

MÖLLINCKSVAART BERGENTHEIM

Trillingsonderzoek t.b.v. nieuwbouw



Colofon

Auteur	Tijmen van der Veen thijmen@we-boost.nl
Controle en vrijgave	Pieter Boon pieter@we-boost.nl +31 6 10 03 94 54
Projectcode	WBD2020-020
Versienr	1.0
Datum	23 juli 2021
Status	Vrijgegeven
Opdrachtgever	Roosdom Tijhuis B.V.



© We-Boost Data 2021

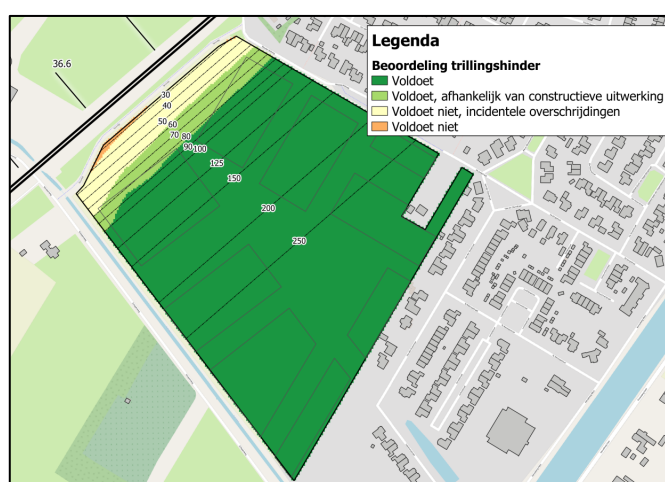
Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming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

Kern van dit rapport

Aan de zuidkant van de dorpskern van Bergentheim wordt een nieuwe woonwijk gerealiseerd, Möllincksvaart. In het plangebied worden grondgebonden woningen gerealiseerd. Het plangebied bevindt zich in de nabijheid van de spoorlijn Zwolle – Emmen. 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 het plangebied, en zo ja, met welke maatregelen deze hinder is te voorkomen. 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 overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder niet zijn uit te sluiten in delen van het plangebied. De overschrijdingen zijn vooral het gevolg van zware goederentreinen die met hoge snelheid (80 – 90 km/h) passeren, in combinatie met de gelaagde bodemopbouw waardoor de trillingen slecht uitdempen en tot op relatief grote afstand voelbaar zijn. De hoogte van de trillingen is afhankelijk van de afstand tot het spoor, het type bebouwing en de verdere constructieve uitwerking van de plannen. Rond de spoorwegovergang bij de Schapenweg zijn de trillingen wat hoger. Ter illustratie is de beoordeling van de trillingen in het plangebied hierboven weergegeven, in grijze kaders zijn de bouwvlakken weergegeven.



Ten behoeve van de verdere uitwerking van de plannen hebben wij het plangebied opgedeeld in contourgebieden volgens 4 classificaties, zie onderstaand overzicht.

Classificatie	Contourafstand
Voldoet, ongeacht constructieve uitwerking	> 85 m
Voldoet bij goed ontwerp	< 85 m
Voldoet niet, beperkt aantal overschrijdingen	< 60 m
Voldoet niet, maatregelen nodig	< 30 m

Aanbevelingen

Algemeen adviseren we om gebouwen in de twee bouwvlakken die het dichtst bij het spoor liggen zo ver mogelijk bij het spoor vandaan te positioneren. Houd hierbij ook rekening met de spoorwegovergang Schapenweg, rond deze spoorwegovergang zijn de trillingen hoger.

Per contourgebied adviseren we het volgende:

In dit contourgebied voldoen de trillingen, er zijn geen maatregelen of constructieve randvoorwaarden nodig om te voldoen aan het beoordelingskader. Vermijd wel zeer slappe, lichte bouwconstructies. Globaal ligt dit gebied buiten de 85 meter van het spoor (bij de spoorwegovergang buiten de 100 meter van het spoor).

In dit contourgebied is het afhankelijk van de constructieve uitwerking van de plannen of de trillingen voldoen aan het beoordelingskader. Globaal ligt dit gebied tussen de 60 meter en 85 meter van het spoor. Voor dit gebied gelden de volgende adviezen:

1. Vermijd houtskeletbouw en andere lichte bouwtechnieken (stalen constructies).
2. Maak waar mogelijk gebruik van breedplaatvloeren i.p.v. kanaalplaat- of ribbenvloeren. Breedplaatvloeren kennen een hogere demping en zorgen voor lagere trillingen.
3. Plaats dichtbij het spoor grotere bouwvolumes en zwaardere bouw, deze bouwtypes zijn wat minder gevoelig voor trillingen.
4. Zorg voor een eigenfrequentie van de vloeren van minimaal 16 Hz. Dit is te realiseren door gebruik te maken van dikkere vloeren, kortere vloeroverspanningen of vloeren ingeklemd op te leggen (bijv. doorgaande breedplaatvloeren bij rijwoningen).

Met bovenstaande aanpassingen wordt in dit gebied voldaan aan het beoordelingskader.

Als bovenstaande optimalisaties om wat voor reden dan ook niet mogelijk zijn, dan dient normaal gesproken te worden gekeken naar andere maatregelen (aan het spoor, in de bodem of aan de woningen). Mogelijke maatregelen zijn:

1. Maatregelen aan de bron (het spoor of de treinen). Deze maatregelen zijn zeer kostbaar. Meest effectief is een betonplaat onder beide sporen over een lengte van 350 meter, maar deze maatregel valt buiten het plangebied en kost € 3.6 tot € 5.6 mln. incl. BTW (excl. kosten ProRail en NS).
2. Maatregelen in de bodem, deze zijn eveneens kostbaar. Meest kosteneffectief is het realiseren van een minimaal 2 meter diepe sloot aan de noordwestzijde van het perceel (verdiepen bestaande watergang), in combinatie met een 4 meter diepe L-wand. Deze maatregel kost € 0.7 tot € 1.1 mln. incl. BTW.
3. Maatregelen aan de gebouwen. Voorbeelden zijn het verzwaren van de fundering (500 mm dikke plaatfundering of zware paalfundering), of het realiseren van een dubbele fundering met daartussen stalen veerdozen, afgeveerd op maximaal 4 Hz (trillingsisolatie). Deze laatste maatregel is het meest effectief, maar kost tussen de € 10.000 en € 25.000 per woning.

Argumenten om in deze zone geen maatregelen te treffen, zijn:

- Er is sprake van een zeer beperkt aantal overschrijdingen (maximaal 1 per week, kan in de toekomst na intensivering goederenvervoer toenemen naar maximaal 2 per week), veroorzaakt door zware goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte. De trillingen van alle reizigerstreinen en de meeste goederentreinen voldoen wel aan het beoordelingskader.
- De trillingen voldoen weliswaar niet aan de strenge streefwaarden voor nieuwbouw uit de SBR B-richtlijn, maar wel ruimschoots aan de soepelere streefwaarden voor bestaande situaties uit de SBR B-richtlijn. In die soepelere streefwaarden voor bestaande situaties is een zekere mate van gewinning meegenomen.
- De woningen worden gerealiseerd in een zone dichtbij het spoor, waar nu ook al bebouwing is gerealiseerd in de naastgelegen woonwijk die dicht bij het spoor staat. Het gaat bovendien om oudere, meer trillingsgevoelige bebouwing, waar de trillingen 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 lager dan in andere, al bestaande bebouwing rond deze locatie. Bovendien zullen de trillingen in de nieuwbouw door de zware constructie lager zijn dan in de bestaande woning.

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

In dit contourgebied is sprake van een beperkt aantal overschrijdingen (maximaal 2 per week na intensivering van het goederenvervoer). In de voorgestelde verkaveling zijn geen bouwvlakken in deze zone geprojecteerd. We adviseren om dat te handhaven, daarmee zijn dure maatregelen tegen trillingen te voorkomen.

In dit contourgebied is sprake van een relatief groot aantal overschrijdingen. Deze zone valt buiten het plangebied

Samenvatting

Samengevat geldt dat de trillingen in delen van het plangebied *mogelijk* niet voldoen aan het beoordelingskader, de SBR B-richtlijn. Door bij de inrichting van het plangebied en verdere constructieve uitwerking rekening te houden met trillingen, zijn overschrijdingen van het beoordelingskader te voorkomen. In dit rapport worden handvatten gegeven voor het afwegen van constructieve optimalisaties en maatregelen. Of deze constructieve optimalisaties of maatregelen doelmatig zijn, hangt af van de verdere uitwerking van de plannen. In ieder geval bevat dit rapport de handvatten waarmee een constructeur of architect de plannen verder kan uitwerken, en waarmee de initiatiefnemer maatregelen of optimalisaties kan afwegen op doelmatigheid.

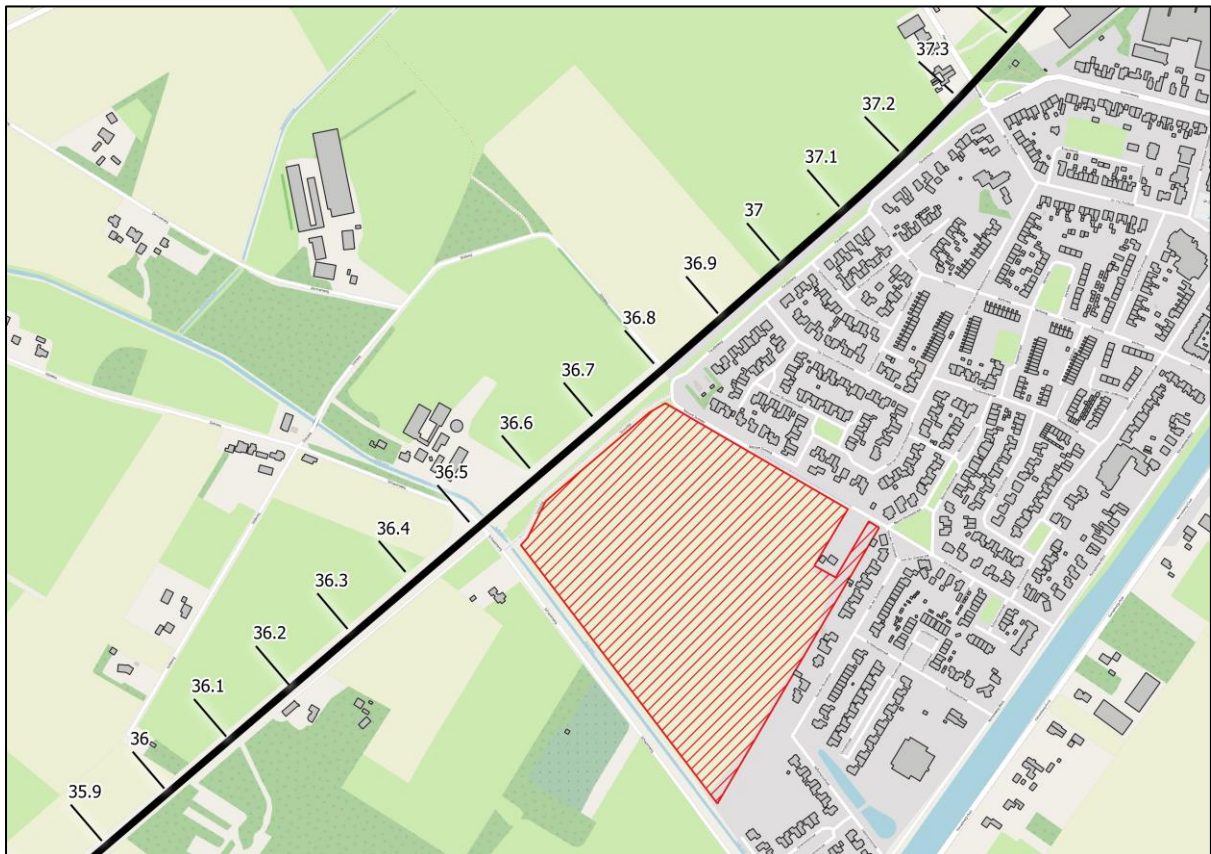
Inhoudsopgave

1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding	7
1.2	Doel	7
1.3	Leeswijzer	8
2	Situatie en uitgangspunten	9
2.1	Situatiebeschrijving	9
2.2	Uitgangspunten	10
3	Beoordelingskader	12
3.1	Beoordelingskader	12
3.2	Rekenmethode	13
4	Verwachte trillingen in de woningen	16
4.1	Meetresultaten	16
4.2	Trillingen in geplande nieuwbouw	16
4.3	Maatregelen	19
4.4	Advies voor verdere ontwikkeling van het plan	24
4.5	Onzekerheden in het onderzoek	25
I	Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek	27
II	Bijlage Rekenmodel Buildyn	29
	Fundering	30
	Draagconstructie	30
	Vloeren	31
	Resultaten	32
III	Resultaten metingen	33
IV	Principedetails maatregelen	37

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Aan de zuidkant van de dorpskern van Bergentheim wordt een nieuwe woonwijk gerealiseerd, Möllincksvaart. In het plangebied worden grondgebonden woningen gerealiseerd. Het plangebied bevindt zich in de nabijheid van de spoorlijn Zwolle – Emmen, zie Figuur 1. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet *op voorhand* worden uitgesloten.



Figuur 1 Plangebied Möllincksvaart in Bergentheim

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 (de SBR B-richtlijn). Als er overschrijdingen van het beoordelingskader worden verwacht, dan geven we aan met welke constructieve aanpassingen of maatregelen wel wordt voldaan aan 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 het onderzoeksgebied voor de geplande gebouwen op basis van de gemeten trillingen en de eigenschappen en functies van de gebouwen. Het resultaat van deze stap wordt in hoofdstuk 4 beschreven. Hier gaan we ook in op maatregelen waarmee eventuele trillingshinder is te voorkomen.

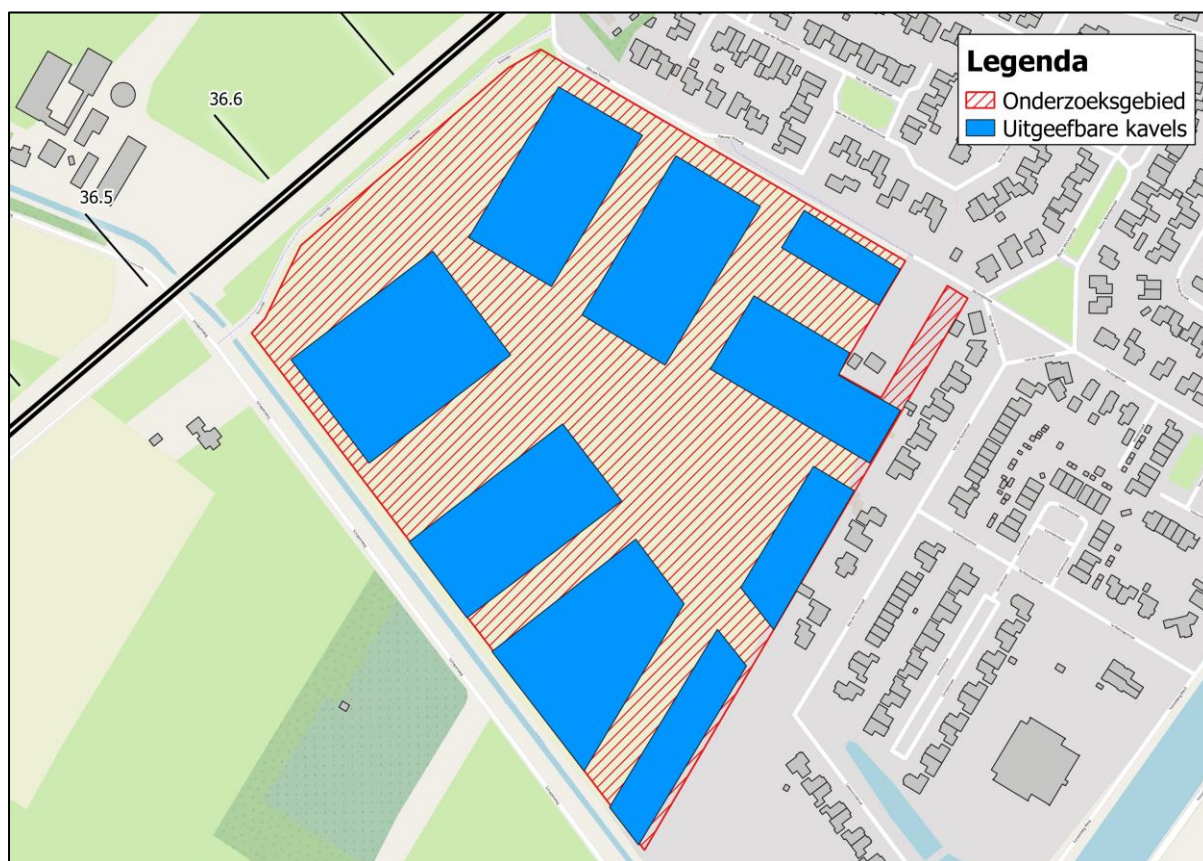
De bijlages bevatten technische informatie van het onderzoek, zoals een toelichting op de rekenmethodiek, relevant grondonderzoek, resultaten van de metingen en een toelichting op mogelijke trillingsmaatregelen.

2 Situatie en uitgangspunten

In dit hoofdstuk geven wij een toelichting op de beoogde toekomstige situatie in het plangebied en geven we de uitgangspunten van het onderzoek weer.

2.1 Situatiebeschrijving

De planlocatie bestaat op dit moment uit land met agrarisch gebruik, gelegen tussen het spoor, de Schapenweg, de Nieuwe Slotweg en aan de zuidzijde de Bolsstraat en de Van der Sluisstraat. Het opgestelde stedenbouwkundig plan geeft ruimte aan verschillende soorten geplande bebouwing, zoals vrijstaande woningen, twee-onder-een kap woningen en rijwoningen. De vorm en locatie van de bebouwing is nog niet bepaald. Een voorbeelduitwerking van de uitgifbare kavels is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Uitgifbare kavels uit stedenbouwkundig plan

De uitgifbare kavels bevinden zich in een zone van zo'n 50 tot 440 meter van het spoor. Het aantal treinen per uur per richting en de rijnsnelheid van de treinen zijn weergegeven in Tabel 1. De gegevens in Tabel 1 zijn gebaseerd op gegevens uit het Geluidsregister Spoor en gegevens van de vervoerders. Volgens de NMCA spoor 2030-2040 (vooruitblik voor goederenvervoer) zal het goederenvervoer op deze lijn licht toenemen van de huidige 2 tot 3 goederentreinen naar 3 tot 5 goederentreinen per dag. Er wordt geen verandering in het aantal reizigerstreinen voorzien.

Tabel 1 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)
Stoptrein	100 – 130 km/h	3.00	2.00	0.88
Sneltrein	100 – 130 km/h	1.00	1.00	0.13
Goederentrein	80 – 90 km/h	0.03	0.18	0.15

Zwaar wegverkeer over de nabijgelegen overweg aan de Schapenweg en over wegen met drempels of klinkers kunnen ook voor voelbare trillingen in de woningen zorgen, maar wegverkeer is niet nader kwantitatief beschouwd in dit onderzoek.

2.2 Uitgangspunten

In deze paragraaf lichten wij de gebruikte uitgangspunten toe. In het volgende hoofdstuk (onder werkwijze) leggen we uit hoe deze uitgangspunten zijn verwerkt in de berekeningen.

2.2.1 Gegevens bebouwing

In het plangebied is ruimte voor verschillende soorten bebouwing. Er is een stedenbouwkundig plan vastgesteld (25 maart 2021) waarin dit wordt weergegeven. Omdat er nog geen definitief ontwerp van de geplande bebouwing beschikbaar is, hebben we meerdere varianten doorgerekend, zowel dichtbij als verder weg gelegen van het spoor. Het rekenmodel voor de bebouwing is gebaseerd op Tabel 2.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

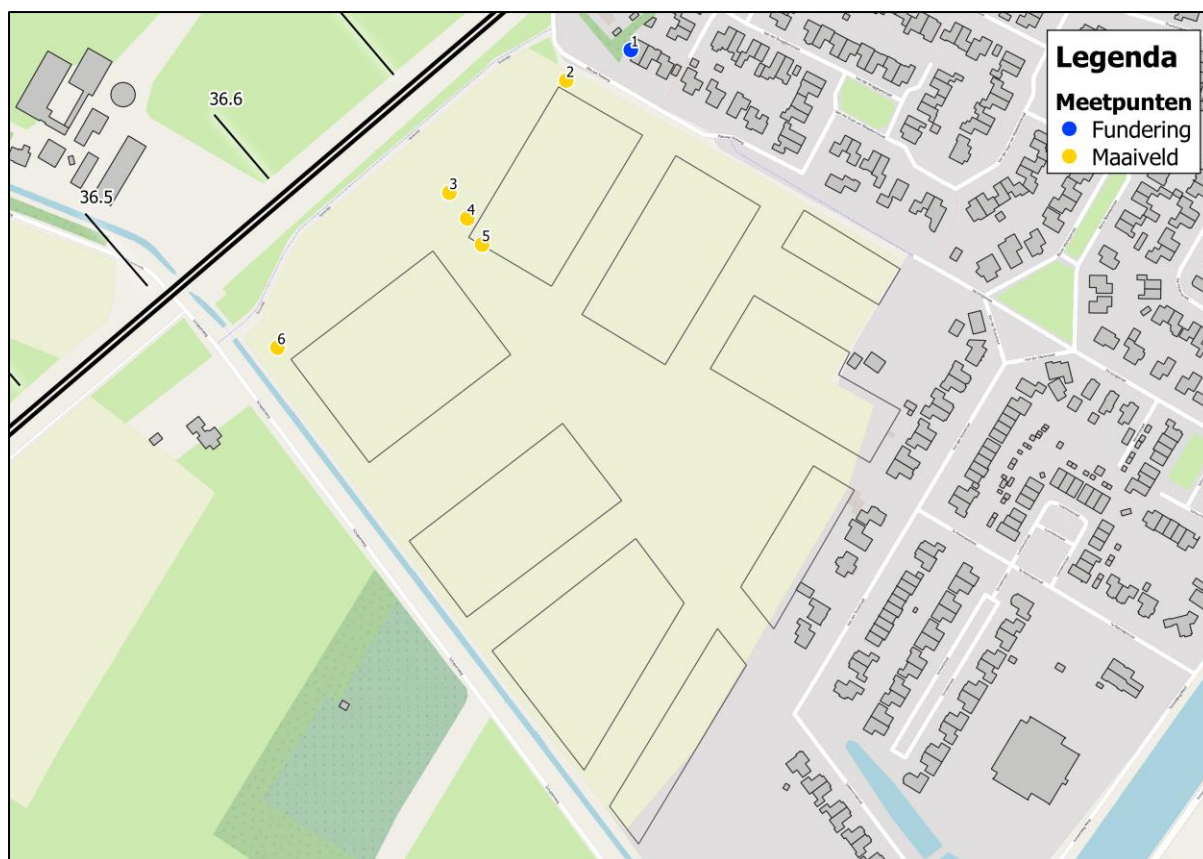
Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Meerdere varianten: - Breedplaatvloeren 200 mm, met 60-70 mm zandcement dekvloer - Kanaalplaatvloeren 200 en 260 mm, met 60-70 mm zandcement dekvloer - Houten vloeren, diverse varianten
Hoogte	6.0 tot 9.0 m
Lengte vloerveld	Meerdere varianten, variërend van 4.8 tot 7.0 m
Breedte vloerveld	Meerdere varianten, variërend van 8.0 tot 12.0 m
Constructietype	Meerdere varianten: - Kalkzandsteen/metselwerk - Prefab en in i.h.w.g. beton - Houtskeletbouw
Fundering	Op palen en op staal

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 nabijheid 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

Door Alcedo zijn metingen uitgevoerd in en nabij het onderzoeksgebied. De metingen zijn uitgevoerd in juli 2021. Er zijn metingen uitgevoerd op zes punten: één meetpunt aan de fundering van bestaande bebouwing naast het plangebied en vijf meetpunten op maaiveld, zie Figuur 3. De meetresultaten van het meetonderzoek worden weergegeven in hoofdstuk 4.



Figuur 3 Meetpunten in en bij het onderzoeksgebied

3 Beoordelingskader

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

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.¹

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 de geplande bebouwing 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:

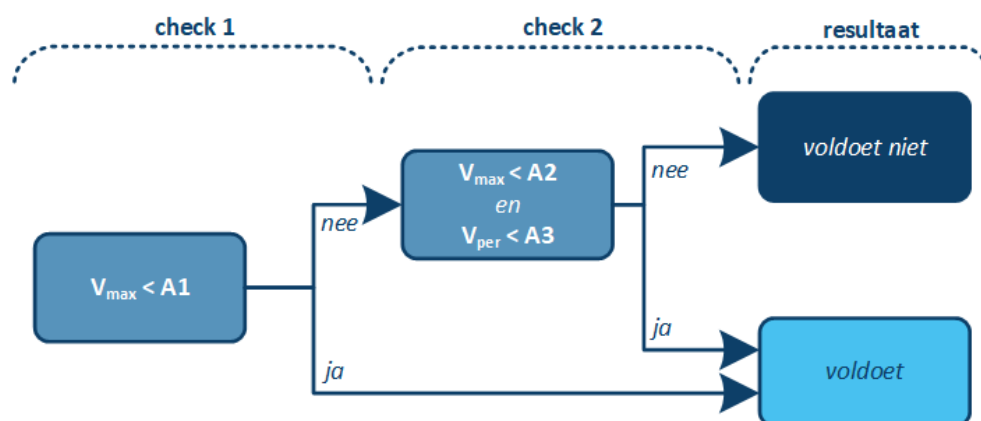
1. De richtlijn toetst zowel een maximaal optredende trillingssterkte (V_{max} , treedt op bij de trein die gedurende de meetperiode de hoogste trillingen veroorzaakt) als het tijdsgemiddelde van de trillingen (V_{per} , deze grootheid is in tegenstelling tot V_{max} dus ook afhankelijk van het aantal 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 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. In het voorliggende plan gaat het uitsluitend om gebouwen met een woonfunctie.

¹ 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.

- 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.
3. Een gebouw met een woonfunctie 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.
4. Voor gebouwen met een kantoorfunctie geldt hetzelfde, alleen wordt daar geen onderscheid gemaakt tussen dag en nacht.

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 4 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

3.2 Rekenmethode

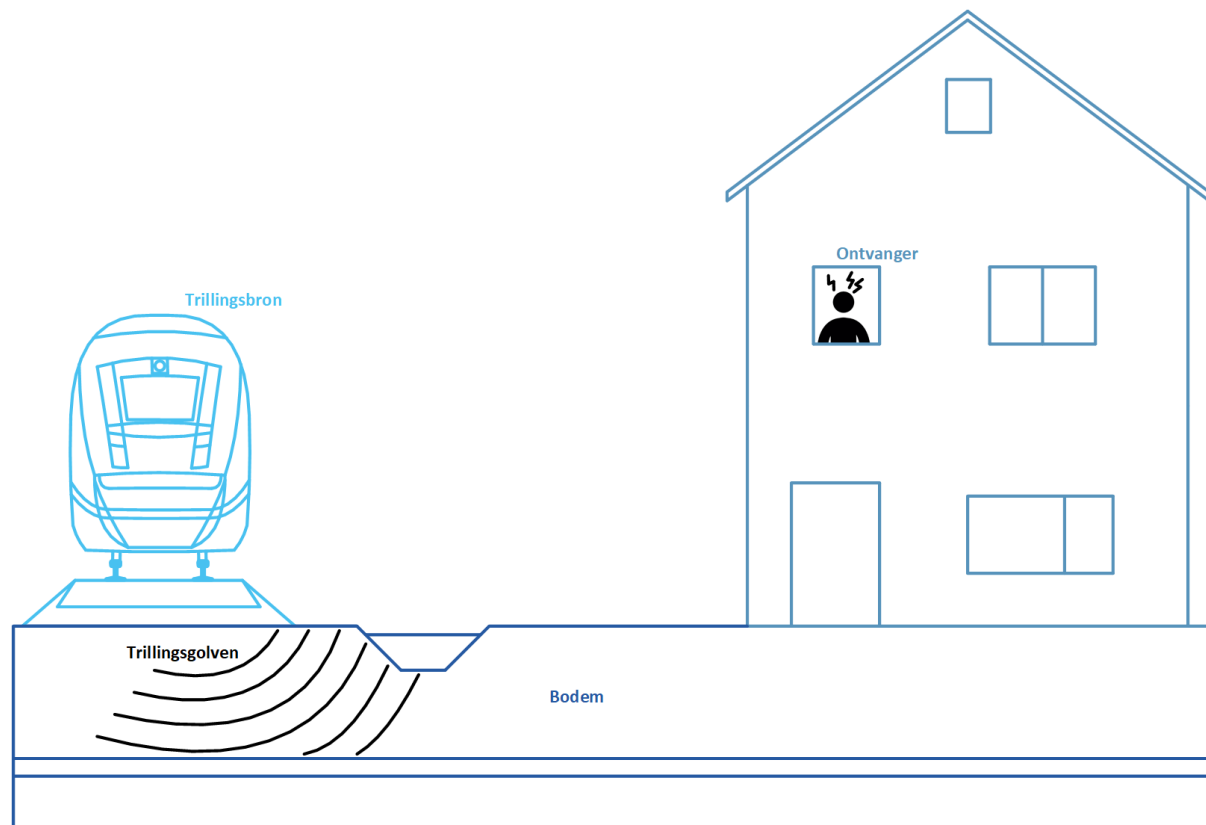
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde gebouwen, wordt op basis van metingen aan bestaande bebouwing een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande nieuwe bebouwing. Deze verwachte trillingen 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. Daarnaast worden de trillingen op maaiveld in de nabijheid van de geplande bebouwing geanalyseerd. Hieronder wordt een korte uitleg gegeven over hoe trillingen zich voortplanten van de trillingsbron tot in het gebouw, en 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 5.

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



Figuur 5 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 in en bij het plangebied, aan de fundering van bestaande bebouwing en op maaiveld. 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 vooral uit zandlagen, maar bovenin komen ook leem- en kleilagen voor, 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 bouwgedrag 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 de gebouwen gemodelleerd en doorgerekend zijn. De resultaten van het model zijn geïjkt met praktijkresultaten uit metingen. Een toelichting op het rekenmodel Buildyn is gegeven in Bijlage II.

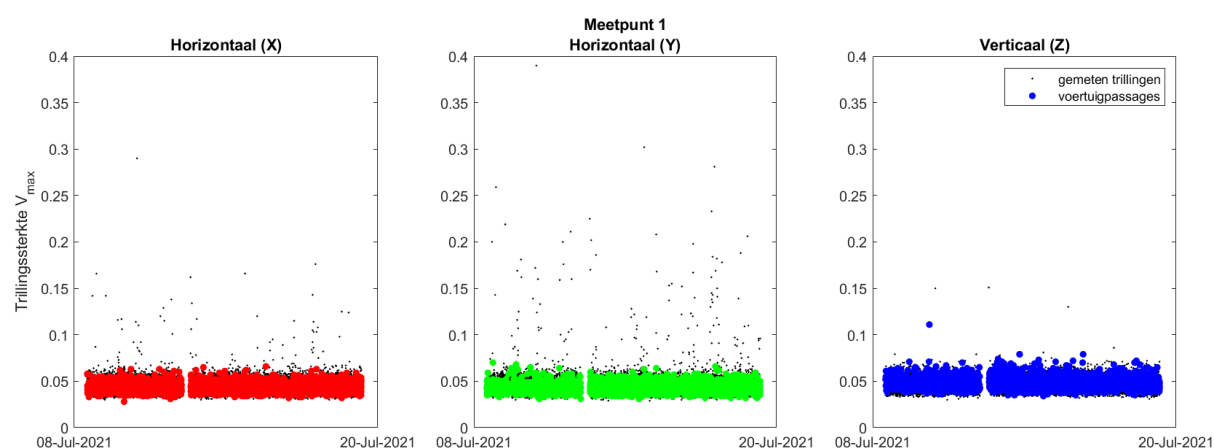
4 Verwachte trillingen in de woningen

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.

4.1 Meetresultaten

Alcedo heeft metingen uitgevoerd aan de fundering van bestaande bebouwing en op maaiveld. De trillingen op het meetpunt aan de fundering van de bestaande bebouwing zijn weergegeven in Figuur 6 (zie Bijlage III voor meetinformatie van alle meetpunten). In Figuur 6 valt het volgende op:

1. De trillingen zijn maatgevend in verticale richting.
2. De hoogste trillingen worden veroorzaakt door stoortrillingen bij de woning. De hoogst gemeten trillingen afkomstig van treinen worden veroorzaakt door passerende goederentreinen. Goederentreinen hebben doorgaans een grotere massa dan reizigerstreinen, en veroorzaken daardoor vaak meer trillingen.
3. De trillingen van de stoptreinen en sneltreinen vallen weg in de achtergrondtrillingen, omdat de afstand tussen het spoor en de bestaande bebouwing dermate groot is dat deze trillingen sterk zijn afgezwakt.
4. Uit Bijlage III valt nog op dat de trillingen rond de overweg aanzienlijk hoger zijn. Vaak komt dit door de slechtere spoorligging, ES-lassen en stijfheidsverschillen in de onderbouw rond spoorwegovergangen.



Figuur 6 Gemeten trillingen op meetpunt aan fundering van bestaand pand

4.2 Trillingen in geplande nieuwbouw

De geplande gebouwen zijn gemodelleerd op basis van de input uit hoofdstuk 2. Er is een groot aantal bouwkundige en constructieve uitwerkingen doorgerkend. Het trillingsgedrag van de gebouwen is weergegeven in Bijlage II. Met deze modelresultaten zijn de trillingen in de toekomstige gebouwen bepaald. De trillingen zijn sterk afhankelijk

van de bouwkundige en constructieve uitwerking. In Tabel 4 is aangegeven vanaf welke afstand de trillingen voldoen aan het beoordelingskader per gebouwtype. In Tabel 4 zijn de globale contourafstanden weergegeven voor vier classificaties in de beoordeling:

1. Voldoet, ongeacht constructieve uitwerking: vrijwel elk type gebouw voldoet. Alleen gebouwen met zeer sterk afwijkende materialisaties (zoals slappe stalen constructies, zeer grote vloeroverspanningen e.d.) kunnen mogelijk niet voldoen.
2. Voldoet bij goed ontwerp, d.w.z. dat bij de verdere uitwerking rekening wordt gehouden met trillingen. Handvatten hiervoor worden verderop gegeven.
3. Voldoet niet, beperkt aantal overschrijdingen: in deze zone zijn er alleen in de nachtperiode (na 23:00 en voor 6:00) overschrijdingen van het beoordelingskader, mits sprake is van een goed ontwerp. Het gaat om maximaal 1 overschrijding per week in de huidige situatie, na de voorziene groei van het aantal goederentreinen om maximaal 2 overschrijdingen per week.
4. Voldoet niet, maatregelen nodig: in deze zone is sprake van een groot aantal overschrijdingen per dag, en is zonder maatregelen of constructieve optimalisaties een acceptabel woon- en leefklimaat niet mogelijk.

Tabel 4 Contourafstanden SBR B-richtlijn (globale afstanden tot spoorlijn, rond overweg zijn contourafstanden iets ruimer)

Classificatie	Contourafstand
Voldoet, ongeacht constructieve uitwerking	> 85 m
Voldoet bij goed ontwerp	< 85 m
Voldoet niet, beperkt aantal overschrijdingen	< 60 m
Voldoet niet, maatregelen nodig	< 30 m

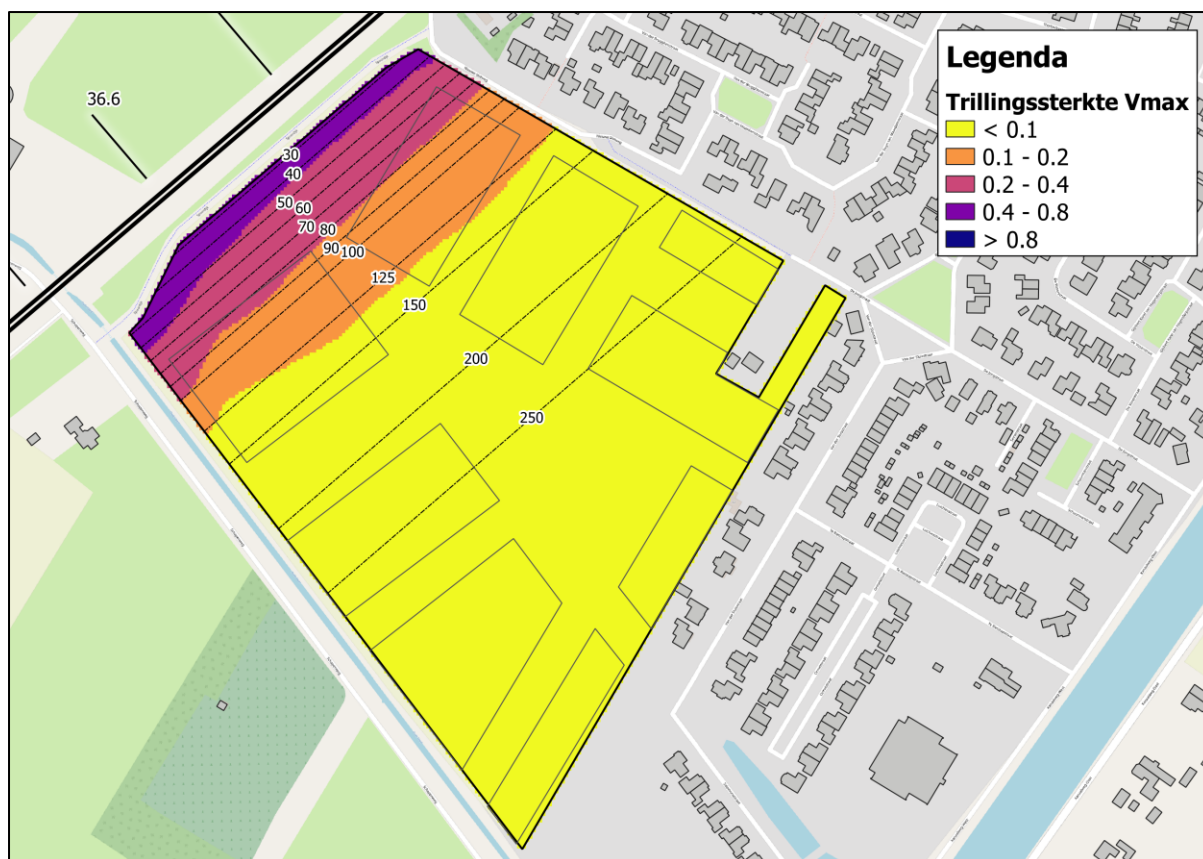
In respectievelijk Figuur 7 en Figuur 8 zijn de volgende gegevens weergegeven:

1. De trillingssterkte V_{max} , voor de worst-case variant (meest trillingsgevoelige uitwerking van het type gebouw, in dit geval houtskeletbouw).
2. De gemiddelde trillingssterkte V_{per} , eveneens voor de worst-case variant.

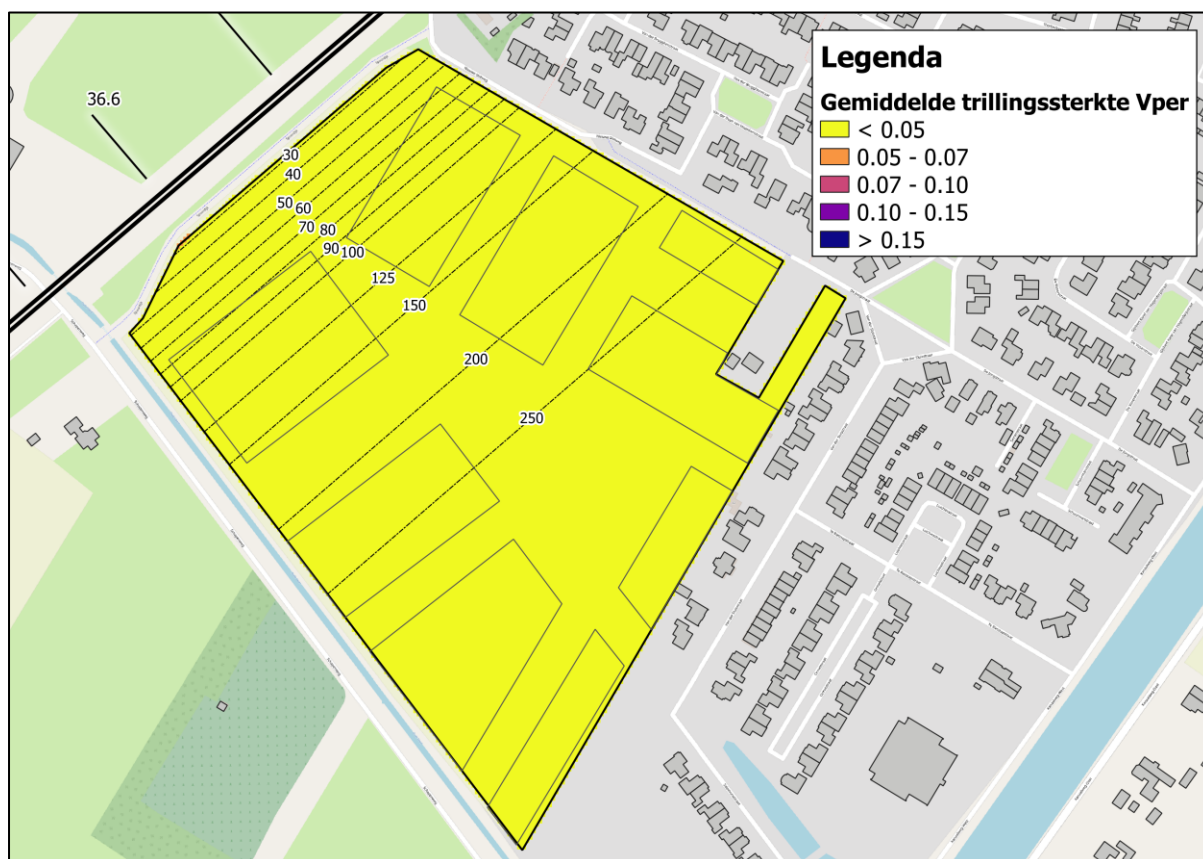
Voor de verschillende soorten grondgebonden woningen is een contourkaart van de beoordeling weergegeven in Figuur 9. De afstanden tot het spoor zijn hier ook aangegeven. Samengevat geldt het volgende:

1. In de zone buiten ca. 85 meter van het spoor (bij de overweg 100 meter) hoeft geen rekening te worden gehouden met trillingen bij de verdere uitwerking.
2. In de zone tussen ca. 60 en ca. 85 meter dient rekening te worden gehouden met trillingen bij de verdere uitwerking van de constructies.
3. In de zone tot ca. 60 meter van het spoor zijn overschrijdingen van het beoordelingskader mogelijk. In deze zone zijn momenteel geen bouwvlakken gepland.

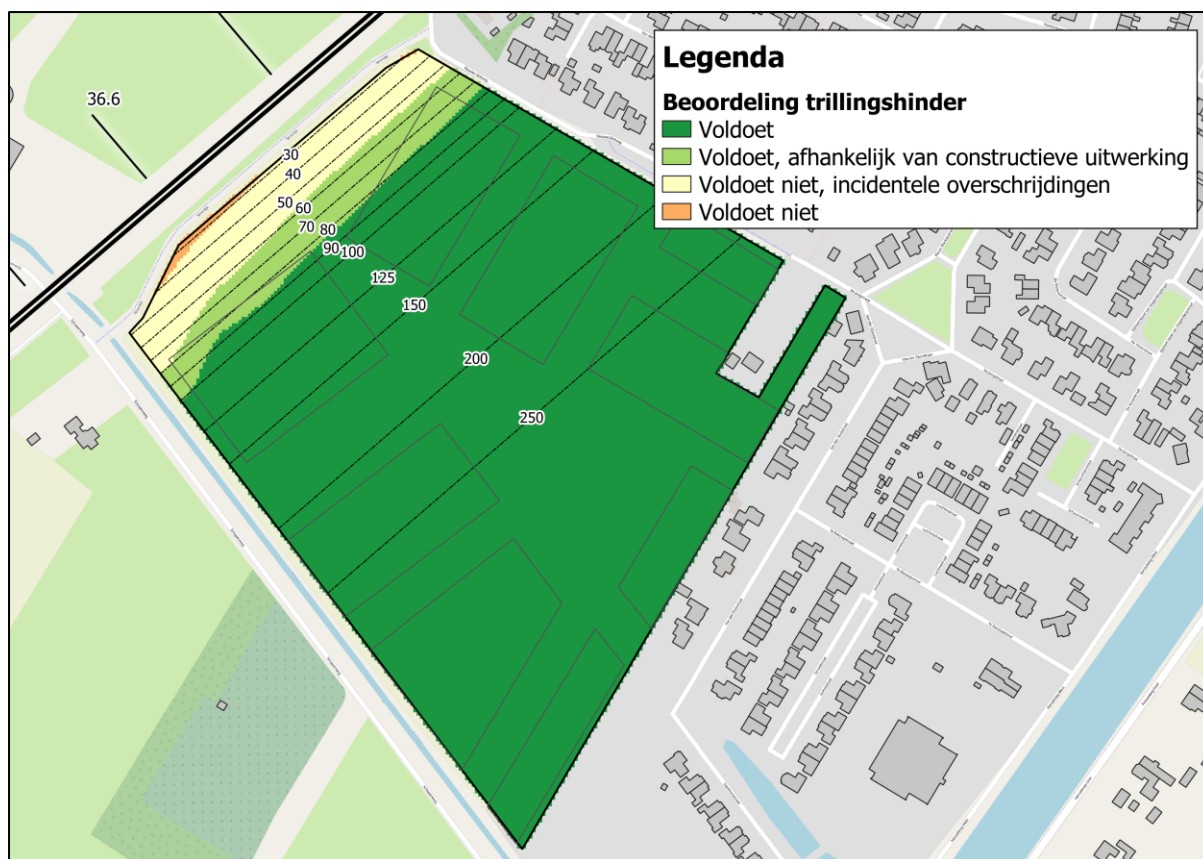
Samengevat is met qua trillingen goed ontworpen bebouwing dus te voldoen aan het beoordelingskader.



Figuur 7 Maximale trillingssterkte V_{max} voor alle woningtypes



Figuur 8 Maximale gemiddelde trillingssterkte V_{per} voor alle woningtypes



Figuur 9 Beoordeling trillingen volgens de SBR B-richtlijn

Uit het variantenonderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Bij een palenfundering zijn de trillingen 5 tot 10 procent lager dan bij een balkenfundering. Bij zwaardere funderingen (onderkeldering, plaatfundering) nemen de trillingen nog verder af.
- Het vergroten van de bouwvolumes zorgt voor een afname van de trillingen met maximaal 15 procent. Grote bouwvolumes worden minder makkelijk in trilling gebracht.
- Gebouwen met breedplaatvloeren kennen 10 tot 15 procent lagere trillingen dan gebouwen met kanaalplaatvloeren. Dit komt vooral door de hogere demping van breedplaatvloeren.
- Er is weinig verschil tussen een constructie in prefab beton of in kalkzandsteen en metselwerk. Houtskeletbouw kent, door de wat lichtere constructie, wel wat hogere trillingen.
- De eigenfrequentie van de vloer heeft geen significante invloed op de trillingen.

4.3 Maatregelen

Door de passage van een zware goederentrein wordt in delen van de geplande bouwvlakken bij qua trillingen niet optimale bouw, niet voldaan aan het beoordelingskader. Daarom hebben we een maatregelafweging uitgevoerd. Deze afweging beschrijven we in deze paragraaf.

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

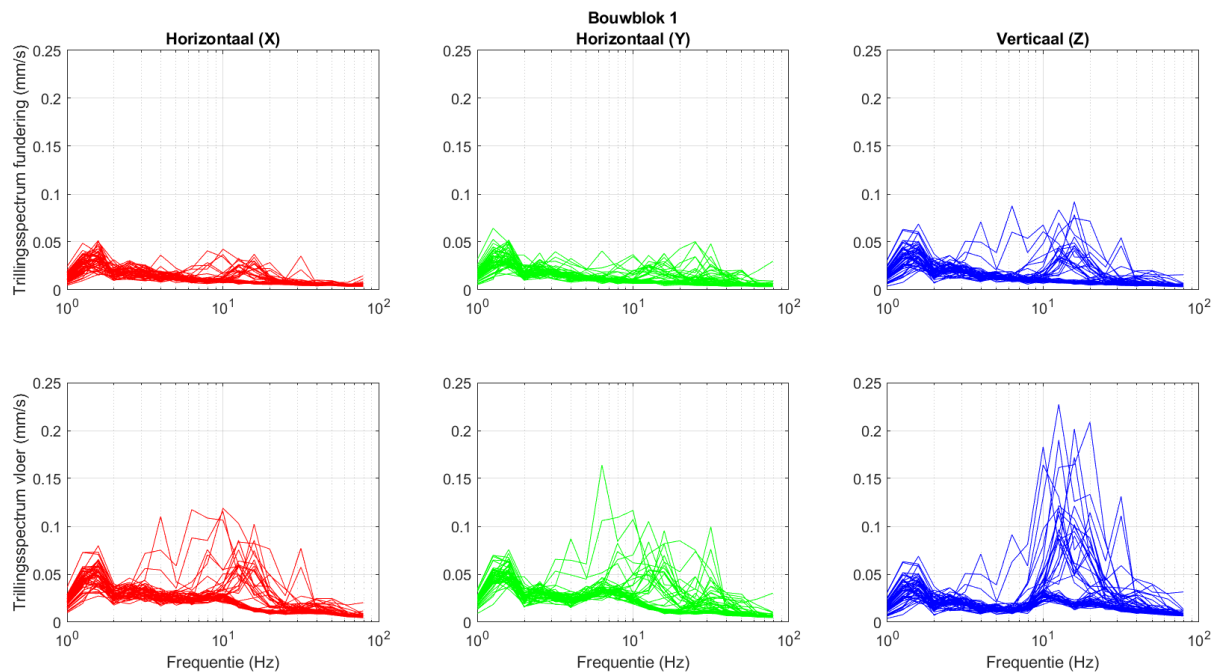
1. De mate waarin de trillingssterkte voorkomt. Hiervoor geldt dat de gemiddelde trillingssterkte V_{per} een goede indicatie is. In alle geplande bouwvlakken is de trillingssterkte lager dan 0.02, en daarmee lager dan de streefwaarde voor nieuwbouw (0.05). Ook het aantal overschrijdingen is zeer beperkt: maximaal 1 per week, in de toekomst, na intensivering van het spoorvervoer maximaal 2 per week. Het gaat dus om een beperkt aantal overschrijdingen, dat het achterwege laten van een maatregel zou kunnen rechtvaardigen.
2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. Daar is hier alleen lokaal, dichtbij de overweg, sprake van. In de geplande bouwvlakken zijn de trillingen van treinverkeer echter maatgevend boven die van wegverkeer.
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, gaan we hierna in op maatregelen om de trillingen te reduceren. Om effectieve maatregelen te treffen, doen we eerst een nadere analyse van de verwachte trillingen. Zo stellen we 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. Vervolgens sluiten we af met een aantal adviezen m.b.t. de verdere ontwikkeling van het plan.

4.3.1 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 10. In deze figuur is de trillingssnelheid per treinpassage weergegeven als tertsbandspectrum op de fundering en de hoogste verdieping van een vrijstaande woning dichtbij het spoor. Hieruit kan worden afgeleid bij welke frequentie en in welke trillingsrichting de trillingen het hoogst zijn.

Uit deze figuur volgt dat de hoogste trillingen optreden in de verticale Z-richting, vooral als gevolg van een combinatie van de versterking van de trillingen door de vloer (de eigenfrequentie van de vloer valt samen met de trillingen van de treinen) en de vering van het pand op zichzelf. Maatregelen die genomen worden moeten vooral effectief zijn tegen trillingen tussen de 8 en 25 Hz, omdat daar de meeste trillingsenergie zit. In de volgende subparagrafen wordt ingegaan op mogelijke maatregelen aan de trillingsbron, in de bodem of aan de gebouwen.



Figuur 10 Verwachte trillingen in vrijstaande woning dichtbij het spoor, kanaalplaatvloer met 11.5 Hz eigenfrequentie

4.3.2 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), bijvoorbeeld door het verbeteren van de spoorligging rond de spoorwegovergang aan de Schapenweg (heeft maar tijdelijk effect) of het toepassen van een zware betonplaat onder het spoor in combinatie met een ballastmat. Dit laatste is een zeer kostbare maatregel met een lange realisatietijd, terwijl ook met deze maatregel overschrijdingen van het beoordelingskader nog niet zijn uit te sluiten. Goedkopere maatregelen, zoals under sleeper pads of ballastmatten, zorgen in het frequentiegebied tussen de 8 en 25 Hz voor onvoldoende reductie van de 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. Ter indicatie, een betonplaat met ballastmat over 350 meter (beide sporen) kost (€ 3.600.000 tot € 5.600.000 incl. BTW²).

4.3.3 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 een diepe sloot (bijv. verdiepen van sloot op westelijke rand plangebied, evt. in combinatie met L-wand), een trillingsscherm van piepschuim (EPS), beton, jet-grout (soil-mix methode voor beton) of een damwand. Nadeel van deze maatregelen is dat deze vaak

² Deze kosten zijn nog exclusief kosten voor bijv. inzet van vervangend vervoer bij buitendienststellingen.

hoge kosten met zich meebrengen en dat ze niet aanpasbaar zijn aan toekomstige situaties.

Een trillingsscherm is alleen effectief dicht bij de bron of dicht bij de ontvanger. De meest voor de hand liggende locatie is daarmee een locatie in het plangebied direct langs de eerstelijnsbebouwing of direct naast het spoor. Voor een locatie dicht op de bebouwing geldt dat dit als belangrijk nadeel de interactie met kabels en leidingen, en blijvende interactie met bijv. de voortuinen van de woningen heeft, terwijl een locatie dichtbij het spoor veel afstemming met ProRail vergt, en ook tal van aanvullende eisen (taludstabiliteit, kabels en leidingen, etc.).

Op beide locaties geldt dat een trillingsscherm een grote diepte (minimaal 10 meter) nodig heeft om voldoende effectief te zijn. Om het plangebied af te schermen, is een trillingsscherm van ca. 400 meter lengte nodig, en gezien de laagfrequente trillingen met een diepte van minimaal 10 meter. Mogelijke maatregelen in de bodem met een inschatting van het effect en de kosten voor een scherm zo dicht mogelijk op de bebouwing zijn weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5 Mogelijke maatregelen in de bodem (zo dicht mogelijk bij bebouwing)

Maatregel	Effect	Kosten ³
Betonnen wand (diepwandmethode)	20 – 35%	€ 4.2 – 6.5 mln
Jet-grout wand	15 – 25%	€ 4.0 – 6.2 mln
Damwand (intrillen)	5 – 15%	€ 2.7 – 4.2 mln
Beton met 100 mm rubber	40 – 70%	€ 6.1 – 9.4 mln
Damwand met EPS	10 – 25%	€ 4.1 – 6.4 mln
Damwand met sleuf	15 – 30%	€ 5.4 – 8.3 mln
Prefab L-wand 3 m diep	5 – 15%	€ 0.5 – 0.8 mln
Prefab L-wand 4 m diep, bekleed met 100 mm rubber	10 – 25%	€ 1.5 – 2.4 mln
CSM-wand (Cutter Soil Mix of Mix-In-Place)	0 – 10%	€ 1.2 – 1.9 mln
Sloot, 2 m diep	15 – 25%	€ 0.2 – 0.5 mln
Sloot, 2 m diep met L-wand 4 m diep	25 – 35%	€ 0.7 – 1.1 mln
Trillingsscherm EPS	0 – 10%	€ 0.5 – 0.9 mln

Om in alle gevallen te voldoen aan het beoordelingskader, is, afhankelijk van de constructieve uitwerking en de locatie van de gebouwen, maximaal 30 procent reductie nodig. De meest goedkope maatregel met voldoende effect is een sloot van 2 meter diep met een prefab L-wand van 4 meter diep (zie Bijlage IV voor principeschetsen). Deze maatregel is vooral effectief dicht op de bebouwing (maar daar niet realiseerbaar) of dicht bij het spoor (maar tussen de Spoordijk en het spoor niet realiseerbaar i.v.m. taludstabiliteit van het spoor). De enige mogelijkheid is dus om de greppel ten zuidoosten van de Spoordijk om te vormen tot een dergelijk trillingsscherm, de effectiviteit is dan echter wel iets lager omdat een deel van de trillingen onder het scherm door zal gaan. De

³ Totale investeringskosten, incl. BTW. Kosten zijn exclusief kosten voor grondverwerving, verleggen van kabels en leidingen en slopen of amoveren van eventuele bestaande opstallen. Deze zijn wel aanwezig in de spoorzone, dus de werkelijke kosten van maatregelen zullen hoger uitvallen.

kosten van een dergelijk trillingsscherm zijn bedragen tussen de € 0.7 en 1.1 mln. Ter indicatie, ProRail hanteert voor het treffen van trillingsmaatregelen vaak een bedrag van € 47.000 per woning met een overschrijding in bestaande situaties. Bij nieuwbouw wordt doorgaans een (veel) lager (projectafhankelijk te motiveren) bedrag gehanteerd, omdat dergelijke kostenopslagen voor trillingsmaatregelen vaak leiden tot niet verkoopbare woningen.

4.3.4 Maatregelen aan de gebouwen

Bij maatregelen aan de woningen is een breed scala aan maatregelen mogelijk. Uit het variantenonderzoek blijkt dat met optimalisatie van de constructie al veel winst kan worden geboekt. Zo is met iets grotere afstand tot het spoor voor de eerstelijnsbebouwing en grotere bouwvolumes met breedplaatvloeren in de deze woningen te voldoen aan het beoordelingskader. Als een grotere afstand tot het spoor of breedplaatvloeren niet mogelijk zijn, dan kunnen ook andere constructieve optimalisaties worden overwogen. Denk aan het toepassen van een zwaardere fundering (onderheien of bijv. een 500 mm dikke plaatfundering onder de woningen), het vergroten van de massa van het gebouw door zwaardere materialen of significant dikkere vloeren (bijv. 300 mm i.p.v. 200 mm) toe te passen tot het ontkoppelen 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 6.

Tabel 6 Mogelijke maatregelen aan de gebouwen

Maatregel	Effect	Kosten ⁴
Toepassen van dempende materialen (metselwerk i.p.v. beton)	0 – 5%	< 3% SK
Toepassen dikkere vloeren met minimale eigenfrequentie van 16 Hz	0 – 5%	< 2% SK
Breedplaatvloeren i.p.v. kanaalplaatvloeren	10 – 15%	< 3% SK
Grotere bouwvolumes	5 – 15%	gebouwspecifiek
Paalfundering i.p.v. balkenfundering	5 – 10%	1 – 3% SK
500 mm dikke plaatfundering i.p.v. balkenfundering	10 – 20%	1 – 3% SK
Ontkoppelen van de vloeren	0 %	2 – 4% SK
Ontkoppelen van de fundering (afveren, stalen veren met $f_0 = 4$ Hz)	60 – 80%	4 – 8% SK
Inpakken van de fundering met rubber	5 – 15%	2 – 5% SK
Afschermen van de fundering met EPS	0 – 10%	< 2% SK

Door het combineren van een of meerdere van bovenstaande optimalisaties of maatregelen zijn overschrijdingen van het beoordelingskader in het plangebied te voorkomen. Het meest effectief is het afveren van de woningen m.b.v. stalen veren op maximaal 4 Hz, toegepast tussen paalkoppen en funderingsbalken, of tussen een plaatfundering en funderingsbalken. De kosten van deze maatregelen zijn echter hoog en bedragen tussen de € 10.000 en € 25.000 per woning.

⁴ SK = Stichtingskosten

4.4 Advies voor verdere ontwikkeling van het plan

In delen van het plangebied zijn overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder voor nieuwe situaties niet uit te sluiten, afhankelijk van de constructieve uitwerking van de plannen en de inrichting van het plangebied. Dat komt vooral door incidentele passages van zware goederentreinen op hoge snelheid, terwijl de trillingen door de gelaagde bodem slecht uitdempen met de afstand.

Op basis van het onderzoek adviseren we het volgende (in aflopende prioritering):

1. Houd bij woonfuncties binnen 85 meter van het spoor rekening met trillingen bij de verdere bouwkundige en constructieve uitwerking. Hiervoor gelden de volgende adviezen:
 - a. Vermijd houtskeletbouw en andere lichte bouwtechnieken (stalen constructies).
 - b. Maak waar mogelijk gebruik van breedplaatvloeren i.p.v. kanaalplaat- of ribbenvloeren. Breedplaatvloeren kennen een hogere demping en zorgen voor lagere trillingen.
 - c. Plaats dichtbij het spoor grotere bouwvolumes en zwaardere bouw, deze bouwtypes zijn wat minder gevoelig voor trillingen.
 - d. Zorg voor een eigenfrequentie van de vloeren van minimaal 16 Hz. Dit is te realiseren door gebruik te maken van dikkere vloeren, kortere vloeroverspanningen of vloeren ingeklemd op te leggen (bijv. doorgaande breedplaatvloeren bij rijwoningen).

Met bovenstaande aanpassingen zijn er geen overschrijdingen meer in de geplande bouwvlakken.

2. Als bovenstaande optimalisaties om wat voor reden dan ook niet mogelijk zijn, weeg dan af of andere maatregelen doelmatig zijn, gezien het beperkte aantal overschrijdingen. Mogelijke maatregelen zijn:
 - a. Maatregelen aan de bron (het spoor of de treinen) zijn zeer kostbaar. Meest effectief is een betonplaat onder beide sporen over een lengte van 350 meter, maar deze maatregel valt buiten het plangebied en kost € 3.6 tot € 5.6 mln. incl. BTW (excl. kosten ProRail en NS).
 - b. Maatregelen in de bodem zijn eveneens kostbaar. Minst kostbaar en voldoende effectief is het realiseren van een minimaal 2 meter diepe sloot aan de noordwestzijde van het perceel (verdiepen bestaande watergang), in combinatie met een 4 meter diepe L-wand (zie bijlage IV voor principedetails). Deze maatregel kost € 0.7 tot € 1.1 mln. incl. BTW.
 - c. Bij maatregelen in de gebouwen zijn er meerdere mogelijkheden. Denk aan het verzwaren van de fundering (500 mm dikke plaatfundering of zware paalfundering), of het realiseren van een dubbele fundering met daartussen stalen veerdozen, afgeveerd op maximaal 4 Hz (trillingsisolatie). Deze

laatste maatregel is het meest effectief, maar kost tussen de € 10.000 en € 25.000 per woning.

Argumenten om in deze zone geen maatregelen te treffen, zijn:

- a. Er is sprake van een zeer beperkt aantal overschrijdingen (maximaal 2 per week na intensivering van het goederenvervoer), veroorzaakt door zware goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte. De trillingen van alle reizigerstreinen en de meeste goederentreinen voldoen wel aan het beoordelingskader.
- b. De trillingen voldoen weliswaar niet aan de strenge streefwaarden voor nieuwbouw uit de SBR B-richtlijn, maar wel ruimschoots aan de soepelere streefwaarden voor bestaande situaties uit de SBR B-richtlijn. In die soepelere streefwaarden voor bestaande situaties is een zekere mate van gewenning meegenomen.
- c. De woningen worden gerealiseerd in een zone dichtbij het spoor, waar nu ook al bebouwing is gerealiseerd in de naastgelegen woonwijk die dicht bij het spoor staat. Het gaat bovendien om oudere, meer trillingsgevoelige bebouwing, waar de trillingen 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 lager dan in andere, al bestaande bebouwing rond deze locatie. Bovendien zullen de trillingen in de nieuwbouw door de zware constructie lager zijn dan in de bestaande woning.

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

4.5 Onzekerheden in het onderzoek

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

1. Ten aanzien van de trillingsbron: de natuurlijke variatie als gevolg van spooronderhoud en de temperatuur kan 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 status van de spoorligging op het moment van de metingen, wel is bekend dat de trillingen rond spoorwegovergangen (zoals aan de Schapenweg) sterk afhankelijk zijn van de onderhoudsstatus en met de tijd dus kunnen variëren. Er is op basis van bovenstaande informatie geen reden om te twijfelen aan de representativiteit van de berekeningen voor de toekomstige trillingen, wel kunnen de trillingen in werkelijkheid hierdoor soms hoger of lager zijn.
2. 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. Omdat op verschillende posities is gemeten, is de invloed van die lokale variaties beperkt. Deze variaties zijn meegenomen in het onderzoek.
3. 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 zijn er natuurlijke variaties in materiaalgedrag (van bijvoorbeeld hout). In de berekeningen is gerekend met een verwachtingswaarde van de trillingen

op basis van een aan de hand van praktijkmetingen geijkt rekenmodel, en zijn meerdere varianten doorgerekend. Hiermee wordt een resultaat verkregen dat representatief is voor de toekomstige situatie.

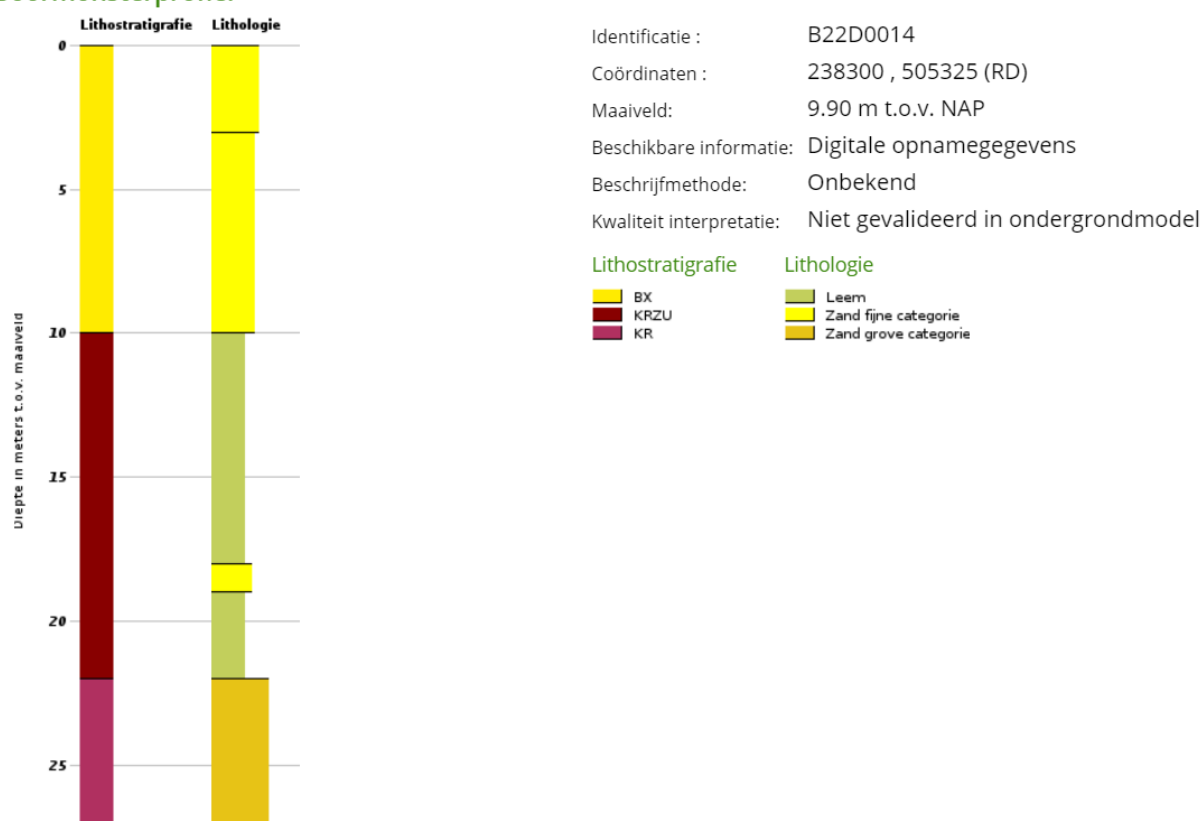
Bovenstaande onzekerheden geven geen aanleiding tot andere conclusies van het onderzoek.

Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek

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.

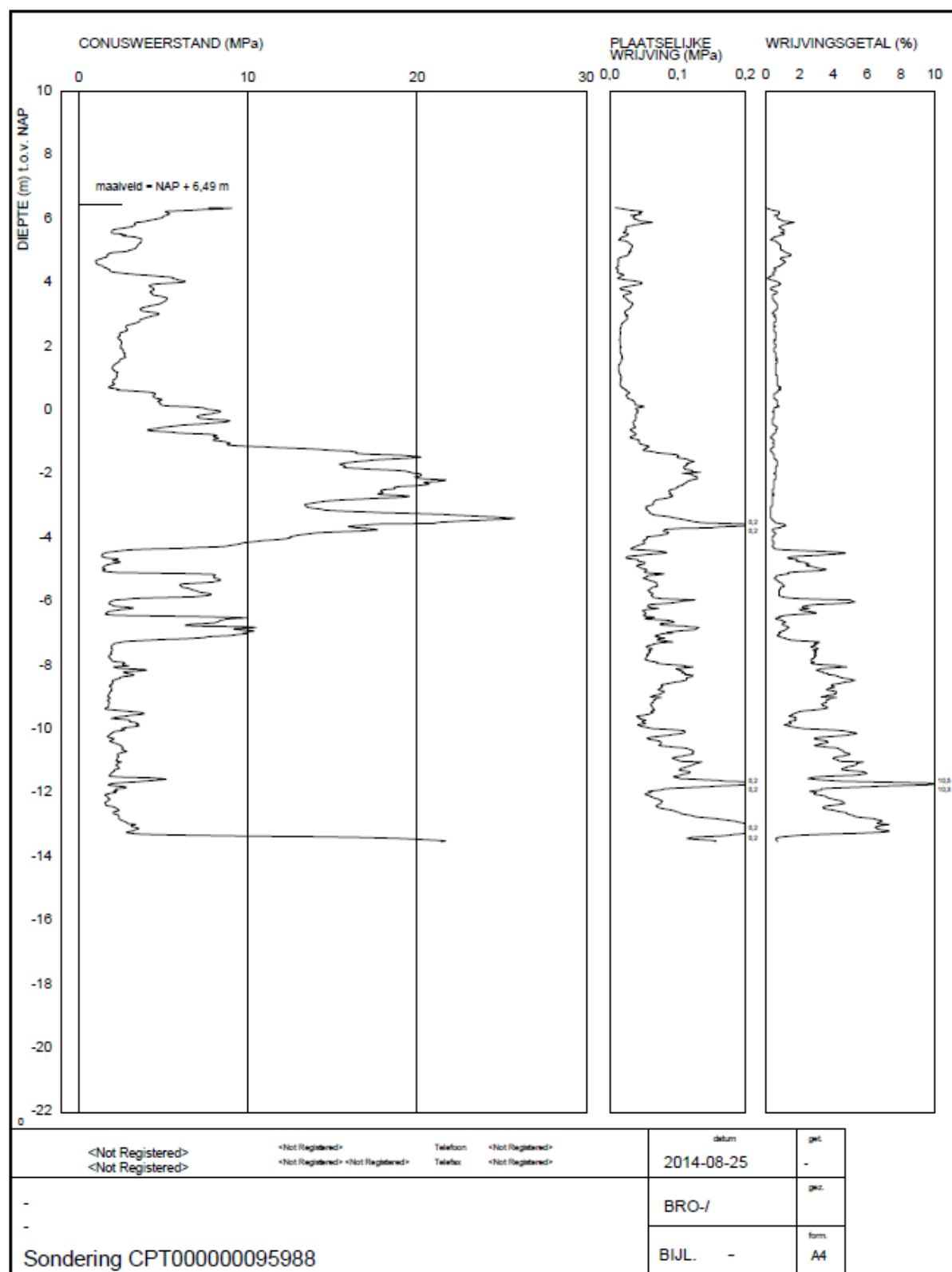
Een boring in de nabijheid van het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur 11. Hier is te zien dat de bodem hoofdzakelijk is opgebouwd uit leem- en zandlagen. Met name door de gelaagde bodem dempen de trillingen slecht uit met de afstand.

Boormonsterprofiel



Figuur 11 Boring in het onderzoeksgebied, B22D0014

Een representatieve sondering nabij het onderzoeksgebied, waarin de gelaagde opbouw van de bodem zichtbaar is, is weergegeven in Figuur 12.

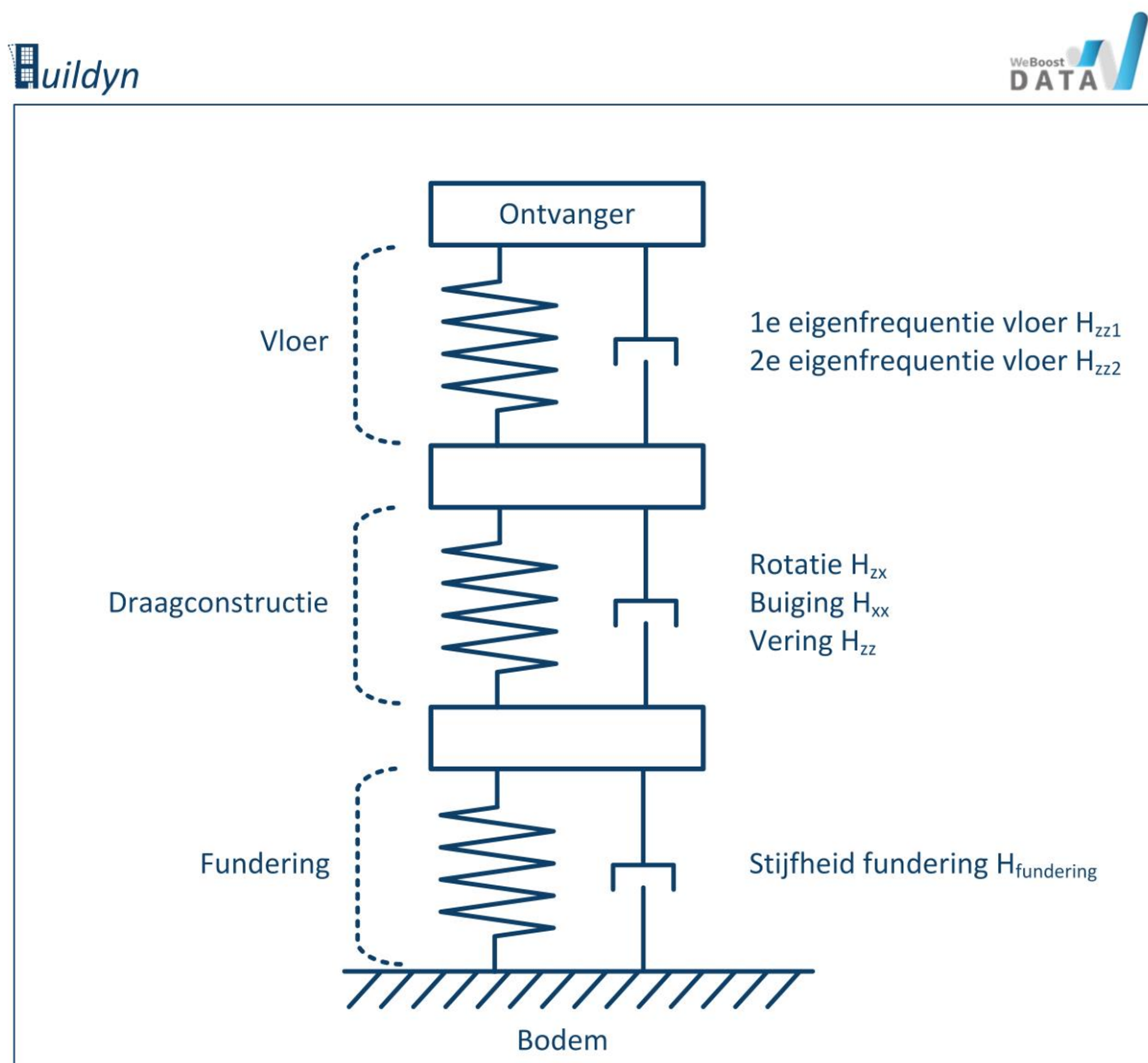


Figuur 12 Sondering nabij het onderzoeksgebied, CPT000000095988

Bijlage Rekenmodel Buildyn

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. De resultaten van het model zijn met behulp van een algoritme gemodelleerd op basis van praktijkresultaten (meer dan 200 metingen in gebouwen). Daarmee wordt een nauwkeurigheid verkregen die vaak beter is dan een eindige elementenmodel, omdat de resultaten zo sterk leunen op de praktijk (terwijl een eindige elementenmodel zeer gevoelig is voor de gebruikte input t.a.v. bijv. damping en stijfheden).

In Buildyn wordt een gebouw gemodelleerd door middel van gekoppelde massa-veersystemen, zie Figuur 13. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 13, worden in deze bijlage nader toegelicht.



Figuur 13 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)
- Afmetingen en gewicht van het gebouw
- Bodem waarop het gebouw staat

Met name boven de 10 Hz worden trillingen uitgedempt door de fundering.

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.

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

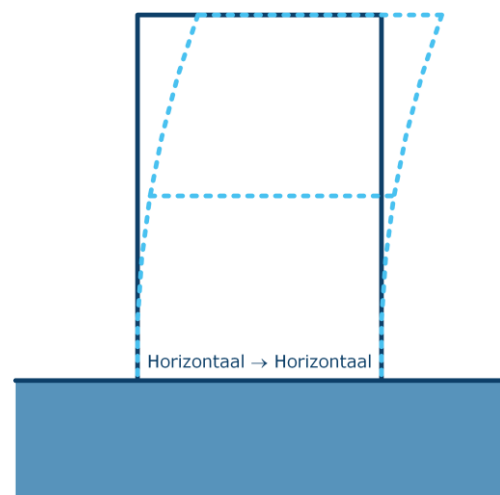
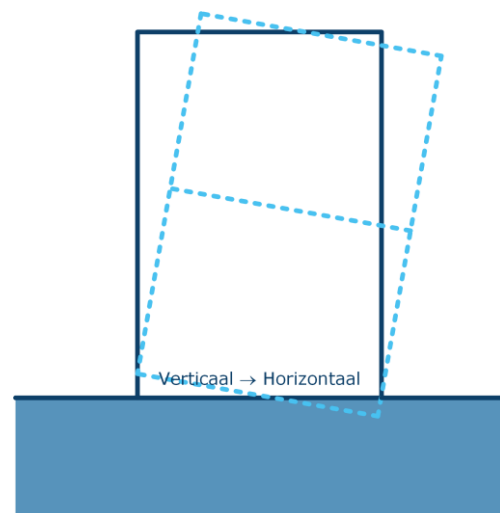
Dit effect noemen we H_{zx} , en is afhankelijk van:

- 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.

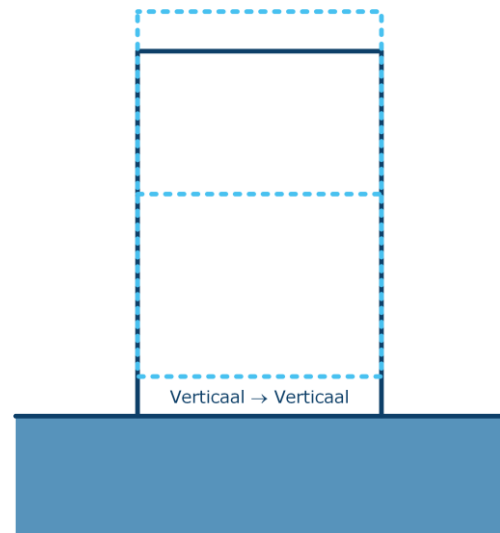
Dit effect noemen we H_{xx} , en is afhankelijk van:

- 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. Dit effect noemen we H_{zz} , en is afhankelijk van:

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



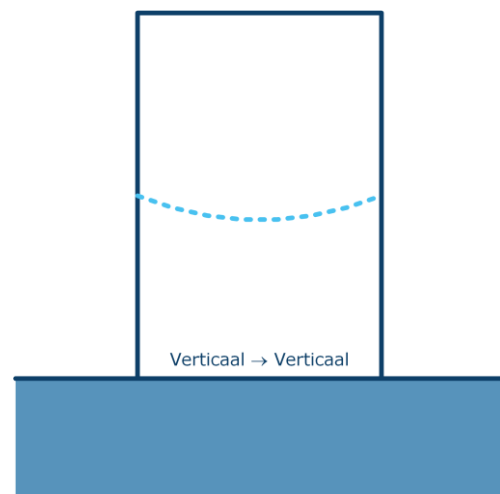
Vloeren

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 damping 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:

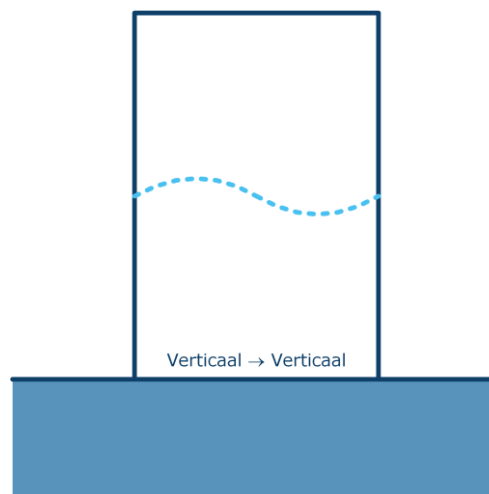
- Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- Afmetingen van de vloer
- Type oplegging



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 prinsipschets rechts.

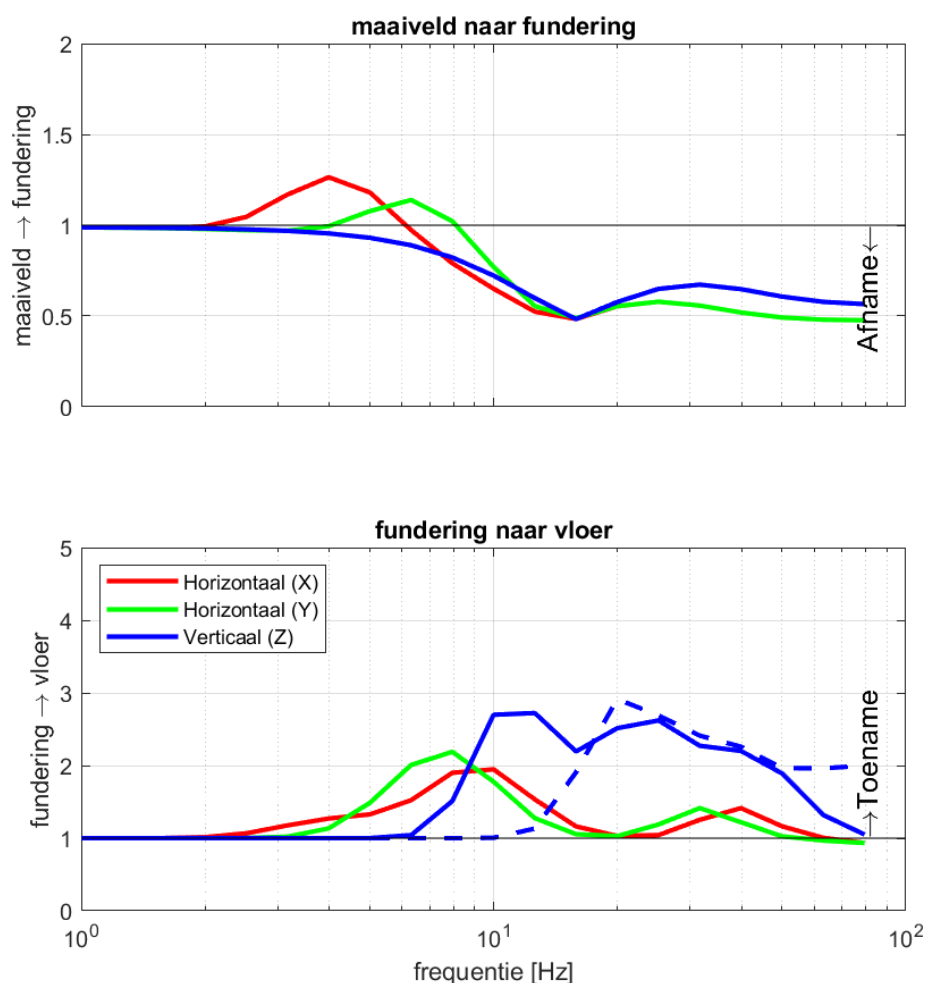
Dit effect noemen we H_{zz2} , en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1} .

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

De resultaten uit de Buildyn-berekeningen voor een representatieve vrijstaande woning zijn weergegeven in Figuur 14.

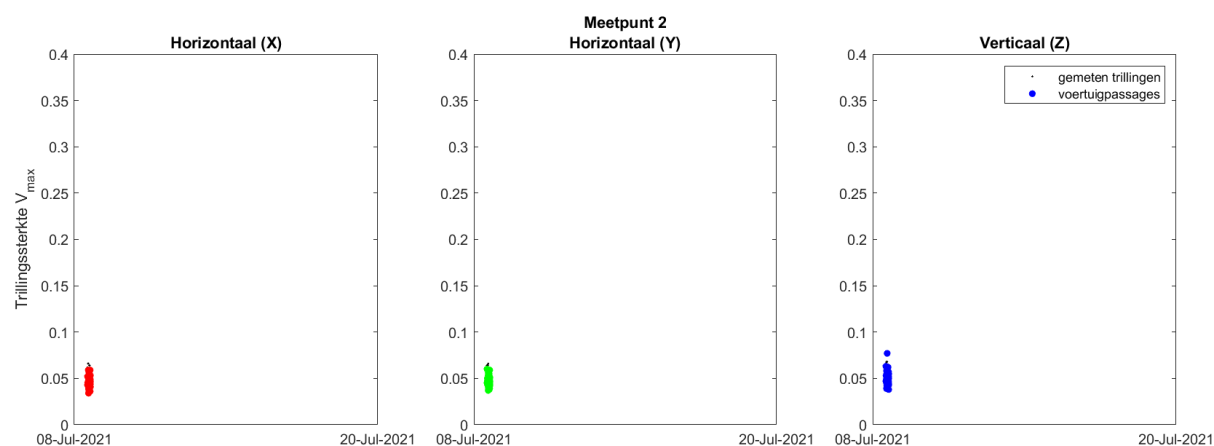


Figuur 14 Buildyn-resultaten voor vrijstaande woning van 10.0 bij 6.0 meter, drie bouwlagen met kap, 200 mm kanaalplaatvloer, 6.0 m vloeroverspanning en casco van kalkzandsteen en metselwerk

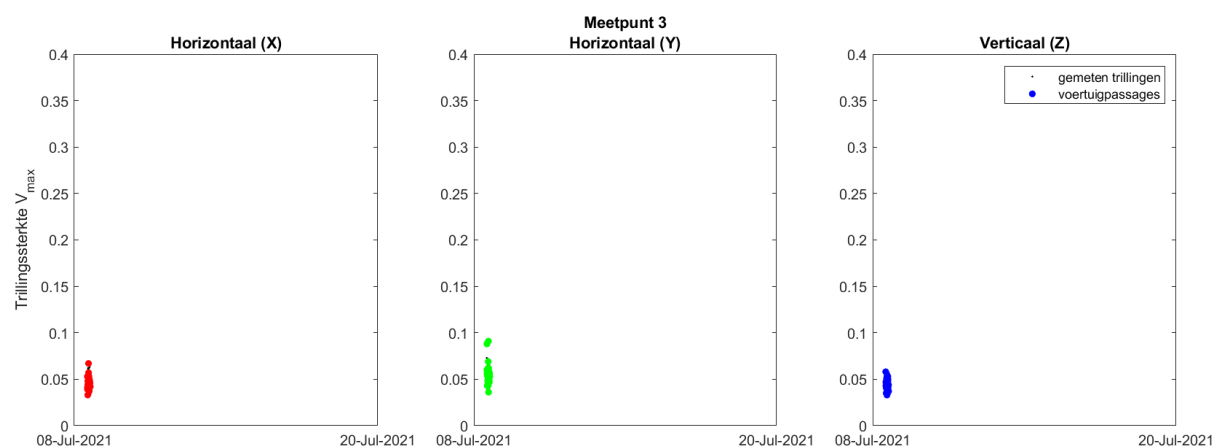


Resultaten metingen

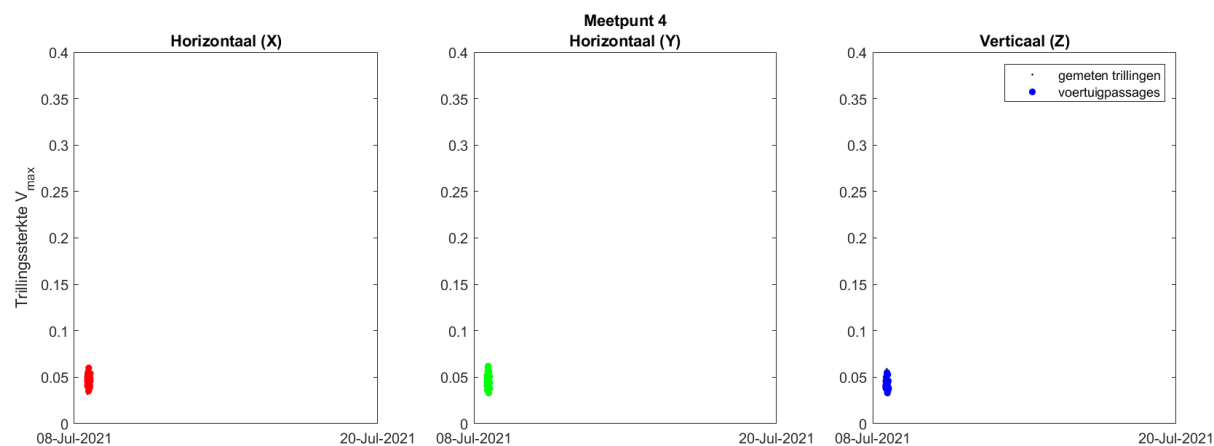
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra van de trillingen per treinpassage weergegeven.



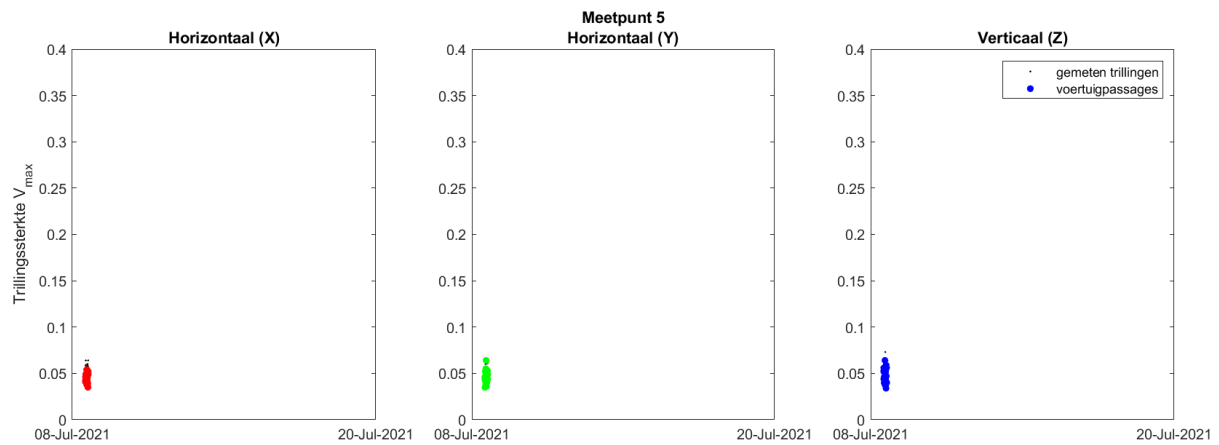
Figuur 15 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (maaiveld)



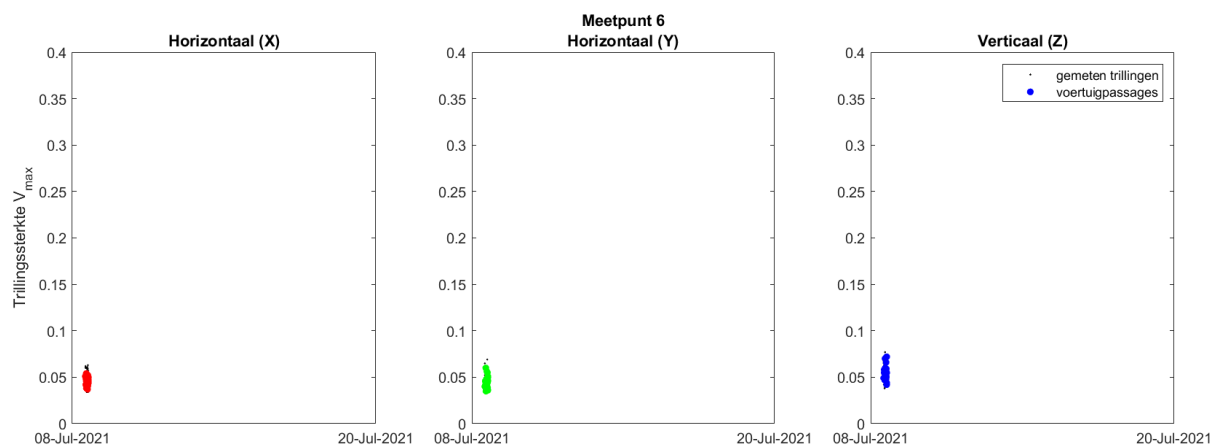
Figuur 16 Gemeten trillingen bij meetpunt 3 (maaiveld)



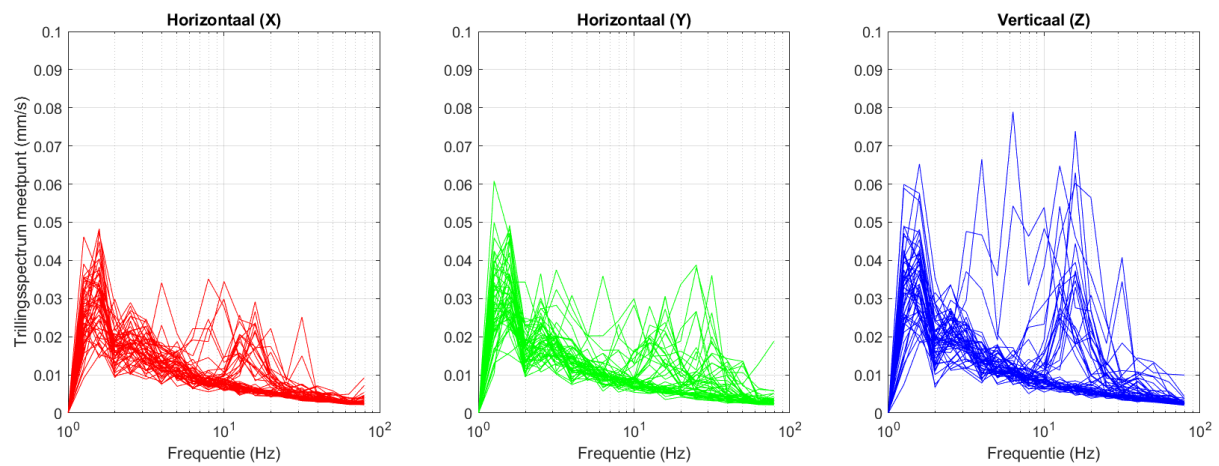
Figuur 17 Gemeten trillingen bij meetpunt 4 (maaiveld)



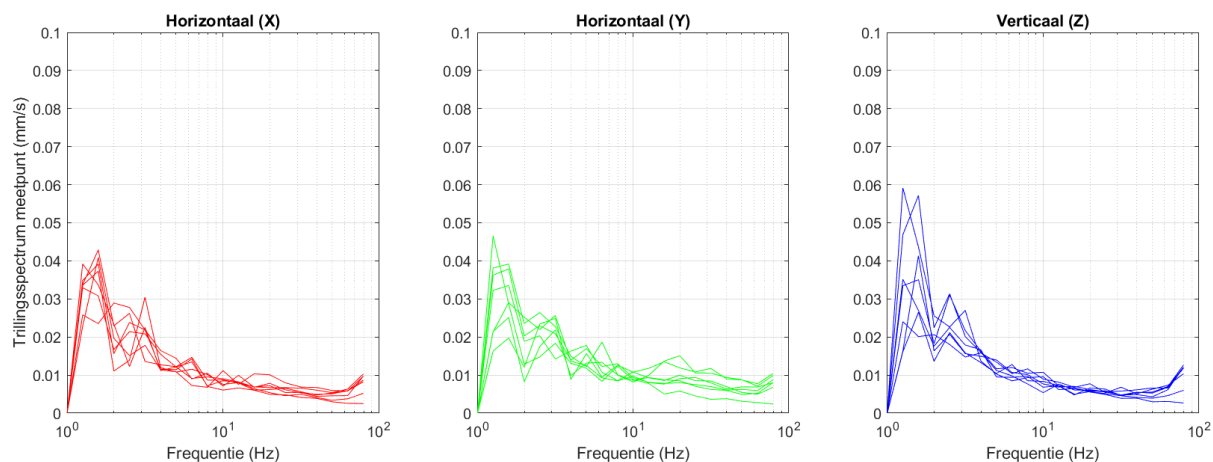
Figuur 18 Gemeten trillingen bij meetpunt 5 (maaiveld)



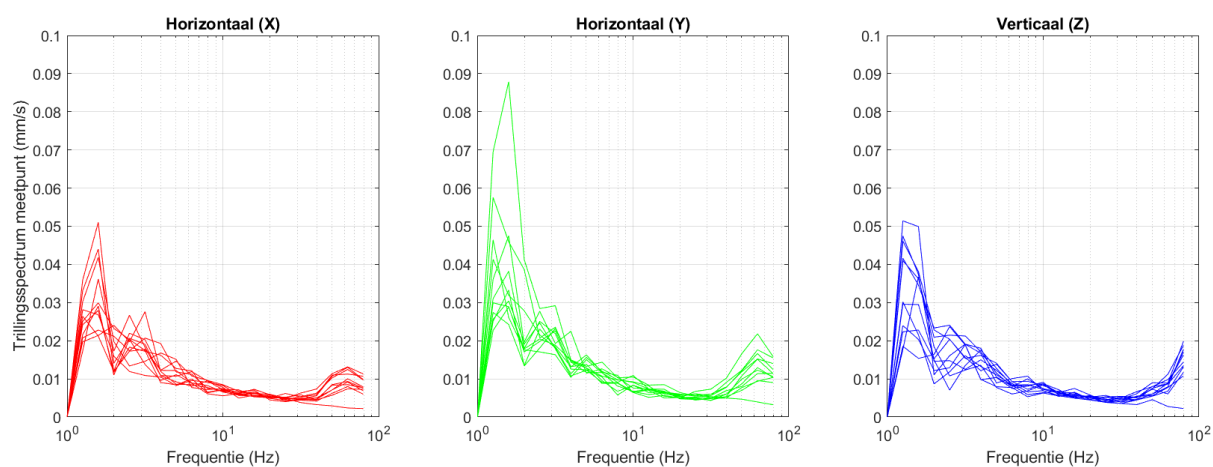
Figuur 19 Gemeten trillingen bij meetpunt 6 (maaiveld)



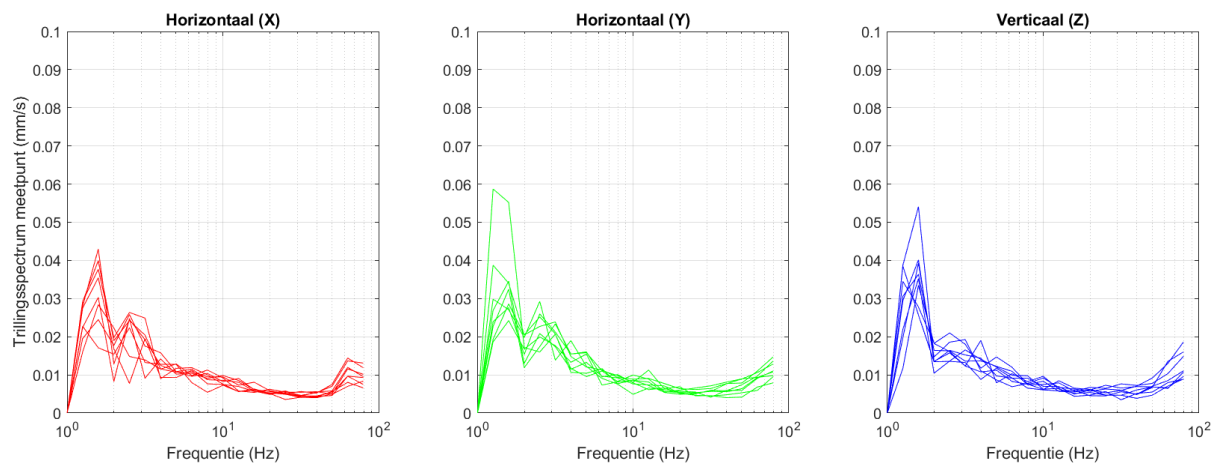
Figuur 20 Tertsbandspectra bij meetpunt 1 (fundering bestand pand)



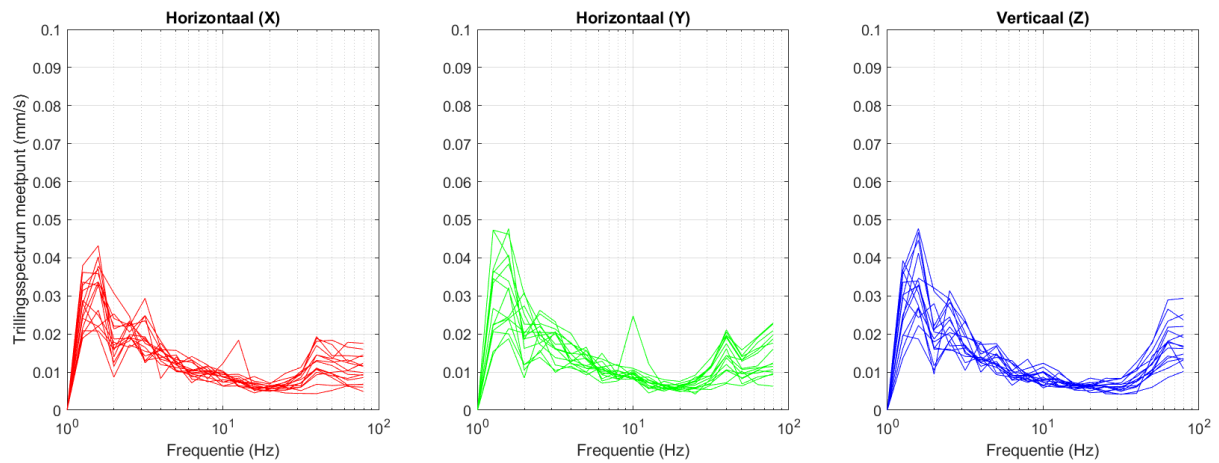
Figuur 21 Tertsbandspectra bij meetpunt 2 (maaveld)



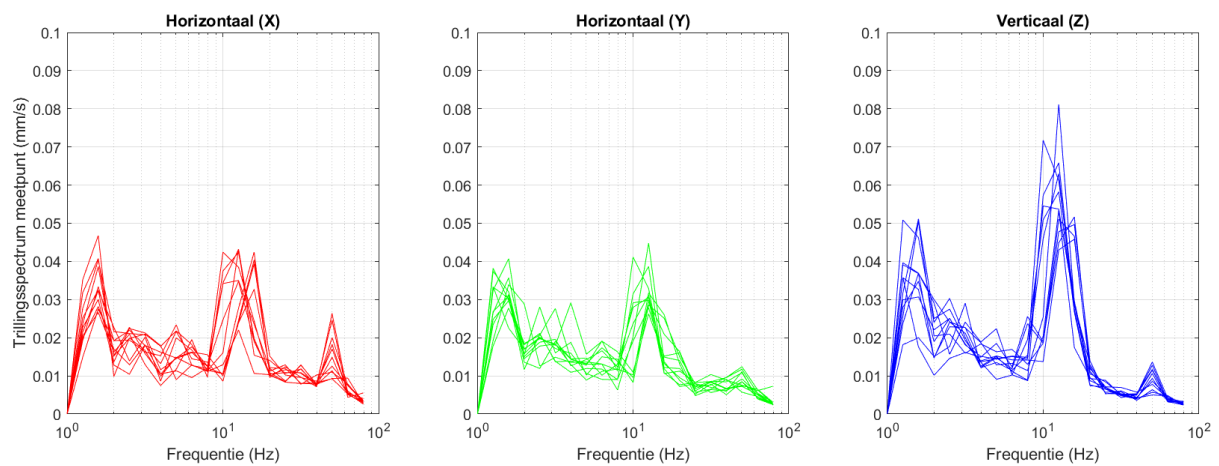
Figuur 22 Tertsbandspectra bij meetpunt 3 (maaveld)



Figuur 23 Tertsbandspectra bij meetpunt 4 (maaveld)



Figuur 24 Tertsbandspectra bij meetpunt 5 (maaveld)

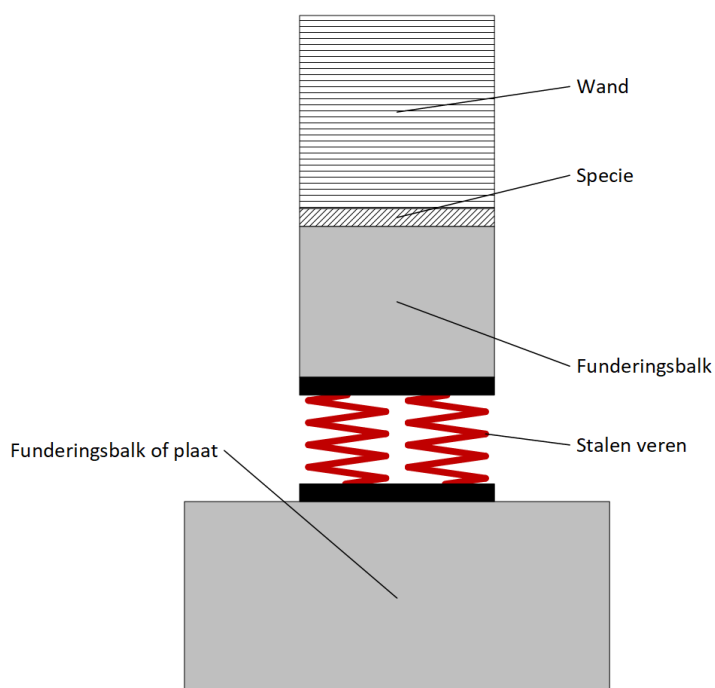


Figuur 25 Tertsbandspectra bij meetpunt 6 (maaveld)

IV Principedetails maatregelen

Deze bijlage bevat achtergrondinformatie en principedetails van enkele besproken maatregelen.

Een prinsescheets van een afgeveerde fundering met stalen veerdozen is weergegeven in Figuur 26. Een foto van een concrete toepassing bij eengezinswoningen in Prinsenbeek is weergegeven in Figuur 27.

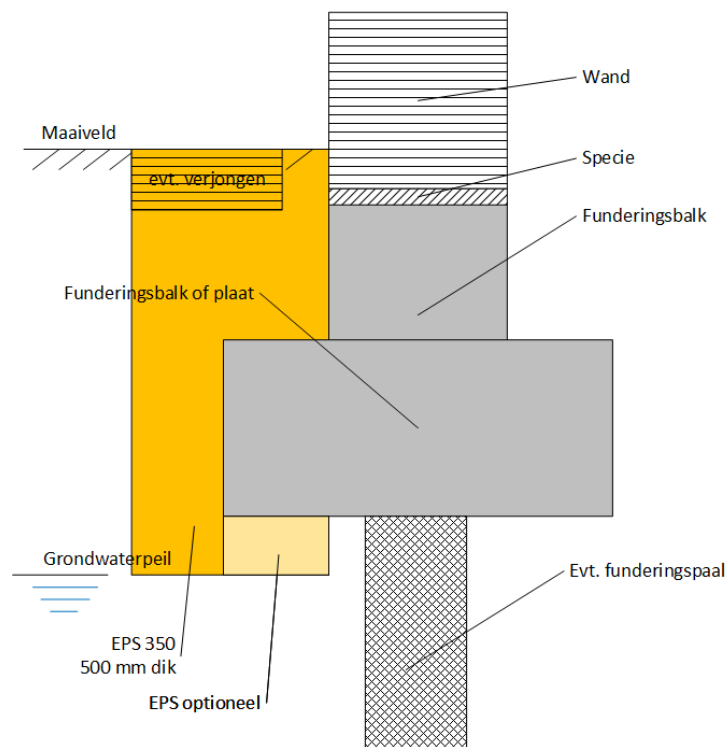


Figuur 26 Principeschema afgeveerde fundering (hier met stalen veerdozen)



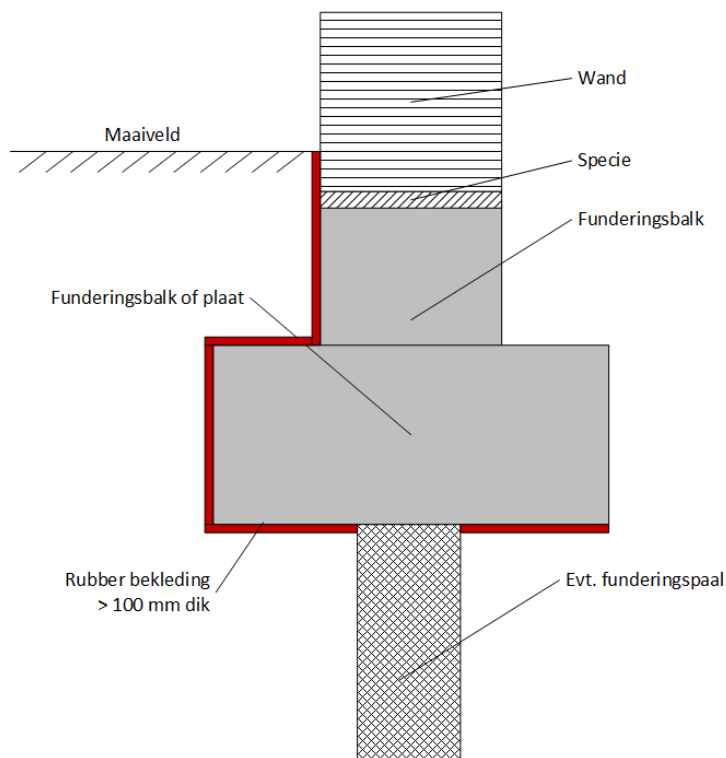
Figuur 27 Dubbele fundering met stalen veerdozen (project in Prinsenbeek)

Een prinscheschets van het bekleden van de fundering met EPS (piepschuim) is weergegeven in Figuur 28. De EPS-kwaliteit dient wat zwaarder te zijn dan standaard i.v.m. de gronddruk. De benodigde dikte voor voldoende reductie is zo'n 500 mm (1000 mm in de afbeelding), om opdrijven te voorkomen moet dit tot de GHG-waarde van het grondwaterpeil worden aangebracht en verankerd worden aan de fundering. Een prinscheschets is weergegeven in Figuur 28. Bij maaiveld kan eventueel iets verjongd worden. Afdekken met een dunne zandlaag (max. 100 mm) en tegels is mogelijk. Bij toepassing bij een parkeergarage is verankering aan de parkeergarage noodzakelijk om opdrijven te voorkomen.



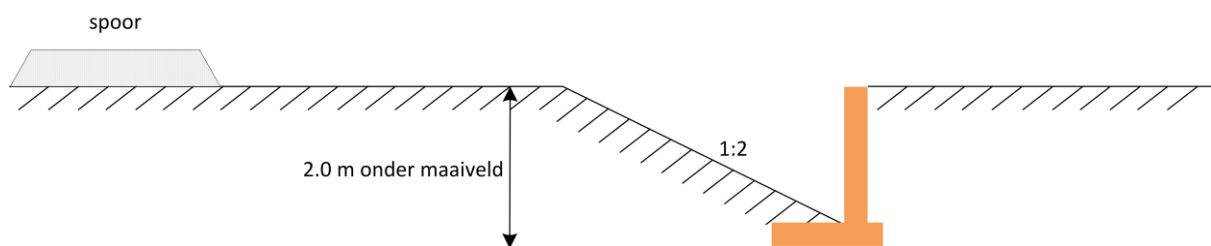
Figuur 28 Fundering met EPS-scherm ervoor

Op analoge wijze kan een fundering worden bekleed met rubber materiaal, zie Figuur 29.

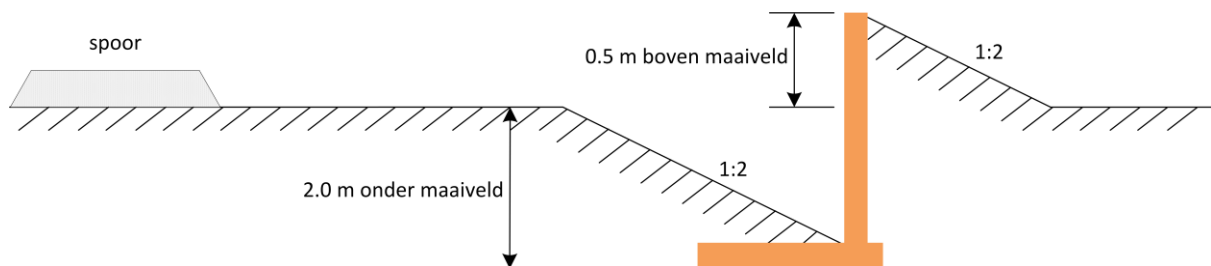


Figuur 29 Fundering bekleed met rubber

Principe-oplossingen voor het combineren van een sloot met een prefab L-wand zijn weergegeven in Figuur 30, en in Figuur 31 voor een situatie waarbij een combinatie van een sloot en geluidscherm wordt gerealiseerd met aan de zijde van de woningen een 1:2-talud. Door de L-wand dieper te plaatsen ontstaat ook een trillingsreducerend effect, waarbij geldt dat hoe dieper deze wordt geplaatst, hoe groter het effect is. Merk op dat alle werkzaamheden binnen de 10 meter zone van het spoor vergunningsplichtig zijn bij ProRail.



Figuur 30 Sloot gecombineerd met prefab L-wand



Figuur 31 Geluidscherm gecombineerd met sloot en prefab L-wand