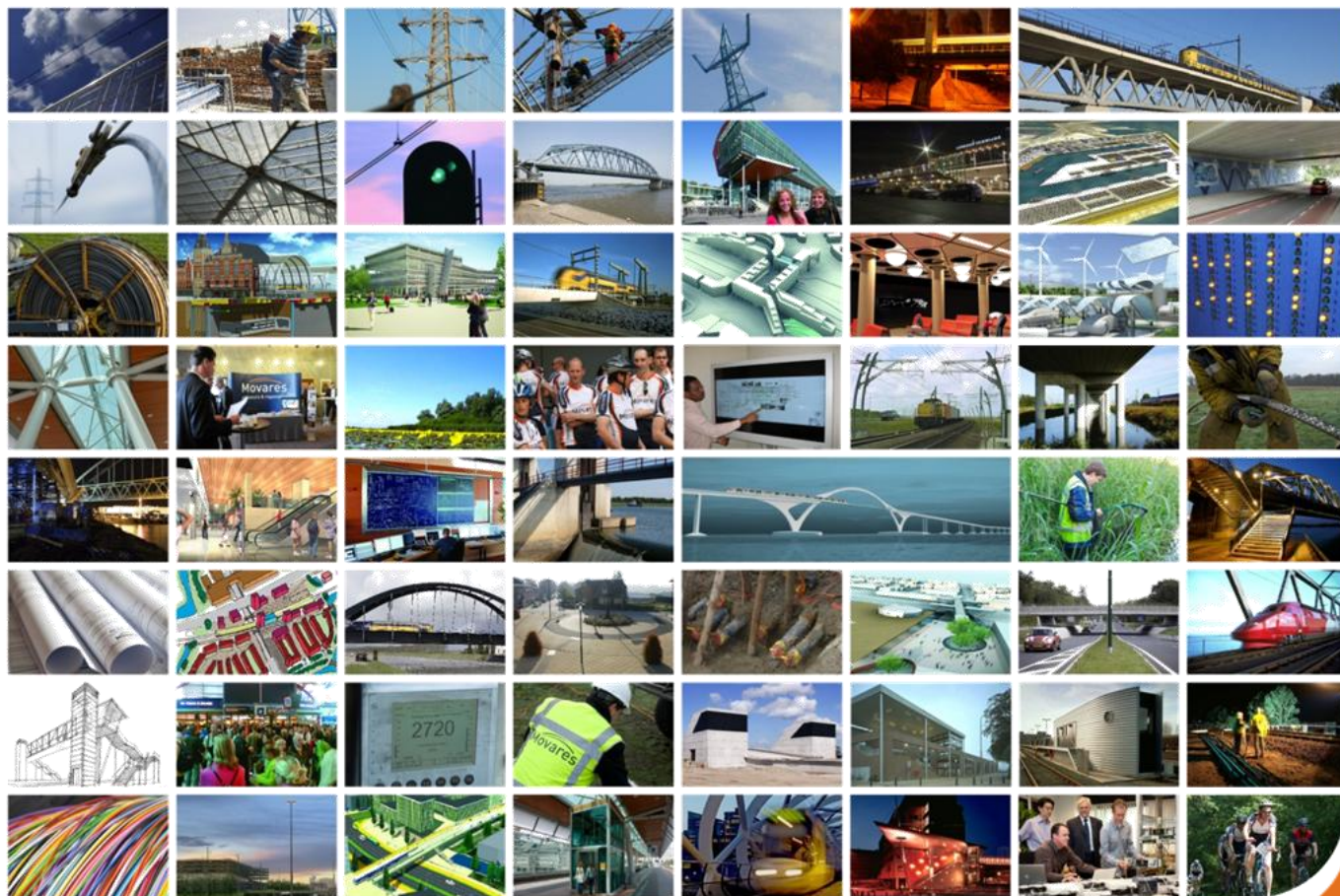




TMH4.1|009 Rapport t.b.v. bestemmingsplan

12 september 2017 - Versie 4.0

Autorisatieblad

Tram Maastricht-Hasselt

Onderzoeken trillingen, laagfrequent geluid en booggeluid

	Naam	Akkoord	Datum
Opgesteld door	Burg, AA van der	✓	12-09-2017
Gecontroleerd door	Boon, PM	✓	12-09-2017
Vrijgegeven door	Boon, PM	✓	12-09-2017

Op dit autorisatieblad ontbreken de handtekeningen wegens de digitale verwerking van ons vrijgaveproces. Dit rapport is aantoonbaar vrijgegeven.

Samenvatting

De Belgische en Nederlandse overheden en de Vlaamse Vervoermaatschappij De Lijn werken gezamenlijk aan het tot stand brengen van een tramverbinding tussen Hasselt en Maastricht, de *Tram Maastricht-Hasselt* (TMH).

Om dit project te realiseren is een bestemmingsplan opgesteld. Het bestemmingsplan beoogt het vastleggen van de circa 3,8 kilometer geëlektrificeerde tramverbinding op Nederlands grondgebied met twee haltes; nabij de Timmerfabriek (halte Sphinxkwartier) en ter hoogte van de Van Hasseltkade (halte Mosae Forum). Dit is tevens de eindhalte van de tramlijn. Buitenstedelijk wordt gebruik gemaakt van het bestaande goederenspoor. Binnenstedelijk wordt een nieuwe railverbinding aangelegd. Voor zowel het buiten- als binnenstedelijk tracé geldt dat er portalen moeten worden geplaatst om de elektrische lijnen van de tram te geleiden. Bovendien moet er één onderstation worden gerealiseerd op het bedrijventerrein Bosscherveld (nabij Thomas Regout aan de Industrieweg).

In het kader van het project TMH is voor het bestemmingsplan een onderzoek nodig waarin de gevolgen van de nieuw te realiseren tramverbinding worden beschreven ten aanzien van onder meer de omgevingsaspecten trillingshinder, laagfrequent geluidhinder en hinder ten gevolge van booggeluid.

Doel van het voorliggende onderzoek is om de effecten van het project voor de milieuaspecten trillingen, laagfrequent geluid en booglawaaai te onderzoeken, om vast te stellen of er sprake is van overschrijdingen van het beoordelingskader, en zo ja, om vast te stellen welke maatregelen waar ingezet kunnen worden om deze effecten binnen de heersende richtlijnen in te perken.

Hiervoor is met behulp van een predictiemodel en metingen per gebouw een berekening gemaakt van deze milieueffecten voor de situatie waarbij de tramverbinding tussen Hasselt en Maastricht Mosae Forum in exploitatie is.

Uit het onderzoek volgt dat het project leidt tot een toename van het aantal mogelijke overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingen, en daarnaast tot mogelijke overschrijdingen van het beoordelingskader voor laagfrequent geluid en booggeluid:

- mogelijke overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingen treden vooral op bij de Boschstraat (Sphinxgebouw) en de Maasmolendijk;
- mogelijke overschrijdingen van het beoordelingskader voor laagfrequent geluid treden vooral op bij bebouwing dichtbij het spoor, in dezelfde gebieden als waar ook mogelijke overschrijdingen zijn van het beoordelingskader voor trillingen. Een extra locatie met mogelijk laagfrequent geluid is een pand aan de Van Hasseltkade;
- booggeluid treedt met name op bij krappe bogen, bij de bocht richting het Bassin en bij de eindhalte Mosae Forum.

Voor bovengenoemde locaties is vervolgens een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. Uit dit onderzoek blijkt dat een floating slab track voldoende effect heeft voor trillingen en laagfrequent geluid rond het Sphinxgebouw, bij de Maasmolendijk en de Van Hasseltkade kan volstaan worden met een lichtere maatregel, een elastische mat. Het booggeluid kan voldoende worden gereduceerd met smering in de voertuigen,

eventueel aangevuld met extra spooronderhoud (akoestisch slijpen) en smering in de krappe bogen. Met deze aanpassingen valt ook het booggeluid binnen het heersende binnenstedelijke geluidsbeeld. Na het nemen van de voorgestelde maatregelen voldoen de trillingen, het laagfrequent geluid en booggeluid van de trams op alle locaties aan het beoordelingskader.

Langs de Boschstraat zijn er zowel in de huidige als toekomstige situatie mogelijke overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder als gevolg van bussen. De trillingen nemen hier echter niet toe door de realisatie van het project TMH.

Begrippenlijst

Huidige situatie	Situatie in het onderzoeksgebied in 2017, met de vervoersbewegingen behorend bij dat jaar.
Plansituatie	Situatie die ontstaat na realisatie van het project, in 2024
SBR richtlijn	Door de Stichting BouwResearch opgestelde richtlijn om trillingen te beoordelen. De richtlijn bestaat uit 3 delen: • Deel A: schade aan gebouwen; • Deel B: hinder voor personen in gebouwen; • Deel C: verstoring van apparatuur. In dit rapport vindt alleen de beoordeling op deel B voor de exploitatiefase plaats.
OTC	Ondergrondse Trillingsreducerende Constructie, een constructie in de bodem waarmee trillingen worden gedempt of gereflecteerd, zodat in de bebouwing achter deze constructie minder trillingshinder wordt ervaren
ALARA	As Low As Reasonably Achievable. Hiermee wordt een maatregel bedoeld die niet noodzakelijk is, maar getroffen wordt vanuit het oogpunt van hinderreductie om omwonenden tegemoet te komen. Bij het treffen van deze maatregelen vindt geen doelmatigheidsafweging plaats op basis van het richtbedrag van € 47.000, maar wordt een maatregel getroffen op basis van overwegingen als hinderreductie en meer- of minderkosten voor realisatie en onderhoud.
VO	Voorlopig Ontwerp
MER	Milieueffectrapportage, bedoeld om de milieueffecten van een project in beeld te brengen voordat het besluit wordt genomen.
VKA	Voorkeursalternatief, uiteindelijk gekozen variant op basis van het MER

Inhoudsopgave

Samenvatting	1
Begrippenlijst	1
1 Inleiding	6
1.1 Aanleiding	6
1.2 Doel	6
1.3 Scope en kader	6
1.4 Leeswijzer	6
2 Situatie en uitgangspunten	7
2.1 Studiegebied	7
2.2 Referentiesituatie	7
2.3 Plansituatie	7
2.3.1. Voertuigen	8
2.3.2. Nieuwbouwplannen	9
2.3.3. Spoorgebruik, spooropbouw en rijsnelheden	10
2.3.4. Cumulatie met overige bronnen	11
2.3.5. Bodemopbouw	11
2.3.6. Gebouweigen-schappen	12
3 Werkwijze en beoordelingskader	13
3.1 Trillingen	13
3.1.1. Werkwijze	13
3.1.2. Beoordelingskader	14
3.2 Laagfrequent geluid	16
3.2.1. Werkwijze	16
3.2.2. Beoordelingskader	16
3.3 Booggeluid	17
3.3.1. Werkwijze	17
3.3.2. Beoordelingskader	17
4 Resultaten	19
4.1 Trillingen	19
4.2 Laagfrequent geluid	19
4.3 Booggeluid	20
5 Mitigerende maatregelen	22
5.1 Inleiding	22
5.2 Gevolgde methodiek	22
5.2.1. Stap 1 - Knelpuntenanalyse	23
5.2.2. Stap 2 - Mogelijke maatregelen	25
5.2.3. Stap 3 - Eerste selectie van maatregelen	26
5.2.4. Stap 4 - Meest kosteneffectieve maatregelen	28
5.2.5. Stap 5 – Voorstel maatregelen	30
6 Conclusies	32

Bronnen	33
Colofon	34

Bijlage I Onderbouwing correctiefactoren in predicties	
Bijlage II Overzicht mogelijke maatregelen	
Bijlage III Meetmethode en meetapparatuur booggeluid	
Bijlage IV Gebruikt grondonderzoek	
Bijlage V Resultaten per gebouw	

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De Belgische en Nederlandse overheden en de Vlaamse Vervoermaatschappij De Lijn werken gezamenlijk aan het tot stand brengen van een tramverbinding tussen Hasselt en Maastricht, de *Tram Maastricht-Hasselt* (TMH).

Om dit project te realiseren is een bestemmingsplan opgesteld. Het bestemmingsplan beoogt het vastleggen van de circa 3,8 kilometer geëlektrificeerde tramverbinding op Nederlands grondgebied met twee haltes; nabij de Timmerfabriek (halte Sphinxkwartier) en ter hoogte van de Van Hasseltkade (halte Mosae Forum). Dit is tevens de eindhalte van de tramlijn. Buitenstedelijk wordt gebruik gemaakt van het bestaande goederenspoor. Binnenstedelijk wordt een nieuwe railverbinding aangelegd. Voor zowel het buiten- als binnenstedelijk tracé geldt dat er portalen moeten worden geplaatst om de elektrische lijnen van de tram te geleiden. Bovendien moet er één onderstation worden gerealiseerd op het bedrijventerrein Bosscherveld (nabij Thomas Regout aan de Industrieweg).

In het kader van het project TMH is voor het bestemmingsplan een onderzoek nodig waarin de gevolgen van de nieuw te realiseren tramverbinding worden beschreven ten aanzien van onder meer de omgevingsaspecten trillingshinder, laagfrequent geluidhinder en hinder ten gevolge van booggeluid.

1.2 Doel

Doel van het voorliggende onderzoek is om de effecten van het project voor de milieuaspecten trillingen, laagfrequent geluid en booglawaaai te onderzoeken, om vast te stellen of er sprake is van overschrijdingen van het beoordelingskader, en zo ja, om vast te stellen welke maatregelen waar ingezet kunnen worden om deze effecten binnen de heersende richtlijnen in te perken.

1.3 Scope en kader

De scope of het plangebied van dit onderzoek heeft betrekking op het tracégedeelte in Nederland, gelegen tussen de grens met het buitenstedelijke tracé (zie hiervoor het MER) en de eindhalte Mosae Forum. De planhorizon van het project is 2024.

1.4 Leeswijzer

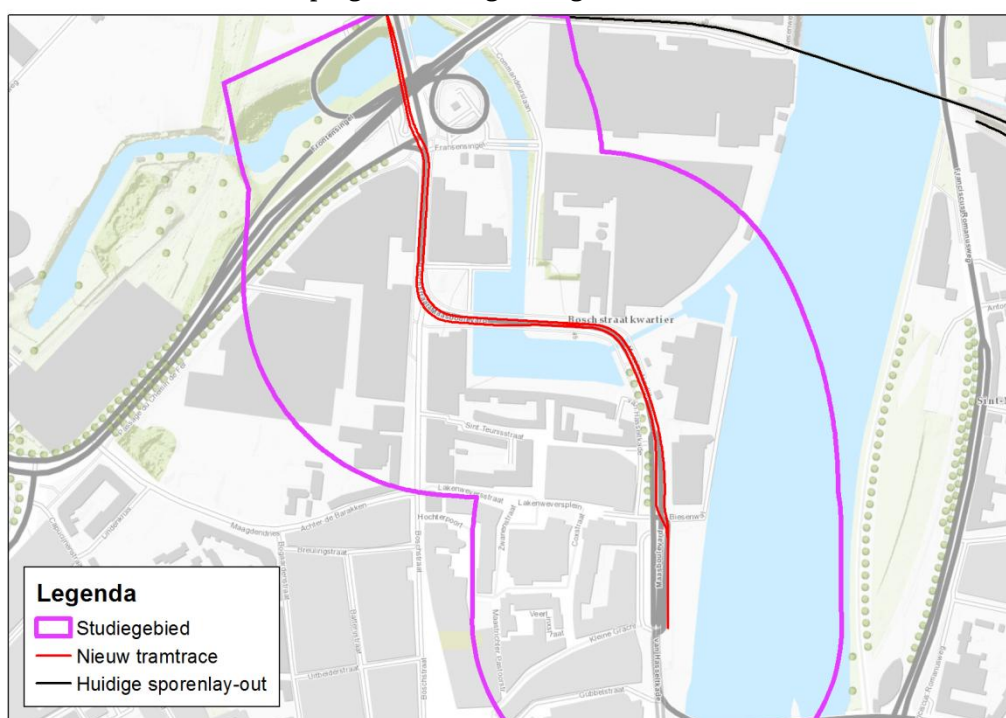
In dit rapport wordt in hoofdstuk 2 een beschrijving van de situatie en uitgangspunten voor het onderzoek gegeven. Hoofdstuk 3 geeft een omschrijving van de werkwijze en rekenmethodiek (detailinformatie hierover is opgenomen in bijlage I), alsmede een samenvatting van het gebruikte beoordelingskader voor de verschillende milieueffecten. Vervolgens worden in hoofdstuk 4 de rekenresultaten (in aantal gehinderden op de verschillende milieuaspecten) weergegeven. De mogelijke en voorgestelde maatregelen worden toegelicht in hoofdstuk 5, conclusies en aanbevelingen zijn opgenomen in hoofdstuk 6.

2 Situatie en uitgangspunten

In dit hoofdstuk wordt het studiegebied gedefinieerd, wordt een toelichting gegeven op de relevante wijzigingen in het studiegebied, en worden de kaders en uitgangspunten voor het onderzoek toegelicht.

2.1 Studiegebied

De scope van het onderzoek is weergegeven in Figuur 2-1, en is gebaseerd op het MER en de grenzen van het bestemmingsplan. Het studiegebied is gedefinieerd als een zone van 200 meter rond het geplande binnenstedelijke tracé. Buiten deze zone zijn ten aanzien van trillingen, laagfrequent geluid en booggeluid geen significante effecten te verwachten door de uitdemping van trillingen en geluid met de afstand¹.



Figuur 2-1 Studiegebied

2.2 Referentiesituatie

In deze paragraaf is een beschrijving van de huidige of referentiesituatie opgenomen. In de huidige situatie is geen sprake van spoorverkeer, wel van intensief busverkeer via diverse routes in het studiegebied. Als referentiejaar wordt 2017 gehanteerd.

2.3 Plansituatie

In deze paragraaf is een beschrijving van het studiegebied in de plansituatie opgenomen in het planjaar (2024).

Voor de in dit rapport beschreven milieueffecten kan de aard van de hinder worden toegeschreven aan (een combinatie van) factoren die in drie types zijn te categoriseren:

¹ Deze zone is gebaseerd op andere onderzoeken in Nederland. Voor trillingen en laagfrequent geluid worden vaak zones van 50, 100 of 200 meter gehanteerd. Voor dit onderzoek is een zone van 200 meter gehanteerd om ook de effecten van booggeluid (reikt verder dan trillingen en laagfrequent geluid) voldoende mee te nemen.

- De trillingsbron: het treinmaterieel (in de huidige situatie) en de tramvoertuigen (in de plansituatie) zorgen voor trillingen door variaties in wielonrondheid, railruwheid en spoorgeometrie. In (krappe) bochten kan booggeluid ontstaan;
- De transmissie of overdracht tussen trillingsbron en een ontvanger: de door de trillingsbron gegenereerde trillingen worden via de bodem doorgegeven;
- De ontvanger: de door de bodem doorgegeven trillingen worden via de fundering van een gebouw naar de muren en vloeren geleid, waar personen in het gebouw de trillingen kunnen voelen en deze als hinderlijk kunnen classificeren. Laagfrequent geluid, maar ook trillingen kunnen, afhankelijk van de afmetingen van een gebouw en de gebruikte materialen, worden versterkt in een gebouw. Booggeluid wordt beschouwd op de gevel, hiervoor zijn de eigenschappen van het gebouw dus niet relevant.

Elk van deze onderdelen wordt in de volgende subparagrafen nader toegelicht.

2.3.1. Voertuigen

De toekomstige exploitant, de *Vlaamse Vervoermaatschappij De Lijn*, heeft nog geen voertuigtype aangeschaft. Het exacte voertuigtype op de tramverbinding is dus nog onbekend. Wel zijn de trillingsspecifieke kenmerken van het in te zetten materieel door de *Vlaamse Vervoermaatschappij De Lijn* als volgt functioneel omschreven ten behoeve van het leveringscontract voor het materieel, zie Tabel 2-1 [Lijn 2014].

Tabel 2-1 Functionele eisen aan materieel

Parameter	Waarde of toelichting
Aslast	11,5 ton (maximaal statisch), inclusief passagiers (7 per m ² a 70 kg/persoon)
Vering	Minimaal 2 niveaus (primaire en secundaire) van vering, met beperking van niet-afgeveerde massa
Wielen	Elastische, resiliënte wielen
Trillingen in het voertuig	Compliance met comfortwaarde op basis van norm ISO7096, hoogst gewogen equivalent trillingsniveau per tertsbandfrequentie max. 0,12 m/s ² .
Maximalsnelheid	100 km/h

Omdat er nog geen keuze is gemaakt voor een voertuig, wordt een conservatief (worst-case) voertuig gekozen als referentie. De uiteindelijk te kiezen voertuigen produceren evenveel of minder trillingen, laagfrequent geluid en booggeluid.

Voor dit project zijn metingen verricht aan zogenaamd RegioCitadis-materieel, tram- en metrovoertuigen die onder meer in Den Haag worden ingezet. Dit is een voertuigtype met een ontwerp van begin jaren 2000 en met basiskenmerken die goed overeenkomen met bovenstaande specificaties². De verwachting is dat het uiteindelijke voertuig betere trillingskarakteristieken heeft, gezien de voortschrijdende techniek. Het voorkomen van trillingen in het voertuig en richting de omgeving is voor de fabrikanten van voertuigen een permanent aandachtspunt, omdat spoorlijnen voor trams vrijwel altijd worden ingepast in een dicht bebouwde omgeving. Sinds de ontwikkeling van de RegioCitadis zijn er meerdere fabrikanten die hun voertuigen verder hebben ontwikkeld op technische kenmerken zoals het verenpakket en de niet-afgeveerde massa van de trams. De ervaring leert dat deze technische ontwikkeling

² De RegioCitadis heeft geen elastische, resiliënte wielen, een wieltype dat zorgt voor minder trillingen. De RegioCitadis vormt een zo goed mogelijke benadering van het toekomstige voertuigtype. Sommige trillingseigenschappen worden mogelijk iets overschat doordat het om een ouder voertuigtype gaat.

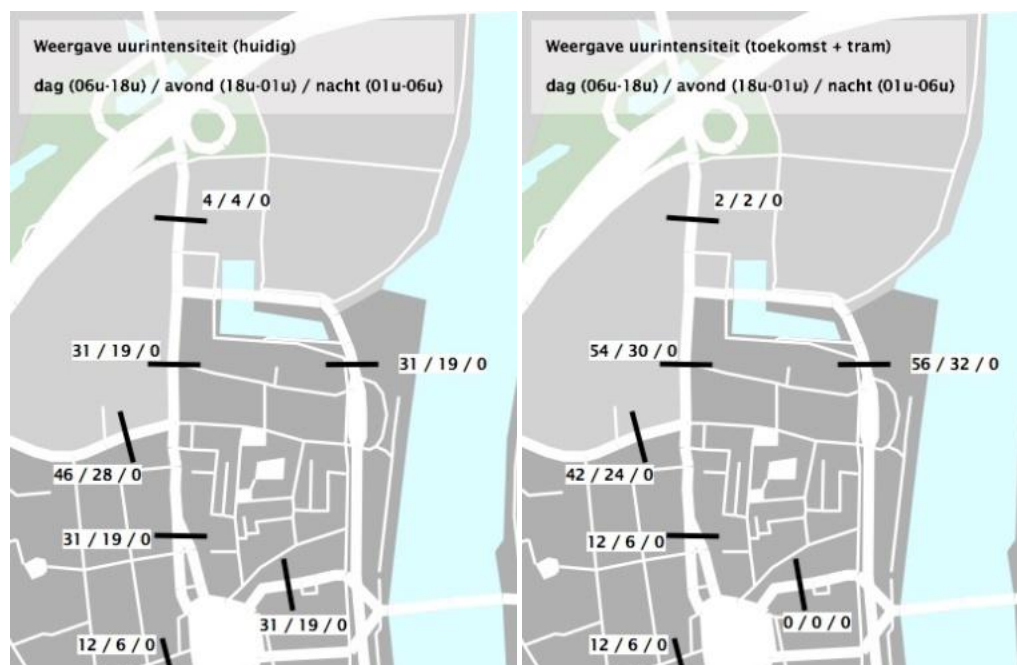
voertuigen een positieve invloed heeft op het tegengaan van trillingen richting de omgeving. Momenteel (2017) rijden er geen trams in een situatie die vergelijkbaar is met de toekomstige situatie in Maastricht (ten aanzien van bodemopbouw, voertuigtype en spoorconstructie), de RegioCitadis in Den Haag is het meest vergelijkbare type en daarom gebruikt als referentie voor Maastricht.

Het plan voorziet in een blijvend gebruik van het huidige spoor als incidentele goederenverbinding, deze valt qua invloed van trillingen, laagfrequent geluid en booggeluid echter buiten het studiegebied. In het trillingsonderzoek is, zoals gebruikelijk, het maximale werkdaggemiddelde van het aantal trams gehanteerd, dit is weergegeven in Tabel 2-2.

Tabel 2-2 Aantal trams in eindsituatie (maximale werkdaggemiddeldes)

Periode	Aantal trams per uur per richting
Dag (7:00 tot 19:00 uur)	2.00
Avond (19:00 tot 23:00 uur)	1.25
Nacht (23:00 tot 7:00 uur)	0.50

De intensiteiten van de bussen zijn weergegeven in Figuur 2-2 voor zowel de huidige als de toekomstige situatie met trams. In 2024 zullen de bussen in het studiegebied gewijzigde routes volgen. Veel bussen die het traject Boschstraat – Gubbelstraat nemen, rijden in de plansituatie via het Bassin en de Maasboulevard. De bussen zijn ook meegenomen in dit onderzoek.



Figuur 2-2 Busintensiteiten huidige situatie (links) en situatie met tram (rechts) in aantal per uur in dag/avond/nacht³

2.3.2. Nieuwbouwplannen

Het gehanteerde planjaar voor dit onderzoek is 2024. Tot 2024 ontwikkelt de omgeving zich overeenkomstig de reeds verleende vergunningen, goedgekeurde en

³ Afkomstig van afdeling Mobiliteit van gemeente Maastricht, o.b.v. dienstregelingen busvervoerders
TMH4.1|009 / Proj.nr. RM004781 / Vrijgegeven / Versie 4.0 / 12 september 2017

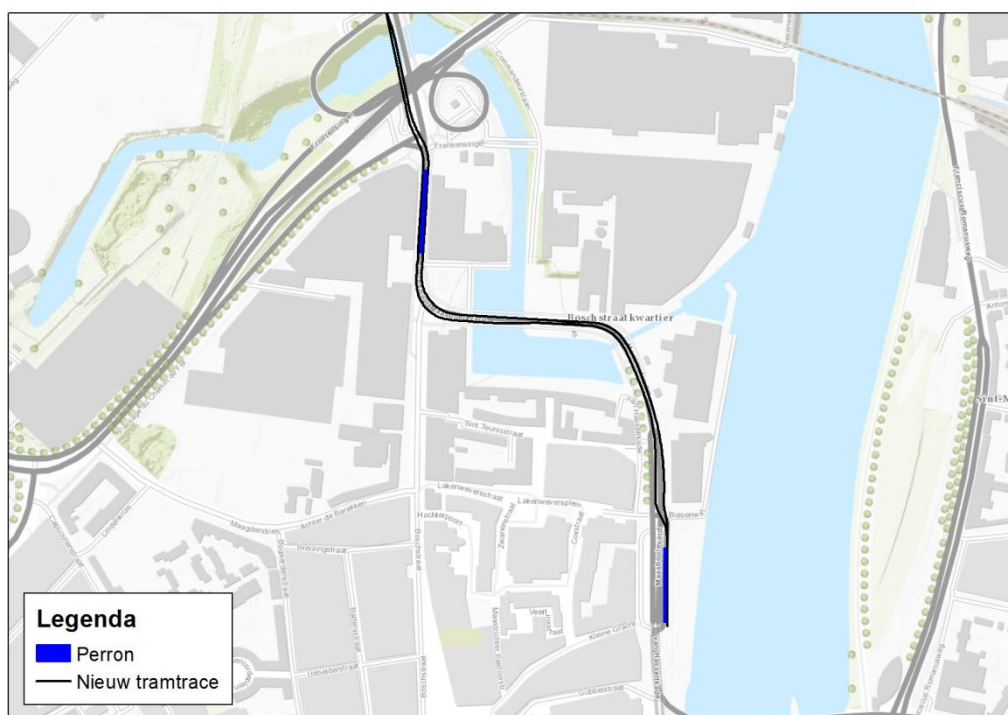
financieel gedekte plannen en vastgesteld beleid. In het studiegebied zijn de in Tabel 2-3 vermelde plannen inmiddels vastgesteld. Deze plannen zijn geen onderdeel van het project.

Tabel 2-3 *Ontwikkeling van bouwplannen in studiegebied*

Plan	Toelichting
Timmerfabriek	Bestemmingsplan Timmerfabriek is gedeeltelijk gewijzigd met vaststelling van de omgevingsvergunning en projectafwijkingbesluit voor Lumière begin 2014. Hierbij zijn wijzigingen doorgevoerd in het bestemmingsplan ten behoeve onder meer de bouw van kantoorruimte. Daarnaast is medio 2016 een functiewijziging uitgevoerd om commerciële horeca mogelijk te maken bij Lumière
Sphinx	Voor dit gebied wordt in de zomer van 2018 een nieuwe omgevingsvisie vastgesteld.

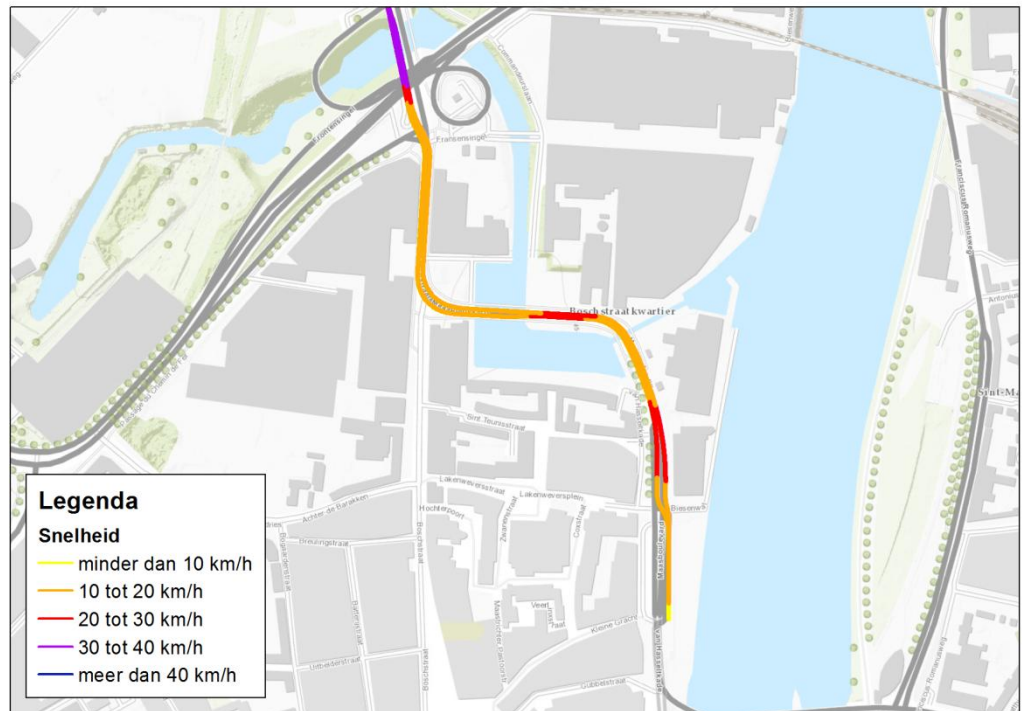
2.3.3. *Spoorgebruik, spooropbouw en rijsnelheden*

De sporenlay-out in de plansituatie is weergegeven in Figuur 2-3. Er is sprake van een dubbelsporig tracé tot aan de eindhalte Mosae Forum. Het tracé kent twee haltes in Maastricht, een tussenhalte Sphinxkwartier en een eindhalte Mosae Forum. In de berekeningen is binnen het studiegebied uitgegaan van een spoorconstructie in asfalt (gebruik door tram en wegverkeer), en het ontwerp zoals vastgelegd in het VO+.



Figuur 2-3 *Onderzochte alternatieven*

De snelheid van de voertuigen is weergegeven in Figuur 2-4. De tramvoertuigen remmen af in de bochten, afhankelijk van de bochtstraal.



Figuur 2-4 Rijsnelheid materieel

2.3.4. Cumulatie met overige bronnen

De cumulatie van de trillingen van tramverkeer met andere trillingsbronnen kan leiden tot hogere trillingen dan wanneer deze trillingsbronnen afzonderlijk worden beschouwd. In het studiegebied kan cumulatie optreden met zwaar wegverkeer, zoals bussen en vrachtverkeer. In de praktijk treedt cumulatie alleen op wanneer aan onderstaande twee condities wordt voldaan:

1. Beide trillingsbronnen hebben vergelijkbare trillingssterktes en trillingsspectra. Dit betekent doorgaans dat de afstand tussen de bebouwing en beide trillingsbronnen vergelijkbaar moet zijn, maar ook dat het type trillingsbron gelijk moet zijn. In het studiegebied kunnen vooral bussen en vrachtwagens voor trillingen zorgen. De trillingsspectra van deze voertuigen hebben echter dermate andere karakteristieken dan trams, dat er geen sprake zal zijn van significante versterking van de trillingen bij gelijktijdige passage, én
2. Beide trillingsbronnen treden gelijktijdig op. In de praktijk betekent dit dat op het moment van een trampassage ook een ander voertuig passeert dat vergelijkbare trillingen veroorzaakt.

Op basis van bovenstaande overwegingen en de karakteristieken van het wegverkeer in het studiegebied worden geen cumulatieve effecten verwacht. In dit onderzoek is cumulatie daarom niet nader meegenomen in de berekeningen.

2.3.5. Bodemopbouw

De voortplanting van trillingen in de bodem is sterk afhankelijk van bijvoorbeeld de aanwezigheid van eventuele obstakels tussen de trillingsbron en het gebouw, zoals damwanden of een spoorsloot, en de opbouw van de bodem.

De positie en diepte van sloten is bepaald met behulp van gegevens uit het *Actuele Hoogtebestand Nederland 2* (AHN2). Met behulp van deze gegevens is met grote nauwkeurigheid de geometrie van de bodem in kaart gebracht. De grondopbouw is bepaald aan de hand van sonderingen, zie bijlage IV.

2.3.6. Gebouweigenschappen

In dit onderzoek zijn de volgende uitgangspunten gebruikt om de trillingen en het laagfrequent geluid in gebouwen te bepalen:

1. Voor de funderingen van gebouwen is de aanname gemaakt dat alle gebouwen op staal zijn gefundeerd met uitzondering van de gebouwen waarvan de bouwhoogte meer is dan 20 meter, tenzij vanuit meer gedetailleerde beschikbare informatie het tegendeel blijkt. Voor gebouwen met een bouwhoogte van meer dan 20 meter is de aanname dat de fundering op palen rust. Deze aanname is gebaseerd op de grondopbouw, afkomstig uit sonderingen. Een deel van de (oudere) panden is op palen gefundeerd, maar met de aanname van een fundering op staal wordt een conservatieve aanname gebruikt⁴. Een op staal gefundeerd pand is namelijk gevoeliger voor trillingen en laagfrequent geluid dan een op palen gefundeerd pand. Er wordt dus uitgegaan van een worstcase scenario.
Voor de trillings- en laagfrequent geluideigenschappen van de gebouwen is gebruik gemaakt van trillingsmetingen in representatieve gebouwen in het studiegebied. Deze metingen zijn uitgevoerd in twee fases, in 2014 en 2017, beide metingen zijn gebruikt in dit onderzoek. Het betreft gebouwen die qua karakteristieken (bouwhoogte, bouwjaar, afmetingen) representatief zijn voor andere gebouwen in het studiegebied;
2. Voor de afmetingen van de gebouwen wordt gebruik gemaakt van de *Basisregistraties Adressen en Gebouwen* (BAG) van januari 2017. De hoogte van gebouwen is bepaald door deze te koppelen aan de AHN2-hoogtebestanden;
3. Voor nieuwbouwplannen waarvan de exacte locatie van de bebouwing nog onduidelijk is, wordt het gehele bestemmingsplanvlak berekend met de meest waarschijnlijke hoogte. Het aantal toekomstige adressen wordt gelijk verspreid over dit mogelijke bouwvlak.

⁴ Een op staal gefundeerd gebouw kan gefundeerd zijn op stroken (metselwerk), beton of bijvoorbeeld mergel.

3 Werkwijze en beoordelingskader

Dit hoofdstuk beschrijft de werkwijze en het beoordelingskader per milieuaspect. Per milieuaspect wordt een samenvatting gegeven van de gehanteerde rekenmethodiek voor de onderzochte milieuaspecten trillingen, laagfrequent geluid en booggeluid.

3.1 Trillingen

Trillingen ten gevolge van spoorverkeer ontstaan doordat een voertuig over oneffenheden in de spoorbaan rijdt. De trillingen worden via de spoorbaan, de bodem en de fundering van gebouwen doorgegeven naar gebruikers in de gebouwen, die deze trillingen kunnen voelen en als hinderlijk kunnen ervaren.

3.1.1. Werkwijze

Om voor alle gebouwen in het studiegebied te bepalen of het project leidt tot trillingshinder, is de volgende aanpak gehanteerd:

1. Vaststellen van de trillingen van vergelijkbare tramvoertuigen op een vergelijkbare bodem en spoorconstructie. Deze trillingen zijn vastgesteld door metingen uit te voeren in een zo vergelijkbaar mogelijke situatie, in Den Haag. RandstadRail 3 in Den Haag heeft een bodem die qua gedrag vergelijkbaar is met de bodem in Maastricht. Bovendien rijden er voertuigen die naar verwachting vergelijkbare of slechtere trillingseigenschappen hebben dan het trammaterieel dat in de toekomst in Maastricht zal gaan rijden (worst-case benadering);
2. Met behulp van metingen bepalen van de invloed van correctiefactoren voor de invloed van rijsnelheid, wissels, bochten en verschillen in bodemopbouw tussen de meetlocatie in Den Haag en het studiegebied in Maastricht. Hiermee wordt een predictie gemaakt van de trillingen in Maastricht op maaiveld;
3. Bepalen van de trillingen in de huidige en plansituatie en vaststellen van het aantal mogelijke overschrijdingen van het beoordelingskader. Hiervoor wordt het in stap 2 verkregen signaal op maaiveld gecorrigeerd voor de invloed van de fundering en constructie van gebouwen. Hiermee resulteert een predictie van de trillingen in de gebouwen in Maastricht in de toekomstige situatie.

Voor het berekenen van de trillingen is gebruik gemaakt van het frequentieafhankelijke rekenmodel *VibraDyna*. In de berekeningen is gebruik gemaakt van metingen om de predicties zo nauwkeurig als mogelijk te maken. Dit rekenmodel berekent de trillingen in gebouwen, en is gebaseerd op empirische relaties die ook bij eerdere trillingspredicties van spoor- en wegverkeer zijn gebruikt. Het gebruikte model is een semi-empirisch model, en wordt in meer detail beschreven in bijlage I. In het model worden de voor trillingen relevante parameters meegenomen, zoals het type voertuig, de snelheid van de voertuigen, de uitdamping van trillingen met de afstand tot de trillingsbron, maar ook wissels en bochten in het tracé. De trillingseigenschappen van de gebouwen langs de toekomstige tracés zijn eveneens op basis van metingen bepaald. Hiervoor zijn metingen uitgevoerd in een aantal gebouwen die qua eigenschappen representatief zijn voor de gebouwen in het studiegebied. Een uitgebreide toelichting op de meetresultaten en de rekenmethodiek is opgenomen in bijlage I.

Ook de trillingen van het busverkeer zijn meegenomen in dit trillingsonderzoek. De trillingen van bussen die in dit onderzoek zijn gebruikt, zijn bepaald op basis van metingen die op diverse locaties in Nederland zijn uitgevoerd. De trillingen van de bussen wijzigen niet door het project. Wel nemen de trillingen toe op punten waar bussen loodrecht over de tramrails passeren, zoals in de boog bij de Bassinbrug. Als bussen schuin over tramrails rijden, zoals bij de Van Hasselkade, nemen de trillingen

slechts beperkt toe. Beide invloeden zijn meegenomen in het trillingsonderzoek.

Binnen het project worden geen bouwwerkzaamheden uitgevoerd die tot trillingsschade aan gebouwen kunnen leiden. Er vinden geen heiwerkzaamheden of het intrillen van damwanden plaats op korte afstand van gebouwen. Trillingsschade tijdens de bouwfase is daarom niet kwantitatief beschouwd in dit rapport. Op basis van vergelijkbare binnenstedelijke projecten met tramverbindingen wordt evenmin trillingsschade tijdens de exploitatiefase verwacht.

3.1.2. Beoordelingskader

Er is geen wetgeving voor trillingshinder. In dit onderzoek wordt daarom voor de beoordeling van trillingshinder gebruikt gemaakt van de SBR B-richtlijn [SBR 2002], dit is in Nederland het meest gebruikte beoordelingskader voor het beoordelen van trillingen van weg- en railverkeer ten behoeve van bestemmingsplannen. Deze richtlijn bestaat uit drie delen:

1. Deel A, beoordeling van trillingsschade aan gebouwen. Op basis van bovengenoemde overwegingen leidt het project niet tot een kans op trillingsschade, er wordt daarmee voldaan aan de SBR A-richtlijn;
2. Deel B, beoordeling van trillingshinder voor personen in gebouwen. Gezien de voorgenomen activiteiten binnen het project en de afstand tussen de tram en de bebouwing, leidt het project mogelijk tot een toename van de trillingshinder voor personen in gebouwen (ten opzichte van de huidige situatie, waar nog geen sprake is van tramverkeer);
3. Deel C, beoordeling van de verstoring van gevoelige apparatuur. In het studiegebied is geen sprake van zeer gevoelige apparatuur, de enige apparatuur nabij de tramlijn met verhoogde gevoeligheid is het gasdruk meet- en regelstation aan de Maasboulevard. Op basis van de volgende overwegingen wordt geen verstoring van de apparatuur in dit station verwacht:
 - a. Voor gasleidingen wordt door bijvoorbeeld Stedin een minimale afstand van 2 meter tot werkzaamheden als het heien van palen of het intrillen van damwanden gehanteerd, werkzaamheden waarbij aanzienlijk hogere trillingsniveaus optreden dan bij het rijden van trams op 2 meter afstand;
 - b. De trams rijden op 8 meter afstand, in veel steden zijn verdeelstations dichtbij tramlijnen gesitueerd, hier zijn geen problemen bekend;
 - c. Op een afstand van 8 meter zijn de trillingen van de trams beperkt, en naar verwachting lager dan van zware vrachtwagens en bussen die ook momenteel dichtbij het meet- en regelstation passeren. De trillingen nemen daarom naar verwachting niet toe in het meet- en regelstation.

Op basis van bovenstaande afwegingen voldoet het project aan de SBR C-richtlijn.

De SBR B-richtlijn beschouwt twee grootheden: de trillingssterkte V_{max} , een indicatie van de maximaal optredende trillingssnelheid gedurende een periode van een week, en de trillingsintensiteit V_{per} , een indicatie van het tijdsgemiddelde van de trillingen.

De SBR B-richtlijn maakt onderscheid tussen drie types streefwaarden, zie Tabel 3-1.

Tabel 3-1 Streefwaarden in de SBR B-richtlijn

Streefwaarde	Omschrijving
A1	Onderste, dimensieloze streefwaarde voor de trillingssterkte V_{max}
A2	Bovenste, dimensieloze streefwaarde voor de trillingssterkte V_{max}
A3	Dimensieloze streefwaarde voor de trillingssterkte V_{per}

De hoogte van de streefwaarden is afhankelijk van drie criteria:

1. Type situatie. De SBR B-richtlijn maakt onderscheid tussen drie types situaties:
 - a. Nieuwe situatie. Hierbij is in de huidige situatie nog geen sprake van trillingen door weg- en railverkeer, bijvoorbeeld doordat het gebouw nog niet bestaat of de spoorlijn of weg nog niet is gerealiseerd;
 - b. Bestaande situatie. Deze situatie is bedoeld om de huidige situatie te beoordelen, waarbij er al trillingen zijn ten gevolge van weg- en railverkeer;
 - c. Gewijzigde situatie. Deze situatie is bedoeld om de effecten van een project te beoordelen, waarbij er in de huidige situatie al sprake is van trillingen ten gevolge van weg- en railverkeer.

In het onderzoeksgebied is sprake van intensief busverkeer. Ervaringen bij andere projecten laten zien dat bussen over kasseien, klinkers, voegen en putdeksels trillingen boven de streefwaarden kunnen geven. Daarom wordt in dit onderzoek de realisatie van de tramverbinding beoordeeld als een gewijzigde situatie. In gebouwen waar nu nog geen sprake is van trillingen, gelden dan strengere streefwaarden dan in gebouwen waar al wel sprake is van trillingen;

2. Periode van de dag. De SBR B-richtlijn maakt onderscheid tussen drie periodes: dag (7:00 tot 19:00), avond (19:00 tot 23:00) en nacht (23:00 tot 7:00). De streefwaarden voor dag en avond zijn gelijk;
3. Gebouwfunctie. Hierbij maakt de SBR B-richtlijn onderscheid tussen de gebouwfuncties *Gezondheidszorg*, *Wonen*, *Kantoor*, *Bijeenkomsten* en *Kritische werkruimte*.

De streefwaarden voor nieuwe situaties zijn weergegeven in Tabel 3-2, en voor bestaande situaties bij weg- en railverkeer in Tabel 3-3.

Tabel 3-2 Streefwaarden nieuwe situatie volgens SBR B-richtlijn

Gebouwfunctie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
<i>Gezondheidszorg</i>	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
<i>Wonen</i>	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
<i>Kantoor</i>	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
<i>Bijeenkomsten</i>	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
<i>Kritische werkruimte</i>	0.1	0.1	---	0.1	0.1	---

Tabel 3-3 Streefwaarden bestaande situatie volgens SBR B-richtlijn

Gebouwfunctie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
<i>Gezondheidszorg</i>	0.2	0.8	0.1	0.2	0.4	0.1
<i>Wonen</i>	0.2	0.8	0.1	0.2	0.4	0.1
<i>Kantoor</i>	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15
<i>Bijeenkomsten</i>	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15
<i>Kritische werkruimte</i>	0.1	0.1	---	0.1	0.1	---

Beoordeling van trillingshinder in een nieuwe situatie vindt op de volgende manier plaats: een locatie voldoet aan het beoordelingskader wanneer de trillingssterkte lager is dan A1. Een tweede mogelijkheid om te voldoen, is als de trillingssterkte lager is

dan A2 en de trillingsintensiteit lager is dan A3.

Een soortgelijke manier van beoordelen is van toepassing op een gewijzigde situatie. Hierbij wordt gebruik gemaakt van Tabel 3-3, en geldt aanvullend dat de trillingssterkte en trillingsintensiteit niet mogen toenemen ten gevolge van het project wanneer deze hoger zijn dan de A2- respectievelijk A3-waarde uit Tabel 3-2.

3.2 Laagfrequent geluid

Laagfrequent geluid ontstaat doordat de vloeren en wanden van gebouwen dichtbij een trillingsbron in trilling worden gebracht. Het trillen van de wanden en vloeren van het gebouw kan hoorbaar geluid veroorzaken, zogenaamd laagfrequent geluid. Doorgaans treedt hinder ten gevolge van laagfrequent geluid op in de buurt van tunnels en andere ondergrondse constructies. Laagfrequent geluid wordt doorgaans niet beoordeeld bij bovengrondse sporen, omdat het gewone, directe geluid het laagfrequent geluid daar maskeert.

3.2.1. Werkwijze

In het huidige onderzoek wordt de hinder ten gevolge van laagfrequent geluid bepaald aan de hand van het trillingsspectrum in de gebouwen. Dit spectrum is bepaald met het empirische rekenmodel wat ook voor trillingen wordt gebruikt, maar omdat laagfrequent geluidhinder optreedt bij andere frequenties, wordt nu een frequentieafhankelijk rekenmodel gebruikt waarbij de trillingen tussen de 10 en 250 Hz worden beschouwd (bij trillingshinder wordt gekeken naar trillingen tussen de 1 en 80 Hz). Meer informatie over het gebruikte rekenmodel is opgenomen in bijlage I.

3.2.2. Beoordelingskader

Ook voor laagfrequent geluid ontbreekt een wettelijk kader. Bovendien is er in Nederland geen uniforme beoordelingsrichtlijn beschikbaar. Er zijn verschillende methodes in omloop om de hinder ten gevolge van laagfrequent geluid te beoordelen, zoals de NSG-methode [NSG 1999] en de methodiek van De Ruiter [DR 2008]. Deze laatste wordt vooral bij laagfrequent geluid ten gevolge van spoorverkeer veelvuldig toegepast. Derhalve wordt de methodiek van De Ruiter ook in dit onderzoek toegepast. In de methodiek van De Ruiter worden twee beoordelingen uitgevoerd:

1. Een beoordeling van het passageniveau L_{Amax} , bepaald per trampassage. Vervolgens wordt over alle passages het 95 procentniveau van L_{Amax} bepaald, en dit wordt getoetst aan een grenswaarde van 35 dB(A). Om de hinder t.g.v. laagfrequent geluid in de gebouwen te bepalen, is het totale, energetisch gesommeerde en A-gewogen geluidrukniveau⁵ voor het frequentiebereik van 10 tot 250 Hz bepaald en beoordeeld op de grenswaarde van 35 dB(A) uit de methodiek van De Ruiter;
2. Een beoordeling van het passageniveau L_{lmax} , bepaald per trampassage in de octaafbanden 16, 32, 64 en 125 Hz.

De grenswaarden voor de beide beoordelingscriteria zijn weergegeven in Tabel 3-4.

Tabel 3-4 Grenswaarden laagfrequent geluid uit methodiek van De Ruiter

	L_{lmax}				L_{Amax}
	16 Hz	32 Hz	64 Hz	125 Hz	10-250 Hz
Grenswaarde	80 dB	68 dB	55 dB	45 dB	35 dB(A)

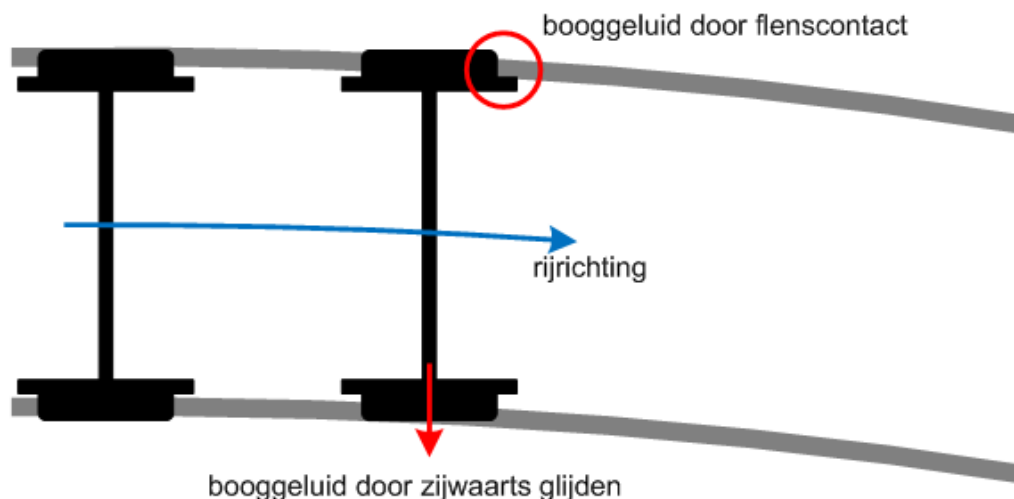
In het onderzoek ten behoeve van de aanvulling op het bestemmingsplan wordt inzicht gegeven in het aantal adressen met een overnachtingsfunctie (woonfunctie,

⁵ Hierbij is het geluidrukniveau gecorrigeerd voor het menselijk gehoor.

logiesfunctie) waar sprake is van een mogelijke overschrijding van het beoordelingskader in Tabel 3-4.

3.3 Booggeluid

Bij het rijden door krappe bogen kan booggeluid ontstaan. Dit is een piepend geluid met een hoge toon. Het wordt veroorzaakt doordat wielen door een bocht rijden, hierbij loopt de wielflens van het buitenste wiel tegen de spoorstaaf of strijkgel en ondervinden wielen een zijwaartse glijbeweging, zie Figuur 3-1. Beide bewegingen zorgen voor het ontstaan van booggeluid.



Figuur 3-1 Oorzaken van booggeluid: *flenscontact en zijwaarts glijden*

Mogelijkheden om booggeluid te voorkomen of beperken zijn met name gelegen op het gebied van smering (aan voertuigen of het spoor) en onderhoud en profilering van de rails. Omdat booggeluid met name voorkomt bij krappe bogen, is ook een goed baanontwerp van de bocht van belang.

Of en in welke mate booggeluid optreedt bij passage van trams is op voorhand moeilijk te voorspellen. Diverse parameters spelen hierbij een rol, waarbij de wrijving tussen de wielen en rails van groot belang is, maar ook de plaats waar het wiel exact op de rail rust. Met name bij boogstralen kleiner dan 100 meter neemt de kans op booggeluid toe.

3.3.1. Werkwijze

In [Thompson 2009] is aangegeven dat de kans op het optreden van booggeluid toeneemt naarmate de boogstraal kleiner wordt. De hoogte van de piek van het booggeluid wordt in mindere mate door de boogstraal beïnvloed. Uit metingen aan het RegioCitadis-trammaterieel in Den Haag blijkt dat bij een boogstraal van 50 meter minder booggeluid optreedt vergeleken met een boogstraal van 25 meter. Daarnaast is ook de kans op booggeluid bij ruimere bogen minder. Meer informatie over de methode voor het berekenen van booggeluid is opgenomen in bijlage I.

3.3.2. Beoordelingskader

Voor booggeluid is er geen wettelijk kader (*Wet geluidhinder* (Wgh)) of uniforme beoordelingsrichtlijn beschikbaar. Een toets aan het wettelijke kader is daarom niet mogelijk. Vanuit goede ruimtelijke ordening is echter wel een beoordeling gewenst. Uit het geluidsonderzoek [Arcadis 2017] dat ten behoeve van het project is uitgevoerd, blijkt dat de trams opgaan in het binnenstedelijke geluidbeeld. Hierbij hoort dat de trams hoorbaar zijn evenals andere binnenstedelijke geluiden zoals langrijdende auto's, bussen en brommers. Bij de bogen doet zich evenwel de situatie voor dat er bij

krappe bogen een kans is op booggeluid. Hierbij ontstaat het geluid van de trams duidelijk het binnenstedelijke geluid. Niet alleen de hoogte van de geluidsniveaus speelt hierbij een rol, maar ook het tonale karakter, hetgeen de hinderlijkheid vergroot. Voor het huidige project betekent dit dat piekgeluidsniveaus van boven de 75 dB op de gevel als hinderlijk worden aangemerkt.

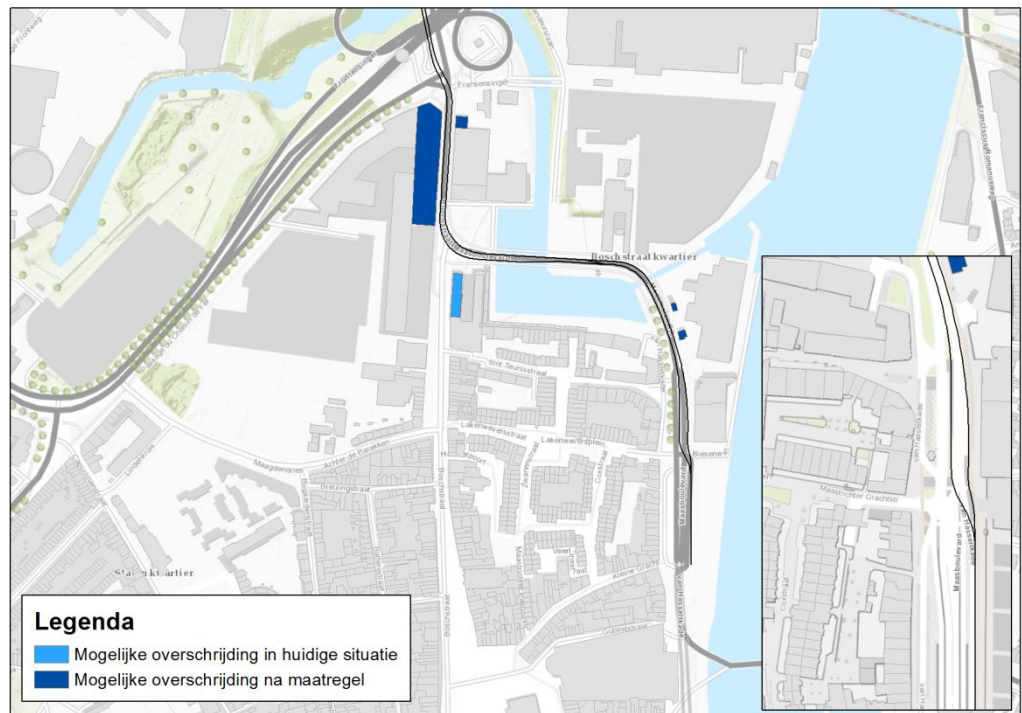
Een mogelijke overschrijding is, in lijn met het onderzoek t.b.v. de aanvulling op het MER, gedefinieerd als een adres met een overnachtingsfunctie (woonfunctie, logiesfunctie) waar de 75 dB-waarde als gevolg van piekgeluid wordt overschreden.

4 Resultaten

Dit hoofdstuk bevat de resultaten van de berekeningen voor trillingen, laagfrequent geluid en booggeluid. De resultaten (in aantal mogelijke overschrijdingen van het beoordelingskader) zijn steeds samengevat in een tabel en in overzichtskaarten per milieuaspect weergegeven. Details per gebouw zijn opgenomen in bijlage V.

4.1 Trillingen

Op basis van de uitgangspunten (zie hoofdstuk 2) en de rekenmethodiek (zie hoofdstuk 3 en bijlage I) is een predictie gemaakt van de trillingssituatie in elk gebouw. Per gebouw is de trillingssterkte V_{max} en de trillingsintensiteit V_{per} in zowel de huidige als de plansituatie vastgesteld, zie bijlage V. De resultaten zijn vervolgens beoordeeld op het beoordelingskader, de SBR B-richtlijn. De locaties van de mogelijke overschrijdingen zijn weergegeven in Figuur 4-1.



Figuur 4-1 Locaties van de overschrijdingen op het milieuaspect trillingshinder

Er zijn mogelijke overschrijdingen van het beoordelingskader op twee locaties:

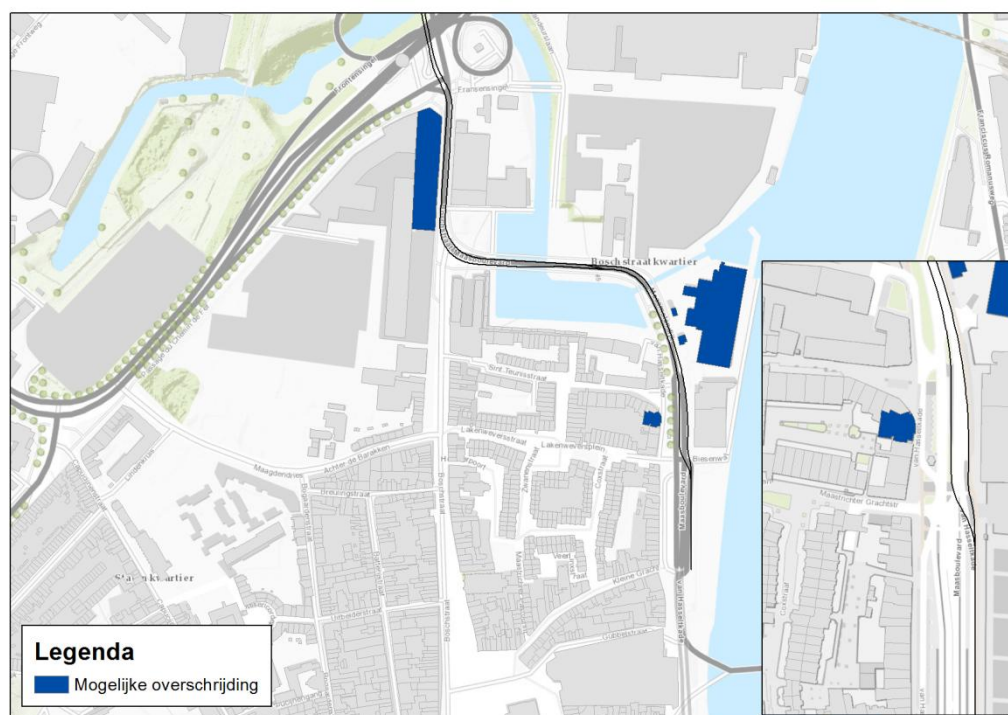
1. Rond het Sphinxgebouw, door de korte afstand tot het spoor;
2. Bij de Maasmolendijk, eveneens door de korte afstand tot het spoor.

Bij enkele panden aan de Boschstraat is ook sprake van mogelijke overschrijdingen van het beoordelingskader, deze worden echter niet door de trams, maar door de bussen veroorzaakt. Langs de rest van het tramtracé zorgen bussen niet voor overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder, omdat daar sprake is van asphalt. De trillingen van de bussen in omliggende gebouwen wijzigen niet significant door het project TMH.

4.2 Laagfrequent geluid

Op dezelfde manier als voor trillingen is een berekening uitgevoerd voor laagfrequent geluid in de gebouwen. Per gebouw zijn de parameters L_{Amax} en L_{Lmax} (voor 16, 32, 64 en 125 Hz) berekend in zowel de huidige als de plansituatie, zie bijlage V. De

resultaten zijn vervolgens beoordeeld op het beoordelingskader, de methode De Ruiter. De locaties van de overschrijdingen zijn weergegeven in Figuur 4-2.



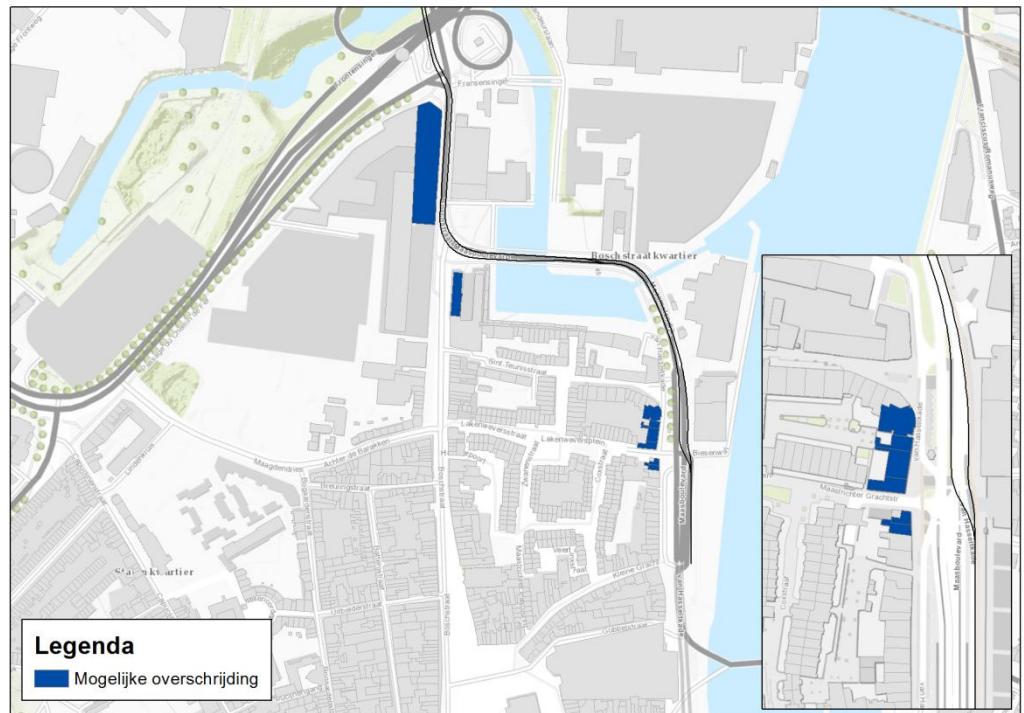
Figuur 4-2 Locaties van de overschrijdingen op het milieuaspect laagfrequent geluid

De resultaten van de laagfrequent geluidberekeningen zijn grotendeels vergelijkbaar met de trillingsberekeningen, daarnaast worden ook overschrijdingen verwacht bij een pand aan de Van Hasseltkade. Laagfrequent geluid dempt sneller uit met de afstand, en is dan ook vooral bij de eerstelijnsbebouwing dichtbij het spoor te vinden. De trillingen van bussen zijn lagerfrequent dan van trams, en zorgen in de huidige situatie niet voor overschrijdingen van het beoordelingskader voor laagfrequent geluid.

4.3 Booggeluid

Booggeluid is berekend op de gevels van de gebouwen, conform de methodiek in bijlage I. In de huidige situatie is nog geen sprake van booggeluid, deze berekening is daarom alleen uitgevoerd voor de toekomstige situatie, zie bijlage V. De locaties van de overschrijdingen zijn weergegeven in Figuur 4-3.

Er zijn mogelijke overschrijdingen van het beoordelingskader voor booggeluid bij de bocht naar de Bassinbrug en rond de eindhalte, bij de Van Hasseltkade. De trams richting de eindhalte Mosae Forum gaan hier door het wissel naar het perron toe, en kunnen daarbij booggeluid veroorzaken.



Figuur 4-3 Locaties van de overschrijdingen op het milieuaspect booggeluid

5 Mitigerende maatregelen

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de mogelijke mitigerende maatregelen toegelicht. Eerst wordt de gevolgde methodiek toegelicht, daarna wordt aangegeven welke maatregelen effectief en doelmatig zijn.

5.2 Gevolgde methodiek

De keuze voor een bepaalde maatregel wordt volgens een getrechterd proces uitgevoerd, om de onderzoeksinspanningen niet groter te laten zijn dan strikt noodzakelijk en om te voorkomen dat onterecht bepaalde oplossingsrichtingen buiten beschouwing worden laten. Hiervoor wordt een stappenplan gebruikt, de stappen zijn schematisch weergegeven in Figuur 5-1.



Figuur 5-1 Stappenplan voor maatregelenafweging

De volgende stappen worden genomen:

1. Knelpuntenanalyse: het bepalen van de situatie per gebouw ten aanzien van trillingen, laagfrequent geluid en booggeluid. De resultaten van deze analyse zijn in het voorgaande hoofdstuk toegelicht. Vervolgens worden de gebouwen geclusterd. Een groep gebouwen waarvoor een aaneengesloten maatregel mogelijk is, wordt een cluster genoemd;
2. Opstellen van overzicht met mogelijke maatregelen op basis van literatuuronderzoek en expert judgment. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de laatste stand der techniek. Resultaat is een overzicht met *mogelijke* maatregelen;
3. Eerste selectie van maatregelen op basis van benodigde reductie, inpasbaarheid (ruimte- en milieutechnisch) en kosten⁶. Deze eerste selectie vindt plaats op basis van expert judgment. Hierna resteert een overzicht van *uitvoerbare* maatregelen;
4. Doorrekenen van uitvoerbare maatregelen. Hiervoor wordt het aantal gehinderden bepaald in de situatie met maatregel, en vergeleken met de situatie zonder maatregel. Resultaat is een lijst met de uitvoerbare maatregelen, en de bijbehorende effectiviteit;
5. Uit de lijst met effectieve maatregelen wordt aangegeven welke maatregel(en), op basis van de inpasbaarheid, het effect op de omgeving en de effectiviteit ten aanzien van hinderreductie, in de afweging worden opgenomen.

In dit stadium van het onderzoek wordt in stap 4 en 5 aangegeven welke maatregelen voldoende effectief zijn om te voldoen aan het beoordelingskader. Een detaildoorrekening is nu nog niet mogelijk, omdat het voertuigtype nog onbekend is.

⁶ Deze drie parameters zijn meegenomen in de afweging om doelmatig met overheids gelden om te gaan. Een maatregel is doelmatig als deze (1) merkbaar effect heeft, (2) realiseerbaar is en (3) de mate van effect in relatie staat tot de kosten. Omdat dit laatste aspect een rekbaar begrip is, wordt in het voorliggende onderzoek dit derde aspect minder zwaar meegewogen.

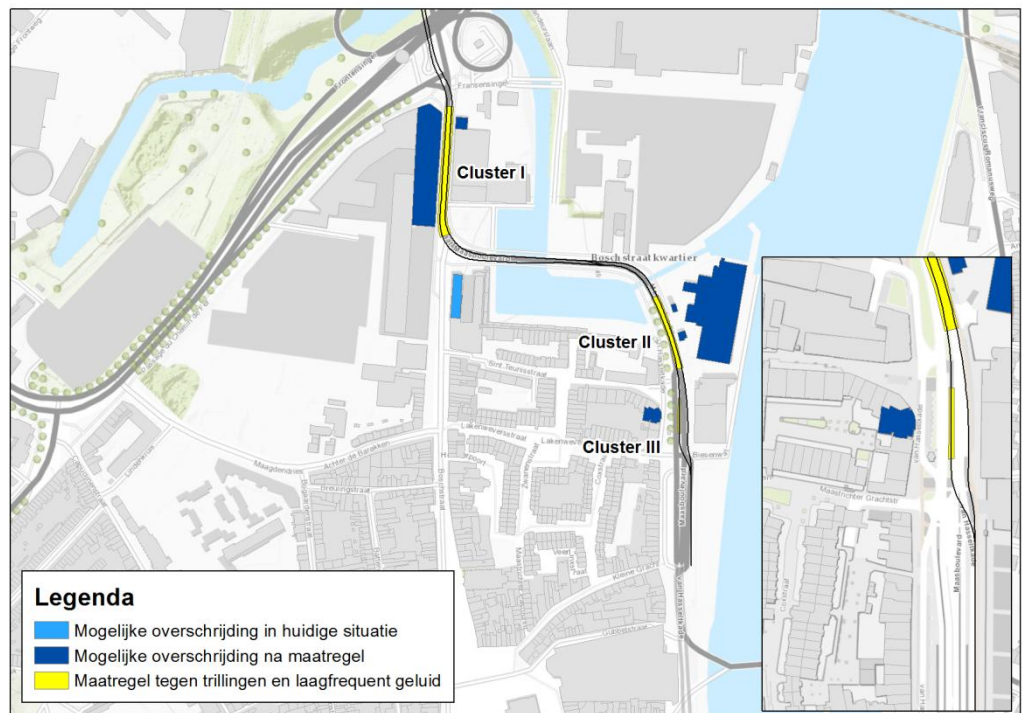
Daarom wordt een ruimte- en budgetreservering voor maatregelen opgenomen, gebaseerd op conservatieve (worst-case) aannames zodat er niet onterecht bepaalde locaties voor maatregelen worden weggelaten in de afweging. Wanneer het voertuigtype bekend is, zal worden bepaald worden of de ruimte-reservering ook daadwerkelijk dient te worden gebruikt. Hiervoor zullen in een later stadium detailberekeningen worden uitgevoerd. Als hieruit blijkt dat de ruimte-reservering voor de maatregelen geëffectueerd dient te worden, wordt ook de technische detaillering van de maatregel uitgewerkt. Er vindt bij deze detailuitwerking *geen* doelmatigheidsafweging meer plaats, met andere woorden, de in dit onderzoek voorgestelde maatregelen vallen dan niet meer af omdat de kosten te hoog zijn.

De overige stappen worden in de volgende subparagrafen nader toegelicht. In de volgende paragraaf zijn alle mogelijke mitigerende maatregelen opgenomen.

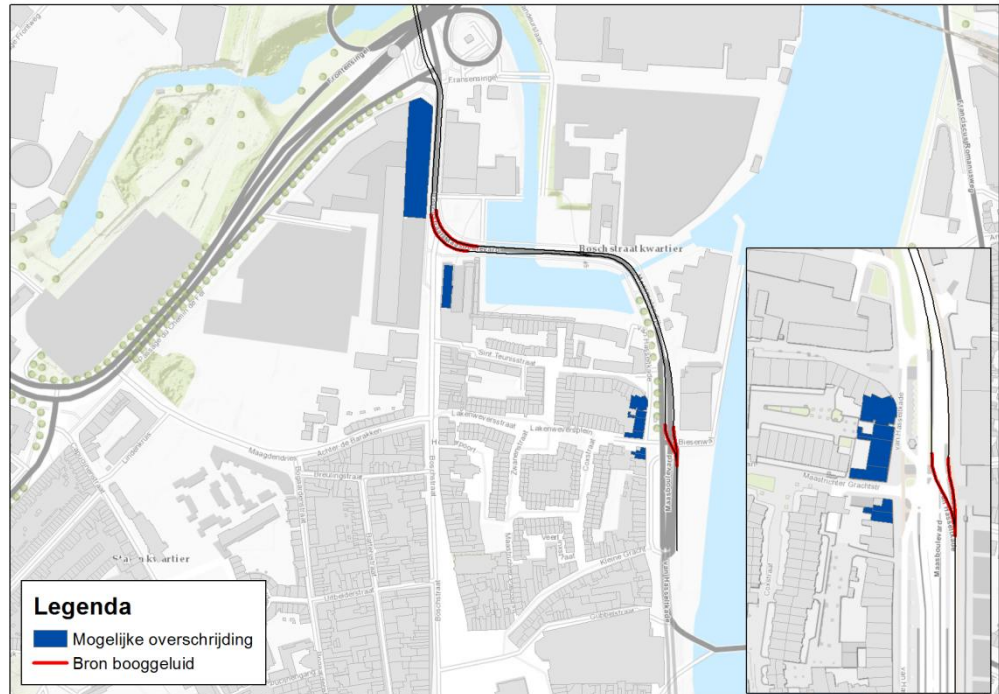
5.2.1. *Stap 1 - Knelpuntenanalyse*

In bijlage V zijn de resultaten van de berekeningen weergegeven voor de milieuaspecten trillingen, laagfrequent geluid en booggeluid. Met behulp van de resultaten van de metingen, aanvullende berekeningen en een inschatting van de gebouweigenschappen van de niet-gemeten gebouwen is een predictie gemaakt van de trillingssterkte en het laagfrequent geluidniveau in alle gebouwen, en het booggeluid op de gevels. De gebouwen waar een overschrijding van de streefwaarden wordt verwacht in de plansituatie zijn weergegeven in de kaarten in het voorgaande hoofdstuk. Omdat maatregelen tegen trillingen ook effectief zijn tegen laagfrequent geluid (wat ontstaat doordat in trilling gebrachte oppervlakken in gebouwen geluid gaan uitstralen), zijn de mogelijke overschrijdingen op de milieuaspecten trillingen en laagfrequent geluid gecombineerd weergegeven in Figuur 5-2. In deze figuur is ook de locatie van de maatregelvlakken weergegeven.

De mogelijke overschrijdingen op het milieuapect booggeluid zijn weergegeven in Figuur 5-3. In deze figuur zijn de bochten gemarkeerd waar booggeluid ontstaat.



Figuur 5-2 Locaties voor trillings- en laagfrequent geluidmaatregelen, rechts een uitsnede bij de eindhalte



Figuur 5-3 Locaties voor booggeluidmaatregelen, rechts een uitsnede bij de eindhalte

De lengte van de benodigde maatregelen per cluster is weergegeven in Tabel 5-1. Voor deze clusters wordt gezocht naar de meest kosteneffectieve maatregel.

Tabel 5-1 Lengte per cluster voor maatregelen tegen trillingen en laagfrequent geluid

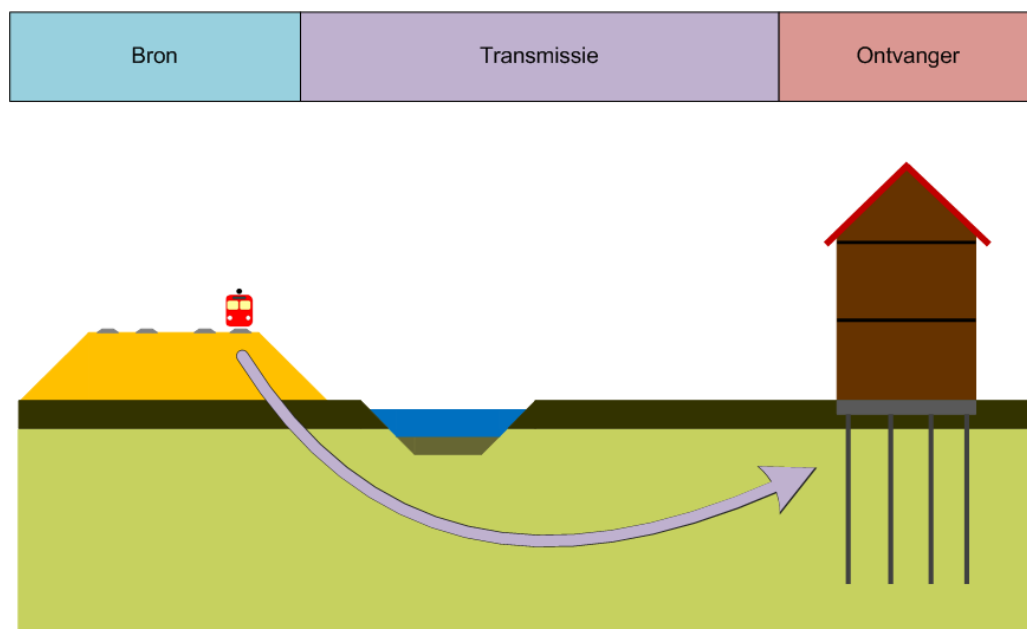
Cluster	Benodigde lengte maatregel
I	150 meter, dubbelsporig
II	85 meter, dubbelsporig
III	40 meter, enkelsporig

5.2.2. Stap 2 - Mogelijke maatregelen

Trillingen ten gevolge van tramvoertuigen kunnen op drie posities worden gereduceerd:

1. Bij de bron (tramvoertuigen of spoorconstructie);
2. Bij de ontvanger (gebouw);
3. Tussen de bron en de ontvanger (in de bodem).

Deze drie posities zijn schematisch weergegeven in Figuur 5-4.



Figuur 5-4 Schematisch overzicht spoorstelsel

Bij het zoeken naar mogelijkheden voor het reduceren van de trillingen dient de beschouwing van mogelijke reductieopties bij voorkeur in de hieronder opgenomen volgorde te worden uitgevoerd:

- het reduceren van de brontrillingen, afkomstig van het tramvoertuig;
- het reduceren van de overdracht van de trillingen, bijvoorbeeld door het ontkoppelen van de bron en de ontvanger door het toepassen van absorberende of reflecterende tussenlagen. Dit type maatregel wordt het meest toegepast;
- het verhogen van de impedantie van de aangestoten constructie (de mate waarin een constructie in beweging kan worden gebracht). Dit kan bijvoorbeeld door het verhogen van de stijfheid van de constructie of het vergroten van de massa.

De effectiviteit van een maatregel hangt af van een groot aantal factoren. Maatregelen die op de ene locatie effectief zijn, kunnen op een andere locatie de trillingssterkte niet of veel minder reduceren. Het uitvoeren van een maatregelenonderzoek dient daarom altijd locatiespecifiek plaats te vinden.

Door middel van bronnenonderzoek, expert interviews en brainstormsessies is een breed scala aan mogelijke trillingsmaatregelen bepaald. De verschillende types maatregelen worden in bijlage II nader toegelicht.

5.2.3. Stap 3 - Eerste selectie van maatregelen

Op basis van de beschrijving van de mogelijke maatregelen en het benodigde effect kan een eerste selectie worden gemaakt van maatregelen. Hierbij is de classificatie zoals weergegeven in Tabel 5-2 gebruikt. Per cluster is in Tabel 5-3 aangegeven of een bepaalde maatregel kansrijk is voor nader onderzoek. Deze inschatting is gemaakt op basis van de inpasbaarheid, uitvoerbaarheid, effectiviteit van de maatregel, de benodigde reductie en de kosten. Hierbij geldt dat maatregelen met meer effect, een betere uitvoerbaarheid en lagere kosten eerder in aanmerking komen voor nader onderzoek, dan maatregelen die minder goed scoren op deze aspecten.

Tabel 5-2 Legenda bij Tabel 5-3

Kleurcode	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit
-	Niet uitvoerbaar	Negatief effect
0	Realisatie heeft forse consequenties	Geen effect
+	Redelijk eenvoudig uitvoerbaar	Klein, niet merkbaar effect
++	Eenvoudig uitvoerbaar	Merkbaar effect
+++	Zeer eenvoudig uitvoerbaar	Voldoet aan beoordelingskader

Tabel 5-3 Eerste inschatting maatregelen trillingen en laagfrequent geluid

		Uitvoerbaar	Effectiviteit		Kosten ⁷	Nader onderzoeken
			Trillingen	LFG		
Bronmaatregelen						
	Baseplate pads	-				
	Resilient fasteners	-				
	Under sleeper pads	-				
	Ballastmatten	-				
	Elastische mat	+	++	+++	€ 2.000/m	✓
	Floating slab track	+	+++	+++	€ 15.000/m	✓
	Slab track	+	+	-	€ 11.000/m	
	Aanpassing dwarsliggers	-				
	Aanpassing spoorconstructie	0	+	+		
	Aanpassing voertuigen	0	++	++		
Transmissiemaatregelen						
	Trillingsscherm	0	+	++	€ 4.000/m	
	Bekleed trillingsscherm	0	++	++	€ 9.000/m	
	Sleuf tussen twee damwanden	0	+	++	€ 5.000/m	
	Sloot aanleggen of verdiepen	-				
	Aanpassen bodem	+	+	+	€ 15.000/m	
Ontvangermaatregelen						
	Amoveren	-	+++	+++	€ 250.000	
	Verstijven van vloeren	0	+	-	€ 40.000	

⁷ Minimale totale bouwkosten met 15% risico-opslag, incl. BTW, maar exclusief nadere engineering. Kosten zijn gebaseerd op prijspeil 2017 en met een nauwkeurigheid van +/- 20 procent. Verwijdering en afvoer bestaand is *niet* opgenomen. Voor maatregelen aan het spoor zijn de kosten geldig voor enkelsporige trajecten.

	Uitvoerbaar	Effectiviteit		Kosten ⁷	Nader onderzoeken
		Trillingen	LFG		
Verstijven van muren	0	+	0	€ 50.000	
Inpakken van fundering	0	+	+	€ 40.000	
Tuned Mass Damper	0	-	-	€ 8.000	
Onderheien	0	+	0	€ 100.000	
Afgeveerde vloer	0	++	++	€ 25.000	
Akoestische wanden/plafonds	0	0	++	€ 30.000	

Een aantal bronmaatregelen is niet inpasbaar omdat het spoor ook door wegverkeer wordt gebruikt. Aan de voertuigen worden in de aanbesteding door de exploitant, de *Vlaamse Vervoermaatschappij De Lijn*, al eisen gesteld die zorgen voor lagere trillingen en laagfrequent geluid, maar de impact van het voertuig van de winnende aanbieder is nog onbekend. Daarom is in dit onderzoek gerekend met een conservatief (bovengrens) voertuig.

Omdat het gaat om een binnenstedelijke omgeving, zijn veel transmissiemaatregelen niet goed uitvoerbaar, vanwege ruimtegebrek en een grote impact op de bestaande leefomgeving. Deze maatregelen vallen daarom grotendeels af op uitvoerbaarheid. Maatregelen aan de gebouwen zijn in een aantal gevallen effectief met relatief lage kosten per gebouw, maar gezien de impact op de bewoners van de panden worden deze maatregelen alleen uitgevoerd indien overige maatregelen onvoldoende effect hebben.

Op basis van deze overwegingen worden een elastische mat en een floating slab track nader onderzocht, zie Figuur 5-5 voor een schematische weergave hiervan. Dit nader onderzoek wordt beschreven in de volgende paragraaf.

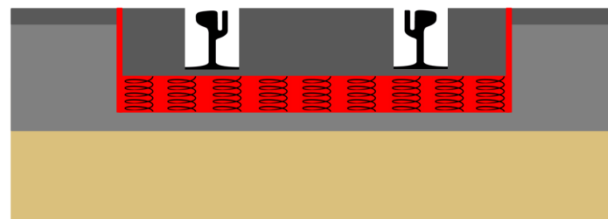
Standaard spoorconstructie in wegdek



Spoorconstructie met elastische mat



Spoorconstructie met floating slab track



Figuur 5-5 Normale spoorconstructie (boven), elastische mat op betonplaat (midden) en floating slab track (onder).

Voor booggeluid is eenzelfde aanpak gehanteerd, zie Tabel 5-4. Van een aantal maatregelen zijn de kosten onbekend, omdat deze afhankelijk zijn van nog niet vastgestelde parameters. De kosten zijn daarom niet meegewogen in de selectie van de uiteindelijke maatregelen.

Tabel 5-4 Eerste inschatting maatregelen booggeluid

	Uitvoerbaar	Effectiviteit	Kosten	Nader onderzoeken
Bronmaatregelen				
Reductie rijnsnelheid	0	0		
Smering (wiel of rail)	++	++		✓
Hoogstaand spooronderhoud	+	++		✓
Wieldempers	++	+		(✓)
Ontvangermaatregelen				
Amoveren	-	+++	€ 250.000	
Akoestische wanden/plafonds	0	++	€ 30.000	

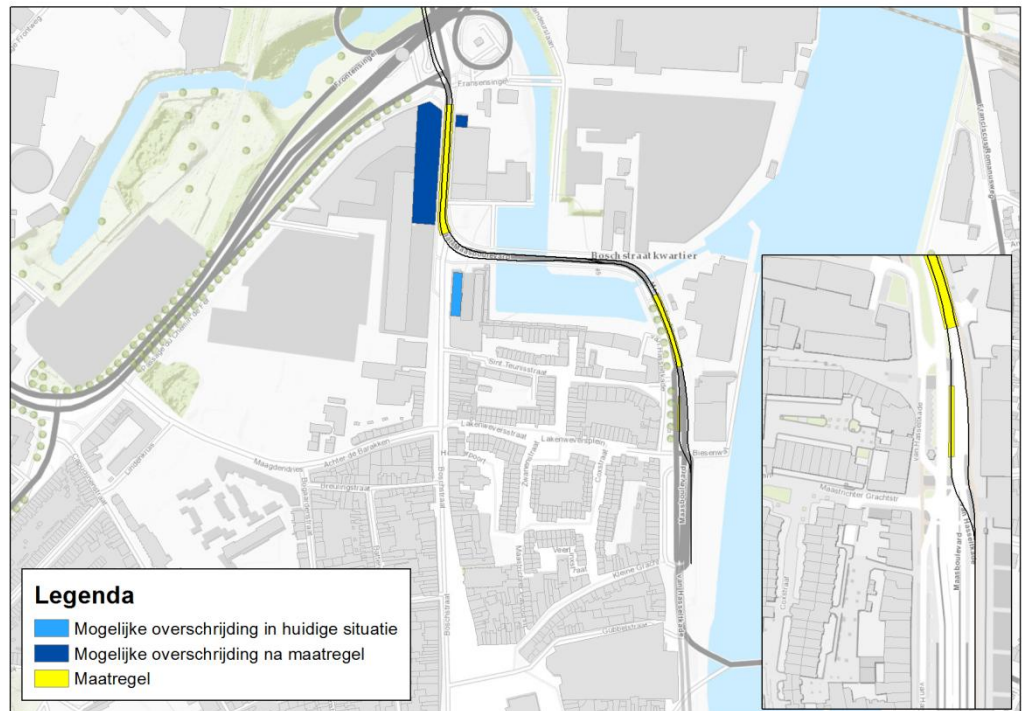
Voor booggeluid is smering en demping in de voertuigen, extra spooronderhoud (akoestisch slijpen⁸) en smering in krappe bogen, maatregelen met voldoende effectiviteit.

De genoemde maatregelen die mogelijk voldoende effectief zijn, zijn doorgererekend. De resultaten hiervan zijn opgenomen in de volgende paragraaf.

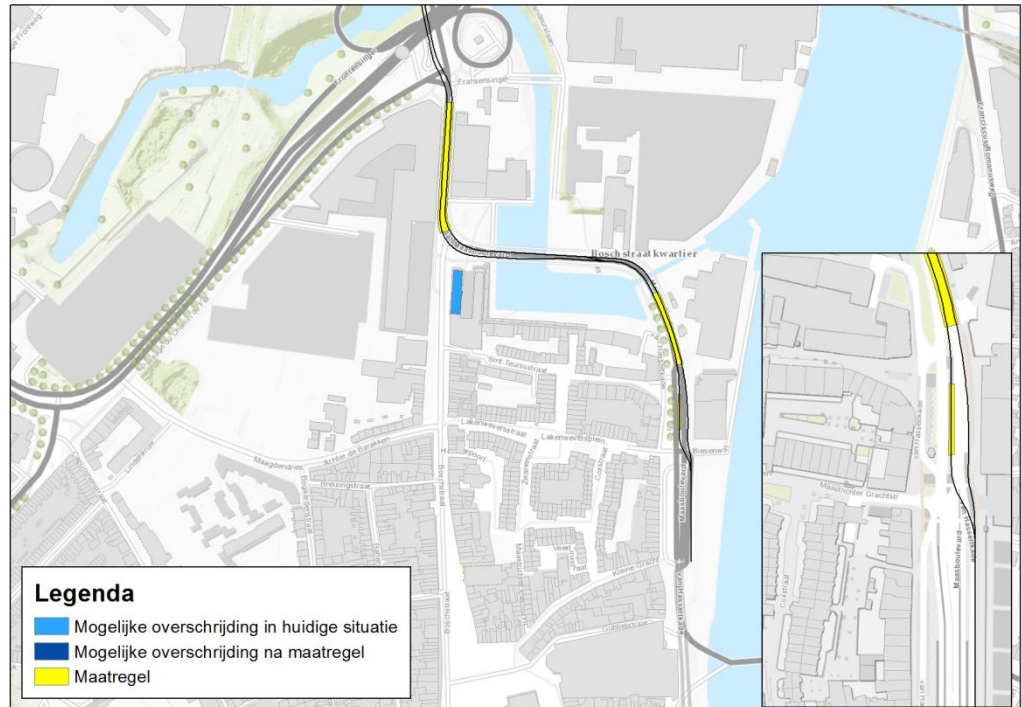
5.2.4. Stap 4 - Meest effectieve maatregelen

Voor elke maatregel die in de voorgaande paragraaf als mogelijk effectief is gemarkeerd, is een gedetailleerde berekening gedaan voor de eerstelijnsbebouwing in het onderzoeksgebied. Deze berekening is uitgevoerd op basis van modelberekeningen. De overschrijdingen op trillingen en laagfrequent geluid na maatregelen zijn weergegeven in Figuur 5-6 voor een elastische mat op een betonplaat, en in Figuur 5-7 voor een floating slab track als maatregel.

⁸ Extra nabewerking bij het slijpen van het spoor, gericht op het verlagen van de railruwheid.



Figuur 5-6 Mogelijke overschrijdingen trillingen en/of laagfrequent geluid met elastische mat op betonplaat als maatregel, rechts een uitsnede bij de eindhalte



Figuur 5-7 Mogelijke overschrijdingen trillingen en/of laagfrequent geluid met floating slab track als maatregel, rechts een uitsnede bij de eindhalte

Uit de berekeningen volgt dat voor cluster I een floating slab track, op basis van de huidige informatie, een geschikte maatregel is met voldoende effectiviteit. Een

elastische mat op een betonplaat reduceert de trillingen en het laagfrequent geluid voor clusters II en III voldoende, voor cluster I is een zwaardere (en kostbaardere) maatregel noodzakelijk in de vorm van een floating slab track. Na het nemen van deze maatregelen zijn er geen overschrijdingen meer van het beoordelingskader.

Voor booggeluid zijn meerdere maatregelen mogelijk, zoals het toepassen van wielsmering en demping in de voertuigen, eventueel aangevuld met akoestisch slijpen en het toepassen van railsmering van krappe bogen. Het effect van de maatregelen tegen booggeluid is ingeschat op basis van kentallen. Met deze maatregelen valt het booggeluid binnen het heersende binnenstedelijke geluidsbeeld, zodat een aanvaardbare situatie ontstaat.

5.2.5. Stap 5 – Voorstel maatregelen

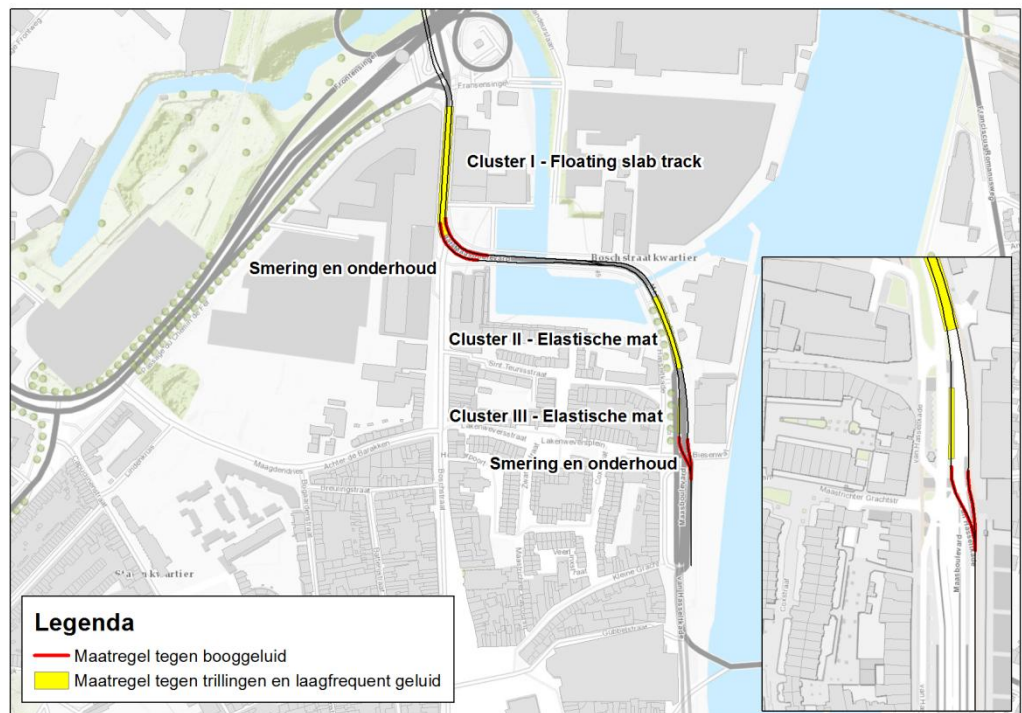
Op basis van de doorgerekende maatregelen, is per cluster een meest kosteneffectieve maatregel (minst kostbare maatregel met voldoende effect) benoemd. De maatregelen zijn weergegeven in Figuur 5-8 en samengevat weergegeven in Tabel 5-5. Voor deze maatregelen wordt in het bestemmingsplan een ruimte- en budgetreservering opgenomen. Omdat het voertuigtype van de trams nog onbekend is, is het niet mogelijk om in dit stadium van het onderzoek de maatregelen volledig uit te detailleren. Daarom adviseren wij om de maatregelen op te nemen als ruimte- en budgetreservering. Wanneer het voertuigtype bekend is, kan worden bepaald of de ruimtereservering ook daadwerkelijk dient te worden gebruikt. Hiervoor dienen in een later stadium detailberekeningen worden uitgevoerd. Als hieruit blijkt dat de ruimtereservering voor de maatregelen geëffectueerd dient te worden, kan ook de technische detaillering van de maatregel worden uitgewerkt.

Om het booggeluid te reduceren, adviseren wij om de volgende, getrapte aanpak te hanteren:

1. Toepassen van wielsmering in de voertuigen, dit wordt meegenomen in de uitvraag voor materieel van de *Vlaamse Vervoermaatschappij De Lijn*;
2. Effecten monitoren, indien aanvullende maatregelen nodig zijn, worden de krappe bogen akoestisch geslepen;
3. Effecten monitoren, indien aanvullende maatregelen nodig zijn, dan wordt boogsmearing toegepast in de krappe bogen. Hiervoor adviseren wij een ruimtereservering in de spoorgoot op te nemen.

Tabel 5-5 Ruimtereserveringen voor maatregelen in bestemmingsplan

Locatie	Maatregelreservering in bestemmingsplan
Cluster I - Boschstraat, ter hoogte van Sphinxgebouw	Floating slab track, 150 meter, dubbelsporig
Bocht Boschstraat – Maasboulevard	Smering en hoogstaand spooronderhoud
Cluster II - Maasboulevard t.h.v. Maasmolendijk 24-26	Elastische mat, 85 meter, dubbelsporig
Cluster III - Eindhale Mosae Forum	Elastische mat, 40 meter, enkelsporig Smering en hoogstaand spooronderhoud



Figuur 5-8 Locaties van ruimtereserveringen voor maatregelen, rechts een uitsnede bij de eindhalte

De verwachte situatie in de gebouwen rond het tramtracé voor de milieuaspecten trillingen, laagfrequent geluid en booggeluid met de voorgestelde maatregelen is per adres weergegeven in bijlage V. Na het nemen van de voorgestelde maatregelen voldoen de trillingen, het laagfrequent geluid en booggeluid van de trams op alle locaties aan het beoordelingskader. Wel zijn er langs het zuidelijke deel van de Boschstraat zowel in de huidige als toekomstige situatie mogelijke overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder als gevolg van bussen. De trillingen nemen hier echter niet toe door de realisatie van het project TMH.

6 Conclusies

In het voorliggende rapport is ten behoeve van het bestemmingsplan onderzoek verricht naar de milieueffecten trillingen, laagfrequent geluid en booggeluid voor het project *Tram Maastricht-Hasselt*. Hiervoor is met behulp van een predictiemodel en metingen per gebouw een berekening gemaakt van deze milieueffecten voor de situatie waarbij de tramverbinding tussen Hasselt en Maastricht Mosae Forum in exploitatie is.

Uit het onderzoek volgt dat het project leidt tot een toename van het aantal mogelijke overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingen, en daarnaast tot mogelijke overschrijdingen van het beoordelingskader voor laagfrequent geluid en booggeluid:

- mogelijke overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingen treden vooral op bij de Boschstraat (Sphinxgebouw) en de Maasmolendijk;
- mogelijke overschrijdingen van het beoordelingskader voor laagfrequent geluid treden vooral op bij bebouwing dichtbij het spoor, in dezelfde gebieden als waar ook mogelijke overschrijdingen zijn van het beoordelingskader voor trillingen. Een extra locatie met mogelijk laagfrequent geluid is een pand aan de Van Hasseltkade;
- booggeluid treedt met name op bij krappe bogen, bij de bocht richting het Bassin en bij de eindhalte Mosae Forum.

Voor bovengenoemde locaties is vervolgens een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. Uit dit onderzoek blijkt dat een floating slab track voldoende effect heeft voor trillingen en laagfrequent geluid rond het Sphinxgebouw, bij de Maasmolendijk en de Van Hasseltkade kan volstaan worden met een lichtere maatregel, een elastische mat. Het booggeluid kan voldoende worden gereduceerd met een maatregelpakket met smering in de voertuigen, eventueel aangevuld met extra spooronderhoud (akoestisch slijpen) en smering in de krappe bogen. Met deze aanpassingen valt ook het booggeluid binnen het heersende binnenstedelijke geluidsbeeld. Na het nemen van de voorgestelde maatregelen⁹ voldoen de trillingen, het laagfrequent geluid en booggeluid van de trams op alle locaties aan het beoordelingskader.

Langs de Boschstraat zijn er zowel in de huidige als toekomstige situatie mogelijke overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder als gevolg van bussen. De trillingen nemen hier echter niet toe door de realisatie van het project TMH.

⁹ Omdat het voertuigtype van de trams nog onbekend is, is het niet mogelijk om in dit stadium van het onderzoek de maatregelen volledig uit te detailleren. Daarom worden de maatregelen opgenomen als ruimte- en budgetreservering, gebaseerd op conservatieve (worst-case) aannames zodat er niet onterecht bepaalde locaties voor maatregelen worden weggelaten in de afweging, noch onterecht een onvoldoende effectieve maatregel wordt voorgesteld. Wanneer het voertuigtype bekend is, zal worden bepaald worden of de ruimtereservering ook daadwerkelijk dient te worden gebruikt. Hiervoor zullen in een later stadium detailberekeningen worden uitgevoerd. Als hieruit blijkt dat de ruimtereservering voor de maatregelen geëffectueerd dient te worden, wordt ook de technische detaillering van de maatregel uitgewerkt. Er vindt bij deze detailuitwerking *geen* doelmatigheidsafweging meer plaats, met andere woorden, de in dit onderzoek voorgestelde maatregelen vallen dan niet meer af omdat de kosten te hoog zijn.

Bronnen

- Asmussen 2011: *Review of existing standards, regulations and guidelines, as well as laboratory and field studies concerning human exposure to vibration*, RIVAS Deliverable D1.4, 12 januari 2011
- Arcadis 2017: *Geluidsonderzoek tram Maastricht-Hasselt*, Arnhem, 2017
- BTS 2012: *Beleidsregel Trillinghinder Spoor*, gepubliceerd in Staatscourant 2012, nr. 7532, 10 april 2012
- BTS 2014: *Beleidsregel Trillinghinder Spoor*, wijzigingen gepubliceerd in Staatscourant 2014, nr. 8251, 24 maart 2014
- CUR 2012: *Damwandconstructies, 6^e herziene druk*, CUR Bouw&Infra, 2012
- DIN 1999: *DIN 4150, Erschütterungen im Bauwesen, teil 1, 2 en 3*, 1999
- Klaeboe 2003-1: *Vibration in dwellings from road and rail traffic – Part II: exposure-effect relationships based on ordinal logit and logistic regression models*, Applied Acoustics, 64, 89-109
- DR 2008: *Methodiek van De Ruiter*, Trillingen en LF Geluid, kennisdocument van het kenniscentrum Spoorgeluid
- Klaeboe 2003-2: *Vibration in dwellings from road and rail traffic – Part III: towards a common methodology for socio-vibrational surveys*, Applied Acoustics, 64, 111-120
- Movares 2014-1: *Sporen in Arnhem, Trillingsonderzoek ten behoeve van tracébesluit*, Movares, 2014
- Movares 2014-2: *Sporen in Utrecht, Trillingsonderzoek ten behoeve van tracébesluit*, Movares, 2014
- NSG 1999: *'Stil geluid': laagfrequent geluid in woningen*, Natuurkundewinkel RuG, Groningen, 1999
- Lijn 2014: *Technische specificatie_Sneltram deel C1*
- ProRail 2014: *Omschrijving systematiek doelmatigheidsafweging*, ProRail, 2014
- SBR 2002: *Meet- en beoordelingsrichtlijn*, Stichting BouwResearch, 2002
- Steinhauser 2010: *Erschütterungsbeurteilung nach ONORM S 9012 im Vergleich zur internationalen Normung, Lärmbekämpfung*, Bd. 5 Nr. 5, 206-212, 2010
- Thompson 2009: *Railway noise and vibration*, Elsevier 2009
- Woodcock 2012: *Human response to vibration from passenger and freight railway traffic in residential environments*, ICSV19, Vilnius, Lithuania, 8-12 juli 2012
- Zapfe 2009: *Groundborn Noise and Vibration in Buildings Caused by Rail Transit, Final report for Transit Cooperative Research Program (TCRP)*, D-12, 2009

Colofon

Opdrachtgever Arcadis Nederland BV

Uitgave Movares Nederland B.V.

Divisie Ruimte, Mobiliteit en Infra
Afdeling Infrastructuur: Waterbouw, Geotechniek en Dynamica

Daalseplein 100
Postbus 2855
3500 GW Utrecht

Telefoon 06 10 03 94 54

Ondertekenaar
Adviseur

Projectnummer RM004781

Kenmerk TMH4.1|009

© 2017, Movares Nederland B.V.

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 Movares Nederland B.V.

Bijlage I Onderbouwing correctiefactoren in predicties

De bijlage bevat een samenvatting van de meetresultaten die zijn gebruikt ten behoeve van de predicties voor trillingen, laagfrequent geluid en booggeluid.

I.1 Trillingen

Een rijdende tram veroorzaakt trillingen in de directe omgeving van het spoor. Algemeen geldt dat de trillingssterkte toeneemt wanneer:

- een tram harder rijdt;
- een tram door een bocht gaat of over een wissel rijdt;
- een gebouw dichterbij het spoor staat;
- een gebouw trillingsgevoelig is.

Voor de beschrijving van de trillingssterkte is een formule opgesteld waarin bovenstaande factoren zijn meegenomen. Deze is gebaseerd op de volgende basisvergelijking:

$$v = \sqrt{v_{\text{doorgaand spoor}}^2 + v_{\text{wissel}}^2} \quad (1)$$

In deze vergelijking wordt de term $v_{\text{doorgaand spoor}}$ berekend met behulp van de volgende vergelijking:

$$v_{\text{doorgaand spoor}} = v_0 \cdot C_{\text{snellheid}} \cdot C_{\text{bocht}} \cdot C_{\text{bodem1}} \cdot C_{\text{woning}} \cdot C_{\text{correctie}} \quad (2)$$

De term v_{wissel} wordt beschouwd als een toeslagfactor op de trillingen van een tram op doorgaand spoor, en wordt als volgt berekend:

$$v_{\text{wissel}} = v_0 \cdot C_{\text{snellheid}} \cdot C_{\text{bodem2}} \cdot C_{\text{woning}} \cdot C_{\text{correctie}} \cdot C_{\text{wissel}} \quad (3)$$

De term C_{bocht} uit vergelijking (2) valt weg, deze kan namelijk niet onafhankelijk van de invloed van het wissel worden bepaald en is daarom meegenomen in de term C_{wissel} . Verder gelden voor C_{bodem} andere parameters, omdat een wissel zich gedraagt als een puntbron. In de analyses worden C_{wissel} en C_{bodem} daarom samen gepresenteerd.

De betekenis van de verschillende parameters is hieronder weergegeven.

Parameter	Betekenis
$C_{\text{snellheid}}$	$e^{B \cdot v_{\text{tram}}}$, zie par. I.1.1 [-]
C_{bodem}	$\left(\frac{x_0}{x}\right)^n \cdot e^{-\alpha \cdot (x-x_0)}$, C_{bodem1} voor doorgaand spoor, C_{bodem2} voor wissels, zie par. I.1.2 [-]
C_{bocht}	Factor voor krappe bogen, zie par. I.1.3 [-]
C_{woning}	Overdracht van maaiveld voor een gebouw naar de verdiepingsvloeren, zie par. I.1.4 [-]
$C_{\text{correctie}}$	Correctiefactor voor verschillen in bodemopbouw tussen Den Haag en Maastricht, zie par. I.1.6 [-]
C_{wissel}	Correctiefactor voor het rijden over een wissel, zie par. I.1.5 [-]
v	Trillingssterkte in de woning [-]
v_0	Trillingssterkte op maaiveld op referentieafstand x_0 , zie par. I.1.1 [-]

Parameter	Betekenis
x_0	Referentieafstand tot trillingsbron, in dit onderzoek 10 [m]
x	Afstand tot de trillingsbron, afhankelijk van locatie, gebaseerd op ontwerp [m]
V_{tram}	Rijsnelheid van de tram, afhankelijk van locatie, gebaseerd op ontwerp [km/h]
n	Factor voor geometrische spreiding van de trillingen, verwerkt in C_{bodem} , zie par. 1.1.2 [-]
α	Dempingsconstante voor materiaaldemping van de bodem, verwerkt in C_{bodem} , zie par. 1.1.2 [1/m]

De parameters van deze factoren zijn bepaald door metingen te verrichten in een situatie die qua bodem, spoorconstructie, voertuigtype en rijsnelheid zo goed mogelijk vergelijkbaar is met de situatie in Maastricht. Deze situatie doet zich voor in Den Haag, bij tramlijn 3. Deze tramlijn rijdt over een zandgrond die qua gedrag vergelijkbaar is met de bodem in Maastricht. De trams zijn van het type RegioCitadis, en hebben naar verwachting vergelijkbare of slechtere trillingseigenschappen als het trammaterieel dat in de toekomst in Maastricht zal gaan rijden (worst-case benadering).

Voor alle parameters geldt dat deze frequentieafhankelijk in het rekenmodel zijn meegenomen. Het gehanteerde rekenmodel, *VibraDyna*, is een door Movares ontwikkeld rekenmodel voor trillingen en laagfrequent geluid, gebaseerd op empirische formules, modelberekeningen en een groot aantal metingen. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van versie 1.5. Dit model is uitvoerig gevalideerd in eerdere projecten met behulp van metingen in gebouwen, waarbij modelpredicties zijn vergeleken met meetresultaten.

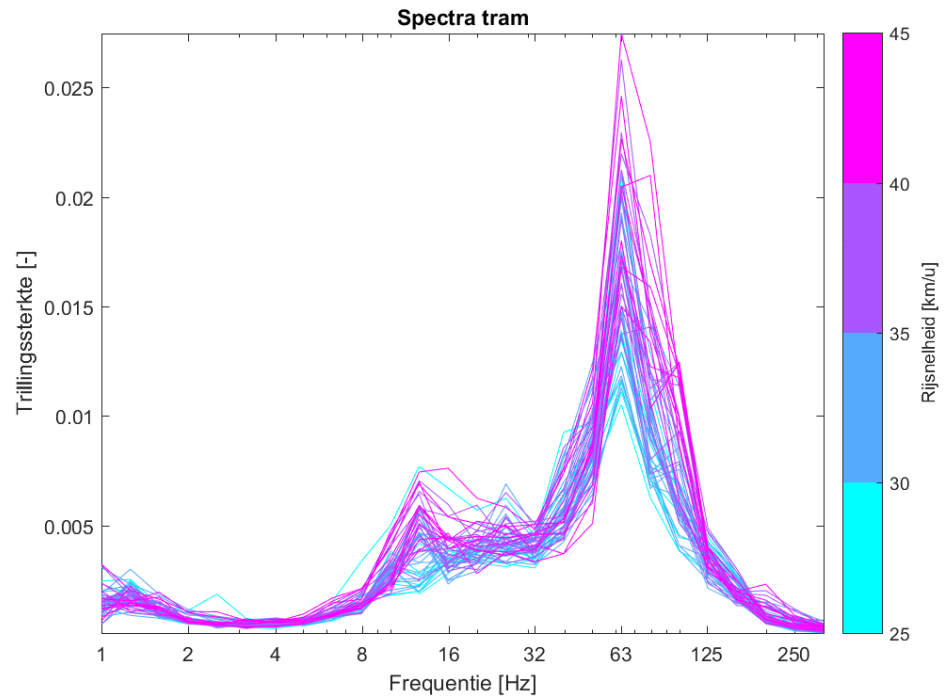
1.1.1 De trams

In deze subparagraaf wordt ingegaan op de waarde van de trillingssterkte van de bron, de trams, de zogenaamde v_0 . Het meten van v_0 als losse parameter is niet mogelijk, omdat deze afhankelijk is van de tramsnelheid, de afstand tot het spoor en de condities van het spoor. Wel is het mogelijk om een waarde van v_0 te bepalen uit het snelheidsverband op een vaste afstand van het tramspoor. Hiervoor zijn metingen uitgevoerd bij optrekkende en afremmende trams, om een zo groot mogelijke spreiding in rijsnelheid te krijgen.

Om de overige parameters uit de vergelijkingen (1) tot en met (3) te kunnen wegstrepen, zijn metingen uitgevoerd op maaiveld, bij rechtdoorgaand spoor zonder wissels, en op een vaste afstand tot het spoor die ongeveer overeenkomt met de afstand tussen spoor en gebouwen in Maastricht. Hierdoor reduceert vergelijking (1) tot:

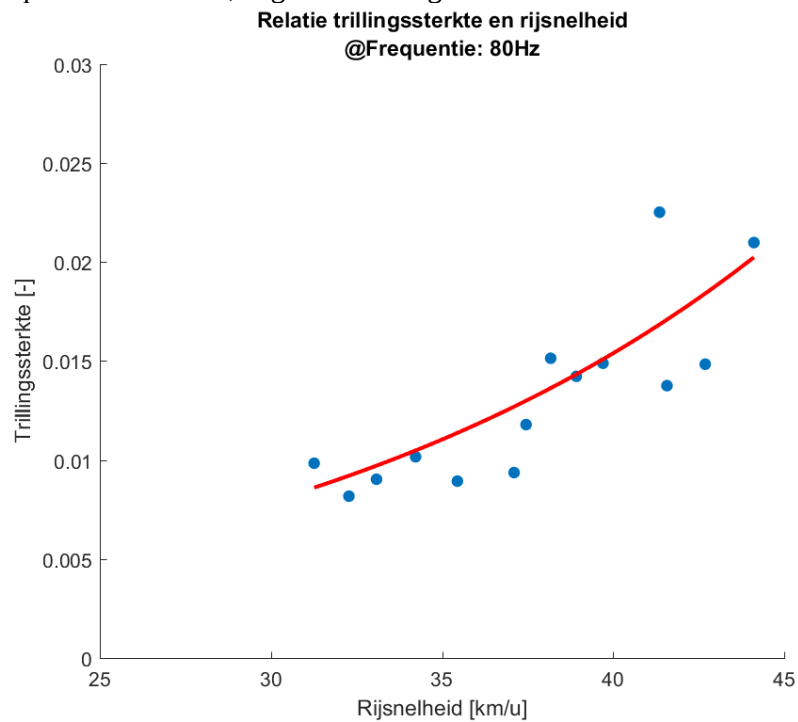
$$v = v_0 \cdot e^{B \cdot v_{tram}} \quad (4)$$

Er zijn meerdere metingen uitgevoerd in Den Haag, om de parameters uit vergelijking (4) betrouwbaar vast te stellen, waarna per meetlocatie een curve is gefit om de relatie tussen trillingssterkte en rijsnelheid vast te stellen. Hiervoor zijn de gemeten trillingsspectra en rijsnelheden van de trams tegen elkaar uitgezet, een voorbeeld wordt getoond in Figuur I - 1. In deze figuur is zichtbaar dat met name bij hogere frequenties het trillingsspectrum wat naar rechts en naar boven verschuift.



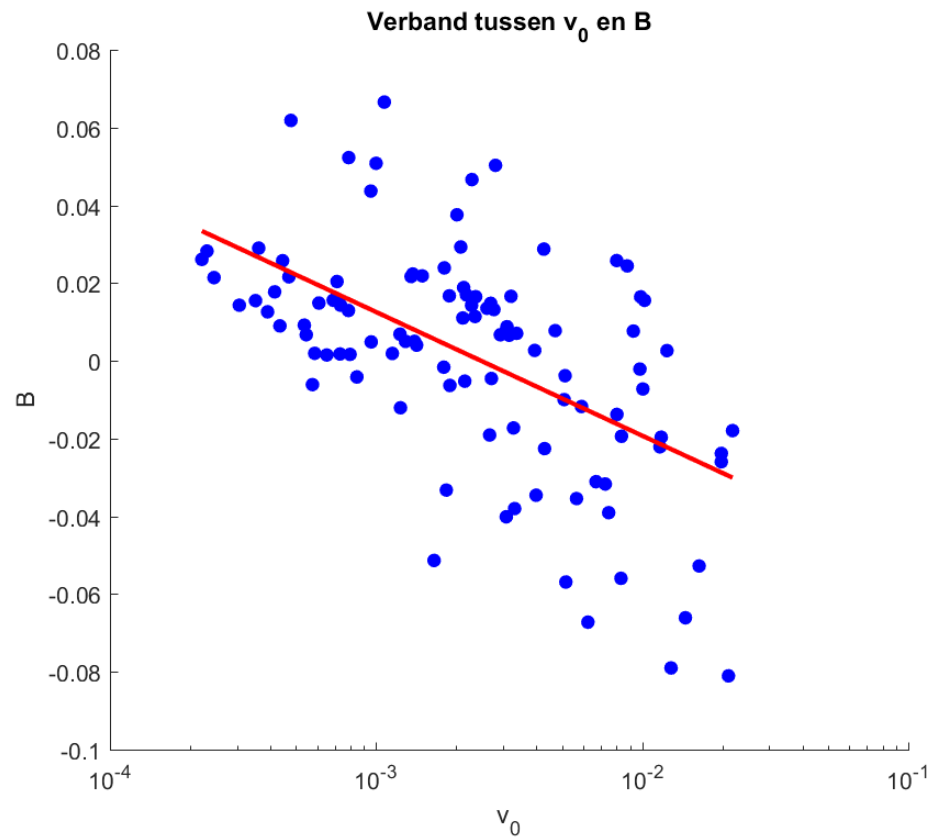
Figuur I - 1 Gemeten trillingspectra op een locatie, met de rijsnelheid van de trams

Een voorbeeld van de relatie tussen de trillingssterkte en de rijsnelheid, bij een frequentie van 80 Hz, is getoond in Figuur I - 2.



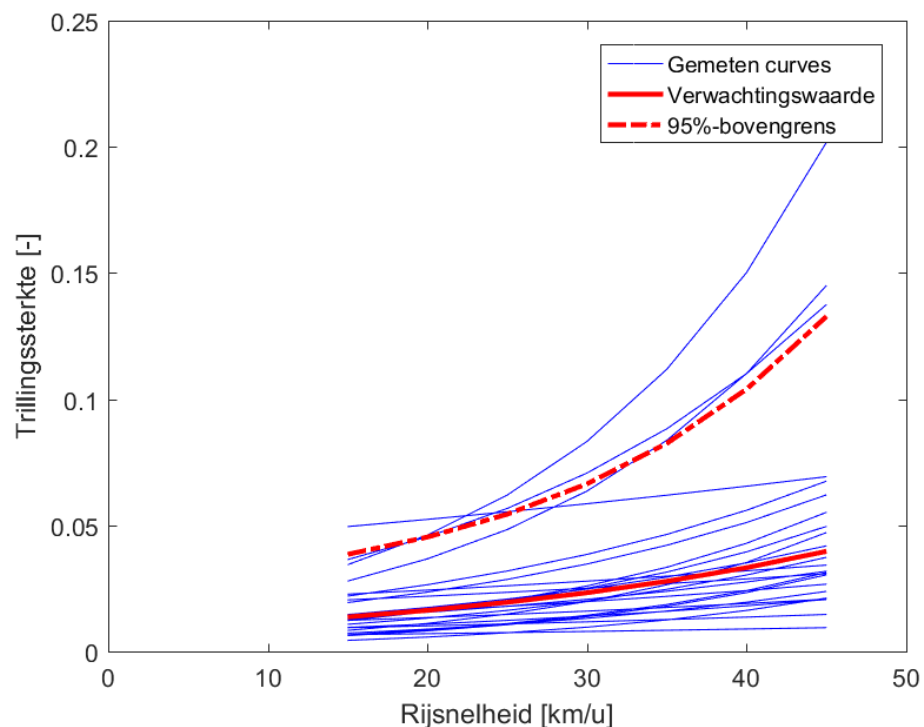
Figuur I - 2 Voorbeeld van relatie tussen trillingssterkte en rijsnelheid

Op basis van alle relaties is per frequentie een gemiddelde en standaardafwijking vastgesteld voor de parameters v_0 en B . Uit een statistische analyse blijkt dat v_0 en B afhankelijk van elkaar zijn, er is een negatieve correlatie tussen beide parameters: een hoge v_0 leidt tot een lage B , en omgekeerd, zie Figuur I - 3.



Figuur I - 3 Waarden van v_0 en B , met negatieve correlatie (rode lijn) tussen beide waarden (waarden voor alle frequenties weergegeven)

Vervolgens is, op basis van een lognormale verdeling van de verschillende parameters, een inschatting gemaakt van vergelijking (4), waarbij een snelheidsafhankelijke onzekerheid wordt gehanteerd. De gemiddelde en bovengrensrelatie voor de trillingssterkte als functie van de rijsnelheid van de tram is conform de weergave in Figuur I - 4 bij een frequentie van 80 Hz. In deze figuur zijn de gemeten relaties weergegeven. Een dergelijke relatie is voor elke frequentie bepaald.



Figuur I - 4 Relatie tussen trillingssterkte en rijsnelheid van de tram bij 80 Hz

De trillingen van bussen die in dit onderzoek zijn gebruikt, zijn bepaald op basis van metingen die op diverse locaties in Nederland zijn uitgevoerd. De trillingen van de bussen wijzigen niet significant door het voorgenomen project.

1.1.2 Bodem

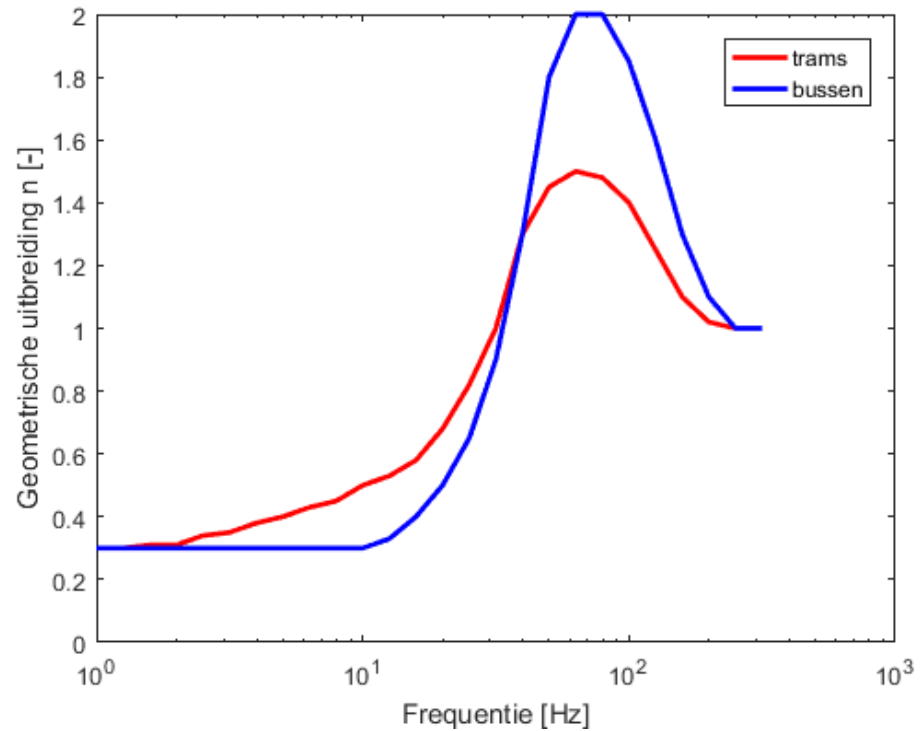
Deze subparagraaf bevat de uitwerking van de afstandscorrectie C_{bodem} . Deze afstandscorrectie is bepaald met behulp van de Barkanvergelijking. Deze luidt als volgt:

$$C_{bodem} = \left(\frac{x_0}{x}\right)^n \cdot e^{-\alpha \cdot (x-x_0)} \quad (5)$$

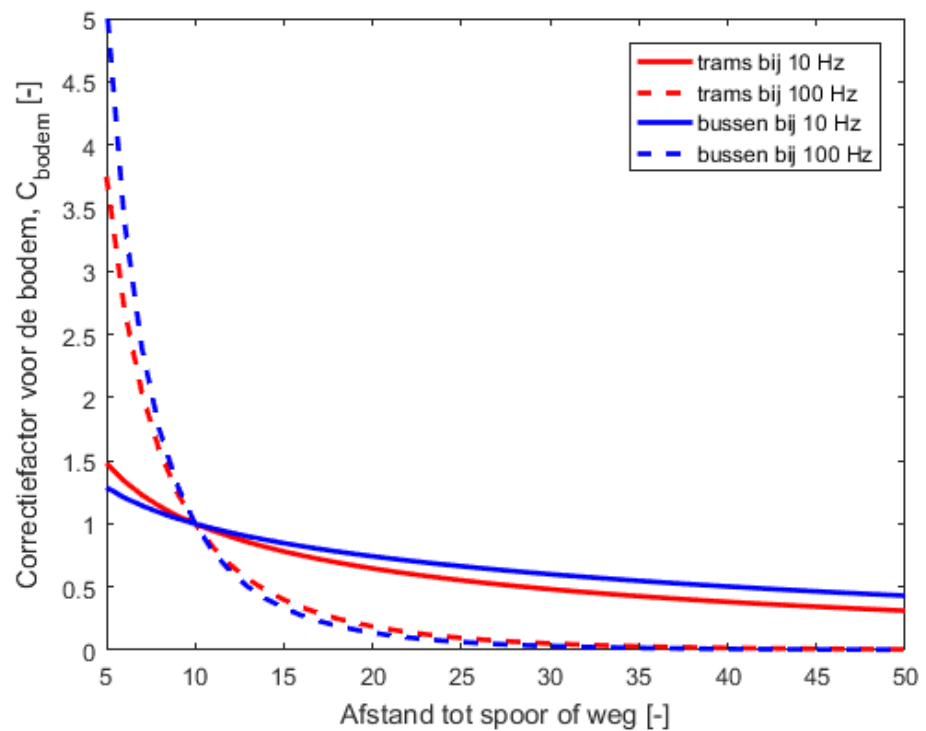
Wanneer het trillingsspectrum van een tram wordt beschouwd, bestaat dit op korte afstand tot de trillingsbron vooral uit hoogfrequente trillingen. Deze dempen snel uit en daardoor zal de ervaren trillingssterkte v ook snel afnemen met de afstand tot de trillingsbron. Hierdoor blijft vooral het laagfrequente deel van het signaal over. Dit gedeelte van het trillingsspectrum dempt minder snel uit.

Zowel de factor n als de bodemdemping α zijn frequentieafhankelijk meegenomen. De gebruikte frequentieafhankelijke bodemdemping is weergegeven in Figuur I - 12, deze is bepaald met behulp van valproefmetingen, waarbij een vaste aanname is gedaan voor de geometrische uitbreiding n van een valproef ($n = 0.5$). De gehanteerde geometrische uitbreiding voor trams en bussen is weergegeven in Figuur I - 5. Deze (theoretische) curve is gebaseerd op de opbouw en gelaagdheid van de bodem en is vooral van invloed op de trillingen op grotere afstand van het spoor.

Met behulp van de bodemdemping en de geometrische spreiding is C_{bodem} bepaald. De verwachtingswaarden van C_{bodem} voor frequenties van 10 en 100 Hz zijn als voorbeeld weergegeven in Figuur I - 6.



Figuur I - 5 Geometrische spreiding als functie van de frequentie



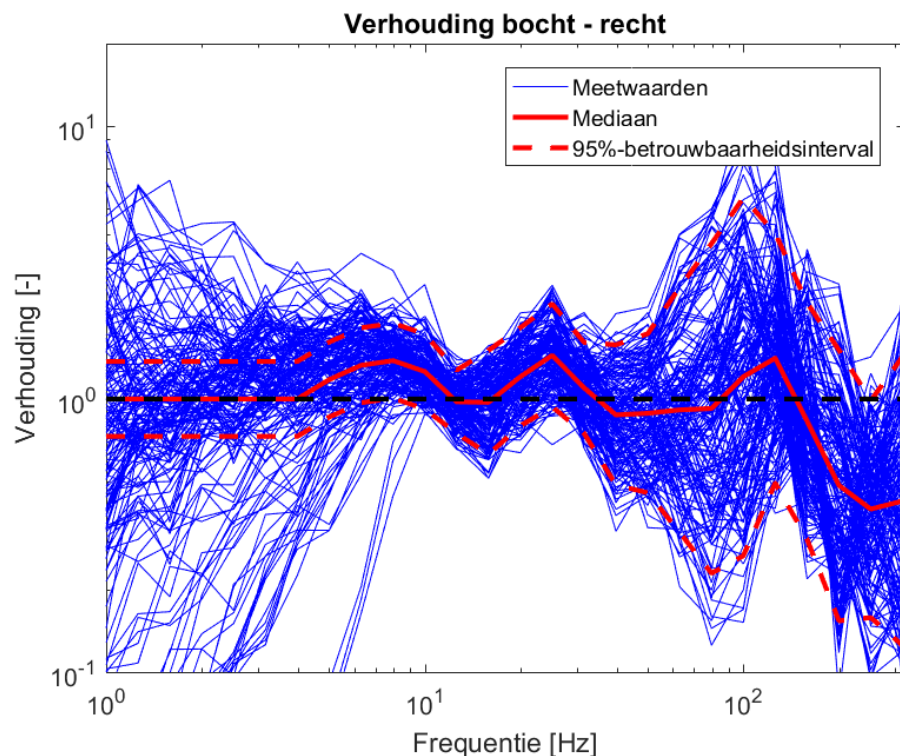
Figuur I - 6 Correctiefactor C_{bodem} voor trams en bussen bij 10 en 100 Hz

1.1.3 Bochten

Als een tram door een bocht rijdt, veroorzaakt deze extra trillingen ten opzichte van een tram die met dezelfde snelheid over doorgaand spoor rijdt. Om deze toename te beschrijven zijn in Den Haag metingen uitgevoerd om een bochttoeslag te bepalen die de verhouding beschrijft tussen de trillingssterkte in de bocht gedeeld door de trillingssterkte op een recht stuk spoor. De formule voor C_{bocht} is weergegeven in vergelijking (6).

$$C_{bocht} = \frac{v_{bocht}}{v_{doorgaand}} \quad (6)$$

Bij de bochtmetingen is in twee bochten gemeten met op elke meetlocatie vijf sensoren. De metingen zijn uitgevoerd in bij bochten met een boogstraal van ongeveer 30 meter, vergelijkbaar met de krappe bogen in het ontwerp van de tramlijn in Maastricht. In Figuur I - 7 zijn de gemeten bochttoeslagen (verhouding tussen trillingen van tram in een bocht en tram op rechtdoorgaand spoor) als functie van de frequentie weergegeven. Met name rond 8 Hz, bij 30 Hz en bij 120 Hz nemen de trillingen toe bij trams die door een bocht rijden. De gehanteerde mediaan en het betrouwbaarheidsinterval zijn eveneens weergegeven in Figuur I - 7.

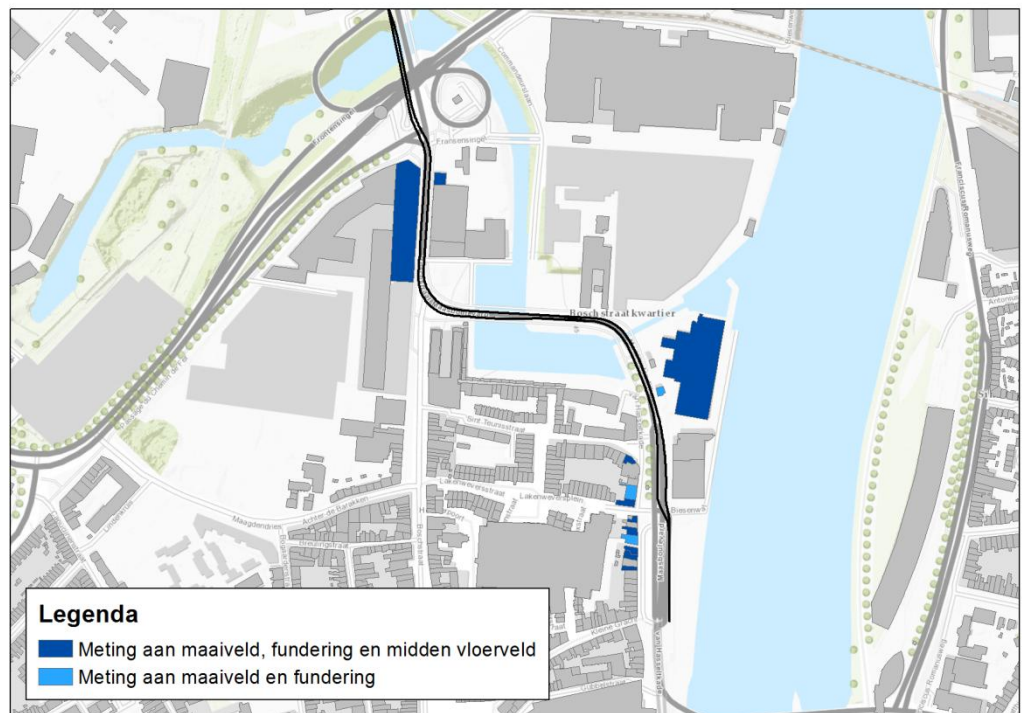


Figuur I - 7 Gemeten bochttoeslagen

1.1.4 Gebouwen

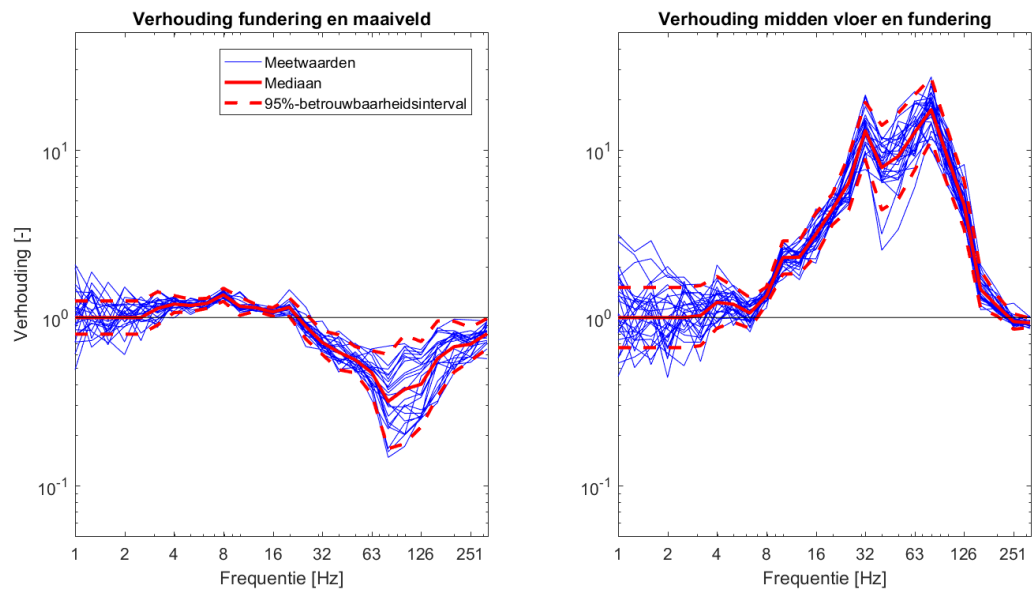
In Den Haag is de trillingssterkte van de tram *op maaiveld* gemeten. Uiteindelijk is het doel van dit onderzoek om de trillingshinder *in gebouwen* in Maastricht te bepalen ten gevolge van de passerende trams. Daarvoor is het nodig om een overdrachtsfactor te bepalen tussen maaiveld en het gebouw.

Om te bepalen tot welke trillingssterkte de tram in gebouwen leidt, zijn de overdrachten van maaiveld naar fundering en midden vloerveld in Maastricht gemeten in representatieve gebouwen in het studiegebied. Hierbij zijn metingen verricht aan de passage van zwaar wegverkeer. Voor een aantal gebouwen is daarnaast gebruik gemaakt van een kunstmatige trillingsbron (valgewicht). Met dit valgewicht is op de plaats waar de tram gaat rijden minimaal tienmaal een kunstmatig trillingssignaal gegenereerd met behulp van een kunstmatige trillingsbron. Sensoren op maaiveld voor de gevel en sensoren binnen in het gebouw registreren de trillingssterkte en geven daarmee de relatie tussen de trillingsspectra buiten en binnen. Er zijn metingen verricht aan de overdracht van maaiveld naar fundering, en van fundering naar midden vloerveld. Niet alle panden waren toegankelijk, zodat in sommige panden alleen de overdracht van maaiveld naar fundering is gemeten. De meetlocaties zijn weergegeven in Figuur I - 8. De meetlocaties zijn geselecteerd op basis van gebouweigenschappen (bouwjaar, afmetingen, hoogte, type vloeren) en zijn representatief voor de overige panden.



Figuur I - 8 Meetlocaties gebouweigenschappen

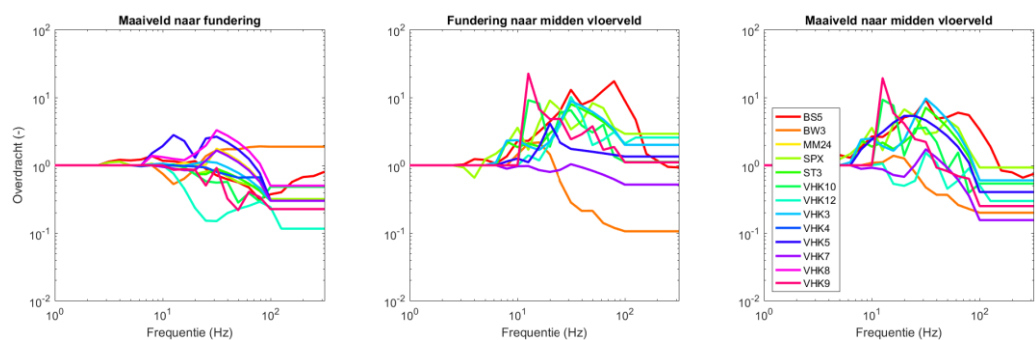
Een voorbeeld van de spectrale overdracht is te zien in Figuur I - 9.



Figuur I - 9 Overdrachten Boschstraat 5

De gemeten overdrachten zijn sterk verschillend per gebouw, zie Figuur I - 10. Dit is gebruikelijk, de overdracht is namelijk afhankelijk van veel parameters, zoals bouwstijl, afmetingen, gebruikte materialen, afmetingen van vloeren en muren en funderingsconstructie. Voor de niet-gemeten gebouwen is de overdracht van een qua bouwstijl vergelijkbaar pand gekozen.

Tenslotte, een aantal gebouwen geeft hoogfrequente trillingen (boven de 80 Hz) maar zeer beperkt door, waardoor deze tijdens de metingen nauwelijks waarneembaar waren in de gebouwen. In dat geval is ervoor gekozen om de overdracht vanaf de laatste frequentie met een betrouwbare signal-to-noise ratio te handhaven voor de hogere frequenties. Op basis van eerdere metingen kan gesteld worden dat zo een worst-case aanname wordt gedaan voor de overdracht van hoogfrequente trillingen.

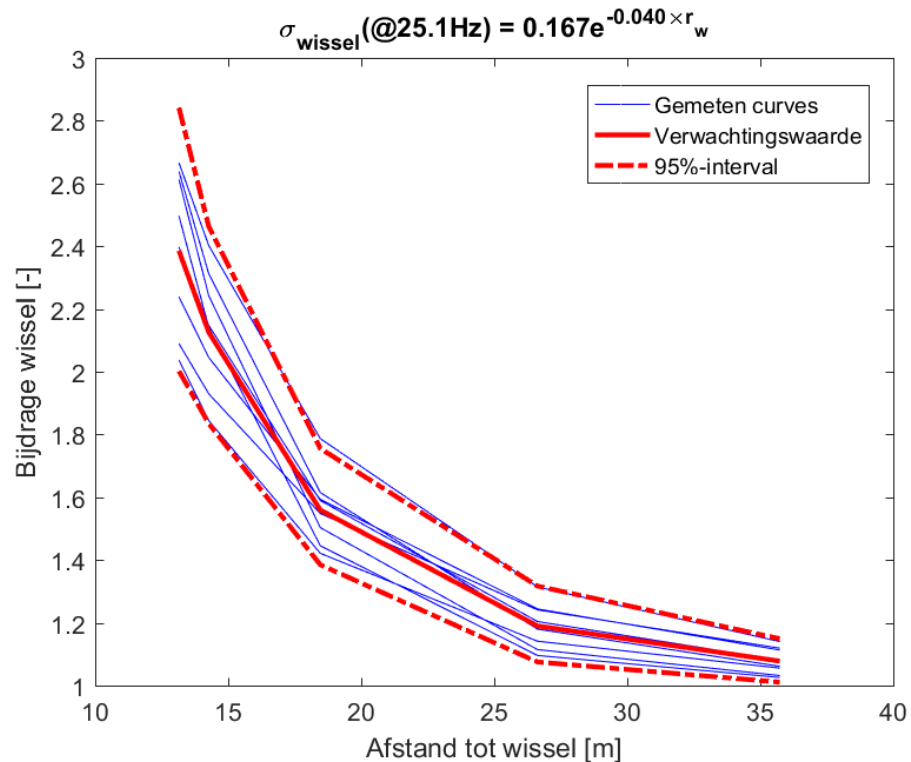


Figuur I - 10 Overdrachten alle meetlocaties

1.1.5 Wisselcorrectie

Met behulp van vergelijking (3) is de wisseltoeslagfactor bepaald. De gemeten wisseltoeslagfactor C_{wissel} , vermenigvuldigd met de uitdamping van de bodem C_{bodem} , is weergegeven in Figuur I - 11 voor een frequentie van 25 Hz. Deze relatie is voor elke frequentie bepaald. Uit de verschillende metingen aan wissels is per

frequentie een mediaan en betrouwbaarheidsinterval bepaald. Deze zijn eveneens weergegeven in Figuur I - 11. In de figuur is zichtbaar dat de invloed van een wissel sterk afneemt met de afstand.



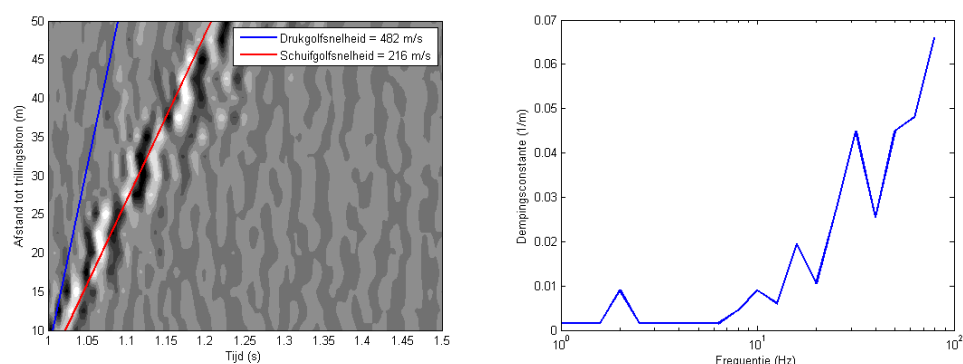
Figuur I - 11 Product van wisseltoeslagfactor en uitdamping van de bodem, meetresultaten en kleinste kwadratenfit met betrouwbaarheidsinterval bij 25 Hz

1.1.6 Bodemcorrectie Den Haag en Maastricht

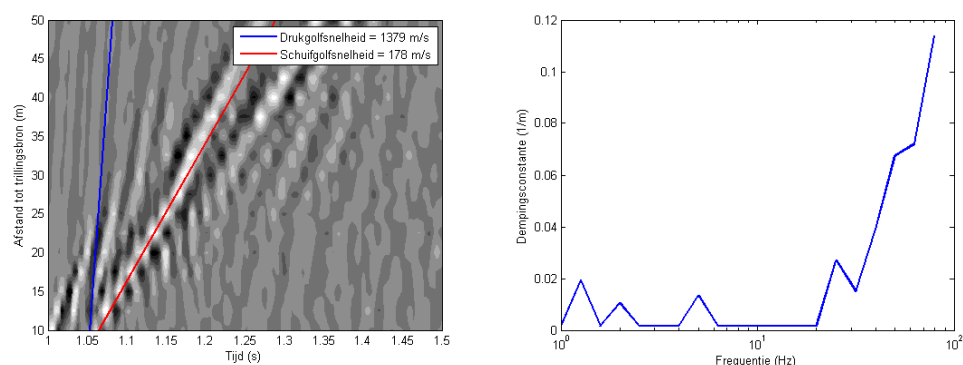
In deze subparagraaf wordt een vergelijking gemaakt tussen de bodem in Maastricht en in Den Haag, om de waarde voor $C_{\text{correctie}}$ te bepalen. De trams in Den Haag zijn gebruikt om de trillingssterkte in Maastricht te voorspellen. Maastricht en Den Haag liggen geografisch ver uit elkaar en daarom is het belangrijk dat de bodemeigenschappen van Den Haag en Maastricht overeenkomen of dat de signalen worden gecorrigeerd op basis van de bodemeigenschappen. Den Haag heeft een bodem die qua stijfheid vergelijkbaar is met die van Maastricht. Daarnaast is het ontwerp van de trambaan en het materieel vergelijkbaar met de situatie in Maastricht.

De belangrijkste parameter waardoor het bronsignaal van een tram in Maastricht kan afwijken van die in Den Haag zijn de bodemparameters (de voortplantingssnelheid en de demping). Daarom zijn in de buurt van elke meetlocatie in zowel Den Haag als Maastricht bodemproeven gedaan. Bij de bodemproeven is gekeken of de bodemkarakteristieken voor Den Haag en Maastricht overeenkomen. Hiervoor is gebruik gemaakt van valproeven, waarbij een valgewicht telkens vanaf dezelfde hoogte wordt losgelaten en zo een gestandaardiseerd trilsignaal produceert. Door de trillingssterkte op verschillende afstanden te meten ontstaat een beeld van de voortplantingssnelheid van de druk- en schuifgolfsnelheid. Daarnaast geeft de proef ook inzicht in de parameters van de Barkanformule.

De resultaten van de valproeven in Maastricht en Den Haag staan in Figuur I - 12 resp. Figuur I - 13. Uit zowel het golfpatroon als de bodemdemping blijkt dat de bodem vergelijkbare karakteristieken heeft. De bodem in Den Haag is iets slapper dan de bodem in Maastricht, getuige de lagere schuifgolfsnelheid en de hogere bodemdemping. Daardoor zal het bronsignaal van de trillingen op 10 meter afstand in Den Haag iets groter zijn dan in Maastricht. De referentielocatie in Den Haag geeft dus een conservatieve inschatting van de trillingssterkte in Maastricht. In dit onderzoek wordt daarom een waarde van 1 gehanteerd voor $C_{correctie}$.



Figuur I - 12 Resultaten van de valproef in Maastricht met links de golfvoortplanting en rechts de frequentieafhankelijke dempingsconstante



Figuur I - 13 Resultaten van de valproef in Den Haag met links de golfvoortplanting en rechts de frequentieafhankelijke dempingsconstante

Uit het onderzoek volgt dat:

- De stijfheid van de bodems in Den Haag en in Maastricht ligt in dezelfde range;
- De demping van de bodems in Den Haag en in Maastricht ligt in dezelfde range;
- Zowel in Den Haag als in Maastricht is er nog een significante variatie in bodemeigenschappen. Daarom is een conservatieve benadering aangehouden voor de waarde van C_{bodem} .

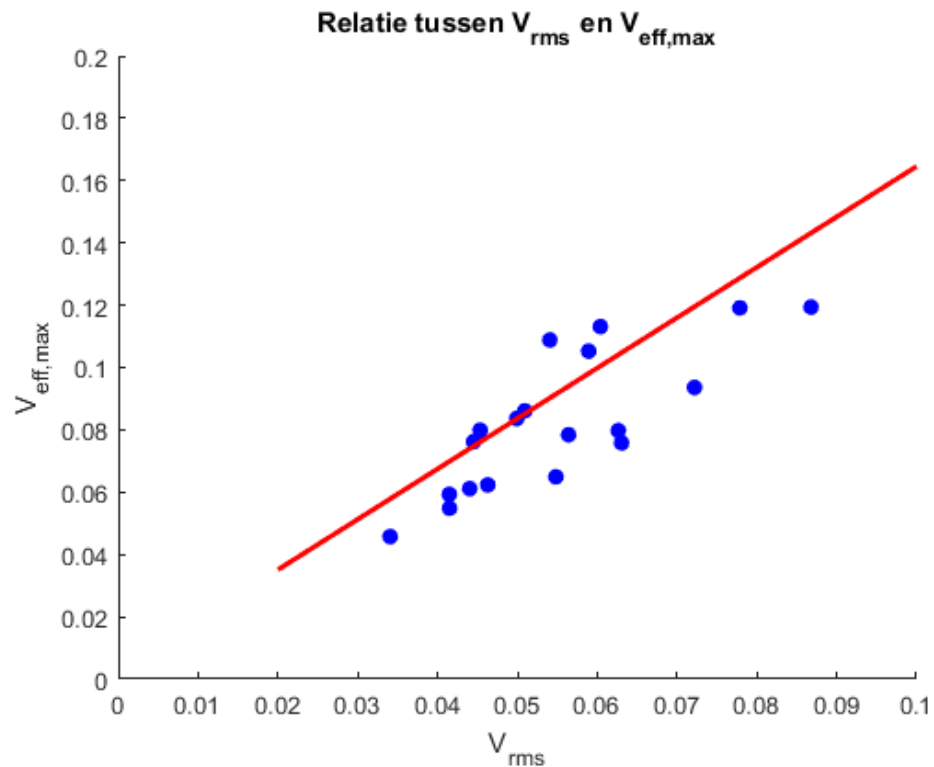
1.1.7 Omrekening van V_{rms} naar V_{max}

De trillingssterkte $V_{eff,max}$ is een gewogen voortschrijdend gemiddelde van de trillingen. Deze grootheid wordt gebruikt om de trillingssterkte V_{max} te bepalen. In het gebruikte rekenmodel wordt gerekend met tertsbandspectra, waarbij de trillingen afhankelijk zijn van de frequentie. De V_{rms} -waarde kan worden bepaald uit het tertsbandspectrum door

energetisch te sommeren over de frequenties, na het toepassen van de correctie uit de SBR B-richtlijn:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^N F_c(f) v_i(f)^2} \quad (7)$$

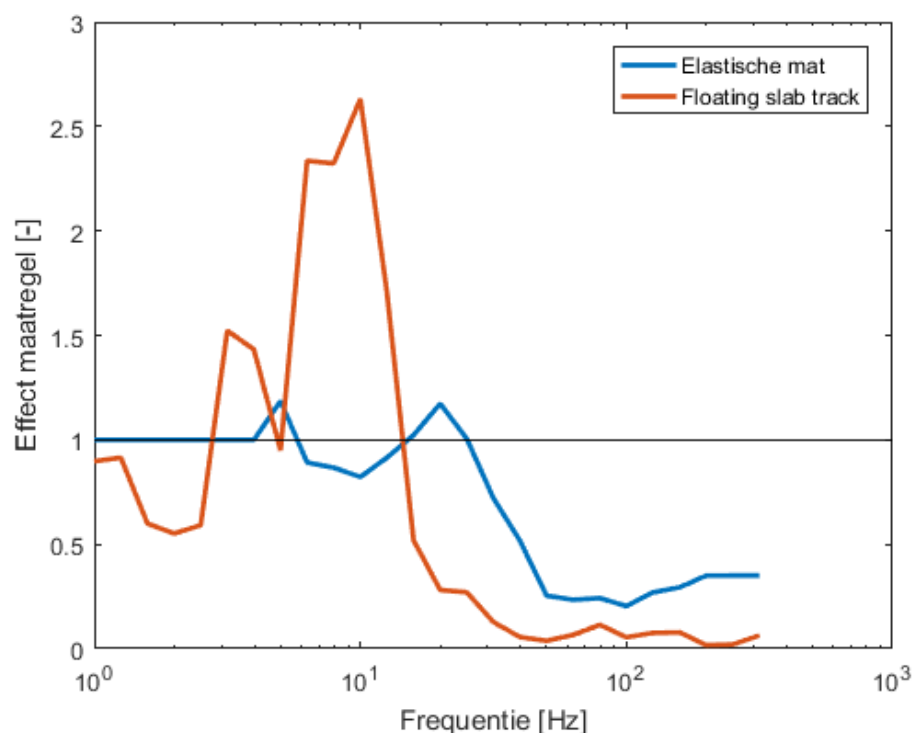
Hierbij is $v_i(f)$ het tertsbandspectrum en $F_c(f)$ de correctiefactor van de SBR B-richtlijn. Op basis van metingen aan tramverkeer in vergelijkbare situaties, is de verhouding bepaald tussen de waarde van V_{rms} en $V_{eff,ax}$, deze relatie is weergegeven in Figuur I - 14.



Figuur I - 14 Relatie tussen V_{rms} en $V_{eff,max}$

1.1.8 Effect van maatregelen

In dit onderzoek is het effect van maatregelen doorgerekend voor een elastische mat onder het spoor, en voor een floating slab track, afgeveerd op 10 Hz. De effectiviteit van deze maatregelen is bepaald met behulp van eindige elementen modellen en literatuuronderzoek. De gemiddelde effectiviteit van deze maatregelen is weergegeven in Figuur I - 15.



Figuur I - 15 Gemiddelde effectiviteit van maatregelen (boven 1 is versterking, onder 1 is verzwakking van trillingen en laagfrequent geluid)

I.2 Laagfrequent geluid

In het huidige onderzoek wordt de hinder ten gevolge van laagfrequent bepaald aan de hand van het trillingsspectrum in de gebouwen. Dit spectrum is bepaald met het empirische rekenmodel wat ook voor trillingen wordt gebruikt, maar omdat laagfrequent geluidhinder optreedt bij andere frequenties, wordt nu een frequentieafhankelijk rekenmodel gebruikt waarbij alleen trillingen tussen de 10 en 250 Hz worden beschouwd (bij trillingshinder wordt gekeken naar trillingen tussen de 1 en 80 Hz). Het geluidsdrukkniveau wordt vervolgens berekend met vergelijking (8)¹⁰:

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{rc \sigma S v(f)^2}{W_0} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{aA}{4} \right) + 10 \log_{10} \left(\left(\frac{4}{\pi^2} \right)^2 \right) \quad (8)$$

De eerste term is een weergave van het geluidsdrukkniveau ten gevolge van de trillingen, de tweede term is een correctiefactor voor de absorptie in de ruimte en de derde term dient alleen toegepast te worden indien het vlak wat beschouwd wordt trilt rond de eerste eigenfrequentie. In dat geval mag deze term met een grootte van -7.84 dB, bij het totaal worden opgeteld. Bij hogere frequenties mag deze correctie niet worden toegepast. De parameters in deze formule worden hieronder toegelicht.

Parameter	Betekenis
L_p	geluidsdrukkniveau [dB]
$v(f)$	effectieve trillingsspectrum in m/s op het midden van de vloer, in de vorm van

¹⁰ Zie Molenaar, ir. D.J., et al., *Prognoses van trillingen en laagfrequent geluid als gevolg van de TBM passage in en om de woning Patrimoniumpark 26 in Leiderdorp*, TNO Bouw, 16 mei 2003, 2002-C1-R2129

	tertsbandspectra (1/3 octaafbandspectra)
r	Dichtheid van lucht, bij kamertemperatuur, 1,29 kg/m ³
c	geluidsnelheid in lucht, bij kamertemperatuur en normale druk 344 m/s
	afstraalcoëfficiënt van de kamer, die afneemt van ongeveer 1 (bij frequenties rond 10 Hz) tot 0.1 tot 0.3 (bij frequenties rond 50 Hz) en vervolgens weer toeneemt tot 1 (voor frequentie rond en boven 100 Hz), afhankelijk van de eigenschappen van de materialen in de ruimte
σ	
S	trillende oppervlak [m ²]
W_0	referentievermogen [pW]
a	absorptiecoëfficiënt die varieert tussen de 0.01 en 0.20 voor de meeste materialen
A	totale oppervlak van wanden, plafond en vloeren in de ruimte [m ²]

Met behulp van deze gegevens kan vergelijking (9) worden omgeschreven tot:

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{443.76 \sigma S v(f)^2}{W_0} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{aA}{4} \right) - 7.84 \quad (9)$$

De toeslagfactoren variëren dus met de grootte van de ruimte, de frequentie en de materialen die worden toegepast. In Tabel I - 1 is de variatie in toeslagfactor (met de frequentie) weergegeven voor verschillende afmetingen van ruimtes en verschillende absorptiecoëfficiënten. Grofweg kan gesteld worden dat de laagfrequent geluidsniveaus hoger zijn in kleinere ruimtes met weinig absorptie (beton, steen) en een lage aanstootfrequentie van het trillende vlak.

Tabel I - 1 Toeslagfactor laagfrequent geluid (termen 2, 3 en 4 uit vergelijking 9)

	Kamer 1	Kamer 2	Kamer 3	Kamer 4
Grootte	3 x 3 m	3 x 3 m	6 x 6 m	6 x 6 m
Hoogte	2.5 m	2.5 m	2.5 m	2.5 m
Afstraalcoëfficiënt	0.1 tot 1.0	0.1 tot 1.0	0.1 tot 1.0	0.1 tot 1.0
Absorptiecoëfficiënt	0.01	0.20	0.01	0.20
Toeslagfactor	+27 tot +45 dB	+14 tot +32 dB	+29 tot +47 dB	+16 tot +34 dB

Uit Tabel I - 1 kan worden geconcludeerd dat, afhankelijk van de meetlocatie en de dominante frequentie, 14 tot 47 dB moet worden opgeteld bij de resultaten uit de trillingsmetingen. Dit is afhankelijk van:

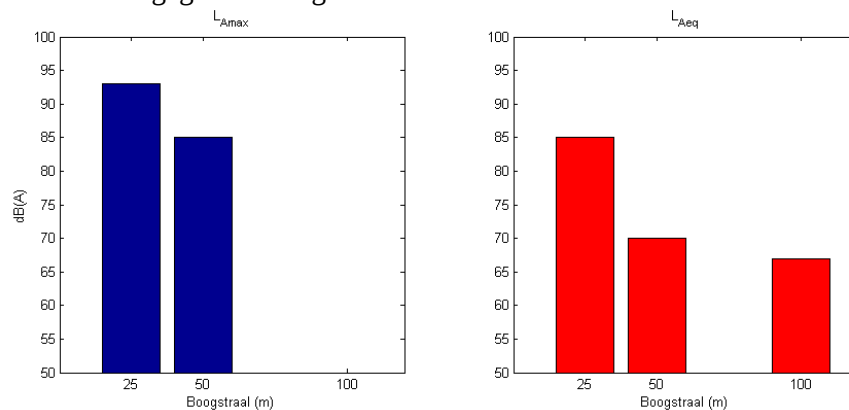
- Een kamer met weinig demping (geen gordijnen, kale vloeren, betonnen wanden) heeft een lage absorptiecoëfficiënt. Een hoge of een lage absorptiecoëfficiënt scheelt ca. 13 dB;
- Bij een dominante frequentie rond 50 Hz neemt de afstraalcoëfficiënt af naar ca. 0.1 tot 0.3. Een dominante frequentie van 10 tot 30 Hz leidt tot een hoge afstraalcoëfficiënt, en daarmee tot een ongeveer 7.5 dB hoger laagfrequent geluidniveau. Dit wordt echter weer ongedaan gemaakt door de correctiefactor van -7.84 dB. Ten behoeve van een conservatieve inschatting van het laagfrequent geluidniveau is deze correctiefactor van -7.84 dB in dit onderzoek niet toegepast.

I.3 Booggeluid

Om het booggeluid in Maastricht zo nauwkeurig mogelijk te bepalen in de toekomstige situatie, zijn geluidmetingen aan RegioCitadis-materieel uitgevoerd. Dit materieel

wordt ingezet op enkele lijnen van Randstadrail te Den Haag, onder andere op de lijnen 2,3 en 19. Deze lijnen verbinden Den Haag met Zoetermeer.

De geluidmetingen in Den Haag zijn uitgevoerd op 1 november 2014, zie ook bijlage III. Het optredende booggeluid (uitgedrukt in L_{Amax} en L_{Aeq}) voor verschillende boogstralen is weergegeven in Figuur I - 16.



Figuur I - 16 Gemiddeld optredend booggeluid als functie van de boogstraal

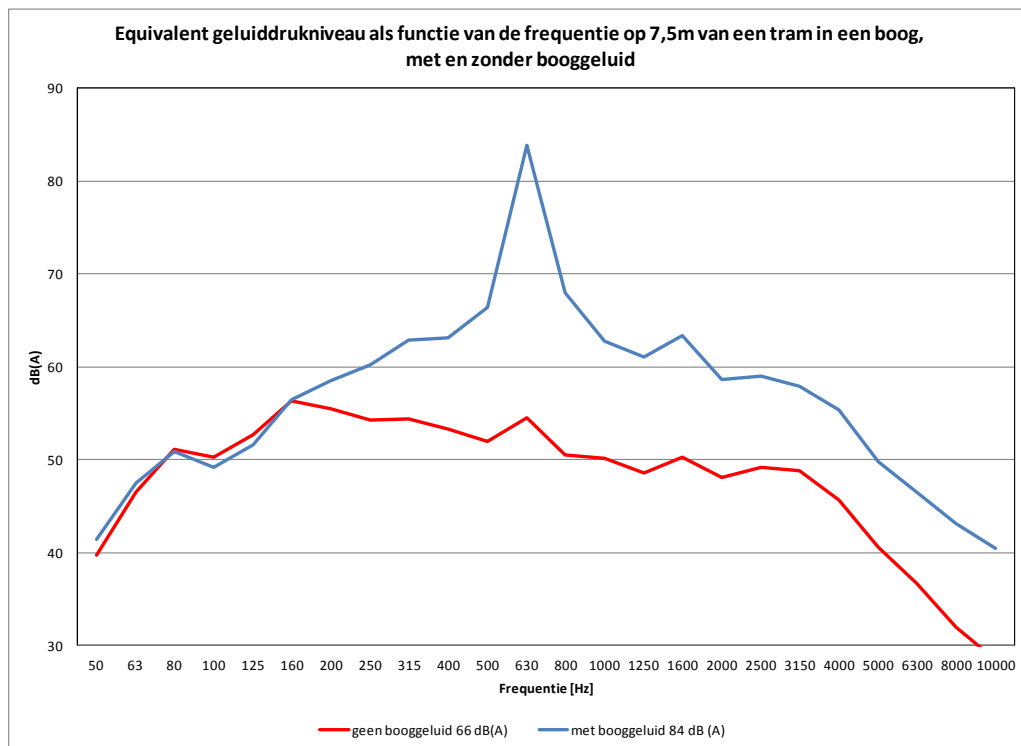
Er zijn meerdere metingen uitgevoerd in Den Haag, bij twee van de gemeten locaties trad booggeluid op, bij twee locaties niet, of veel minder. Een verklaring van waarom de ene locatie wel booggeluid toont en de andere niet, heeft onder andere te maken met de conditie en de staat van onderhoud van de rails en de wielen, de boogstraal en hoe de rails bereiden wordt, met al dan niet een verkanting en de juiste snelheid.

Uit de in Figuur I - 17 getoonde spectra blijkt het verschil in geluidproductie tussen de situatie met en zonder booggeluid, met name bij 630 Hz. In Figuur I - 18 zijn enkele typerende passages door een boog gegeven, als functie van de tijd. De gemeten waarden zijn in overeenstemming met gegevens van AEAT Technology uit 2004¹¹ bij het tramPlusproject IJsselmonde met RegioCitadis materieel.

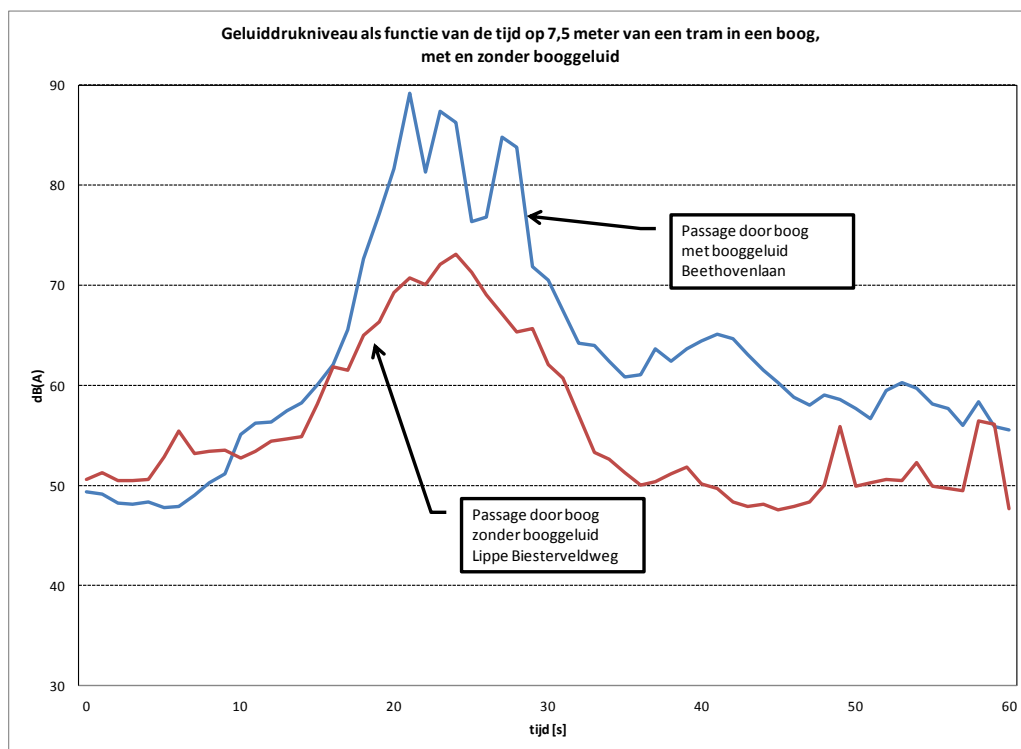
De metingen te Den Haag tonen geen significante verschillen tussen de binnen- en de buitenboog. Voor de prognose te Maastricht wordt er dan ook geen onderscheid gemaakt naar de zijde van de boog.

In het onderzoek wordt per gebouw de afstand tot krappe bogen bepaald, en op basis van deze afstand en de boogstraal wordt (zonder afscherming) het optredende booggeluid berekend.

¹¹ AEAT Technology, Booggeluidemissie Citadis, Booggeluidmetingen 25 mei 2004, Kenmerk AEAT/04/00003/010 van september 2004



Figuur I - 17 Equivalent geluidsdrukkniveau als functie van de frequentie op 7,5m van een tram in een boog, met en zonder booggeluid



Figuur I - 18 Kenmerkende geluidniveaus bij passages van bogen

I.4 Betrouwbaarheid van de rekenmodellen

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van een relatief eenvoudig rekenmodel, een scalair rekenmodel. Omdat het model eenvoudig is, is gebruik gemaakt van conservatieve inschattingen van alle parameters. De ervaring leert dat dit rekenmodel daarom overschattingen geeft van de werkelijk optredende situatie.

Verder wordt opgemerkt dat alle metingen verricht zijn in Den Haag, bij een tramlijn die al jarenlang is gebruikt, en bij materieel uit begin 21^e eeuw. Hierdoor is de spoorligging kwalitatief achteruit gegaan ten opzichte van een nieuwbouwsituatie, en ook de trams hebben naar verwachting slechtere trillings- en booggeluideigenschappen vergeleken met moderner materieel. Hiervoor is in dit onderzoek niet gecorrigeerd, de metingen zijn daarmee een conservatieve (bovengrens) inschatting van de verwachte trillingen, laagfrequent geluid en booggeluid.

Verder wordt in dit onderzoek conservatief gerekend met een 5% overschrijdingskans, zoals de SBR B-richtlijn voorschrijft. Dat betekent dat in 95% van de gebouwen een lagere of gelijke trillingssituatie zal optreden als is berekend. In incidentele gevallen (maximaal 5%) is een hogere trillingssterkte of laagfrequent geluidniveau mogelijk.

Bijlage II Overzicht mogelijke maatregelen

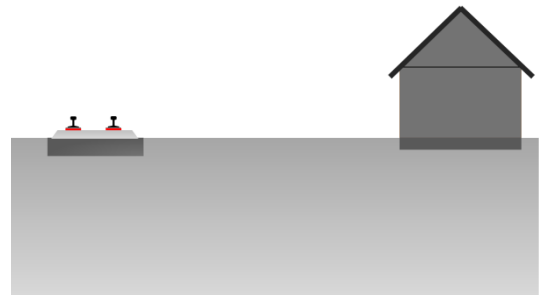
In deze bijlage worden de mogelijke trillings- en laagfrequent geluidmaatregelen toegelicht (paragraaf II.1 tot en met II.3). Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen bron-, transmissie- en gebouwmaatregelen. Deze maatregelen worden in de volgende paragrafen afzonderlijk toegelicht door middel van een principeschets en een korte omschrijving van de maatregel.

Paragraaf II.4 bevat maatregelen tegen booggeluid.

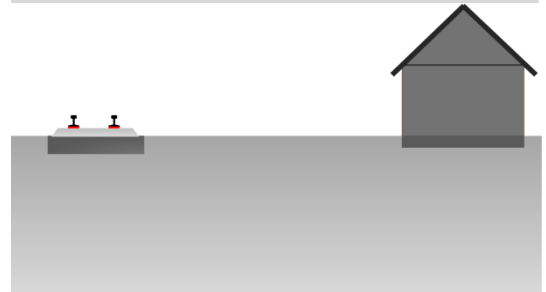
II.1 Bronmaatregelen

De meest effectieve aanpak is het reduceren van de trillingen bij de bron: het tramvoertuig of het spoorstelsel. In onderstaand overzicht zijn de mogelijke bronmaatregelen opgenomen:

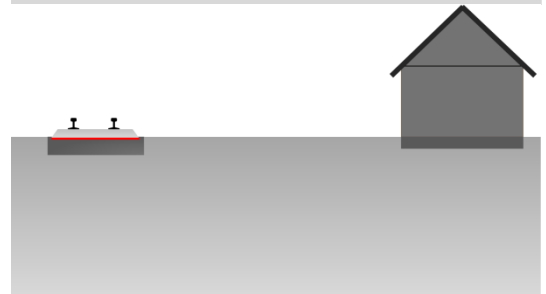
Baseplatepads, een verende constructie tussen spoorstaafbevestiging en ondergrond. Deze maatregel heeft pas effect bij frequenties boven de 70 Hz, en kan niet worden toegepast bij een embedded rail constructie.



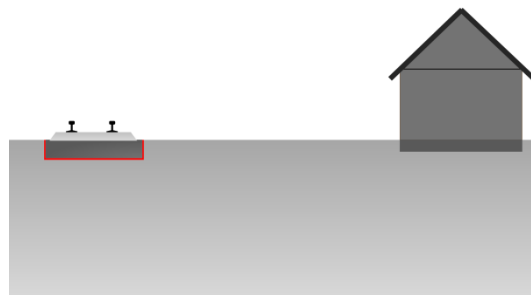
Resilient fasteners, klemmen met demping om de rail aan de dwarsligger te bevestigen. Deze maatregel heeft pas effect bij frequenties boven de 30 Hz, en kan niet worden toegepast bij een embedded rail constructie.



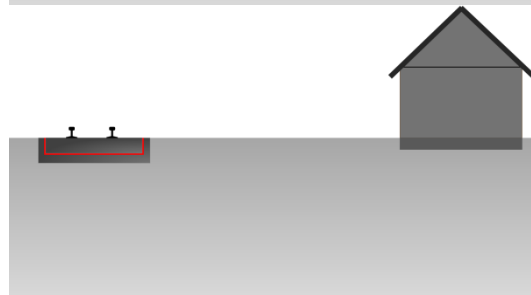
Under sleeper pads, een verende constructie tussen dwarsligger en ballast of betonplaat. Deze maatregel heeft effect bij frequenties boven de 50 Hz, en kan niet worden toegepast bij een embedded rail constructie.



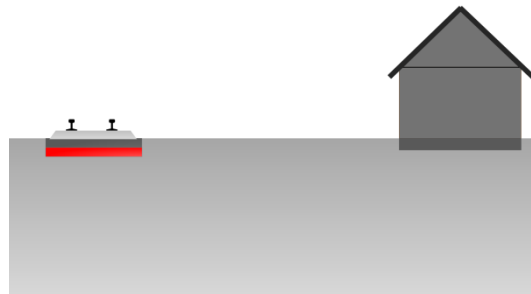
Ballastmatten, een verende constructie onder het ballast. Deze maatregel heeft effect bij frequenties boven de 20 Hz. Maatregel kan ook worden toegepast onder een embedded rail constructie.



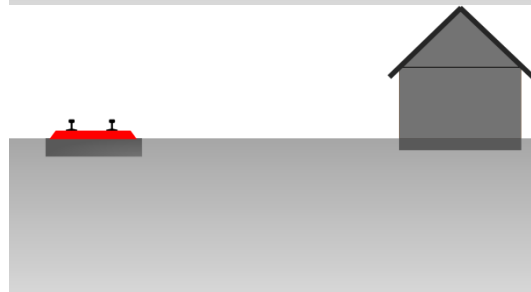
Floating slab track, een verende oplegging van het gehele spoorstelsel. Deze constructie kan zowel met een rubberen mat als met discrete rubberblokken of veer-dempersystemen worden uitgevoerd. Deze maatregel heeft effect bij frequenties boven de 5 Hz, en wordt regelmatig toegepast in binnen- en buitenland om de trillingen van metro- en tramverkeer te reduceren.



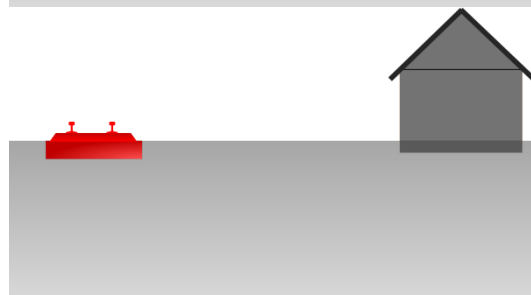
Slab track, een betonplaat onder het ballast. Deze maatregel heeft vaak alleen effect bij lage frequenties en een slappe toplaag van de bodem door de minimalisatie van zettingsverschillen in het spoor. Deze maatregel heeft effect bij frequenties boven de 8 Hz.



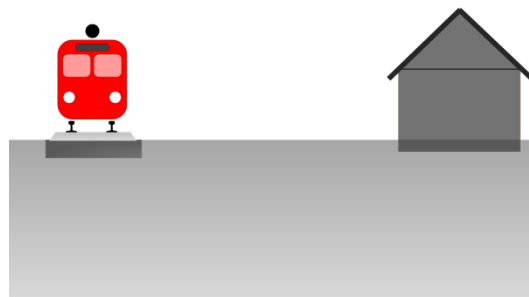
Aanpassing dwarsliggers, door de stijfheid of massa van de dwarsliggers aan te passen (grotere dwarsliggers, ander materiaal, holle dwarsliggers, aan elkaar verbonden dwarsliggers (laddertrack), etc.) kunnen de trillingen worden gereduceerd. Deze maatregel heeft effect bij frequenties boven de 8 Hz.



Aanpassing spoorconstructie, door de stijfheid of massa van de betonnen plaat aan te passen (grotere stijfheid, grotere massa etc.) kunnen de trillingen worden gereduceerd. Deze maatregel heeft effect bij frequenties boven de 8 Hz.



Aanpassing aan voertuigen, bijvoorbeeld door het reduceren van de snelheid of beter toezicht op de kwaliteit van het materieel, of door strengere eisen te stellen aan nieuw materieel.

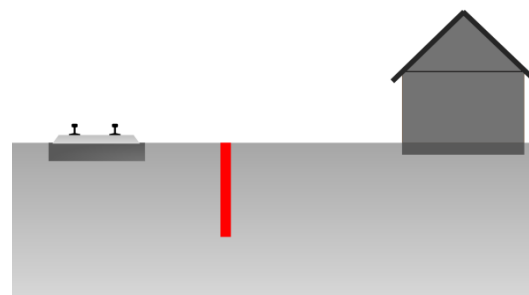


II.2 Transmissiemaatregelen

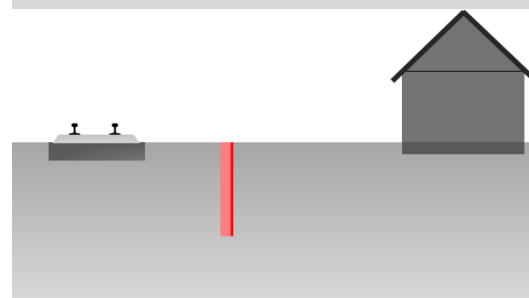
Bij maatregelen aan de transmissie of de overdracht kan reductie van trillingshinder worden bereikt door de trillingen te absorberen of te reflecteren. Absorptie van trillingen is praktisch lastig uitvoerbaar, reflectie van trillingen kan worden bereikt door het introduceren van een fysieke barrière tussen de bron en de ontvanger. Een dergelijke barrière kan worden gerealiseerd van een zeer slap materiaal zoals rubber (of zelfs het verwijderen van materiaal, zoals bij een sloot), of juist een zeer stijf materiaal (zoals beton). Belangrijk is dat er een impedantiesprong wordt gecreëerd ten opzichte van de impedantie van de bodem. Het ontwerpen van maatregelen aan de ontvanger dient daarom altijd locatiespecifiek te worden uitgevoerd, zodat de lokale bodemkarakteristieken worden meegenomen.

Mogelijke transmissiemaatregelen zijn onder meer:

Ondergrondse trillingsreducerende constructie (OTC), bijvoorbeeld van beton of EPS¹². Een dergelijke constructie kan de trillingen absorberen (bij een zware constructie) en reflecteren, waardoor er een barrière ontstaat tussen bron en ontvanger.

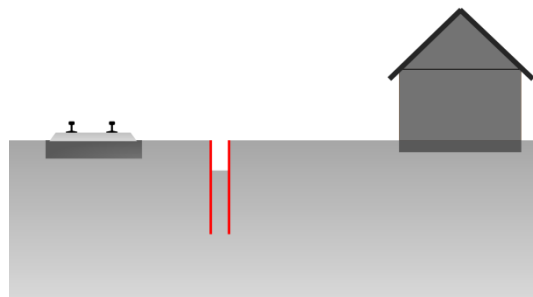


Beklede ondergrondse trillingsreducerende constructie (beklede OTC), waarbij de barrière wordt voorzien van een extra laag slap materiaal, bijvoorbeeld rubber, om een extra impedantiesprong te creëren. Deze maatregel heeft doorgaans meer effect dan een niet-beklede barrière.

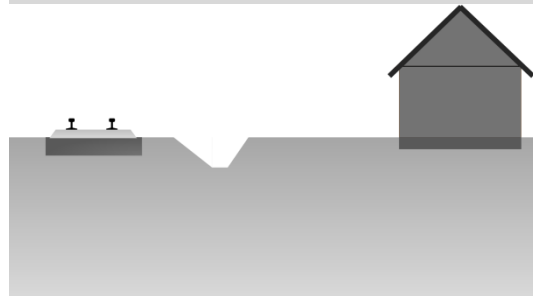


¹² EPS = Expanded PolyStyrene, in de volksmond piepschuim genoemd. Voor voldoende effect is een licht EPS met grote afmetingen nodig.

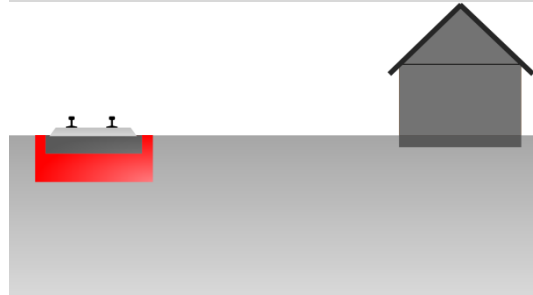
Toepassen van een sleuf tussen twee damwanden, bij deze constructie wordt een smalle sloot gerealiseerd tussen twee damwanden. De verschillende materialen zorgen voor impedantiesprongen, waardoor reflectie van de trillingsgolven optreedt.



Sloot, hierbij wordt een fysieke onderbreking gecreëerd in het pad van de trillingen tussen bron en ontvanger.



Aanpassen van de bodem onder het spoor, bijvoorbeeld door het toepassen van grondverbetering of het realiseren van een zettingsvrije plaat (onderheide betonnen plaat)



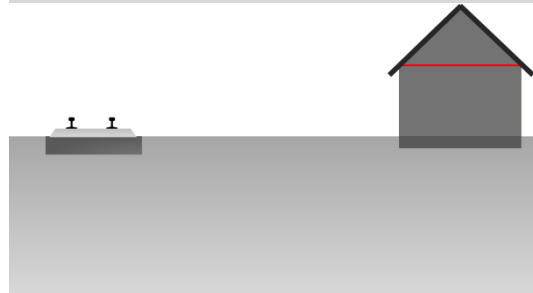
II.3 Ontvangermaatregelen

De laatste categorie maatregelen zijn maatregelen aan de ontvanger, aan de gebouwen. Nadeel van deze categorie is dat de meeste opties grote impact hebben op de gebruikers van de gebouwen en doorgaans vrijwel niet uitvoerbaar zijn voor bestaande gebouwen. Mogelijke ontvangermaatregelen zijn:

Amoveren, de gebouwen worden opgekocht en de bewoners of gebruikers verhuizen.



Verstijven van vloeren, hierbij worden (veelal houten) vloeren vervangen of verstevigd door stalen of betonnen elementen. Bij betonnen vloeren kan de massa van de vloer worden vergroot. Bij houten vloeren kan een dragende dekvloer worden toegepast of kunnen de vloerbalken worden verstevigd door middel van stalen



profielen.

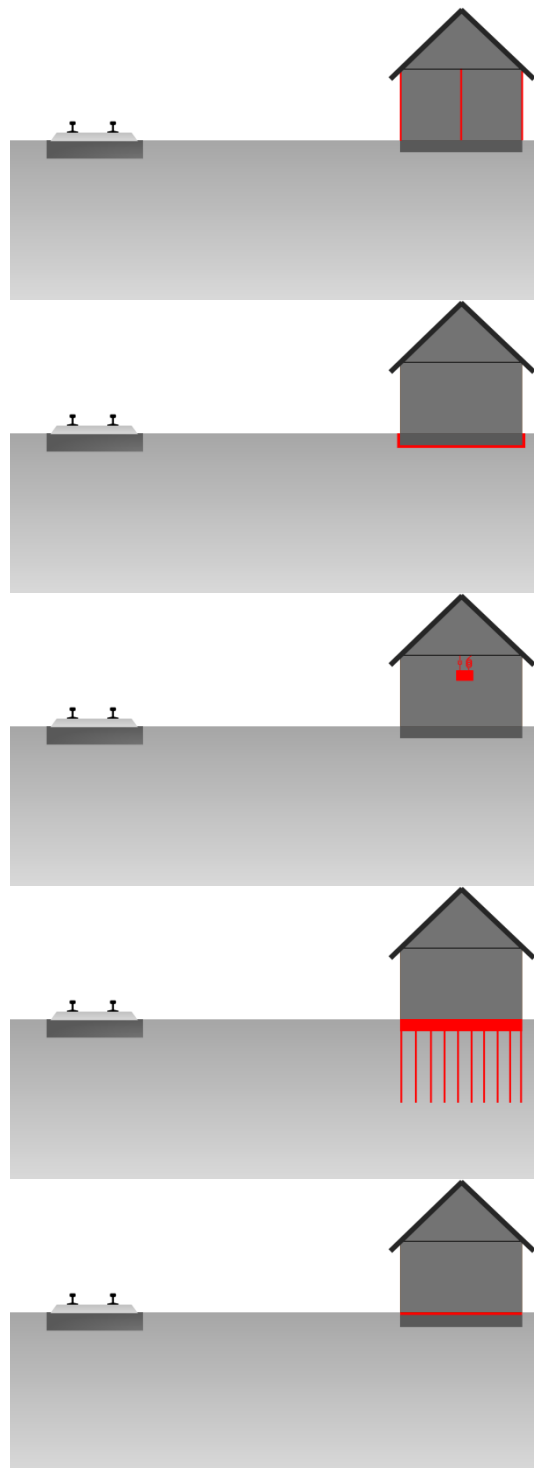
Verstijven van muren, hierbij worden buitenmuren verstevigd, of niet-constructieve binnenwanden vervangen door constructieve binnenwanden.

Inpakken van de fundering, vooral bij gebouwen die op staal zijn gefundeerd. Hierbij wordt de fundering ingepakt in een dempend materiaal, bijvoorbeeld rubber.

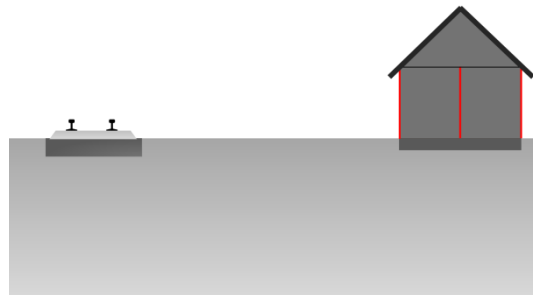
Tuned mass damper, een afgeregeld massa-veersysteem dat trillingen kan uitdempen toepassen in een gebouw. Zo'n tuned mass damper (TMD) wordt aangepast op de eigenfrequentie van de vloeren, maar werkt doorgaans alleen bij een scherpe piek in het trillingsspectrum, omdat omliggende frequenties vaak worden opgeslingerd.

Onderheien, verzwaren van de fundering van het gebouw, waardoor de bedding in de ondergrond toeneemt. Dit kan bereikt worden door het gebouw te onderheien of grout- of gelinjectie toe te passen onder het gebouw.

Afgeveerde vloer, het toepassen van een afgeveerde vloer in een gebouw, deze maatregel is vooral effectief tegen hoogfrequente trillingen (vanaf 5 Hz), en is vooral toepasbaar op betonnen vloeren.



Toepassen van paneelresonatoren of akoestische voorzetwanden, dit is een maatregel tegen laagfrequent geluid om de afstraling van geluid door wanden of plafonds te reduceren, of om staande geluidsgolven in ruimtes te absorberen. Maatregel heeft geen effect op trillingen.



II.4 Maatregelen tegen booggeluid

Om booggeluid te beperken zijn meerdere maatregelen mogelijk, deze maatregelen worden hieronder kort toegelicht.

III.4.1 Ruimere bogen

Het voorkomen van krappe bochten is het meest effectief. Waar mogelijk wordt geadviseerd om bij de verdere detaillering van plannen bochtstralen zo groot mogelijk te kiezen. Ruimere bochten betekenen niet alleen minder (kans op) booggeluid, maar ook minder slijtage van de rails en daarmee minder frequent onderhoud.

III.4.2 Smering

Als maatregel om booggeluid effectief te bestrijden is spoorstaafconditionering met smering van het contact tussen wiel en rail, de maatregel die breed wordt toegepast door zowel ProRail als regionale vervoerders, in binnen en buitenland. Deze maatregel is als effectief naar voren gekomen in de CROW studie naar booggeluid¹³.

Bij smering van het contact tussen wiel en rail heeft men de keuze tussen een vaste installatie of een voertuiggebonden installatie. Vaste installaties hebben het voordeel dat deze lokaal zeer gericht ingezet kunnen worden. Een nadeel is dat er enkel lokale dekking is en indien er meerdere probleemlocaties zijn, het systeem minder efficiënt is. Voertuiggebonden installaties hebben het voordeel dat ze over de gehele lijn effectief kunnen zijn.

Voor een effectieve smering met frictieverbeteraar wordt zowel de flens van het wiel als de kop van de rails gesmeerd (flens- en kopsmering). Uit onderzoek dat voor de HTM is uitgevoerd, is naar voren gekomen dat flenssmering bij al de voertuigen kan worden aangebracht, maar kopsmering bij niet meer dan 20% van het materieel moet worden aangebracht om de rails niet te glad te maken. Voor een vervoerder als de HTM met meerdere lijnen in gebruik, is dit een technisch bezwaar bij voertuiggebonden installaties, voor de exploitatie van TMH lijkt deze randvoorwaarde geen beperking, omdat het hier een enkele lijn betreft.

Met kop en flenssmering neemt het aantal passages waarbij booggeluid optreedt significant af. Algemeen geldt dat de grootte van het effect afhankelijk is van de ernst van de problematiek; voor locaties met een grote instabiliteit (grote geluidsproblemen) kan het aantal voertuigpassages waarbij booggeluid optreedt sterk worden verminderd, voor locaties met een geringere instabiliteit kan booggeluid veelal geheel verdwijnen.

¹³ CROW rapport 03-03 'Maatregelen booggeluid railverkeer' van april 2003

Naast voertuiggebonden smering kan ook gebruik gemaakt worden van vaste installaties waarmee gericht het booggeluid bij specifieke bogen kan worden aangepakt. Bij spoor in ballast zijn dit losse installaties. Deze maatregel is door ProRail grootschalig geïmplementeerd op haar emplacementen met spoorstaaf conditionerings systemen. Daarnaast wordt deze maatregel ook door regionale vervoerders toegepast.

Voor lightrail met overrijdbare trambanen in binnenstedelijke situaties zijn deze systemen niet één op één toepasbaar, hier zijn andere oplossingen nodig. Een techniek die hier wordt toegepast is het toevoegen van het smeermiddel bij de kop en de flens via smeerkanaal vanuit de rails en het ondergronds plaatsen van het reservoir met smeermiddel. De rail wordt via een speciale boortechniek uitgerust met kanalen, waarvan de openingen exact zijn geplaatst aan de rijflank, geleiderand of aan de railkop. Voor de smering van de achterzijde van het wiel worden bij de geleiderails, eventueel ook achteraf, smeerkanaal ingebracht. Bovendien zijn er beweeglijke (blokkeerbare) smeerstrips beschikbaar. Deze kunnen in combinatie met groefrails, ook in de afgedekte rail, worden gebruikt.

III.4.3 Onderhoud

Een belangrijk aspect bij bogen en het voorkomen van booggeluid, is het onderhoud van de rails bij de bogen. Bij het berijden van een boog treden grote krachten op die slijtage in de hand werken en bijgevolg ook het ontstaan van booggeluid. Zo kan gemakkelijk golfslijtage voorkomen hetgeen het ontstaan van extra geluid bespoedigd. Doordat de rails van bochten veelal uit zachter staal wordt geconstrueerd om de rails te buigen, is het slijtage effect extra groot.

Het onderhoud kan verbeterd worden door de kop van de rails te verharderen met een coating of met laser cladding. Daarnaast zal regelmatig herprofilering van het profiel met slijpen aan de orde zijn. Indien het profiel hierbij asymmetrisch geslepen wordt vermindert eveneens de kans op het optreden van booggeluid.

III.4.4 Wioldempers

Bij wioldempers wordt het wiel van het lightrail voertuig met speciale blokken verzwaaard zodat het minder geluid zal afstralen, waarmee de geluidproductie verminderd. Een voorwaarde is dat deze maatregel door de vervoerder moet worden uitgevoerd en pas effectief is indien al de voertuigen voorzien zijn van de stillere wielen. Verder is deze maatregel niet in alle gevallen effectief.

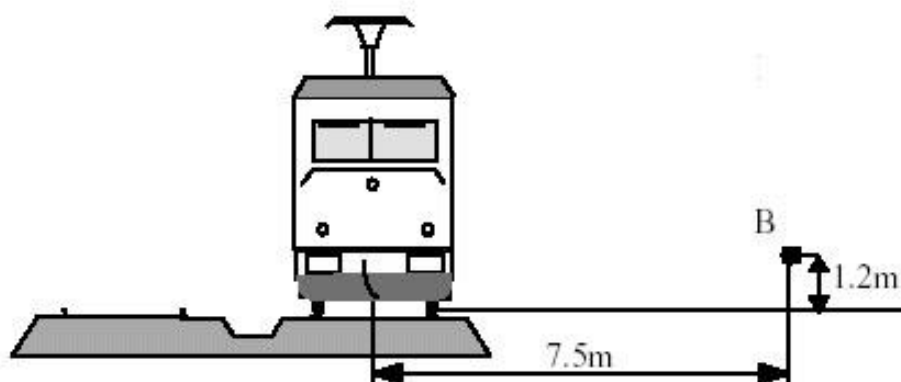
III.4.5 Rijgedrag

De krachten die tijdens het rijden door een bocht tussen wiel en rails optreden, zijn afhankelijk van de snelheid. Belangrijk is dat de bochten met de juiste snelheid en rustig bereden worden. De krappe bochten in de binnenstedelijke situaties initiëren een dergelijk rijgedrag.

Bijlage III Meetmethode en meetapparatuur booggeluid

III.1 Meetmethode

De metingen voor booggeluid zijn, waar mogelijk, uitgevoerd volgens ISO 3095 en het meetprotocol booggeluid. De metingen worden uitgevoerd op 7,5 meter van het hart van het spoor, waarbij de microfoons op een hoogte van 1,20 meter boven de bovenzijde spoorstaaf zijn opgesteld, zie Figuur III - 1. Van de passage door de boog wordt het equivalente geluidsdrukniveau (L_{Aeq}) gemeten alsmede de maximale optredende geluidsdruk (L_{Amax}).



Figuur III - 1 Meetopstelling booggeluid

III.2 Gebruikte apparatuur

De geluidmetingen zijn uitgevoerd met de volgende apparatuur:

- Analyzer 2250, fabrikaat Brüel & Kjaer (binnenbogen);
- ½ inch microfoon 4189, firma Brüel & Kjaer (idem);
- Brüel & Kjaer Analyzer 2250 firma Brüel & Kjaer (buitenbogen);
- ½ inch microfoon 4189, firma Brüel & Kjaer (idem);
- Statieven Manfrotto;
- Brüel & Kjaer ijctoongenerator 9230.

III.3 Kalibratie

De laatst kalibratie is uitgevoerd op 30 juni 2014 door de firma Brüel & Kjaer.

III.4 Gebruikte software

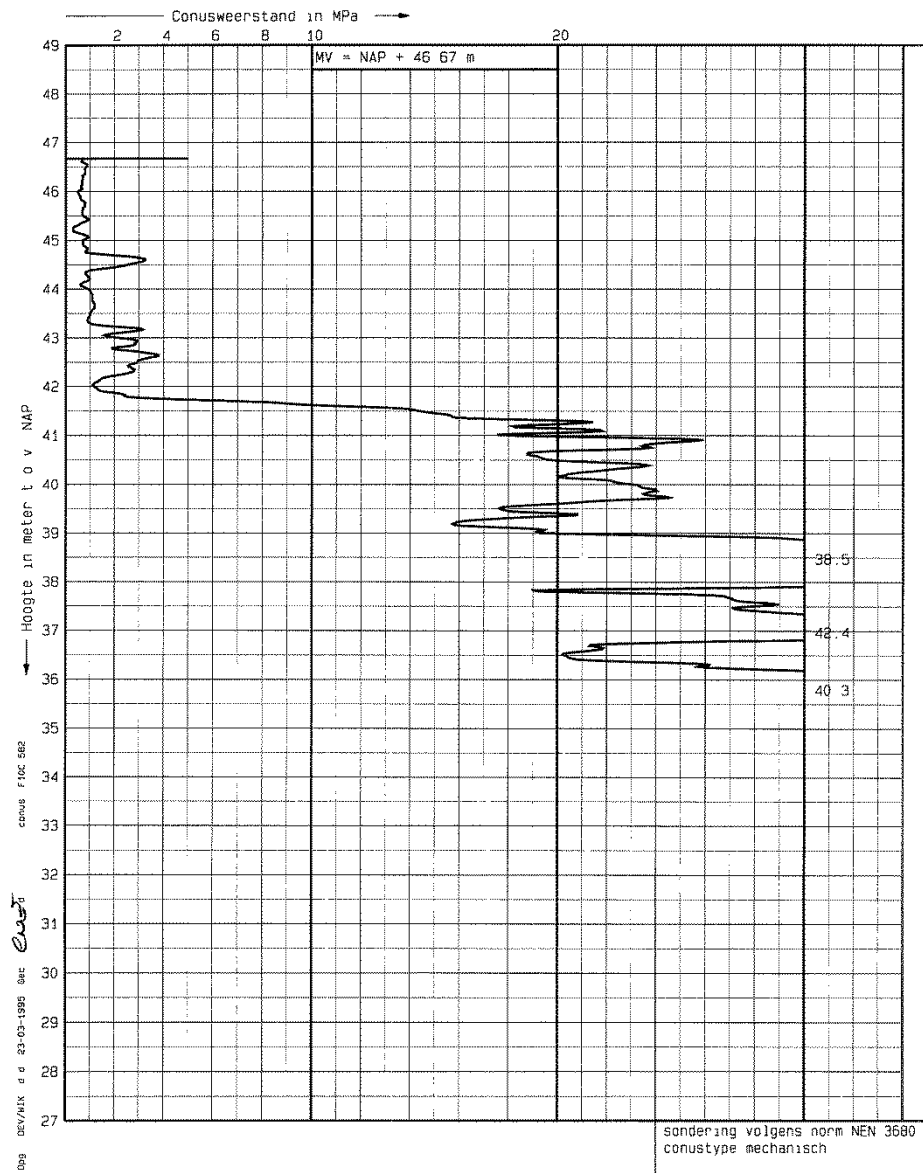
De metingen zijn verwerkt en geanalyseerd met behulp van het verwerkingsprogramma Evaluator 7820 van de firma Brüel & Kjaer. De resultaten zijn verder met Excel (Microsoft) bewerkt.

III.5 Meteorcondities

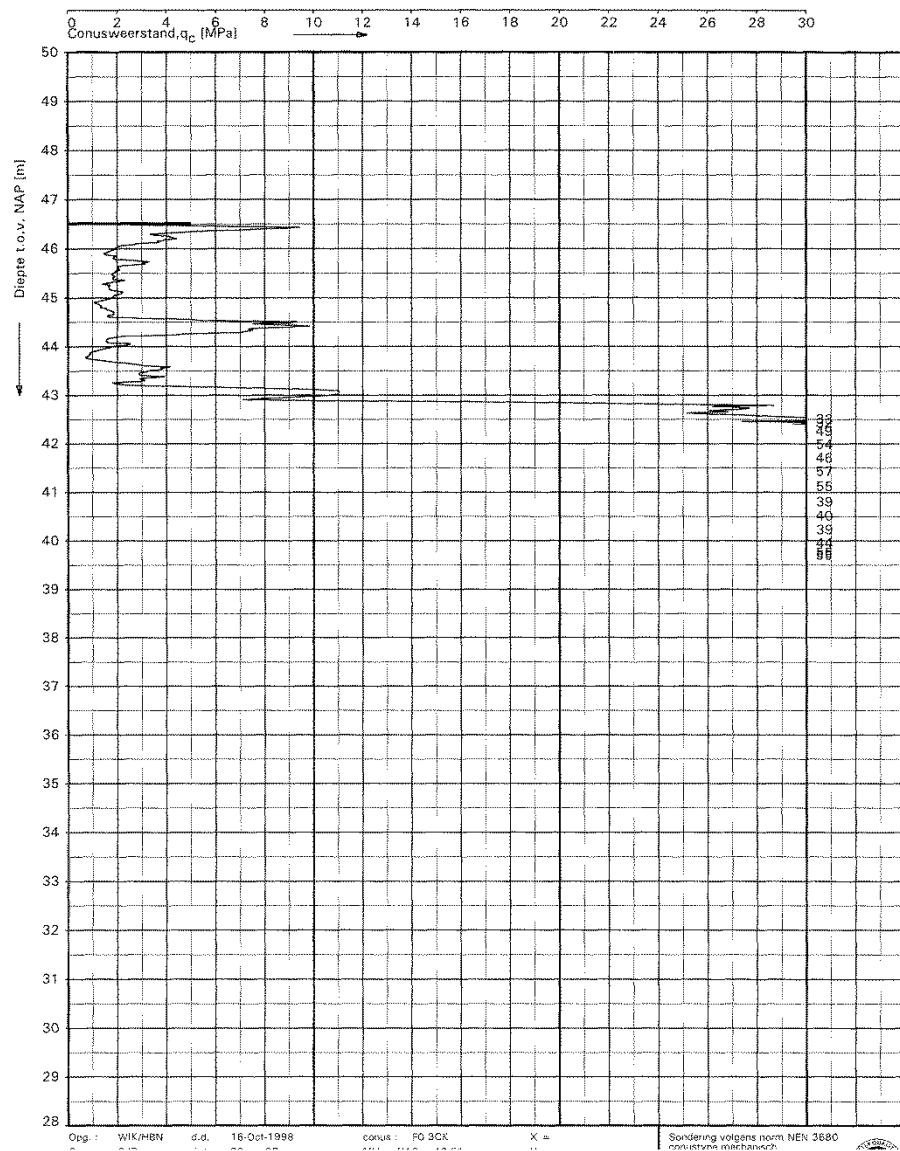
Datum	Tijd [uren]	Temperatuur [°C]	Windsnelheid [m/s]	Richting
01-11-2014	10.20 - 13.30	18-20	1-2	Zuid

Bijlage IV Gebruikt grondonderzoek

Deze bijlage bevat de voor dit onderzoek gebruikte sonderingen, gebruikt om de (variatie in) bodemopbouw vast te stellen. De sonderingen laten een vergelijkbare bodemopbouw zien.



Figuur IV - 1 Sondering S61F00318, ter hoogte van de Van Hasselkade (hoek Sint Teunisstraat)



Figuur IV - 2 *Sondering S61F00318, ter hoogte van de Van Hasseltkade (hoek Wilhelminabrug)*

Bijlage V Resultaten per gebouw

Deze bijlage bevat de numerieke resultaten van de predicties voor trillingen, laagfrequent geluid en booggeluid per adres binnen het studiegebied. Per adres is de bestemming, de kortste afstand tot het spoor en de snelheid van het tramvoertuig op het dichtstbijzijnde spoor weergegeven. Op basis daarvan, en bijvoorbeeld de afstand tot wissels en bogen, is een berekening uitgevoerd om de trillingen, het laagfrequent geluid en het booggeluid te bepalen, zie bijlage I. De resultaten hiervan zijn weergegeven in onderstaande tabellen. Bij trillingen is conform de richtlijnen de 95%-waarde weergegeven, bij laagfrequent geluid ook de 95%-waarde en bij booggeluid zoals gebruikelijk de verwachtingswaarde.

Overschrijdingen van het beoordelingskader zijn oranje gemarkeerd. Op een aantal locaties is wel sprake van een overschrijding van het beoordelingskader, maar veranderen de trillingen niet door het project. Deze locaties zijn geel gemarkeerd.

Ook de resultaten na de voorgestelde maatregelen (zie paragraaf 5.2.5) zijn weergegeven.

V.1 Resultaten trillingen, laagfrequent geluid en booggeluid zonder maatregelen

Algemene eigenschappen				Trillingen			Laagfrequent geluid					Booggeluid
Adres	Bestemming	Afstand spoor [m]	Snelheid	V _{max} [-]	V _{per, dag} [-]	V _{per, nacht} [-]	L _{Amax} [dB]	L _{Lmax,16Hz} [dB]	L _{Lmax,32Hz} [dB]	L _{Lmax,64Hz} [dB]	L _{Lmax,125Hz} [dB]	L _{Amax} [dB]
Bassin 98	kantoorfunctie	7	18	0.3	0.04	0.02	39	66	60	63	54	75
Bassinkade 13	bijeenkomstfunctie	14	18	0.2	0.03	0.01	32	64	53	53	45	74
Biesenwal 3	woonfunctie	20	27	0.2	0.01	0.01	33	64	52	56	44	66
Biesenweg 16	industriefunctie	72	23	0.0	0.00	0.00	18	50	31	23	9	63
Boschstraat 5	kantoorfunctie	5	20	1.3	0.09	0.06	55	68	68	77	72	74
Boschstraat 7	bijeenkomstfunctie	6	20	0.3	0.02	0.02	39	67	59	63	55	67
Boschstraat 9	kantoorfunctie	6	19	0.3	0.03	0.02	39	66	60	63	55	74
Boschstraat 21-23	woonfunctie	21	18	0.2	0.06	0.03	35	72	56	54	45	78
Maasboulevard 1	kantoorfunctie	9	30	0.1	0.00	0.00	36	60	48	55	54	73
Maasboulevard 2-22	woonfunctie	18	18	0.1	0.04	0.02	34	68	54	53	45	75
Maasboulevard 5	kantoorfunctie	8	18	0.1	0.00	0.00	36	60	50	54	53	81
Maasmolendijk 24	woonfunctie	6	18	0.3	0.02	0.01	39	66	60	63	54	66

Maasmolendijk 26	woonfunctie	9	18	0.3	0.02	0.01	37	65	58	60	52	72
Maastrichter Grachtstraat 1	woonfunctie	34	18	0.1	0.00	0.00	25	60	49	42	35	76
Sint Teunisstraat 2	woonfunctie	20	27	0.1	0.00	0.00	34	59	58	55	45	67
Sint Teunisstraat 3	woonfunctie	25	30	0.1	0.00	0.00	26	54	52	48	35	73
Sint Teunisstraat 4	woonfunctie	22	30	0.1	0.00	0.00	33	58	56	55	45	67
Sint Teunisstraat 6	woonfunctie	22	30	0.1	0.00	0.00	33	58	56	55	45	68
Sint Teunisstraat 8	woonfunctie	23	30	0.1	0.00	0.00	33	58	56	55	45	69
Sint Teunisstraat 10	woonfunctie	23	30	0.1	0.00	0.00	33	58	55	54	44	69
Sphinxcour 1	woonfunctie	7	18	0.7	0.05	0.04	46	72	63	71	60	82
van Hasseltkade 1	woonfunctie	23	22	0.2	0.01	0.01	37	68	55	58	48	77
van Hasseltkade 2	woonfunctie	24	18	0.1	0.01	0.01	28	57	57	52	34	78
van Hasseltkade 3	woonfunctie	26	18	0.1	0.01	0.01	28	57	58	52	33	78
van Hasseltkade 4	woonfunctie	28	18	0.1	0.01	0.01	28	57	59	51	34	77
van Hasseltkade 5	woonfunctie	30	18	0.1	0.01	0.01	24	63	55	50	35	76
van Hasseltkade 6	woonfunctie	34	18	0.1	0.01	0.01	25	62	56	51	36	75
van Hasseltkade 7	logiesfunctie	37	18	0.1	0.01	0.00	26	60	52	47	39	74
van Hasseltkade 8	woonfunctie	37	18	0.1	0.01	0.00	26	59	51	47	39	72
van Hasseltkade 9	woonfunctie	38	18	0.1	0.02	0.01	18	63	44	39	31	71
van Hasseltkade 10	woonfunctie	38	18	0.1	0.01	0.00	23	56	50	43	36	70
van Hasseltkade 11	woonfunctie	38	18	0.1	0.00	0.00	21	56	54	47	32	69
van Hasseltkade 12	woonfunctie	39	18	0.0	0.00	0.00	17	37	42	32	28	68
van Hasseltkade 13	kantoorfunctie	38	18	0.1	0.01	0.00	22	56	47	38	31	67
van Hasseltkade 14	woonfunctie	38	18	0.1	0.01	0.00	22	56	46	36	30	67
van Hasseltkade 15	woonfunctie	39	18	0.1	0.01	0.00	22	56	45	35	28	66
van Hasseltkade 16	woonfunctie	39	18	0.0	0.00	0.00	19	37	39	29	27	65
van Hasseltkade 17	woonfunctie	38	18	0.1	0.01	0.00	23	56	44	33	29	65
van Hasseltkade 18	woonfunctie	38	5	0.0	0.00	0.00	19	37	38	31	29	65
van Hasseltkade 19	kantoorfunctie	38	5	0.1	0.01	0.00	24	56	43	34	30	64

van Hasseltkade 19A	logiesfunctie	38	5	0.1	0.01	0.00	24	56	43	34	30	64
van Hasseltkade 20	kantoorfunctie	39	5	0.0	0.00	0.00	23	55	38	26	22	63

V.2 Resultaten trillingen, laagfrequent geluid en booggeluid met maatregelen

Algemene eigenschappen				Trillingen			Laagfrequent geluid					Booggeluid
Adres	Bestemming	Afstand spoor [m]	Snelheid	V _{max} [-]	V _{per, dag} [-]	V _{per, nacht} [-]	L _{Amax} [dB]	L _{Lmax,16Hz} [dB]	L _{Lmax,32Hz} [dB]	L _{Lmax,64Hz} [dB]	L _{Lmax,125Hz} [dB]	L _{Amax} [dB]
Bassin 98	kantoorfunctie	7	18	0.4	0.04	0.02	41	67	61	65	57	62
Bassinkade 13	bijeenkomstfunctie	14	18	0.2	0.03	0.01	32	64	53	53	45	61
Biesenwal 3	woonfunctie	20	27	0.2	0.01	0.01	32	66	51	54	42	53
Biesenweg 16	industriefunctie	72	23	0.0	0.00	0.00	18	50	31	23	9	50
Boschstraat 5	kantoorfunctie	5	20	0.3	0.02	0.01	41	64	55	63	55	61
Boschstraat 7	bijeenkomstfunctie	6	20	0.3	0.02	0.01	20	71	47	45	36	54
Boschstraat 9	kantoorfunctie	6	19	0.2	0.02	0.01	21	70	46	43	34	61
Boschstraat 21-23	woonfunctie	21	18	0.2	0.06	0.03	35	72	56	54	45	65
Maasboulevard 1	kantoorfunctie	9	30	0.1	0.00	0.00	36	60	48	55	54	60
Maasboulevard 2-22	woonfunctie	18	18	0.1	0.04	0.02	34	68	54	53	45	62
Maasboulevard 5	kantoorfunctie	8	18	0.1	0.00	0.00	36	60	50	54	53	68
Maasmolendijk 24	woonfunctie	6	18	0.2	0.02	0.01	31	67	59	54	44	53
Maasmolendijk 26	woonfunctie	9	18	0.2	0.01	0.01	31	65	55	52	43	59
Maastrichter Grachtstraat 1	woonfunctie	34	18	0.1	0.00	0.00	25	60	49	42	35	63
Sint Teunisstraat 2	woonfunctie	20	27	0.1	0.00	0.00	32	60	55	54	43	54
Sint Teunisstraat 3	woonfunctie	25	30	0.1	0.00	0.00	25	55	52	46	32	60
Sint Teunisstraat 4	woonfunctie	22	30	0.1	0.00	0.00	32	59	55	55	44	54
Sint Teunisstraat 6	woonfunctie	22	30	0.1	0.00	0.00	33	59	56	55	45	55
Sint Teunisstraat 8	woonfunctie	23	30	0.1	0.00	0.00	33	59	56	55	45	56
Sint Teunisstraat 10	woonfunctie	23	30	0.1	0.00	0.00	33	58	55	54	44	56
Sphinxcour 1	woonfunctie	7	18	0.2	0.01	0.01	33	66	52	54	39	69
van Hasseltkade 1	woonfunctie	23	22	0.2	0.01	0.01	35	70	55	54	39	64
van Hasseltkade 2	woonfunctie	24	18	0.1	0.01	0.00	28	58	57	51	32	65
van Hasseltkade 3	woonfunctie	26	18	0.1	0.01	0.01	28	58	58	52	33	65

van Hasseltkade 4	woonfunctie	28	18	0.1	0.01	0.01	28	58	59	51	34	64
van Hasseltkade 5	woonfunctie	30	18	0.1	0.01	0.01	24	63	55	50	35	63
van Hasseltkade 6	woonfunctie	34	18	0.1	0.01	0.01	25	62	56	51	36	62
van Hasseltkade 7	logiesfunctie	37	18	0.1	0.01	0.00	26	60	52	47	39	61
van Hasseltkade 8	woonfunctie	37	18	0.1	0.01	0.00	26	59	51	47	39	59
van Hasseltkade 9	woonfunctie	38	18	0.1	0.02	0.01	18	63	44	39	31	58
van Hasseltkade 10	woonfunctie	38	18	0.1	0.01	0.00	23	56	50	43	36	57
van Hasseltkade 11	woonfunctie	38	18	0.1	0.00	0.00	21	56	54	47	32	56
van Hasseltkade 12	woonfunctie	39	18	0.0	0.00	0.00	17	37	42	32	28	55
van Hasseltkade 13	kantoorfunctie	38	18	0.1	0.01	0.00	22	56	47	38	31	54
van Hasseltkade 14	woonfunctie	38	18	0.1	0.01	0.00	22	56	46	36	30	54
van Hasseltkade 15	woonfunctie	39	18	0.1	0.01	0.00	22	56	45	35	28	53
van Hasseltkade 16	woonfunctie	39	18	0.0	0.00	0.00	19	37	39	29	27	52
van Hasseltkade 17	woonfunctie	38	18	0.1	0.01	0.00	23	56	44	33	29	52
van Hasseltkade 18	woonfunctie	38	5	0.0	0.00	0.00	19	37	38	31	29	52
van Hasseltkade 19	kantoorfunctie	38	5	0.1	0.01	0.00	24	56	43	34	30	51
van Hasseltkade 19A	logiesfunctie	38	5	0.1	0.01	0.00	24	56	43	34	30	51
van Hasseltkade 20	kantoorfunctie	39	5	0.0	0.00	0.00	23	55	38	26	22	50