

**WV  
EBOOST**



**TRILLINGSONDERZOEK T.B.V. NIEUWBOUW**

---

**SPOORLAAN 1**

**WOLVEGA**

# COLOFON

Auteur	Thijmen van der Veen <a href="mailto:marjolein@we-boost.nl">marjolein@we-boost.nl</a>
Controle en vrijgave	Pieter Boon <a href="mailto:pieter@we-boost.nl">pieter@we-boost.nl</a> +31 6 10 03 94 54
Projectcode	WBD2022-009
Versienr	2.0
Datum	5 april 2022
Status	Definitief
Opdrachtgever	Ad Fontem



Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van metingen van

**ALCEDO** 

© We-Boost 2022

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

# DE KERN VAN DIT RAPPORT

Aan de Spoorlaan in Wolvega wordt nieuwbouw ontwikkeld met een woonfunctie. Het plangebied komt vrij door de sloop van een aantal opstallen. Het plangebied bevindt zich ten westen van de spoorlijn Leeuwarden – Zwolle. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet op voorhand worden uitgesloten. Doel van het voorliggende onderzoek is om vast te stellen of er sprake zal zijn van trillingshinder in de nieuw te realiseren bebouwing, en zo ja, met welke maatregelen een aanvaardbaar woon- en leefklimaat te garanderen.

In dit onderzoek is met behulp van metingen op de bouwlocatie en modelberekeningen onderzocht wat de trillingen zullen zijn in de toekomstige bebouwing. Hierbij volgen we de aanpak zoals voorgeschreven in de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

## CONCLUSIES

De belangrijkste conclusie van het onderzoek is dat in drie bouwdelen overschrijdingen van de streefwaarden uit het beoordelingskader voor trillingshinder, de SBR B-richtlijn, worden verwacht. In de overige twee bouwdelen is dit afhankelijk van de constructieve uitwerking van de panden, maar zijn overschrijdingen ook niet uit te sluiten bij een qua trillingen ongunstige constructiewijze. Het gaat om maximaal 1 tot 2 passages per dag in de late avonduren (na 23:00 uur) en de vroege morgenuren (voor 7:00 uur). De trillingen zijn vooral hoog rond de spoorwegovergang, en in mindere mate rond het wissel. De spoorvloot zorgt juist voor een dempende werking op de trillingen.



Omdat er overschrijdingen van het beoordelingskader worden verwacht, is onderzoek gedaan naar mitigerende maatregelen. Hierbij is zowel gekeken naar maatregelen aan het spoor, in de bodem als naar maatregelen aan het geplande gebouw.

## AFWEGING VAN MAATREGELEN

Omdat overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder niet overal zijn uit te sluiten, dient rekening te worden gehouden met trillingen bij de verdere ontwikkeling van het plan. Per bouwdeel (nummers uit de eerste kolom in onderstaand overzicht corresponderen met nummers uit bovenstaande figuur) gelden de volgende adviezen, op basis van het uitgevoerde onderzoek naar maatregelen:

- 1**
  - 1.** Vermijd lichte stalen constructies en lichte houtskeletbouw. Zware houtskeletbouw is juist gunstig voor de trillingen.
  - 2.** Vermijd de **rood** en **geel** gearceerde vloertype-overspanning combinaties in de tabel op de volgende pagina.
  - 3.** Zorg voor voldoende horizontale stijfheid van het gebouw in de richting haaks op het spoor door de wanden dikker uit te voeren en het aantal openingen te beperken of de wanden in het werk te storten.

Met bovenstaande adviezen is er nog een beperkt aantal overschrijdingen (minder dan 1 per dag). Om te voldoen aan het beoordelingskader, zijn aanvullende maatregelen nodig. De meest kosteneffectieve oplossing hiervoor is:

- Het aan de spoorzijde en noordzijde van het pand inpakken van de fundering met 1000 mm dik EPS, of afschermen met een prefab L-wand met luchtpouw.

- 2**
  - 1.** Vermijd lichte stalen constructies en lichte houtskeletbouw. Zware houtskeletbouw is juist gunstig voor de trillingen.
  - 2.** Vermijd de **rood** gearceerde vloertype-overspanning combinaties in de tabel op de volgende pagina.

Met bovenstaande adviezen wordt voldaan aan het beoordelingskader.

- 3**
  - 1.** Vermijd lichte stalen constructies en lichte houtskeletbouw. Zware houtskeletbouw is juist gunstig voor de trillingen.
  - 2.** Vermijd de **rood** gearceerde vloertype-overspanning combinaties in de tabel op de volgende pagina.
  - 3.** Zorg voor voldoende horizontale stijfheid van het gebouw in de richting haaks op het spoor door de wanden dikker uit te voeren en het aantal openingen te beperken of de wanden in het werk te storten.

Met bovenstaande adviezen wordt voldaan aan het beoordelingskader.

- 4**
  - 1.** Vermijd lichte stalen constructies en lichte houtskeletbouw. Zware houtskeletbouw is juist gunstig voor de trillingen.
  - 2.** Vermijd de **rood** en **geel** gearceerde vloertype-overspanning combinaties in de tabel op de volgende pagina.
  - 3.** Zorg voor voldoende horizontale stijfheid van het gebouw in de richting haaks op het spoor door de wanden dikker uit te voeren en het aantal openingen te beperken of de wanden in het werk te storten.

Met bovenstaande adviezen zijn er nog incidentele overschrijdingen (1 of 2 per week). Om te voldoen aan het beoordelingskader, zijn aanvullende maatregelen nodig. De meest kosteneffectieve oplossingen hiervoor zijn:

- Het aan de spoorzijde en noordzijde van het pand inpakken van de fundering met 1000 mm dik EPS, of afschermen met een prefab L-wand met luchtpouw.
- Het verzwaren van de fundering van het pand, bijvoorbeeld door het toepassen van een 500 mm dikke plaatfundering, een lange paalfundering (350 x 350 mm, 15 meter lang) of een kelder.
- Het plaatsen van een prefab L-wand van 4 meter hoog op de westelijke rand van de spoorloot, en verdiepen van de spoorloot tot minimaal 2.5 meter diepte.

- 5**
  - Vermijd lichte stalen constructies en lichte houtskeletbouw. Zware houtskeletbouw is juist gunstig voor de trillingen.
  - Vermijd de **rood** en **geel** gearceerde vloertype-overspanning combinaties in de tabel op de volgende pagina.



- Zorg voor voldoende horizontale stijfheid van het gebouw in de richting haaks op het spoor door de wanden dikker uit te voeren en het aantal openingen te beperken of de wanden in het werk te storten.

Met bovenstaande adviezen zijn er nog incidentele overschrijdingen (1 of 2 per week). Om te voldoen aan het beoordelingskader, zijn aanvullende maatregelen nodig. De meest kosteneffectieve oplossingen hiervoor zijn:

- Het aan de spoorzijde en noordzijde van het pand inpakken van de fundering met 1000 mm dik EPS, of afschermen met een prefab L-wand met luchtsponw.
- Het verzwaren van de fundering van het pand, bijvoorbeeld door het toepassen van een 750 mm dikke plaatfundering, een lange paalfundering (450 x 450 mm, 15 meter lang) of een kelder.
- Het plaatsen van een prefab L-wand van 4 meter hoog op de westelijke rand van de spoorslot, en verdiepen van de spoorslot tot minimaal 2.5 meter diepte.

Overspanning	Kanaalplaatvloer 200	Kanaalplaatvloer 260	Kanaalplaatvloer 320	Breedplaatvloer 200	Breedplaatvloer 280	Breedplaatvloer 320	Hout, 300x100, hoh 400
5.0 meter							
6.0 meter							
7.0 meter							
8.0 meter							

Met bovenstaand stappenplan is een acceptabel woon- en leefklimaat ten aanzien van trillingen te garanderen in het gehele plangebied.

Meest effectief en robuust is, zoals eerder ook al genoemd, het afveren van de funderingen van de woningen. Hiervoor dienen de woningen met een dubbele fundering te worden uitgevoerd. Met deze maatregel zijn overschrijdingen in alle woningen in het plangebied weg te nemen, maar de maatregel kost tussen de € 9.000 en € 20.000 per appartement.

Tenslotte, het kan voorkomen dat optimalisaties en maatregelen niet doelmatig worden geacht, bijvoorbeeld omdat het plan dan niet uitvoerbaar wordt of te kostbaar is. Afhankelijk van de verwachte hinder, zoals beschreven in dit rapport, kan dan eventueel met een beroep op bijlage 5 worden gemotiveerd dat ook zonder maatregelen geen onaanvaardbaar woon- en leefklimaat ontstaat in de geplande woningen. Argumenten die gebruikt kunnen worden om te motiveren dat er dan geen maatregelen worden getroffen, kunnen zijn:

- Er is sprake van een beperkt aantal overschrijdingen, mits de woningen qua trillingen goed zijn ontworpen. Het gaat dan om minder dan 1 overschrijding per dag, en de gemiddelde trillingssterkte voldoet dan aan de streefwaarden.
- De trillingen voldoen weliswaar niet aan de strenge streefwaarden voor nieuwbouw uit de SBR B-richtlijn, maar wel aan de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties uit de SBR

B-richtlijn. In de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties is een zekere mate van gewenning meegenomen.

- De woningen worden gerealiseerd in een zone dichtbij het spoor, waar nu ook al bebouwing is gerealiseerd die soms ook dicht bij het spoor staat. Het gaat bovendien om oudere, meer trillingsgevoelige bebouwing, waar de trillingen dus hoger zullen zijn dan in de nieuwe woningen. Ook zonder maatregelen tegen trillingen ontstaat in de geplande bebouwing daarom geen onacceptabele situatie: de trillingen zijn daar immers (veel) lager dan in andere, al bestaande bebouwing rond deze locatie.



# INHOUDSOPGAVE

<b>I.</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>10</b>
1.1.	Aanleiding	10
1.2.	Doel	10
1.3.	Leeswijzer	10
<b>2.</b>	<b>SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN</b>	<b>13</b>
2.1.	Situatie	13
2.2.	Uitgangspunten	14
<b>3.</b>	<b>BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE</b>	<b>17</b>
3.1.	Beoordelingskader	17
3.2.	Rekenmethode	18
<b>4.</b>	<b>VERWACHTE TRILLINGEN</b>	<b>21</b>
4.1.	Meetresultaten	21
4.2.	Trillingen in geplande bebouwing	21
<b>5.</b>	<b>MITIGERENDE MAATREGELEN</b>	<b>25</b>
5.1.	Nut en noodzaak van maatregelen	25
5.2.	Analyse resultaten	25
5.3.	Maatregelen aan de trillingsbron	26
5.4.	Maatregelen in de bodem	27
5.5.	Maatregelen aan de gebouwen	29
5.6.	Advies voor maatregelen	30
5.7.	Onzekerheden in het onderzoek	32
<b>II.</b>	<b>GRONDONDERZOEK</b>	<b>34</b>
<b>III.</b>	<b>REKENMODEL</b>	<b>36</b>
<b>IV.</b>	<b>RESULTATEN METINGEN</b>	<b>40</b>





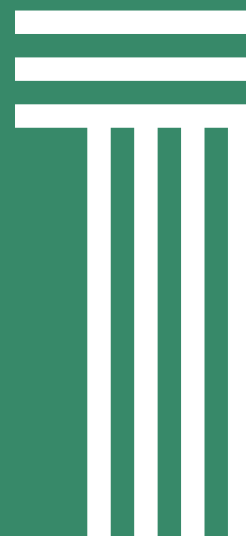




## INLEIDING



In dit hoofdstuk geven we een korte omschrijving van de inhoud van dit onderzoek: de aanleiding, het doel van het onderzoek en een beknopte leeswijzer om informatie snel te kunnen vinden.



# INLEIDING

## 1.1. AANLEIDING

Aan de Spoorlaan in Wolvega wordt nieuwbouw ontwikkeld met een woonfunctie. Het plangebied komt vrij door de sloop van een aantal opstallen. Het plangebied bevindt zich ten westen van de spoorlijn Leeuwarden – Zwolle, zie Figuur 1. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet op voorhand worden uitgesloten.



Figuur 1 Plangebied

## 1.2. DOEL

Doel van dit onderzoek is om vast te stellen of er sprake zal zijn van trillingshinder in de geplande bebouwing, en zo ja, met welke maatregelen deze hinder is te voorkomen. Hiervoor maken wij een nauwkeurige predictie van de trillingen in de geplande bebouwing, conform de in de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* omschreven aanpak. Deze trillingen toetsen we aan het van toepassing zijnde beoordelingskader. Als we overschrijdingen van het beoordelingskader verwachten, dan geven we aan met welke constructieve aanpassingen of maatregelen kan worden voldaan aan de streefwaarden uit het beoordelingskader.

## 1.3. LEESWIJZER

Wij beschrijven de situatie in het onderzoeksgebied en de uitgangspunten in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 lichten we het beoordelingskader en de gevolgde rekenmethodiek toe. Met behulp van de uitgangspunten berekenen we de trillingen in de woning op basis van de gemeten

trillingen en de eigenschappen van het gebouw. Het resultaat van deze stap wordt in hoofdstuk 4 beschreven. In hoofdstuk 5 gaan we in op mitigerende maatregelen.

De bijlages bevatten technische informatie van het onderzoek, zoals een toelichting op de rekenmethodiek en grondonderzoek van nabijgelegen locaties.





## SITUATIEBESCHRIJVING



In dit hoofdstuk wordt een toelichting gegeven op de beoogde toekomstige situatie en worden de uitgangspunten van het onderzoek weergegeven.



# 2. SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN

## 2.1. SITUATIE

Op planlocatie, gelegen tussen het spoor en de Spoorlaan in Wolvega, staan momenteel enkele opstallen. Deze worden gesloopt waardoor er ruimte komt voor appartementen. De geplande nieuwbouw bestaat uit twee bouwblokken, bestaand uit geschakelde appartementencomplexen van 4 en 5 bouwlagen hoog. De bestaande en geplande bebouwing is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Bestaande en geplande bebouwing op de planlocatie

De geplande nieuwbouw bevindt zich in een zone van 14 tot 37 meter van het spoor. De rijsnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. De gegevens in Tabel 1 zijn gebaseerd op het Geluidsregister Spoor en gegevens van de vervoerders. Er is op deze spoorlijn geen sprake van structureel goederenvervoer. Volgens de IMA-2021 (voortuitblik voor spoorvervoer) wordt er geen toename van het aantal treinen verwacht.

Tabel 1 Treinen, rijsnelheid en aantal treinen per uur per richting (gemiddeld, per dagdeel)

Type trein	Rijsnelheid	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Sprinter	60-80 km/h	2.00	1.50	0.13
Intercity	100-120 km/h	2.00	2.00	0.50

Andere trillingsbronnen, met name zwaar wegverkeer over de spoorwegovergang Lycklamaweg, kunnen ook voor voelbare trillingen in de woningen dichtbij de spoorwegovergang zorgen, maar zijn in dit onderzoek niet nader kwantitatief beschouwd.

## 2.2. UITGANGSPUNTEN

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van een aantal uitgangspunten. In het volgende hoofdstuk wordt toegelicht hoe deze uitgangspunten zijn verwerkt in de berekeningen.

### 2.2.1. GEGEVENS BEBOUWING

Er is nog geen definitief ontwerp van de bebouwing beschikbaar. Voor het uitvoeren van de berekeningen is daarom een groot aantal varianten doorgerekend, zodat dit rapport bruikbaar is voor verschillende constructieve uitwerkingen. Zo hebben we verschillende afmetingen, constructiewijzen en materiaaltypes doorgerekend, zodat we robuuste uitspraken kunnen doen over de verwachte trillingen. Een impressie van de gebouwen is weergegeven in Figuur 3. In Tabel 2 zijn de belangrijkste varianten weergegeven. Het rekenmodel voor de bebouwing is hierop gebaseerd.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

Parameter	Eigenschappen
Vloertype	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kanaalplaatvloer 200 en 260 mm, 70 mm zandcement dekvloer</li> <li>Breedplaatvloer 200 en 250 mm, 70 mm zandcement dekvloer</li> <li>Houten vloer, 300 x 100 mm balken, hoh 400 mm</li> </ul>
Hoogte	12.0 tot 15.0 meter
Lengte vloerveld	5.0 tot 8.0 meter
Breedte vloerveld	9.0 tot 12.0 meter
Constructietype	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kalkzandsteen en metselwerk</li> <li>Prefab beton en i.h.w.g. beton, diverse wanddiktes (250 tot 320 mm)</li> <li>Houtskeletbouw</li> </ul>
Fundering	<ul style="list-style-type: none"> <li>Op staal</li> <li>Op palen, 350 x 350 mm, 10 m lang</li> </ul>

### 2.2.2. GEGEVENS ONDERGROND

Voor gegevens van de ondergrond is gebruik gemaakt van beschikbare boringen en sonderingen uit Dinoloket en bodemonderzoeken die in het plangebied zijn uitgevoerd. Deze gegevens zijn gebruikt om de bodemopbouw te modelleren. De bodemopbouw heeft invloed op hoe de trillingen uitdempen met de afstand, en op hoe de gebouwen reageren op trillingen.





*Figuur 3 Impressie geplande bebouwing*

### 2.2.3. MEETRESULTATEN

Zoals te zien in Figuur 4 zijn door Alcedo op zes locaties metingen uitgevoerd. Het gaat hierbij om vier meetpunten op het maaiveld en een meetpunt aan de fundering van het bestaande pand. De metingen zijn uitgevoerd van 3 tot 11 maart 2022.



*Figuur 4 Meetpunten*





# **BEOORDELINGSKADER**



In dit hoofdstuk geven wij een toelichting op het beoordelingskader en de gebruikte rekenmethode.





# **BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE**

## **3.1. BEOORDELINGSKADER**

Er bestaat in Nederland geen wettelijk kader voor de beoordeling van trillingshinder in gebouwen. Wel geldt dat in het kader van een goede ruimtelijke ordening kan worden verzocht om trillingen mee te nemen bij de wijziging van bestemmingsplannen waar trillingen een rol kunnen spelen. Op basis van jurisprudentie wordt al enkele decennia gebruik gemaakt van de SBR-richtlijn om trillingen in gebouwen te beoordelen.<sup>1</sup>

Deze SBR-richtlijn bestaat uit drie delen (deel A – schade in gebouwen, deel B – hinder voor personen in gebouwen en deel C – verstoring van gevoelige apparatuur) waarvan alleen deel B voor dit onderzoek relevant is. De afstand tussen het spoor en het gebouw is dermate groot dat er geen schade aan de gebouwen zal ontstaan, en verstoring van gevoelige apparatuur als gevolg van de realisatie van dit plan is ook niet aan de orde.

In deze SBR-richtlijn deel B zijn een aantal aspecten relevant, deze worden hieronder kort toegelicht:

1. De richtlijn toetst zowel een maximaal optredende trillingssterkte ( $V_{max}$ , treedt op bij de trein die gedurende de meetperiode de hoogste trillingen veroorzaakt) als het tijdsgemiddelde van de trillingen ( $V_{per}$ , deze grootte is in tegenstelling tot  $V_{max}$  dus ook afhankelijk van het aantal treinen).
2. De richtlijn maakt in de beoordeling onderscheid tussen verschillende situaties, en toetst daarbij strenger in:
  - a. Nieuwbouwsituaties (nieuwe gebouwen, nieuw spoor, aanleg van wissels). Bij bestaande situaties zijn de streefwaarden minder streng, er wordt dan uitgegaan van een zekere mate van gewenning en er zijn minder mogelijkheden om de trillingen te reduceren.
  - b. Gebouwen met een overnachtingsfunctie (woningen, ziekenhuizen). De meeste hinder wordt vaak in rust ervaren. Bij gebouwen met een niet-overnachtingsfunctie (kantoren, scholen) gelden minder strenge streefwaarden. Winkels, sport- en industriepanden vallen buiten de richtlijn. In dit plan gaat het uitsluitend om gebouwen met een woonfunctie.
  - c. De nacht, omdat de meeste hinder vaak in rust wordt ervaren. De streefwaarden voor overdag zijn ca. een factor 2 minder streng dan 's nachts.

Een gebouw kan op twee manieren voldoen aan de richtlijn: de trillingssterkte  $V_{max}$  moet lager zijn dan de onderste streefwaarde A1 (zie Tabel 3), óf  $V_{max}$  moet lager zijn dan de bovenste streefwaarde A2, waarbij tegelijkertijd de trillingsintensiteit  $V_{per}$  lager is dan de streefwaarde A3. Zie ook het schema in Figuur 5.

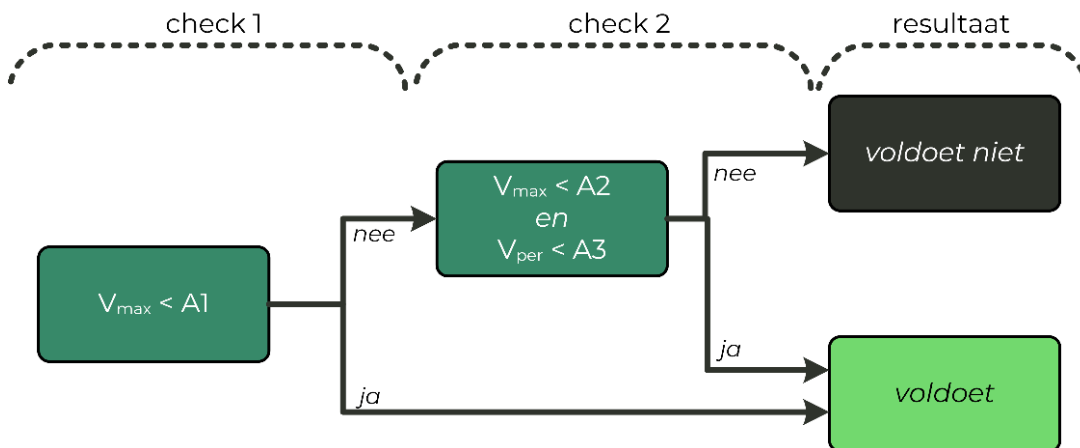
---

<sup>1</sup> Voor spoorprojecten wordt door ProRail sinds 2012 ook wel gebruik gemaakt van de Bts, deze is afgeleid van de SBR-richtlijn en op aspecten aangescherpt (waaronder een doelmatigheidsafweging en een andere manier om de trillingen vast te stellen). Deze richtlijn wordt echter doorgaans niet gebruikt om de trillingen in nieuw te bouwen woningen langs het spoor te beoordelen.



Tabel 3 Streefwaarden in de SBR-richtlijn deel B voor gebouwen met bestemming wonen

Situatie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Nieuwe situatie	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
Bestaande situatie	0.2	0.8	0.10	0.2	0.4	0.10



Figuur 5 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

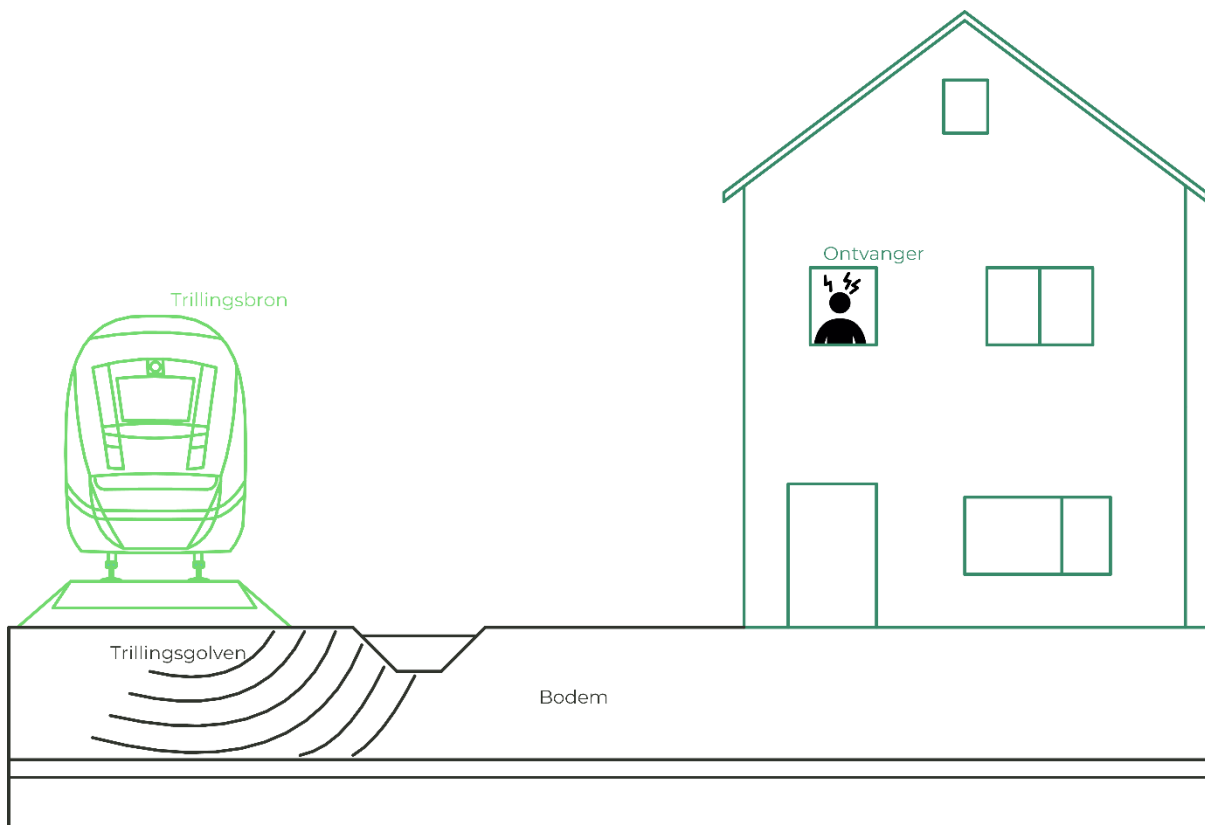
## 3.2. REKENMETHODE

In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde gebouwen, wordt op basis van metingen in de omgeving van de bebouwing (op maaiveld en aan bestaande bebouwing) een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande nieuwe bebouwing. Deze verwachte trillingen zijn afhankelijk van de constructieve eigenschappen van de geplande bebouwing, maar ook van de bodem, de afstand tot het spoor en natuurlijk de gemeten trillingen. Hieronder wordt een korte uitleg gegeven over hoe trillingen zich voortplanten van de trillingsbron tot in het gebouw. In de volgende subparagrafen wordt beschreven hoe dat is vertaald naar een rekenmodel.

### 3.2.1. TRILLINGEN – VAN TRILLINGSBRON NAAR GEBOUW

Trillingen ontstaan doordat een bewegend object (een trein, tram of vrachtwagen bijvoorbeeld) over een niet-efen ondergrond rijdt. Door de massa en beweging van het voertuig, variaties in de ondergrond (die per definitie niet perfect vlak is) en variaties in de rondheid van de wielen van het voertuig ontstaan spanningen in de bodem die zich door de bodem verplaatsen. Afhankelijk van de opbouw van de bodem en de aanwezigheid van obstakels (zoals sloten en damwanden) verplaatsen de trillingen zich diep of juist ondiep door de bodem. Gebouwen worden daardoor in trilling gebracht. Afhankelijk van hoe het gebouw is geconstrueerd, worden bepaalde trillingen meer of minder versterkt in het gebouw. Deze trillingen kunnen als hinderlijk worden ervaren door personen in gebouwen. Dit hele systeem van trillingsbron (hier de trein), overdrachtsmedium (de bodem, waardoor de trillingen zich verplaatsen) en ontvanger (het gebouw met daarin de personen die de hinder ervaren) is schematisch weergegeven in Figuur 6.

In de subparagrafen hieronder wordt toegelicht hoe in dit onderzoek hiermee wordt omgegaan.



*Figuur 6 Trillingen – het systeem van trillingsbron, de bodem als doorgeefmedium en het gebouw als ontvanger*

### **3.2.2. DE TRILLINGSBRON**

In dit onderzoek zijn treinen de bron van de trillingen. De trillingen van het treinverkeer zijn gemeten door Alcedo op meerdere punten op maaiveld in het plangebied en aan de fundering van het bestaande gebouw. De beoordeling van de trillingen in de geplande bebouwing heeft plaatsgevonden op basis van deze metingen.

### **3.2.3. DE BODEM**

De bodem op deze locatie bestaat voornamelijk uit stijve zandlagen, zie bijlage I. De uitdemping van de trillingen met de afstand is bepaald met een rekenmodel op basis van deze bodemopbouw voor een zo betrouwbaar mogelijke predictie van de trillingen.

### **3.2.4. HET GEBOUW**

De trillingen gaan via de fundering een gebouw binnen. Afhankelijk van het type fundering, de bodem, de massa en afmetingen van het gebouw zal de fundering de trillingen meer of minder uitdempen. Vervolgens worden de trillingen in het gebouw weer versterkt door bewegingen van het gebouw en de vloeren. Het gebouwgedrag is in dit onderzoek bepaald op basis van de bodemopbouw, de constructieve eigenschappen en de gebruikte materialen van de gebouwen. Hiervoor maken we gebruik van het rekenmodel Buildyn, een zogenaamd beam-element model (BEM) waarin het gebouw gemodelleerd en doorgerekend wordt. De resultaten van het model zijn geïkt met praktijkresultaten uit metingen. Een toelichting op het rekenmodel Buildyn is gegeven in bijlage II.



## VERWACHTE TRILLINGEN



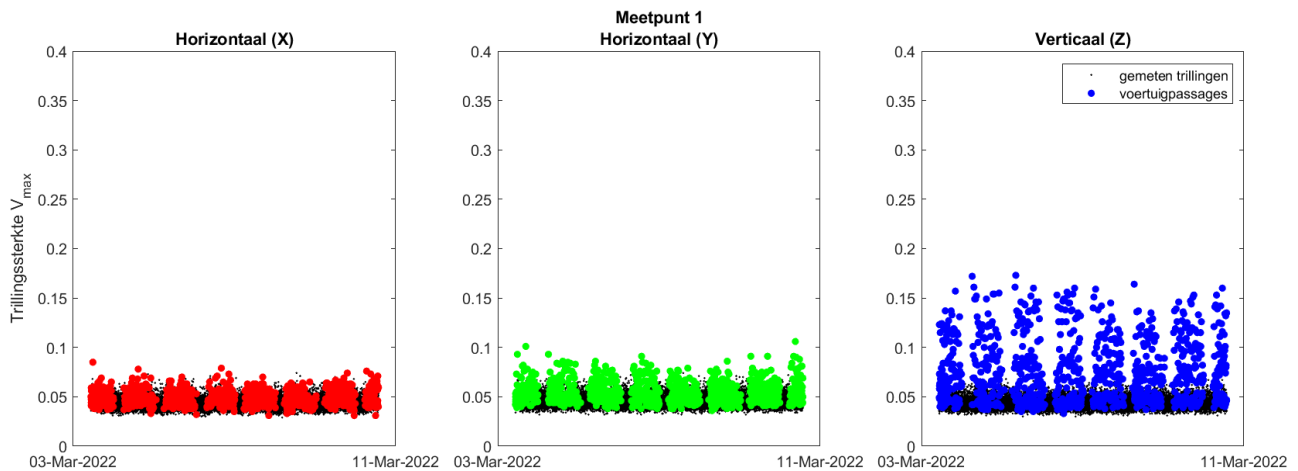
In dit hoofdstuk wordt eerst een korte toelichting gegeven op de meetresultaten, daarna worden de verwachte trillingen in de geplande bebouwing gegeven. Hierbij is gebruik gemaakt van de beoordelingsmethode en de rekenmethodiek zoals toegelicht in het voorgaande hoofdstuk.



# **VERWACHTE TRILLINGEN**

## 4.1. MEETRESULTATEN

Alcedo heeft metingen uitgevoerd op maaiveld en aan de fundering van bestaande (te slopen) pand. De trillingen op het meetpunt aan de fundering zijn weergegeven in Figuur 7. Overige gegevens uit de metingen hebben we opgenomen in bijlage III. In Figuur 7 valt op dat vooral in verticale richting de trillingen hoger zijn dan de achtergrondtrillingen.



Figuur 7 Gemeten trillingen aan fundering bestaande bebouwing

In bijlage III valt nog op dat de trillingen rond de spoorwegovergang en rond het wissel in het spoor hoger zijn.

## 4.2. TRILLINGEN IN GEPLANDE BEBOUWING

De geplande bebouwing is gemodelleerd op basis van de informatie uit Tabel 2. Een voorbeeld van het (frequentie-afhankelijke) gedrag van de geplande bebouwing is weergegeven in bijlage II. Met deze resultaten is bepaald in welke mate de trillingen worden versterkt tussen de huidige meetpunten en de vloeren in de toekomstige bebouwing.

De resultaten per gebouw hebben we weergegeven in Tabel 4, samen met een beoordeling van de trillingen. De trillingen zijn weergegeven als een bandbreedte, omdat de trillingen afhankelijk zijn van de constructieve uitwerking. **Oranje** arcering geeft aan dat er sprake is van een overschrijding van de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn, **geel** geeft aan dat een overschrijding afhankelijk is van de constructieve uitwerking.

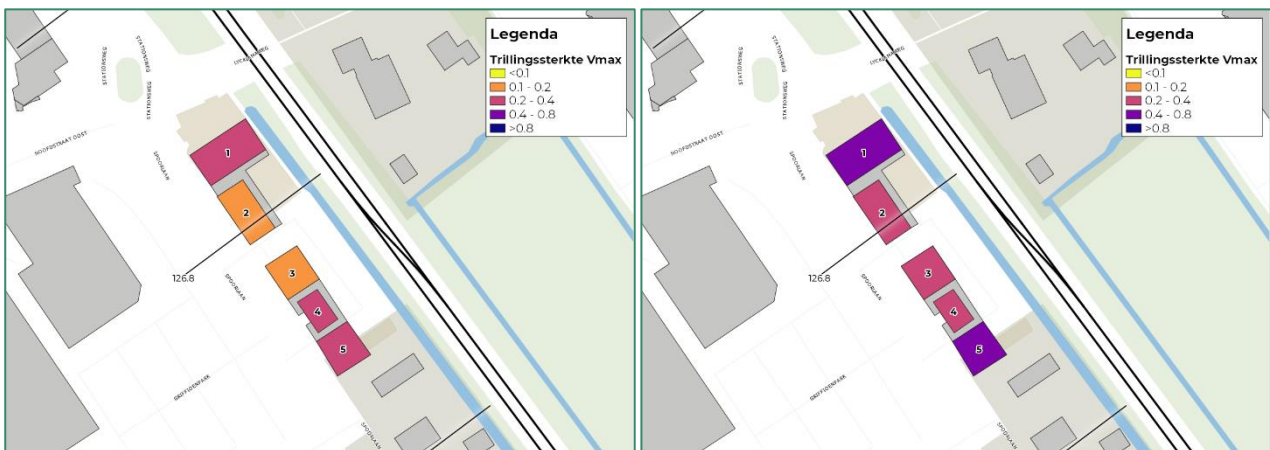
Tabel 4 Trillingen per bouwdeel en beoordeling op SBR B-richtlijn (zie voor nummering Figuur 10)

Bouwdeel	$V_{\max}$	$V_{\text{per}}$	Beoordeling
1	0.4 – 0.6	0.05 – 0.06	Voldoet niet, 1 tot 2 overschrijdingen per dag
2	0.2 – 0.3	0.01 – 0.02	Voldoet mogelijk niet, maximaal 1 overschrijding per week
3	0.2 – 0.4	0.02 – 0.04	Voldoet mogelijk niet, maximaal 2 overschrijdingen per week
4	0.3 – 0.5	0.03 – 0.05	Voldoet niet, minder dan 1 overschrijding per dag
5	0.4 – 0.5	0.04 – 0.05	Voldoet niet, 1 tot 2 overschrijdingen per dag

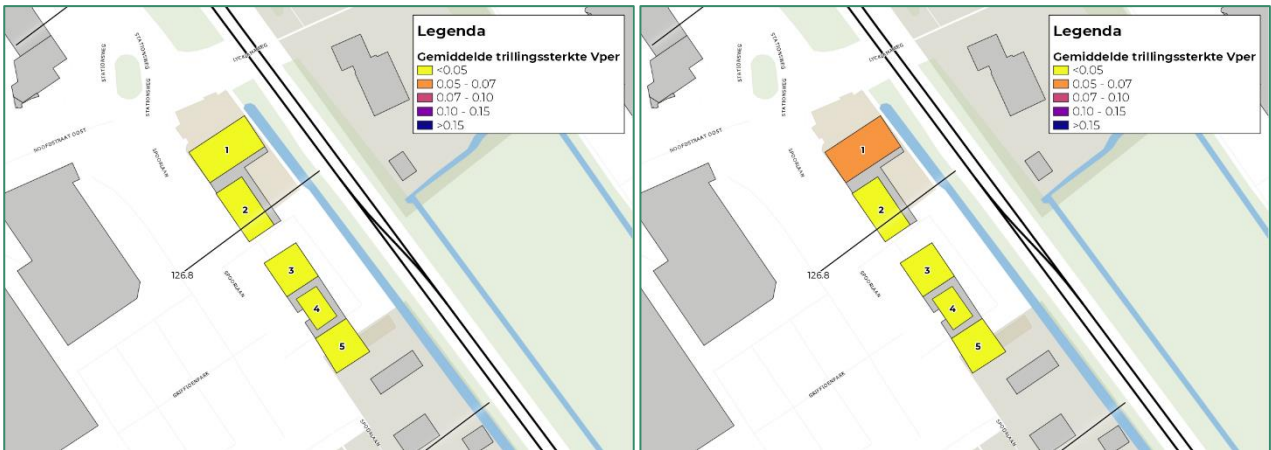
De resultaten (onder- en bovengrens van de trillingen, en beoordeling) zijn grafisch weergegeven in Figuur 9, Figuur 10 en Figuur 10. Samengevat geldt het volgende:

- ▶ Omdat reizigerstreinen zowel overdag als in de nacht rijden, is er geen significant verschil tussen de trillingssterkte in de dag, avond en nacht. De treinen met de hoogste trillingen passeren ook in de nacht, wanneer de streefwaarden strenger zijn.
- ▶ De trillingen zijn het hoogst in 1 dichtbij de spoorwegovergang. Door de aanwezigheid van ES-lassen, een doorgaans mindere spoorligging rond de overweg en verschillen in de stijfheid van de spoorbaan rond de overweg, zijn de trillingen doorgaans hoger.
- ▶ Ook rond het wissel zijn de trillingen hoger, waarbij de treinen over het wissel in het verder weg gelegen spoor voor hogere trillingen zorgen.
- ▶ De hoogte van de trillingen is afhankelijk van de constructieve uitwerking. Uit de variantenanalyse zijn de volgende conclusies te trekken:
  - ✿ De trillingen zijn lager bij een zwaardere fundering
  - ✿ De trillingen zijn lager bij een kortere beukmaat dan bij een langere beukmaat
  - ✿ De trillingen zijn lager bij zwaardere bouw: prefab beton geeft lagere trillingen dan kalkzandsteen en metselwerk, dikke wanden geven lagere trillingen dan dunne wanden
  - ✿ De trillingen zijn lager bij breedplaatvloeren dan bij kanaalplaatvloeren
  - ✿ De trillingen zijn lager bij houtskeletbouw dan bij metselwerk of betonnen constructies, mits voldoende zwaar geconstrueerd. In de berekeningen is uitgegaan van een 300x100 mm balklaag, hoh 400 mm en zware constructieve elementen bij houtskeletbouw.

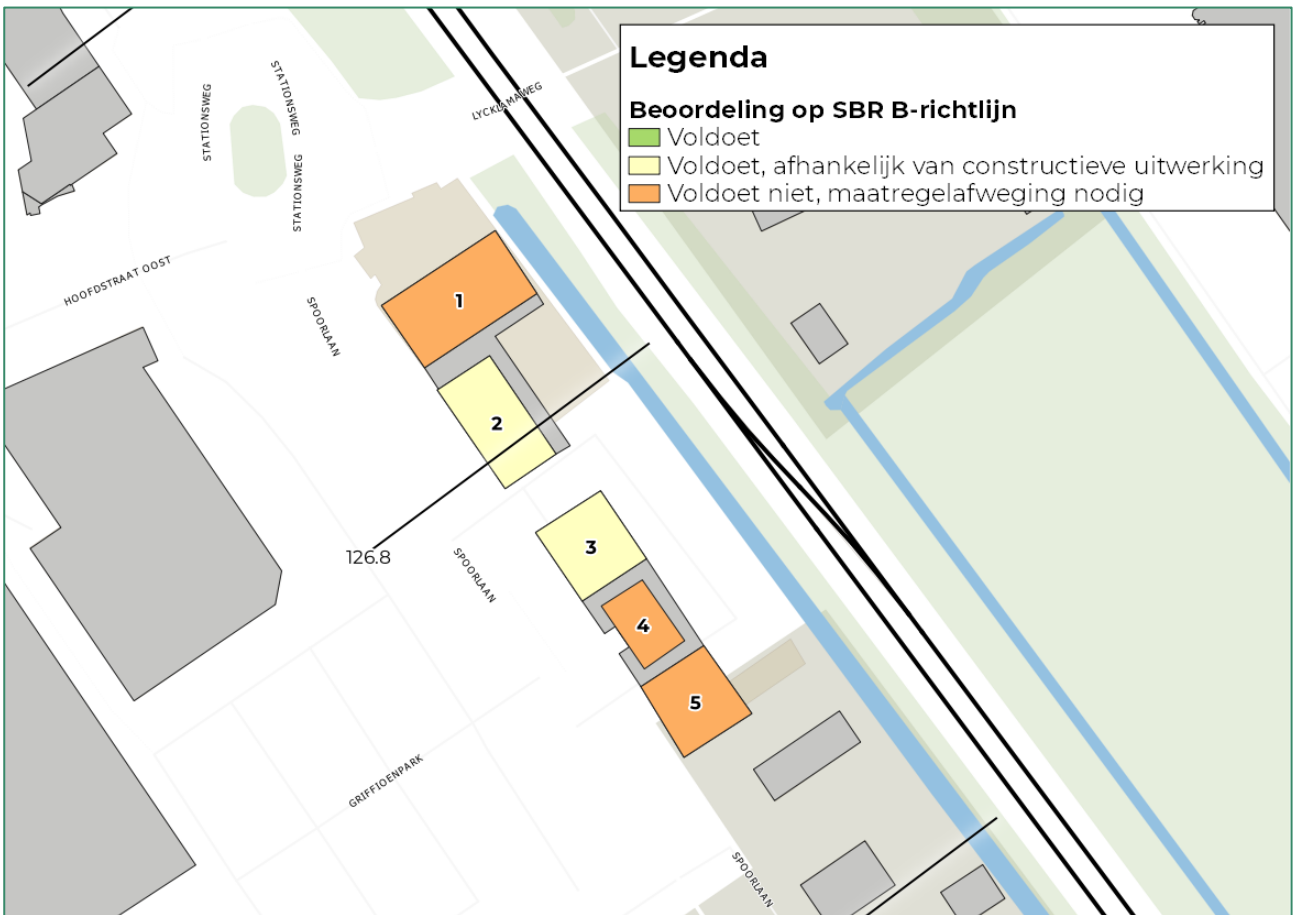
Omdat er sprake is van overschrijdingen van het beoordelingskader, geven we in het volgende hoofdstuk concrete handvatten voor de optimalisatie van de constructie en voor maatregelen.



Figuur 8 Trillingssterkte  $V_{max}$ , links ondergrens, rechts de bovengrens



Figuur 9 Gemiddelde trillingssterkte  $V_{per}$  voor qua trillingen goed ontworpen woningen



Figuur 10 Beoordeling trillingen aan SBR B-richtlijn





## MAATREGELEN



In dit hoofdstuk worden handvatten gegeven om de woningen trillingsarm te ontwerpen, en wordt aangegeven welke maatregelen mogelijk zijn om de trillingen te verminderen.

Hierbij worden ook handvatten gegeven voor een juridisch houdbare afweging tussen effect en kosten van maatregelen.





# MITIGERENDE MAATREGELLEN

Door vooral nachtelijk reizigersverkeer over de wissels en spoorwegovergang in de nabijheid van het plangebied wordt in een aantal bouwdelen een overschrijding van de streefwaarden voor trillingshinder verwacht. Bij sommige bouwdelen is het afhankelijk van de constructieve uitwerking van de gebouwen of er daadwerkelijk sprake is van overschrijdingen.

In dit hoofdstuk beschrijven we de mogelijke maatregelen en bouwkundige optimalisaties waarmee de trillingen kunnen worden voorkomen.

## 5.1. NUT EN NOODZAAK VAN MAATREGELLEN

Voor de afweging van maatregelen geeft bijlage 5 van de SBR B-richtlijn handvatten. Deze bijlage classificeert de trillingen in het plangebied als *matige hinder*. Vervolgens geeft deze bijlage aan dat matige hinder kan worden geaccepteerd onder een aantal voorwaarden:

1. De mate waarin de trillingssterkte voorkomt. Hiervoor geldt dat de gemiddelde trillingssterkte  $V_{per}$  een goede indicatie is. De gemiddelde trillingssterkte in het plangebied is vrijwel overal lager dan de streefwaarde, uitgezonderd in het bouwdeel dichtbij de spoorwegovergang, in het geval van een qua trillingen niet optimale bouw. In dit meest noordelijke bouwdeel en in het meest zuidelijke bouwdeel gaat het om meer dan 1 overschrijding per dag, in de andere drie bouwdelen om minder dan 1 overschrijding per dag.
2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. Hiervoor geldt dat de trillingen van wegverkeer lager zijn dan van het treinverkeer, alleen incidenteel zorgt zwaar vrachtverkeer over de spoorwegovergang Lycklamaweg voor trillingen die vergelijkbaar zijn aan die van het treinverkeer. Van een maskerend effect is dus niet echt sprake.
3. De mogelijkheid tot het treffen van reducerende maatregelen. Het is conform bestaande jurisprudentie gebruikelijk om hierbij een afweging te maken tussen de kosten en het effect van de maatregelen, maar ook aspecten als duurzaamheid en impact op de omgeving kunnen worden meegenomen in deze afweging.

Omdat voorwaarde 2 niet van toepassing is, en voorwaarde 1 ook niet altijd en voor alle bouwdelen, geldt dus dat de matige hinder in het plangebied niet zonder meer kan worden geaccepteerd. Daarom gaan we hierna in op maatregelen om de trillingen te reduceren. Om effectieve maatregelen te treffen, stellen we eerst vast bij welke trillingsfrequenties vooral hoge trillingen optreden. Daarna gaan we in op maatregelen die mogelijk zijn aan de trillingsbron (de trein of het spoor), maatregelen in de bodem en maatregelen aan de gebouwen. Daarbij bespreken we ook bouwkundige optimalisaties.

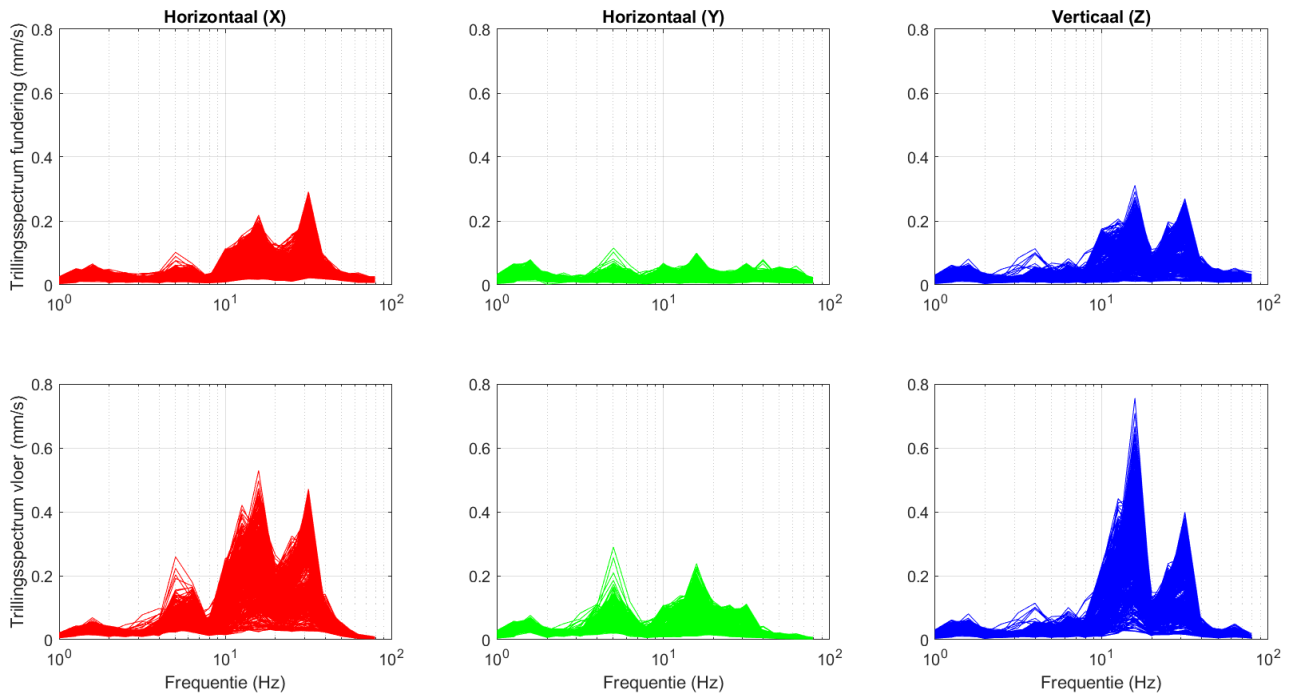
## 5.2. ANALYSE RESULTATEN

Om te bepalen welke trillingsrichting en trillingsfrequenties in de gebouwen maatgevend zijn, is een nadere analyse uitgevoerd van de verwachte trillingen, zie Figuur 11. In deze figuur is de trillingssnelheid per treinpassage weergegeven als tertsbandspectrum op de fundering en de hoogste verdieping van het bouwdeel nabij de spoorwegovergang. Hieruit kan worden afgeleid bij welke frequentie en in welke trillingsrichting de trillingen het hoogst zijn.

Uit Figuur 11 volgt dat de hoogste trillingen optreden in verticale richting, en daarnaast in de horizontale X-richting (loodrecht op het spoor). De trillingen zijn vooral hoog tussen de 10 en 40



Hz. Deze hoge trillingen zijn vooral afkomstig van de ES-lassen en de overweg, en worden in het gebouw versterkt door de eigenfrequenties van wanden en vloeren. Maatregelen en optimalisaties moeten vooral effectief zijn tegen de trillingen tussen 10 en 40 Hz.



Figuur 11 Verwachte trillingen op fundering (boven) en op hoogste verdieping (onder)

In de volgende subparagrafen wordt ingegaan op mogelijke maatregelen aan de trillingsbron, in de bodem of aan de gebouwen.

### 5.3. MAATREGELEN AAN DE TRILLINGSBRON

De meest effectieve manier om de trillingen te reduceren, is het nemen van maatregelen aan de trillingsbron (het spoor of de treinen). Effectieve maatregelen zijn bijvoorbeeld het verwijderen of verplaatsen van het wissel en de overweg (vervangen door onderdoorgang), het significant verlagen van de rijnsnelheid van de treinen, het toepassen van een betonplaat met ballastmat onder het spoor of het aanbrengen van under sleeper pads. Andere maatregelen aan het spoor zijn minder effectief of niet inpasbaar.

Nadeel van maatregelen aan het spoor zijn de hoge kosten hiervan (m.n. doordat een buitendienststelling nodig is), bovendien vallen deze maatregelen buiten het plangebied. Ook zijn niet alle genoemde maatregelen effectief of toepasbaar voor alle bouwdelen:

- Het verwijderen of verplaatsen van het overloopwissel beperkt de robuustheid van de dienstregeling, en is vermoedelijk niet bespreekbaar voor ProRail.
- Het vervangen van de overweg door een onderdoorgang is zeer kostbaar.
- Het verlagen van de rijnsnelheid (m.n. voor intercity's) heeft teveel effect op de robuustheid van de dienstregeling en de reistijden, en is vermoedelijk niet bespreekbaar voor ProRail.
- Under sleeper pads zijn geen toereikende oplossing voor het gebouw rond de overweg, omdat het effect te klein is en omdat de overgangen in de stijfheid van de baan daarmee niet kunnen worden weggenomen.

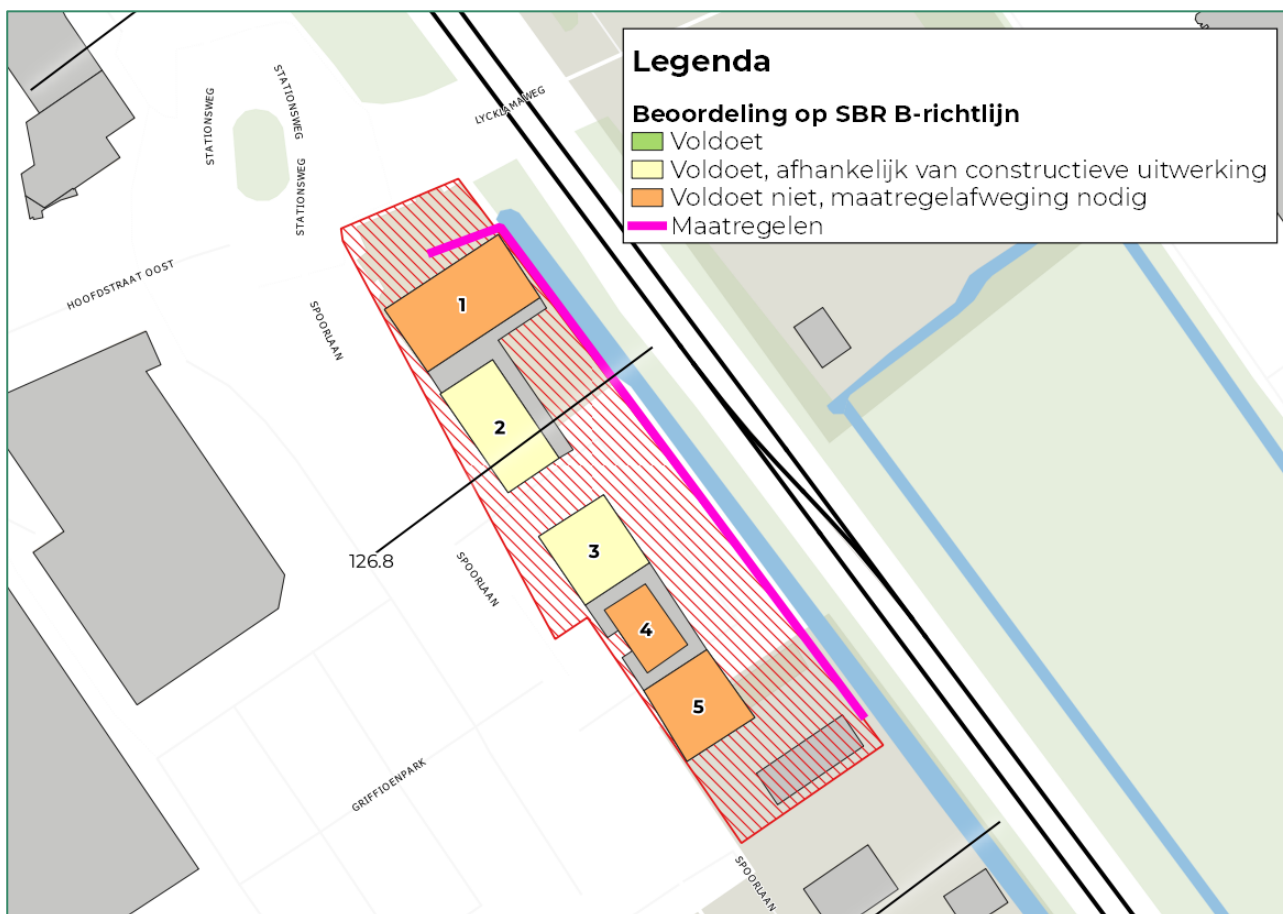


De meest effectieve maatregel is een betonplaat met ballastmat onder beide sporen, over een lengte van ca. 150 meter per spoor. De kosten van deze maatregel bedragen ca. € 1.5 tot € 2.3 mln<sup>2</sup>. Kosten voor tijdelijk vervoer van treinreizigers en herstel van de omgeving zijn hierin niet meegenomen.

## 5.4. MAATREGELEN IN DE BODEM

Bij maatregelen in de bodem kan gedacht worden aan het toevoegen van obstakels in de bodem, die ervoor zorgen dat de gebouwen worden afgeschermd. Voorbeelden zijn het toevoegen van een trillingsscherm van piepschuim (EPS), beton, jet-grout (soil-mix methode voor beton), het verdiepen van de bestaande spoorloot of het aanbrengen van een damwand. Nadeel van deze maatregelen is dat deze vaak hoge kosten met zich meebrengen en dat ze (met uitzondering van een diepere spoorloot) niet aanpasbaar zijn aan toekomstige situaties.

Een trillingsscherm is alleen effectief dicht bij de bron of dicht bij de ontvanger. Gezien de omvang van het plangebied is alleen een locatie dichtbij het spoor voor de hand liggend, aan de westzijde van de huidige spoorloot. De maatregel komt dan wel in de vergunningsplichtige zone van ProRail (tot 10 meter uit buitenste spoorstaaf). Om het plangebied af te schermen, is een trillingsscherm van ca. 150 meter lengte nodig, zie Figuur 12.



Figuur 12 Locatie van mogelijk trillingsscherm

<sup>2</sup> Ter indicatie: ProRail hanteert bij doelmatigheidsafwegingen een bedrag van € 47.000 per adres

De diepte van een scherm moet, gezien de dominante trillingsfrequenties, voor veel schermtypes minimaal 15 meter diep zijn om echt effectief te zijn. Mogelijke maatregelen in de bodem met een inschatting van het effect en de kosten zijn weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5 Mogelijke maatregelen in de bodem, effect op trillingen en kosten

Maatregel	Effect	Kosten <sup>3</sup>
Betonnen wand (diepwandmethode)	25 – 50%	€ 2.0 – 3.1 mln
Jet-grout wand	20 – 35%	€ 1.7 – 2.8 mln
Damwand (intrillen)	5 – 10%	€ 0.9 – 1.4 mln
Betonnen wand, bekleed met rubber	45 – 80%	€ 2.6 – 4.2 mln
Damwand met EPS (piepschuim)	25 – 40%	€ 1.3 – 2.2 mln
Damwand met sleuf (luchtspouw)	20 – 40%	€ 1.7 – 2.7 mln
L-wand 4.0 m diep	5 – 20%	€ 0.2 – 0.4 mln
L-wand 4.0 m diep, bekleed met rubber	10 – 30%	€ 0.4 – 0.7 mln
CSM-wand (Cutter Soil Mix of Mix-In-Place)	5 – 10%	€ 1.1 – 1.8 mln
Trillingsscherm EPS (piepschuim), 1 m dik	15 – 25%	€ 0.2 – 0.4 mln
Spoorsloot verdiepen tot 2.5 m diep	10 – 25%	€ 0.1 – 0.2 mln
Spoorsloot 2.5 m diep, i.c.m. prefab L-wand, 4 m diep	20 – 35%	€ 0.2 – 0.4 mln

De minimaal (bij qua trillingen optimaal ontworpen constructie) en maximaal (bij qua trillingen slecht ontworpen constructie van het gebouw) benodigde reductie per bouwdeel is weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Benodigde reductie per bouwdeel

Bouwdeel	Benodigde reductie
1	43 – 55%
2	0 – 11%
3	0 – 25%
4	24 – 42%
5	32 – 47%

Voor bouwdeel 1 geldt dat alleen een betonnen trillingsscherm van 15 meter diep en 0.5 meter dik, bekleed met 100 mm rubber tot minimaal 8 meter diepte, met zekerheid voldoende effectief is. De kosten van deze maatregel bedragen tussen de € 2.6 en 4.2 mln, en zijn daarmee mogelijk

<sup>3</sup> Totale investeringskosten, incl. BTW, prijspeil 2022, met een bandbreedte van +/-25%. Kosten zijn exclusief kosten voor grondverwerving, verleggen van kabels en leidingen en kosten voor een vergunningsprocedure. De werkelijke kosten van maatregelen zullen daardoor hoger uitvallen.



nog hoger dan maatregelen aan het spoor. Andere, goedkopere maatregelen zijn nog steeds relatief kostbaar, en minder effectief.

Tenslotte, voor al deze maatregelen geldt, net als bij maatregelen aan het spoor, dat ze deels buiten het plangebied dienen te worden getroffen en niet of slecht aanpasbaar zijn aan toekomstige situaties. Bovendien zijn de genoemde kosten exclusief kosten voor het verleggen van kabels en leidingen, vergunningverlening en herinrichten van de openbare ruimte op naastgelegen percelen. De totale kosten worden daarmee hoger.

## 5.5. MAATREGELLEN AAN DE GEBOUWEN

Tenslotte zijn ook maatregelen en optimalisaties aan de bebouwing mogelijk. Zeker in dit stadium van het plan is dat een optie die kosteneffectief kan zijn. Eerder zijn hiervoor al een aantal opties weergegeven. Mogelijke maatregelen zijn het toepassen van een ander constructieprincipe, het verzwaren van de vloeren of verkleinen van de beukmaat, een zwaardere constructie of fundering of het inpakken of afveren van de fundering door middel van stalen veren of een rubberen oplegging. Het globale effect en de kosten van de mogelijke maatregelen aan de woningen zijn weergegeven in Tabel 7.

Tabel 7 Mogelijke maatregelen aan de gebouwen, reductie t.o.v. kalkzandsteen constructie met 200 mm kanaalplaatvloeren

Maatregel	Effect	Kosten <sup>4</sup>
Toepassen van meer dempende materialen (zware houtskeletbouw)	10 – 20%	< 3% SK
Betonnen skelet i.p.v. kalkzandsteen	5 – 15%	< 1% SK
Toepassen breedplaat- i.p.v. kanaalplaatvloeren	5 – 10%	< 2% SK
Eigenfrequentie vloer < 8 Hz	0 – 5%	< 1% SK
Eigenfrequentie vloer 18 – 22 Hz	10 – 20%	< 2% SK
Ontkoppelen van de vloeren	5 – 15%	2 – 3% SK
Ontkoppelen van de fundering (afveren)	70 – 90%	6 – 10% SK
Inpakken van de fundering met 150 mm rubber	15 – 25%	2 – 4% SK
Afschermen van de fundering met 1 m dik EPS	20 – 35%	< 1% SK
Afschermen van de fundering met 2 m diepe L-wand	10 – 20%	< 1% SK
Palenfundering i.p.v. balkenfundering	5 – 15%	1 – 3% SK
Zwaardere fundering (dikkere en/of langere palen, betonplaat)	15 – 30%	3 – 5% SK

Meest effectief is het ontkoppelen van de fundering (toepassen van stalen veerdozen tussen de fundering en afgeveerd op een lage frequentie van maximaal 5 Hz, zie bijlage IV voor een voorbeelduitwerking). Hiermee zijn de trillingen in alle woningen te reduceren tot onder de streefwaarden. De kosten van deze maatregel bedragen tussen de € 9.000 en € 20.000 per appartement, en zijn daarmee hoog. In sommige bouwdelen kan ook worden volstaan met

<sup>4</sup> SK = Stichtingskosten



lichtere maatregelen, daarnaast is het in alle bouwdelen ook mogelijk om met een combinatie van goedkopere maatregelen te voldoen aan het beoordelingskader.

## 5.6. ADVIES VOOR MAATREGELEN

In het plangebied zijn overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder niet overal uit te sluiten. Dat komt vooral door de aanwezigheid van een wissel en een overweg in de nabijheid van het plangebied, in combinatie met de korte afstand tot het spoor. De hoogte van de trillingen is afhankelijk van de constructieve uitwerking van de gebouwen.

Op basis van dit onderzoek is per bouwdeel een advies gegeven voor maatregelen. In dit advies is, op basis van de paragrafen hiervoor, afgewogen welke maatregelen het meest kosteneffectief en realistisch zijn (bouwdeelnummers in eerste kolom corresponderen met bouwdeelnummers in Figuur 12).

- 1**
  - 1.** Vermijd lichte bouwtechnieken, zoals stalen constructies en lichte houtskeletbouw. Zware houtskeletbouw, bijv. met 300 x 100 mm balkenvloeren, hoh 400 mm, en zware kolommen en wandschijven is juist gunstig voor de trillingen.
  - 2.** Vermijd de **rood** en **geel** gearceerde vloertype-overspanning combinaties in Tabel 8.
  - 3.** Zorg voor voldoende horizontale stijfheid van het gebouw in de richting haaks op het spoor door de wanden dikker uit te voeren en het aantal openingen te beperken of de wanden in het werk te storten.

Met bovenstaande adviezen zijn er nog incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader (1 of 2 per week). Om te voldoen aan het beoordelingskader, zijn aanvullende maatregelen nodig. De meest kosteneffectieve oplossingen hiervoor is:

- Het aan de spoorzijde en noordzijde van het pand inpakken van de fundering (bijv. met 1000 mm dik EPS, of 250 mm dik rubber), tot ca. 500 mm onder onderkant fundering, of maak gebruik van een afschermend element (bijv. prefab L-wand met luchtsponw voor de fundering, tot ca. 1000 mm onder onderkant fundering).

- 2**
  - 1.** Vermijd lichte bouwtechnieken, zoals stalen constructies en lichte houtskeletbouw. Zware houtskeletbouw, bijv. met 300 x 100 mm balkenvloeren, hoh 400 mm, en zware kolommen en wandschijven is juist gunstig voor de trillingen.
  - 2.** Vermijd de **rood** gearceerde vloertype-overspanning combinaties in Tabel 8.

Met bovenstaande adviezen wordt voldaan aan het beoordelingskader.

- 3**
  - 1.** Vermijd lichte bouwtechnieken, zoals stalen constructies en lichte houtskeletbouw. Zware houtskeletbouw, bijv. met 300 x 100 mm balkenvloeren, hoh 400 mm, en zware kolommen en wandschijven is juist gunstig voor de trillingen.
  - 2.** Vermijd de **rood** gearceerde vloertype-overspanning combinaties in Tabel 8.
  - 3.** Zorg voor voldoende horizontale stijfheid van het gebouw in de richting haaks op het spoor door de wanden dikker uit te voeren en het aantal openingen te beperken of de wanden in het werk te storten.

Met bovenstaande adviezen wordt voldaan aan het beoordelingskader.

- 4**
  - 1.** Vermijd lichte bouwtechnieken, zoals stalen constructies en lichte houtskeletbouw. Zware houtskeletbouw, bijv. met 300 x 100 mm balkenvloeren, hoh 400 mm, en zware kolommen en wandschijven is juist gunstig voor de trillingen.
  - 2.** Vermijd de **rood** en **geel** gearceerde vloertype-overspanning combinaties in Tabel 8.



3. Zorg voor voldoende horizontale stijfheid van het gebouw in de richting haaks op het spoor door de wanden dikker uit te voeren en het aantal openingen te beperken of de wanden in het werk te storten.

Met bovenstaande adviezen zijn er nog incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader (1 of 2 per week). Om te voldoen aan het beoordelingskader, zijn aanvullende maatregelen nodig. De meest kosteneffectieve oplossingen hiervoor zijn:

- Het aan de spoorzijde van het pand inpakken van de fundering (bijv. met 500 mm dik EPS, of 150 mm dik rubber), tot ca. 500 mm onder onderkant fundering, of maak gebruik van een afschermend element (bijv. prefab L-wand met luchtsponw voor de fundering, tot ca. 1000 mm onder onderkant fundering).
- Het verzwaren van de fundering van het pand, bijvoorbeeld door het toepassen van een 500 mm dikke plaatfundering, een lange paalfundering (350 x 350 mm, 15 meter lang) of een kelder.
- Het plaatsen van een prefab L-wand van 4 meter hoog op de westelijke rand van de spoorloot, en verdiepen van de spoorloot tot minimaal 2.5 meter diepte.

- 5
  1. Vermijd lichte bouwtechnieken, zoals stalen constructies en lichte houtskeletbouw. Zware houtskeletbouw, bijv. met 300 x 100 mm balkenvloeren, hoh 400 mm, en zware kolommen en wandschijven is juist gunstig voor de trillingen.
  2. Vermijd de rood en geel gearceerde vloertype-overspanning combinaties in Tabel 8.
  3. Zorg voor voldoende horizontale stijfheid van het gebouw in de richting haaks op het spoor door de wanden dikker uit te voeren en het aantal openingen te beperken of de wanden in het werk te storten.

Met bovenstaande adviezen zijn er nog incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader (1 of 2 per week). Om te voldoen aan het beoordelingskader, zijn aanvullende maatregelen nodig. De meest kosteneffectieve oplossingen hiervoor zijn:

- Het aan de spoorzijde van het pand inpakken van de fundering (bijv. met 750 mm dik EPS, of 200 mm dik rubber), tot ca. 500 mm onder onderkant fundering, of maak gebruik van een afschermend element (bijv. prefab L-wand met luchtsponw voor de fundering, tot ca. 1000 mm onder onderkant fundering).
- Het verzwaren van de fundering van het pand, bijvoorbeeld door het toepassen van een 750 mm dikke plaatfundering, een lange paalfundering (450 x 450 mm, 15 meter lang) of een kelder.
- Het plaatsen van een prefab L-wand van 4 meter hoog op de westelijke rand van de spoorloot, en verdiepen van de spoorloot tot minimaal 2.5 meter diepte.

Tabel 8 Gunstige en ongunstige combinaties van vloertype en overspanning

Overspanning	Kanaalplaatvloer 200	Kanaalplaatvloer 260	Kanaalplaatvloer 320	Breedplaatvloer 200	Breedplaatvloer 280	Breedplaatvloer 320	Hout, 300x100, hoh 400
5.0 meter	Geel	Groen	Groen	Geel	Groen	Groen	Groen
6.0 meter	Geel	Geel	Groen	Geel	Geel	Groen	Groen
7.0 meter	Rood	Geel	Geel	Rood	Geel	Geel	Groen
8.0 meter	Rood	Rood	Geel	Rood	Rood	Geel	Geel



Met bovenstaand stappenplan is een acceptabel woon- en leefklimaat ten aanzien van trillingen te garanderen in het gehele plangebied.

Meest effectief en robuust is, zoals eerder ook al genoemd, het afveren van de funderingen van de woningen. Hiervoor dienen de woningen met een dubbele fundering te worden uitgevoerd. Met deze maatregel zijn overschrijdingen in alle woningen in het plangebied weg te nemen, maar de maatregel kost tussen de € 9.000 en € 20.000 per appartement.

Tenslotte, het kan voorkomen dat optimalisaties en maatregelen niet doelmatig worden geacht, bijvoorbeeld omdat het plan dan niet uitvoerbaar wordt of te kostbaar is. Afhankelijk van de verwachte hinder, zoals beschreven in dit rapport, kan dan eventueel met een beroep op bijlage 5 worden gemotiveerd dat ook zonder maatregelen geen onaanvaardbaar woon- en leefklimaat ontstaat in de geplande woningen. Argumenten die gebruikt kunnen worden om te motiveren dat er dan geen maatregelen worden getroffen, kunnen zijn:

- Er is sprake van een beperkt aantal overschrijdingen, mits de woningen qua trillingen goed zijn ontworpen. Het gaat dan om minder dan 1 overschrijding per dag, en de gemiddelde trillingssterkte voldoet dan aan de streefwaarden.
- De trillingen voldoen weliswaar niet aan de strenge streefwaarden voor nieuwbouw uit de SBR B-richtlijn, maar wel aan de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties uit de SBR B-richtlijn. In de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties is een zekere mate van gewenning meegenomen.
- De woningen worden gerealiseerd in een zone dichtbij het spoor, waar nu ook al bebouwing is gerealiseerd die soms ook dicht bij het spoor staat. Het gaat bovendien om oudere, meer trillingsgevoelige bebouwing, waar de trillingen dus hoger zullen zijn dan in de nieuwe woningen. Ook zonder maatregelen tegen trillingen ontstaat in de geplande bebouwing daarom geen onacceptabele situatie: de trillingen zijn daar immers (veel) lager dan in andere, al bestaande bebouwing rond deze locatie.

## 5.7. ONZEKERHEDEN IN HET ONDERZOEK

Dit onderzoek kent een aantal onzekerheden, hiervoor geldt het volgende:

- Ten aanzien van de trillingsbron: de natuurlijke variatie als gevolg van spooronderhoud en de temperatuur kunnen zorgen voor zo'n 30% variatie in de trillingen, afhankelijk van de spoorconstructie en de bodemopbouw. Er is gemeten in een klimatologisch als normaal te typeren periode. Er is geen informatie bekend over de huidige status van de spoorligging, wel is bekend dat die vooral rond spoorwegovergangen vaak slechter is (zoals ook door de metingen in dit onderzoek lijkt te worden bevestigd, de trillingen zijn daar hoger). Door te meten op meerdere punten hebben we variaties waar mogelijk meegenomen in de analyse en berekeningen. Er is op basis van bovenstaande informatie geen reden om te twijfelen aan de representativiteit van de berekeningen voor de toekomstige trillingen.
- Ten aanzien van de bodem geldt dat met name op korte afstand tot het spoor variaties in de trillingen mogelijk zijn door lokale variaties in de bodem. Door op meerdere punten te meten is de invloed van deze variaties meegenomen in de berekeningen. Bovendien is op diverse afstanden van het spoor gemeten. De invloed van de onzekerheid in de bodem is daarmee meegenomen in de analyse, de impact op de resultaten is daardoor beperkt.
- Ten aanzien van de gebouwen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en definitief ontwerp). Bovendien is





het dynamische gedrag van bijvoorbeeld beton afhankelijk van de mate van gescheurdheid van het beton en zijn er natuurlijke variaties in materiaalgedrag (van bijvoorbeeld hout, metselwerk en beton). In de berekeningen is gerekend met een verwachtingswaarde van de trillingen op basis van een aan de hand van praktijkmetingen geïjkt rekenmodel. Hiermee wordt een resultaat verkregen dat representatief is voor de toekomstige situatie.

Bovenstaande onzekerheden hebben geen significante invloed op de conclusies van dit onderzoek.

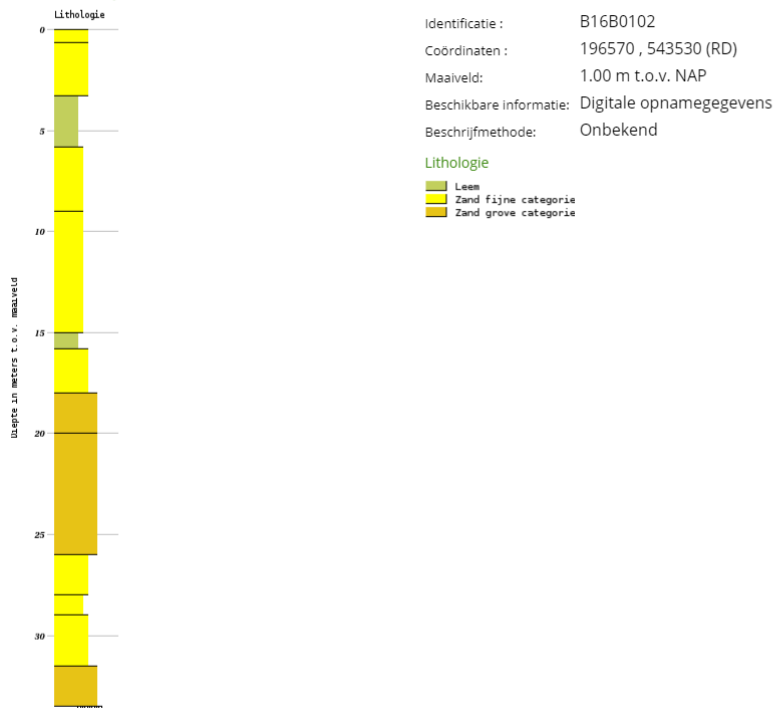


# GRONDONDERZOEK

Deze bijlage bevat geotechnische achtergrondinformatie. Deze informatie is gebruikt om bijvoorbeeld de uitdemping van de trillingen met de afstand te bepalen. Daarnaast is deze informatie gebruikt in het rekenmodel waarmee de dynamische eigenschappen van de bebouwing worden bepaald.

Een grondboring in de nabijheid van het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur 13. De bodem is vooral opgebouwd uit zandlagen, met hier en daar een leemlaag. Door dit stijve zandpakket dempen de trillingen relatief slecht uit met de afstand.

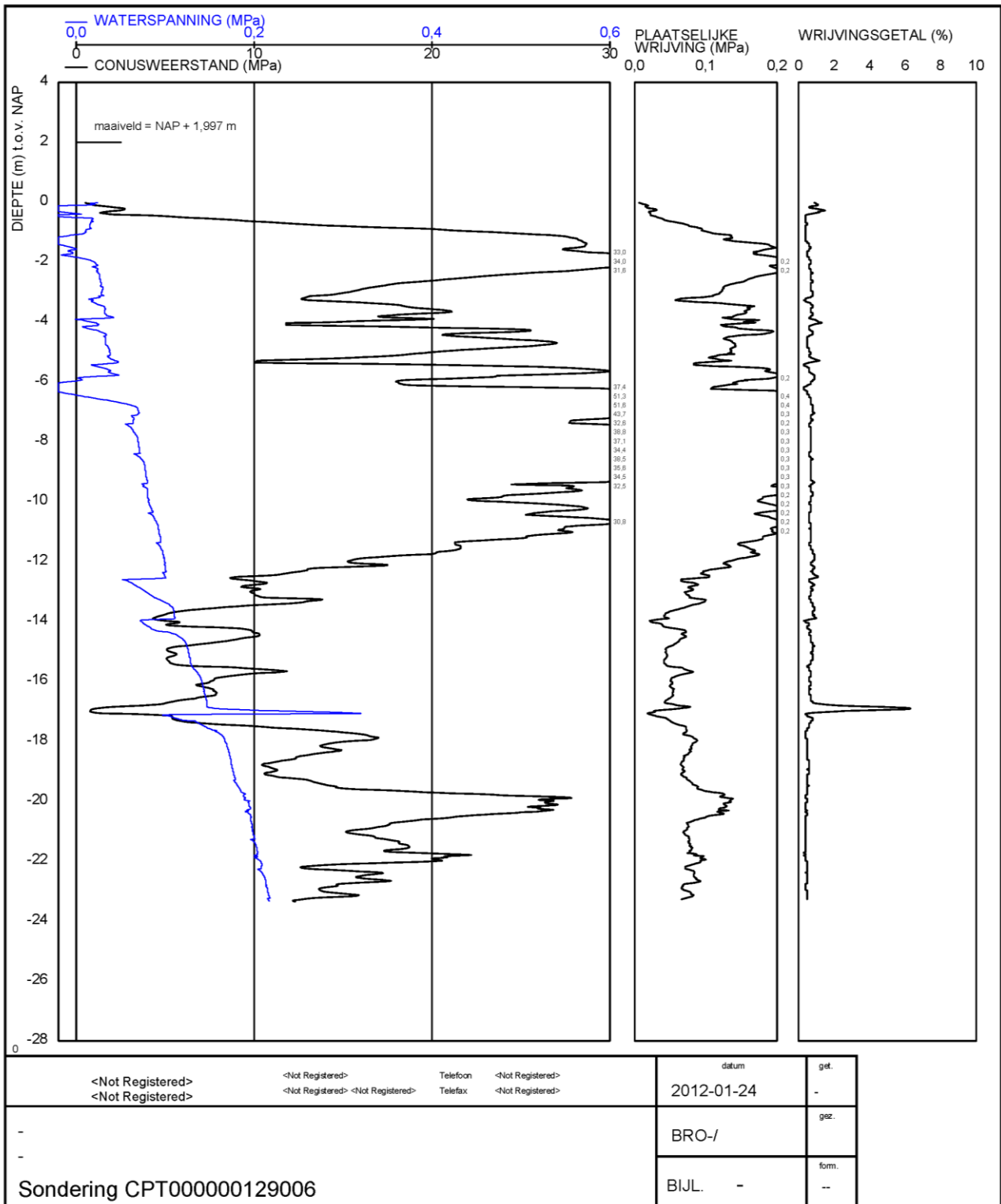
## Boormonsterprofiel



Figuur 13 Boring in het onderzoeksgebied

Een representatieve sondering uit het onderzoeksgebied, waarin onder meer de conusweerstand te zien is, is weergegeven in Figuur 14. Ook hier is de relatief stijve bodemopbouw te zien.





Figuur 14 Sondering nabij het onderzoeksgebied

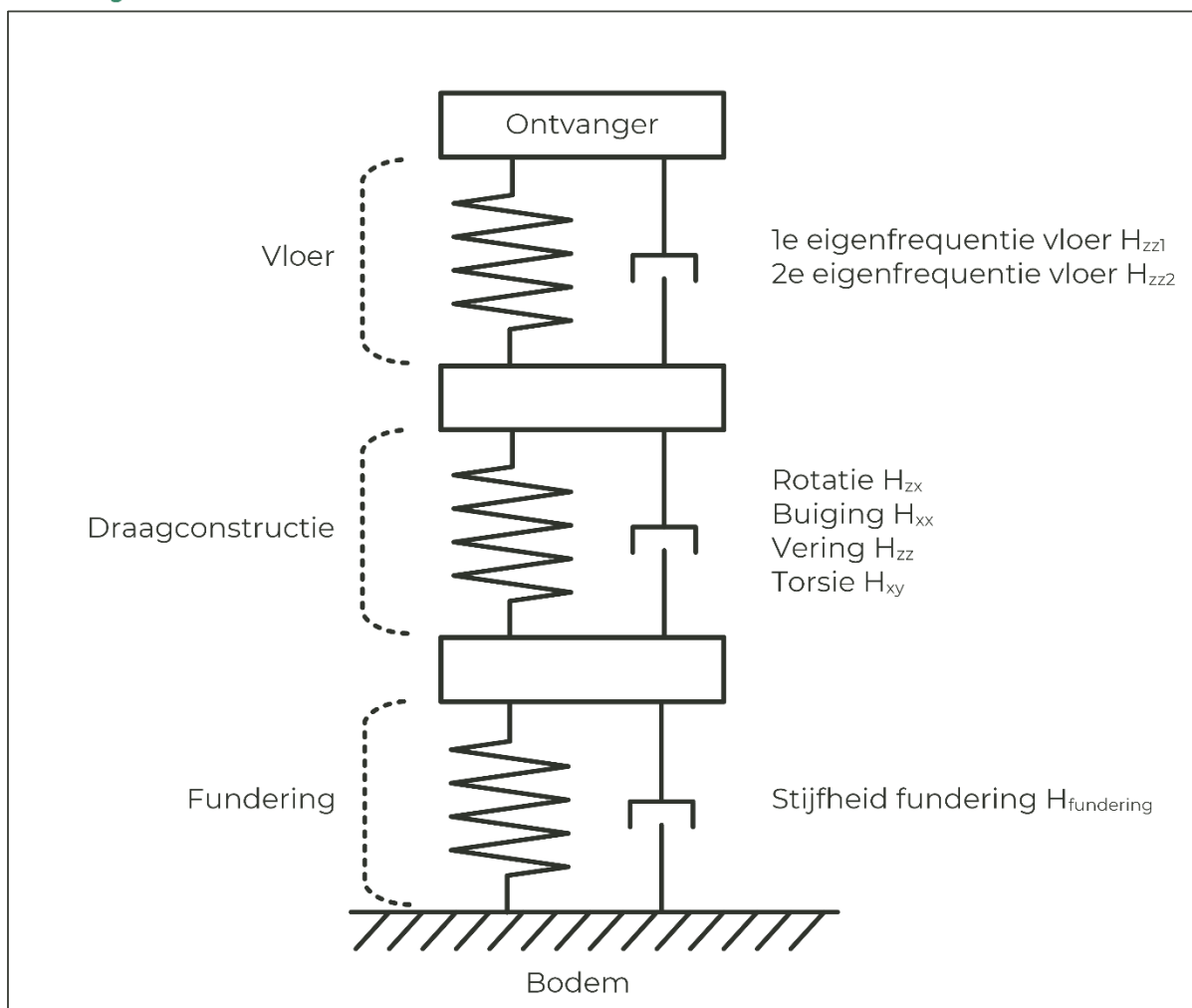


# REKENMODEL

In dit rapport is gebruik gemaakt van het rekenmodel Buildyn om de trillingen in de geplande bebouwing te berekenen. Buildyn is een zogenaamd beam-element model (BEM) waarin een gebouw gemodelleerd en doorgerekend wordt. Dit model is gekalibreerd met meer dan 600 praktijkmetingen, met behulp van een slim algoritme. Door die combinatie van een slim algoritme en een grote hoeveelheid praktijkdata, verkrijgen we een nauwkeurigheid die doorgaans significant beter is dan een Eindige Elementenmodel, omdat de resultaten sterk leunen op de praktijk (terwijl een Eindige Elementenmodel zeer gevoelig is voor de gebruikte input t.a.v. bijv. demping en stijfheden).

In Buildyn wordt een gebouw gemodelleerd door middel van gekoppelde massa-veersystemen, zie Figuur 15. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 15, worden in deze bijlage nader toegelicht. Afhankelijk van de constructie van het gebouw wordt de draagconstructie als één (lage bebouwing, starre bebouwing), of als meerdere elementen (hoge bebouwing, slappere bebouwing) gemodelleerd.

Buildyn



Figuur 15 Principe van Buildyn met een gebouw als gekoppeld massaveersysteem. Rechts de verschillende componenten van het rekenmodel



## FUNDERING

De fundering van een gebouw kan de trillingen uitdempen. De invloed van de fundering op de trillingen is afhankelijk van een aantal parameters:

- Type fundering (op staal, op palen, oude strokenfundering) en afmetingen daarvan
- Afmetingen en gewicht van het gebouw
- Bodem waarop het gebouw staat

Vooraf boven de 10 Hz worden trillingen uitgedempt door de fundering, bij slappe bodems en grote gebouwen kan ook al bij lagere frequenties demping optreden.

In Buildyn wordt de invloed van de stijfheid van het gebouw als geheel (de zogenaamde rigid-body-mode) verdisconteerd in de stijfheid van de fundering. Overige stijfheidseffecten worden meegenomen in het gedrag van de draagconstructie.

## DRAAGCONSTRUCTIE

De trillingen worden door de draagconstructie vaak versterkt. Hierbij zijn meerdere effecten te onderscheiden, waarbij met name rotatie van het gebouw als geheel (op de ondergrond), doorbuiging en vering van het gebouw op zijn fundatie een rol spelen. Bij hogere of slappere gebouwen speelt ook doorbuiging en torsie (rotatie om een verticale as in het gebouw) een rol.

Het principe van rotatie is rechts weergegeven. Verticale trillingsgolven zorgen voor rotatie van het gebouw, waardoor met name in hogere gebouwen horizontale trillingen ontstaan.

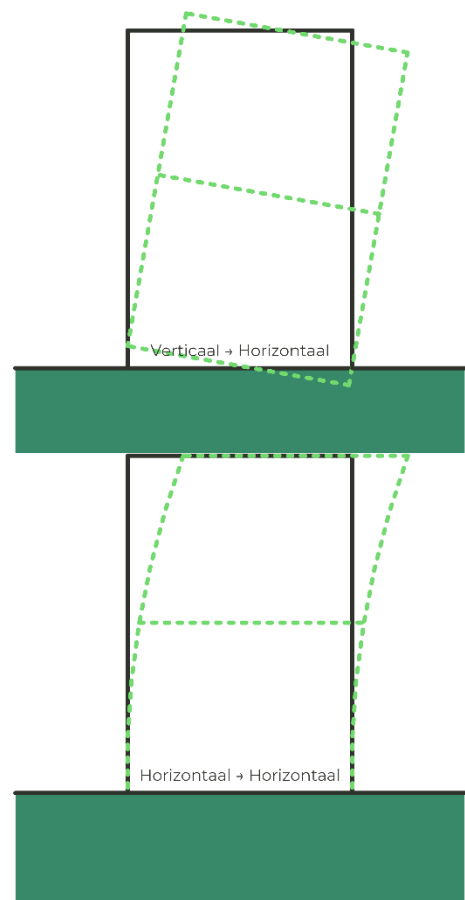
Dit effect noemen we  $H_{zx}$ , en is afhankelijk van:

- Afmetingen van het gebouw (breedte, lengte, hoogte)
- Gewicht van het gebouw
- Type en gewicht van de fundering
- Stijfheid van de ondergrond

Het tweede principe, dat van doorbuiging van het gebouw, is rechts weergegeven. Hierbij zijn met name de horizontale trillingsgolven maatgevend, die bij slappere gebouwen zorgen voor doorbuiging van het gebouw, en daarmee voor horizontale trillingen hoger in het gebouw.

Dit effect noemen we  $H_{xx}$ , en is afhankelijk van:

- Afmetingen van het gebouw
- Constructietype (stijfheid, starheid van verbindingen, open ruimtes)
- Gebruikte materialen

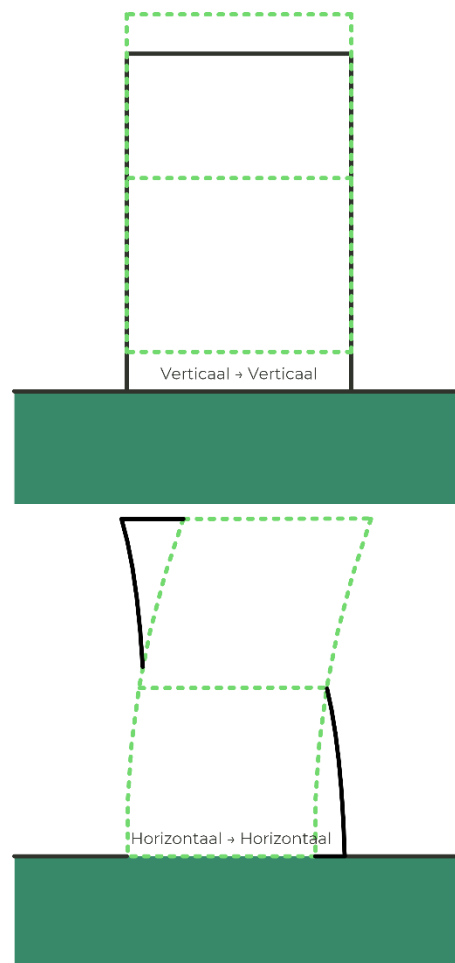


Het derde principe, dat van vering van het gebouw op zijn fundatie, is rechts weergegeven. Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappe onderlaag of lokaal slappere elementen (denk aan kolommen en balkenstructuren). Dit effect noemen we  $H_{zz}$ , en is afhankelijk van:

- Hoogte van het gebouw
- Constructietype (stijfheid, starheid van verbindingen, open ruimtes)

Het vierde principe, dat van torsie van het gebouw, is rechts weergegeven. Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappere constructie. Dit effect noemen we  $H_{xy}$ , en is afhankelijk van:

- Hoogte van het gebouw
- Constructietype (stijfheid, starheid van verbindingen, open ruimtes)
- Afmetingen van het gebouw (symmetrie)



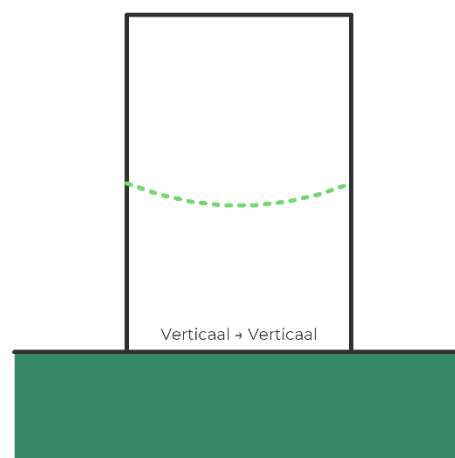
## VLOEREN

Trillingen worden doorgaans als maatgevend ervaren in het midden van de vloeren, waar de doorbuiging het grootst is en de laagste eigenfrequentie optreedt. In specifieke gevallen, met name op stijve zandgronden en bij hoge trillingsfrequenties, kan ook de zogenaamde tweede buigmodus van een vloer een rol spelen. In Buildyn worden daarom beide effecten gemodelleerd.

De eerste buigmodus van de vloer (bij de eerste eigenfrequentie) is simpele doorbuiging, zoals weergegeven in de principeschets rechts. Met name de eigenfrequentie (de frequentie waarvoor de vloer gevoelig is) en de demping bepalen in hoeverre de trillingen worden opgeslingerd. De trillingen zijn het hoogst in het midden van de vloer.

Dit effect noemen we  $H_{zz1}$ , en is afhankelijk van:

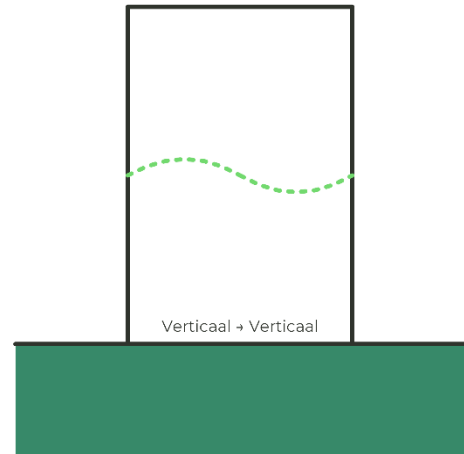
- Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- Afmetingen van de vloer
- Type oplegging



Bij de tweede buigmodus van de vloer (bij de tweede eigenfrequentie) zijn de trillingen maximaal op ongeveer  $\frac{1}{4}$  van het vloerveld, zie de principeschets rechts.

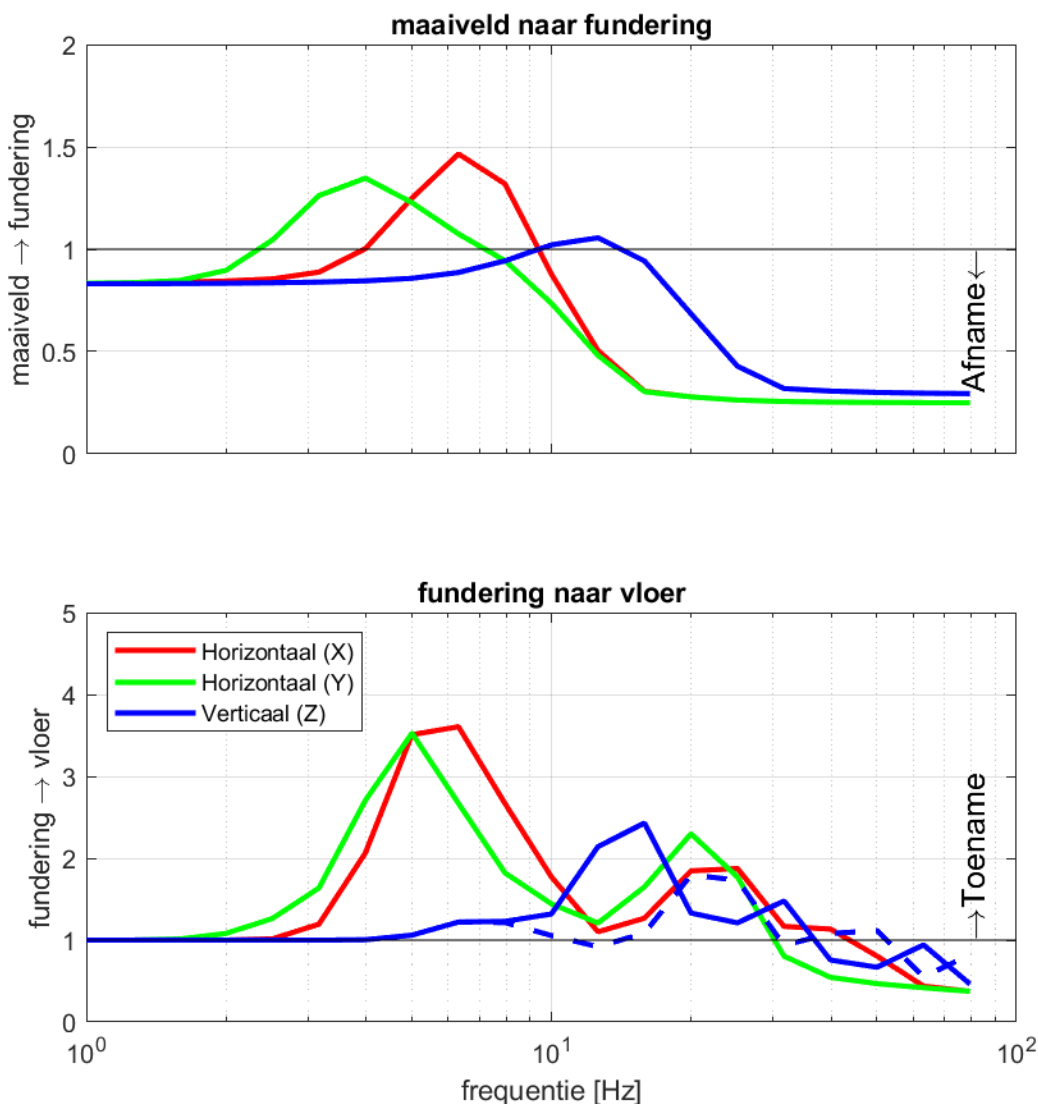
Dit effect noemen we  $H_{zz2}$ , en is afhankelijk van dezelfde parameters als  $H_{zz1}$ .

Uiteindelijk zorgen alle gebouwbevingen samen voor een versterking van de trillingen tussen de fundering en de vloer. In de hierna volgende figuren zijn deze totale overdrachten in de X-, Y- en Z-richting van het gebouw weergegeven. Voor de vloeren wordt onderscheid gemaakt tussen de  $H_{zz1}$  en de  $H_{zz2}$ -beweging, omdat beide niet op hetzelfde punt kunnen optreden ( $H_{zz1}$  is maximaal in het midden van de vloer,  $H_{zz2}$  op een kwart van de randen).



## RESULTATEN

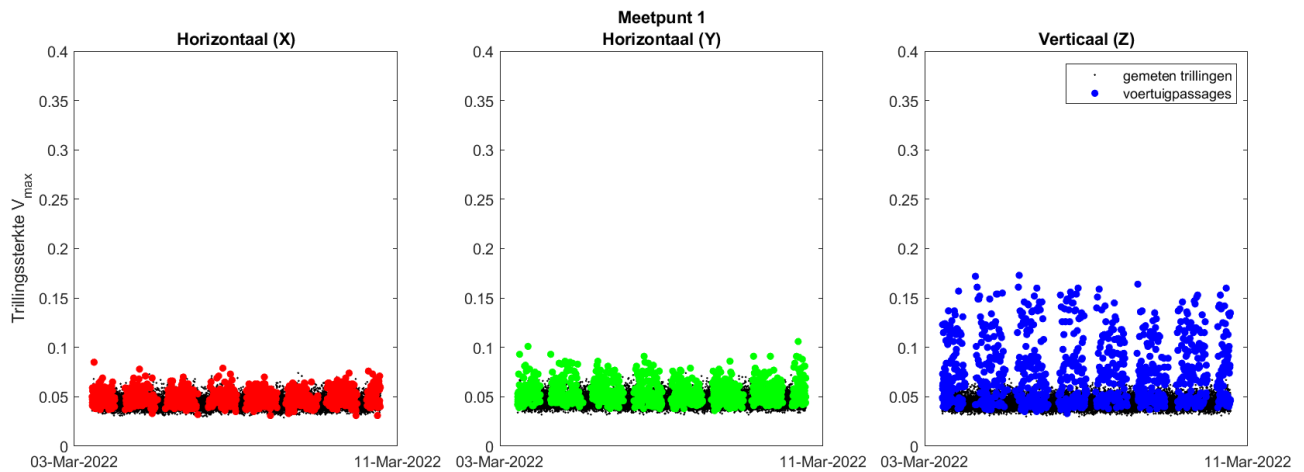
Ter illustratie zijn de resultaten uit de Buildyn-berekeningen voor het maatgevende punt op de hoogste verdieping weergegeven in Figuur 16.



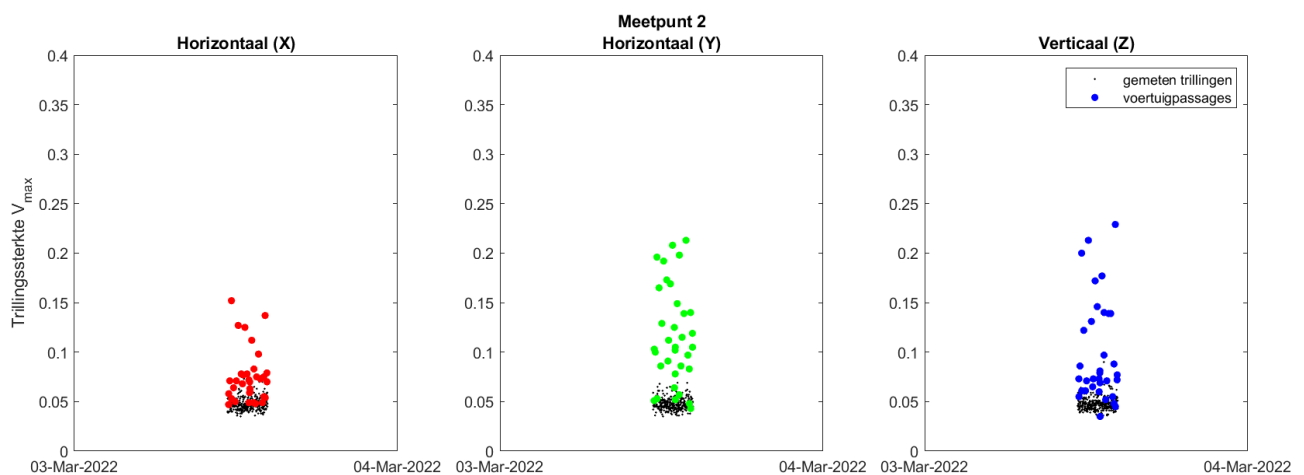
Figuur 16 Buildyn-resultaten voor bovenste verdieping, 5 m beukmaat, 200 mm kanaalplaatvloer. Doorgaande lijn verticaal is midden vloer, onderbroken lijn is op  $\frac{1}{4}$  en  $\frac{3}{4}$  van overspanning

# RESULTATEN METINGEN

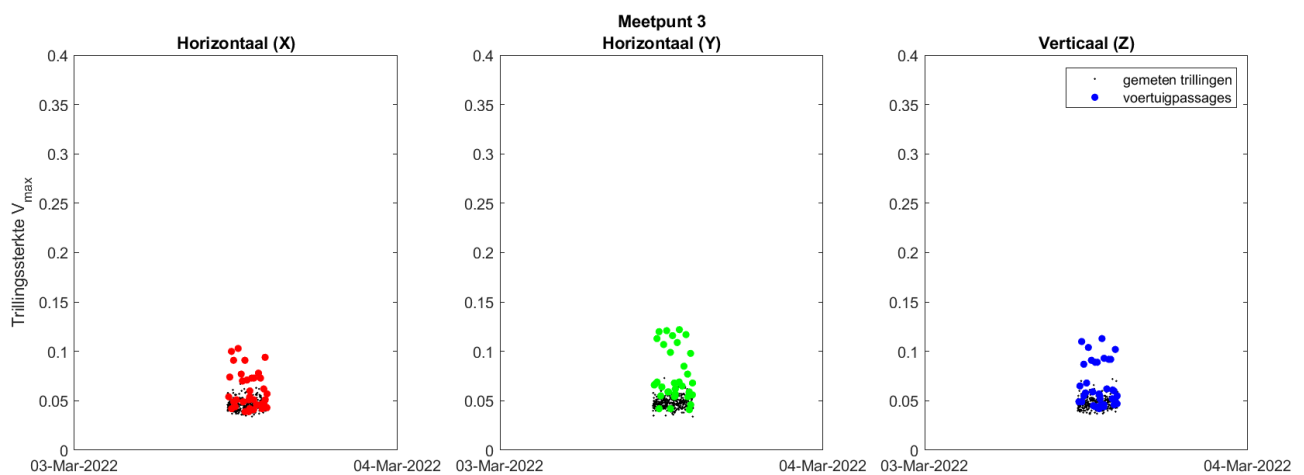
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



Figuur 17 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (fundering bestand gebouw)



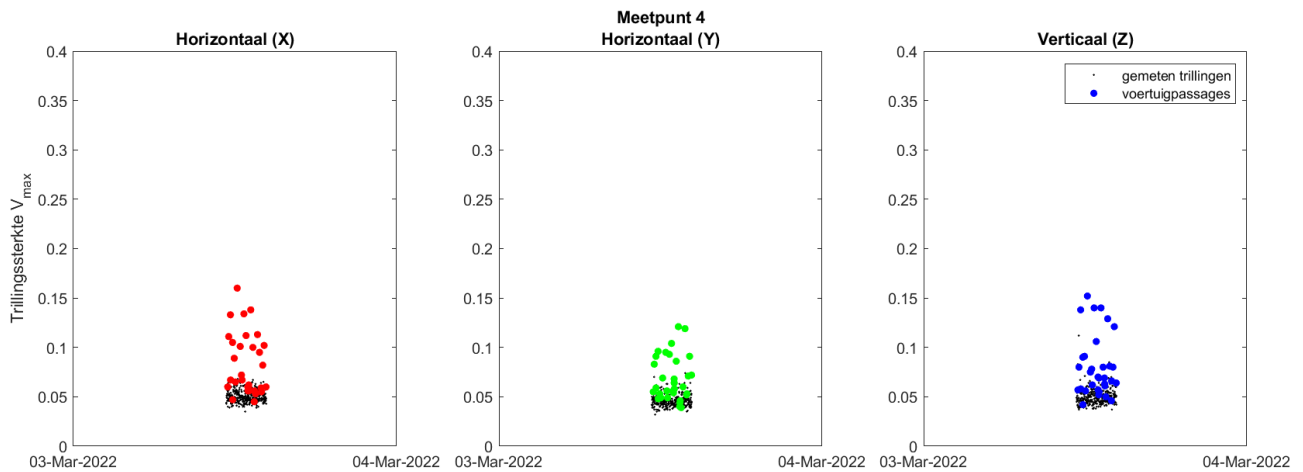
Figuur 18 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (maaiveld, nabij funderingspunt, 14 meter van spoor)



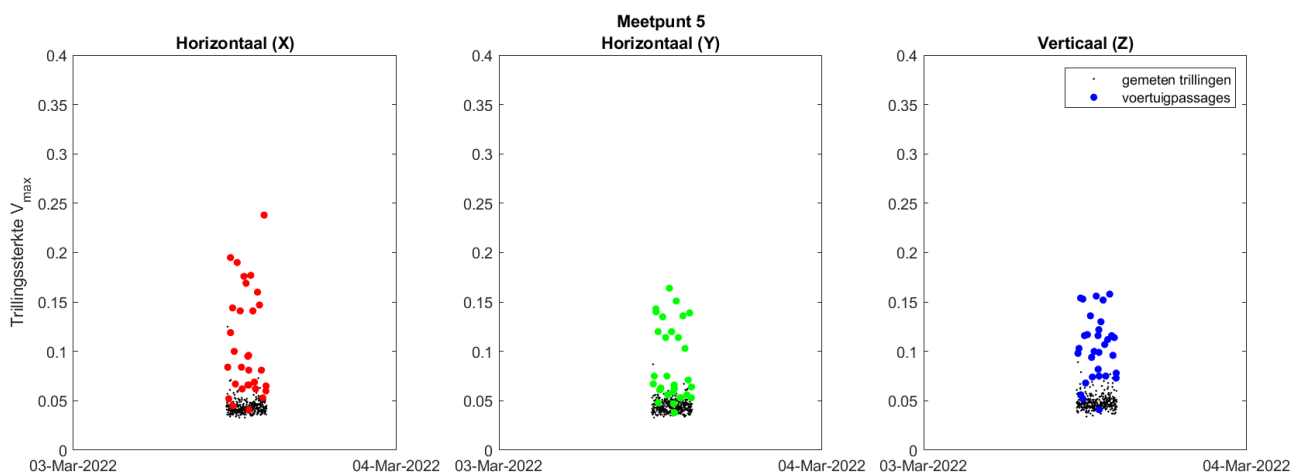
Figuur 19 Gemeten trillingen bij meetpunt 3 (maaiveld, 26 meter van spoor)



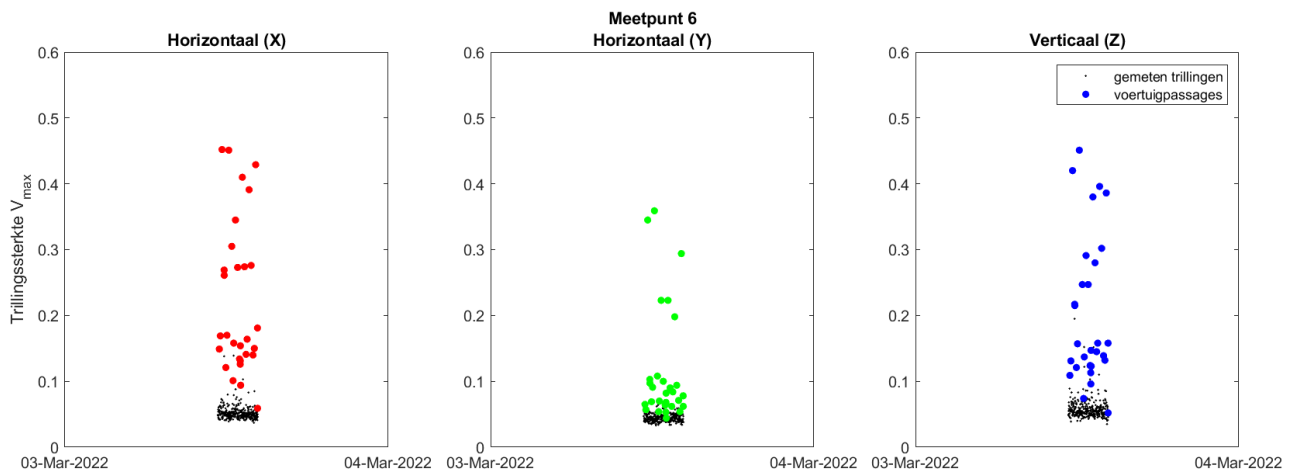




Figuur 20 Gemeten trillingen bij meetpunt 4 (maaiveld, 28 meter van spoor)

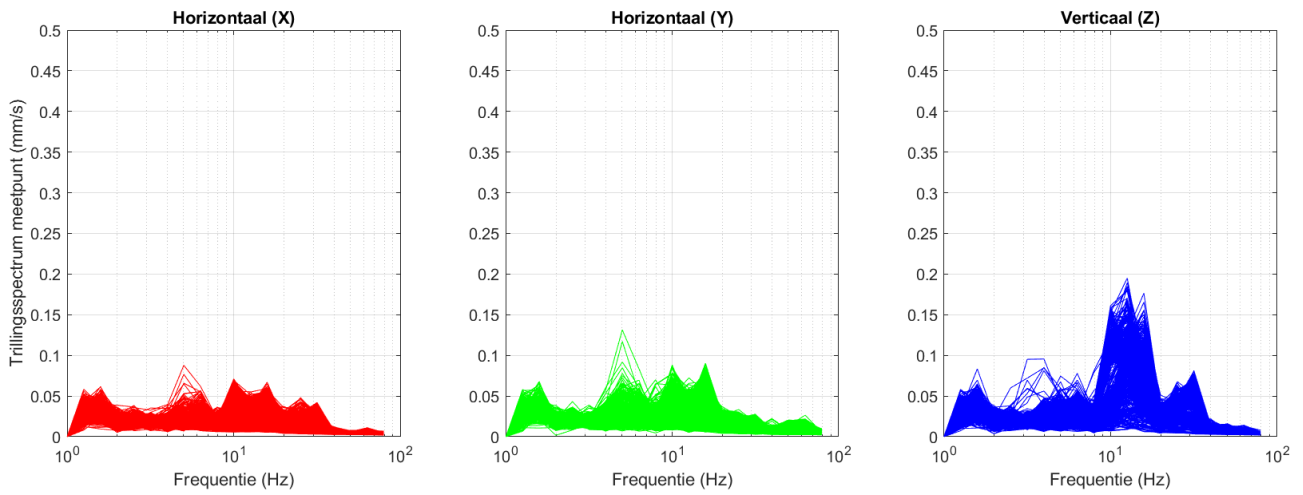


Figuur 21 Gemeten trillingen bij meetpunt 5 (maaiveld, 28 meter van spoor)

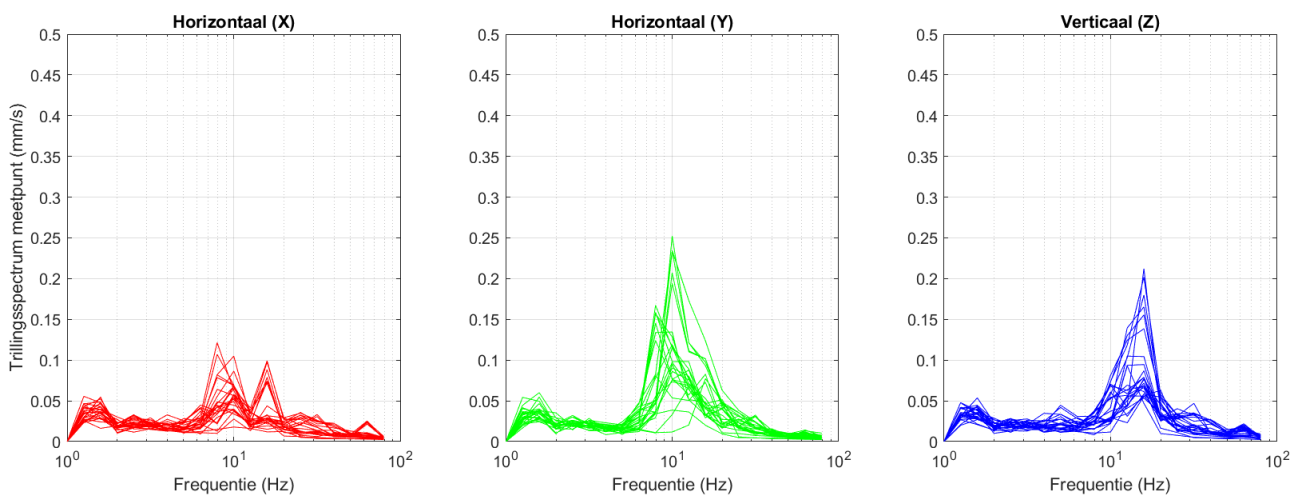


Figuur 22 Gemeten trillingen bij meetpunt 6 (maaiveld, dichtbij spoorwegovergang)

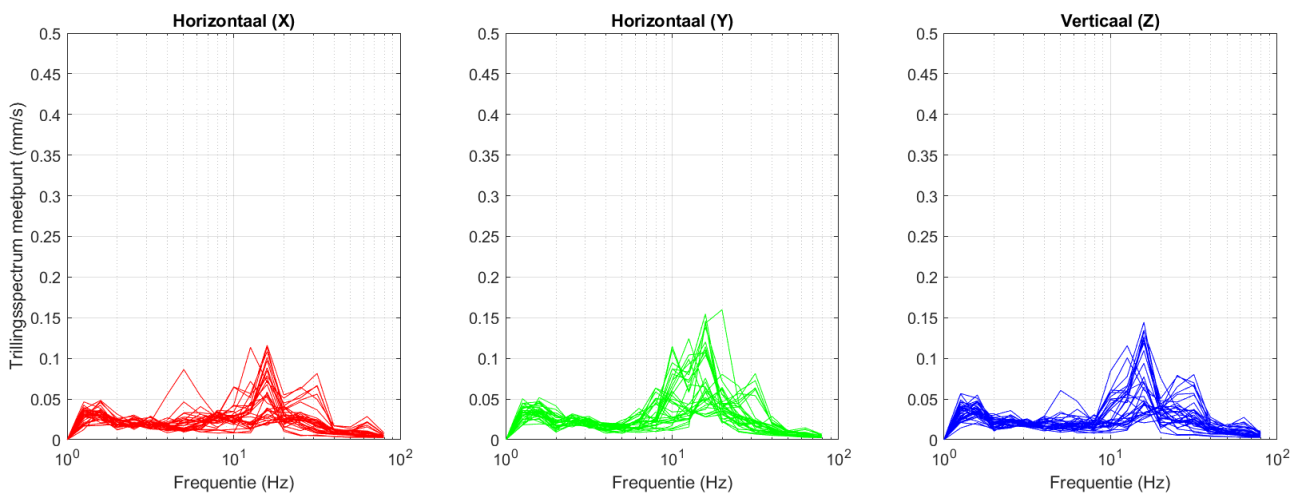




*Figuur 23 Tertsbandspectra bij meetpunt 1*

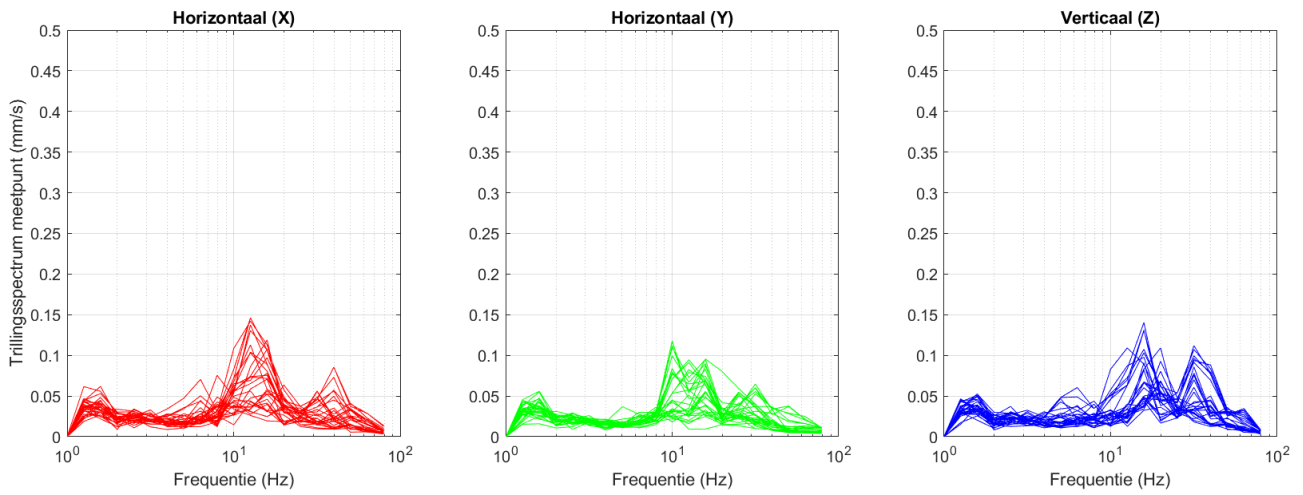


*Figuur 24 Tertsbandspectra bij meetpunt 2*

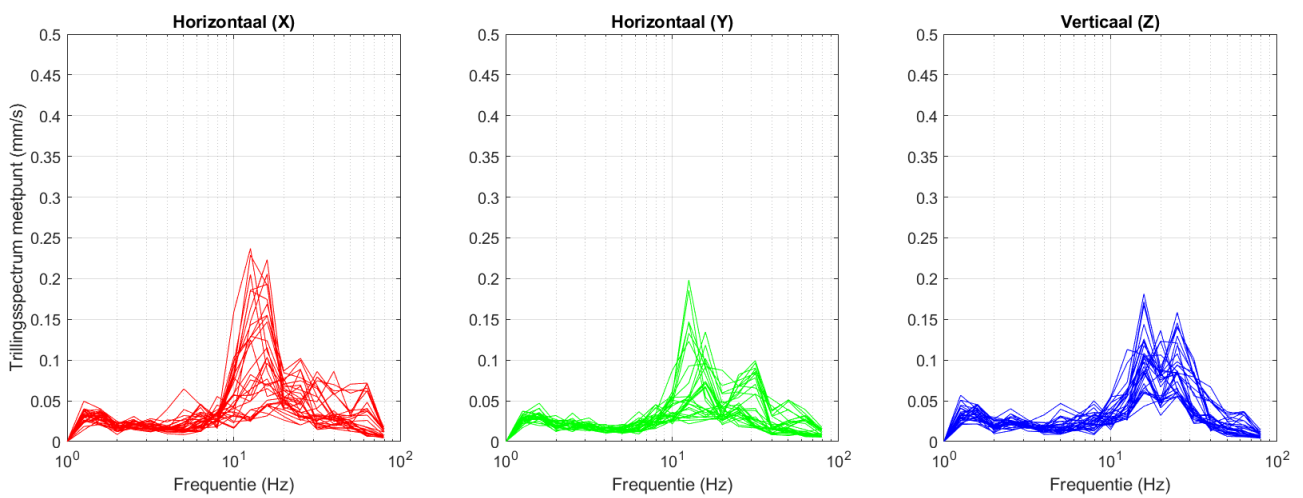


*Figuur 25 Tertsbandspectra bij meetpunt 3*

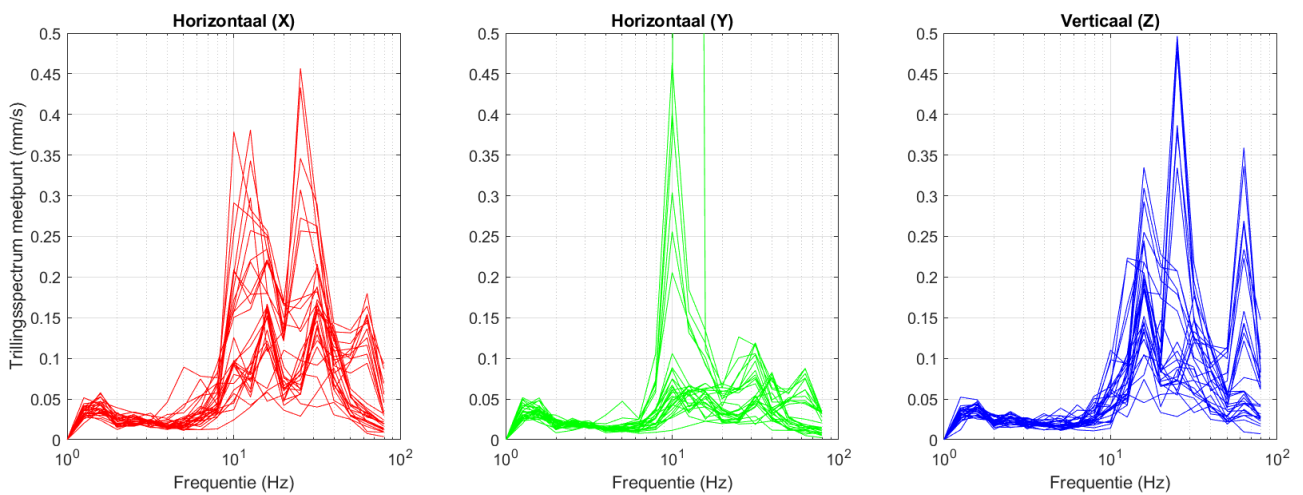




*Figuur 26 Tertsbandspectra bij meetpunt 4*



*Figuur 27 Tertsbandspectra bij meetpunt 5*



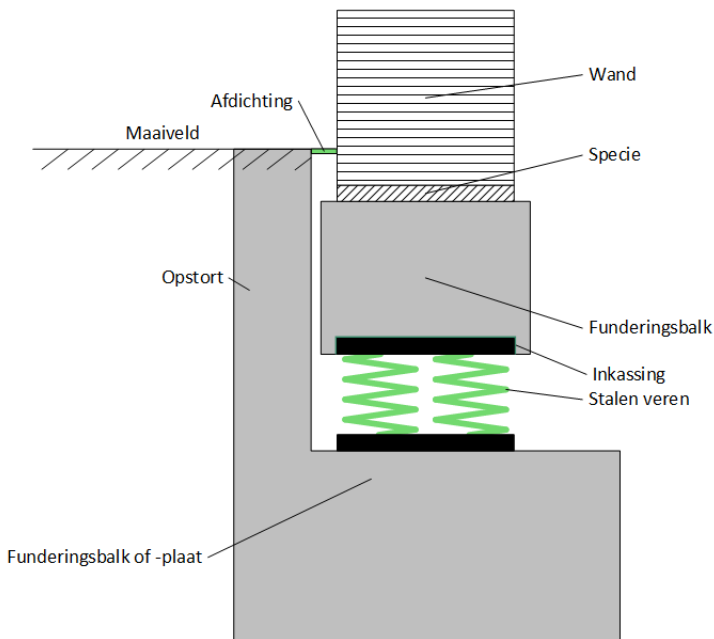
*Figuur 28 Tertsbandspectra bij meetpunt 5*



# DETAILS MAATREGELEN

Deze bijlage bevat achtergrondinformatie en principedetails van de besproken maatregelen.

Een principeschets van een afgeveerde fundering met stalen veerdozen is weergegeven in Figuur 29. Een foto van een concrete toepassing bij eengezinswoningen in Prinsenbeek is weergegeven in Figuur 30 (fundering op staal, bij fundering op palen worden de stalen veerdozen vaak aangebracht op de paalkoppen, in een inkassing in de funderingsbalken). Aan de zijkant kan de bodem van de woning worden geïsoleerd door het aanbrengen van een opstort op de funderingsbalken, met een luchtsponw die aan de bovenzijde is afgedicht met bijv. een afdichtklep.



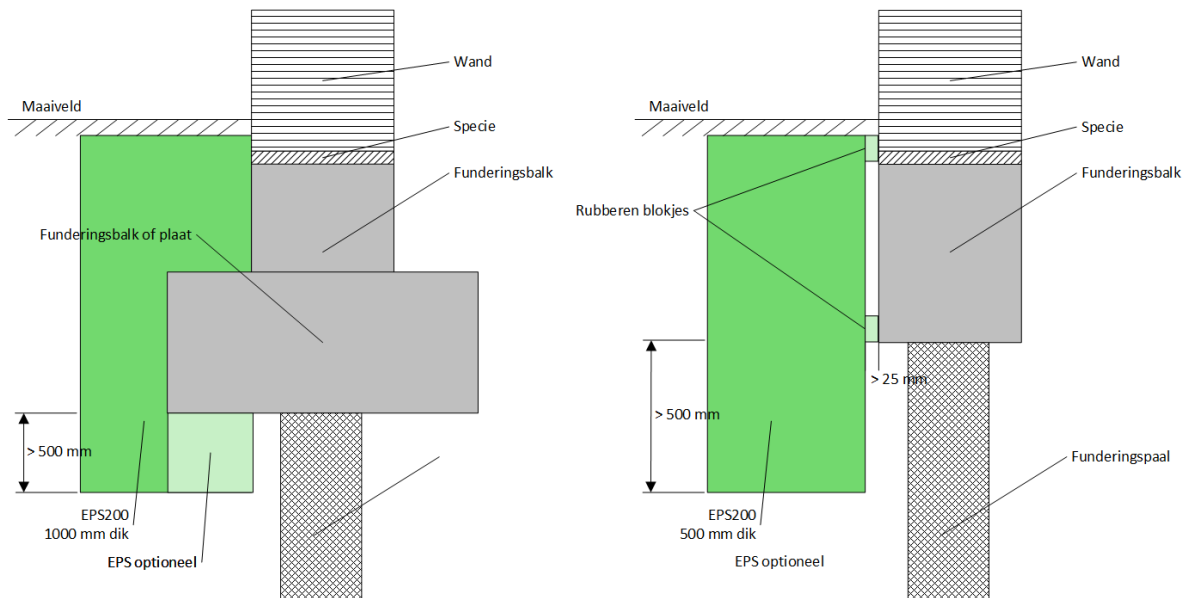
*Figuur 29 Principeschets afgeveerde fundering (hier met stalen veerdozen, fundering op staal)*



*Figuur 30 Dubbele fundering met stalen veerdozen (project in Prinsenbeek)*

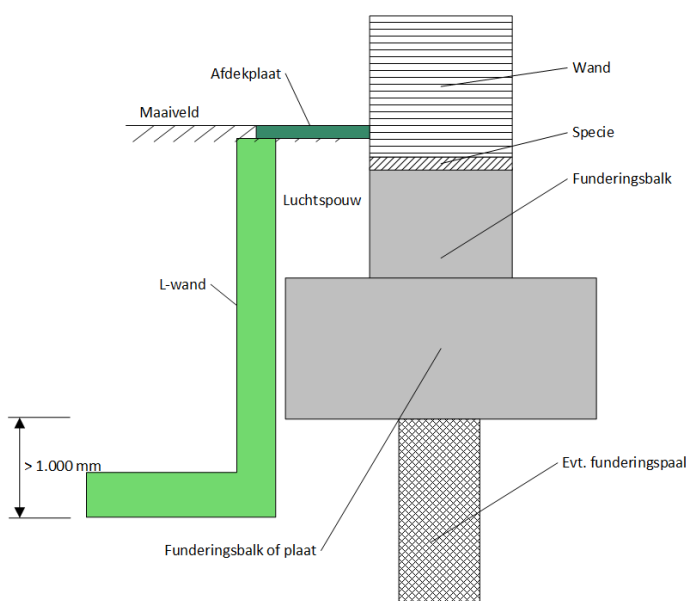
Een principeschets van het bekleden van de fundering met EPS (piepschuim) is weergegeven in Figuur 31. De EPS-kwaliteit dient wat zwaarder te zijn dan standaard i.v.m. de gronddruk. Hier is

EPS200 aangegeven. De minimaal benodigde dikte voor voldoende reductie is zo'n 1000 mm, om opdrijven te voorkomen moet dit tot de GHG-waarde van het grondwaterpeil worden aangebracht en verankerd worden aan de fundering. Een principeschets is weergegeven in Figuur 31. Een geringere dikte is ook mogelijk, mits gebruik wordt gemaakt van een luchtspouw van minimaal 25 mm breed (afgedekt om vuilophoping te voorkomen). Verder dient het EPS dieper te zijn dan de funderingsbalken, bij voorkeur minimaal 500 mm onder de onderzijde van de funderingsbalk. Minder diep is mogelijk, maar leidt tot een lagere effectiviteit.



*Figuur 31 Fundering met EPS-scherm ervoor (links) en met EPS en luchtspouw (rechts)*

Een principeschets van het plaatsen van een L-wand direct voor de fundering is rechts weergegeven in Figuur 32. Belangrijk hierbij is dat een luchtspouw nodig is (geen contact tussen L-wand en fundering), en dat deze dient te worden afgedekt met een afdekplaat. De L-wand moet in ieder geval ruim (minimaal 500, liefst 1.000 mm) lager liggen dan de onderzijde van de funderingsbalk of plaat om effectief te zijn, bij een paalfundering is de effectiviteit lager omdat een deel van de trillingen via de palen het gebouw ingaat.



*Figuur 32 L-wand met luchtspouw voor fundering*

