



WEBOOST



TRILLINGSONDERZOEK T.B.V. NIEUWBOUW

**SPOORSLAG
RIJSSEN**

COLOFON

Auteur

Controle en vrijgave

Projectcode *WBD2022-015*

Versienr *1.0*

Datum *1 juni 2023*

Status *Definitief*



Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van metingen van

ALCEDO 

© We-Boost 2023

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

DE KERN VAN DIT RAPPORT

Aan de Spoorslag in Rijssen worden 4 vrijstaande woningen gerealiseerd. De gebouwen liggen op korte afstand van de spoorlijn Deventer - Wierden. De gebouwen zijn gepland op korte afstand tot de spoorlijn. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet op voorhand worden uitgesloten.

Doel van het voorliggende onderzoek is daarom om vast te stellen of er sprake zal zijn van trillingshinder in de geplande woningen, en zo ja, met welke maatregelen een aanvaardbaar woon- en leefklimaat kan worden gegarandeerd (e.e.a. conform de Wro art. 3.1, wat in wezen niet verandert in de Omgevingswet (art. 4.2)). Voor het beoordelen van mogelijke trillingshinder maken we gebruik van de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn. Deze streefwaarden zijn voorkeurswaarden, waarbij het streven moet zijn om de trillingen in de beoogde bebouwing te laten voldoen aan deze waarden.

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 er overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder (conform de SBR B-richtlijn, het beoordelingskader voor trillingshinder) worden verwacht. Die overschrijdingen worden veroorzaakt door goederentreinen, en zijn relatief hoog door de korte afstand tot het spoor in combinatie met de zandige bodem, waardoor de trillingen slecht uitdempen. Dit zien we op meerdere locaties in deze omgeving terug. Het gaat om meerdere overschrijdingen per dag, en relatief hoge trillingsniveaus.

ADVIES VOOR MAATREGELEN

Omdat er overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder worden verwacht, is nader onderzoek gedaan naar maatregelen waarmee die overschrijdingen kunnen worden voorkomen. Hierbij is gekeken naar maatregelen aan de bron (het spoor of de treinen), in de bodem of aan de geplande woningen. Uit het maatregelenonderzoek volgt dat:

1. Maatregelen aan de trillingsbron hebben zeer hoge kosten (meer dan € 1.2 mln. voor een effectieve maatregel). De kosten staan niet in verhouding tot de bouwsom van het project, bovendien is hiervoor intensieve afstemming met ProRail nodig. Maatregelen aan de bron zijn daarom niet doelmatig.
2. Maatregelen in de bodem hebben nog hogere kosten en zijn onvoldoende effectief, en daarom evenmin doelmatig. Wel kunnen deze maatregelen helpen om de trillingen te verminderen.
3. Met maatregelen aan de gebouwen zijn de trillingen wel te verminderen, maar om te voldoen aan de streefwaarden voor trillingshinder zijn kostbare maatregelen nodig. Voldoen aan de streefwaarden voor trillingshinder is op deze locatie, voor dit type bebouwing alleen mogelijk met een afgeveerde fundering (dubbele fundering met daartussen stalen veerdozen,

afgeveerd op maximaal 3 Hz). Deze oplossing zorgt voor een hoog comfortniveau, maar brengt ook hoge kosten met zich mee (tussen de € 20.000 en € 30.000 per woning, mogelijk wat lagere kosten bij houtskeletbouw op een poerenfundering). Andere maatregelen kunnen de trillingsniveaus wel verminderen, maar hiermee is niet te voldoen aan het beoordelingskader.

Als afveren van de fundering niet doelmatig wordt geacht (te hoge kosten), dan adviseren we in ieder geval om voor de woningen het te doen:

1. Kies voor een **zo hoog mogelijke eigenfrequentie van de vloer**. Dit kan vooral bereikt worden met breedplaatvloeren (als deze meegestort worden, en dan ingeklemd worden opgelegd), korte vloeroverspanningen zo dik mogelijke vloeren. De trillingen zijn door deze maatregel met maximaal 50 procent te verminderen. In dit rapport worden hiervoor concrete handvatten gegeven.
2. Kies voor een **zo zwaar mogelijke fundering**, liefst een dikke betonnen plaatfundering of paalfundering. Door de zware fundering wordt het gebouw minder makkelijk in trilling gebracht, en nemen de trillingen met maximaal zo'n 30 procent af.
3. Overweeg om de **fundering af te scherm**, bijvoorbeeld met dikke EPS-blokken aan de spoorzijde of een prefab L-wand met luchtspouw direct voor de fundering. De trillingen zijn met deze maatregel met maximaal 30 procent te reduceren. Principedetails voor deze maatregelen worden in dit rapport getoond.

Andere optimalisaties in het ontwerp leveren geen significante meerwaarde op. Zelfs met bovengenoemde verzwaringen van de constructie is het overigens niet mogelijk om te voldoen aan de streefwaarden voor trillingshinder, het aantal overschrijdingen neemt hierdoor wel fors af.

Tenslotte, bij trillingen is sprake van streefwaarden in de beoordelingsrichtlijn. Als de streefwaarden niet worden gehaald, dan dienen maatregelen te worden afgewogen op doelmatigheid (conform bijlage 5 van de SBR B-richtlijn, het beoordelingskader voor trillingshinder). Het kan dus zijn dat maatregelen vanwege kosten of inpassingsbezwaren niet worden getroffen, mits goed wordt gemotiveerd dat geen onaanvaardbaar woon- en leefklimaat ontstaat. Hierbij kan eventueel worden verwezen naar naastgelegen woningen op vergelijkbare afstand tot het spoor, die ouder en dus trillingsgevoeliger zijn. Gelet op de trillingsniveaus in de woningen adviseren we wel om bovenstaande adviezen mee te nemen in de constructieve uitwerking van de woningen.



INHOUDSOPGAVE

I.	INLEIDING	8
1.1.	Aanleiding	8
1.2.	Doel	8
1.3.	Leeswijzer	8
2.	SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN	11
2.1.	Situatie	11
2.2.	Uitgangspunten	12
3.	BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE	15
3.1.	Trillingen en wetgeving	15
3.2.	Beoordelingskader trillingshinder	15
3.3.	Rekenmethode	16
4.	VERWACHTE TRILLINGEN	20
4.1.	Meetresultaten	20
4.2.	Trillingen in geplande gebouwen	20
5.	MITIGERENDE MAATREGELEN	23
5.1.	Nut en noodzaak van maatregelen	23
5.2.	Analyse resultaten	23
5.3.	Maatregelen aan de trillingsbron	24
5.4.	Maatregelen in de bodem	24
5.5.	Optimalisaties van de gebouwen	26
5.6.	Afweging van maatregelen	28
5.7.	Onzekerheden in het onderzoek	28
II.	GRONDONDERZOEK	30
III.	REKENMODEL	32



III. RESULTATEN METINGEN

36

IV. DETAILS MAATREGELEN

41

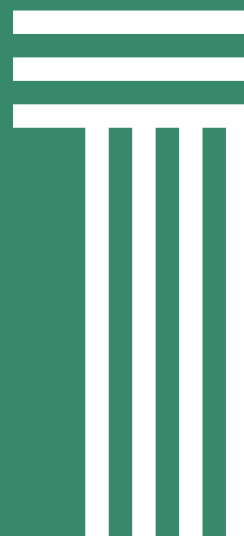




INLEIDING



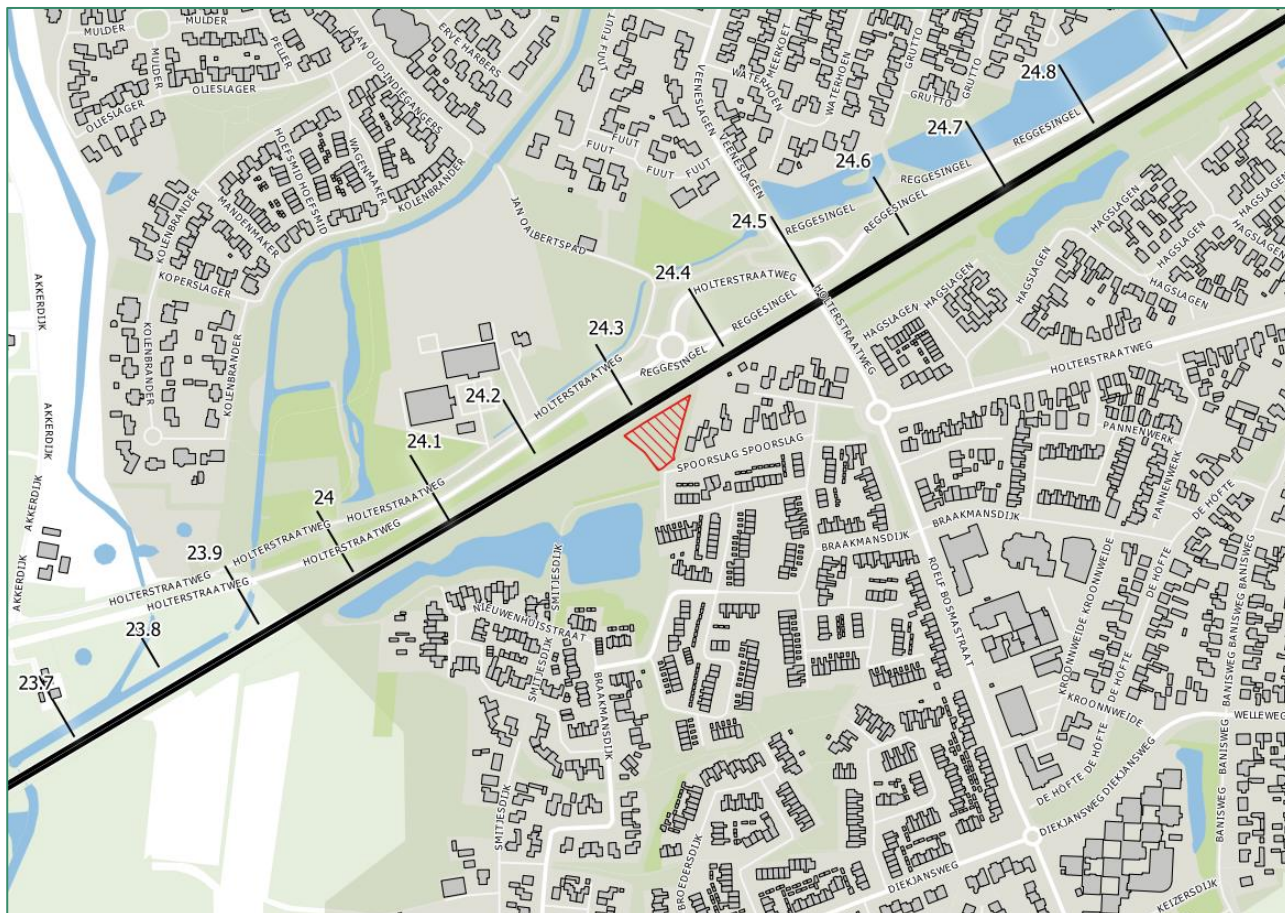
In dit hoofdstuk geven we een korte omschrijving van de inhoud van dit onderzoek: de aanleiding, het doel van het onderzoek en een beknopte leeswijzer om informatie snel te kunnen vinden.



INLEIDING

1.1. AANLEIDING

Aan de Spoorslag in Rijssen worden 4 vrijstaande woningen gerealiseerd. De gebouwen liggen op korte afstand van de spoorlijn Deventer - Wierden, zie Figuur 1. Daardoor kunnen trillingen van treinverkeer als hinderlijk worden ervaren.



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 woningen op basis van de gemeten trillingen en de eigenschappen van de gebouwen. Het resultaat van deze stap wordt in hoofdstuk

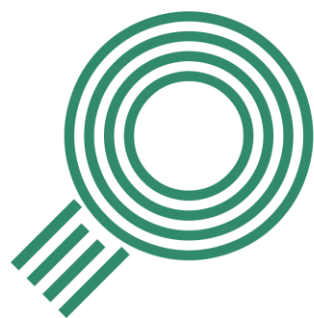
4 beschreven. In hoofdstuk 5 gaan we in op maatregelen en bouwkundige optimalisaties om de trillingen te verminderen.

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





SITUATIEBESCHRIJVING



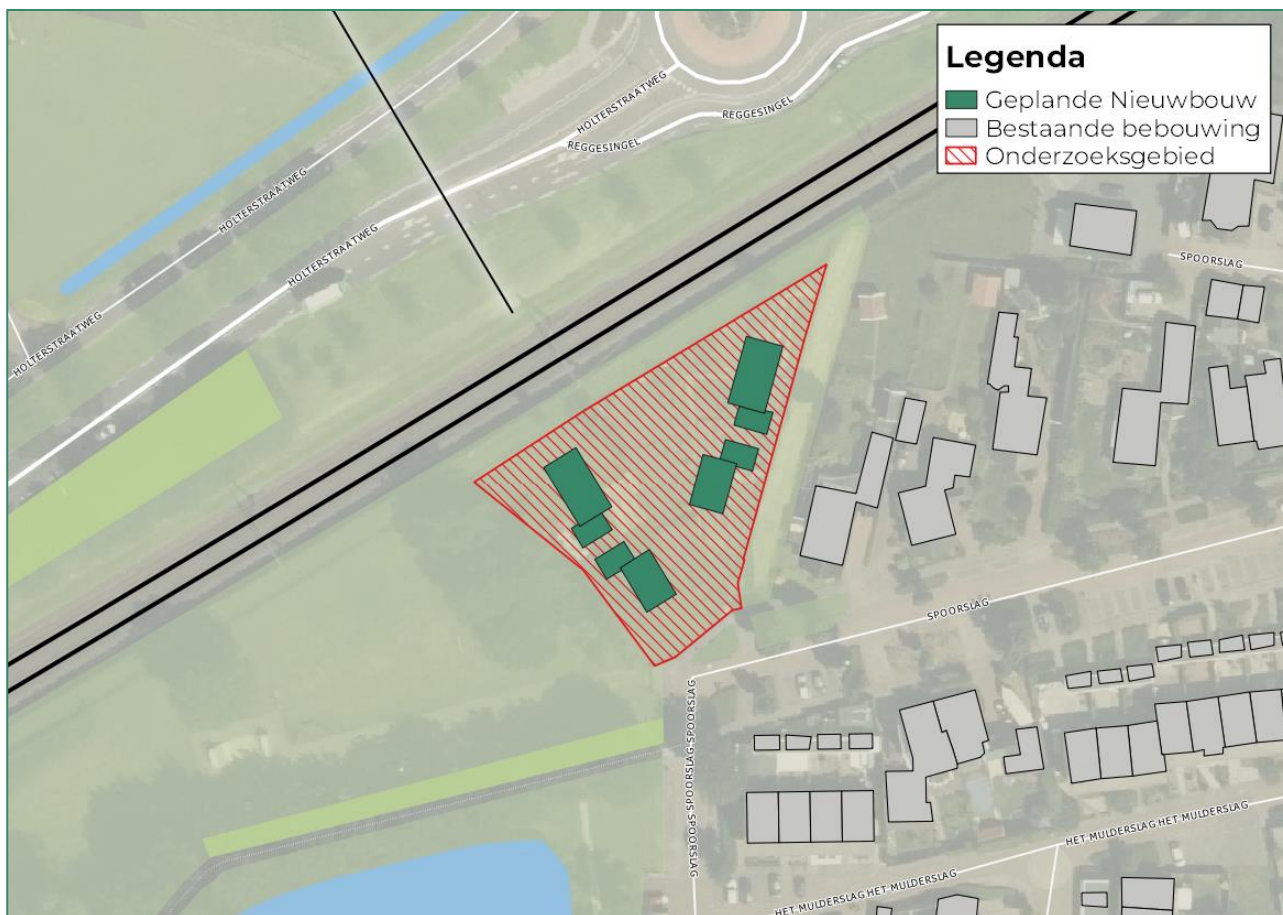
In dit hoofdstuk wordt een toelichting gegeven op de beoogde toekomstige situatie en worden de uitgangspunten van het onderzoek weergegeven.



2. SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN

2.1. SITUATIE

Het plangebied is momenteel in gebruik als volkstuintjes, een deel betreft een braakliggend. Op het terrein worden 4 vrijstaande woningen gerealiseerd. De bestaande en geplande bebouwing is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Toekomstige bebouwing op de planlocatie

De bebouwing is gepland in een zone van ca. 13 tot 45 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. Volgens de Integrale Mobiliteitsanalyse Spoor (IMA-2021) wordt er een toename van het aantal goederentreinen voorzien van de huidige ca. 28 tot 30 naar 53 tot 71 goederentreinen per dag.. Er wordt geen verandering in het aantal reizigerstreinen voorzien.

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

Type trein	Rijsnelheid	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Sprinters	100 - 130 km/h	2.00	2.00	0.50
Intercity's	130 km/h	2.42	2.25	0.75
Goederentreinen	90 km/h	0.59	0.63	0.59

Andere trillingsbronnen, zoals wegverkeer, zullen, gezien de afstand tot de bebouwing en het beperkte verkeer naar verwachting niet voor voelbare trillingen zorgen in de geplande bebouwing.

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

Voor het uitvoeren van de berekeningen is gerekend met het schetsmodel van 12 december 2022. Een constructieve uitwerking ontbreekt nog, daarom is in dit onderzoek nog met een aantal varianten gerekend, zie Tabel 2. Daar zijn de belangrijkste eigenschappen van de bebouwing weergegeven. Het rekenmodel voor de bebouwing is hierop gebaseerd.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Meerdere varianten beschouwd: • Kanaalplaatvloer 200, 260 en 320 mm, 60 mm zandcement dekvloer • Breedplaatvloer 200 en 250 mm, 60 mm zandcement dekvloer
Hoogte	6.0 meter
Lengte vloerveld	Meerdere varianten beschouwd, tussen de 5.0 en 9.0 meter
Constructietype	Meerdere varianten beschouwd: • Kalkzandsteen en metselwerk • Prefab betonnen skelet met metselwerk • Houtskeletbouw
Fundering	Meerdere varianten beschouwd: • Op staal • Op palen (10 meter lang, Ø450 mm, geboord systeem)

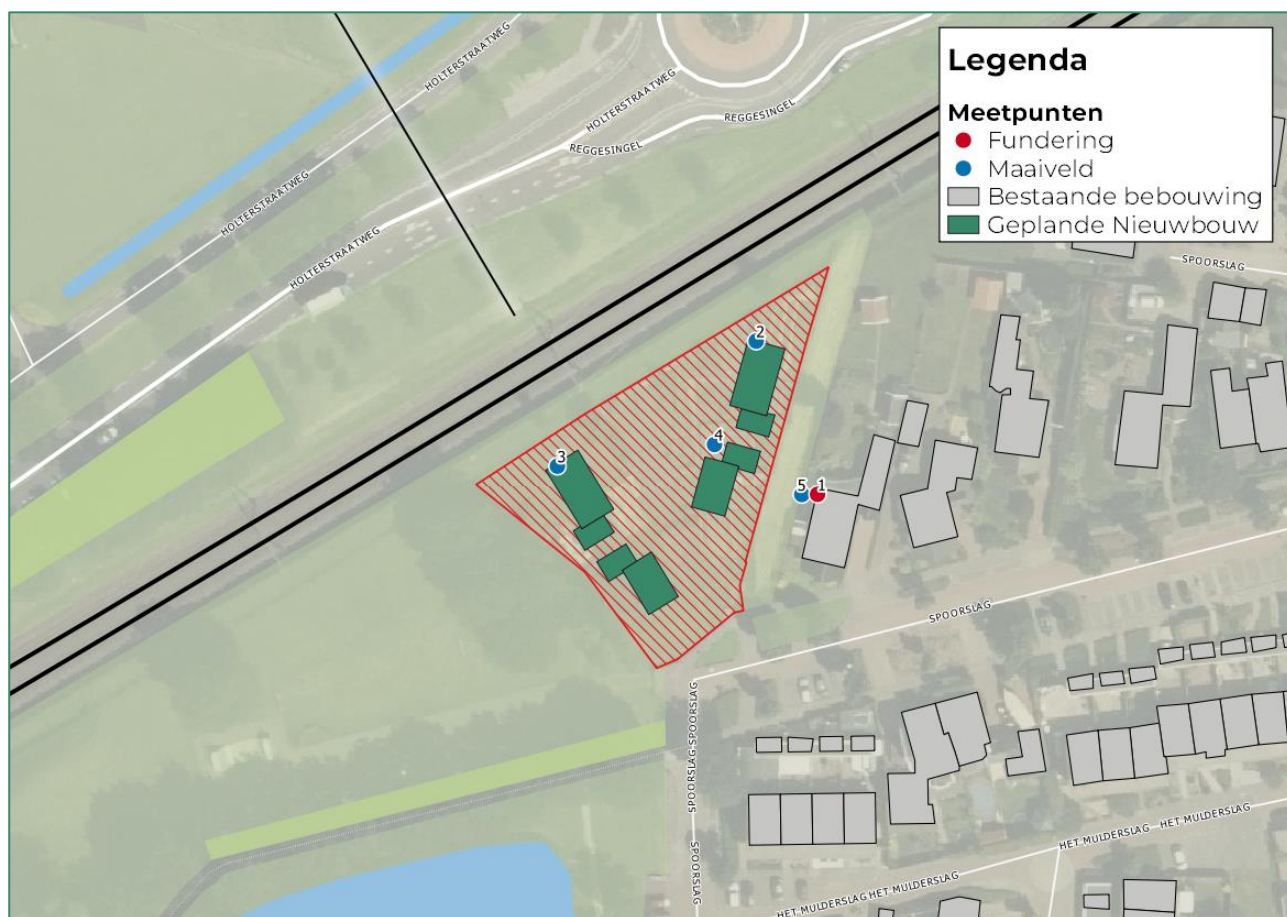
2.2.2. GEGEVENS ONDERGROND

Voor gegevens van de ondergrond is gebruik gemaakt van beschikbare boringen en sonderingen uit Dinoloket en bodemonderzoeken die in de omgeving van 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.

2.2.3. MEETRESULTATEN

Zoals te zien in Figuur 3 zijn door Alcedo op vijf locaties metingen uitgevoerd. Het gaat hierbij om vier meetpunten op maaiveld, en een meetpunt aan de fundering van een nabijgelegen woning. De metingen zijn uitgevoerd van 8 tot 15 mei 2023. Er waren geen afwijkingen in het treinverkeer in deze periode.

De meting heeft een meetduur van een week, conform de eisen uit de SBR B-richtlijn, om de trillingen van goederentreinen goed vast te leggen. Op een aantal meetpunten is korter gemeten, deze meetpunten zijn gebruikt om de (frequentie-afhankelijke) verhouding tussen die specifieke meetpunten en het meetpunt van een week vast te leggen. Zo ontstaat inzicht in het effect van variaties in de bodemopbouw en ligging van het spoor, maar kunnen we ook de trillingsinvloed van de fundering van het bestaande gebouw vaststellen. Vervolgens is die verhouding gebruikt om de trillingen op alle meetpunten over de hele meetduur vast te stellen (methode conform RIVAS en CargoVibes onderzoeken). De metingen zijn uitgevoerd met FrogWatch trillingsmeters, die voldoen aan de eisen uit de SBR-richtlijnen¹.



Figuur 3 Meetpunten

¹ Zie een uitgebreide toelichting van de specificaties op <https://www.frog.watch/facts/>





BEOORDELINGSKADER



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



BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE

3.1. TRILLINGEN EN WETGEVING

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 o.b.v. de Wet Ruimtelijke Ordening (Wro) kan worden verzocht om trillingen mee te nemen bij de wijziging van bestemmingsplannen waar trillingen een rol kunnen spelen.

Per 1 januari 2024 wordt de Omgevingswet (Ow) van kracht. Ook in de Ow zijn geen streef- en grenswaarden opgenomen voor trillingen afkomstig van hoofd- en spoorwegen. Het begrip 'goede ruimtelijke ordening' uit de Wro art. 3.1 is in de Ow vervangen door het begrip 'evenwichtige toedeling van functies aan locaties', art. 4.2. Vanuit dit artikel moet ook in het kader van een omgevingsplan onder de Ow trillingshinder (waar relevant) in kaart worden gebracht en betrokken worden bij de afweging in het kader van het beschermen van de fysieke leefomgeving. Net als onder de Wro zijn hulpmiddelen als de Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen en de SBR-richtlijn van toepassing om mogelijke trillingshinder in kaart te brengen respectievelijk te beoordelen.

3.2. BEOORDELINGSKADER TRILLINGSHINDER

Op basis van jurisprudentie wordt al enkele decennia gebruik gemaakt van de SBR-richtlijn om trillingen in gebouwen te beoordelen.²

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 grootheid 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

² 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.

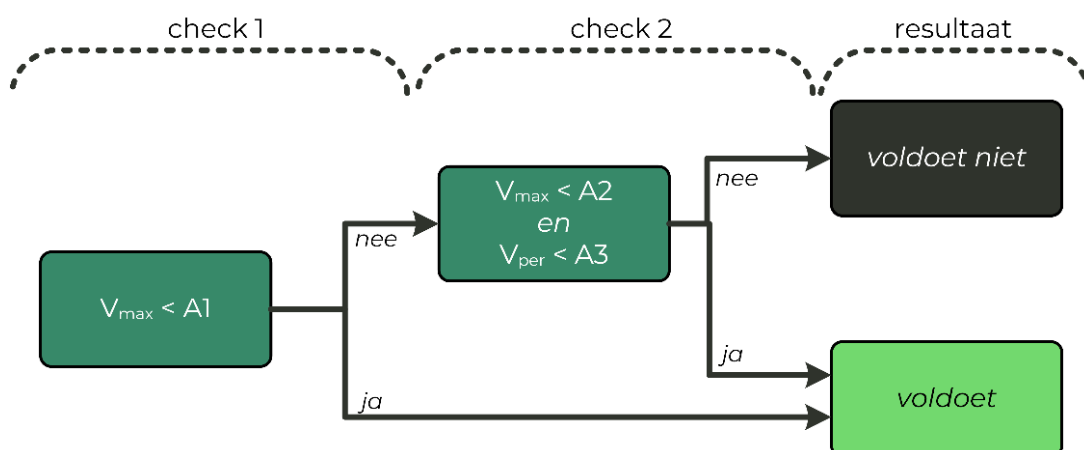
een zekere mate van gewenning en er zijn minder mogelijkheden om de trillingen te reduceren.

- 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 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 4.

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

	Dag en avond			Nacht		
Situatie	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Wonen, nieuwe situatie	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
Wonen, bestaande situatie	0.2	0.8	0.10	0.2	0.4	0.10



Figuur 4 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

3.3. REKENMETHODE

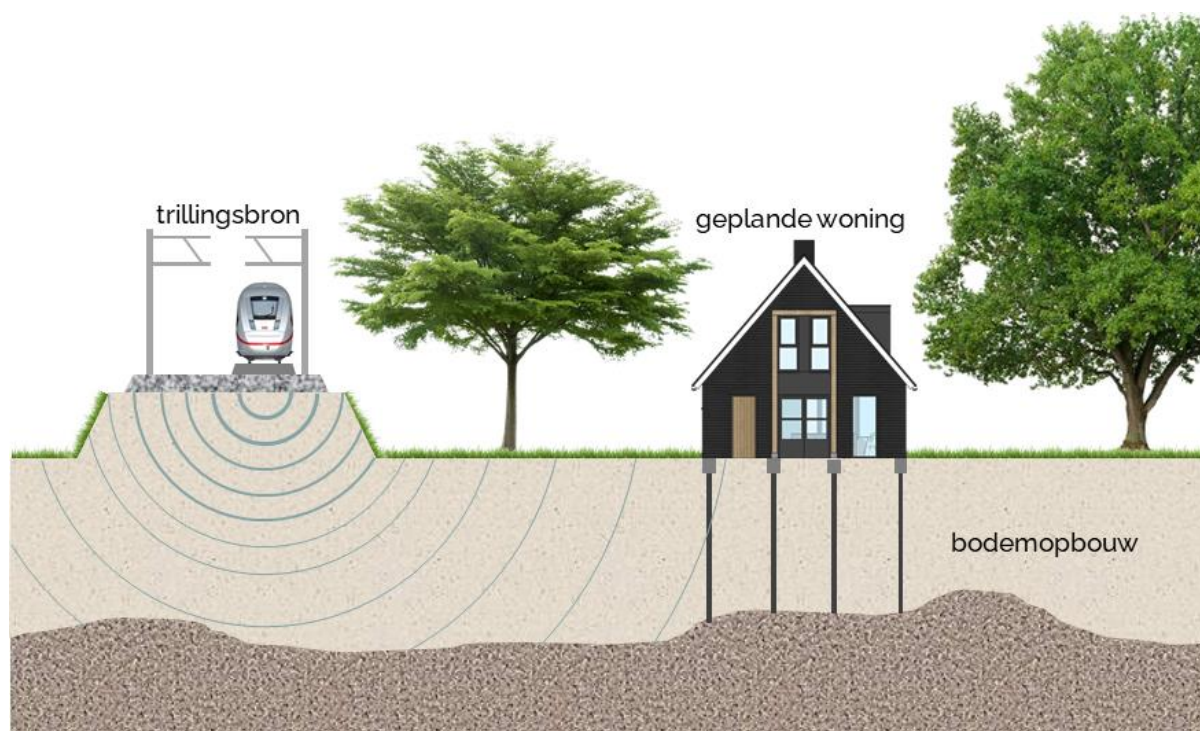
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde bebouwing, wordt op basis van metingen in de omgeving van de bebouwing (op maaiveld en aan een bestaande gebouw) een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande 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.

3.3.1. 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 5.

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



Figuur 5 Trillingen – het systeem van trillingsbron, de bodem en het gebouw als ontvanger

3.3.2. DE TRILLINGSBRON

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

3.3.3. 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.

3.3.4. 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 geijkt met praktijkresultaten uit metingen. Een toelichting op het rekenmodel Buildyn is gegeven in bijlage II.





VERWACHTE TRILLINGEN



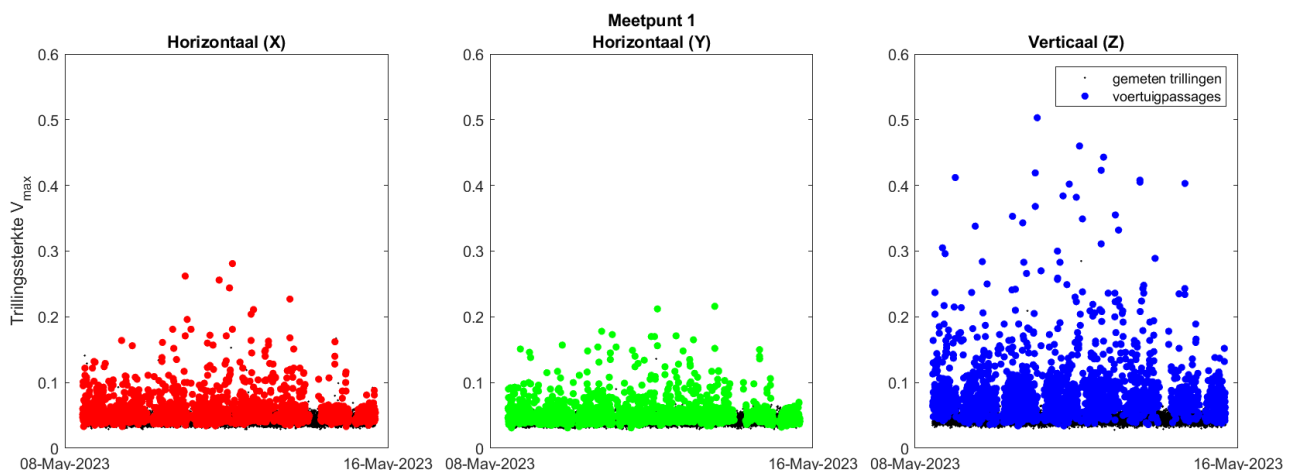
In dit hoofdstuk wordt eerst een korte toelichting gegeven op de meetresultaten, daarna worden de verwachte trillingen in de geplande bebouwing gegeven. Hierbij is gebruik gemaakt van de beoordelingsmethode en de rekenmethodiek zoals toegelicht in het voorgaande hoofdstuk.



VERWACHTE TRILLINGEN

4.1. MEETRESULTATEN

Alcedo heeft metingen uitgevoerd op maaiveld en aan de fundering van een naastgelegen woning. De trillingen op het meetpunt aan de fundering van de bestaande woning zijn weergegeven in Figuur 6, voor de andere meetpunten zijn deze en andere figuren van de metingen opgenomen in bijlage III. In Figuur 6 valt op dat de trillingen maatgevend zijn in verticale Z-richting, en dat deze per dag flink kunnen variëren. De hoogste trillingen worden veroorzaakt door goederentreinen. De trillingen van reizigerstreinen zijn bijna een factor 5 lager dan de trillingen van goederentreinen.



Figuur 6 Gemeten trillingen aan fundering bestaande woning, meetpunt 1

4.2. TRILLINGEN IN GEPLANDE GEBOUWEN

De bebouwing is gemodelleerd op basis van de input uit hoofdstuk 2. Het trillingsgedrag van de geplande gebouwen is weergegeven in Bijlage II. Met de modelresultaten zijn de trillingen in de toekomstige woningen bepaald. De resultaten hebben we weergegeven in Tabel 4, samen met een beoordeling van de trillingen. De trillingen zijn weergegeven als een bandbreedte, omdat deze van woning tot woning verschillen (o.b.v. afmetingen van de woning en afstand tot het spoor), en daarnaast afhankelijk zijn van constructieve vervolgkeuzes. **Oranje** arcering geeft aan dat er sprake is van een overschrijding van de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn, **gele** arcering geeft aan dat een overschrijding afhankelijk is van de constructieve uitwerking van het gebouw, of dat er verschillen zijn tussen de woningen in het plangebied

Tabel 4 Trillingen per bouwconcept en beoordeling op SBR B-richtlijn (fundering op staal)

Constructietype	V _{max, dag}	V _{max, nacht}	V _{per}	Beoordeling
Kalkzandsteen met kanaalplaatvloeren	0.7 - 1.6	0.7 - 1.6	0.06 - 0.10	Voldoet niet
Betonnen skelet met breedplaatvloeren	0.7 - 1.4	0.7 - 1.4	0.05 - 0.09	Voldoet niet
Houtskeletbouw	0.8 - 1.8	0.8 - 1.8	0.08 - 0.14	Voldoet niet

Op basis van de resultaten zijn de volgende conclusies te trekken:

- Er zijn overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder in de geplande bebouwing. Dat komt vooral doordat al op maaiveld hoge trillingssterktes zijn gemeten, iets

wat we vaker terugzien in deze omgeving. De zware goederentreinen in combinatie met de korte afstand tot het spoor en de stijve bodem zorgen voor relatief hoge trillingsniveaus in de woningen.

- De trillingen zijn hoger in de woningen dichtbij het spoor, de trillingen kunnen daar tot een factor 2 hoger zijn dan in de verder van het spoor vandaan gelegen woningen.
- Uit de variantenstudie blijkt het volgende:
 - ✿ De trillingen zijn lager bij een zwaardere bouw (betonnen skelet en breedplaatvloeren zorgt voor lagere trillingen dan standaard kalkzandsteen skelet), en juist hoger bij een lichtere bouw (houtskeletbouw).
 - ✿ De trillingen zijn lager bij een zwaardere fundering (dikke plaatfundering of palenfundering) dan bij een fundering op staal (balkenfundering).
 - ✿ De trillingen zijn lager bij een hogere eigenfrequentie van de vloer. Die eigenfrequentie (de gevoelige frequentie, waarbij de vloer vooral gevoelig is voor de trillingen van de treinen) kan worden verhoogd door het toepassen van dikkere vloeren of kortere vloeroverspanningen.
 - ✿ De trillingen zijn lager bij een vloerconstructie die de trillingen meer dempt, zoals een breedplaatvloer (vergeleken met een kanaalplaatvloer).

Omdat er sprake is van overschrijdingen van de streefwaarden, gaan we in het volgende hoofdstuk in op mitigerende maatregelen.



MAATREGELEN



In dit hoofdstuk worden handvatten gegeven om de woning 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 MAATREGELEN

Door de passage van (met name) goederentreinen zijn er overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder. In dit hoofdstuk beschrijven we de mogelijke maatregelen en bouwkundige optimalisaties waarmee de trillingen kunnen worden verminderd.

5.1. NUT EN NOODZAAK VAN MAATREGELEN

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

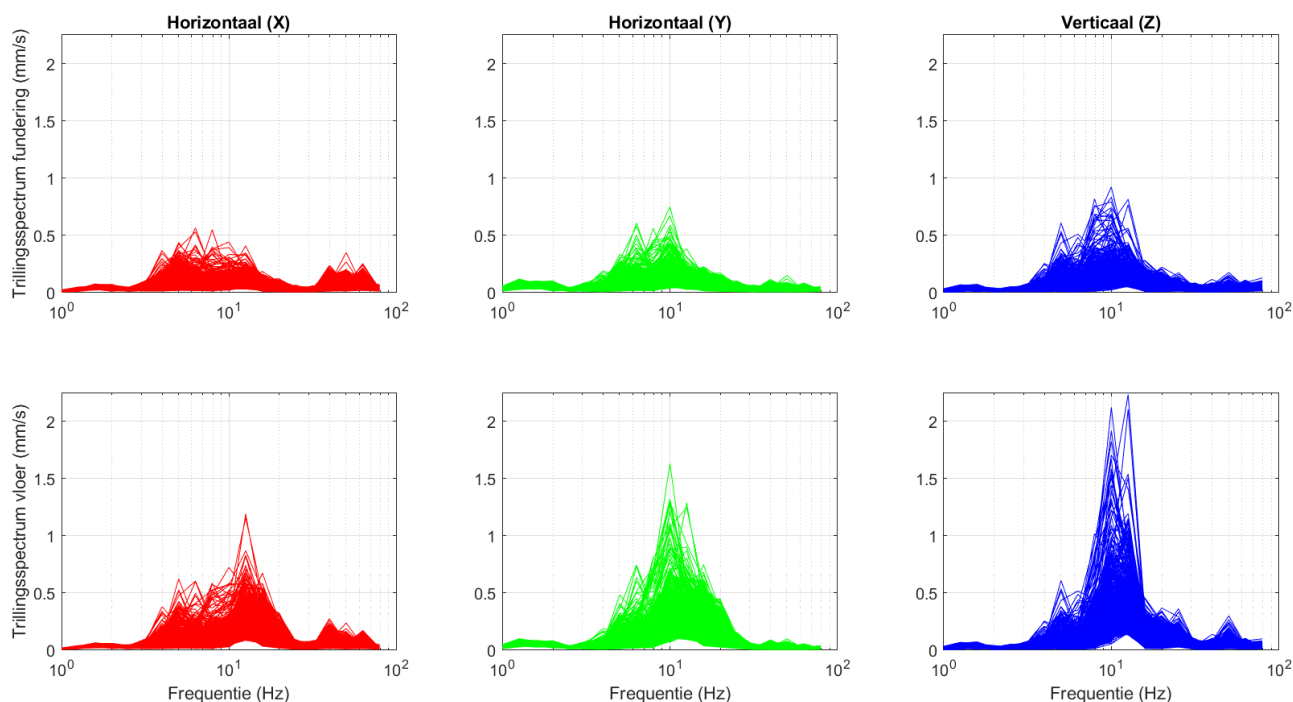
1. De mate waarin de trillingssterkte voorkomt. Hiervoor geldt dat de gemiddelde trillingssterkte V_{per} een goede indicatie is. Die is hoger dan de streefwaarde (0.05), er is bovendien sprake van een relatief groot aantal overschrijdingen van de streefwaarden per dag (7 tot 18 treinen per dag, verschilt per woning en afhankelijk van de constructieve uitwerking).
2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. Wegverkeer zorgt niet voor noemenswaardige trillingen in de geplande bebouwing. Van een maskerend effect is daarmee geen 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.

Gelet op bovenstaande dienen we conform de SBR B-richtlijn dus maatregelen af te wegen op doelmatigheid. Om de effectiviteit van maatregelen te toetsen, 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 maatgevend zijn, is een analyse uitgevoerd van de verwachte trillingen, zie Figuur 7. In deze figuur is de trillingssnelheid per treinpassage weergegeven als tertsbandspectrum op de fundering en op de vloer van de meest noordoostelijke woning, bij een constructie van kalkzandsteen en metselwerk en een 200 mm kanaalplaatvloer. Uit deze figuur kan worden afgeleid bij welke frequentie en in welke trillingsrichting de trillingen het hoogst zijn. De hoogste trillingen treden op in verticale richting. Dit komt met name door opslinging van de trillingen door de vloeren. De trillingen zijn vooral hoog tussen de 8 en 13 Hz, door een combinatie van het inveren van het gebouw op zichzelf en de eigenfrequentie van de vloeren. Als we kijken naar de trillingsenergie op de fundering, dan moet vooral worden voorkomen dat trillingen tussen de 4 en 15 Hz worden versterkt in het gebouw.

Om te voldoen aan de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn is een reductie van bijna 85 procent van de trillingen nodig.



Figuur 7 Verwachte trillingen in noordoostelijke woning, boven op fundering, onder midden vloer

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). Maatregelen die de trillingen verminderen zijn bijvoorbeeld het significant verlagen van de rijksnelheid van de treinen (naar bijv. 40 km/h), het weren van goederentreinen, een betonplaat met ballastmat of het afveren van het spoor. Goedkopere maatregelen, zoals under sleeper pads, zijn onvoldoende effectief tegen de relatief laagfrequente trillingen.

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. Het omleiden van goederentreinen of een verlaging van de rijksnelheid is niet realiseerbaar (i.v.m. de dienstregeling op dit druk bereden spoor met weinig passeermogelijkheden, een verlaging van de snelheid is bovendien onvoldoende effectief), een betonplaat met ballastmat en het afveren van het spoor leiden tot zeer hoge kosten (€ 1.2 tot € 2.0 mln. voor een betonplaat met ballastmat, en € 4.0 tot 6.3 mln. voor een afgeveerd spoor over beide sporen, over een lengte van ongeveer 130 meter per spoor). Deze kosten zijn ruim hoger dan het richtbedrag voor maatregelen dat ProRail hanteert bij doelmatigheidsafwegingen (ruim € 63.000), en staan niet in verhouding tot de bouwsom van de woningen. Maatregelen aan het spoor zijn daarom niet doelmatig.

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 spoorstoot, een trillingsscherm van piepschuim (EPS), beton, jet-grout (soil-mix methode voor beton) of een damwand. Nadeel van deze maatregelen is dat deze vaak hoge kosten met zich meebrengen en dat ze niet aanpasbaar zijn aan toekomstige situaties (met uitzondering van een spoorstoot).

Een trillingsscherm is alleen effectief dicht bij de bron of dicht bij de ontvanger. De enige logische plek voor een trillingsscherm direct tussen de woningen en het spoor, op de noordwestelijke

perceelgrens. Om het plangebied af te schermen, is een trillingsscherm van ca. 100 meter lengte nodig, waarbij de maatregel deels doorloopt buiten het plangebied, zie Figuur 8. Een sloot met voldoende diepte is ruimtetechnisch hier lastig inpasbaar.



Figuur 8 Mogelijke locatie van trillingsscherm

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 ³
Betonnen wand (diepwandmethode)	25 – 45%	€ 1.6 – 2.6 mln.
Jet-grout wand	15 – 30%	€ 1.5 – 2.4 mln.
Damwand (intrillen)	5 – 15%	€ 1.5 – 2.3 mln.
Betonnen wand, bekleed met rubber	35 – 60%	€ 2.0 – 3.2 mln.
Damwand met EPS (piepschuim)	15 – 30%	€ 1.0 – 1.7 mln.

³ 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.

Maatregel	Effect	Kosten ³
Damwand met sleuf (luchtspouw)	15 – 30%	€ 1.4 – 2.3 mln.
L-wand 4.0 m diep	10 – 20%	€ 0.1 – 0.3 mln.
L-wand 4.0 m diep, bekleed met rubber	15 – 25%	€ 0.3 – 0.6 mln.
CSM-wand (Cutter Soil Mix of Mix-In-Place)	5 – 15%	€ 1.7 – 2.7 mln.
Trillingsscherm EPS (piepschuim), 1 m dik	5 – 20%	€ 0.3 – 0.5 mln.
L-wand 4.0 m diep met sloot	15 – 30%	€ 0.1 – 0.3 mln.

Zoals in bovenstaand overzicht is te zien, gaat het stuk voor stuk om kostbare maatregelen met maar een beperkt effect. Dat komt doordat trillingsschermen altijd een deel van de trillingsenergie door laten, en dat dit deel groter is bij laagfrequente trillingen. Er is geen oplossing met de vereiste effectiviteit van 70% om te voldoen aan het beoordelingskader.

De meest effectieve maatregel is een betonnen trillingsscherm van 15 meter diep en 0.5 meter breed, tot 6 meter diepte bekleed met minimaal 100 mm rubber of 1000 mm EPS (piepschuim). De kosten van deze maatregel bedragen tussen de € 2.0 en € 3.2 mln., en zijn daarmee nog hoger dan maatregelen aan het spoor. Dergelijke kosten staan niet in verhouding tot de bouwsom van de geplande woningen. Bovendien, ook met deze maatregel zijn er nog overschrijdingen van het beoordelingskader. Ook maatregelen in de bodem zijn daarmee niet doelmatig, wel kunnen de minder kostbare maatregelen helpen om de hinder te verminderen.

5.5. OPTIMALISATIES VAN DE GEBOUWEN

Tenslotte zijn ook optimalisaties aan de geplande gebouwen mogelijk. Denk hierbij aan het verzwaren of afveren van de fundering, het verzwaren van de dragende wanden of het kiezen voor een zwaardere of dikker vloertype. Het globale effect en de kosten van de mogelijke maatregelen aan de woningen zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Mogelijke maatregelen aan de gebouwen

Maatregel	Effect	Kosten ⁴
Toepassen breedplaat- i.p.v. kanaalplaatvloeren	5 – 10%	< 2% SK
Eigenfrequentie vloer tussen 15 en 20 Hz	30 – 40%	< 3% SK
Eigenfrequentie vloer hoger dan 20 Hz	40 – 50%	< 5% SK
Ontkoppelen van de fundering (afveren)	80 – 90%	6 – 10% SK
Zwaardere bouw (betonnen skelet)	5 – 10%	< 3% SK
Inpakken van de fundering met 150 mm rubber	10 – 20%	2 – 4% SK
Afschermen van de fundering met 1.5 m dik EPS	10 – 25%	< 2% SK
Afschermen van de fundering met 3 m diepe L-wand	15 – 30%	< 1% SK

⁴ SK = Stichtingskosten

Maatregel	Effect	Kosten ⁴
Palenfundering i.p.v. balkenfundering	15 – 30%	2 – 4% SK
Zwaardere fundering (betonplaat)	20 – 35%	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 3 Hz, zie bijlage IV voor een voorbeelduitwerking). Met deze maatregel is in alle gebouwen volledig te voldoen aan het beoordelingskader. Het betreft wel een kostbare maatregel, met voor de woningen geschatte kosten tussen de € 20.000 en € 30.000. De kosten kunnen bij houtskeletbouw en een fundering op poeren lager uitvallen, omdat dan maar enkele verende elementen nodig zijn.

Minder kostbaar, maar ook minder effectief is het verzwaren van de vloeren. Door voor de vloeren een eigenfrequentie boven de 15 Hz te kiezen, worden de trillingen in de woningen al veel minder versterkt, en met een eigenfrequentie boven de 20 Hz wordt dat nog minder. Zo'n hoge eigenfrequentie kan worden bereikt door dikkere vloertypes, kleinere vloeroverspanningen of een ingeklemde oplegging te gebruiken, zie Tabel 7 voor geadviseerde vloertypes per overspanning. In deze tabel geeft een **groene** arcering aan dat het vloertype een eigenfrequentie hoger dan 20 Hz heeft, en **gele** arcering dat de eigenfrequentie tussen de 15 en 20 Hz ligt. Bij kanaalplaatvloeren is de eigenfrequentie nog wat te verhogen door deze ingeklemd op te leggen, maar dit vereist wel speciale aandacht bij de inklemming. Ook met een zware vloer is echter nog sprake van overschrijdingen van de streefwaarden.

Tabel 7 Geadviseerde vloertypes per overspanning voor de woningen

Overspanning	Kanaalplaatvloer 200	Kanaalplaatvloer 260	Kanaalplaatvloer 320	Breedplaatvloer 200	Breedplaatvloer 250	Breedplaatvloer 280	Breedplaatvloer 320
4.0 meter							
4.5 meter							
5.0 meter							
5.5 meter							
6.0 meter							
6.5 meter							
7.0 meter							
7.5 meter							
8.0 meter							

Ook door de fundering af te schermen (met EPS, rubber of een prefab L-wand) zijn de trillingen te verminderen, maar dit heeft wel consequenties voor het gebruik van de ruimte direct rond het huis. Zie bijlage IV voor detailoplossingen hiervan.

5.6. AFWEGING VAN MAATREGELEN

In de geplande gebouwen zijn overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder niet uit te sluiten. Dat komt vooral door de korte afstand tot het spoor, in combinatie met het passeren van (zware) goederentreinen op hoge snelheid. De trillingen dempen in de zandige bodem slecht uit. In de woningen is daardoor regelmatig (meerdere keren per dag) sprake van treinen met trillingen hoger dan de streefwaarden voor trillingshinder. Dit kan zorgen voor overlast.

Voldoen aan de streefwaarden voor trillingshinder is op deze locatie, voor dit type bebouwing alleen mogelijk met een afgeveerde fundering (dubbele fundering met daartussen stalen veerdozen, afgeveerd op maximaal 3 Hz). Deze oplossing (zie Bijlage IV) wordt vaker toegepast langs het spoor, en zorgt voor een hoog comfortniveau, maar brengt hoge kosten met zich mee (tussen de € 20.000 en € 30.000, bij houtskeletbouw op poerenfundering kunnen kosten lager zijn).

Andere maatregelen kunnen de trillingsniveaus wel verminderen, maar hiermee is niet te voldoen aan het beoordelingskader. Als afveren van de fundering niet doelmatig wordt geacht (te hoge kosten i.r.t. de winst op trillingscomfort), dan adviseren we in ieder geval om de volgende optimalisaties af te wegen:

1. Overweeg een hogere eigenfrequentie van de vloer. Dit kan vooral bereikt worden met breedplaatvloeren (als deze meegestort worden, en dan ingeklemd worden opgelegd), korte vloeroverspanningen zo dik mogelijke vloeren. De trillingen zijn door deze maatregel met maximaal 50 procent te verminderen.
2. Overweeg een zwaardere fundering, liefst een betonnen plaatfundering of paalfundering. Door de zware fundering wordt het gebouw minder makkelijk in trilling gebracht, en nemen de trillingen met maximaal zo'n 30 procent af.
3. Overweeg om de fundering af te schermen, bijvoorbeeld met dikke EPS-blokken aan de spoorzijde of een prefab L-wand met luchtsponw direct voor de fundering. De trillingen zijn met deze maatregel met maximaal 30 procent te reduceren.

Andere optimalisaties in het ontwerp leveren weinig trillingsreductie op. Maatregelen aan het spoor, de treinen of in de bodem zijn zeer kostbaar, en daarom niet doelmatig.

Zelfs met bovenstaande optimalisaties is het niet mogelijk om volledig te voldoen aan de streefwaarden voor trillingshinder uit de SBR B-richtlijn, maar het aantal overschrijdingen neemt hierdoor wel fors af. Volledig voldoen aan de streefwaarden is uitsluitend mogelijk door de fundering, zoals hierboven benoemd, af te veren.

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. 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. De invloed hiervan op de resultaten is daardoor beperkt.
- Ten aanzien van de woningen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en de huidige ontwerpprincipes). 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 geijkt 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.

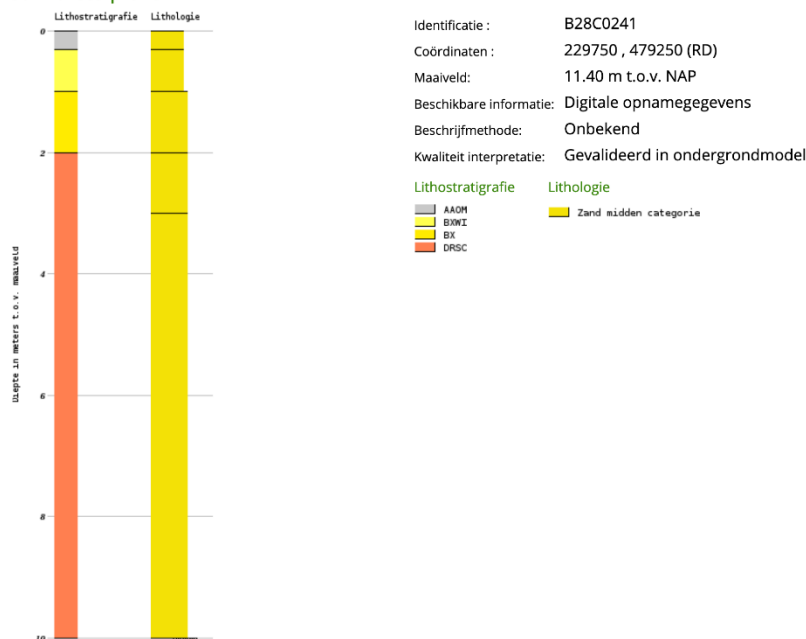


GRONDONDERZOEK

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.

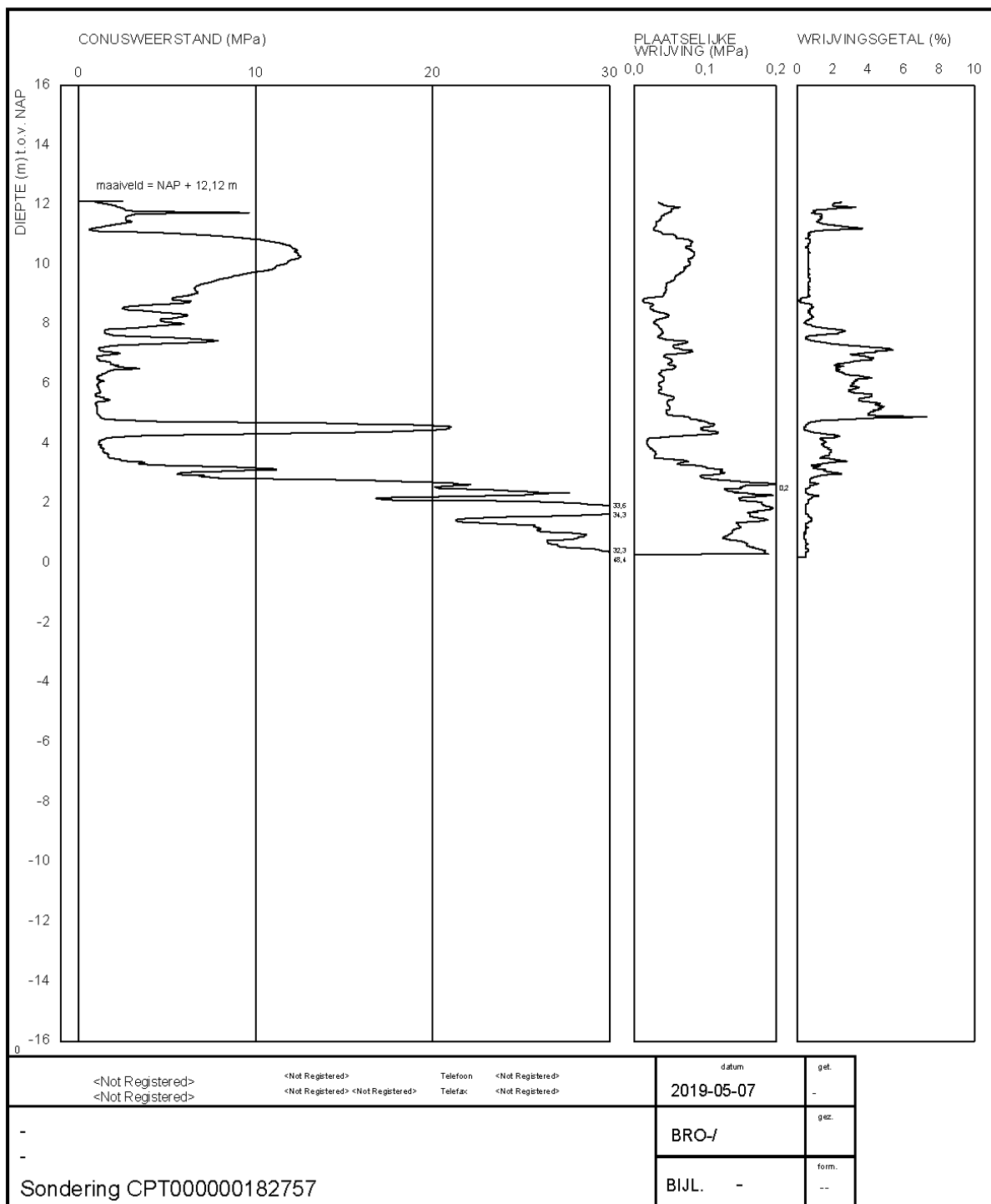
Een grondboring in de nabijheid van het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur 9. Uit de grondboring blijkt dat de bodem is opgebouwd uit stijve zandlagen. Bij een zandige bodem dempen de trillingen slecht uit met de afstand, en kunnen trillingen tot op grote afstand van het spoor voelbaar zijn.

Boormonsterprofiel



Figuur 9 Boring in het onderzoeksgebied

Een representatieve sondering uit het onderzoeksgebied, waarin onder meer de conusweerstand te zien is, is weergegeven in Figuur 10. Ook hier is te zien dat de bodem uit stijvere zandlagen bestaat.



Figuur 10 Sondering nabij het onderzoeksgebied

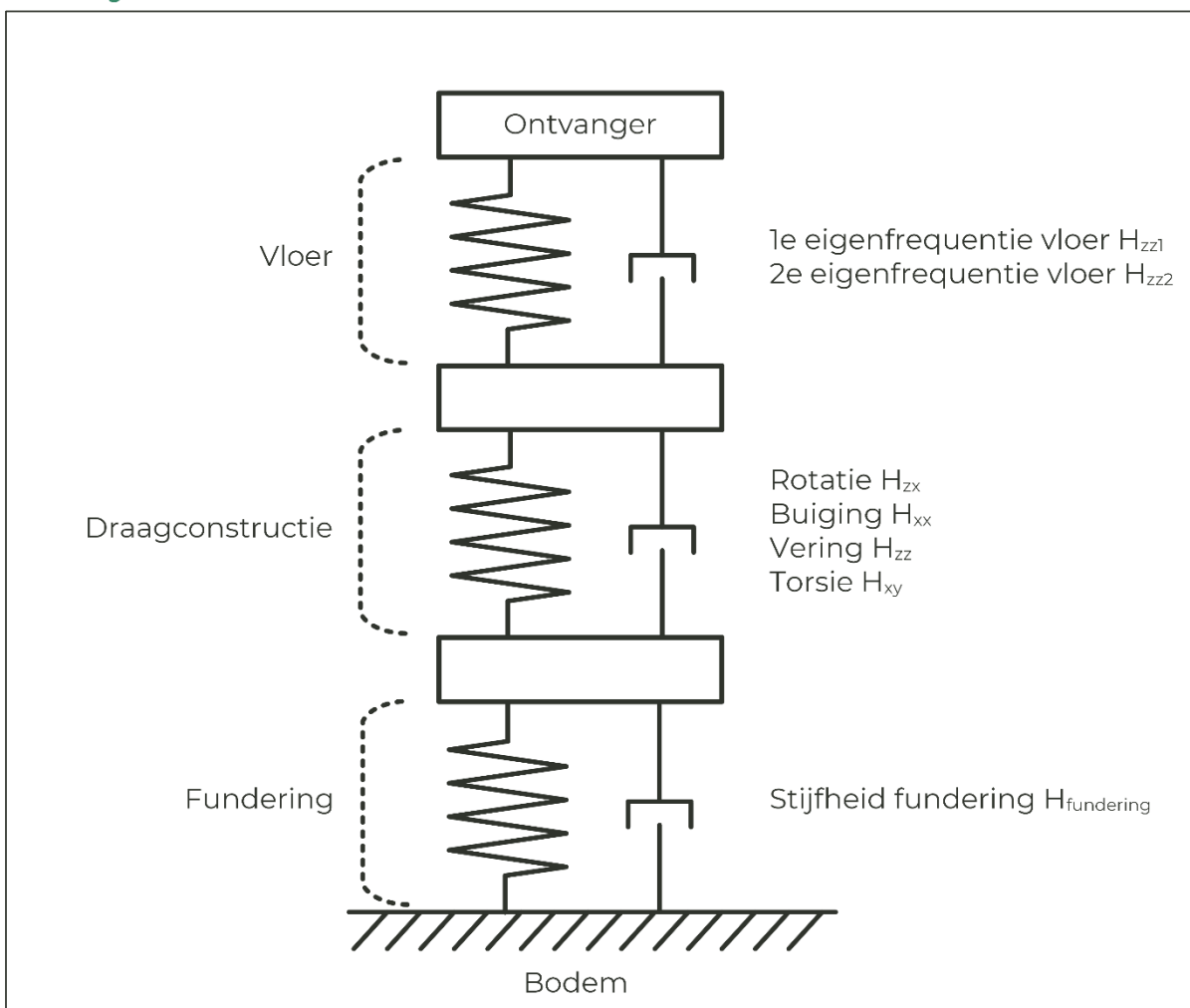
REKENMODEL

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 11. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 11, 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

WVB



Figuur 11 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

Vooral 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.

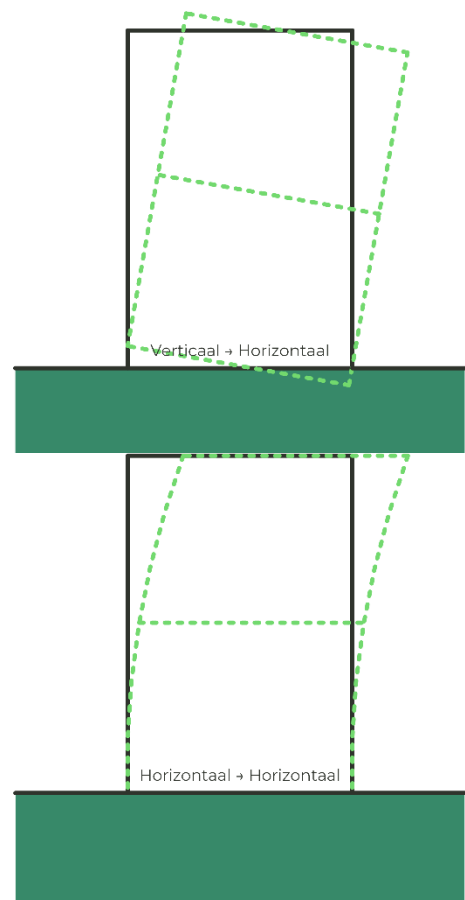
Dit effect noemen we H_{zx} , en is afhankelijk van:

- » 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

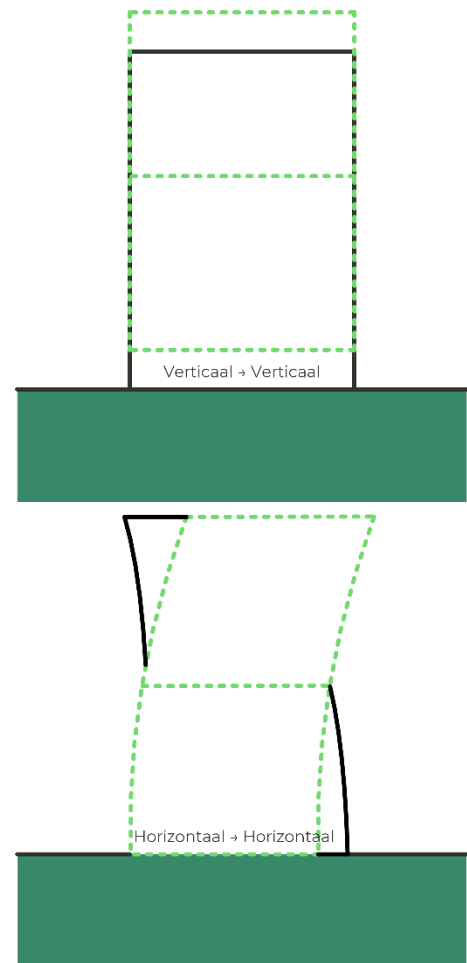


Het derde principe, dat van vering van het gebouw op zijn fundatie, is rechts weergegeven. Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappe onderlaag of lokaal slappere elementen (denk aan kolommen en balkenstructuren). Dit effect noemen we H_{zz} , en is afhankelijk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



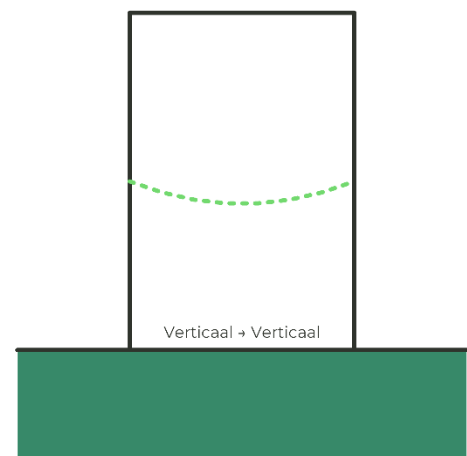
VLOEREN

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:

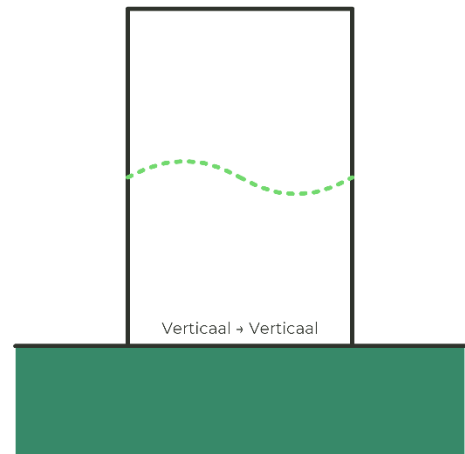
- Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- Afmetingen van de vloer
- Type oplegging



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.

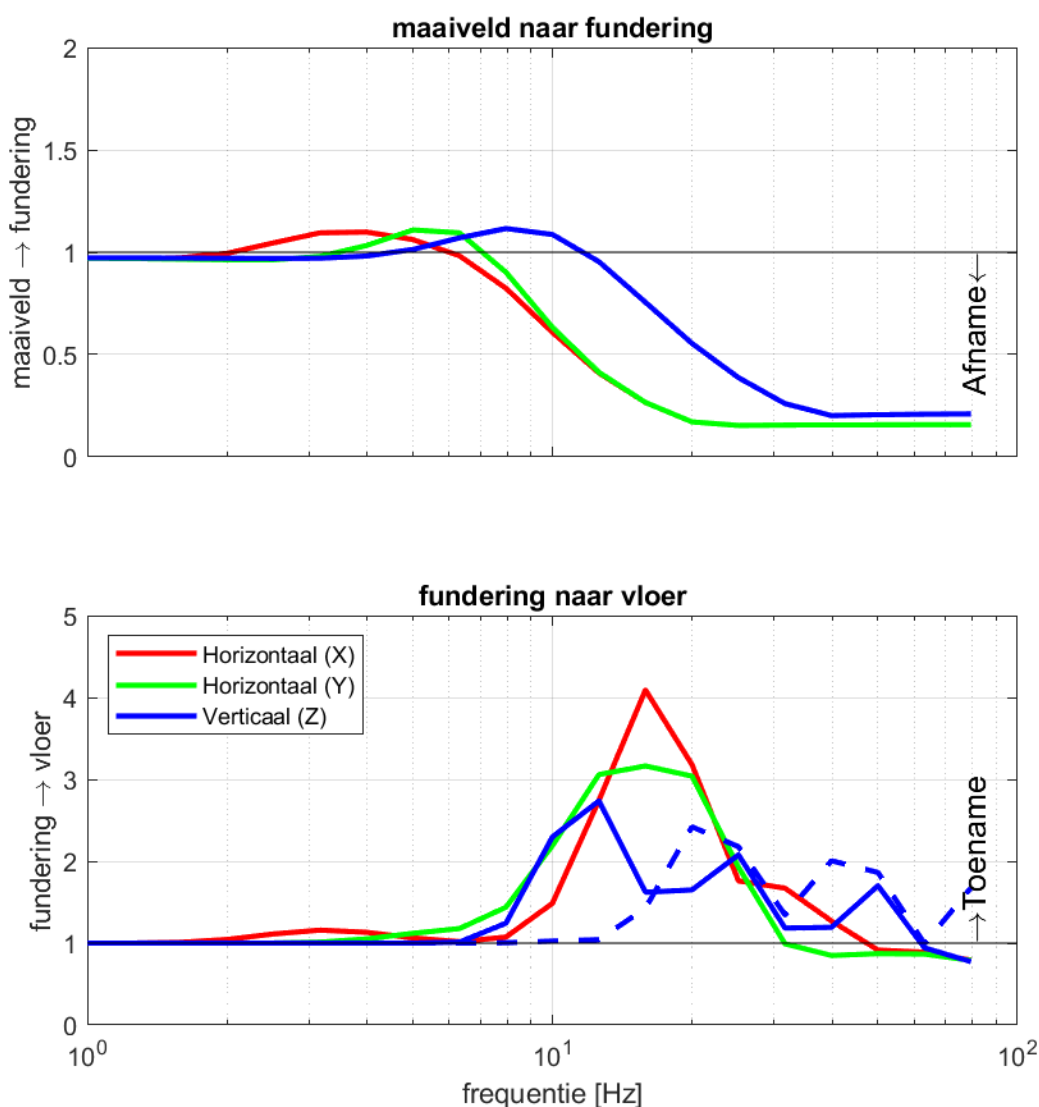
Dit effect noemen we H_{zz2} , en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1} .

Uiteindelijk zorgen alle gebouwbewegingen 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

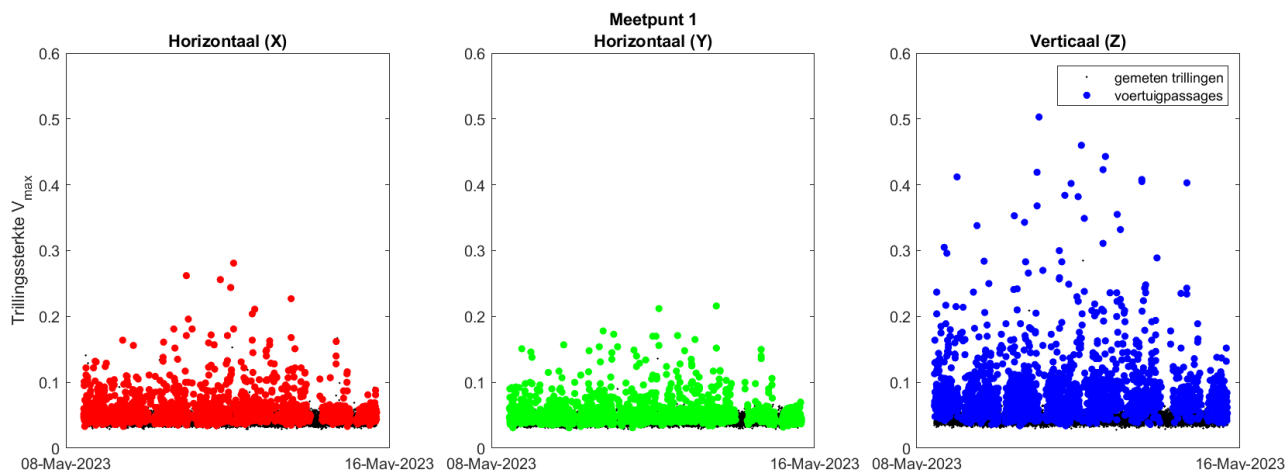
Ter illustratie zijn de resultaten uit de Buildyn-berekeningen weergegeven in Figuur 12 voor de noordoostelijke woning, bij een 200 mm breedplaatvloer en kalkzandsteen constructie.



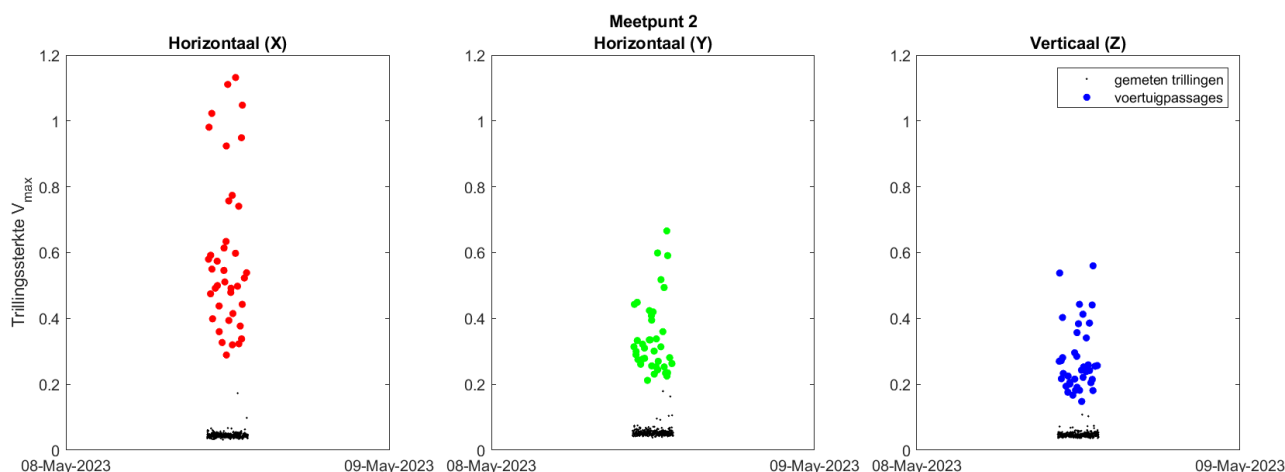
Figuur 12 Buildyn-resultaten voor woning met 200 mm breedplaatvloer. Doorgaande lijn verticaal is midden vloer, onderbroken lijn is op $\frac{1}{4}$ en $\frac{3}{4}$ van overspanning

RESULTATEN METINGEN

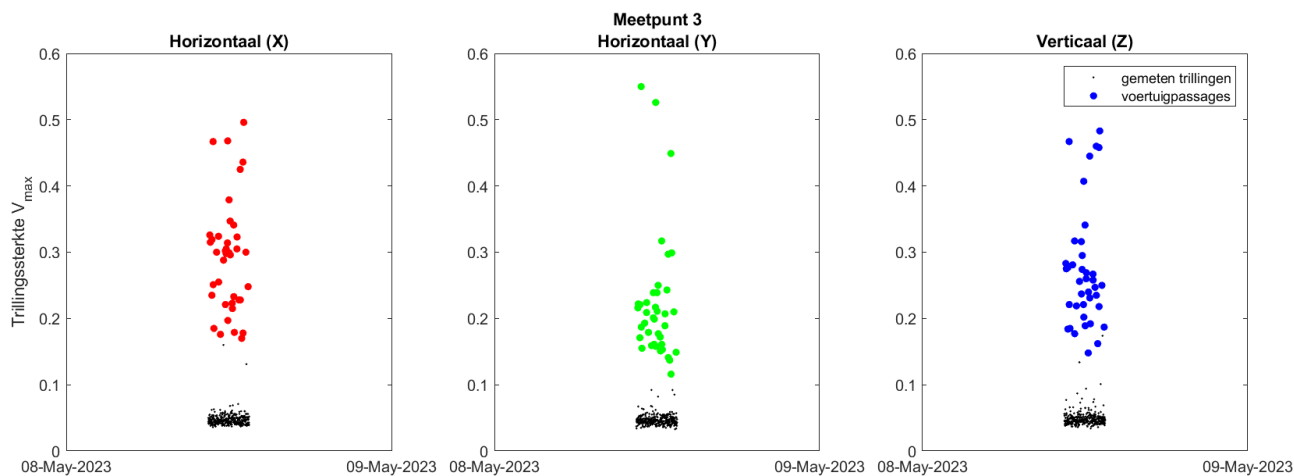
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



Figuur 13 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (fundering bestaande woning, 43 meter van spoor)

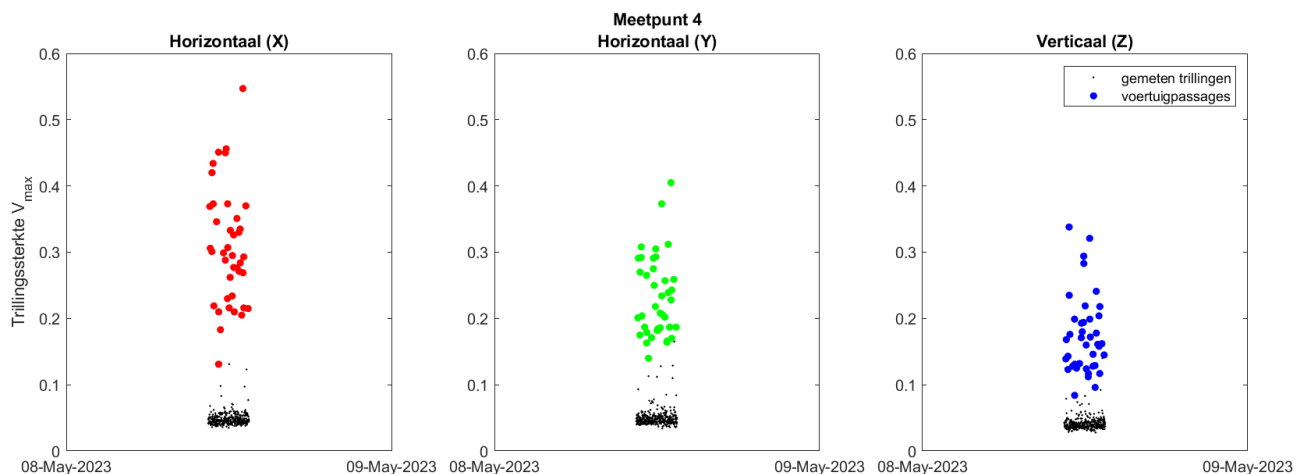


Figuur 14 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (maaiveld, 14 meter van spoor)

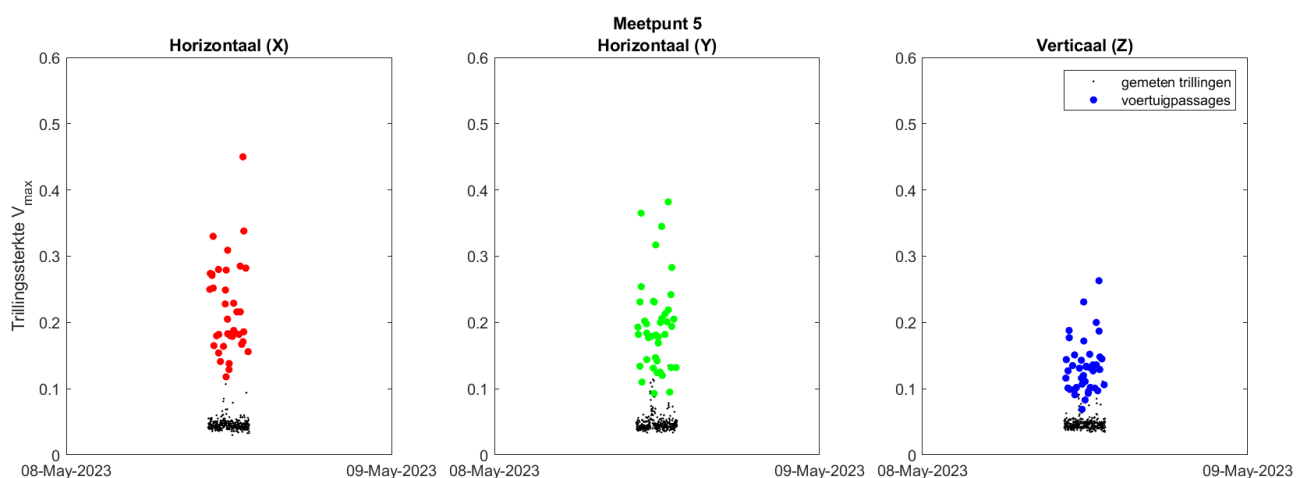


Figuur 15 Gemeten trillingen bij meetpunt 3 (maaiveld, 14 meter van spoor)

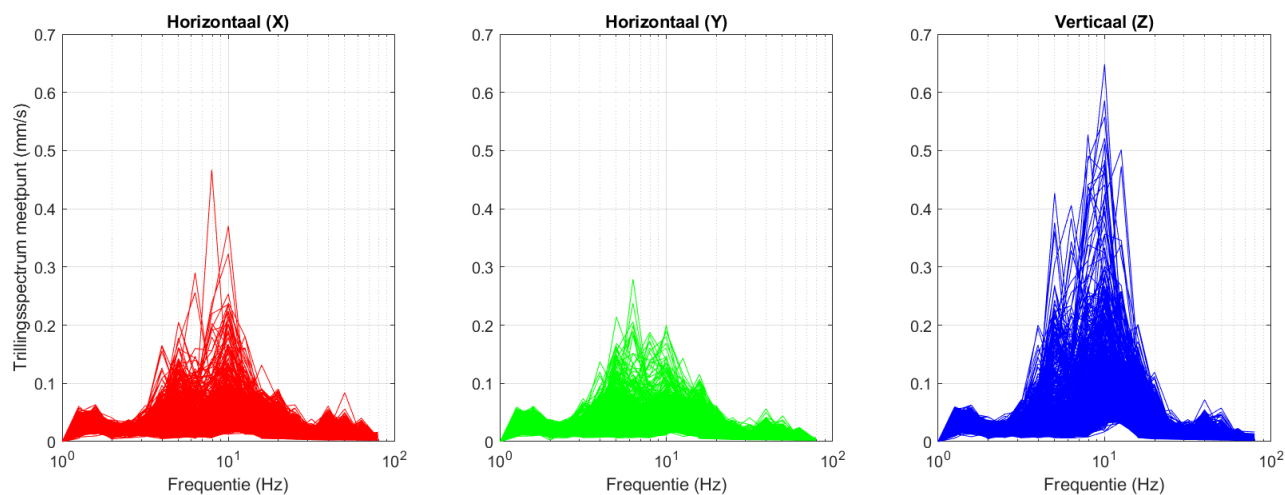




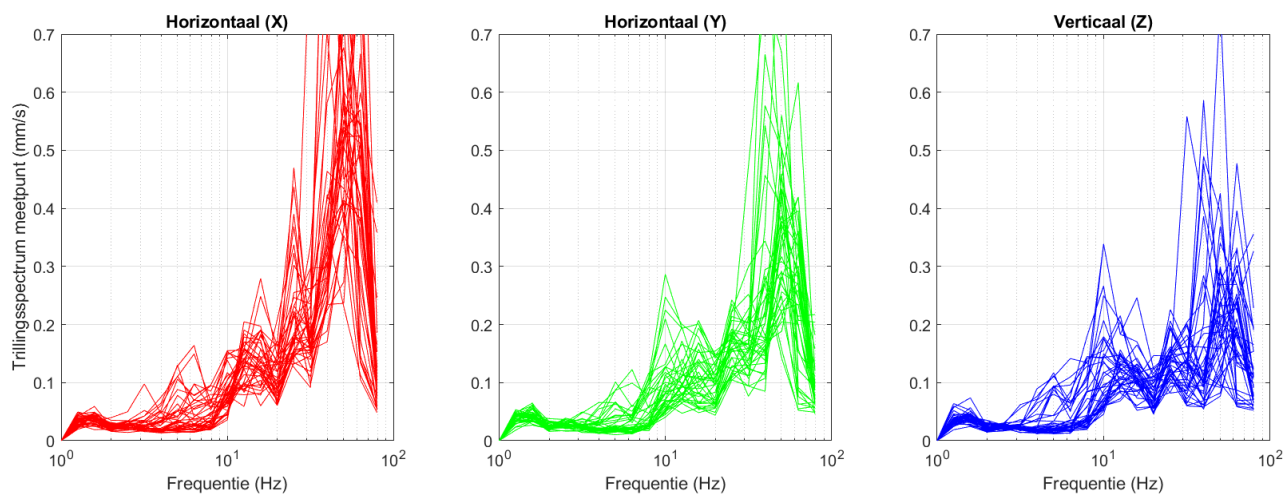
Figuur 16 Gemeten trillingen bij meetpunt 4 (maaiveld, 25 meter van spoor)



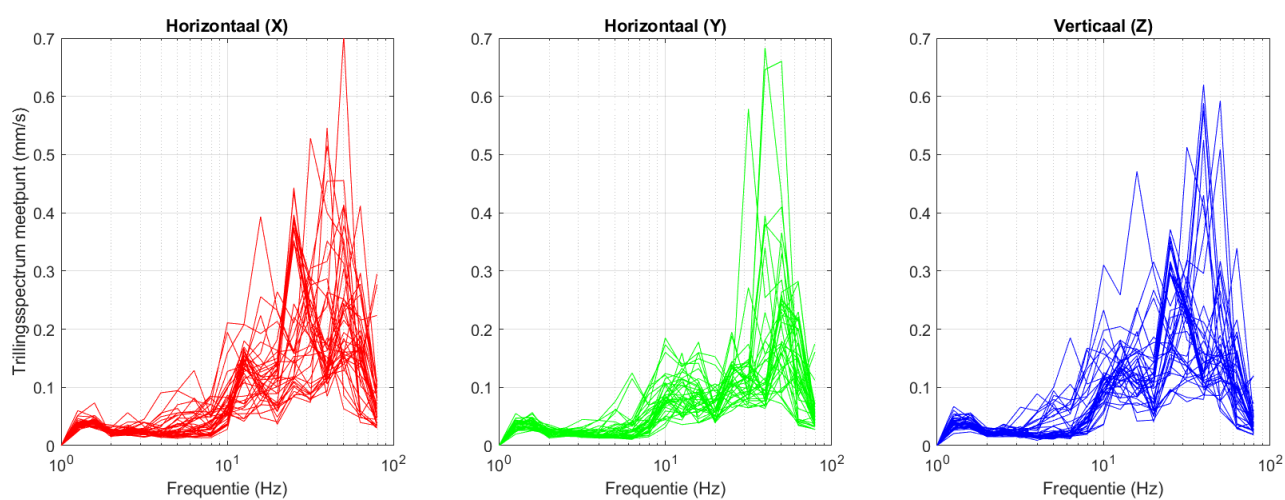
Figuur 17 Gemeten trillingen bij meetpunt 5 (maaiveld, 42 meter van spoor)



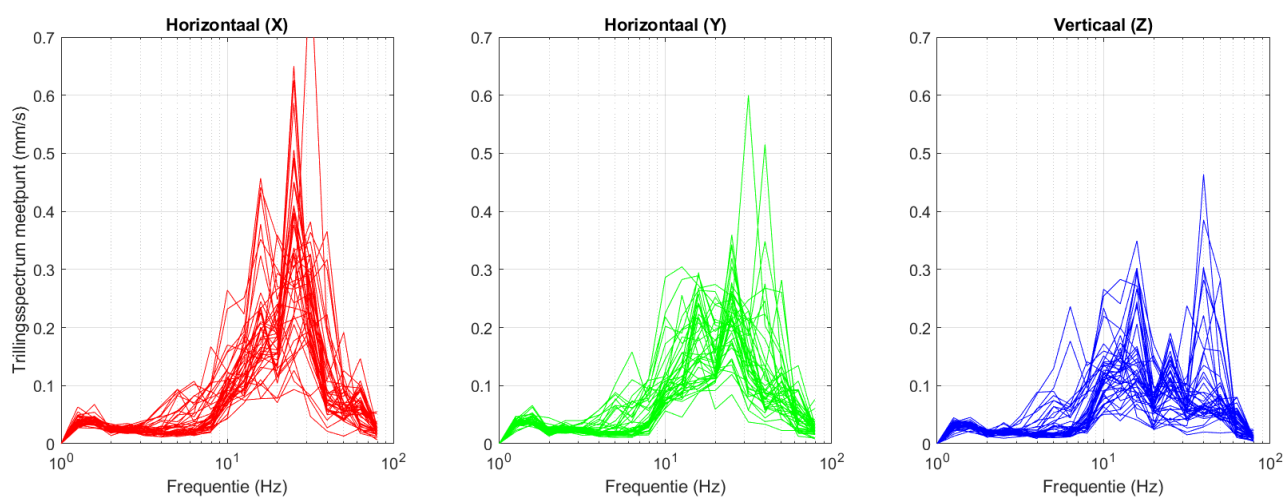
Figuur 18 Tertsbandspectra bij meetpunt 1



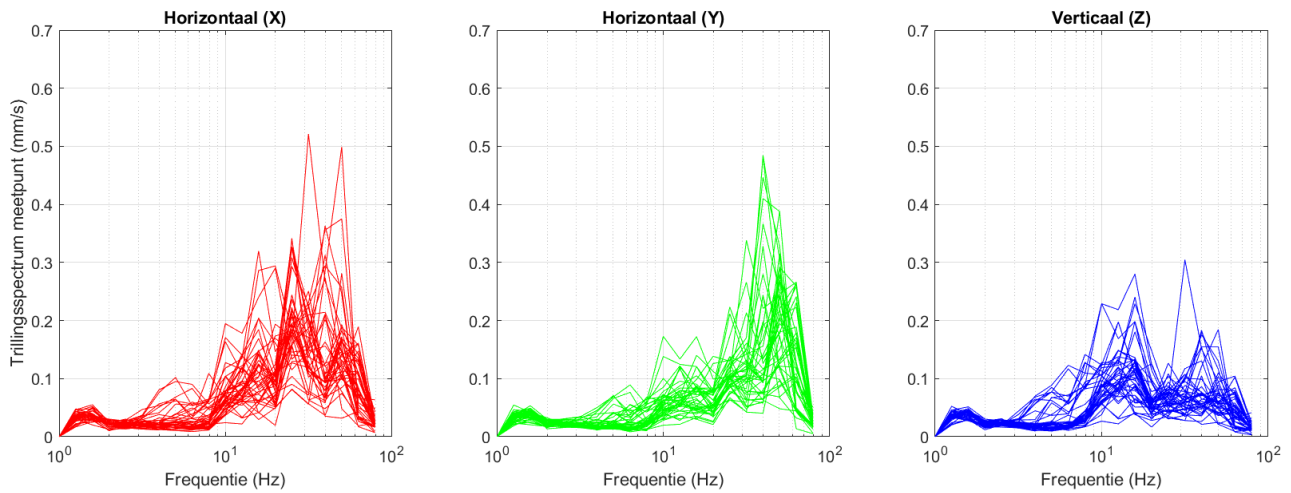
Figuur 19 Tertsbandspectra bij meetpunt 2



Figuur 20 Tertsbandspectra bij meetpunt 3



Figuur 21 Tertsbandspectra bij meetpunt 4

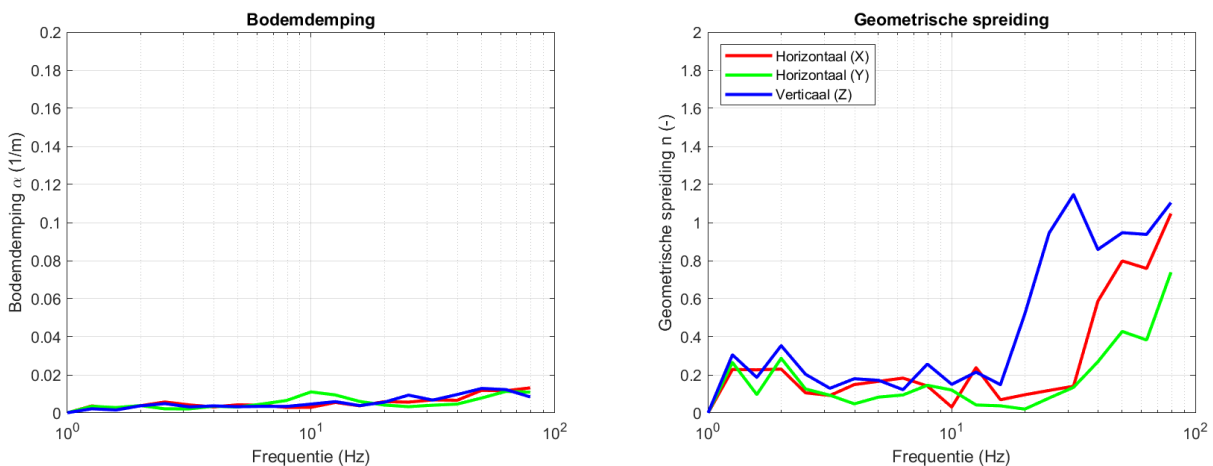


Figuur 22 Tertsbandspectra bij meetpunt 5

De uitdemping van de trillingen als functie van de afstand is bepaald met de empirische Barkan-vergelijking, zoals weergegeven in vergelijking 1.

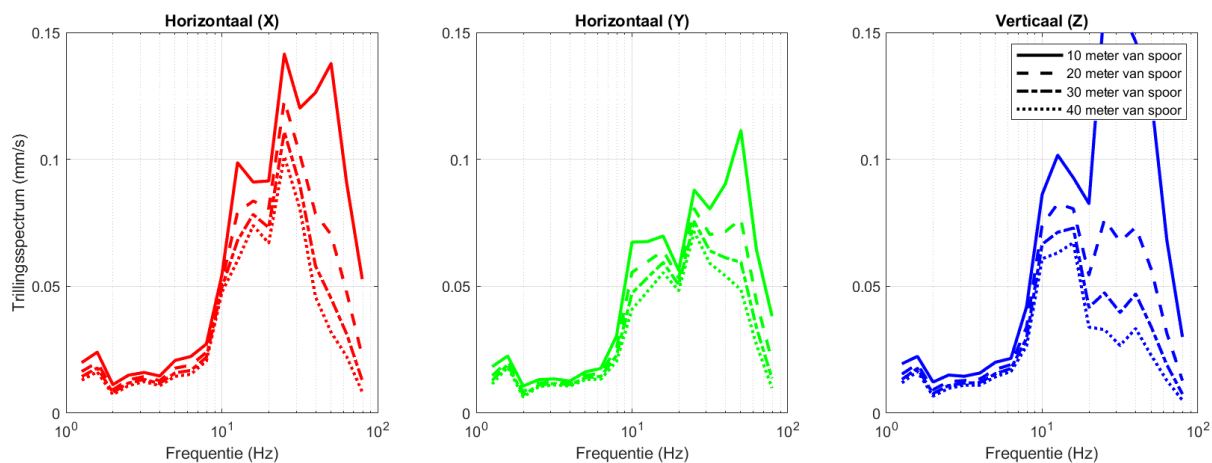
$$V(f, r) = V_0(f, r_0) \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^{n(f)} \cdot e^{-\alpha \cdot (r - r_0)} \quad (1)$$

In deze vergelijking staat V voor de trillingssnelheid, f voor de frequentie, r voor de afstand tot de trillingsbron, r_0 voor de referentieafstand (hier 20 m), n voor de geometrische spreidingsfactor en α voor de bodemdemping. De geometrische spreiding en bodemdemping zijn weergegeven in Figuur 23.



Figuur 23 Bodemdemping α (links) en geometrische spreiding n (rechts) als functie van de frequentie, boven voor positie middenin plangebied, onder voor positie rechts in plangebied

De gemiddelde trillingsspectra op 10, 20, 30 en 40 meter van het spoor zijn weergegeven in Figuur 24. Hier is te zien dat vooral boven de 10 Hz de trillingen uitdempsen met de afstand. De laagfrequente trillingen van goederentreinen (vooral onder de 10 Hz) zijn daarentegen ook op grotere afstand van het spoor nog goed zichtbaar. Deze zijn hier in het gemiddelde trillingsspectrum niet zichtbaar, dat wordt namelijk gedomineerd door reizigerstreinen.

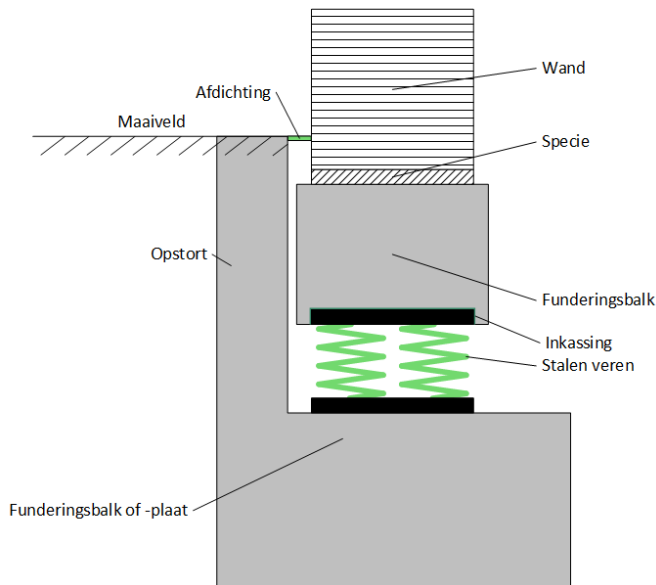


Figuur 24 Gemiddelde trillingsspectra op 10, 20, 30 en 40 meter van het spoor

IV DETAILS MAATREGELEN

Deze bijlage bevat achtergrondinformatie en principedetails van de besproken maatregelen en optimalisaties van het gebouw.

Een principeschets van een afgeveerde fundering met stalen veerdozen is weergegeven in Figuur 25. Een foto van een concrete toepassing bij eengezinswoningen in Prinsenbeek is weergegeven in Figuur 26. Aan de zijkant kan de bodem van de woning worden geïsoleerd door het aanbrengen van bijvoorbeeld een laag EPS, of, zoals in Figuur 25, met een opstort op de funderingsplaat.



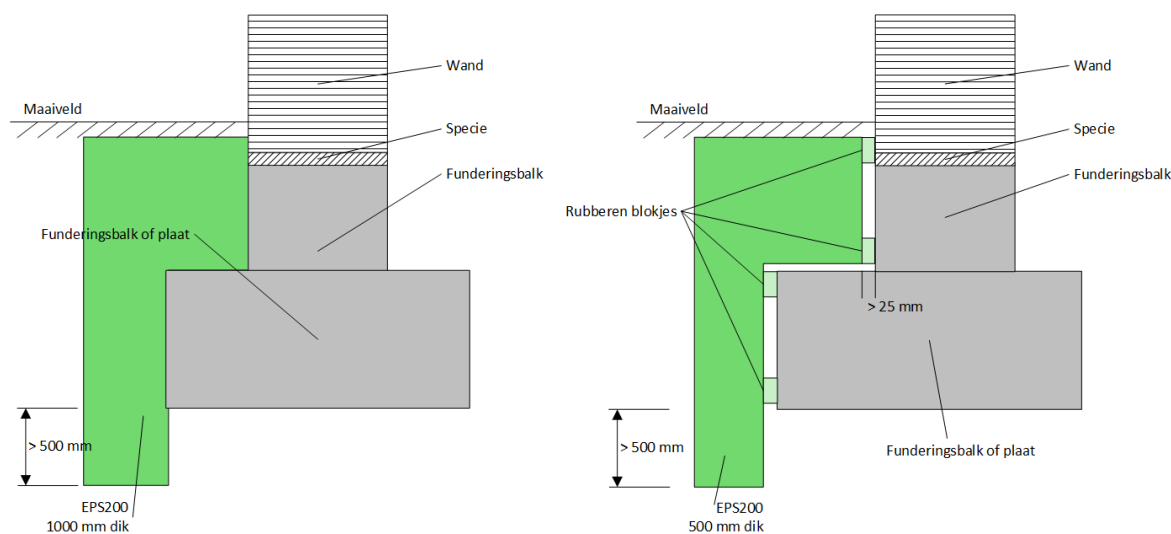
Figuur 25 Principeschets afgeveerde fundering (fundering op staal)



Figuur 26 Dubbele fundering met stalen veerdozen (project in Prinsenbeek)

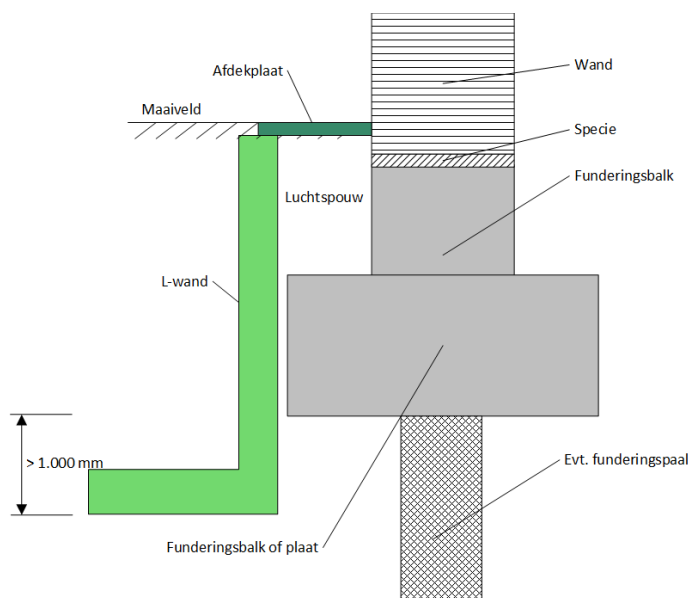
Een principeschets van het bekleden van de fundering met EPS (piepschuim) is weergegeven in Figuur 27. De EPS-kwaliteit dient wat zwaarder te zijn dan standaard i.v.m. de gronddruk. Hier is EPS200 aangegeven. De minimaal benodigde dikte voor voldoende reductie is zo'n 1000 mm, om opdrijven te voorkomen moet dit tot de GHG-waarde van het grondwaterpeil worden aangebracht en verankerd worden aan de fundering. Een geringere dikte is ook mogelijk, mits

gebruik wordt gemaakt van een luchtsponw van minimaal 30 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 27 Fundering met EPS-scherm ervoor (links) en met EPS en luchtsponw (rechts)

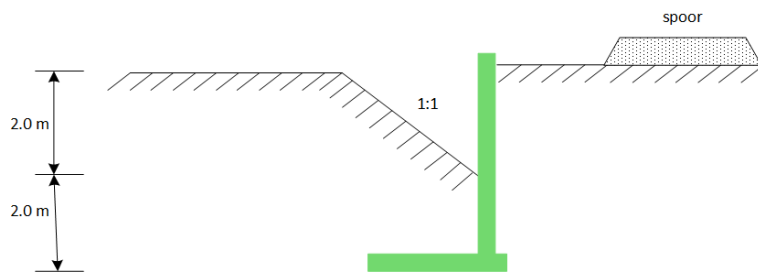
Een principeschets van het plaatsen van een L-wand direct voor de fundering is rechts weergegeven in Figuur 28. Belangrijk hierbij is dat een luchtsponw nodig is (geen contact tussen L-wand en fundering, of opvangen met rubberen afstandhouders van minimaal 30 mm dik), en dat deze dient te worden afgedekt 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 28 L-wand met luchtsponw voor fundering

Een andere in dit rapport besproken optie is het combineren van een betonnen prefab L-wand met een sloot op de noordwestelijke perceelrand, direct langs het spoor, zie Figuur 29. Door de L-wand dieper te plaatsen ontstaat een trillingsreducerend effect, waarbij geldt dat hoe dieper deze

wordt geplaatst, hoe groter het effect is. Merk op dat alle werkzaamheden binnen 11 meter van hart spoor vergunningsplichtig zijn bij ProRail.



Figuur 29 Sloop met L-wand, 4 meter diep