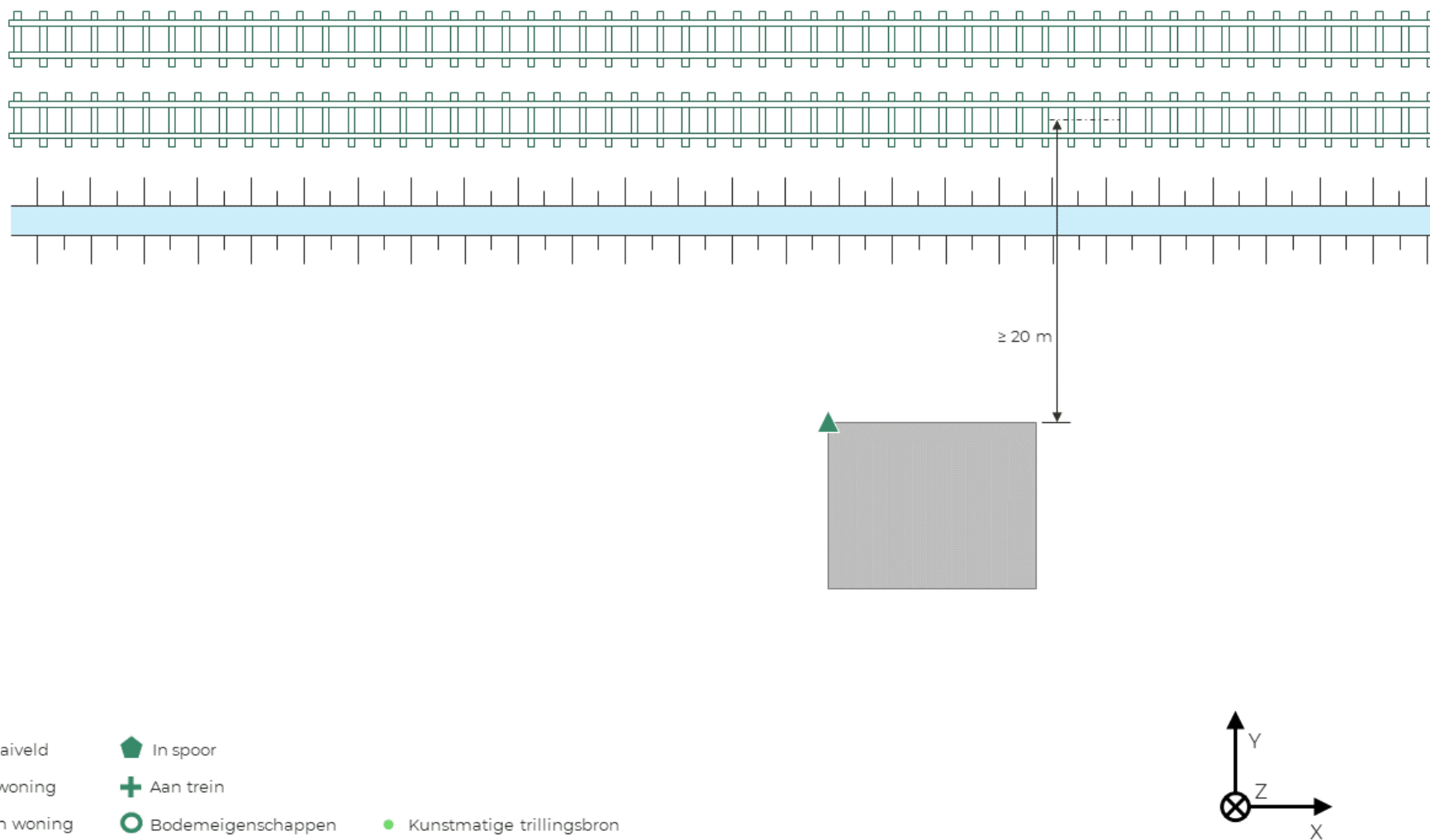
Een overzicht met de meetlocaties is weergegeven in Figuur 13, zie voor de eisen paragraaf 2.3 en 3.1.



Figuur 13 Meetposities op maaiveld

METINGEN AAN EEN GEBOUW

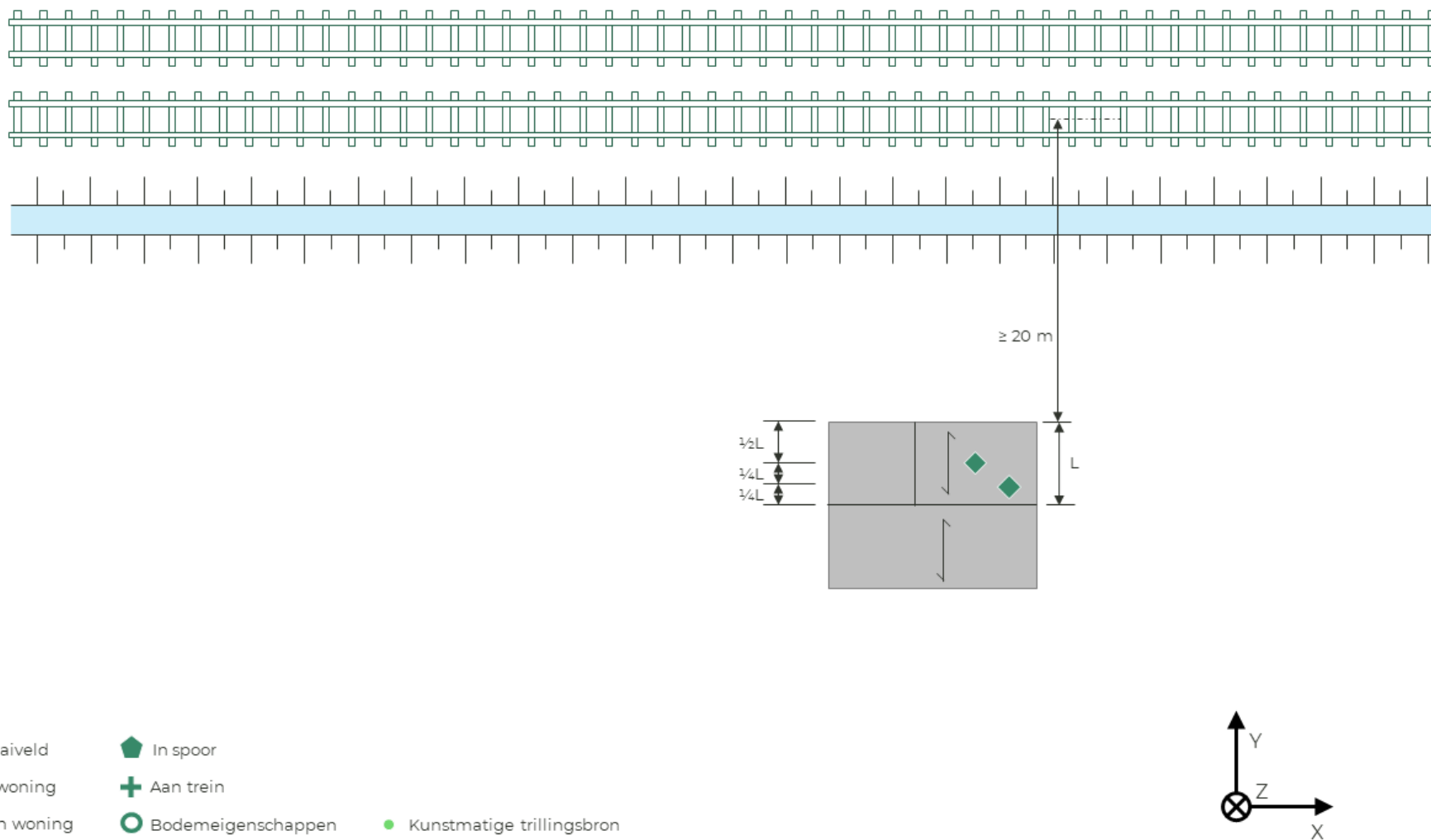
Een overzicht met de meetlocaties is weergegeven in Figuur 14, zie voor de eisen paragraaf 2.3 en 3.1.



Figuur 14 Meetposities aan een gebouw

METINGEN IN EEN GEBOUW

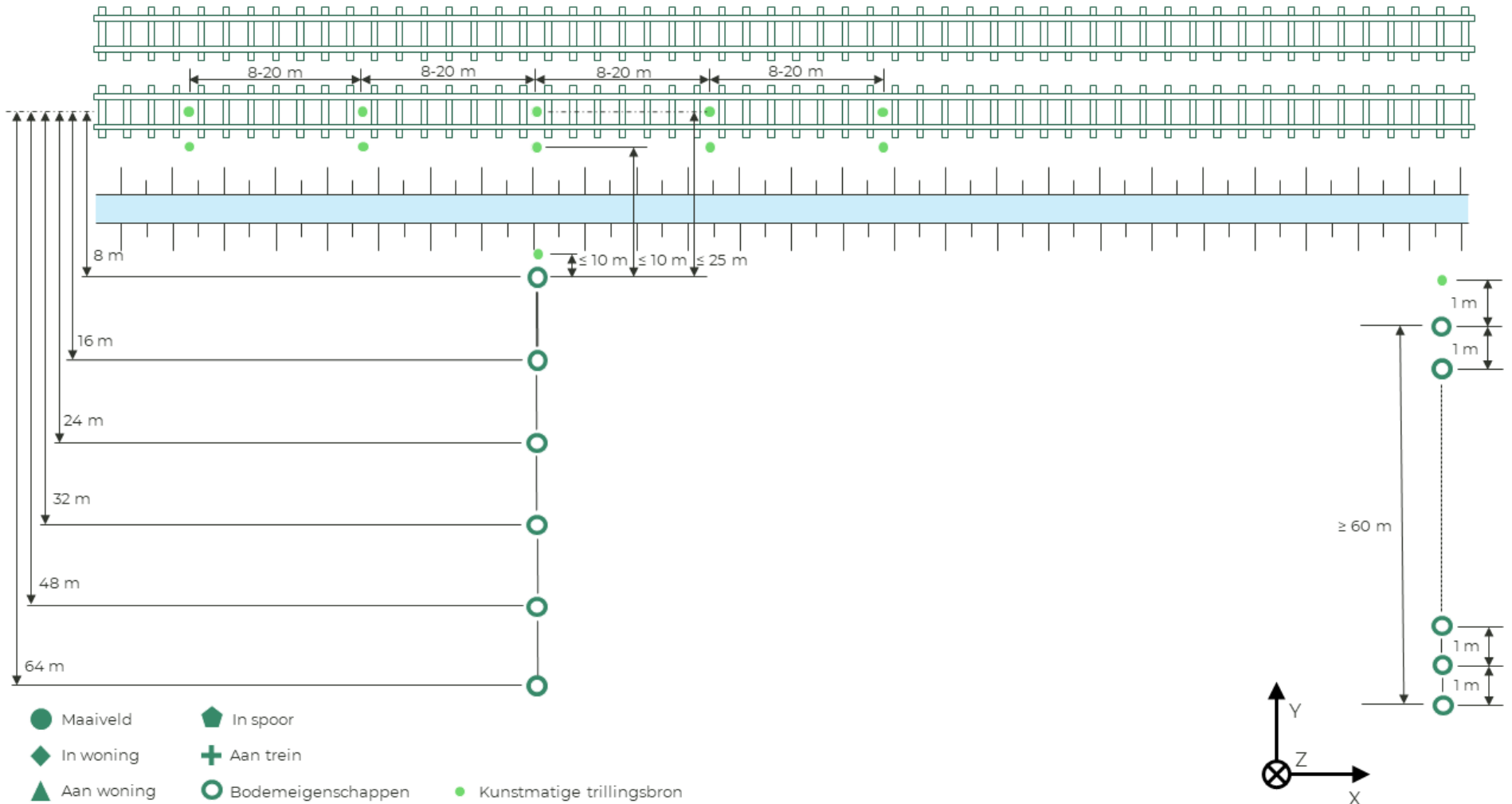
Een overzicht met de meetlocaties is weergegeven in Figuur 15, zie voor de eisen paragraaf 2.3 en 3.1.



Figuur 15 Meetposities in een gebouw

METINGEN MET KUNSTMATIGE TRILLINGSBRON

Een overzicht met de meetlocaties is weergegeven in Figuur 16, zie voor de eisen paragraaf 2.3 en 3.1.



Figuur 16 Meet- en excitatieposities bij metingen met kunstmatige trillingsbron

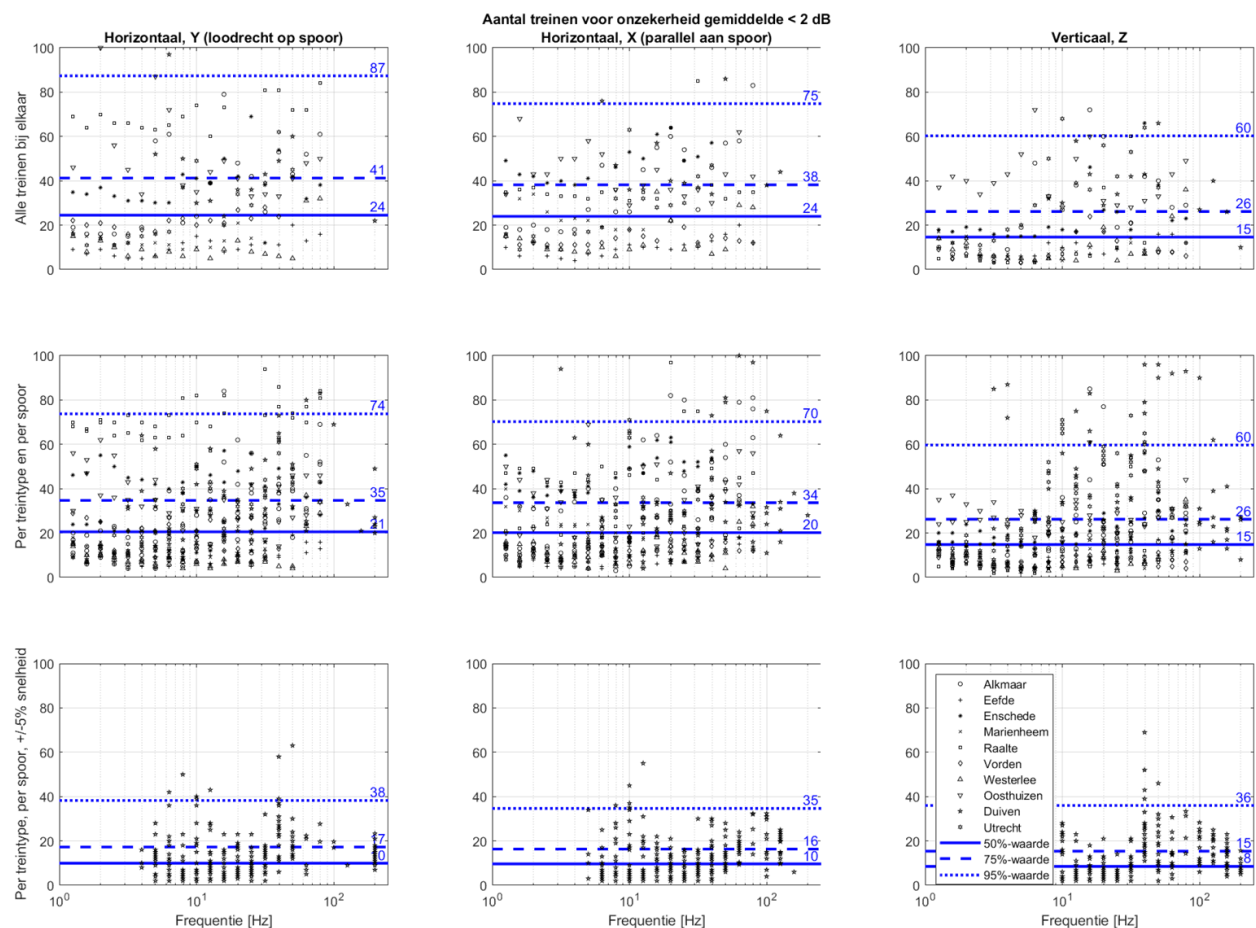
Voor metingen met een kunstmatige trillingsbron maken we onderscheid tussen verschillende types metingen:



- Metingen om een punt- of lijnbronoverdracht te bepalen. De meetopstelling hiervoor is links in Figuur 16 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.
- Metingen om de bodemeigenschappen vast te stellen, doorgaans met de MASW of SASW-techniek. De meetopstelling hiervoor is rechts weergegeven in Figuur 16, en bestaat uit een excitatielocatie en meerdere meetopnemers die maximaal 1 meter uit elkaar staan.

BIJLAGE IV – ACHTERGRONDINFORMATIE OVER AANTALLEN TREINEN

Het aantal benodigde treinen voor een meting is afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid 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 de afwijking in het gemiddelde in alle gevallen lager te laten zijn dan een bepaalde waarde. Voor de onzekerheidsmarge van ± 2 dB (20%) uit de ISO14837-31 (2017) ziet dat eruit als in Figuur 17.



Figuur 17 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 (gemiddelde, 75%- en 95%-bovengrens).



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.



WEBOOST