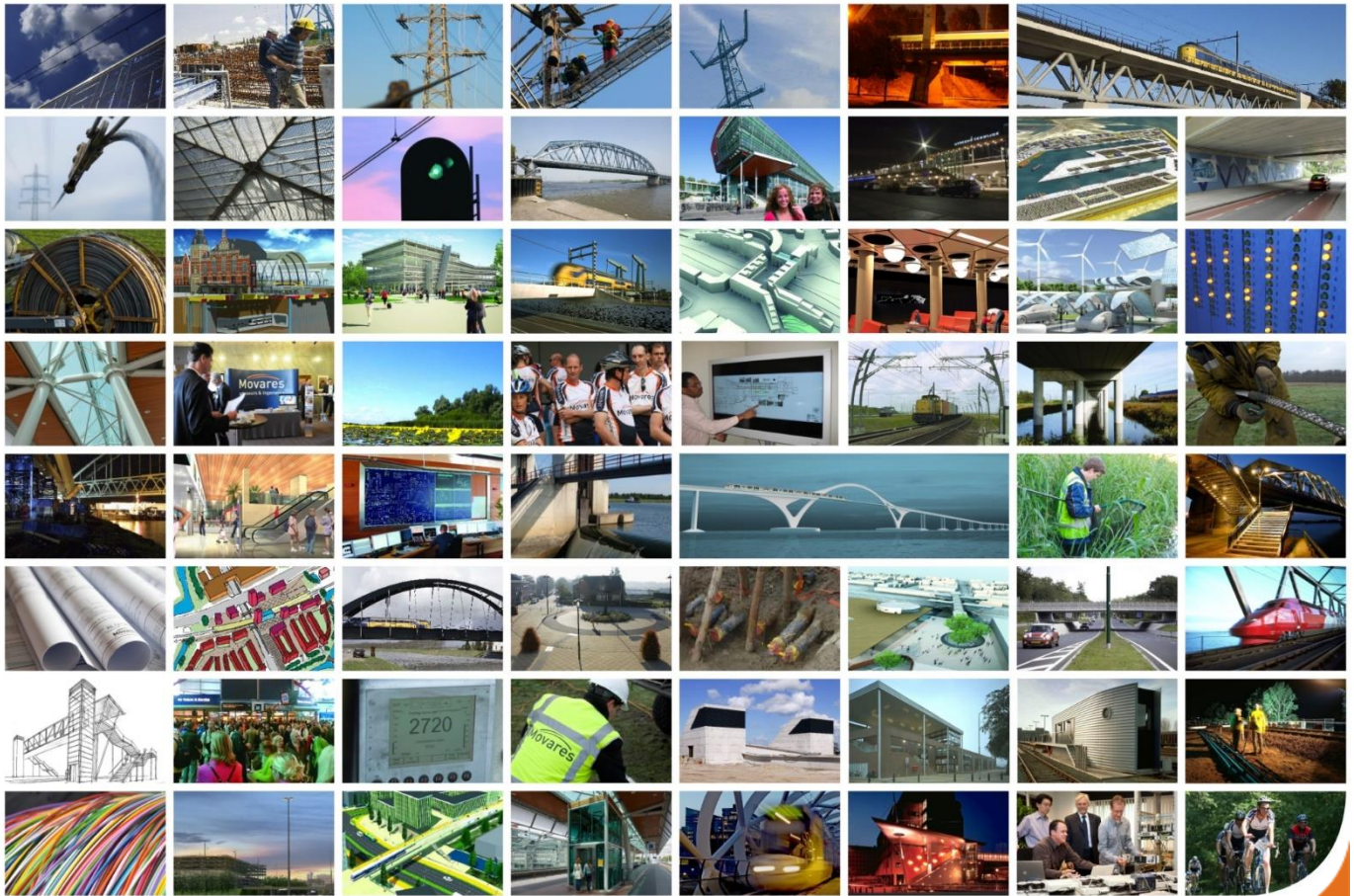




Projectnummer RA004828, D79-RGE-KA-1900120

12 maart 2020 - Versie 2.0

Autorisatieblad

Trillingsonderzoek

Pompenburg Rotterdam

	Naam	Akkoord	Datum
Opgesteld door	Lommers, CR	✓	12-03-2020
Gecontroleerd door	Boon, PM	✓	12-03-2020
Vrijgegeven door	Wijnands, MNJH	✓	12-03-2020

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

Versie historie

Versie	Naam	Datum	Korte toelichting
0.1 – 0.5	Wessel Geerlof	20-11-2019	Concept opgesteld door Wessel Geerlof
0.6 – 0.7	Wybo Gardien	28-11-2019	Aanvullingen door Wybo Gardien
0.8	Pieter Boon	29-11-2019	Interne controle door Pieter Boon
0.9-0.10	Wybo Gardien	29-11-2019	Verwerking commentaar door Wybo Gardien
0.11	Pieter Boon	3-12-2019	2 ^e interne controle door Pieter Boon
0.12	Wybo Gardien	3-12-2019	Verwerking commentaar door Wybo Gardien
1.0	Wybo Gardien	20-12-2019	Definitieve versie
1.3	Niels Lommers	6-3-2020	Aanpassingen aan de hand aanvullende vraag Stroveer
2.0	Niels Lommers	11-3-2020	Verwerking feedback klant

Samenvatting

Synchroon, J.P. van Eesteren en Dura Vermeer zijn samen met de gemeente Rotterdam bezig met deze gebiedsontwikkeling Pompenburg in Rotterdam. Daar dwars door de gebiedsontwikkeling het treinspoor loopt en er een ambitieuze visie ligt is het voor de uitwerking van belang om alle invloedfactoren op de te ontwikkelen plots goed in kaart te brengen. In dit rapport is het aspect trillingshinder onderzocht.

In dit onderzoek zijn metingen en berekeningen uitgevoerd om de verwachte trillingsniveaus in nieuw te bouwen gebouwen in Rotterdam te bepalen. Deze verwachte waarden zijn getoetst aan de streefwaarden voor nieuwbouw uit de SBR-B-richtlijn. De prognose geeft een 50%-waarde (verwachtingswaarde) en een 95%-waarde (bovengrens). Als alleen de 95%-waarde hoger is dan de streefwaarden, dan adviseren we het ontwerp te toetsen als dat nader is uitgewerkt. Als ook de 50%-waarde hoger is dan de streefwaarden, dan zijn er waarschijnlijk maatregelen nodig om aan de streefwaarden te kunnen voldoen. De resultaten van het onderzoek zijn samengevat in de onderstaande tabel.

Deelgebied	Type	Hoogte	afstand	Overschrijding SBR-B streefwaarde	Voorkomen trillingshinder
Pompenburg	Type 1	20	7	50%-waarde	Maatregelafweging
Pompenburg	Type 1	20	40	geen overschrijding	Voldoet, geen actie nodig
Pompenburg	Type 1	20	70	geen overschrijding	Voldoet, geen actie nodig
Pompenburg	Type 2	120	18	95%-waarde	Toetsen ontwerp
Stroveer	Type 3	50	20	50%-waarde	Maatregelafweging, beperkte bouwkundige aanpassingen
Stroveer	Type 3	70	20	50%-waarde	Maatregelafweging, beperkte bouwkundige aanpassingen
Heer Bokelweg	Type 1	20	7	50%-waarde	Maatregelafweging
Heer Bokelweg	Type 1	20	40	95%-waarde	Toetsen ontwerp
Heer Bokelweg	Type 1	20	70	geen overschrijding	Voldoet, geen actie nodig
Heer Bokelweg	Type 2	120	18	95%-waarde	Toetsen ontwerp
Heer Bokelweg	Type 4	70	70	geen overschrijding	Voldoet, geen actie nodig

In een aantal gebouwen is al te voorzien dat er maatregelen nodig zijn om aan de SBR-B streefwaarden te voldoen. De volgende maatregelen komen hiervoor in aanmerking:

- Een trillingsscherm. Deze maatregel is niet voldoende om te voldoen aan de streefwaarden voor nieuwe situaties, maar mogelijk wel om te voldoen aan de streefwaarden voor bestaande situaties.
- Afveren van de fundering. Met stalen veerdozen kan worden voldaan aan de SBR-B streefwaarden voor nieuwe situaties. Met rubber blokken kan mogelijk worden voldaan aan de streefwaarden voor bestaande situaties. Zowel stalen veerdozen als rubber blokken reduceren tevens effectief het laagfrequent geluid.

Deelgebied	Type	Hoogte	afstand	Trillingsscherm € 0.75 tot € 1.25 mln.	Afveren fundering 3-5% Stichtingskosten
Pompenburg	Type 1	20	7	Voldoet niet	Voldoet
Stroveer	Type 3	50	20	Voldoet niet	Voldoet
Heer Bokelweg	Type 1	20	7	Voldoet niet	Voldoet

	Voldoet aan streefwaarden voor nieuwe situatie
	Voldoet aan streefwaarden voor bestaande situatie
	Voldoet niet

Inhoudsopgave

Samenvatting	1
1 Inleiding	5
1.1 Aanleiding	5
1.2 Doel	5
1.3 Aanpak	5
1.4 Leeswijzer	6
2 Situatiebeschrijving en uitgangspunten	7
2.1 Inleiding	7
2.2 Omgeving	7
2.3 Bouwlocatie	8
2.4 Geplande bebouwing	9
3 Beoordelingskader	10
3.1 Algemeen	10
3.2 Grootheden	10
3.3 Streefwaarden	10
3.3.1. <i>Nieuwe of bestaande situatie</i>	11
3.3.2. <i>Periode gedurende de dag</i>	11
3.3.3. <i>Gebouwfunctie</i>	11
3.4 Beoordeling in huidige onderzoek	11
4 Meetresultaten	13
4.1 Inleiding	13
4.2 Meetresultaten deelgebied Heer Bokelweg	13
4.3 Meetresultaten deelgebied Pompenburg	14
5 Analyse en berekeningen	16
5.1 Prognosemethode	16
5.1.1. <i>Overdracht tussen meetpunten</i>	17
5.1.2. <i>Overdracht in gebouwen</i>	17
5.2 Resultaten op maaiveld	18
5.2.1. <i>Verwachtingswaarde trillingen in gebouwen</i>	19
5.2.2. <i>Bovengrens van trillingen in gebouwen</i>	21
5.3 Betrouwbaarheid	22
5.4 Voorkomen van trillingshinder en afweging	22
5.4.1. <i>Laagfrequent geluid</i>	23
5.4.2. <i>Aanvullende maatregelen</i>	23
5.4.3. <i>Samenvatting</i>	24
6 Conclusies en aanbevelingen	27
Colofon	28
Bijlage I - Gegevens van de metingen	29
Bijlage II – Meetresultaten	30

Bijlage III – Bodemgegevens	32
Bijlage IV – Gebouwoverdrachten	33
Bijlage V – Trillingsspectra in gebouwen	1

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Synchroon, J.P. van Eesteren en Dura Vermeer zijn samen met de gemeente Rotterdam bezig met de gebiedsontwikkeling Pompenburg in Rotterdam. Deze gebiedsontwikkeling rondom de Hofbogen (oude kopstation van de Hofpleinlijn) bestaat uit circa 650 woningen en 23.500 m² commerciële ruimte (winkels, hotel, horeca, parkeren, overig) op verschillende plots. Eind 2018 is de visie gepresenteerd aan het college van Rotterdam.

Aan de hand van de visie wordt het plan nu verder uitgewerkt naar een definitief masterplan / stedenbouwkundig ontwerp. Dit om de haalbaarheid van de ontwikkeling te toetsen en kaders vast te stellen voor de verdere ontwikkeling.

Daar dwars door de gebiedsontwikkeling het treinspoor loopt en er een ambitieuze visie ligt is het voor de uitwerking van belang om alle invloedfactoren op de te ontwikkelen plots goed in kaart te brengen.

1.2 Doel

De combinatie Synchroon, J.P. van Eesteren en Dura Vermeer heeft Movares gevraagd ondersteuning te bieden bij het onderzoek naar de mate van invloed van meerdere factoren op de ontwikkeling Pompenburg. Dit rapport gaat in op de invloed van de aan het spoor gerelateerde trillingen.

Doel van dit onderzoek is om een voorspelling te maken van de te verwachten trillingen in de toekomstige bebouwing. Mochten er overschrijdingen van de richtlijnen voor trillingshinder verwacht worden, dan zal geadviseerd worden over mogelijke maatregelen die de trillingshinder kunnen voorkomen.

1.3 Aanpak

Trillingen van spoorverkeer zijn locatie specifiek. Wij hebben daarom de volgende aanpak gevolgd:

1. Uitvoeren van een trillingsmeting ter plaatse van het plangebied. Deze meting bestaat uit drie onderdelen:
 - a. Metingen waarmee wij de uitdemping van de trillingen met de afstand vaststellen (hoe verder van het spoor, hoe lager de trillingen). Deze meting heeft een beperkte meetduur van enkele uren, voldoende om de eigenschappen van de bodem en de uitdemping met de afstand vast te stellen.
 - b. Metingen waarmee de lokale variatie van de trillingen bepalen parallel aan het spoor. Deze meting heeft ook een beperkte meetduur van enkele uren.
 - c. Metingen waarmee wij over langere tijd (ten minste 1 week) de trillingssterktes vaststellen. Het grillige karakter van goederentreinen (grote variatie in passeertijd, zwaarte, etc.) maakt een meetduur van een week wenselijk.
2. Het maken van een prognose van de trillingssterktes in de geplande woningen en kantoren. Omdat de constructieve eigenschappen nog niet bekend zijn, is in overeenstemming met de opdrachtgever een aantal verschillende constructietypes beschouwd.

Op basis van deze resultaten geven wij een advies over of, en zo ja, hoe trillingshinder in de geplande gebouwen kan worden voorkomen.

1.4 Leeswijzer

De situatiebeschrijving is weergegeven in hoofdstuk 2. Het beoordelingskader voor trillingshinder staat beschreven in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 zijn de meetresultaten weergegeven. Hoofdstuk 5 bevat een analyse van de meetresultaten en advies t.a.v. (bouwkundige) optimalisaties om trillingshinder te voorkomen. Het laatste hoofdstuk beschrijft de conclusies en aanbevelingen.

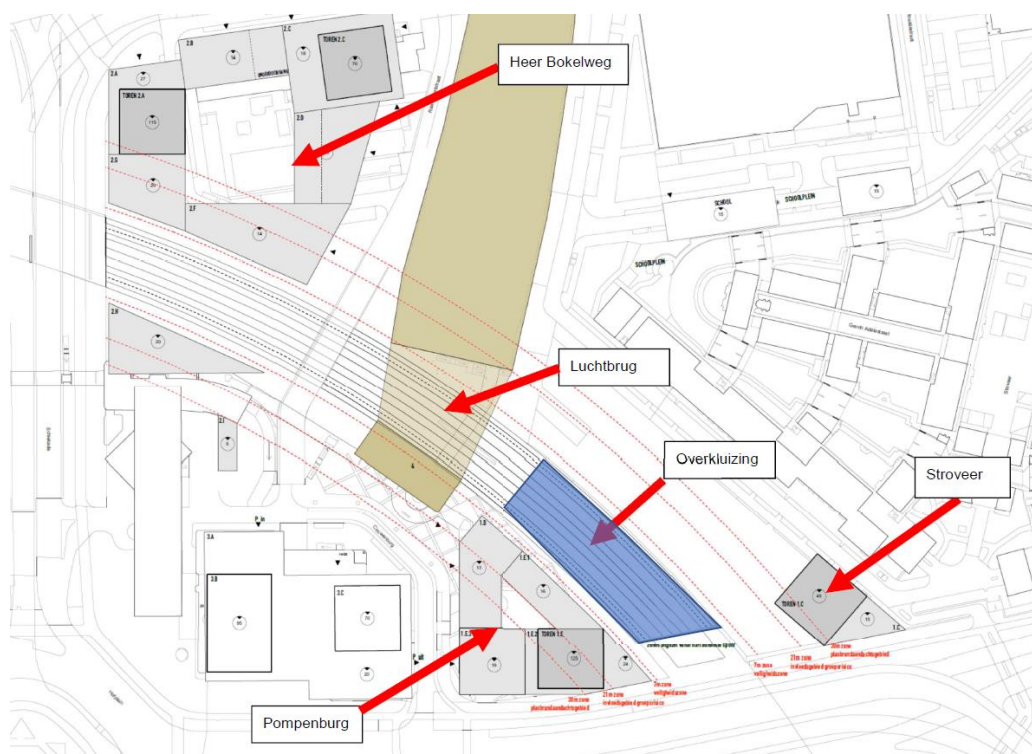
2 Situatiebeschrijving en uitgangspunten

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk bevat een beschrijving van de onderzoekslocatie en de uitgangspunten voor het onderzoek.

2.2 Omgeving

De onderzoekslocatie bevindt zich ten oosten van de spoorlijn Rotterdam Centraal – Rotterdam Blaak, zie Figuur 2-1. De spoorlijn wordt zowel door reizigers- als door goederenverkeer gebruikt. Ten tijde van dit onderzoek bestond een redelijk nauwkeurig beeld van de invulling van de bouwlocaties. Dit zijn de grijze vlakken in de figuur. De metingen zijn verricht in meerdere locaties in het plangebied.



Figuur 2-1 Overzicht van het plangebied. De grijze vlakken zijn de geplande bebouwing, witte vlakken geven bestaande bebouwing aan. Het spoor doorsnijdt de projectlocatie.

De intensiteit van het treinverkeer gedurende de dag, avond en nacht is weergegeven in Tabel 2-1. Het betreft een inschatting op basis van de gegevens uit het geluidsregister spoor in combinatie met de NS dienstregeling.

Tabel 2-1 Huidige treinintensiteiten per uur

	Reizigers	Goederen
Dag	25,00	0,10
Avond	25,00	0,10
Nacht	3,00	0,10

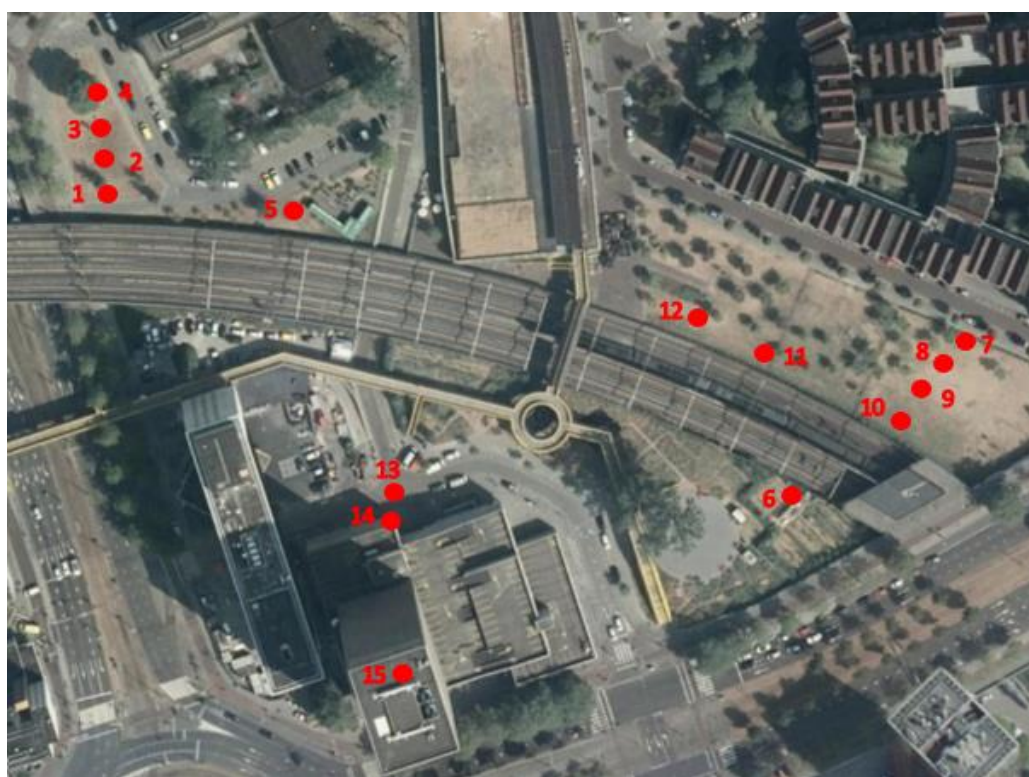
De rijsnelheden van het treinverkeer zijn weergegeven in Tabel 2-2. Ook hier betreft het een inschatting op basis van het geluidsregister spoor, als mede camerabeelden van de passerende treinen die zijn opgenomen in het kader van dit onderzoek.

Tabel 2-2 Rijsnelheden treinverkeer

Corridor	Type trein	Snelheid (km/h)
Centraal - Blaak	Reizigerstreinen	50 – 80
Centraal - Blaak	Goederentreinen	50 - 80

2.3 Bouwlocatie

De metingen zijn uitgevoerd op maaiveldniveau op de onderzoekslocatie (die het plangebied omvat) van de geplande nieuwbouw. Een plattegrond van de onderzoekslocatie met daarop de meetpunten is weergegeven in Figuur 2-2.



Figuur 2-2 Onderzoekslocatie met meetpunten (in rood aangegeven)

Op de onderzoekslocatie zijn drie metingen uitgevoerd op maaiveld: een lange meting van ruim een week, met twee meetpunten (punten 1 en 6). En korte metingen van ruim een dag met meerdere meetpunten, zowel op het maaiveld als in reeds bestaande hoogbouw. De meetpunten voor de lange meting zijn ook tijdens de eerste korte meting gebruikt.

Met de gegevens van de langeduurmeting is het trillingsbeeld van een breed scala aan passerende treinen bepaald voor de onderzoekslocatie. Met de extra meetpunten van de korteduurmeting zijn de effecten zoals het uitdempjen van trillingen met de afstand, en de invloed van de variatie in de ondergrond van de projectlocatie bepaald.

2.4 Geplande bebouwing

De eigenschappen van de toekomstige bebouwing zijn nog niet exact bekend. In het kader van dit onderzoek is in samenspraak een beperkt aantal gebouwcombinaties bepaald welke verder zijn onderzocht. In dit onderzoek is gerekend met de eigenschappen zoals opgenomen in Tabel 2-3, waarbij steeds de bovenste verdieping is beschouwd. Sommige gebouwen worden op meerdere afstanden tot het spoor onderzocht, andere op een enkele afstand.

Omdat een predictie altijd bepaalde onzekerheden met zich mee brengt (door onzekerheden in het predictiemodel, het gedrag van de te gebruiken materialen en verschillen tussen de uiteindelijke as-built situatie en de ontwerpsituatie), is zowel een verwachte trillingssituatie als een maximale trillingssituatie berekend per constructietype, op basis van de gegeven eigenschappen.

Tabel 2-3 Eigenschappen bebouwing

Gebouw- type	Beukmaat	Vloertype	Gebouw- hoogte	Afstand tot spoor	Funderings- type	Locatie
1a	5 m	Kanaalplaatvloer	20	7, 40 en 70m	Palen	Pompenburg / Heer Bokelweg
1b	6.5 m	Kanaalplaatvloer	20	7, 40 en 70m	Palen	Pompenburg / Heer Bokelweg
1c	8 m	Kanaalplaatvloer	20	7, 40 en 70m	Palen	Pompenburg / Heer Bokelweg
2a	5 m	Kanaalplaatvloer	120	18m	Palen	Pompenburg / Heer Bokelweg
2b	6.5 m	Kanaalplaatvloer	120	18m	Palen	Pompenburg / Heer Bokelweg
2c	8 m	Kanaalplaatvloer	120	18m	Palen	Pompenburg / Heer Bokelweg
3a	5 m	Kanaalplaatvloer	50	20m	Palen	Stroveer
3b	6.5 m	Kanaalplaatvloer	50	20m	Palen	Stroveer
3c	8 m	Kanaalplaatvloer	50	20m	Palen	Stroveer
4a	5 m	Kanaalplaatvloer	70	70m	Palen	Heer Bokelweg
4b	6.5 m	Kanaalplaatvloer	70	70m	Palen	Heer Bokelweg
4c	8 m	Kanaalplaatvloer	70	70m	Palen	Heer Bokelweg
5a	5 m	Kanaalplaatvloer	70	20m	Palen	Stroveer
5b	6.5 m	Kanaalplaatvloer	70	20m	Palen	Stroveer
5c	8 m	Kanaalplaatvloer	70	20m	Palen	Stroveer

3 Beoordelingskader

3.1 Algemeen

Treinverkeer kan aanleiding geven tot trillingen in gebouwen. Deze trillingen kunnen leiden tot hinder voor omwonenden. De Duitse DIN 4150-2 (1999) norm beschrijft criteria voor het meten en beoordelen van trillingen. De Nederlandse SBR-richtlijn (2002) is hierop gebaseerd. Deze SBR-richtlijn is in Nederland de meest gebruikte richtlijn voor het beoordelen van trillingen en bestaat uit 3 delen:

- Deel A: schade aan gebouwen;
- Deel B: hinder voor personen in gebouwen;
- Deel C: verstoring van apparatuur.

Op basis van eerdere projecten, waaronder bij een vergelijkbare situatie in de omgeving van de spoortunnel in Delft, verwachten wij geen onaanvaardbaar schaderisico aan een gebouw op deze locatie. Daarom is er niet beoordeeld op de SBR A-richtlijn. Ook verstoring van apparatuur (SBR C-richtlijn) is niet aan de orde. In dit onderzoek is daarom alleen beoordeeld op de SBR B-richtlijn.

De SBR B-richtlijn heeft geen wettelijke status.¹ Daarom bevat de richtlijnen 'streefwaarden'.

3.2 Grootheden

Conform de SBR B-richtlijn worden twee grootheden bepaald:

1. De trillingssterkte V_{max} . Dit is een dimensieloze indicatie van de maximaal ervaren trillingen gedurende de meetperiode, de zogenaamde pieksterkte van de trillingen. Deze grootheid wordt bepaald per 30 seconden; zie par. 9.2 en 9.3 van de SBR B-richtlijn. Van al deze maximale waarden per 30 seconden wordt de maximale waarde bepaald, de $v_{eff, max}$. Vervolgens wordt, op basis van de vijftien hoogst gemeten waarden een statistische berekening uitgevoerd met als resultaat de trillingssterkte die niet wordt overschreden door 95 procent van de passerende treinen, de V_{max} . Deze trillingssterkte is beoordeeld op de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn;
2. De trillingsintensiteit V_{per} , een dimensieloze indicatie van het tijdsgemiddelde van de trillingen. Deze grootheid wordt bepaald door het kwadratisch gemiddelde te nemen van de maximale trillingssterkte per 30 seconden indien deze boven de drempelwaarde van 0.1 uitkomt. Trillingssnelheden onder de 0.1 zijn niet of nauwelijks voelbaar en worden niet meegenomen in de bepaling van V_{per} . Het kwadratisch gemiddelde wordt vervolgens gecorrigeerd voor de tijd waarin de trillingssnelheden boven de 0.1 uitkomen, zie ook par. 9.8 van de SBR B-richtlijn.

3.3 Streefwaarden

De SBR B-richtlijn kent drie typen streefwaarden:

1. A1, de onderste streefwaarde voor de trillingssterkte V_{max} ;
2. A2, de bovenste streefwaarde voor de trillingssterkte V_{max} ;
3. A3, de streefwaarde voor de trillingsintensiteit V_{per} .

De hoogte van de streefwaarden is afhankelijk van een aantal criteria:

1. Of er sprake is van een nieuwe of bestaande situatie;

¹ De richtlijnen voor bijvoorbeeld geluid hebben wel een wettelijke status.

2. Periode gedurende de dag;
3. Gebouwfunctie.

De verschillende criteria worden hieronder toegelicht.

3.3.1. Nieuwe of bestaande situatie

In de SBR B-richtlijn wordt onderscheid gemaakt tussen nieuwe en bestaande situaties, waarbij de streefwaarden voor nieuwe situaties strenger zijn dan voor bestaande situaties. Omdat het om nieuwe gebouwen gaat langs een bestaande spoorlijn, wordt het onderzoeksgebied beoordeeld als nieuwe situatie, zie par. 10.3 van de SBR B-richtlijn.

3.3.2. Periode gedurende de dag

De SBR B-richtlijn maakt daarnaast onderscheid tussen dag, avond en nacht. Voor de gebouwfunctie 'Kantoor' zijn de streefwaarden voor dag, avond en nacht gelijk aan elkaar. Voor de gebouwfunctie 'Wonen' zijn er wel verschillen.

3.3.3. Gebouwfunctie

Als derde criterium wordt onderscheid gemaakt naar de functie van een gebouw. De SBR B-richtlijn kent de gebouwfuncties *Gezondheidszorg*, *Wonen*, *Kantoor*, *Bijeenkomsten* en *Kritische werkruimte*. Bij elke gebouwfunctie horen andere toegestane trillingssterktes. Op basis van deze drie criteria zijn de streefwaarden voor A1, A2 en A3 weergegeven in Tabel 3-1 voor nieuwe situaties. In de beoordeling is gekeken naar gebouwen met bestemming wonen en kantoor, zie de waarden in Tabel 3-1.

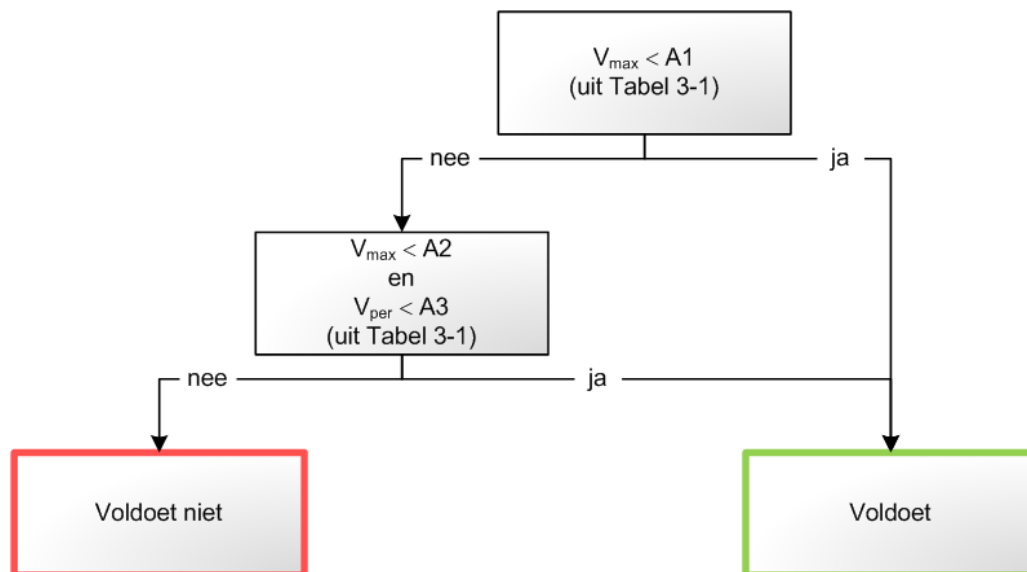
Tabel 3-1 Streefwaarden nieuwe situatie volgens SBR B-richtlijn

Gebouwfunctie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
<i>Gezondheidszorg</i>	0.1 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	-.--

¹⁾ Een streefwaarde van 0.1 betekent een waarde kleiner dan 0.15

3.4 Beoordeling in huidige onderzoek

Om te beoordelen of een situatie voldoet, dient het schema in Figuur 3-1 te worden doorlopen. 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.



Figuur 3-1 Stroomschema beoordeling nieuwe situatie in SBR B-richtlijn

4 Meetresultaten

4.1 Inleiding

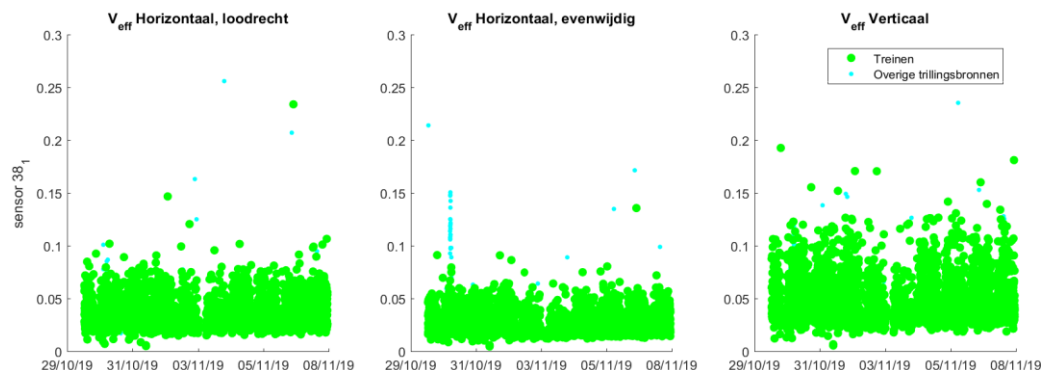
In dit hoofdstuk worden de resultaten van de metingen beschreven. Er zijn drie metingen uitgevoerd:

1. Een korte meting met meerdere meetpunten, bedoeld om de variatie in bodemopbouw en spreiding van de trillingssterktes binnen het onderzoeksgebied vast te stellen;
2. Een lange meting met twee meetpunten, om de variatie van de trillingen over de tijd vast te stellen. Op deze manier ontstaat een representatief beeld van de trillingen over een looptijd van een week.
3. Een korte meting om de opslingering in bestaande gebouwen in de nabijheid van de onderzoekslocatie te bepalen.

4.2 Meetresultaten deelgebied Heer Bokelweg

De gemeten trillingssterktes van de treinen tijdens de langeduurmeting van meetpunt 1, zijn per richting weergegeven in Figuur 4-1. Dit betreft de trillingen op maaiveld op ca. 11 meter afstand tot het spoor. Zoals te zien zijn er ook veel overige trillingsbronnen die hogere trillingen veroorzaken. Bijvoorbeeld op 30 oktober. Dit betrof werkzaamheden in de buurt van de meetlocatie. De trillingen zijn weergegeven in drie richtingen:

1. Horizontaal, loodrecht op het spoor (ook wel X genoemd);
2. Horizontaal, parallel aan het spoor (ook wel Y genoemd);
3. Verticaal (ook wel Z genoemd).

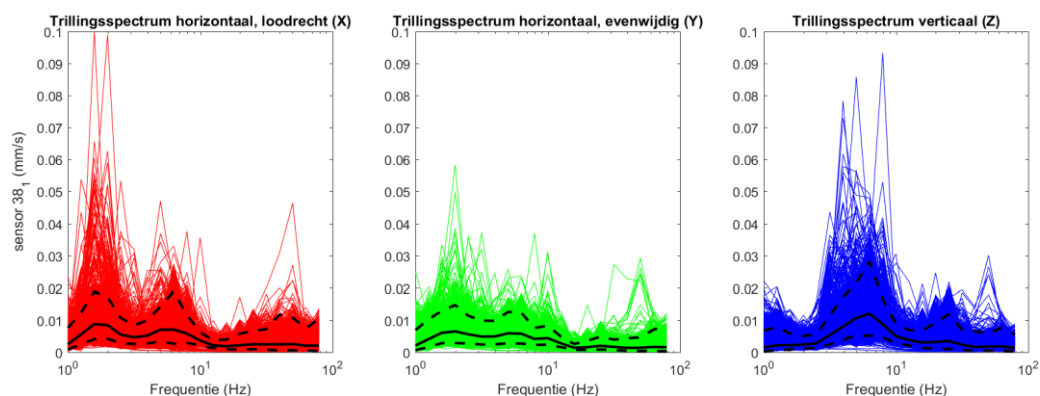


Figuur 4-1 Trillingssterktes op maaiveldniveau als functie van de tijd voor deelgebied Heer Bokelweg

De gemeten trillingssterktes zijn gemiddeld genomen in de verticale richting het grootste, maar de hoogste trillingswaarden zijn in de X-richting gemeten. Gedurende de hele periode zijn er ook veel en hoge stoorsignalen gemeten ('overige trillingsbronnen'). Het onderscheid tussen een trein en een overige trillingsbron is gemaakt op basis van signaalanalyse, beeldanalyse en de dienstregeling. Deze kunnen bijvoorbeeld worden veroorzaakt door de naast gelegen wegen, of de eerder genoemde werkzaamheden in de omgeving.

Het trillingsspectrum van de gemeten treinen op maaiveld is weergegeven in Figuur 4-2. De trillingen zijn vooral hoog tussen de 1 en de 10Hz. Daarnaast is er af en toe sprake van relatief hoge trillingen bij frequenties boven de 20Hz. Mogelijk wordt dit

door een of enkele specifieke treintypes veroorzaakt. Verder is de dominante frequentie in de horizontale richtingen, met zo'n 2 Hz, aanmerkelijk lager dan in de verticale richting (tussen de 3 en de 10 Hz).



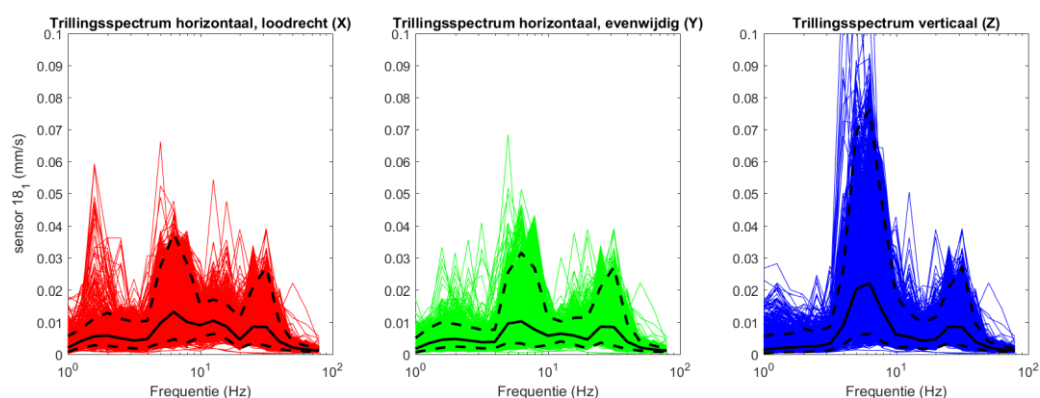
Figuur 4-2 Trillingsspectra van treinpassages tijdens de lange meting in X- Y- en Z-richting

4.3 Meetresultaten deelgebied Pompenburg

Op de meetlocatie Pompenburg zijn bijna alle gemeten trillingen afkomstig van treinverkeer. Er zijn weinig overige trillingsbronnen die hogere trillingen veroorzaken. Dit komt waarschijnlijk door de beschutte meetlocatie, in een volkstuin. Verder zijn er duidelijk hogere waarden gemeten dan voor de deellocatie Heer Bokelweg.

Door een storing aan het meetsysteem heeft de meetopstelling van vrijdag middag 1 november tot maandag ochtend 4 november geen resultaten opgeslagen. De totale meetduur is echter 7 dagen. Bovendien zijn er resultaten beschikbaar voor de dagen dat er bij het meetpunt van Heer Bokelweg extreme uitschieters zijn gemeten. Dit schept vertrouwen in het feit dat we een goede spreiding van het treinverkeer in beschouwing hebben kunnen nemen.

Het spectrum op maaiveld is weergegeven in Figuur 4-3. Met deze meetresultaten zijn de modelvoorspellingen uit de paragrafen 5.2 en verder berekend. De dominante frequentie is ca. 6 Hz, en ook bij ca. 30 Hz is het spectrum verhoogd. In de horizontale richting leveren trillingen in het frequentiegebied van 1 tot 40 Hz een bijdrage aan het trillingsniveau.



Figuur 4-3 Trillingsspectra van treinpassages tijdens de lange meting in X- Y- en Z-richting

Ter hoogte van het deelgebied Pompenburg rijden de treinen al door de verdiepte ligging van de spoortunnel onder de Maas door. Hierdoor zien de spectra er hier anders uit dan bij het deelgebied Heer Bokelweg. Zo is de piek tussen de 20 en de 30Hz duidelijker aanwezig dan bij Heer Bokelweg. Daarnaast zit er minder trillingsenergie bij de zeer lage frequenties. Ook zijn er wat minder extreme uitschieters zichtbaar. Dit beeld komt overeen met projectervaring die Movares heeft in de buurt van spoortunnels, zoals stationsomgeving Delft en de Groene Harttunnel.

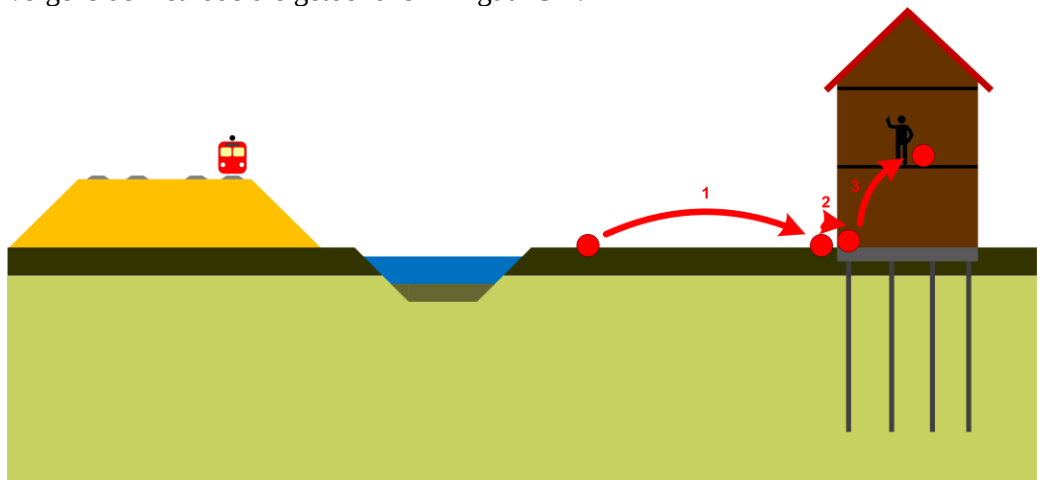
5 Analyse en berekeningen

5.1 Prognosemethode

De resultaten van de metingen zijn gecombineerd met informatie over de geplande bebouwing. Hiermee is een prognose gemaakt van de trillingssterktes aan de fundering en op de vloeren van de gebouwen. Daarnaast brengen we de onzekerheid van de predicties (onder meer veroorzaakt door onzekerheid in exacte dimensionering, materiaalkeuze en constructiewijze) in rekening door een 50%-waarde en een 95%-waarde te onderscheiden:

- 50%-waarde: De kans dat de trillingssterktes lager zijn dan deze waarde is 50%. Deze waarde representeert daarmee de verwachtingswaarde voor trillingssterktes in de gebouwen en geldt voor gebouwen met gemiddelde constructieve eigenschappen.
- 95%-waarde: De kans dat de trillingssterktes lager zijn dan deze waarde is 95%. De kans op voorkomen is klein, maar niet verwaarloosbaar. De 95%-waarde wordt gebruikt als redelijkerwijs maximaal te verwachten trillingssterktes en geldt voor gebouwen met ongunstige constructieve eigenschappen. Een voorbeeld hiervan is bijvoorbeeld dat de vloeren erg slap worden geconstrueerd (grote vloeroverspanningen, dunne vloeren).

De prognoses van trillingen op funderingsniveau en op midden vloerveld wordt gedaan volgens de methode die getoond is in Figuur 5-1.



Figuur 5-1 Methode voor het vaststellen van de trillingen in een gebouw

Deze methode werkt als volgt:

1. De trillingssterktes van de langeduurmeting worden vertaald naar een meetpunt op maaiveld ter plaatse van het bouwblok, door de trillingssterktes bij het bouwvlak uit de korteduurmeting te delen op de trillingssterktes bij het meetpunt van de langeduurmeting uit de korteduurmeting. Deze overdracht corrigeert voor bijvoorbeeld verschillen in afstand tot het spoor (uitdemping van de trillingssterkte met de afstand) en voor variatie in de bodem of de spoorligging.
2. De trillingssterktes op maaiveld worden vertaald naar een meetpunt op de fundering van het gebouw, op basis van de eigenschappen van het gebouw (afmetingen, type fundering).

3. De trillingssterktes op de fundering worden vertaald naar een meetpunt op de hoogste vloer van het gebouw, op basis van de eigenschappen van het gebouw (afmetingen, type constructie).

Resultaat van deze berekening is een predictie van de trillingssterktes in het gebouw, waarbij elke afzonderlijke trein zoals gemeten is bij de langeduurmeting is vertaald naar een trillingssterkte in het gebouw. Over deze trillingssterktes worden de parameters V_{max} en V_{per} bepaald, waarna deze worden beoordeeld op de SBR B-richtlijn.

5.1.1. Overdracht tussen meetpunten

De overdracht van het meetpunt uit de langeduurmeting naar de overige meetpunten is bepaald tijdens de korte meting. Op basis daarvan is de uitdemping van de trillingssterkte met de afstand bepaald, zie Bijlage II. Hierbij is gebruik gemaakt van de Barkan vergelijking, een empirische formule die de uitdemping van de trillingssterkte met de afstand beschrijft. Door deze uitdemping te vermenigvuldigen met de trillingssterktes uit de langeduurmeting, zijn de trillingssterktes uit die meting op elk willekeurig punt te bepalen.

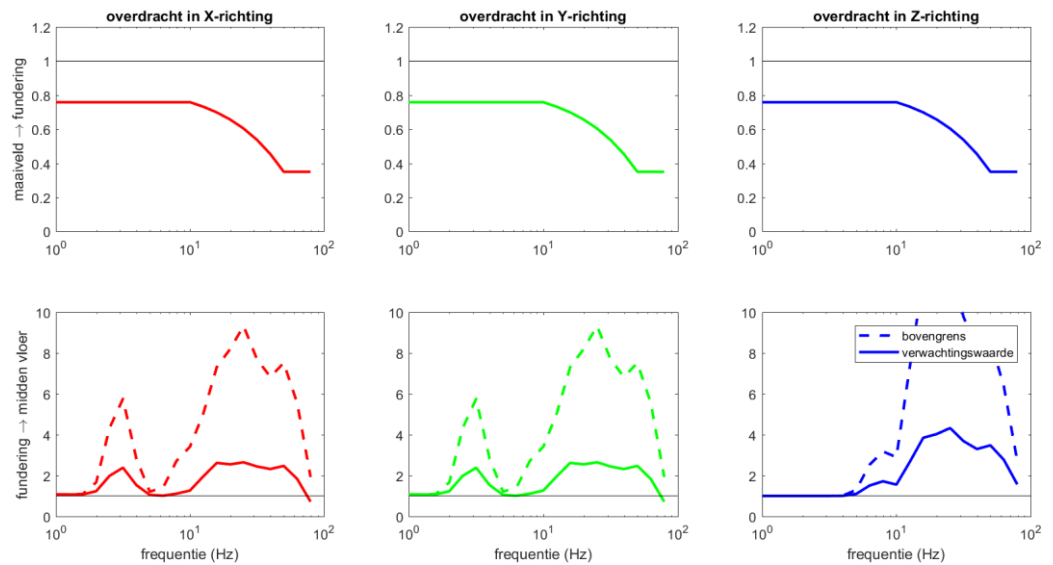
5.1.2. Overdracht in gebouwen

Een document van VROM geeft indicatieve richtlijnen voor het bepalen van de overdracht van trillingssterktes van maaiveld naar fundering². Deze theoretische waarden komen voor gebouwen met een hoogte tot ca. 12 meter goed overeen met praktijkwaarden uit metingen. Voor grotere gebouwen is uit metingen gebleken dat de fundering de trillingen anders dempen dan in het VROM document staat. De funderingsoverdracht is voor deze grotere gebouwen daarom deels gebaseerd op metingen.

De overdracht van fundering naar midden vloerveld is afhankelijk van de gebouwconstructie, gebouwafmetingen, type vloer en de eigenfrequentie van de vloer. Het document van VROM geeft voor deze overdrachten een beeld dat niet geheel met praktijkmetingen overeenkomt. De gebruikte overdrachten van fundering naar midden vloerveld in dit onderzoek zijn daarom gebaseerd op een combinatie van meetresultaten in vergelijkbare gebouwen en analytische formules die het gedrag van gebouwen en vloeren beschrijven. Voor gebouwtype 1 zijn deze resultaten weergegeven in Figuur 5-2. Hierbij is X loodrecht op het spoor en Y parallel aan het spoor.

Wat opvalt is dat de grootste opslinging binnen de constructie in de verticale richting optreedt bij frequenties boven de 10 Hz. In de horizontale richting is er ook sprake van opslinging bij frequenties lager dan 10 Hz. In het vorige hoofdstuk werd geconstateerd dat op maaiveld frequenties van 1-40 Hz een bijdrage leveren aan de trillingssterkte, en dat er dominante frequenties zijn bij ca. 6 en 30 Hz. De trillingen bij hoge frequenties (30 Hz) worden goed gedempt in de overdracht van maaiveld naar fundering. Bij lage frequenties (6 Hz) dempt de fundering de trillingen in beperkte mate.

² Rekenmodel voor de bepaling van trillingsniveau, Ministerie VROM, mei 1995, distributienummer 12462/164.



Figuur 5-2 Overdracht van de trillingssterktes van maaiveld naar de fundering (boven) en van de fundering naar midden vloerveld (onder) voor gebouwtype 1b (type 1 met een vloeroverspanning van 6,5m)

5.2 Resultaten op maaiveld

De resultaten van de langeduurmeting in deelgebied Pompenburg (meetpunt 6 op 10 meter afstand) zijn weergegeven in Tabel 5-1. Hier valt op dat op maaiveld de gemeten trillingssterktes relatief hoog zijn. Er is eigenlijk demping nodig om op deze positie te voldoen aan de SBR-B richtlijn voor nieuwe woningen.

Tabel 5-1 Meetresultaten en beoordeling op maaiveld voor deelgebied Pompenburg (zie Figuur 2-1)

	X	Y	Z
V_{per}, dag	0,09	0,04	0,07
V_{per}, avond	0,10	0,04	0,07
V_{per}, nacht	0,02	0,01	0,02
V_{max}, gemeten	0,22	0,13	0,31

De resultaten van de langeduurmeting in deelgebied Heer Bokelweg (meetpunt 1 op 11 meter afstand) zijn weergegeven in Tabel 5-2. Ook hier zijn de meetresultaten op dit punt weer vrij hoog. In de X-richting is eigenlijk demping nodig om in een gebouw op deze plek te kunnen voldoen aan de SBR-B richtlijn voor nieuwe woningen.

Tabel 5-2 Meetresultaten en beoordeling op maaiveld voor deelgebied Heer Bokelweg (zie Figuur 2-1)

	X	Y	Z
V_{per}, dag	0,00	0,00	0,01
V_{per}, avond	0,01	0,00	0,01
V_{per}, nacht	0,00	0,00	0,01
V_{max}, gemeten	0,23	0,14	0,19

5.2.1. Verwachtingswaarde trillingen in gebouwen

Voor alle beschouwde gebouwtypes (Tabel 2-3) is een prognose gemaakt van de trillingssterktes in de gebouwen op de vloeren op de hoogste verdieping. Overschrijdingen van het beoordelingskader zijn in de tabellen met resultaten rood als de streefwaarden worden overschreden voor nieuwe situaties in de dagperiode. Als er bij de waarde V_{max} alleen in de dagperiode sprake is van een overschrijding, dan is de waarde oranje gekleurd.

V _{per}	Rood	Overschrijding streefwaarde A3 in dag- en nachtperiode in nieuwe situatie (0.05 voor wonen en 0.07 voor kantoor)
V _{max}	Oranje	Overschrijding streefwaarde A2 in nachtperiode in nieuwe situatie (0.2 voor wonen)
V _{max}	Rood	-Overschrijding streefwaarde A2 in dag- en nachtperiode in nieuwe situatie (0.4 voor wonen en 0.6 voor kantoor) -Tevens overschrijding streefwaarde A2 in nachtperiode voor bestaande situatie voor wonen

Deelgebied Pompenburg

Op 7 meter van het spoor zien we een overschrijding van de streefwaarden voor wonen, waarbij geldt dat de trillingen lager zijn bij een kleinere vloeroverspanning. Vanaf 40 meter afstand voldoen alle gebouwtypes. Ook de trillingen in het gebouw met een hoogte van 120 meter, voldoen aan de streefwaarden. Voor dit hoge gebouw is de invloed van de vloeroverspanning beperkt.

Tabel 5-3 Verwachtingswaarden voor trillingen in deelgebied Pompenburg

Type	Hoogte	Beukmaat	afstand	Beoordeling wonen		Beoordeling kantoor	
				Vper	Vmax	Vper	Vmax
Type 1a	20	5	7	0,07	0,31	0,07	0,31
Type 1b	20	6,5	7	0,07	0,34	0,07	0,34
Type 1c	20	8	7	0,08	0,36	0,08	0,36
Type 1a	20	5	40	0,02	0,15	0,02	0,15
Type 1b	20	6,5	40	0,02	0,15	0,02	0,15
Type 1c	20	8	40	0,03	0,17	0,03	0,17
Type 1a	20	5	70	0,00	0,08	0,00	0,08
Type 1b	20	6,5	70	0,00	0,08	0,00	0,08
Type 1c	20	8	70	0,00	0,09	0,00	0,09
Type 2a	120	5	18	0,03	0,20	0,03	0,20
Type 2b	120	6,5	18	0,03	0,20	0,03	0,20
Type 2c	120	8	18	0,04	0,21	0,04	0,21

Deelgebied Stroveer

De trillingen in gebouwtype 3a, 3b en 3c voldoen niet aan de streefwaarden voor wonen in nieuwe situaties. Er is een beperkte invloed van de vloeroverspanning te zien. Wanneer de gebouwtypes 70 meter hoog zijn (5a, 5b en 5c) nemen de trillingen iets af, maar voldoen ze nog net niet aan de streefwaarden voor trillingshinder.

Tabel 5-4 Verwachtingswaarden voor trillingen in deelgebied Stroveer

Type	Hoogte	Beukmaat	afstand	Beoordeling wonen		Beoordeling kantoor	
				Vper	Vmax	Vper	Vmax
Type 3a	50	5	20	0,05	0,28	0,05	0,28
Type 3b	50	6,5	20	0,05	0,27	0,05	0,27
Type 3c	50	8	20	0,06	0,30	0,06	0,30
Type 5a	70	5	20	0,05	0,26	0,05	0,26
Type 5b	70	6,5	20	0,05	0,26	0,05	0,26
Type 5c	70	8	20	0,05	0,27	0,05	0,27

Deelgebied Heer Bokelweg

Alleen op 7 meter zien we een overschrijding van de streefwaarden voor wonen, waarbij geldt dat de trillingen lager zijn bij een grotere vloeroverspanning. Bij vloeroverspanningen van meer dan 6,0 meter wordt wel voldaan aan de streefwaarden voor kantoren. Op een afstand van 40 meter voldoet het gebouw met een hoogte van 20 meter aan de streefwaarden. Bij een kleinere vloeroverspanning zijn lagere trillingsniveaus te verwachten dan bij een grote vloeroverspanning. Op een afstand van 70 meter voldoen de trillingen in het gebouw met een hoogte van 20 meter aan de streefwaarden. Ook de trillingen in het gebouw met een hoogte van 70 meter, voldoen naar verwachting aan de streefwaarden.

Tabel 5-5 Verwachtingswaarden voor trillingen in deelgebied Heer Bokelweg

Type	Hoogte	Beukmaat	afstand	Beoordeling wonen		Beoordeling kantoor	
				Vper	Vmax	Vper	Vmax
Type 1a	20	5	7	0.07	0.65	0.07	0.65
Type 1b	20	6.5	7	0.07	0.48	0.07	0.48
Type 1c	20	8	7	0.06	0.47	0.06	0.47
Type 1a	20	5	40	0.00	0.14	0.00	0.14
Type 1b	20	6.5	40	0.00	0.15	0.00	0.15
Type 1c	20	8	40	0.01	0.23	0.01	0.23
Type 1a	20	5	70	0.00	0.09	0.00	0.09
Type 1b	20	6.5	70	0.00	0.09	0.00	0.09
Type 1c	20	8	70	0.00	0.12	0.00	0.12
Type 2a	120	5	18	0.00	0.14	0.00	0.14
Type 2b	120	6.5	18	0.00	0.11	0.00	0.11
Type 2c	120	8	18	0.00	0.13	0.00	0.13
Type 4a	70	5	70	0.00	0.05	0.00	0.05
Type 4b	70	6.5	70	0.00	0.05	0.00	0.05
Type 4c	70	8	70	0.00	0.06	0.00	0.06

5.2.2. Bovengrens van trillingen in gebouwen

De hierboven genoemde waarden zijn de verwachtingswaarde van de trillingssterktes (50%-waarde). Met de 95%-waarde wordt een bovengrens voor de verwachte trillingssterktes gegeven, deze 95%-waarde correspondeert met de bovengrens aan de opslingering van trillingssterktes in constructies zoals wij die tegenkomen in praktijkmetingen. Concreet correspondeert deze 95%-bovengrenswaarde met een situatie waarin gebouwen relatief kaal zijn ingericht (weinig demping, relatief slappe constructie). De 50%-waarde correspondeert meer met de meest voorkomende situaties en is naar verwachting meer representatief voor de te bouwen gebouwen.

De bovengrens is voor de verschillende deelgebieden weergegeven in Tabel 5-6 tot en met Tabel 5-8. Bij de bovengrens zijn er op een afstand van 40 meter ook geen overschrijdingen van de streefwaarden mogelijk, bij een vloeroverspanning van 8 meter is er nog wel een overschrijding op 40m. Indien de bovengrens hoger is dan de streefwaarden, maar de verwachtingswaarde (zie vorige paragraaf) wel voldoet aan de streefwaarden, dan adviseren we om het ontwerp bij nadere uitwerking van het ontwerp, te toetsen op trillingen.

Tabel 5-6 Bovengrens van trillingen in deelgebied Pompenburg

Type	Hoogte	Beukmaat	afstand	Beoordeling wonen		Beoordeling kantoor	
				Vper	Vmax	Vper	Vmax
Type 1a	20	5	7	0,14	0,70	0,14	0,70
Type 1b	20	6,5	7	0,16	1,01	0,16	1,01
Type 1c	20	8	7	0,23	1,09	0,23	1,09
Type 1a	20	5	40	0,05	0,24	0,05	0,24
Type 1b	20	6,5	40	0,05	0,24	0,05	0,24
Type 1c	20	8	40	0,10	0,47	0,10	0,47
Type 1a	20	5	70	0,02	0,17	0,02	0,17
Type 1b	20	6,5	70	0,03	0,17	0,03	0,17
Type 1c	20	8	70	0,06	0,29	0,06	0,29
Type 2a	120	5	18	0,09	0,48	0,09	0,48
Type 2b	120	6,5	18	0,09	0,47	0,09	0,47
Type 2c	120	8	18	0,12	0,53	0,12	0,53

Tabel 5-7 Bovengrens van trillingen in deelgebied Stroveer

Type	Hoogte	Beukmaat	afstand	Beoordeling wonen		Beoordeling kantoor	
				Vper	Vmax	Vper	Vmax
Type 3a	50	5	20	0,11	0,58	0,11	0,58
Type 3b	50	6,5	20	0,12	0,58	0,12	0,58
Type 3c	50	8	20	0,18	0,74	0,18	0,74

Tabel 5-8 Bovengrens van trillingen in deelgebied Heer Bokelweg

Type	Hoogte	Beukmaat	afstand	Beoordeling wonen		Beoordeling kantoor	
				Vper	Vmax	Vper	Vmax
Type 1a	20	5	7	0.16	1.36	0.16	1.36
Type 1a	20	5	40	0.01	0.25	0.01	0.25
Type 1a	20	5	70	0.00	0.20	0.00	0.20
Type 2a	120	5	18	0.03	0.30	0.03	0.30
Type 4a	70	5	70	0.00	0.11	0.00	0.11

5.3 Betrouwbaarheid

De prognoses zijn gebaseerd op de meest recente inzichten en de uitgangspunten zoals opgenomen in hoofdstuk 2. Desondanks zijn er een aantal parameters die kunnen leiden tot andere uitkomsten dan zoals hierboven beschreven:

1. Wijzigingen in de sporenlay-out, het spoorgebruik of de rijnsnelheid van de treinen ten opzichte van de situatie waarvan in dit onderzoek is uitgegaan. In het geval van wijzigingen buiten de spoorzone zal ProRail doorgaans trillingsonderzoek uitvoeren.
2. Toename van het aantal treinen, waardoor de waarde van V_{per} hoger wordt. De waarde van V_{max} neemt hierdoor niet toe. De uitvoering van het project PHS Rotterdam – Rijswijk kan bijvoorbeeld tot een intensiteitstoename van het treinverkeer leiden.
3. De ligging van het spoor heeft invloed op de trillingen van het treinverkeer, deze spoorligging hangt samen met (onder meer) de onderhoudscyclus van het spoor. Naar verwachting zorgt deze variatie in spoorligging voor een variatie van +/- 25 procent in de trillingen;
4. Omdat de exacte detaillering van de bebouwing nog niet bekend is, is de spreiding in te verwachten waarden op midden vloerveld nog vrij hoog. Deze spreiding is in rekening gebracht in de prognoses van de 50%-waarde en de 95%-waarde.

5.4 Voorkomen van trillingshinder en afweging

Uit de rekenresultaten volgt voor welke gebouwen er een overschrijding van de SBR-B streefwaarden te verwachten is. Om trillingshinder zo veel mogelijk te voorkomen, is in Tabel 5-9 samengevat welke actie er per gebouw nodig is.

- Indien de 50% verwachtingswaarde hoger is dan de streefwaarden, dan adviseren we een afweging van maatregelen om trillingen te reduceren.
- Indien alleen de 95% bovengrens van de verwachtingswaarde de streefwaarden overschrijden, dan adviseren we het nader uitgewerkte ontwerp te toetsen op trillingen.
- Indien de 95% bovengrens van de verwachtingswaarde lager is dan de streefwaarden, dan wordt naar alle waarschijnlijkheid in het gebouw voldaan aan de streefwaarde, en is verdere actie niet nodig.

Hierbij is uitgegaan van de streefwaarden voor de gebouwfunctie “wonen”.

Tabel 5-9 Samenvatting beoordeling aan SBR-B streefwaarden en acties ter voorkoming van trillingshinder (gebouwfunctie wonen).

Deelgebied	Type	Hoogte	afstand	Overschrijding SBR-B streefwaarde	Voorkomen trillingshinder
Pompenburg	Type 1	20	7	50%-waarde	Maatregelafweging
Pompenburg	Type 1	20	40	geen overschrijding	Voldoet, geen actie nodig
Pompenburg	Type 1	20	70	geen overschrijding	Voldoet, geen actie nodig
Pompenburg	Type 2	120	18	95%-waarde	Toetsen ontwerp
				50%-waarde	Maatregelafweging, beperkte bouwkundige aanpassingen
Stroveer	Type 3	50	20		
				50%-waarde	Maatregelafweging, beperkte bouwkundige aanpassingen
Stroveer	Type 3	70	20		
Heer Bokelweg	Type 1	20	7	50%-waarde	Maatregelafweging
Heer Bokelweg	Type 1	20	40	95%-waarde	Toetsen ontwerp
Heer Bokelweg	Type 1	20	70	geen overschrijding	Voldoet, geen actie nodig
Heer Bokelweg	Type 2	120	18	95%-waarde	Toetsen ontwerp
Heer Bokelweg	Type 4	70	70	geen overschrijding	Voldoet, geen actie nodig

Een belangrijke nuancering hierbij is dat de trillingen in een aantal panden weliswaar hoger zijn dan de streefwaarden voor nieuwbouw, maar wel lager dan de streefwaarden voor bestaande bebouwing, waarin het zogenaamde ‘gewenningseffect’ is meegenomen. Dit treedt na verloop van tijd op, mensen wennen dan aan het wonen langs het spoor met de bijbehorende geluids- en trillingseffecten.

5.4.1. Laagfrequent geluid

Trillingen die via de bodem het gebouw binnendringen, brengen de vloeren en wanden in trilling, waardoor in het gebouw laagfrequent geluid kan ontstaan. Dit onderzoek is gericht op trillingen. Toch adviseren we om in dit project rekening te houden met laagfrequent geluid. Dit geldt vooral voor de gebouwen die zich het dichtst bij het spoor bevinden, omdat de trillingen die meestal het laagfrequent geluid veroorzaken (30 Hz en hoger), daar nog niet zijn uitgedempt in de bodem. Het betreft hier de gebouwen tot en met een afstand van 20 meter van het spoor.

5.4.2. Aanvullende maatregelen

Om de trillingen te reduceren zijn er globaal gezien een aantal mogelijkheden: maatregelen in de bodem (zoals trillingsschermen) of maatregelen aan het gebouw (globaal het verstevigen van het gebouw zodat het minder gevoelig is voor de dominante trillingsfrequenties, of het qua trillingen loskoppelen van de fundering en de rest van het gebouw). Relevant hierbij is dat bij de keuze van maatregelen rekening wordt gehouden met de trillingen in het gebouw.

In Bijlage V zijn ter illustratie voor vloeren met een overspanning van 5 meter de berekende trillingsspectra weergegeven. Meestal zijn de trillingen in de verticale richting maatgevend voor de trillingssterkte in de gebouwen. Vooral trillingen met een frequentie van 6 Hz en 30 Hz geven een bijdrage aan de trillingssterkte. In gebouwen dicht bij het spoor leveren de trillingen met een frequentie rond 30 Hz de grootste bijdrage, en in de verder weg gelegen gebouwen de trillingen met een frequentie rond 6 Hz.

Voor gebouwen dicht bij het spoor kan al een aanzienlijke afname van de trillingssterkte worden verkregen door trillingen rond 30 Hz te reduceren. De trillingen

met een frequentie van ca. 6 Hz blijven dan nog wel aanwezig, en waarschijnlijk wordt dan nog niet voldaan aan de streefwaarden voor nieuwe situaties.

Voor verderaf gelegen gebouwen zijn maatregelen alleen zinvol als ze de trillingen rondom 6 Hz reduceren.

Op basis van bovenstaande is er een aantal mogelijke maatregelen te identificeren:

1. Realisatie van een trillingsscherm in de bodem, bijvoorbeeld een sloot of een scherm van beton, jet-grout of een dubbele damwand met een sleuf of EPS³ ertussen. Deze maatregel is het meest effectief voor gebouwen die dicht bij het spoor staan. Een effectief trillingsscherm zal van beton of jet-grout moeten zijn, en een forse diepte moeten hebben van minimaal zo'n 15.0 meter, bij een breedte van 1.0 meter. De kosten voor een dergelijk scherm bedragen, bij een lengte van zo'n 100 meter, tussen de € 750.000 en € 1.250.000. Ook dan nog is het effect bij frequenties rond 6 Hz zeer beperkt, naar verwachting tot maximaal 10 procent. Reducties van minder dan 30 procent worden conform bestaande jurisprudentie als niet voelbaar aangemerkt. Dit betekent dat deze maatregel alleen een voelbaar effect kan geven voor gebouwen dichtbij het spoor, waar hoge frequenties van ca. 30 Hz een significante bijdrage leveren aan de trillingssterkte.
2. Aanpassen van de bebouwing zodat de gevoeligheid voor 5 tot 10 Hz wordt verminderd. Mogelijkheden hiervoor zijn:
 - a. Het vergroten van de eigenfrequentie van de vloeren door het verkleinen van de overspanning of het dikker maken van de vloeren.
 - b. Het verbeteren van de horizontale stijfheid van het gebouw, door kolomstructuren te vervangen door dragende wanden (verbeteren van de schijfwerking) en door niet-dragende tussenwanden (houtskelet of gips) te vervangen door dragende wanden. Het effect van dergelijke maatregelen is vaak in de orde van 10 tot 20 procent.
3. Afveren van de fundering, door gebruik te maken van een dubbele fundering. De constructie bestaat dan uit een betonnen plaat of kelder, met daarop verende elementen en daarop de funderingsbalken van het gebouw. Hierbij zijn er twee mogelijkheden: afveren met behulp van rubberen blokken of met behulp van stalen veerdozen. Nadeel van een afgeveerde fundering is dat trillingen rond de eigenfrequentie van het systeem altijd worden versterkt. Omdat de trillingen vooral hoog zijn rond 6 Hz, zal een dergelijk systeem een eigenfrequentie van maximaal 4 Hz moeten hebben om de trillingen effectief te reduceren. Dergelijke lage frequenties zijn met rubberen blokken niet te realiseren, wel met stalen veerdozen. Bij een afveerfrequentie van 3 Hz nemen trillingen rond 6 Hz met ca. 60% af, en zijn de trillingen bij 30 Hz vrijwel volledig verdwenen. Wel zal er een versterking van trillingen rondom de afveerfrequentie van 3 Hz optreden, wat er toe kan leiden dat vooral de horizontale trillingen in de gebouwen met een hoogte van 20 meter toenemen. Met rubber blokken, bijvoorbeeld op de kolomkoppen van de palen, zijn wel de trillingen met een frequentie van 30 Hz en hoger goed te reduceren. Laagfrequent geluid kan hiermee effectief gereduceerd worden.

5.4.3. Samenvatting

Op basis van expert judgement is het effect en de kosten van maatregelen samengevat weergegeven in Tabel 5-10, Tabel 5-11 en Tabel 5-12.

³ Expanded Polystyrene of piepschuim

Pompenburg

Het afveren van de fundering is naar verwachting een effectieve maatregel voor de gebouwen van 20 meter hoog op een afstand van 7 meter van het spoor. Afvering met rubber blokken leidt ook tot trillingsreductie, en een aanmerkelijke reductie van laagfrequent geluid. Om aan de SBR-B streefwaarden te voldoen, verwachten we echter dat er stalen veerdozen nodig zijn. Ook een trillingsscherm is voor deze gebouwen een effectieve maatregel, maar naar verwachting onvoldoende om aan de streefwaarden voor nieuwe situaties in de nacht te voldoen.

Tabel 5-10 Samenvatting effect maatregelen Pompenburg op basis van expert judgement

			Zonder maatregelen	Stijvere gebouwkern	Trillingsscherm	Dikkere vloer / kleinere beukmaat	Afveren fundering
Gebouw-type	hoogte [m]	afstand [m]	€ 0	< 1% SK ⁴	€ 0.75 tot € 1.25 mln.	< 1% SK	3-5 % SK
1	20	7	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet
1	20	40	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet
1	20	70	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet
2	120	18	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet

	Voldoet aan streefwaarden voor nieuwe situatie
	Voldoet aan streefwaarden voor bestaande situatie
	Voldoet niet

Stroveer

Bij gebouw Stroveer is er sprake van een beperkte overschrijding van de streefwaarden (< 10% boven de streefwaarden). Bij beukmaten van 5 tot en met 7 meter gaat het om maximaal één overschrijding per week en bij beukmaten van 8 meter om één overschrijding per dag. Bij grotere beukmaten dan 8 meter zijn de overschrijdingen frequenter dan één per dag.

Reeds bij één overschrijding per week dient een maatregelafweging te worden uitgevoerd, aan de hand van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn. In essentie zijn daarbij twee categorieën maatregelen mogelijk:

1. dure maatregelen zoals afveren van het gebouw;
2. goedkopere maatregelen in de vorm van ontwerpoptimalisaties.

Voor beukmaten tot en met 7 meter zijn dure maatregelen, zoals het afveren van het gebouw, niet doelmatig, gezien de beperkte en incidentele overschrijdingen. Voor beukmaten van 8 meter is dit niet vanzelfsprekend; daar kan discussie over gevoerd worden. Boven de 8 meter komen die dure maatregelen wel ergens in beeld. Ontwerpoptimalisaties zijn minder duur. Mogelijkheden daarvoor zijn:

- verder beperken van de beukmaat;

⁴ SK = StichtingsKosten

- toepassen van dikkere vloeren (dikker dan constructief benodigd, bijvoorbeeld dikkere maat of dikkere smeervloer);
- toepassen van een zwaardere fundering;
- toepassen van een stijvere gebouwkern.

Wij adviseren om bij de detaillering van het gebouw bovenstaande mogelijkheden voor ontwerptimalisatie te onderzoeken.

Tabel 5-11 Samenvatting effect maatregelen Stroveer op basis van expert judgement

			Zonder maatregelen	Stijvere gebouwkern	Trillingsscherm	Dikkere vloer / kleinere beukmaat	Afveren fundering
Gebouw-type	hoogte [m]	afstand [m]	€ 0	< 1% SK	€ 0.75 tot € 1.25 mln.	< 1% SK	3-5 % SK
3	50	20	Voldoet niet	Voldoet	Voldoet niet	Voldoet	Voldoet*
3	70	20	Voldoet niet	Voldoet	Voldoet niet	Voldoet	Voldoet*

	Voldoet aan streefwaarden voor nieuwe situatie
	Voldoet aan streefwaarden voor bestaande situatie
	Voldoet niet

Heer Bokelweg

Tabel 5-12 Samenvatting effect maatregelen Heer Bokelweg op basis van expert judgement

			Zonder maatregelen	Verbeteren schijfwerking	Trillingsscherm	Hogere eigenfrequentie vloer	Afveren fundering
Gebouw-type	hoogte [m]	afstand [m]	€ 0	< 1% SK	€ 0.75 tot € 1.25 mln.	< 1% SK	3-5 % SK
1	20	7	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet
1	20	40	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet
1	20	70	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet
2	120	18	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet
4	70	70	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet

	Voldoet aan streefwaarden voor nieuwe situatie
	Voldoet aan streefwaarden voor bestaande situatie
	Voldoet niet

6 Conclusies en aanbevelingen

In dit onderzoek zijn metingen en berekeningen uitgevoerd om de verwachte trillingsniveaus in nieuw te bouwen gebouwen in Rotterdam te bepalen. Deze verwachte waarden zijn getoetst aan de streefwaarden voor nieuwbouw uit de SBR-B-richtlijn. De prognose geeft een 50%-waarde (verwachtingswaarde) en een 95%-waarde (bovengrens). Als de 95%-waarde hoger is dan de streefwaarden, dan adviseren we het ontwerp te toetsen als dat nader is uitgewerkt. Als de 50%-waarde hoger is dan de streefwaarden, dan zijn er waarschijnlijk maatregelen nodig om aan de streefwaarden te kunnen voldoen. De resultaten van het onderzoek zijn samengevat in de onderstaande tabel.

Deelgebied	Type	Hoogte	afstand	Overschrijding SBR-B streefwaarde	Voorkomen trillingshinder
Pompenburg	Type 1	20	7	50%-waarde	Maatregelafweging
Pompenburg	Type 1	20	40	95%-waarde	Voldoet, geen actie nodig
Pompenburg	Type 1	20	70	geen overschrijding	Voldoet, geen actie nodig
Pompenburg	Type 2	120	18	95%-waarde	Toetsen ontwerp
				50%-waarde	Maatregelafweging, beperkte bouwkundige aanpassingen
Stroveer	Type 3	50	20		
				50%-waarde	Maatregelafweging, beperkte bouwkundige aanpassingen
Stroveer	Type 3	70	20		
Heer Bokelweg	Type 1	20	7	50%-waarde	Maatregelafweging
Heer Bokelweg	Type 1	20	40	95%-waarde	Toetsen ontwerp
Heer Bokelweg	Type 1	20	70	geen overschrijding	Voldoet, geen actie nodig
Heer Bokelweg	Type 2	120	18	95%-waarde	Toetsen ontwerp
Heer Bokelweg	Type 4	70	70	geen overschrijding	Voldoet, geen actie nodig

In een aantal gebouwen is al te voorzien dat er maatregelen nodig zijn om aan de SBR-B streefwaarden te voldoen. De volgende maatregelen komen hiervoor in aanmerking:

- Een trillingsscherm. Deze maatregel is niet voldoende om te voldoen aan de streefwaarden voor nieuwe situaties, maar mogelijk wel om te voldoen aan de streefwaarden voor bestaande situaties.
- Afveren van de fundering. Met stalen veerdozen kan worden voldaan aan de SBR-B streefwaarden voor nieuwe situaties. Met rubber blokken kan mogelijk worden voldaan aan de streefwaarden voor bestaande situaties. Zowel stalen veerdozen als rubber blokken reduceren tevens effectief het laagfrequent geluid.

Deelgebied	Type	Hoogte	afstand	Trillingsscherm € 0.75 tot € 1.25 mln.	Afveren fundering 3-5% Stichtingskosten
Pompenburg	Type 1	20	7	Voldoet niet	Voldoet
Stroveer	Type 3	70	20	Voldoet niet	Voldoet *
Heer Bokelweg	Type 1	20	7	Voldoet niet	Voldoet

	Voldoet aan streefwaarden voor nieuwe situatie
	Voldoet aan streefwaarden voor bestaande situatie
	Voldoet niet

* bij beukmaten tot 7 meter niet doelmatig.

Colofon

Opdrachtgever Synchron B.V.

Uitgave Movares Nederland B.V.

Kennislijn Gebouwen en Infra
groep Lijninfra en Geotechniek: Lijninfra en Geotechniek

Daalseplein 100
Postbus 2855
3500 GW Utrecht

Telefoon 030 265 55 55

Ondertekenaar Mark Wijnands

Projectnummer RA004828

Kenmerk D79-RGE-KA-1900120

© 2019, 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.

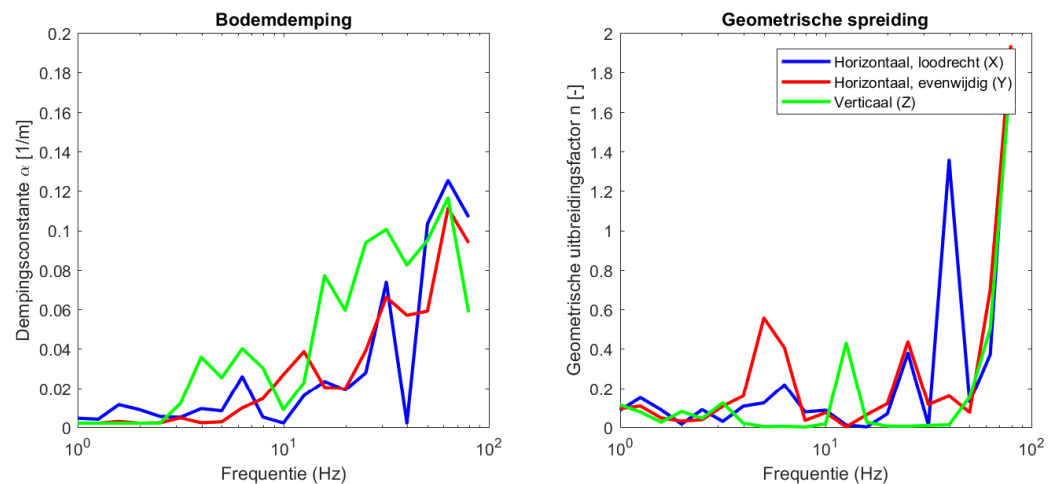
Bijlage I - Gegevens van de metingen

Conform de eisen in de SBR B-richtlijn, hoofdstuk 11, bevat deze bijlage de gegevens van de metingen.

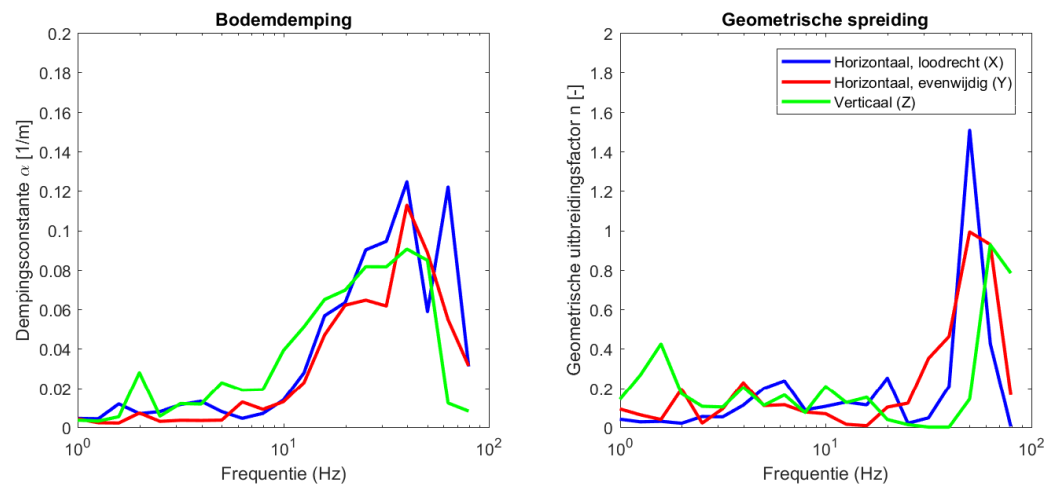
1	Uitvoerende organisatie	<i>Movares Nederland B.V. Daalseplein 101 3511 SX Utrecht</i>
	Verantwoordelijke persoon	<i>Mark Wijnands e-mail: mark.wijnands@movares.nl tel.: 06 - 51 62 44 37</i>
2	Meting uitgevoerd door	<i>Sybre van Klaarbergen en André Fredriksz</i>
3	Tijdsperiode meting	<i>30-10-2019 tot 01-11-2019 (kortduurmeting) 29-10-2019 tot 09-11-2019 (langeduurmeting)</i>
4	Type trillingsbron	<i>Treinen.</i>
5	Gebouwomschrijving	<i>Meting in en aan hoogbouw "Spaces", verder; niet van toepassing</i>
6	Locatie metingen	<i>Zie plattegrond in hoofdstuk 2</i>
7	Geotechnische gegevens	<i>Zie Bijlage III</i>
8	Meetposities	<i>Zie plattegrond in hoofdstuk 2</i>
9	Gebruikte meetopnemers	<i>vijftien 3D-geofoons</i>
	Gebruikte registratieapparatuur	<i>Webcam gekoppeld aan meetcomputer</i>
	Gebruikte verwerkingsapparatuur	<i>Raspberry Pi met USB-DUX. Meetcomputers leggen zowel de trillingssterkte per 30 seconden als het tijdssignaal vast.</i>
10	Overzicht meetwaarden	<i>Zie figuren in hoofdstuk 4</i>
11	Motivatie classificatie gebouw	<i>Zie hoofdstuk 2</i>
12	Overige relevante omstandigheden	<i>Zie hoofdstuk 2</i>

Bijlage II – Meetresultaten

In Figuur II-0-1 en Figuur II-0-2 zijn de dynamische bodemeigenschappen weergegeven. Deze zijn vastgesteld middels de twee meetraaien die haars op het spoor zijn uitgezet (zie Figuur 2-2). Links is de bodemdamping weergegeven, rechts de geometrische spreiding van de trillingen. Deze metingen zijn verricht voor de deelgebieden Heer Bokelweg (meetpunt 1 t/m 4, zie Figuur 2-1 en Figuur 2-2) en Pompenburg (meetpunten 7 t/m 10, zie Figuur 2-1 en Figuur 2-2)



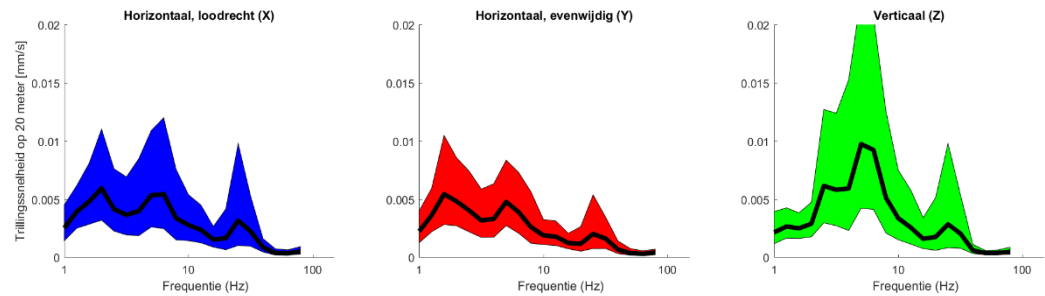
Figuur II-0-1 Bodemdamping en geometrische spreiding voor deelgebied Heer Bokelweg (zie Figuur 2-1)



Figuur II-0-2 Bodemdamping en geometrische spreiding voor deelgebied Pompenburg (zie Figuur 2-1)

Het algemene beeld is op beide locaties hetzelfde. Bij relatief lage frequenties, 0 tot 10 Hz, treedt relatief weinig damping op. In het gebied van 10 tot 40 Hz neemt de bodemdamping van trillingen snel toe. In het zeer hoogfrequente deel van het spectrum, 60 tot 100 Hz, neemt de grilligheid van de grafieken toe. Dit komt doordat er

in dit deel van het spectrum weinig trillingsenergie is gemeten op deze locatie. De spoorse bron zendt op deze locatie bijna geen trillingen met dergelijk hoge frequenties uit, waardoor het niet goed mogelijk is om met een hoge mate van zekerheid de bodemdemping voor deze frequenties vast te stellen, zie Figuur II-0-3.



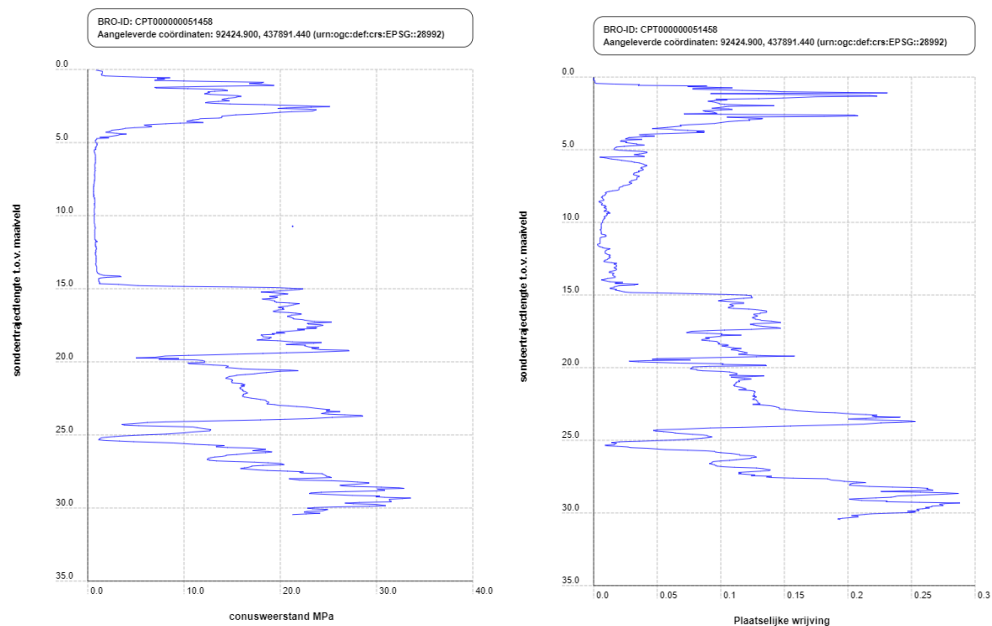
Figuur II-0-3: Omhullenden van de gemeten spectra voor de dempingsmeting in deelgebied Pompenburg

De relatief hoge demping bij frequenties boven de 10Hz betekent dat deze trillingen al vanaf relatief korte afstand van het spoor geen rol van betekenis meer spelen. Dit is gunstig voor laagfrequent geluid, omdat laagfrequent geluid wordt veroorzaakt door frequenties hoger dan 10 Hz.

De lagere frequenties, 0 tot 10Hz, dempen echter slecht uit. Deze zouden dus ook op grotere afstand problemen kunnen veroorzaken. Dit is ongunstig, omdat deze lage frequenties hogere gebouwen, zoals die hier gepland zijn, heen en weer kunnen laten schudden. Bovendien is in dit deel van het frequentiedomein de meeste trillingsenergie vastgesteld.

Bijlage III – Bodemgegevens

Onderstaande sondering geeft een beeld van de bodemopbouw ter plaatse van de onderzoekslocatie. In dinoloket zijn meerdere sonderingen beschikbaar voor dit gebied. Sondering *CPT000000051458* (Figuur III-0-1) mag gezien worden als representatief. De toplagen zijn afwisselend stijf en slap. Hierna volgt een dikke, slappe bodemlaag. De stijve, dragende grondlaag begint op ongeveer 15m onder maaiveld.



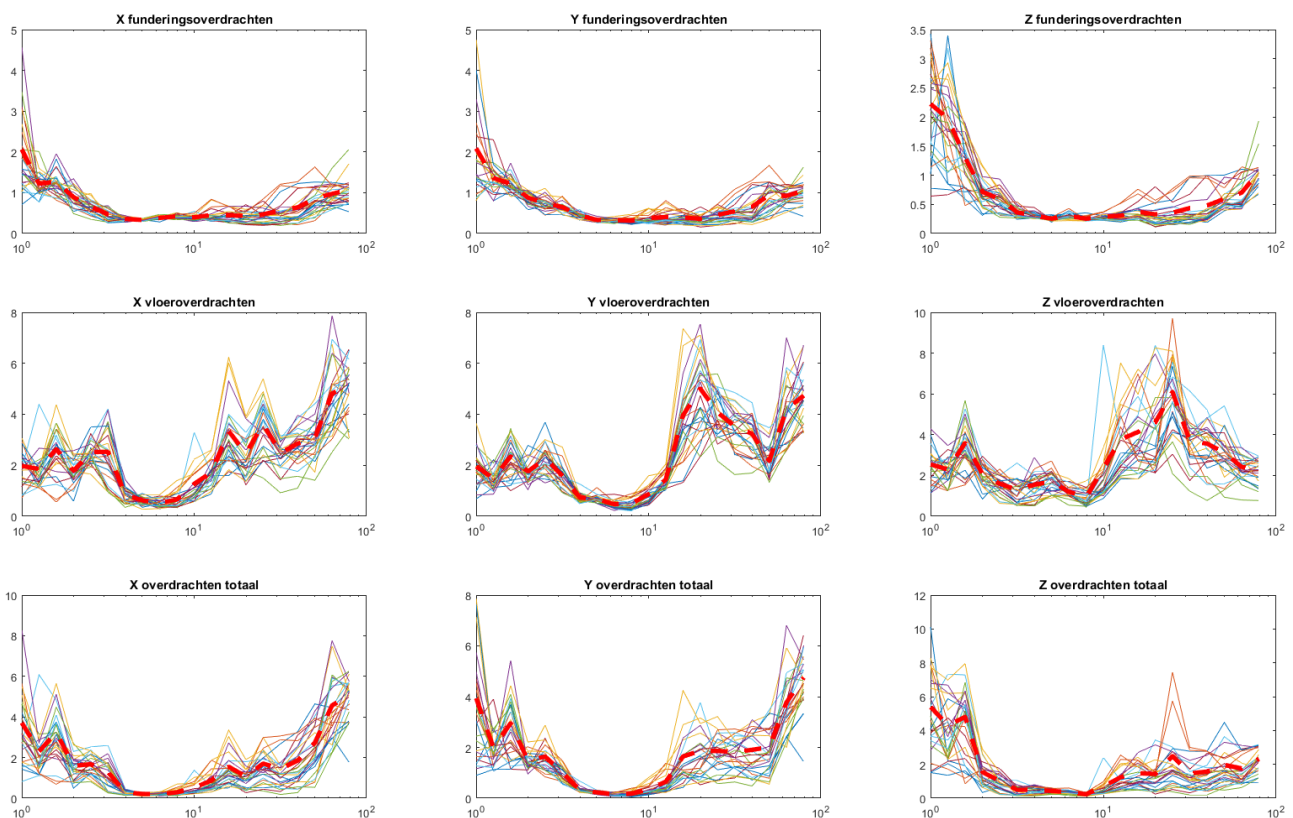
Figuur III-0-1 Conusweerstand (links) en wrijvingsgetal (rechts) voor sondering *CPT000000051458* (bron *DINOloket*)

Trillingen dempen sneller uit in slappe grondlagen. Door de afwisseling van slappe en stijvere lagen in de bovenste 5m van het grond pakket, is het goed mogelijk dat trillingen met hogere frequenties snel uitdempen, terwijl de lagere frequenties veel minder zullen dempen. Dit komt overeen met de gemeten demping in Bijlage II.

Bijlage IV – Gebouwoverdrachten

In het kader van dit project heeft er ook een overdrachtsmeting plaatsgevonden in het gebouw Hofplein 20. Dit is een gebouw van ongeveer 75m hoog met 25. Dit gebouw bevindt zich op zo'n 55m afstand tot het spoor. Er is gemeten op maaiveld voor het gebouw, aan de fundering van het gebouw en op een vloer op de bovenste verdieping van het gebouw (meetpunten 13, 14 en 15 in Figuur 2-2).

Door de gemeten trillingsspectra van de meetpunten door elkaar te delen kunnen overdrachten van punt naar punt bepaald worden, voor meerdere treinpassages. Door van al deze passages de RMS waarde te berekenen kan een representatieve overdracht berekend worden. Dit zijn de rode stippellijnen in Figuur IV-1.



Figuur IV-0-1 Gemeten overdrachtsspectra Hofplein 20.

Horizontale assen:

frequentie [Hz]

Verticale assen:

overdrachtsverhouding

funderingsoverdrachten: verhouding trillingen fundering / trillingen maaiveld

vloeroverdrachten: verhouding trillingen vloer / trillingen fundering

overdrachten totaal: verhouding trillingen vloer / trillingen maaiveld

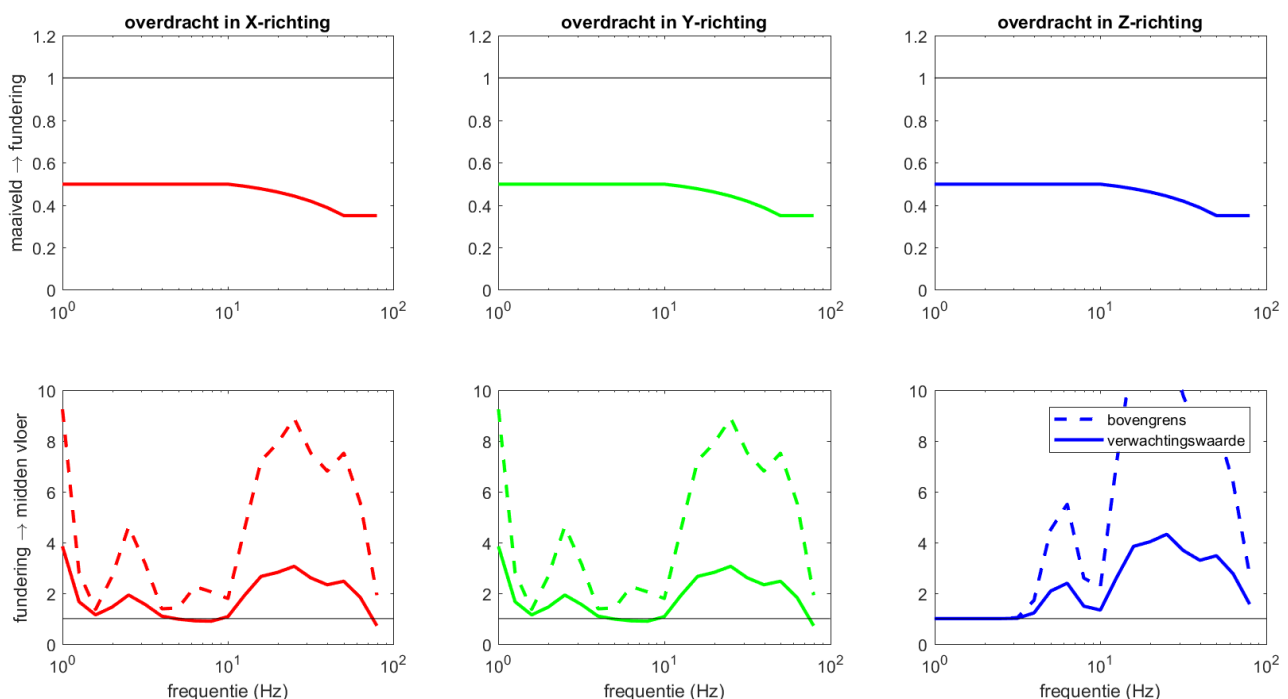
Ter hoogte van het maaiveldpunt (meetpunt 13) is vooral trillingsenergie gemeten tussen de 3 en de 10Hz. Door de afstand van het gebouw tot het spoor zijn de hoogfrequentere trillingen al uitgedempt in de bodem. Dit betekent dat buiten dit

frequentiegebied het niet mogelijk is om met een grote mate van zekerheid de overdrachten van trillingen van treinverkeer vast te stellen.

In het gebied tussen de 3 en de 10Hz zien we voor alle gemeten overdrachten van maaiveld naar de fundering van het pand, dat er een mooie smalle band zichtbaar is, rond 0,4. Dit betekent dat de trillingen op maaiveld slechts voor 40% doorgegeven worden binnen dit frequentie bereik. Dit laat zich redelijk goed vergelijken met de overdracht voor een gebouw van 70m hoog uit het VROM model, zoals gehanteerd in dit onderzoek (zie Figuur IV-2), al lijkt het VROM model iets conservatiever. Onder de 3Hz en boven de 10Hz zijn de meetresultaten slechter. Doordat er weinig trillingsenergie gemeten is bij deze frequenties, zien we hier de resultaten van het delen van 'ruis'.

Tussen de 3 en de 10Hz is de gemeten overdracht van fundering naar vloerveld ongeveer 1. Dat wil zeggen; binnen dit frequentiebereik worden trillingen op de fundering 1:1 doorgegeven naar een vloer op de bovenste verdieping. Dat komt goed overeen met de vloeroverdracht van het VROM model.

Vanaf 15Hz en hoger zien we een aantal pieken in de gemeten vloeroverdracht in figuur IV-1. Deze zijn representatief voor de eigenfrequenties van de vloeren. Alhoewel er bij deze frequenties weinig energie vanuit de spoorse bron komt op deze afstand, bewegen de vloeren wel een beetje in hun eigenfrequentie. Dus ook al kan er geen goede overdracht worden bepaald in dit frequentiebereik, geeft de meting wel een goede indicatie voor de eigenfrequenties van de vloeren.



Figuur IV-0-2 Gehanteerde overdrachten VROM model voor een gebouw van 70m hoog en een vloeroverspanning van 6,5m

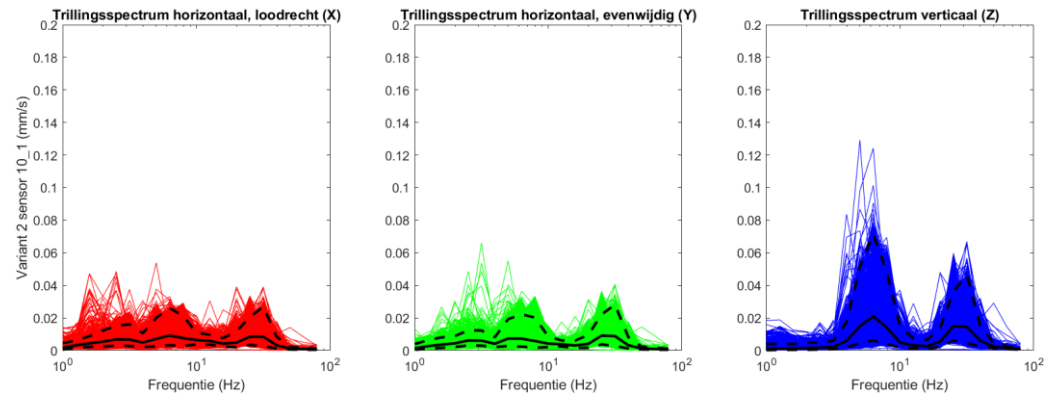
In het VROM model wordt aangenomen dat de eigenfrequenties van de vloeren zich tussen de 15 en de 70Hz bevinden, voor een vloeroverspanning van 6,5m. De

eigenfrequenties uit het VROM model lijken goed overeen te komen met de eigenfrequenties uit de metingen.

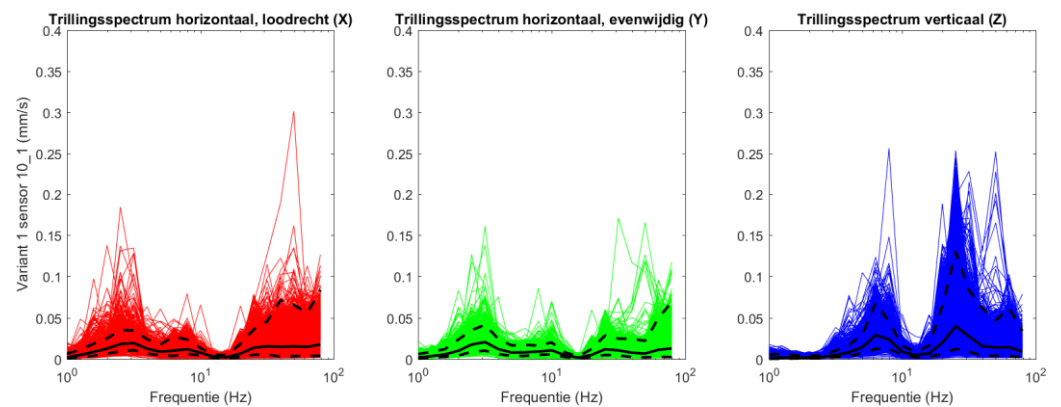
Verder zijn er in de vloeroverdrachten ook onder de 3Hz nog pieken zichtbaar. Dit zijn de eigenfrequenties waarmee de toren heen en weer zwaait. Waarschijnlijk is dat in deze meting veroorzaakt doordat de toren wordt aangestoten door de wind. Ook het bestaan van deze eigenfrequenties onder de 3Hz wordt goed meegenomen in het VROM model.

Zoals beschreven in Hoofdstuk 4, zijn er binnen de onderzoekslocatie wel degelijk significante hoeveelheden trillingsenergie gemeten buiten de bandbreedte 3 tot 10Hz. Echter kunnen we aan de hand van de meting geen goede overdracht bepalen voor de bandbreedte 1 tot 100Hz, zoals nodig zou zijn voor een SBR-B analyse. Wel kunnen we vaststellen dat de overdrachten uit het VROM model voor een redelijk vergelijkbaar gebouw als Hofplein 20 kwalitatief goed overeen komen. Om deze redenen is in het kader van dit onderzoek gekozen om verder te werken met overdrachten van het VROM model, en niet met de gemeten overdracht van Hofplein 20.

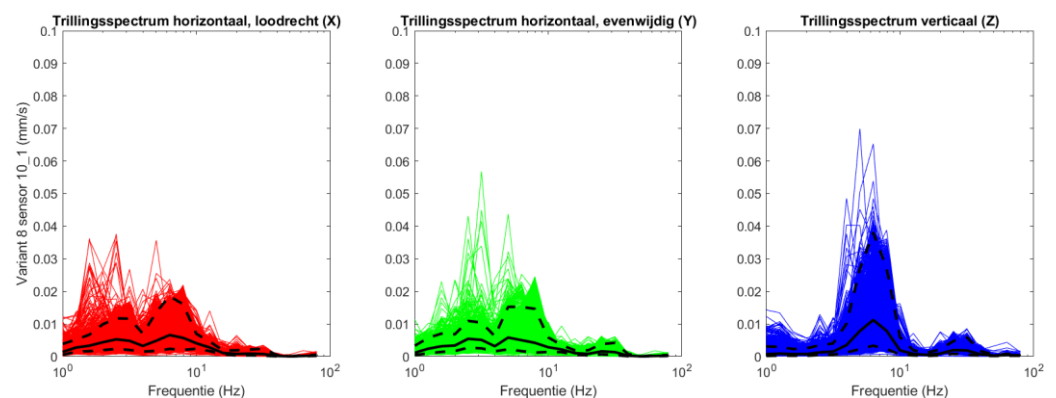
Bijlage V – Trillingsspectra in gebouwen



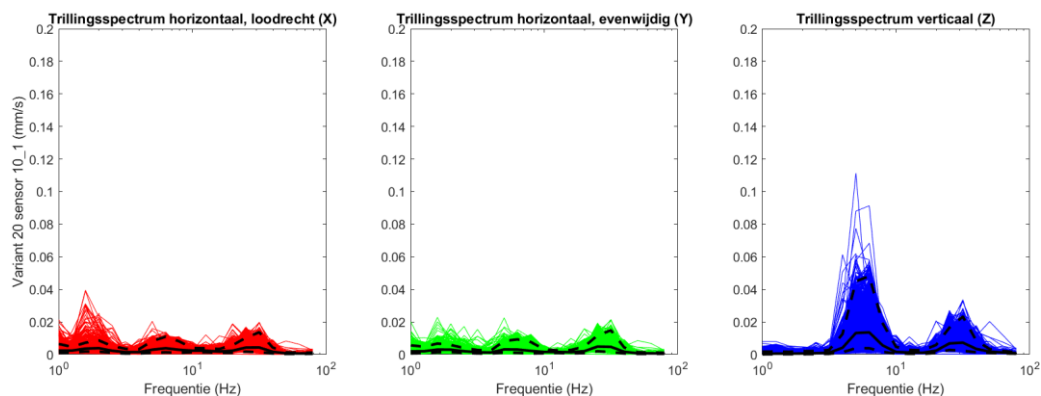
Figuur V-1 Trillingsspectra voor een gebouw met een hoogte van 20 meter in deelgebied Pompenburg op 7 meter van het spoor



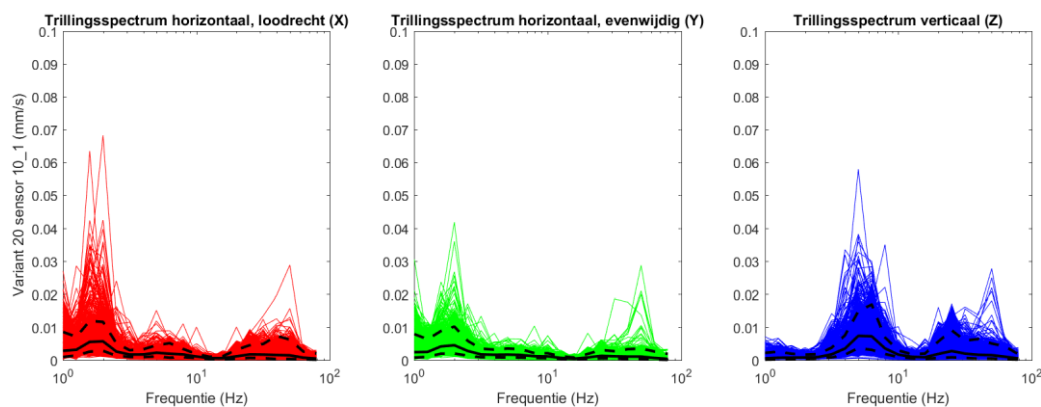
Figuur V-2 Trillingsspectra voor een gebouw met een hoogte van 20 meter in deelgebied Heer Bokelweg op 7 meter van het spoor



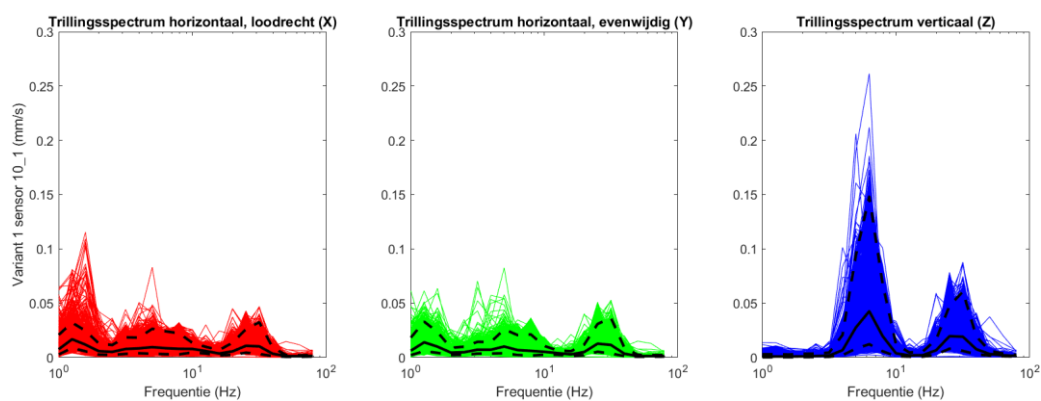
Figuur V-3 Trillingsspectra voor een gebouw met een hoogte van 20 meter in deelgebied Pompenburg op 40 meter van het spoor



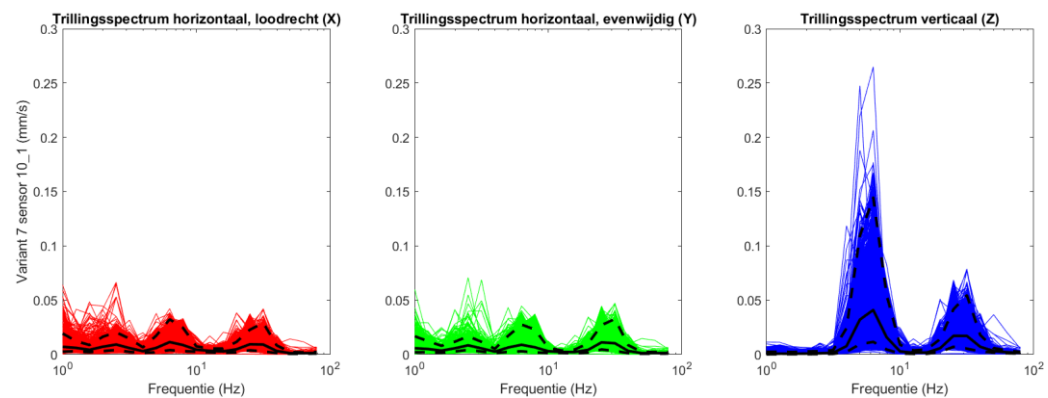
Figuur V-4 Trillingsspectra voor gebouw met een hoogte van 120 meter in deelgebied Pompenburg



Figuur V-5 Trillingsspectra voor gebouw met een hoogte van 120 meter in deelgebied Heer Bokelweg



Figuur V-6 Trillingsspectra voor gebouw met een hoogte van 50 meter in deelgebied Stroveer



Figuur V-7 Trillingsspectra voor gebouw met een hoogte van 70 meter in deelgebied Stroeveer