

ENKOTERREIN HOLTEN

Trillingsonderzoek t.b.v. nieuwbouw

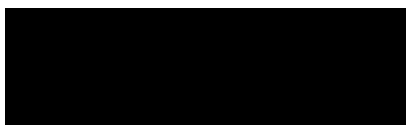


Colofon

Auteur



**Controle en
vrijgave**



Projectcode

WBD2021-017

Versienr

1.0

Datum

22 juni 2021

Status

Vrijgegeven

Opdrachtgever

Gemeente Rijssen-Holten



Nijverheidsweg 16B

3534 AM Utrecht

www.we-boost-data.nl

© We-Boost Data 2021

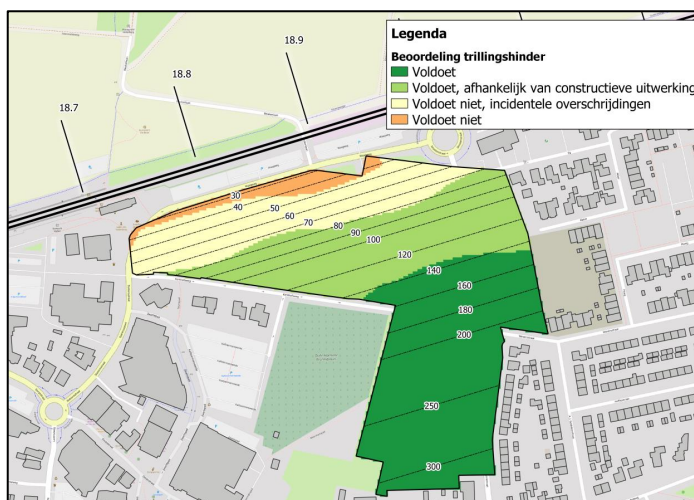
Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming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

Kern van dit rapport

De gemeente Rijssen-Holten is van plan het Enkcoterrein, nabij station Holten, te herontwikkelen. In het plangebied worden onder meer woningen gerealiseerd. Het plangebied bevindt zich in de nabijheid van de spoorlijn Deventer – Almelo. 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 zandige bodem waardoor de trillingen slecht uitdempen en tot op 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. Voor vrijstaande bebouwing is ter illustratie de beoordeling van de trillingen in het plangebied hierboven weergegeven.



Ten behoeve van de verdere uitwerking van de plannen hebben wij voor verschillende types gebouwen en functies het plangebied opgedeeld in contourgebieden volgens 4 classificaties, zie onderstaand overzicht.

	Vrijstaand	2-onder-1-kap	Rijwoning	Appartementen	Kantoren
Classificatie					
Voldoet, ongeacht constructieve uitwerking	> 140 m	> 140 m	> 140 m	> 120 m	> 30 m
Voldoet bij goed ontwerp	< 140 m	< 140 m	< 140 m	< 120 m	< 30 m
Voldoet niet, beperkt aantal overschrijdingen	< 80 m	< 70 m	< 60 m	< 60 m	< 20 m
Voldoet niet, maatregelen nodig	< 50 m	< 40 m	< 40 m	< 30 m	< 10 m

Aanbevelingen

Algemeen adviseren we het volgende:

1. Positioneer gebouwen zo ver mogelijk bij het spoor vandaan. Houd hierbij ook rekening met de spoorwegovergang Beukenlaan, rond deze spoorwegovergang zijn de trillingen hoger.
2. Plaats minder trillingsgevoelige functies (horeca, winkels, kantoren) dicht bij het spoor dan meer trillingsgevoelige functies (wonen).
3. Plaats grotere bouwvolumes (appartementencomplexen) dicht bij het spoor dan kleinere bouwvolumes (grondgebonden woningen).

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 140 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 80 meter en 140 meter van het spoor. Voor dit gebied gelden de volgende adviezen:

1. Vermijd houtskeletbouw en andere lichte bouwtechnieken (stalen constructies).
2. Zorg voor een eigenfrequentie van de vloeren van minimaal 14, liefst 15 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).
3. Maak waar mogelijk gebruik van breedplaatvloeren i.p.v. kanaalplaat- of ribbenvloeren.
4. Pas indien mogelijk een palenfundering of een dikke plaatfundering toe. Bij appartementen: realiseer een (zware) parkeerkelder onder het gebouw.

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

In dit contourgebied is, bij een goed ontwerp, sprake van een beperkt aantal overschrijdingen (maximaal 2 per dag, na toename van het aantal goederentreinen). Globaal ligt dit gebied tussen de 50 meter en 80 meter van het spoor. Voor dit gebied gelden de volgende adviezen:

1. Weeg af of maatregelen doelmatig zijn, gezien het beperkte aantal overschrijdingen. Mogelijke maatregelen zijn:
 - a. Aan het spoor of de treinen (trillingsbron) is een betonplaat onder beide sporen over een lengte van 400 meter het meest effectief. Deze maatregel valt buiten het plangebied en kost € 2.5 tot € 7.0 mln. incl. BTW.
 - b. Meest effectieve maatregel in de bodem is een 25 meter diep trillingsscherm van beton, bekleed met rubber, tussen het spoor en het P&R-terrein bij het station. Deze maatregel valt buiten het plangebied en kost € 14.0 tot 21.6 mln. incl. BTW.
 - c. Bij maatregelen in de gebouwen zijn er meerdere mogelijkheden (in aanvulling op de eerder gegeven adviezen voor de zone van 80 tot 140 meter). Denk aan het verzwaren van de fundering (500 of 700 mm dikke plaatfundering, afschermen van de fundering met rubber of EPS of het realiseren van een dubbele fundering met daartussen stalen veerdozen, afgeveerd op 2.5 Hz (trillingsisolatie). Deze laatste maatregel is het meest effectief, maar kost tussen de € 10.000 en € 25.000 per woning. Alleen met deze maatregel zijn alle overschrijdingen in het hele plangebied weg te nemen.
2. Argumenten om in deze zone geen maatregelen te treffen, zijn:
 - a. Er is sprake van een beperkt aantal overschrijdingen (maximaal 2 per dag in de toekomst, na de verwachte intensivering van het goederenvervoer), veroorzaakt door zware goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte. De trillingen van vrijwel 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 op incidentele uitschieters na (ca. 2 tot 4 per week) wel aan de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties uit de SBR B-richtlijn. In die soepeler 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 die dicht bij het spoor staat. Het gaat bovendien om oude, meer trillingsgevoelige bebouwing, waar de trillingen dus significant hoger zullen zijn dan in de nieuwe woningen. Ook zonder maatregelen tegen trillingen ontstaat in de geplande bebouwing daarom geen onacceptabele situatie: de trillingen zijn daar immers (veel) lager dan in andere, al bestaande bebouwing rond deze locatie. Bovendien zullen de trillingen in de nieuwbouw door de zware constructie veel lager zijn dan in de bestaande, te slopen woning.

Ook wanneer uiteindelijk geen maatregelen zouden worden getroffen, is hiermee te motiveren dat er geen onacceptabel woon- en leefklimaat ontstaat.

In dit contourgebied is sprake van een relatief groot aantal overschrijdingen. Globaal ligt dit gebied in een zone tot 50 meter van het spoor (bij grote bouwvolumes is de contourafstand kleiner). Voor dit gebied geldt dat een maatregelafweging noodzakelijk is om een prettig woon- en leefklimaat te garanderen. De mogelijke optimalisaties en maatregelen zijn hierboven al beschreven.

Samenvatting

Samengevat geldt dat de trillingen in delen van het plangebied 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, is deze zone sterk te beperken. Met maatregelen is in het gehele plangebied te voldoen aan het beoordelingskader.

Voor delen van het plangebied is een maatregelafweging noodzakelijk. In dit rapport worden handvatten gegeven voor 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.

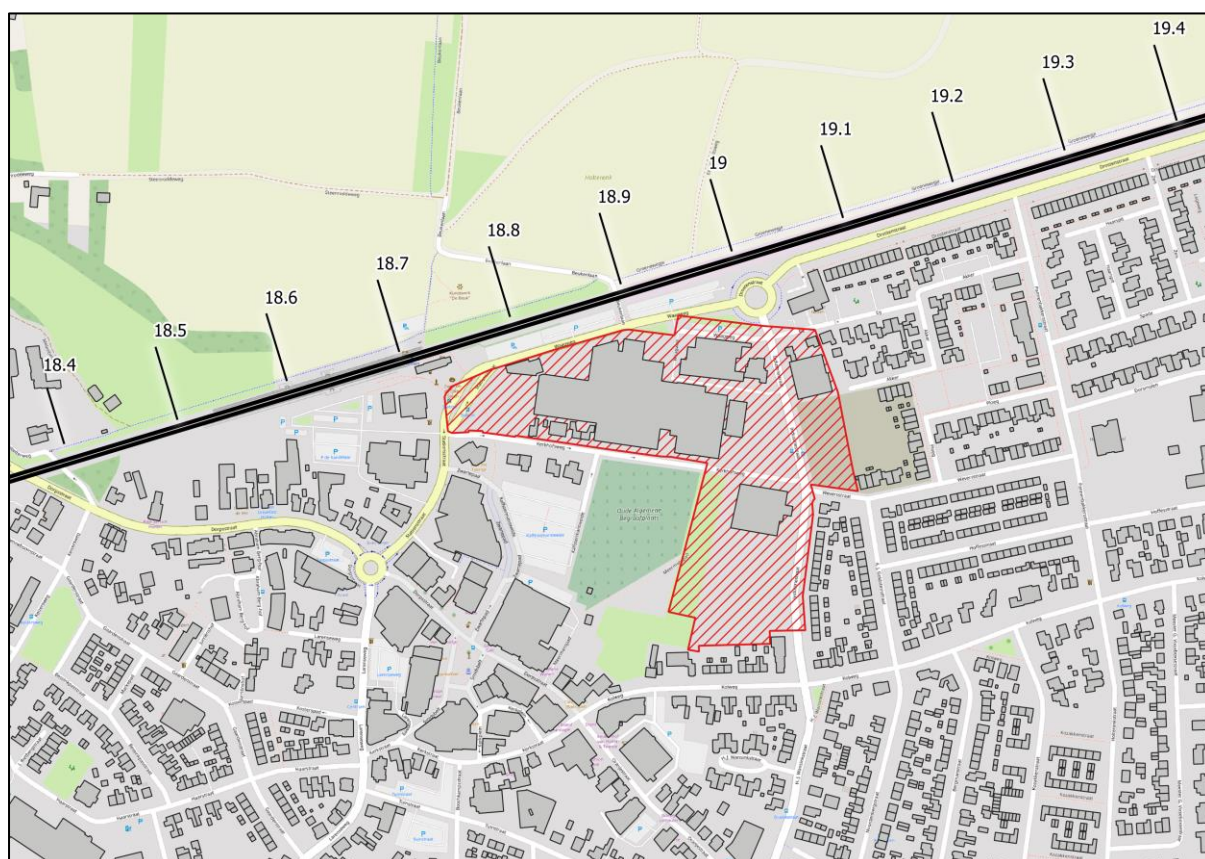
Inhoudsopgave

1	Inleiding	8
1.1	Aanleiding	8
1.2	Doel	8
1.3	Leeswijzer	9
2	Situatie en uitgangspunten	10
2.1	Situatiebeschrijving	10
2.2	Uitgangspunten	11
3	Beoordelingskader	13
3.1	Beoordelingskader	13
3.2	Rekenmethode	14
4	Verwachte trillingen in de woningen	17
4.1	Meetresultaten	17
4.2	Trillingen in geplande nieuwbouw	17
4.3	Maatregelen	20
4.4	Advies voor verdere ontwikkeling van het plan	24
4.5	Onzekerheden in het onderzoek	26
I	Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek	27
II	Bijlage Rekenmodel Buildyn	29
	Fundering	30
	Draagconstructie	30
	Vloeren	31
	Resultaten	32
III	Resultaten metingen	33
IV	Contourkaarten	37
	Vrijstaande woningen	38
	2-onder-1-kap woningen	40
	Rijwoningen	42
	Appartementencomplexen	44
V	Principedetails maatregelen	46

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De gemeente Rijssen-Holten is van plan het Enkcoterrein, nabij station Holten, te herontwikkelen. In het plangebied worden onder meer woningen gerealiseerd. Het plangebied bevindt zich in de nabijheid van de spoorlijn Deventer – Almelo, zie Figuur 1. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet *op voorhand* worden uitgesloten.



Figuur 1 Plangebied Enkcoterrein in Holten

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 een loods en bedrijfspanden. De opgestelde structuurvisie geeft ruimte aan verschillende soorten geplande bebouwing, zoals vrijstaande woningen, twee-onder-een kap woningen, rijwoningen en appartementen. De vorm en locatie van de bebouwing is nog niet bepaald. Een voorbeelduitwerking is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Voorbeelduitwerking uit structuurvisie

De nieuwbouw bevindt zich in een zone van zo'n 30 tot 320 meter van het spoor. Het aantal treinen per uur per richting en de rijnsnelheid van de treinen zijn weergegeven in Tabel 1. De planlocatie ligt dichtbij station Holten, sprinters halteren hier en hebben een

lage rijnsnelheid. Doorgaande intercity's en goederentreinen komen op hoge snelheid voorbij.

De gegevens in Tabel 1 zijn gebaseerd op gegevens uit het Geluidsregister Spoor en gegevens van de vervoerders. Het traject tussen Deventer en Almelo is een belangrijke corridor voor goederenvervoer van en naar Duitsland. Volgens de NMCA spoor 2030-2040 (vooruitblik voor goederenvervoer) wordt een toename verwacht van de huidige ca. 25 goederentreinen per dag naar 30 tot 44 goederentreinen per dag. Er wordt geen verandering voor reizigerstreinen voorzien.

Tabel 1 Aantal treinen per uur per richting (gemiddeld, beide richtingen samen)

Type trein	Rijnsnelheid (km/h)	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Sprinter	20 – 60 km/h	2.00	2.00	0.50
Intercity	100 – 120 km/h	2.42	2.25	0.75
Goederentrein	80 – 90 km/h	0.32	0.34	0.32

Zwaar wegverkeer over de nabijgelegen wegen met drempels of klinkers kan ook voor voelbare trillingen in de woningen zorgen, maar wegverkeer is niet nader kwantitatief beschouwd in dit onderzoek, omdat treinverkeer qua trillingen maatgevend is.

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 structuurvisie vastgesteld (21 november 2019) waarin dit wordt omschreven. 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 en 250 mm, met 60-70 mm zandcement dekvloer - Kanaalplaatvloeren 200 en 260 mm, met 60-70 mm zandcement dekvloer - Houten vloeren, diverse varianten
Hoogte	Grondgebonden woningen, 6 tot 9 m Appartementencomplex, 12 tot 15 m
Lengte vloerveld	Meerdere varianten, variërend van 4.8 tot 8.0 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 staal en op palen

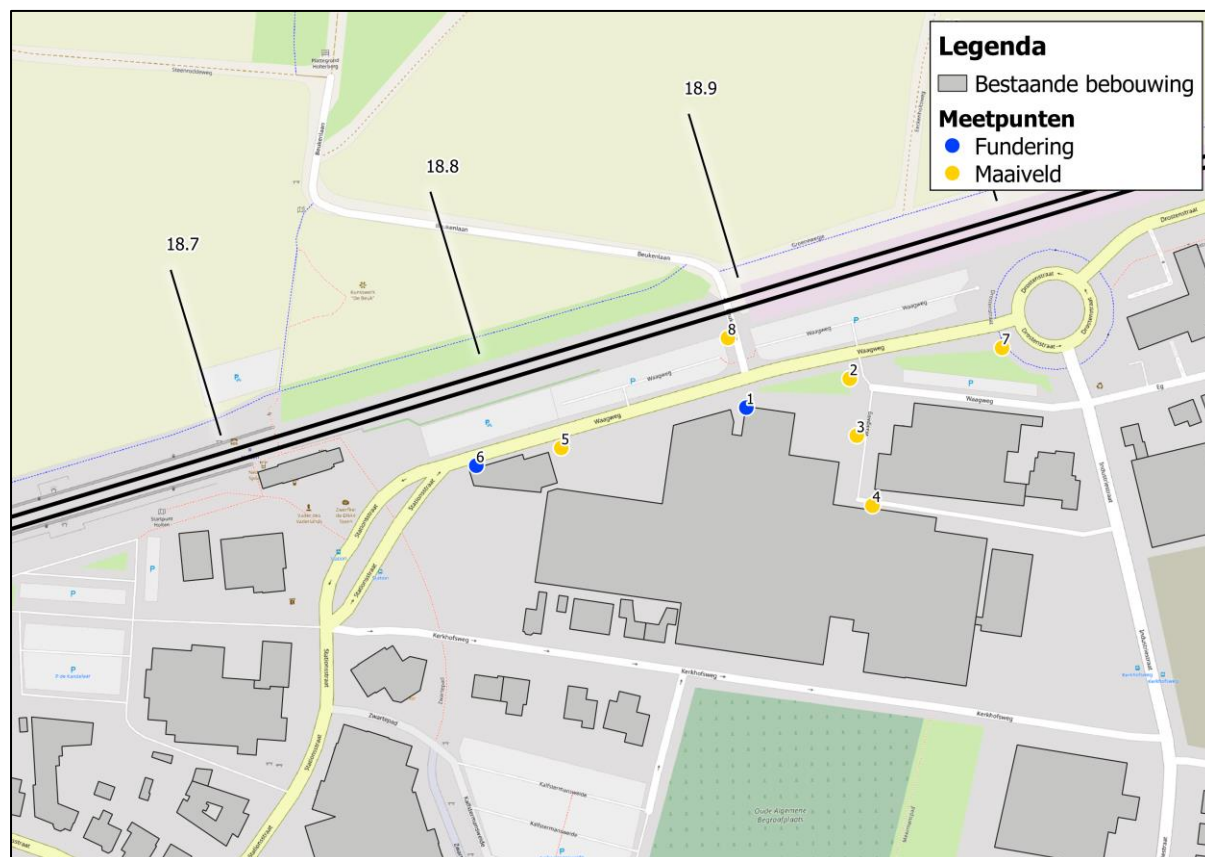
2.2.2 Gegevens ondergrond

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 eind mei en begin juni 2021. Er zijn metingen uitgevoerd op acht punten: twee meetpunten aan de fundering van bestaande bebouwing op het Enkcoterrein en zes 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 voornamelijk om gebouwen met een woonfunctie, maar ook andere functies (winkels, horeca, kantoor) zijn

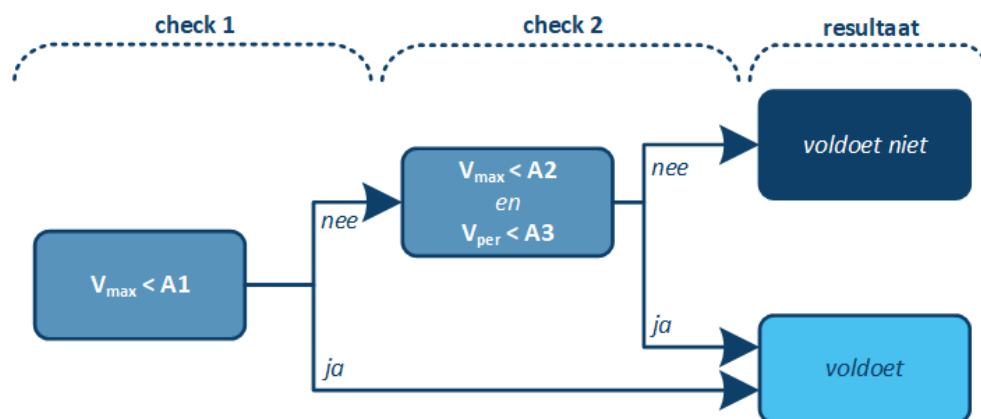
¹ Voor spoorprojecten wordt door ProRail sinds 2012 ook wel gebruik gemaakt van de Bts, deze is afgeleid van de SBR-richtlijn en op aspecten aangescherpt (waaronder een doelmatigheidsafweging en een andere manier om de trillingen vast te stellen). Deze richtlijn wordt echter doorgaans niet gebruikt om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

mogelijk. Gebouwen met een commerciële functie (zoals winkels en horeca) vallen formeel niet onder het beoordelingskader, de SBR B-richtlijn.

- 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
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
Kantoor, nieuwe situatie	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
Kantoor, bestaande situatie	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15



Figuur 4 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

3.2 Rekenmethode

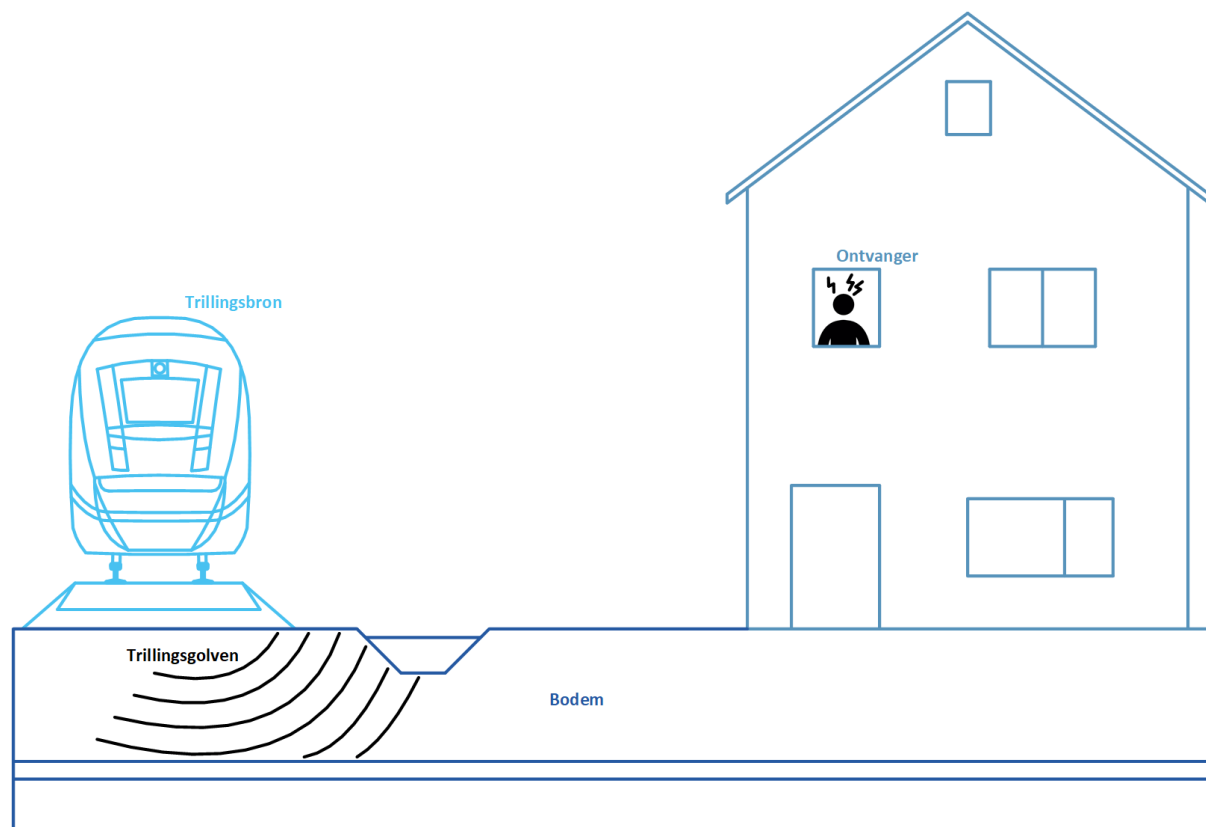
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde gebouwen, wordt op basis van metingen aan bestaande bebouwing een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande nieuwe bebouwing. Deze verwachte trillingen 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 voornamelijk uit zandlagen, zie bijlage I. De uitdemping van de trillingen met de afstand is bepaald met een rekenmodel op basis van deze bodemopbouw voor een zo betrouwbaar mogelijke predictie van de trillingen.

3.2.4 Het gebouw

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

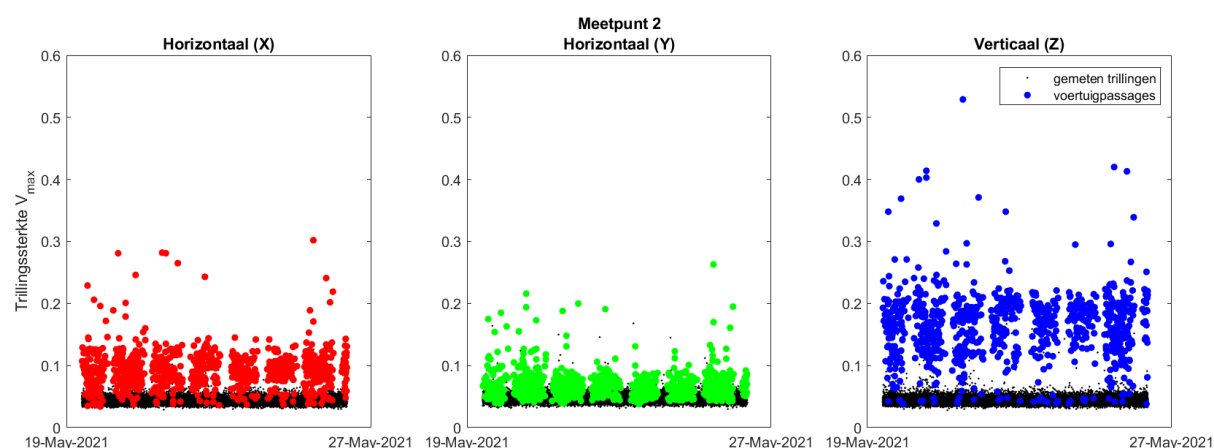
4 Verwachte trillingen in de woningen

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 het bestaande Enkco-gebouw 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, vergeleken met de horizontale X- en Y-richting zijn hier de hoogste trillingen gemeten.
2. De hoogste trillingen worden veroorzaakt door passerende goederentreinen. Deze zijn ook zichtbaar in het grillige patroon van de trillingen. De brede band aan trillingen tussen de 0.1 en 0.2 (in verticale richting) betreft voornamelijk intercity's. Goederentreinen hebben doorgaans een grotere massa dan reizigerstreinen, en veroorzaken daardoor vaak meer trillingen, zeker rond overwegen.
3. De trillingen van de sprinters vallen weg in de achtergrondtrillingen, omdat deze een lage rijsnelheid hebben vanwege de stop op station Holten.
4. De trillingen zijn al erg hoog op de fundering van het bestaande (oude) pand (hoogst gemeten waarde is 0.53, een goederentrein in de nacht). Ter indicatie, voor nieuwbouw geldt in de nacht een streefwaarde van 0.2.



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 doorgererekend. 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 **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** is aangegeven vanaf welke afstand de trillingen voldoen aan het beoordelingskader per gebouwtype. In **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** 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 tot 2 overschrijdingen per dag.
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.

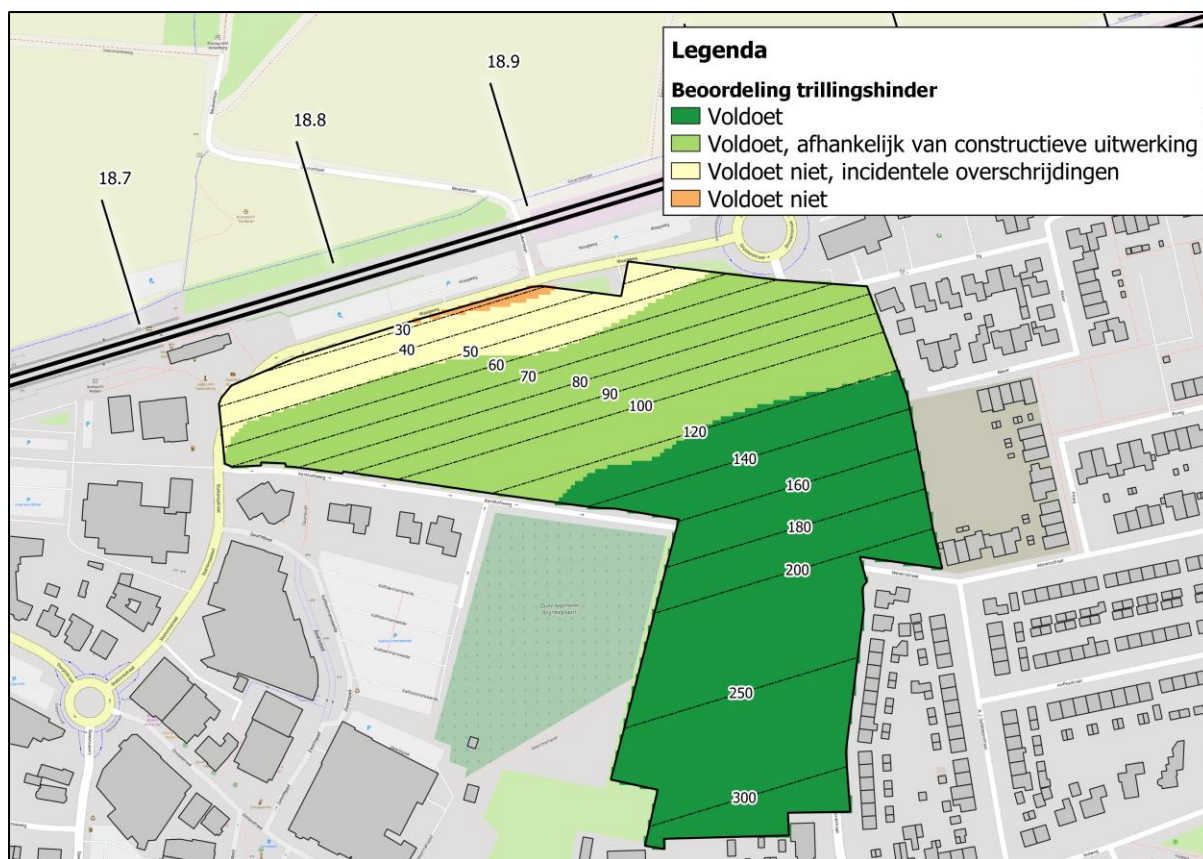
Tabel 4 Contourafstanden SBR B-richtlijn (globale afstanden tot spoorlijn)

		Vrijstaand	2-onder-1-kap	Rijwoning	Appartementen	Kantoren
	Classificatie					
	Voldoet, ongeacht constructieve uitwerking	>140 m	>140 m	>140 m	> 120 m	> 30 m
	Voldoet bij goed ontwerp	< 140 m	< 140 m	< 140 m	< 120 m	< 30 m
	Voldoet niet, beperkt aantal overschrijdingen	< 80 m	< 70 m	< 60 m	< 60 m	< 20 m
	Voldoet niet, maatregelen nodig	< 50 m	< 40 m	< 40 m	< 30 m	< 10 m

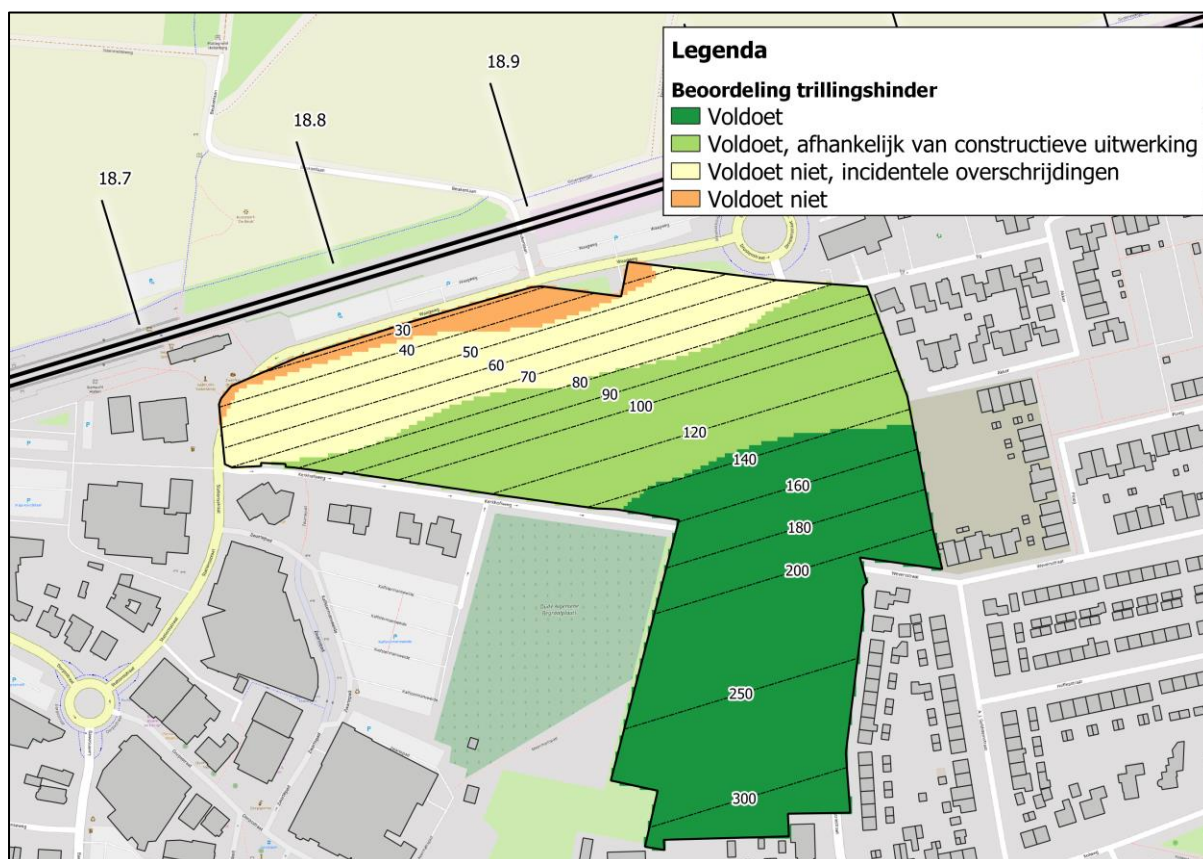
Voor appartementengebouwen en voor vrijstaande woningen zijn de contourkaarten van de beoordeling weergegeven in Figuur 7 resp. Figuur 8. De afstanden tot het spoor zijn hier ook aangegeven. Voor andere woningtypes zijn deze kaarten opgenomen in Bijlage IV, alsmede kaarten van de trillingssterkte V_{max} en de gemiddelde trillingssterkte V_{per} .

Samengevat geldt het volgende:

1. In de zone buiten ca. 140 meter van het spoor hoeft geen rekening te worden gehouden met trillingen bij de verdere uitwerking
2. In de zone tussen ca. 80 en ca. 140 meter dient rekening te worden gehouden met trillingen bij de verdere uitwerking van de constructies
3. In de zone tot ca. 80 meter van het spoor zijn overschrijdingen van het beoordelingskader mogelijk.



Figuur 7 Beoordeling trillingen aan SBR B-richtlijn, appartementen



Figuur 8 Beoordeling trillingen aan SBR B-richtlijn, vrijstaande woningen

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 verder af.
- Als de eigenfrequentie van de vloer hoger is dan 14 Hz, dan zijn de trillingen zo'n 25 procent lager vergeleken bij een vloer met een eigenfrequentie van 10 Hz. Dit kan worden gerealiseerd door gebruik te maken van dikkere vloeren, kortere vloeroverspanningen of vloeren ingeklemd op te leggen (bijv. doorgaande breedplaatvloeren bij rijwoningen).
- 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 5 tot 10 procent lagere trillingen dan gebouwen met (standaard) kanaalplaatvloeren. Dit komt vooral door de hogere demping van breedplaatvloeren.
- Gebouwen met een lichte bouw (zoals houtskeletbouw) kennen tot 30 procent hogere trillingen dan gebouwen in prefab beton of kalkzandsteen en metselwerk. Er is daarentegen weinig verschil tussen een constructie in beton of in kalkzandsteen.

4.3 Maatregelen

Door de passage van zware goederentreinen (en dichtbij het spoor ook de doorgaande intercity's) wordt 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 het plangebied als *matige hinder*. Vervolgens geeft deze bijlage aan dat matige hinder kan worden geaccepteerd onder een aantal voorwaarden:

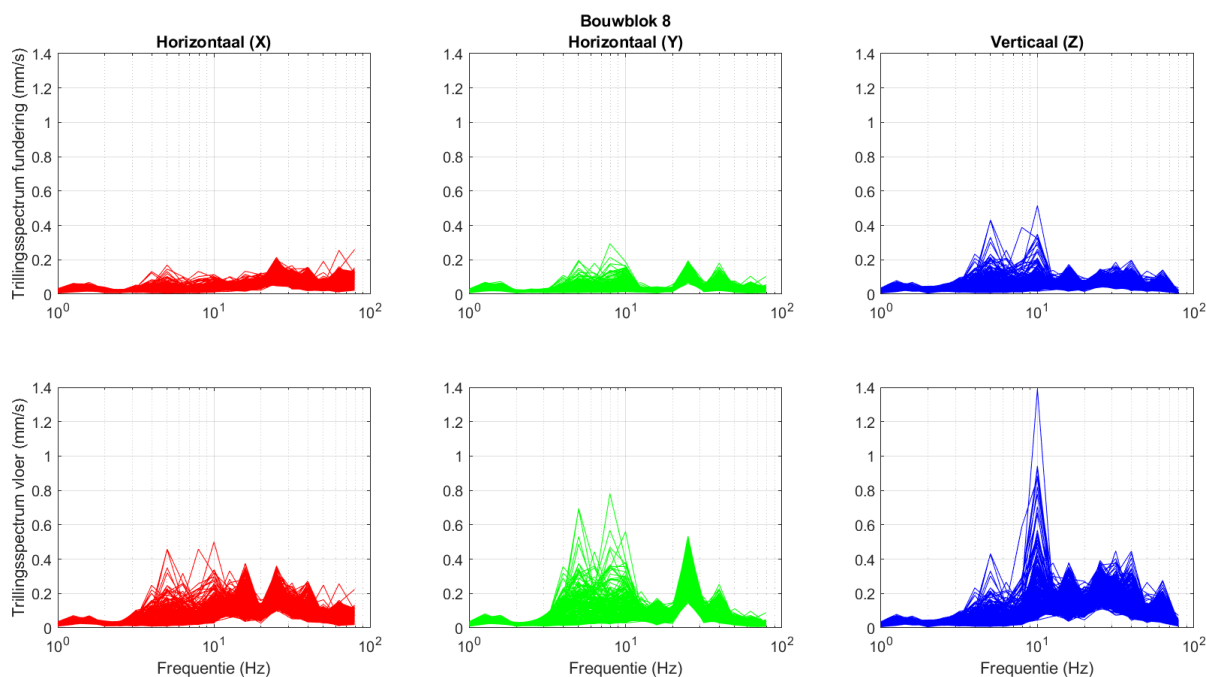
1. De mate waarin de trillingssterkte voorkomt. Hiervoor geldt dat de gemiddelde trillingssterkte V_{per} een goede indicatie is. In de zone tot 30 a 50 meter van het spoor (en lokaal rond de overweg) is V_{per} hoger dan de streefwaarde van 0.05, maar daarbuiten is deze waarde laag en is sprake van een beperkt aantal overschrijdingen: maximaal 1 tot 2 per dag na de verwachte toename van het aantal goederentreinen. Het gaat daar om een relatief beperkt aantal overschrijdingen, dat eventueel het achterwege laten van een maatregel zou kunnen rechtvaardigen. Binnen de zone van 30 a 50 meter van het spoor is sprake van een groot aantal overschrijdingen.
2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. Daar is hier niet of slechts zeer beperkt sprake van, de trillingen van lokaal verkeer over de overweg en het omliggende wegennet zijn vrijwel overal lager dan die van het treinverkeer.
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 9. In deze figuur is de trillingssnelheid per treinpassage weergegeven als tertsbandspectrum op de fundering en de hoogste verdieping van een 2-onder-1-kapwoning dichtbij de spoorwegovergang. Hieruit kan worden afgeleid bij welke frequentie en in welke trillingsrichting de trillingen het hoogst zijn.



Figuur 9 Verwachte trillingen in 2-onder-1-kapwoning dichtbij spoorwegovergang, met vloer met 10 Hz eigenfrequentie

Uit deze analyse 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. In horizontale richting nog mee dat de kantel- en buigfrequentie van de woning samenvallen met de loopsnelheid van de trillingsgolven, waardoor deze worden versterkt tussen maaiveld en het gebouw.

Maatregelen die genomen worden moeten vooral effectief zijn tegen trillingen tussen de 4 en 15 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.

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 (heeft maar tijdelijk effect) of het toepassen van een zware betonplaat onder het spoor. 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 onder sleeper pads of ballastmatten, zijn onvoldoende effectief tegen de laagfrequente trillingen van goederentreinen.

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 kost (€ 2.500.000 tot € 7.000.000 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 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.

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 direct naast de Waagweg of op de westelijke grens van de parkeerplaats direct naast het spoor. Op beide locaties geldt dat een dergelijk scherm een grote diepte nodig heeft om voldoende effectief te zijn, en dat de maatregel in de openbare ruimte wordt getroffen. Los van allerlei uitvoeringsrisico's, langdurige afsluiting van de openbare weg en de noodzaak tot het verleggen van kabels en leidingen, zorgt de aanleg van een dergelijk scherm ook voor forse uitvoeringshinder voor omwonenden (geluid, trillingen, bereikbaarheid).

Om het plangebied af te schermen, is een trillingsscherm van ca. 400 meter lengte nodig, en gezien de laagfrequente trillingen met een diepte van zo'n 25 meter. Mogelijke maatregelen in de bodem met een inschatting van het effect en de kosten voor deze situatie zijn weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5 Mogelijke maatregelen in de bodem

Maatregel	Effect	Kosten ³
Betonnen wand (diepwandmethode)	15 – 30%	€ 10.0 – 15.5 mln
Jet-grout wand	10 – 20%	€ 8.1 – 12.6 mln
Damwand (intrillen)	5 – 15%	€ 6.6 – 10.2 mln
Beton met 100 mm rubber	30 – 60%	€ 14.0 – 21.6 mln

² Deze kosten zijn nog exclusief kosten voor bijv. inzet van vervangend vervoer bij buitendienststellingen, en genomen voor een lengte van ca. 400 meter voor beide sporen.

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.

Maatregel	Effect	Kosten ³
Damwand met EPS	10 – 20%	€ 8.6 – 13.4 mln
Damwand met sleuf	10 – 25%	€ 13.3 – 20.5 mln
Prefab L-wand 3 m diep	5 – 15%	€ 1.7 – 2.7 mln
Prefab L-wand 4 m diep, bekleed met 100 mm rubber	10 – 20%	€ 2.7 – 4.3 mln
CSM-wand (Cutter Soil Mix of Mix-In-Place)	0 – 10%	€ 2.3 – 3.6 mln
Sloot, 2 m diep	5 – 20%	€ 0.3 – 0.6 mln
Sloot, 2 m diep met L-wand 4 m diep	15 – 25%	€ 2.0 – 3.3 mln
Trillingsscherm EPS	5 – 20%	€ 1.6 – 2.6 mln

Om in alle gevallen te voldoen aan het beoordelingskader, is, afhankelijk van de constructieve uitwerking van de gebouwen, maximaal 70 procent reductie nodig. Alleen een betonnen trillingsscherm van 25 meter diep, 0.5 meter breed en tot 10 meter diepte (onder maaiveld) bekleed met minimaal 100 mm rubber komt in de buurt van een dergelijke reductie. De kosten van een dergelijk trillingsscherm zijn met € 14.0 tot 21.6 mln. zeer hoog. Ter indicatie, ProRail hanteert voor het treffen van trillingsmaatregelen vaak een bedrag van € 47.000 in bestaande situaties. Bij nieuwbouw leiden dergelijke kostenopslagen vaak tot onverkoopbare woningen, daarom wordt bij nieuwbouw vaak een (veel) lager (projectafhankelijk te motiveren) bedrag gehanteerd.

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 in gebouwen met een kantoorfunctie veel eenvoudiger te voldoen aan het beoordelingskader dan in gebouwen met een woonfunctie, zijn de trillingen lager in appartementengebouwen dan in grondgebonden woningen, en zorgt een hogere eigenfrequentie van de vloer voor lagere trillingen.

Aanvullend kunnen ook nog extra maatregelen worden getroffen. Denk aan het toepassen van een zwaardere fundering (onderheien, zware parkeerkelder, of bijv. een 500 mm dikke plaatfundering onder grondgebonden woningen), het vergroten van de massa van het gebouw door zwaardere materialen of dikkere vloeren 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 14 Hz	15 – 25%	< 2% SK
Breedplaatvloeren i.p.v. kanaalplaatvloeren	5 – 10%	< 3% SK
Grotere bouwvolumes	0 – 15%	nvt
Paalfundering i.p.v. balkenfundering	5 – 10%	1 – 3% SK

⁴ SK = Stichtingskosten

Maatregel	Effect	Kosten ⁴
500 mm dikke plaatfundering i.p.v. balkenfundering	10 – 20%	1 – 3% SK
Zware parkeerkelder i.p.v. paalfundering bij appartementen	5 – 20%	3 – 7% SK
Ontkoppelen van de vloeren	0 %	2 – 4% SK
Ontkoppelen van de fundering (afveren, stalen veren met $f_0 = 2.5$ Hz)	70 – 90%	4 – 8% SK
Inpakken van de fundering met rubber	10 – 20%	2 – 5% SK
Afschermen van de fundering met EPS	5 – 15%	< 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 2.5 Hz, toegepast tussen paalkoppen en funderingsbalken, of tussen een plaatfundering en funderingsbalken). Hiermee zijn de trillingen te reduceren tot onder de streefwaarden en kan een hoog comfortniveau worden bereikt. De kosten van deze maatregelen zijn echter hoog en bedragen tussen de € 10.000 en € 25.000 per woning.

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. Dat komt vooral door de passage van zware goederentreinen op hoge snelheid, terwijl de trillingen door de zandbodem slecht uitdempen met de afstand.

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

3. Positioneer gebouwen zo ver mogelijk bij het spoor vandaan. Houd hierbij ook rekening met de spoorwegovergang Beukenlaan, rond deze spoorwegovergang zijn de trillingen hoger.
4. Plaats minder trillingsgevoelige functies (horeca, winkels, kantoren) dicht bij het spoor dan meer trillingsgevoelige functies (wonen).
5. Plaats grotere bouwvolumes (appartementencomplexen) dicht bij het spoor dan kleinere bouwvolumes (grondgebonden woningen).
6. Houd bij woonfuncties binnen 140 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. Zorg voor een eigenfrequentie van de vloeren van minimaal 14, liefst 15 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).
 - c. Maak waar mogelijk gebruik van breedplaatvloeren i.p.v. kanaalplaat- of ribbenvloeren.
 - d. Pas indien mogelijk een palenfundering of een dikke plaatfundering toe. Bij appartementen: realiseer een (zware) parkeerkelder onder het gebouw.

Met bovenstaande aanpassingen zijn er op afstanden van 60 (grotere bouwvolumes zoals appartementencomplexen) tot 80 meter van het spoor (vrijstaande woningen) geen overschrijdingen meer.

7. Weeg voor de zone van 30 tot 60 meter (bij grotere bouwvolumes zoals appartementencomplexen) en 50 tot 80 meter (bij vrijstaande woningen) af of 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 400 meter, maar deze maatregel valt buiten het plangebied en kost € 2.5 tot € 7.0 mln. incl. BTW.
 - b. Maatregelen in de bodem zijn maar beperkt effectief. Meest effectief is een 25 meter diep trillingsscherm van beton, bekleed met rubber, tussen het spoor en het P&R-terrein bij het station. Deze maatregel valt buiten het plangebied en kost € 14.0 tot 21.6 mln. incl. BTW.
 - c. Bij maatregelen in de gebouwen zijn er meerdere mogelijkheden. Denk aan het verzwaren van de fundering (500 of 700 mm dikke plaatfundering, afschermen van de fundering (zie Bijlage V) met rubber of EPS of het realiseren van een dubbele fundering met daartussen stalen veerdozen, afgeveerd op 2.5 Hz (trillingsisolatie). Deze laatste maatregel is het meest effectief, maar kost tussen de € 10.000 en € 25.000 per woning. Alleen met deze maatregel zijn alle overschrijdingen in het hele plangebied weg te nemen.

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

- d. Er is sprake van een beperkt aantal overschrijdingen (maximaal 2 per dag in de toekomst, na de verwachte intensivering van het goederenvervoer), veroorzaakt door zware goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte. De trillingen van vrijwel alle reizigerstreinen en de meeste goederentreinen voldoen wel aan het beoordelingskader.
- e. De trillingen voldoen weliswaar niet aan de strenge streefwaarden voor nieuwbouw uit de SBR B-richtlijn, maar op incidentele uitschieters na (ca. 2 tot 4 per week) wel aan de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties uit de SBR B-richtlijn. In die soepeler streefwaarden voor bestaande situaties is een zekere mate van gewinning meegenomen.
- f. De woningen worden gerealiseerd in een zone dichtbij het spoor, waar nu ook al bebouwing is gerealiseerd die dicht bij het spoor staat. Het gaat bovendien om oude, meer trillingsgevoelige bebouwing, waar de trillingen dus significant hoger zullen zijn dan in de nieuwe woningen. Ook zonder maatregelen tegen trillingen ontstaat in de geplande bebouwing daarom geen onacceptabele situatie: de trillingen zijn daar immers (veel) lager dan in andere, al bestaande bebouwing rond deze locatie. Bovendien zullen de trillingen in de nieuwbouw door de zware constructie veel lager zijn dan in de bestaande, te slopen woning.

8. Neem voor de zone tot 30 meter (bij grotere bouwvolumes zoals appartementencomplexen) en tot 50 meter (bij vrijstaande woningen) maatregelen, zoals hierboven benoemd onder 5.

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 hier) 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.

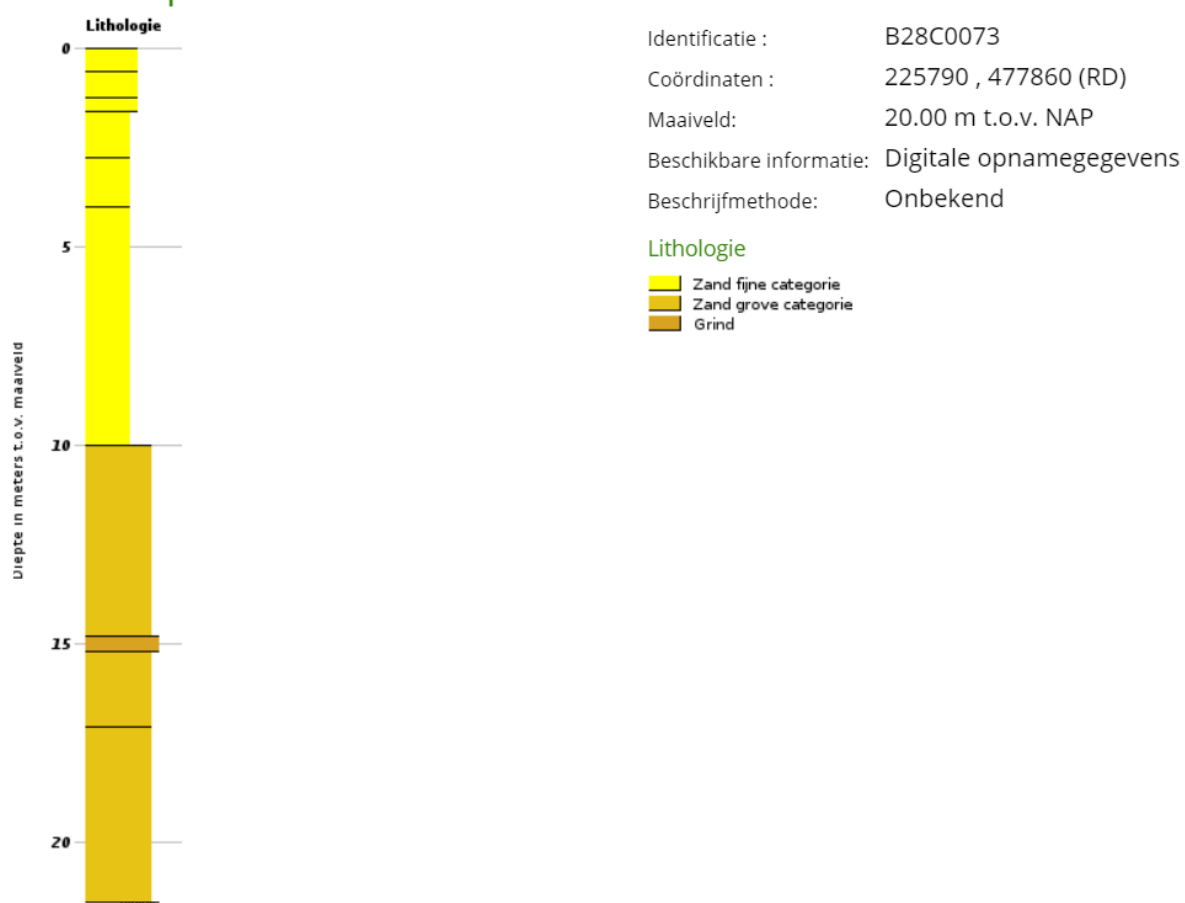


Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek

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.

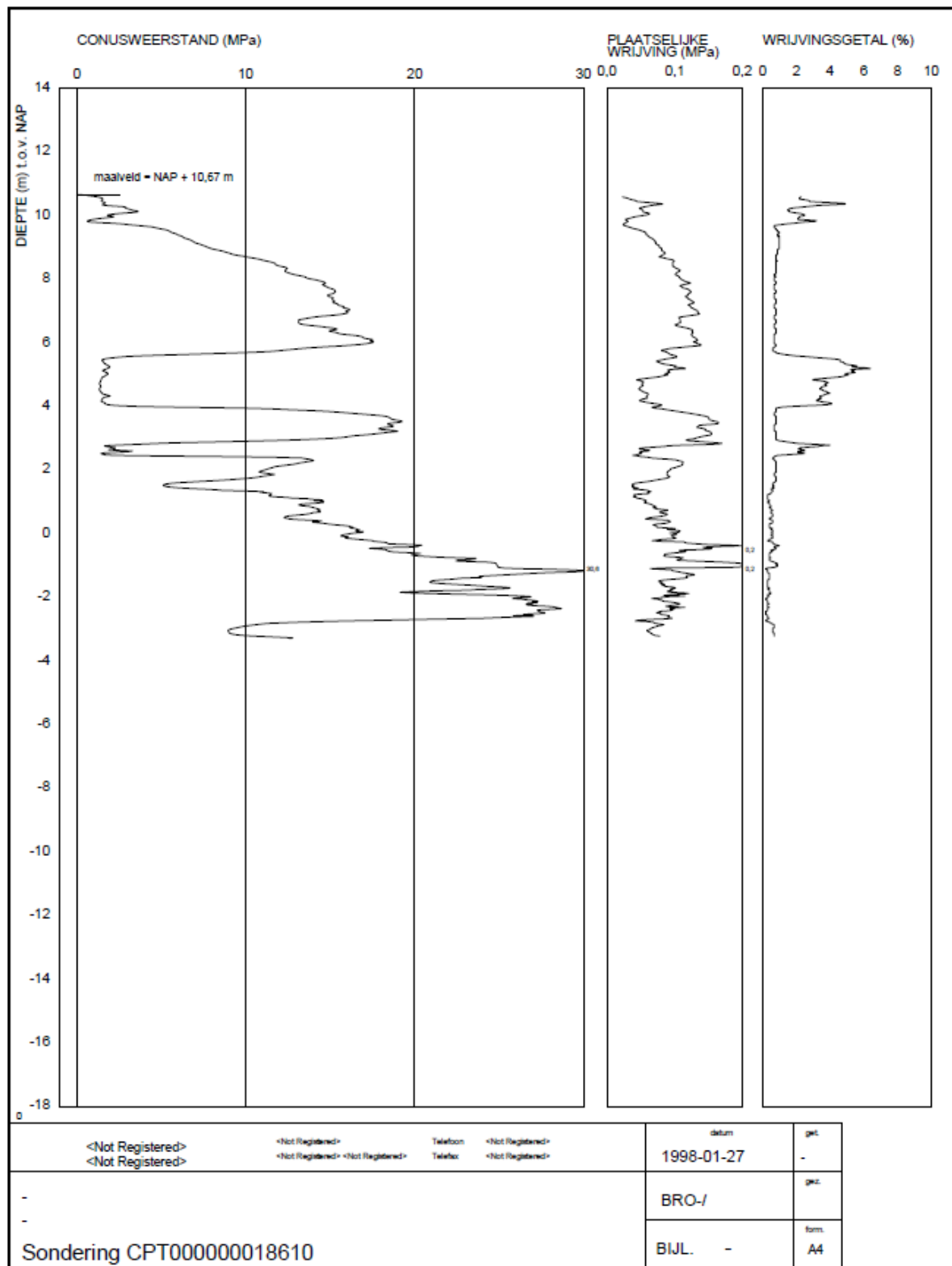
Een boring in de nabijheid van het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur 10. Hier is te zien dat de bodem hoofdzakelijk is opgebouwd uit zandlagen. Met name door de aanwezigheid van zand dempen de trillingen slecht uit met de afstand.

Boormonsterprofiel



Figuur 10 Boring in het onderzoeksgebied, B28C0073

Een representatieve sondering nabij het onderzoeksgebied, waarin de stijve opbouw van de bodem zichtbaar is, is weergegeven in Figuur 11.

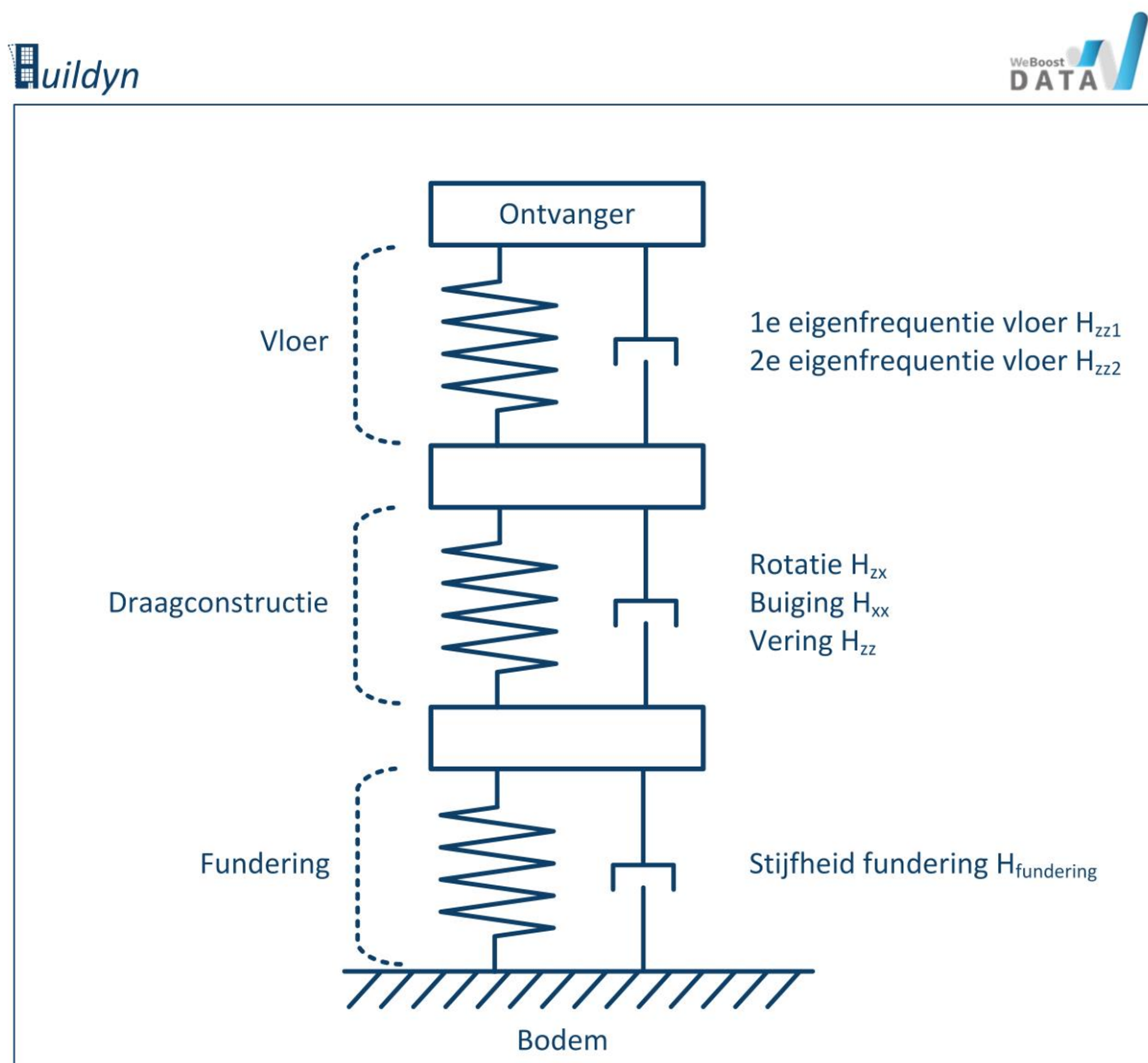


Figuur 11 Sondering nabij het onderzoeksgebied, CPT000000018610

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 12. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 12, worden in deze bijlage nader toegelicht.



Figuur 12 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.

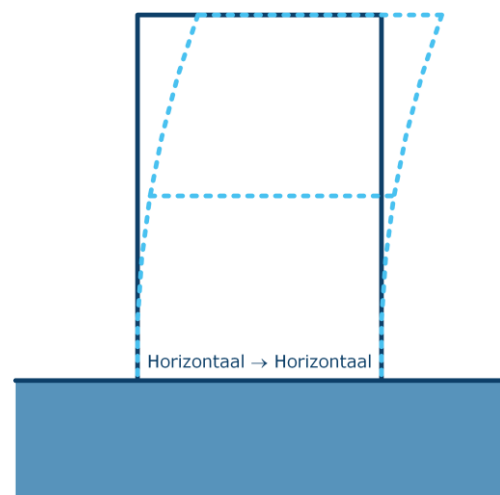
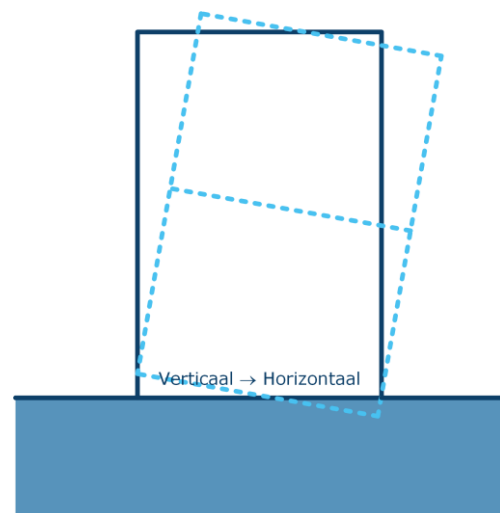
Dit effect noemen we H_{zx} , en is afhankelijk van:

- 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.

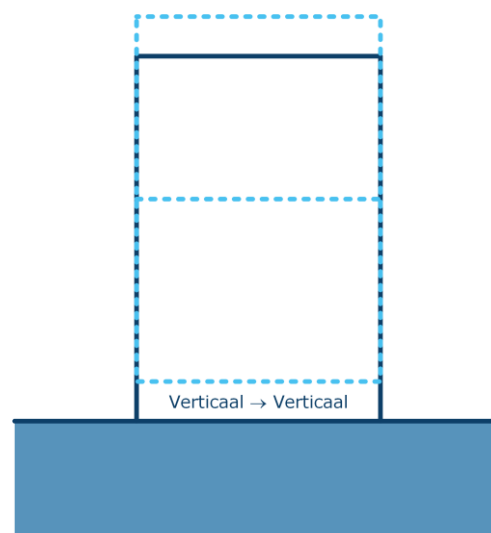
Dit effect noemen we H_{xx} , en is afhankelijk van:

- 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)



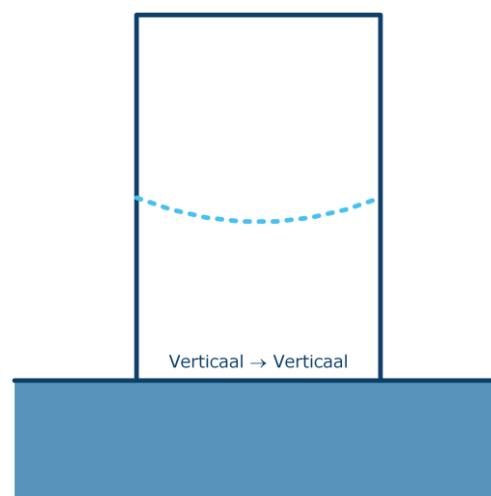
Vloeren

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:

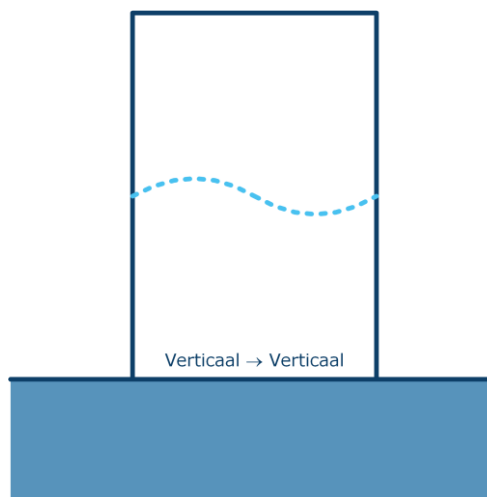
- Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- Afmetingen van de vloer
- Type oplegging



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 prinscheschets rechts.

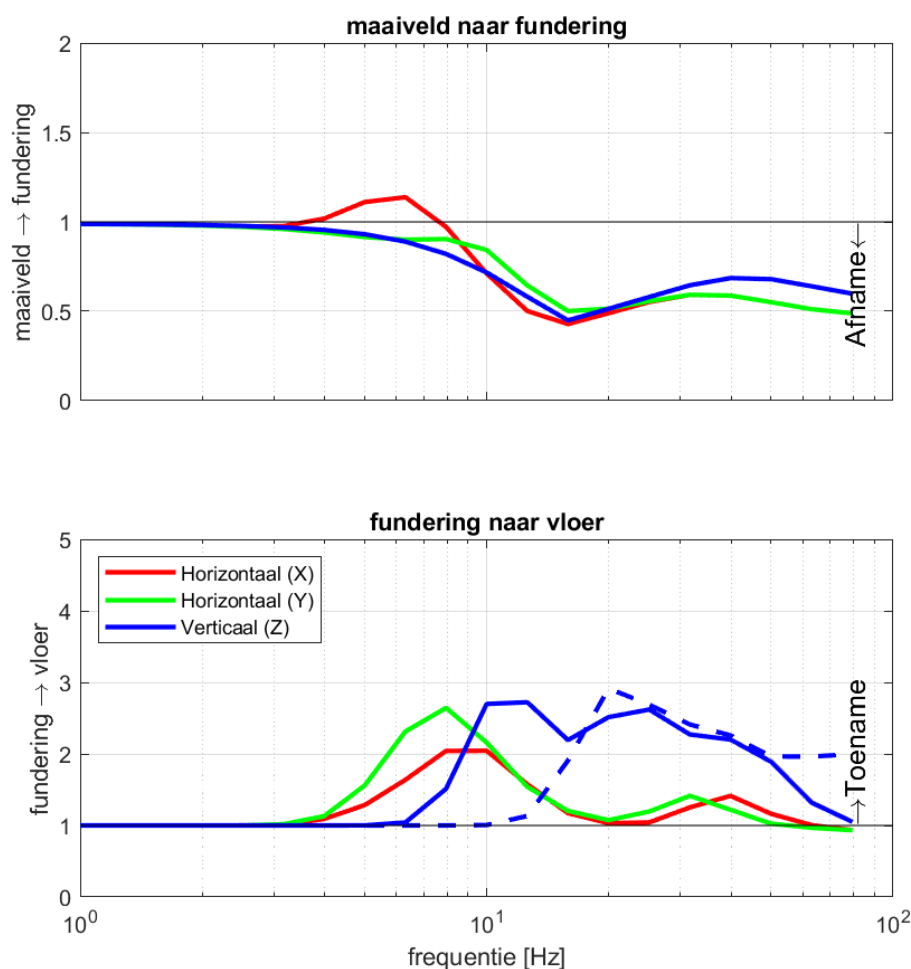
Dit effect noemen we H_{zz2} , en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1} .

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 13.

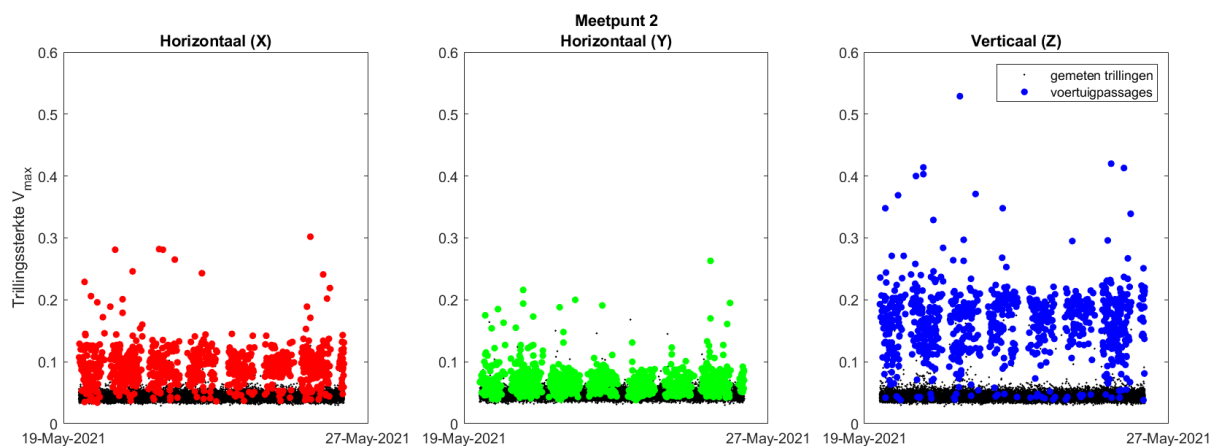


Figuur 13 Buildyn-resultaten voor vrijstaande woning van 10.0 bij 6.0 meter, twee bouwlagen met kap, 200 mm kanaalplaatvloer, 6.0 m vloeroverspanning en casco van kalkzandsteen en metselwerk

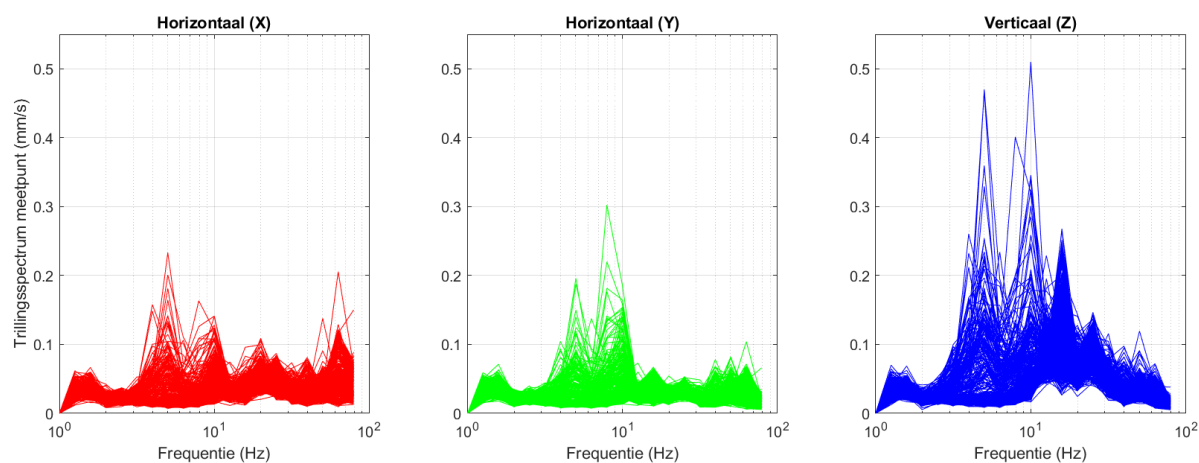


Resultaten metingen

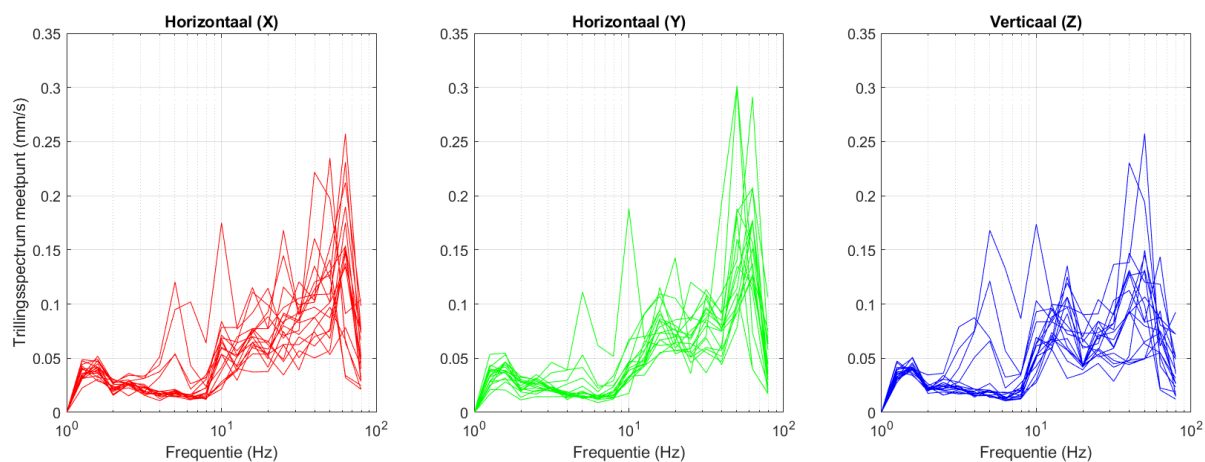
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra van de trillingen per treinpassage weergegeven.



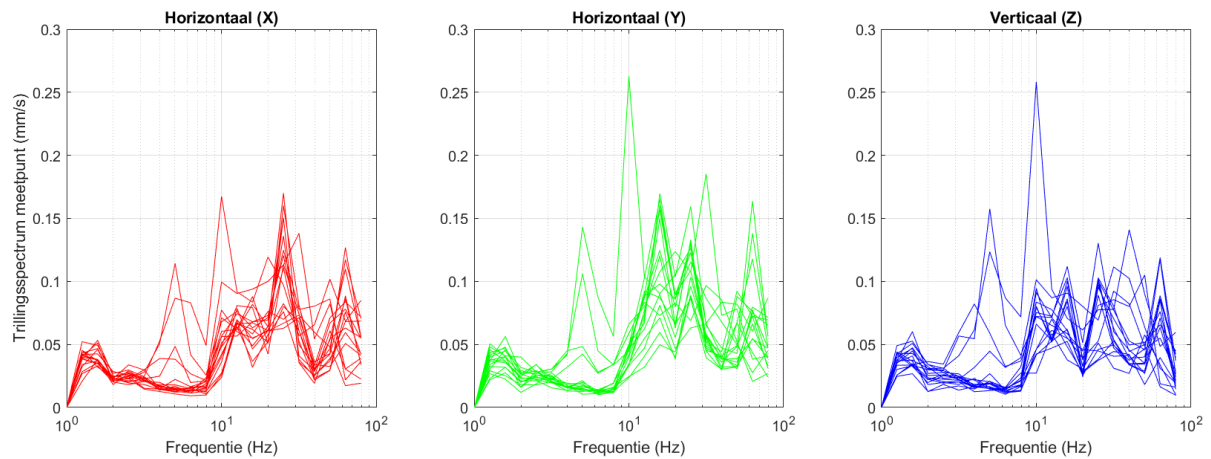
Figuur 14 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (fundering bestaand pand)



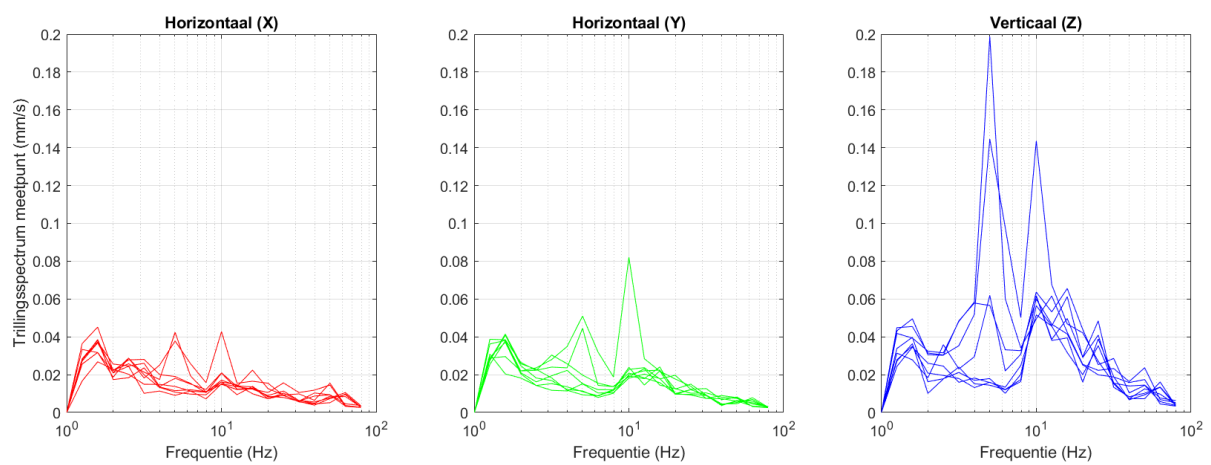
Figuur 15 Tertsbandspectra bij meetpunt 1 (fundering bestaand pand)



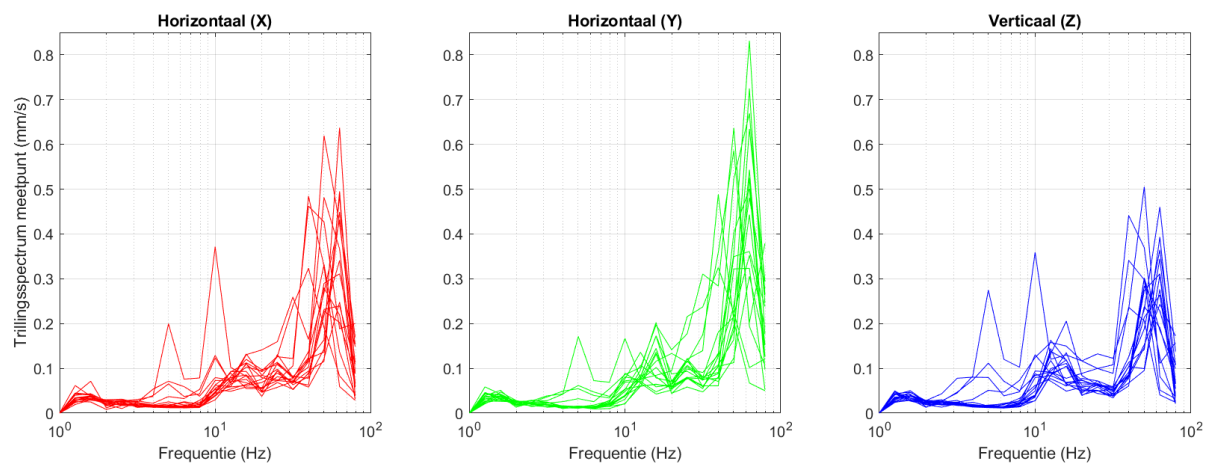
Figuur 16 Tertsbandspectra bij meetpunt 2



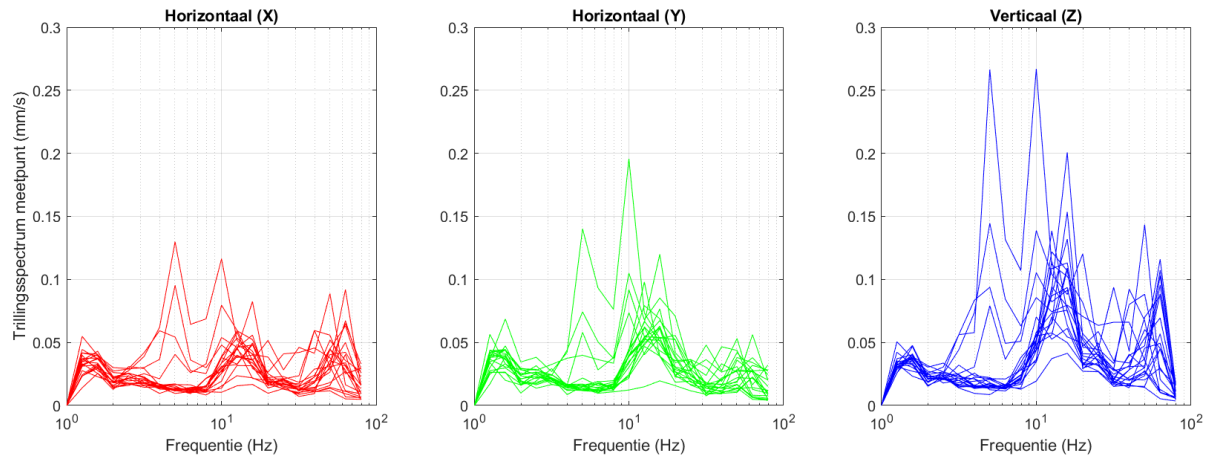
Figuur 17 Tertsbandspectra bij meetpunt 3



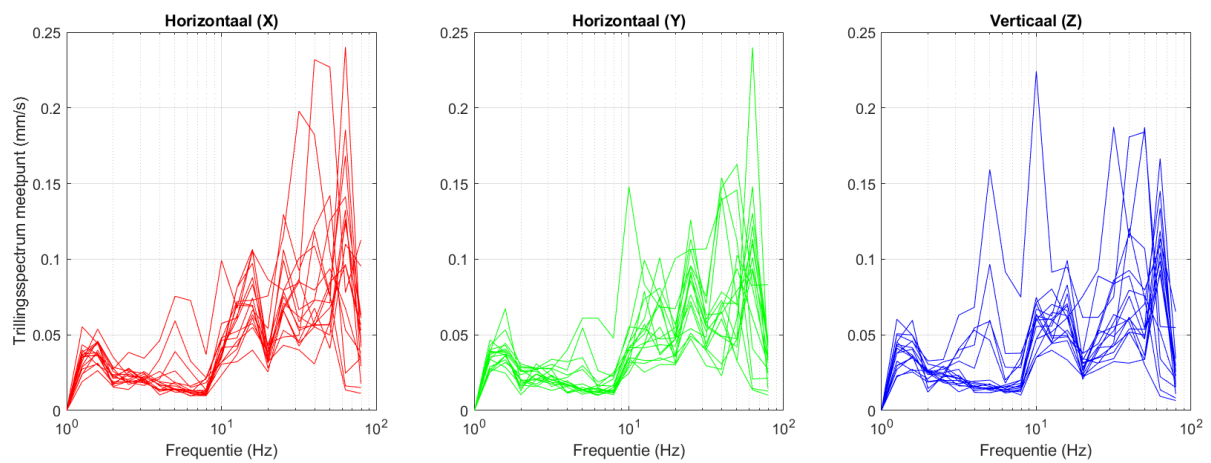
Figuur 18 Tertsbandspectra bij meetpunt 4



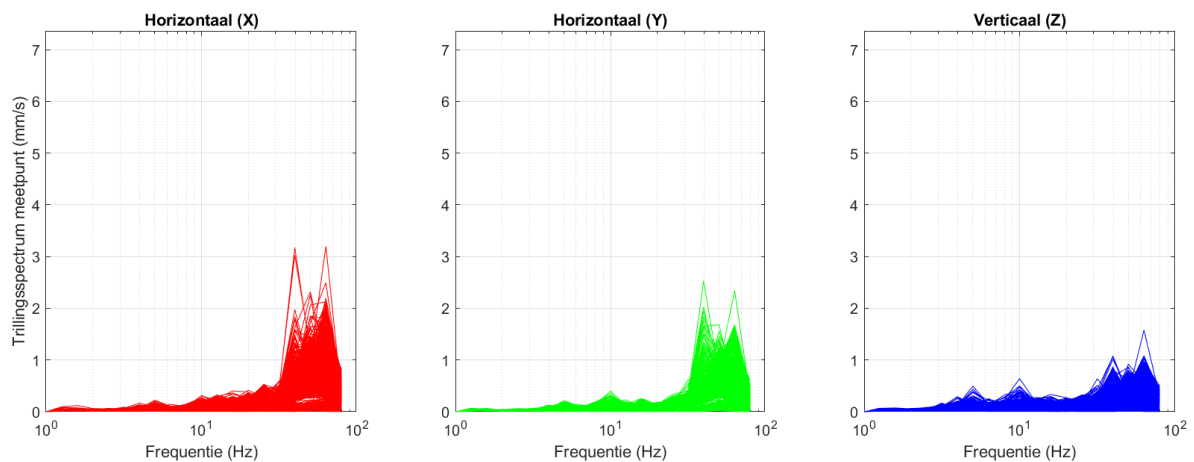
Figuur 19 Tertsbandspectra bij meetpunt 2



Figuur 20 Tertsbandspectra bij meetpunt 6



Figuur 21 Tertsbandspectra bij meetpunt 7



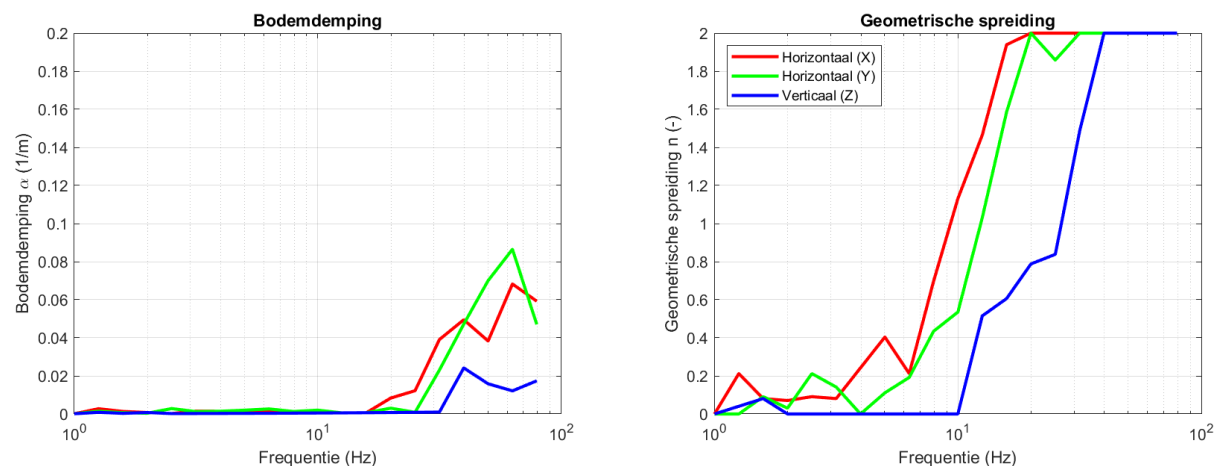
Figuur 22 Tertsbandspectra bij meetpunt 8 (maaiveld, dichtbij spoor)

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

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

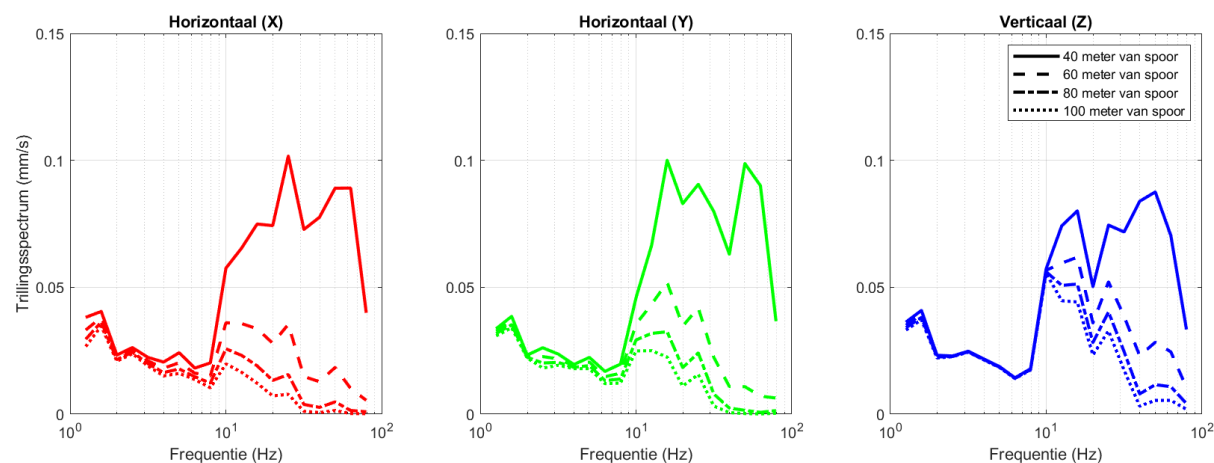
In deze vergelijking staat V voor de trillingssnelheid, f voor de frequentie, r voor de afstand tot de trillingsbron, r_0 voor de referentieafstand (hier 20 m), n voor de geometrische

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

De gemiddelde trillingsspectra op 40, 60, 80 en 100 meter van het spoor zijn weergegeven in Figuur 24. Hier is te zien dat vooral boven de 10 Hz de trillingen sterk uitdempnen met de afstand.



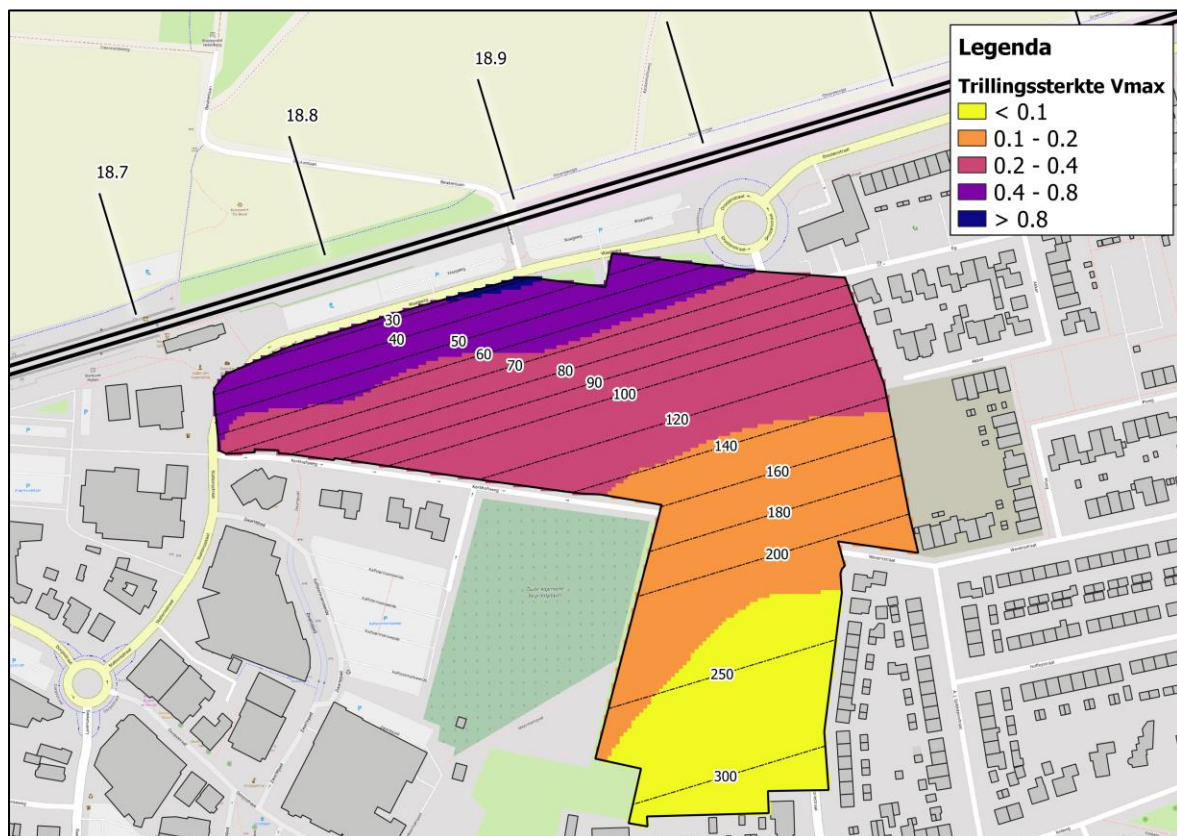
Figuur 24 Gemiddelde trillingsspectra op 40, 60, 80 en 100 meter van het spoor

IV Contourkaarten

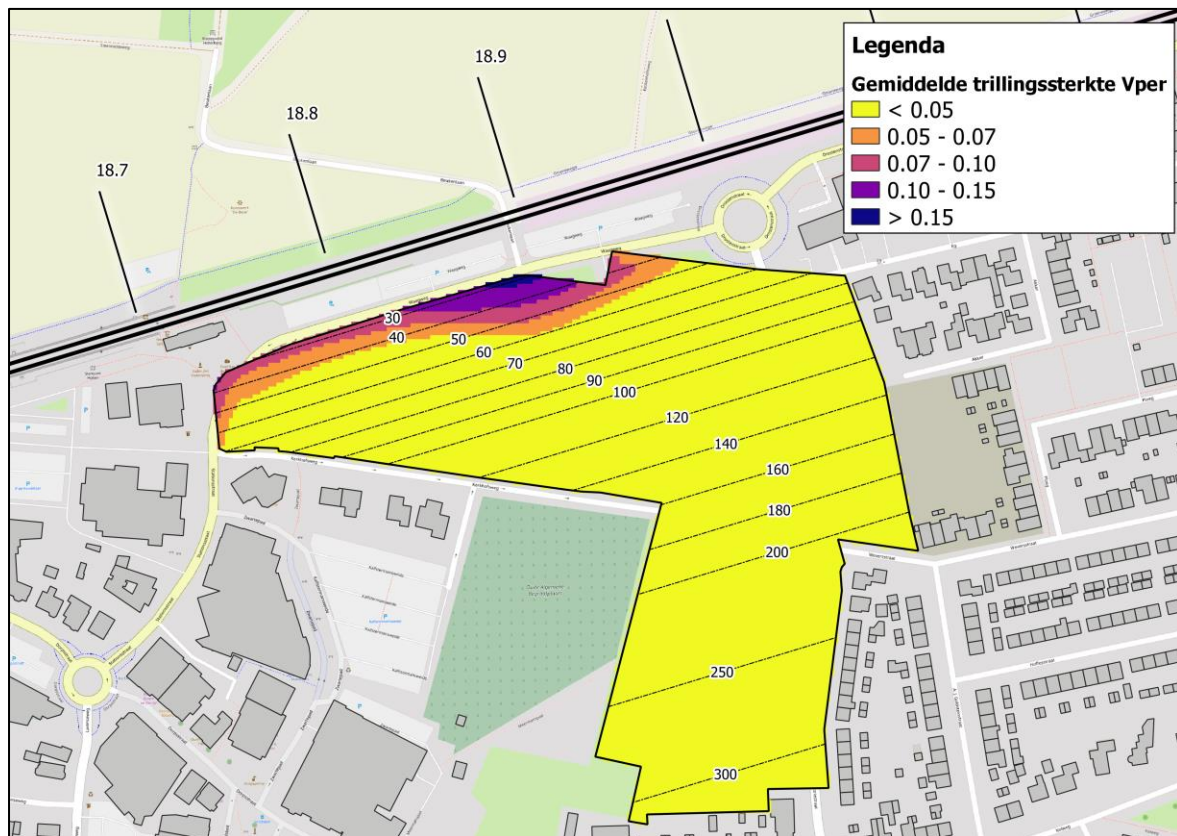
Deze bijlage bevat contourkaarten voor vier types gebouwen: vrijstaande woningen, 2-onder-1-kap woningen, rijwoningen en appartementengebouwen. Hierbij is steeds het volgende weergegeven:

1. De trillingssterkte V_{max} , voor de worst-case variant (meest trillingsgevoelige uitwerking van het type gebouw)
2. De gemiddelde trillingssterkte V_{per} , voor de worst-case variant
3. De beoordeling van de trillingen op de SBR B-richtlijn, conform de in hoofdstuk 4 benoemde classificaties.

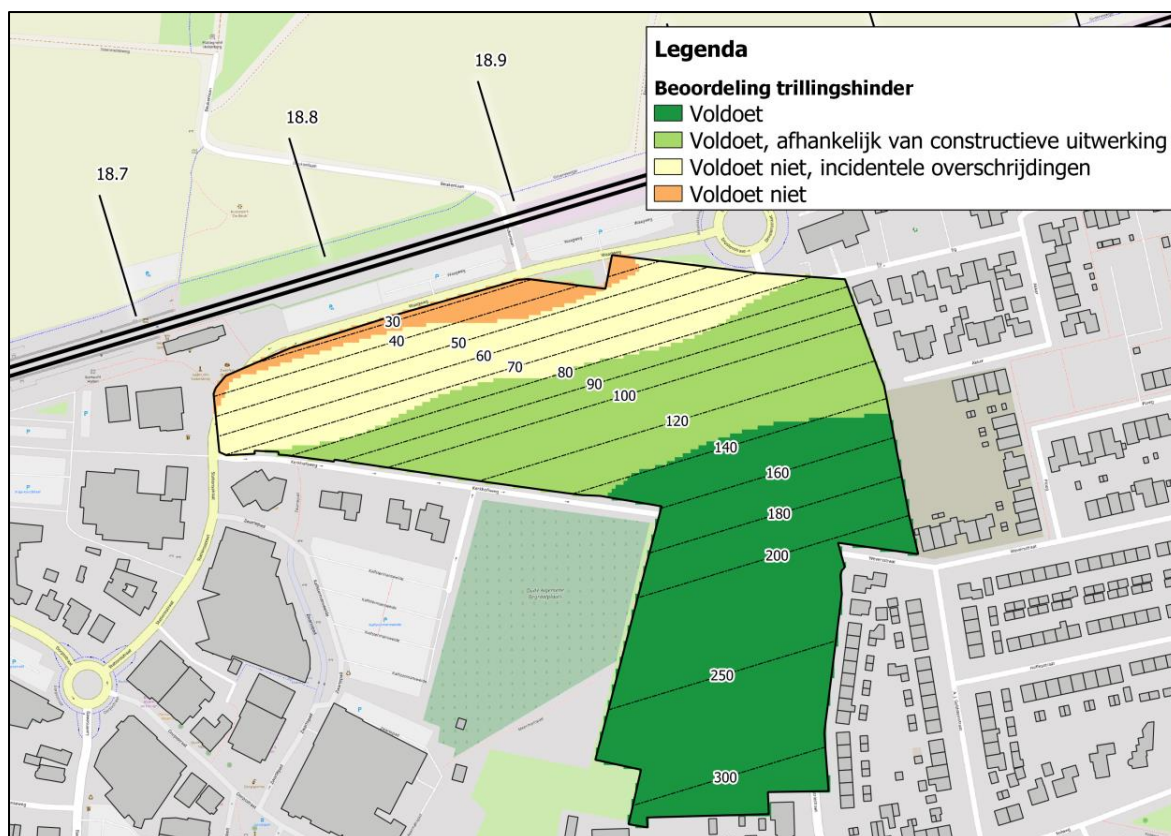
Vrijstaande woningen



Figuur 25 Maximale trillingssterkte V_{max} voor vrijstaande woningen

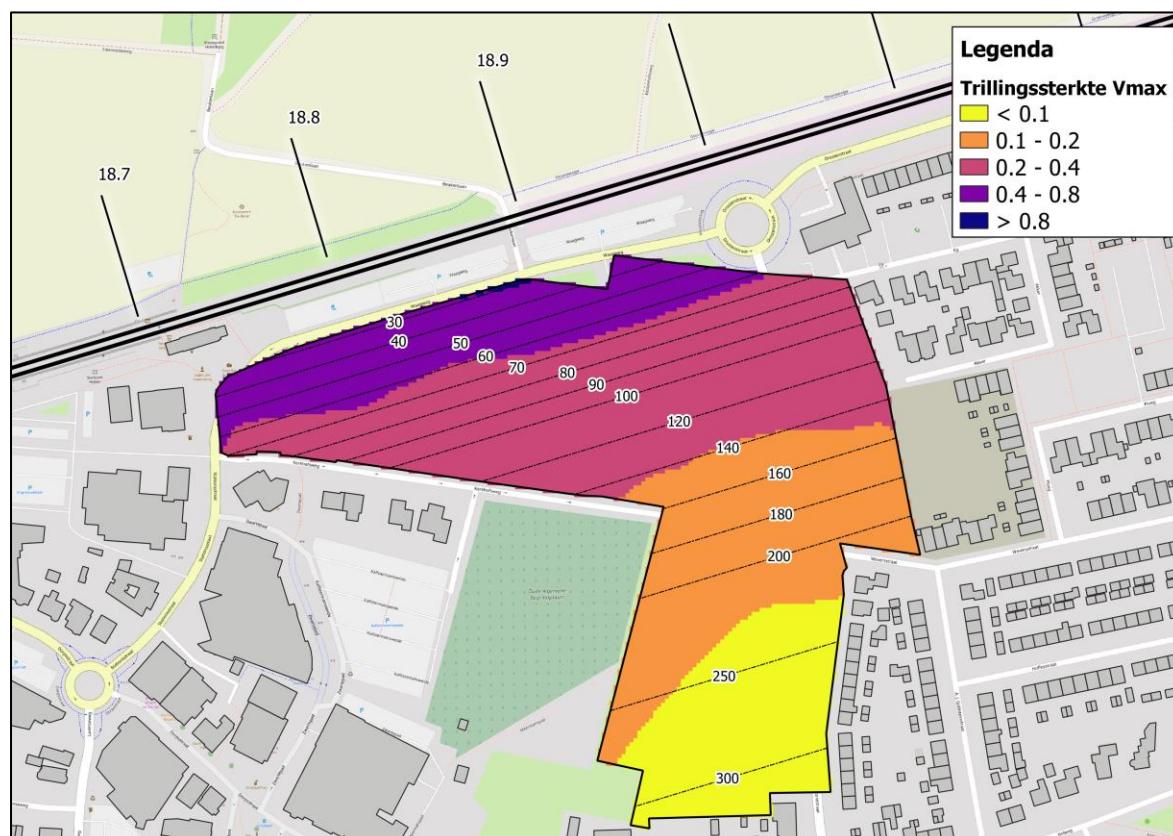


Figuur 26 Maximale gemiddelde trillingssterkte V_{per} voor vrijstaande woningen

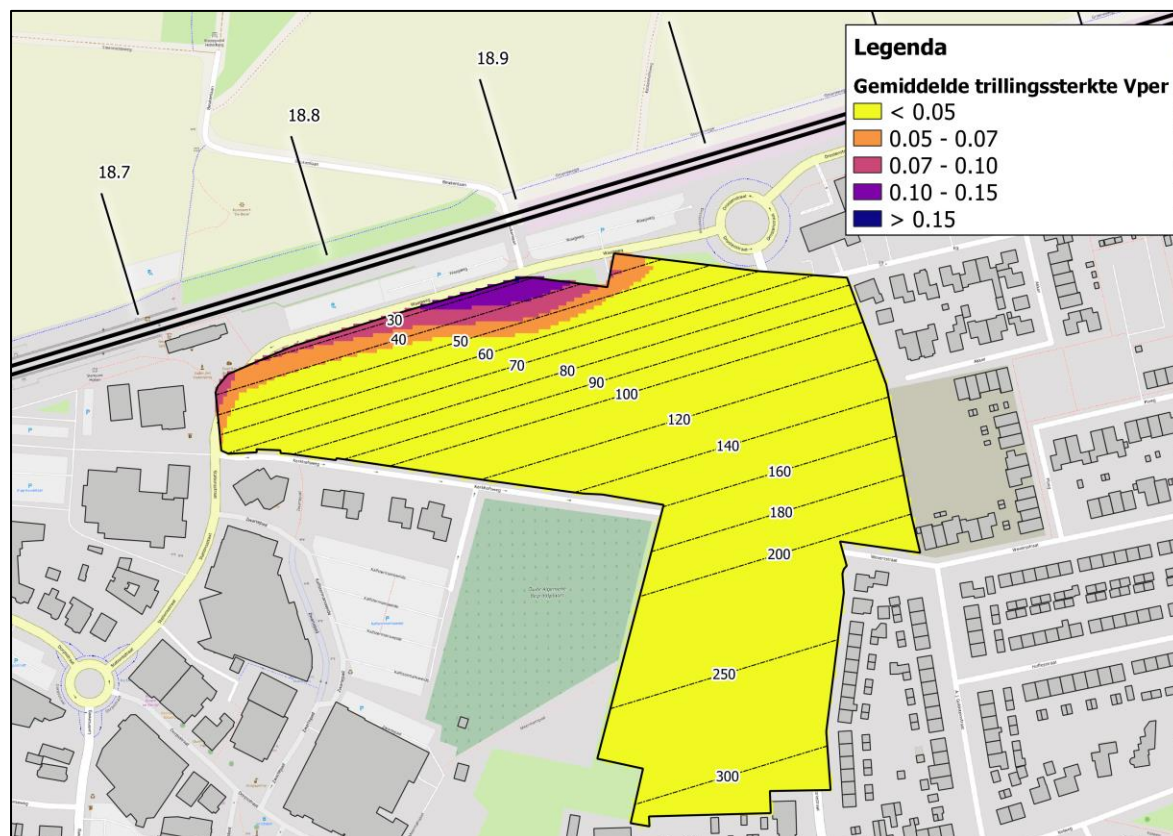


Figuur 27 Beoordeling van de trillingen aan de SBR B-richtlijn voor vrijstaande woningen

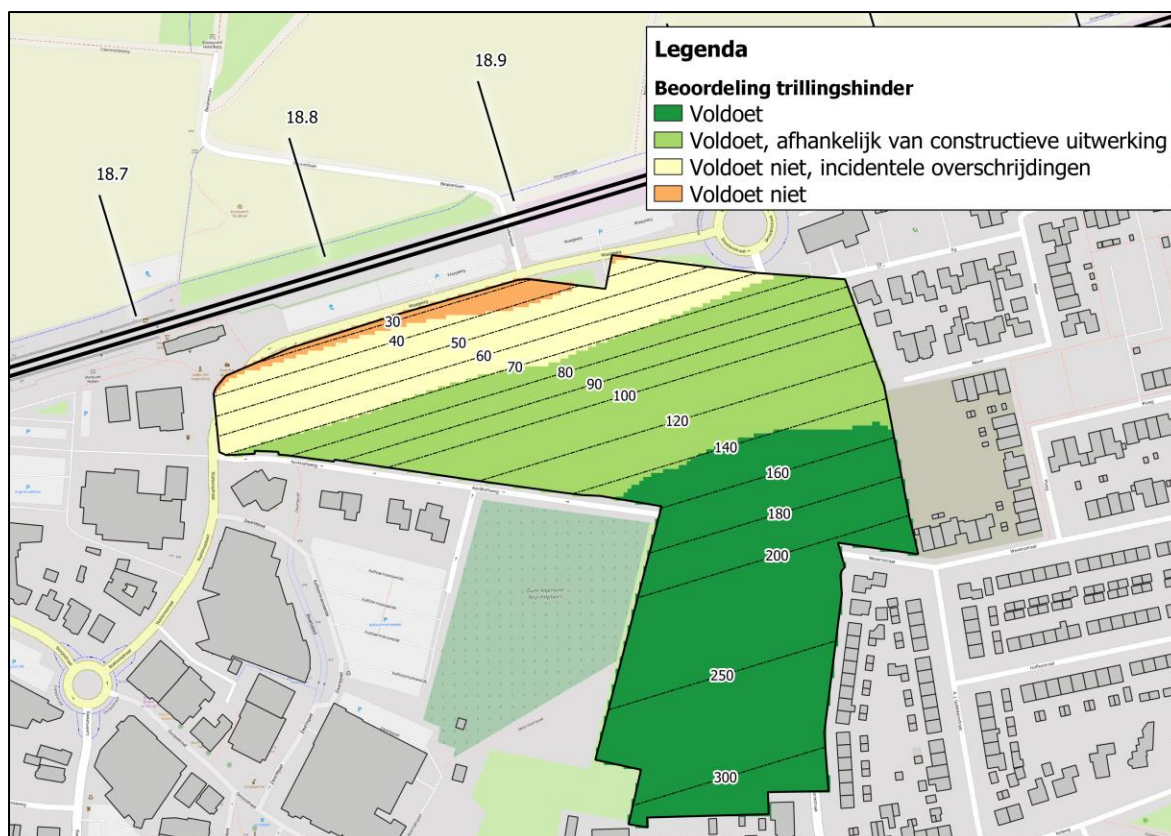
2-onder-1-kap woningen



Figuur 28 Maximale trillingssterkte V_{max} voor 2-onder-1-kap woningen

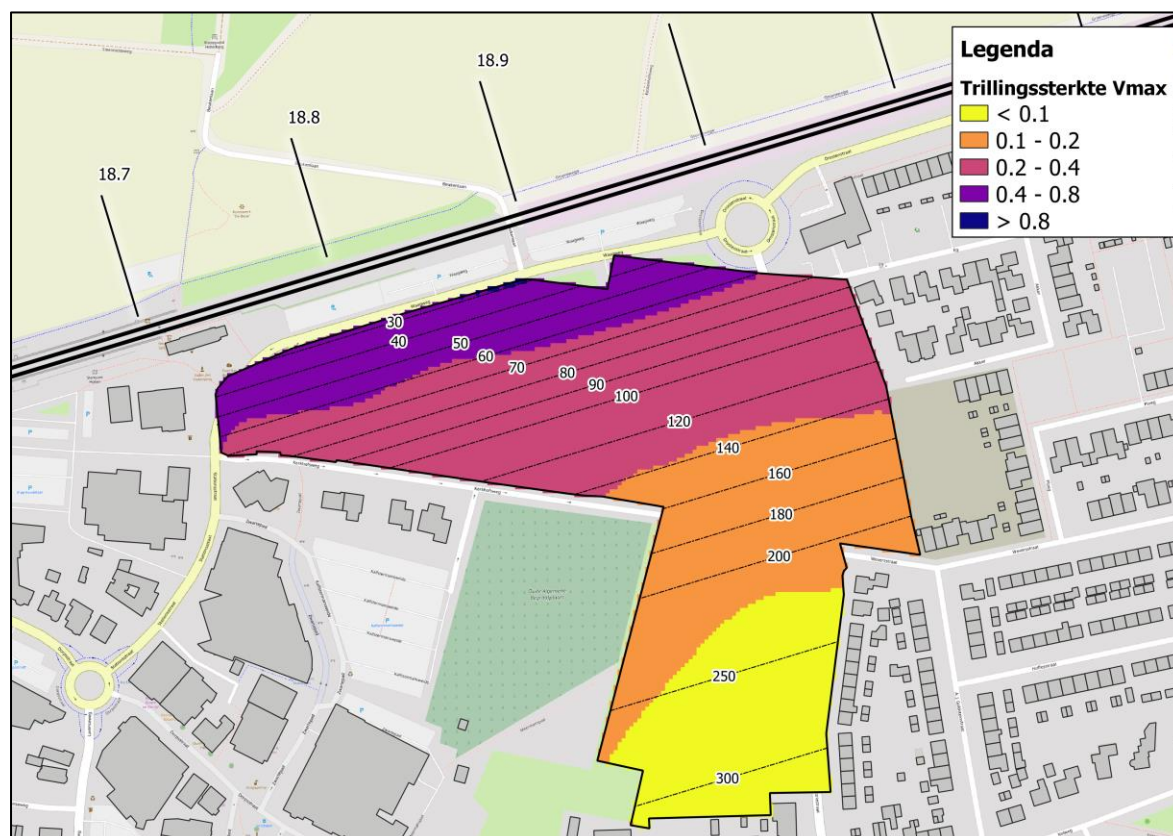


Figuur 29 Maximale gemiddelde trillingssterkte V_{per} voor 2-onder-1-kap woningen

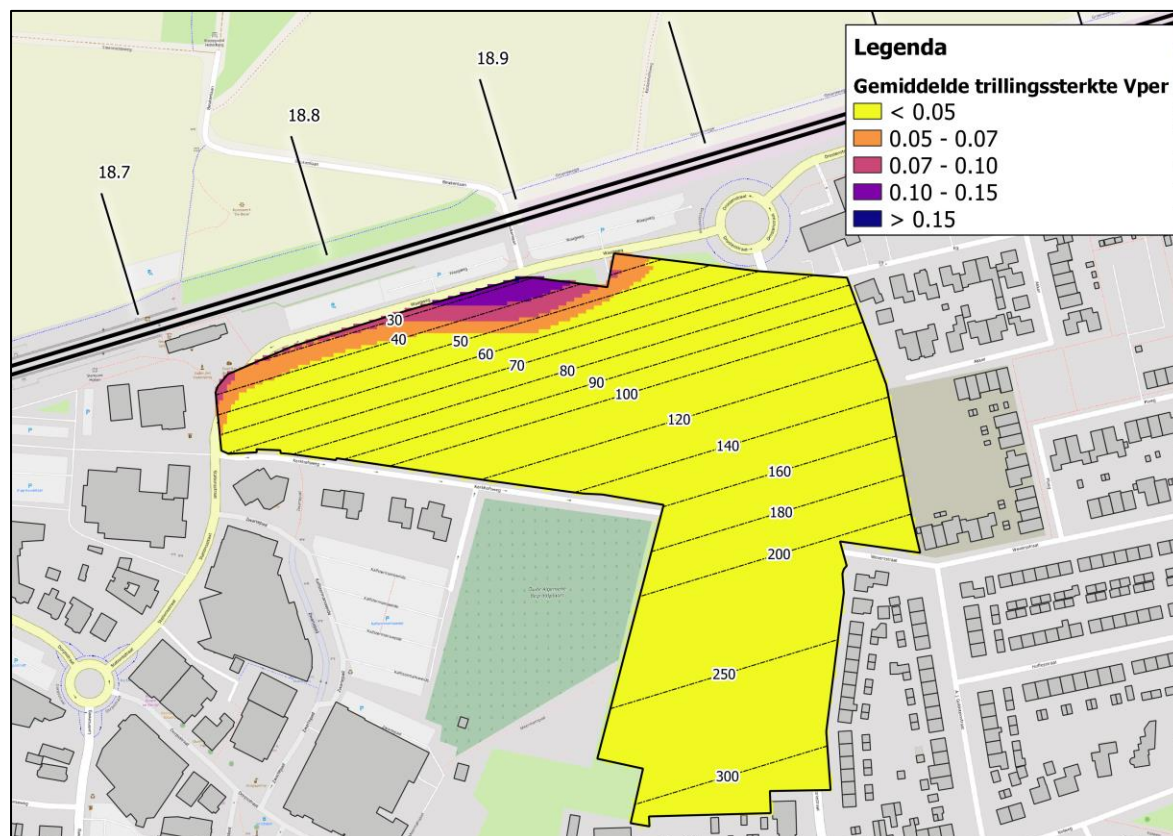


Figuur 30 Beoordeling van de trillingen aan de SBR B-richtlijn voor 2-onder-1-kap woningen

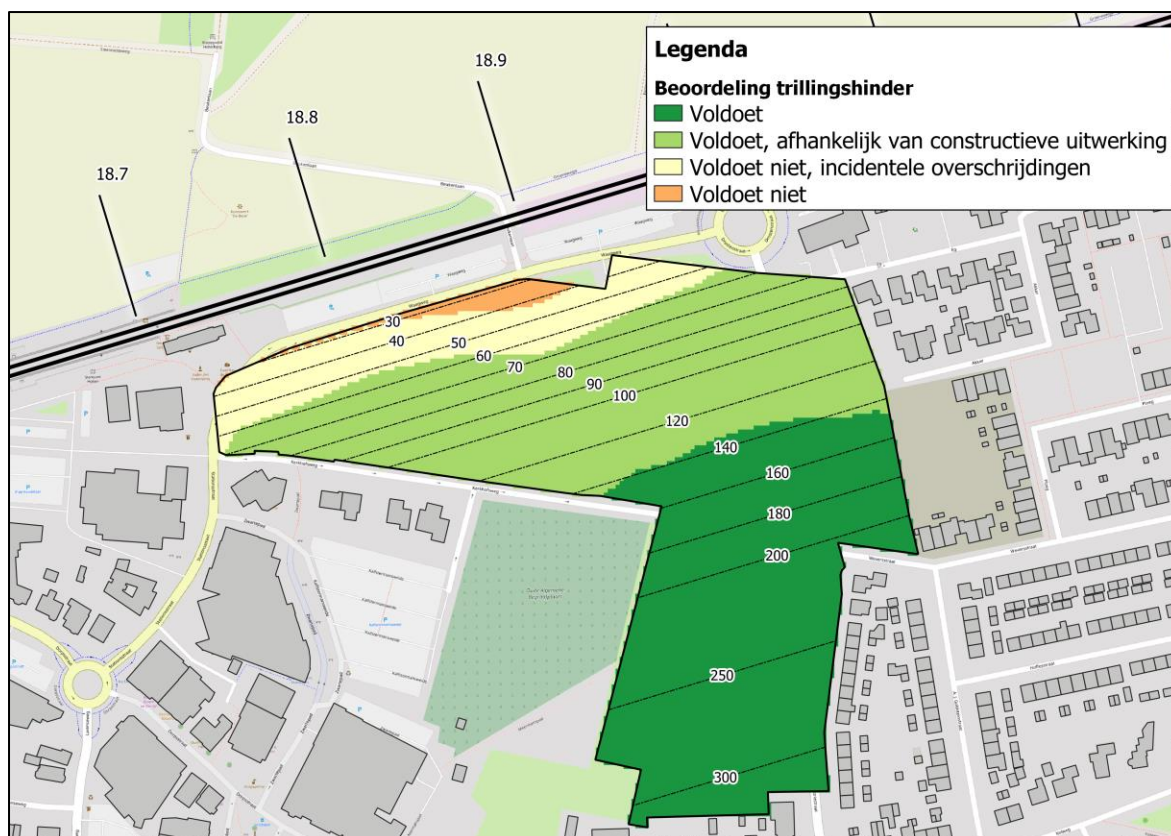
Rijwoningen



Figuur 31 Maximale trillingssterkte V_{max} voor rijwoningen

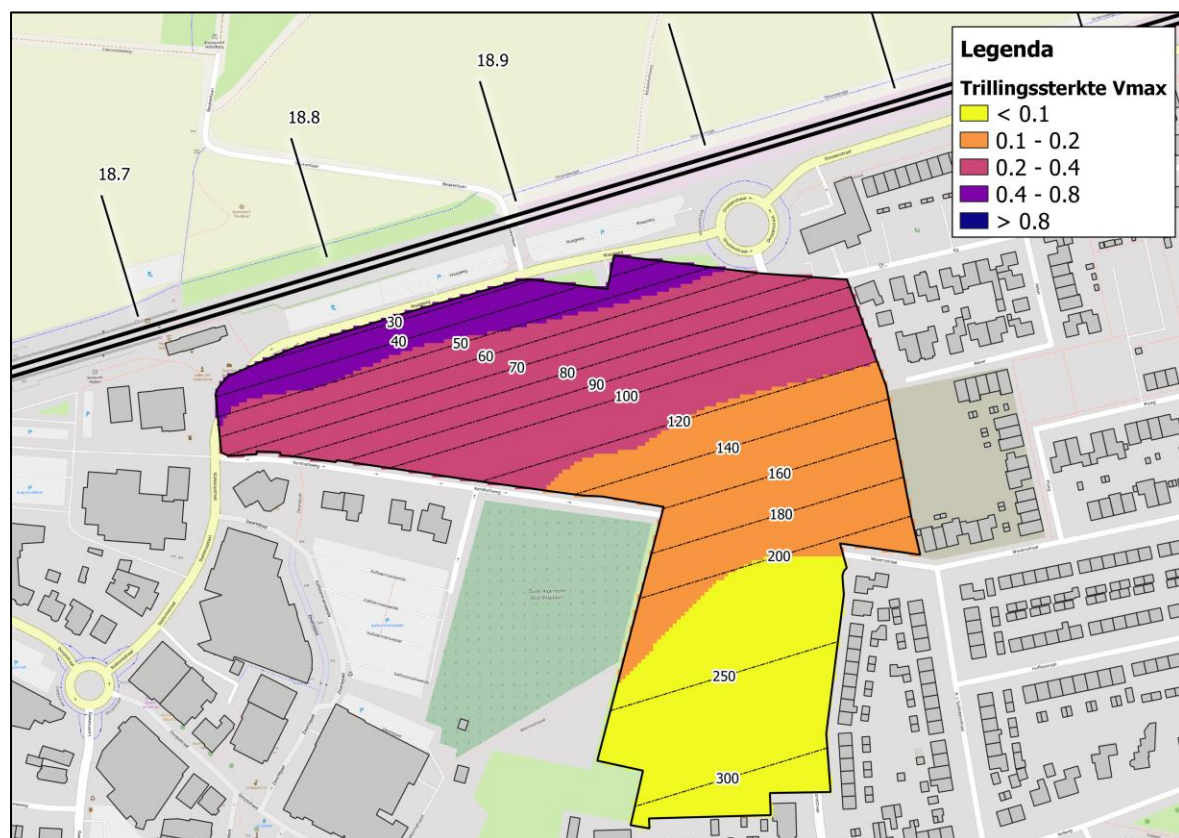


Figuur 32 Maximale gemiddelde trillingssterkte V_{per} voor rijwoningen

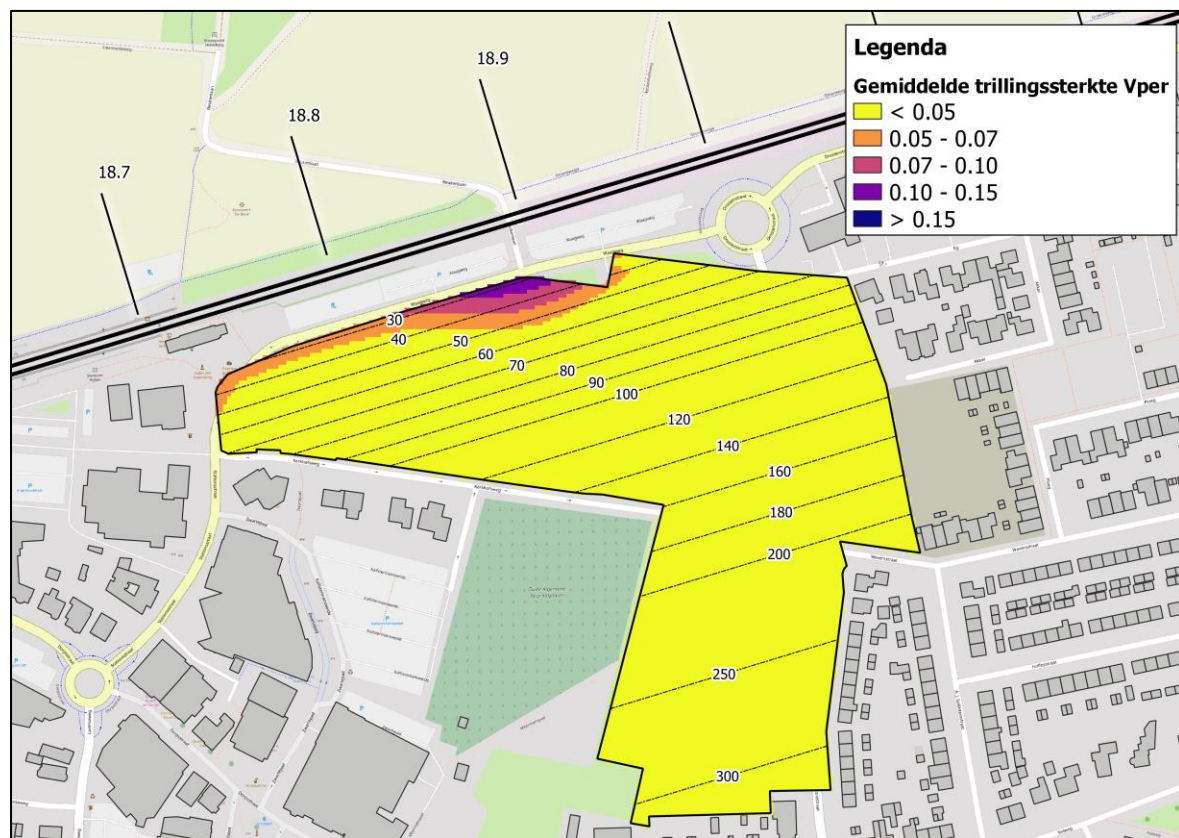


Figuur 33 Beoordeling van de trillingen aan de SBR B-richtlijn voor rijwoningen

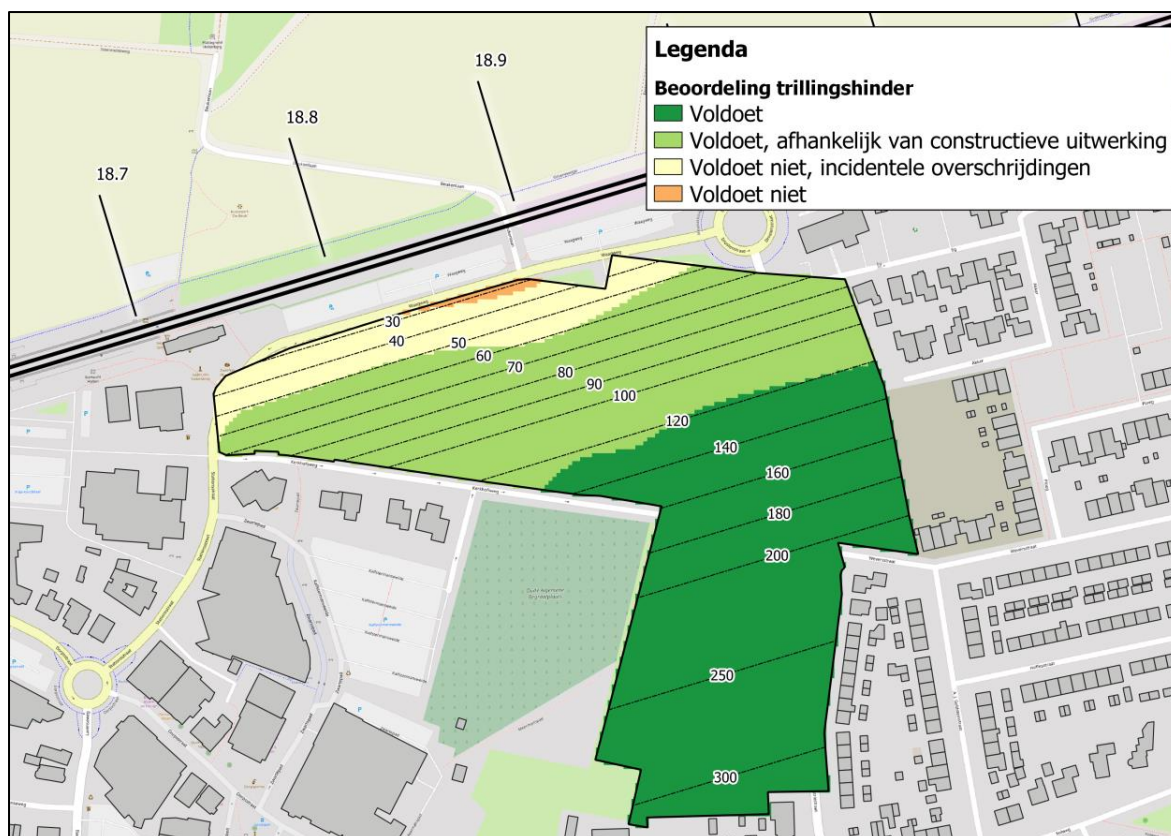
Appartementencomplexen



Figuur 34 Maximale trillingssterkte V_{max} voor appartementencomplexen



Figuur 35 Maximale gemiddelde trillingssterkte V_{per} voor appartementencomplexen

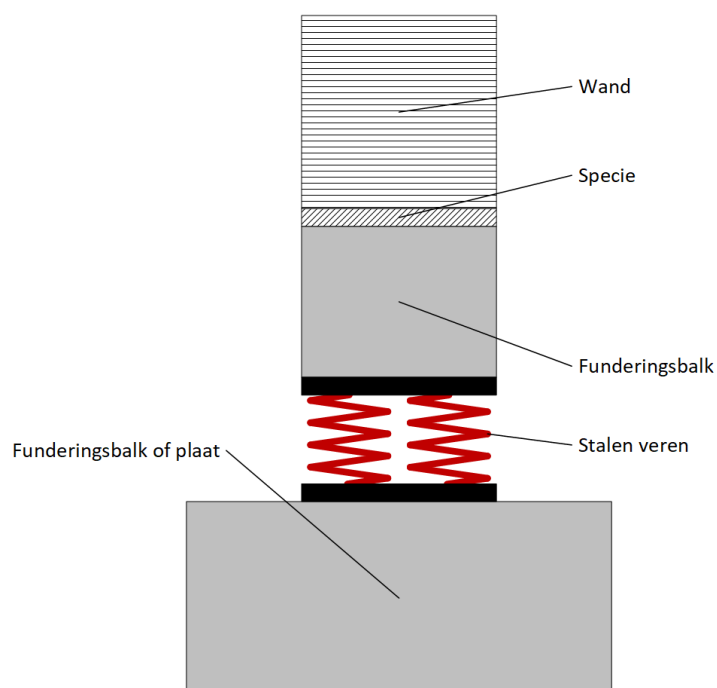


Figuur 36 Beoordeling van de trillingen aan de SBR B-richtlijn voor appartementencomplexen

V Principedetails maatregelen

Deze bijlage bevat achtergrondinformatie en principedetails van enkele besproken maatregelen.

Een principeschets van een afgeveerde fundering met stalen veerdozen is weergegeven in Figuur 37. Een foto van een concrete toepassing bij eengezinswoningen in Prinsenbeek is weergegeven in Figuur 38.

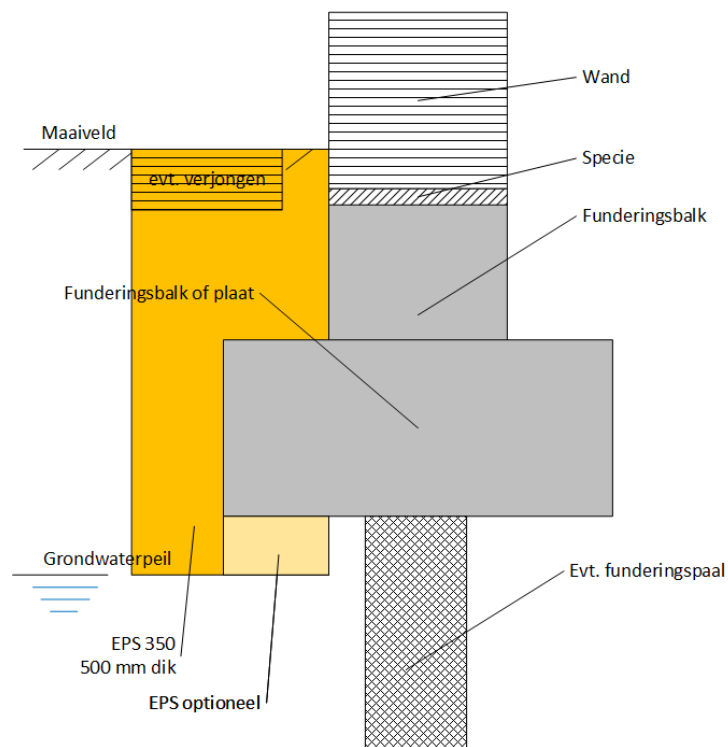


Figuur 37 Principeschets afgeveerde fundering (hier met stalen veerdozen)



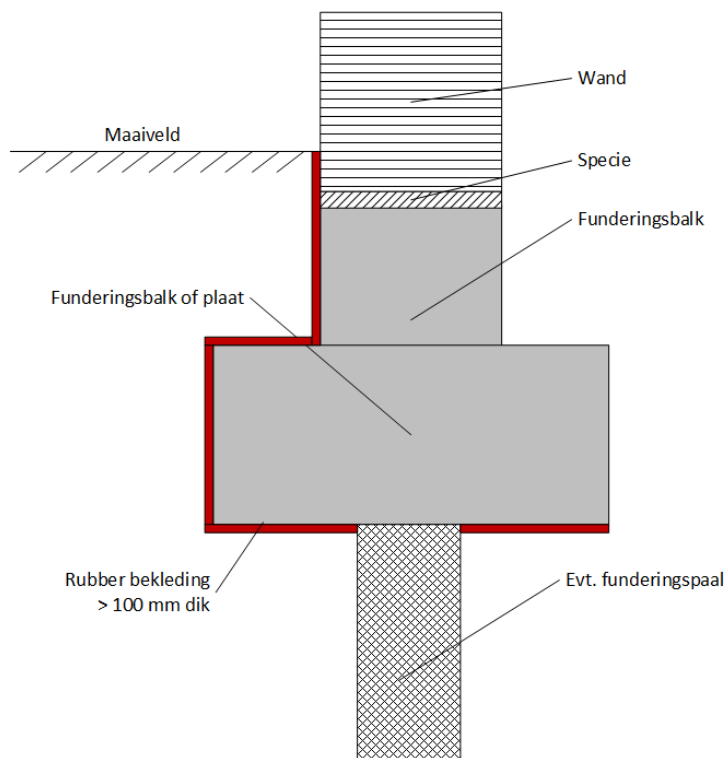
Figuur 38 Dubbele fundering met stalen veerdozen (project in Prinsenbeek)

Een prinsescheets van het bekleeden van de fundering met EPS (piepschuim) is weergegeven in Figuur 39. 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 prinsescheets is weergegeven in Figuur 39. 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.



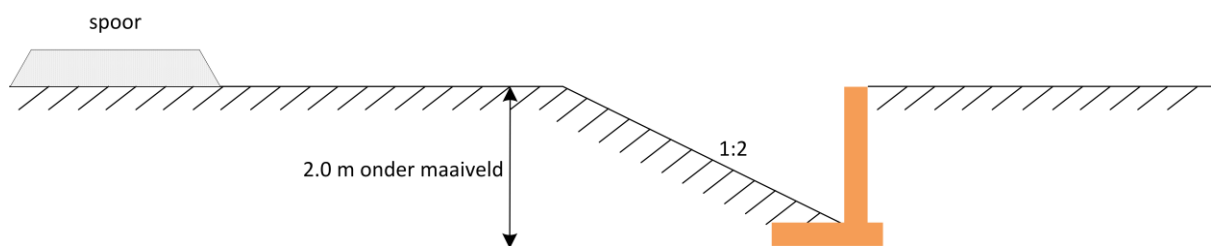
Figuur 39 Fundering met EPS-scherm ervoor

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

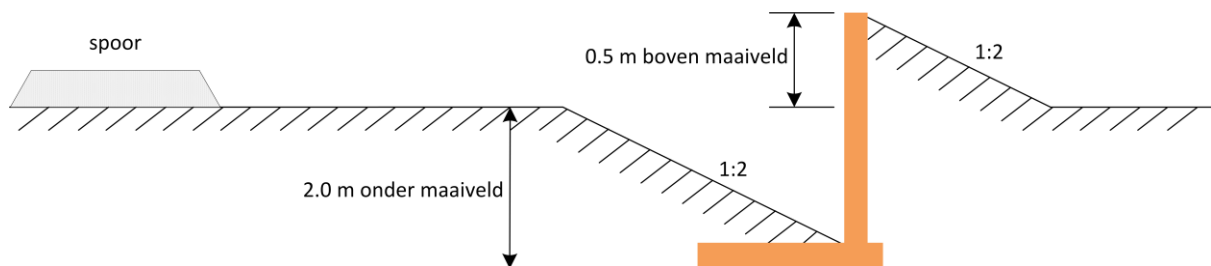


Figuur 40 Fundering bekleed met rubber

Principe-oplossingen voor het combineren van een sloot met een prefab L-wand zijn weergegeven in Figuur 41, en in Figuur 42 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 41 Sloot gecombineerd met prefab L-wand



Figuur 42 Geluidscherm gecombineerd met sloot en prefab L-wand