

WEBOOST



TRILLINGSONDERZOEK T.B.V. NIEUWBOUW

LOOWEG BATHMEN

COLOFON

Auteur	Marjolein Hordijk marjolein@we-boost.nl
Controle en vrijgave	Pieter Boon pieter@we-boost.nl +31 6 10 03 94 54
Projectcode	WBD2023-009
Versienr	1.0
Datum	8 mei 2023
Status	Definitief



Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van metingen van

ALCEDO 

© We-Boost 2023

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



DE KERN VAN DIT RAPPORT

Aan de Looweg in Bathmen worden nieuwe woningen gerealiseerd, in de vorm van vrijstaande woningen, 2-onder-1-kap woningen, een erfwoning (3 wooneenheden) en rug-aan-rug woningen. De geplande nieuwbouw ligt binnen 100 meter van de spoorlijn Deventer - Wierden. Daardoor kunnen trillingen van treinverkeer als hinderlijk worden ervaren.

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

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

CONCLUSIES

De belangrijkste conclusie van het onderzoek is dat er overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder (conform de SBR B-richtlijn, het beoordelingskader voor trillingshinder) worden verwacht. Die overschrijdingen worden veroorzaakt door goederentreinen, en zijn relatief hoog doordat de trillingen slecht uitdempen in de zandige bodem. Deze hoge trillingen zien we op meer locaties in deze omgeving terug.

In dit onderzoek zijn meerdere constructieve uitwerkingen onderzocht, en uit dat onderzoek blijkt dat de trillingen en het aantal overschrijdingen per dag sterk afhankelijk zijn van de gekozen constructieve eigenschappen.

ADVIES VOOR MAATREGELEN

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

1. Maatregelen aan de trillingsbron hebben zeer hoge kosten (meer dan € 2.9 mln. voor een effectieve maatregel). De kosten staan niet in verhouding tot de bouwsom van het project. Maatregelen aan de bron zijn daarom niet doelmatig.
2. Maatregelen in de bodem hebben nog hogere kosten en zijn onvoldoende effectief, en daarom evenmin doelmatig.
3. Met maatregelen aan de gebouwen zijn de trillingen te verminderen. We adviseren daarom om bij de verdere uitwerking van het plan onderstaande adviezen mee te nemen:

- A. **Vermijd lichte bouw**, zoals houtskeletbouw en staalconstructies. Deze zijn erg gevoelig voor trillingen.
- B. Kies indien mogelijk voor **breedplaatvloeren met een eigenfrequentie boven de 13 Hz**. De eigenfrequentie van de vloer kan worden verhoogd door de vloeren ingeklemd op te leggen, de vloeroverspanning te beperken (smallere beukmaat of extra dragende tussenwanden (evt. gedeelte van de woningen)), of door dikkere vloeren te gebruiken. Met deze maatregel zijn de trillingen met maximaal 45 procent te verminderen. Het aantal overschrijdingen neemt af van gemiddeld 4 naar 1 per dag. Met een slappe vloer (eigenfrequentie lager dan 6.5 Hz) zijn de trillingen van de treinen ook te verminderen, maar de vloeren zijn dan gevoeliger voor trillingen door lopen. In dit rapport is een tabel opgenomen met per vloeroverspanning een geadviseerd vloertype.
- C. Zorg voor een **zo zwaar mogelijke fundering**, liefst een 500 mm dikke betonnen plaatfundering of onderheide fundering (geboord paalsysteem, 7 meter paallengte en 450 mm paaldiameter). Door de zware fundering wordt het gebouw minder makkelijk in trilling gebracht, en nemen de trillingen met zo'n 10 tot 20 procent af. Het aantal overschrijdingen neemt af van gemiddeld 4 naar gemiddeld 2,5 per dag, en in combinatie met een zwaardere vloer (maatregel 2) naar minder dan 1 per dag.

Volledig voldoen aan de streefwaarden voor trillingshinder is alleen mogelijk met een afgeveerde fundering (dubbele fundering met daartussen stalen veerdozen, afgeveerd op maximaal 4 Hz). Deze oplossing zorgt voor een hoog comfortniveau, maar brengt hoge kosten met zich mee (tussen de € 15.000 en € 30.000).

Gelet op de trillingsniveaus is het verstandig om tijdens het ontwerpproces, zodra meer duidelijk is over de geplande woningen, de trillingsniveaus in de woningen nogmaals te toetsen, en eventueel aanvullende optimalisaties af te wegen. Voor de vrije kavels is het verstandig om een soort kavelpaspoort mee te geven, waarin bovenstaande adviezen zijn opgenomen.

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



INHOUDSOPGAVE

I.	INLEIDING	8
1.1.	Aanleiding	8
1.2.	Doel	8
1.3.	Leeswijzer	8
2.	SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN	11
2.1.	Situatie	11
2.2.	Uitgangspunten	12
3.	BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE	15
3.1.	Trillingen en wetgeving	15
3.2.	Beoordelingskader trillingshinder	15
3.3.	Rekenmethode	16
4.	VERWACHTE TRILLINGEN	20
4.1.	Meetresultaten	20
4.2.	Trillingen in geplande gebouwen	20
5.	MITIGERENDE MAATREGELEN	23
5.1.	Nut en noodzaak van maatregelen	23
5.2.	Analyse resultaten	23
5.3.	Maatregelen aan de trillingsbron	24
5.4.	Maatregelen in de bodem	24
5.5.	Optimalisaties van de gebouwen	26
5.6.	Afweging van maatregelen	27
5.7.	Onzekerheden in het onderzoek	28
II.	GRONDONDERZOEK	30
III.	REKENMODEL	32



III. RESULTATEN METINGEN

36

IV. DETAILS MAATREGELEN

38

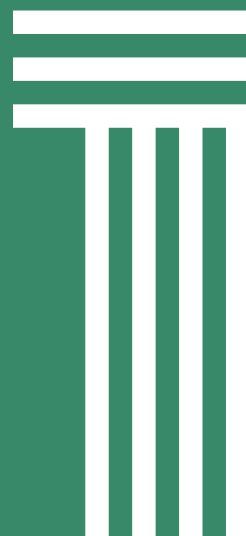




INLEIDING



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



INLEIDING

1.1. AANLEIDING

Aan de Looweg in Bathmen worden nieuwe woningen gerealiseerd, in de vorm van vrijstaande woningen, 2-onder-1-kap woningen, een erfwooning (3 wooneenheden) en rug-aan-rug woningen. De geplande nieuwbouw ligt binnen 100 meter van de spoorlijn Deventer - Wierden, zie Figuur 1. Daardoor kunnen trillingen van treinverkeer als hinderlijk worden ervaren.



Figuur 1 Plangebied

1.2. DOEL

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

1.3. LEESWIJZER

Wij beschrijven de situatie in het onderzoeksgebied en de uitgangspunten in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 lichten we het beoordelingskader en de gevolgde rekenmethodiek toe. Met behulp van de uitgangspunten berekenen we de trillingen in de woningen op basis van de gemeten trillingen en de eigenschappen van de gebouwen. Het resultaat van deze stap wordt in hoofdstuk

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

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





SITUATIEBESCHRIJVING



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



2. SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN

2.1. SITUATIE

Het plangebied is momenteel een agrarisch terrein, in het verlengde van de lintbebouwing aan de Looweg in Bathmen. Op het terrein worden vijf vrije kavels (voor drie vrijstaande woningen en twee twee-onder-een-kapwoningen), acht rug-aan-rugwoningen en drie erfwoningen gerealiseerd. De bestaande en geplande bebouwing is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Toekomstige bebouwing op de planlocatie

De bebouwing is gepland in een zone van ca. 75 tot 110 meter van het spoor. De rijsnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. De gegevens in Tabel 1 zijn gebaseerd op het Geluidsregister Spoor en gegevens van de vervoerders. Volgens de Integrale Mobiliteitsanalyse Spoor (IMA-2021) wordt er een toename van het aantal goederentreinen voorzien van de huidige ca. 25 naar 30 tot 44 goederentreinen per dag. Er wordt geen verandering in het aantal reizigerstreinen voorzien.

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

Type trein	Rijsnelheid	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Sprinter	130 km/h	2.00	2.00	0.50
Intercity	130 km/h	2.42	2.25	0.75
Goederentrein	90 km/h	0.32	0.34	0.32

Andere trillingsbronnen, zoals wegverkeer, zullen, gezien de afstand tot de bebouwing, de vlakke wegoopbouw (asfalt) en het beperkte verkeer naar verwachting maar beperkt voor voelbare trillingen zorgen in de geplande bebouwing. In de metingen wordt dit verkeer ook meegenomen.

2.2. UITGANGSPUNTEN

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

2.2.1. GEGEVENS BEBOUWING

Voor het uitvoeren van de berekeningen is gerekend met het stedenbouwkundig plan van 10 november 2022. Omdat er nog geen uitgewerkt constructief ontwerp beschikbaar is, zijn in dit onderzoek een aantal varianten doorerekend, zie Tabel 2. Daar zijn de belangrijkste eigenschappen van de bebouwing weergegeven. Het rekenmodel voor de bebouwing is hierop gebaseerd.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Meerdere varianten beschouwd: • Kanaalplaatvloer 200, 260 en 320 mm, 60 mm zandcement dekvloer • Breedplaatvloer 200, 250 en 280 mm, 60 mm zandcement dekvloer • Houten balkenvloer
Hoogte	Varieert, tussen de 6.0 en 9.0 meter
Lengte vloerveld	Varieert, tussen de 5.4 en 8.0 meter
Constructietype	Meerdere varianten beschouwd: • Kalkzandsteen en metselwerk • Prefab beton en metselwerk • Houtskeletbouw
Fundering	Meerdere varianten beschouwd: • Op staal • Paalfundering, geboord paalsysteem met paallengte van max. 7.5 meter

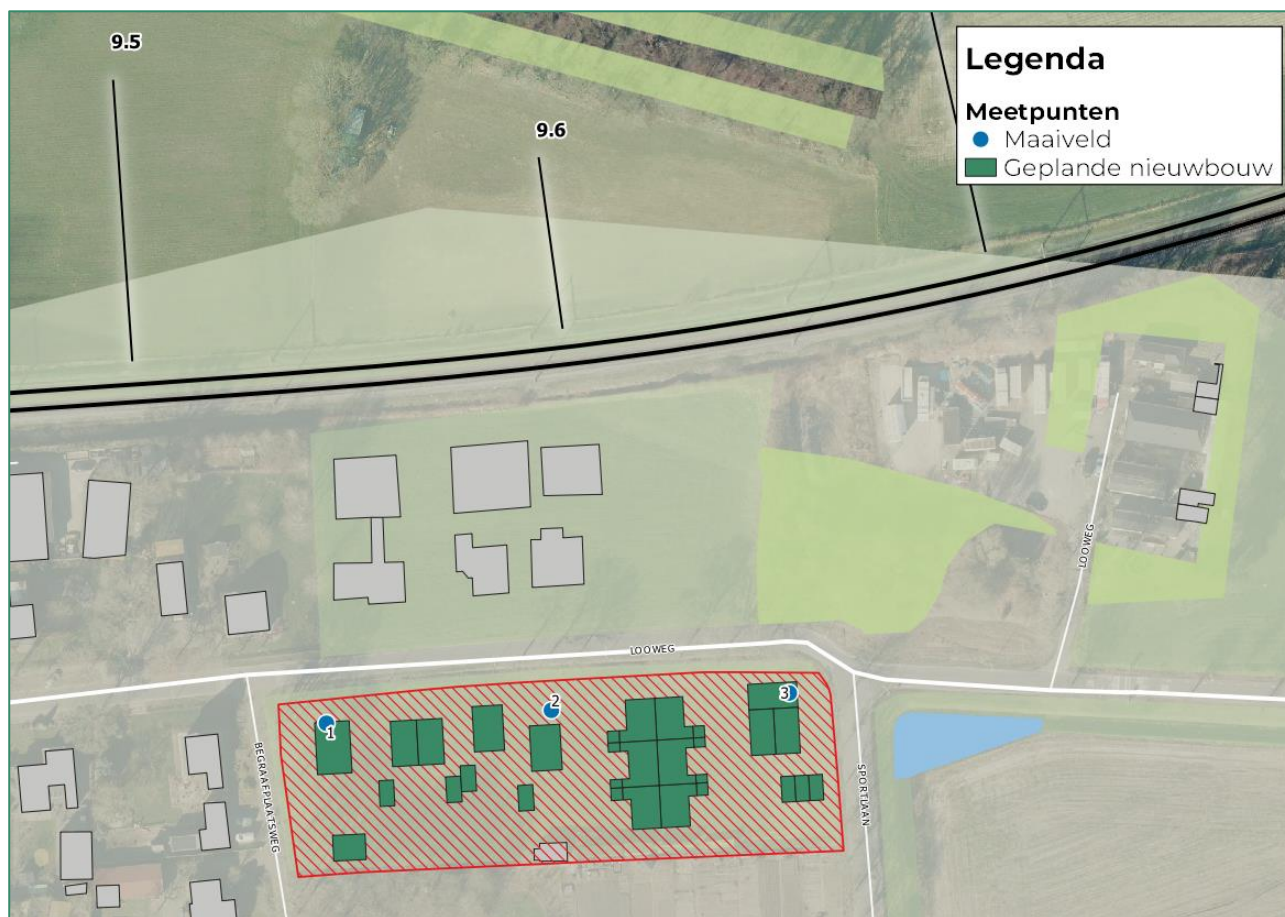
2.2.2. GEGEVENS ONDERGROND

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

2.2.3. MEETRESULTATEN

Zoals te zien in Figuur 3 zijn door Alcedo op drie locaties metingen uitgevoerd. Het gaat hierbij om drie meetpunten op maaiveld. De metingen zijn uitgevoerd van 19 tot 26 april 2023. Er waren geen afwijkingen in het treinverkeer in deze periode. Daarnaast is gebruik gemaakt van meetpunten die zijn gebruikt voor de metingen aan de overzijde van de Looweg, hier zijn eerder in 2023 ook metingen verricht.

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



Figuur 3 Meetpunten

¹ Zie een uitgebreide toelichting van de specificaties op <https://www.frog.watch/facts/>. Er wordt uitsluitend gebruik gemaakt van sensoren die voldoen aan de kalibratie-eisen uit de SBR B-richtlijn.



BEOORDELINGSKADER



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



BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE

3.1. TRILLINGEN EN WETGEVING

Er bestaat in Nederland geen wettelijk kader voor de beoordeling van trillingshinder in gebouwen. Wel geldt dat in het kader van een goede ruimtelijke ordening o.b.v. de Wet Ruimtelijke Ordening (Wro) kan worden verzocht om trillingen mee te nemen bij de wijziging van bestemmingsplannen waar trillingen een rol kunnen spelen.

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

3.2. BEOORDELINGSKADER TRILLINGSHINDER

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

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

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

1. De richtlijn toetst zowel een maximaal optredende trillingssterkte (V_{max} , treedt op bij de trein die gedurende de meetperiode de hoogste trillingen veroorzaakt) als het tijdsgemiddelde van de trillingen (V_{per} , deze grootheid is in tegenstelling tot V_{max} dus ook afhankelijk van het aantal treinen).
2. De richtlijn maakt in de beoordeling onderscheid tussen verschillende situaties, en toetst daarbij strenger in:
 - a. Nieuwbouwsituaties (nieuwe gebouwen, nieuw spoor, aanleg van wissels). Bij bestaande situaties zijn de streefwaarden minder streng, er wordt dan uitgegaan van

² Voor spoorprojecten wordt door ProRail sinds 2012 ook wel gebruik gemaakt van de Bts, deze is afgeleid van de SBR-richtlijn en op aspecten aangescherpt (waaronder een doelmatigheidsafweging en een andere manier om de trillingen vast te stellen). Deze richtlijn wordt echter doorgaans niet gebruikt om de trillingen in nieuw te bouwen woningen langs het spoor te beoordelen.

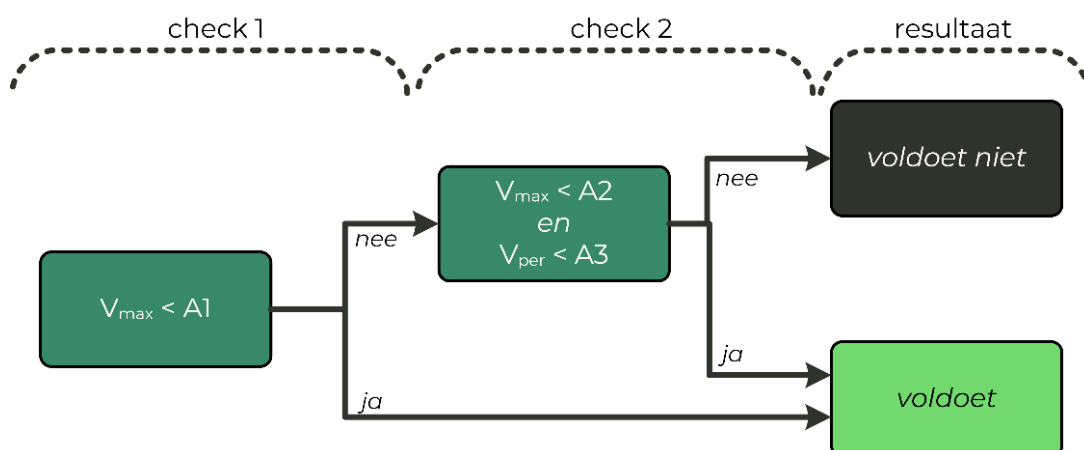
een zekere mate van gewenning en er zijn minder mogelijkheden om de trillingen te reduceren.

- b. Gebouwen met een overnachtingsfunctie (woningen, ziekenhuizen). De meeste hinder wordt vaak in rust ervaren. Bij gebouwen met een niet-overnachtingsfunctie (kantoren, scholen) gelden minder strenge streefwaarden. Winkels, sport- en industriepanden vallen buiten de richtlijn. In dit plan gaat het om gebouwen met een woonfunctie.
- c. De nacht, omdat de meeste hinder vaak in rust wordt ervaren. De streefwaarden voor overdag zijn ca. een factor 2 minder streng dan 's nachts.

Een gebouw kan op twee manieren voldoen aan de richtlijn: de trillingssterkte V_{max} moet lager zijn dan de onderste streefwaarde A1 (zie Tabel 3), óf V_{max} moet lager zijn dan de bovenste streefwaarde A2, waarbij tegelijkertijd de trillingsintensiteit V_{per} lager is dan de streefwaarde A3. Zie ook het schema in Figuur 4.

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

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



Figuur 4 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

3.3. REKENMETHODE

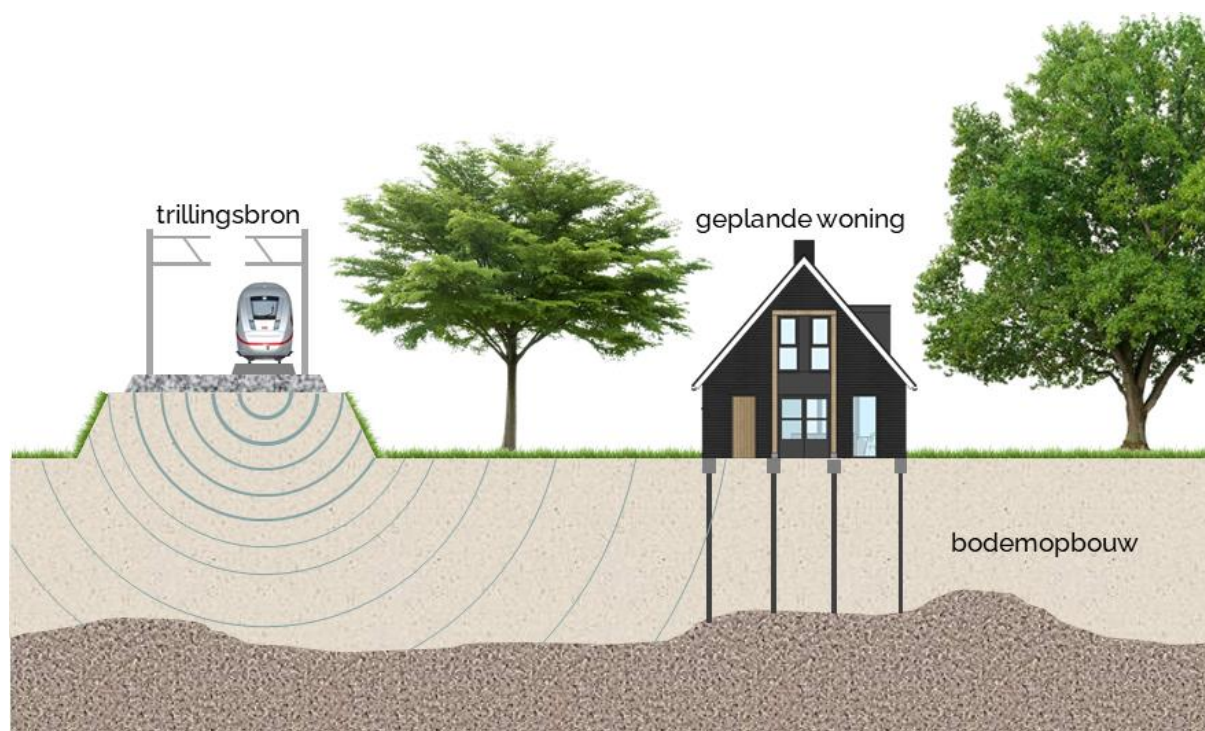
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde bebouwing, wordt op basis van metingen in de omgeving van de bebouwing (op maaiveld) een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande nieuwe bebouwing. Deze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

3.3.1. TRILLINGEN – VAN TRILLINGSBRON NAAR GEBOUW

Trillingen ontstaan doordat een bewegend object (een trein, tram of vrachtwagen bijvoorbeeld) over een niet-efen ondergrond rijdt. Door de massa en beweging van het voertuig, variaties in de

ondergrond (die per definitie niet perfect vlak is) en variaties in de rondheid van de wielen van het voertuig ontstaan spanningen in de bodem die zich door de bodem verplaatsen. Afhankelijk van de opbouw van de bodem en de aanwezigheid van obstakels (zoals sloten en damwanden) verplaatsen de trillingen zich diep of juist ondiep door de bodem. Gebouwen worden daardoor in trilling gebracht. Afhankelijk van hoe het gebouw is geconstrueerd, worden bepaalde trillingen meer of minder versterkt in het gebouw. Deze trillingen kunnen als hinderlijk worden ervaren door personen in gebouwen. Dit hele systeem van trillingsbron (hier de trein), overdrachtsmedium (de bodem, waardoor de trillingen zich verplaatsen) en ontvanger (het gebouw met daarin de personen die de hinder ervaren) is schematisch weergegeven in Figuur 5.

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



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

3.3.2. DE TRILLINGSBRON

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

3.3.3. DE BODEM

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

3.3.4. HET GEBOUW

De trillingen gaan via de fundering een gebouw binnen. Afhankelijk van het type fundering, de bodem, de massa en afmetingen van het gebouw zal de fundering de trillingen meer of minder uitdempen. Vervolgens worden de trillingen in het gebouw weer versterkt door bewegingen van het gebouw en de vloeren. Het gebouwgedrag is in dit onderzoek bepaald op basis van de bodemopbouw, de constructieve eigenschappen en de gebruikte materialen van de gebouwen.

Hiervoor maken we gebruik van het rekenmodel Buildyn, een zogenaamd beam-element model (BEM) waarin het gebouw gemodelleerd en doorgerekend wordt. De resultaten van het model zijn geijkt met praktijkresultaten uit metingen. Een toelichting op het rekenmodel Buildyn is gegeven in bijlage II.





VERWACHTE TRILLINGEN



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

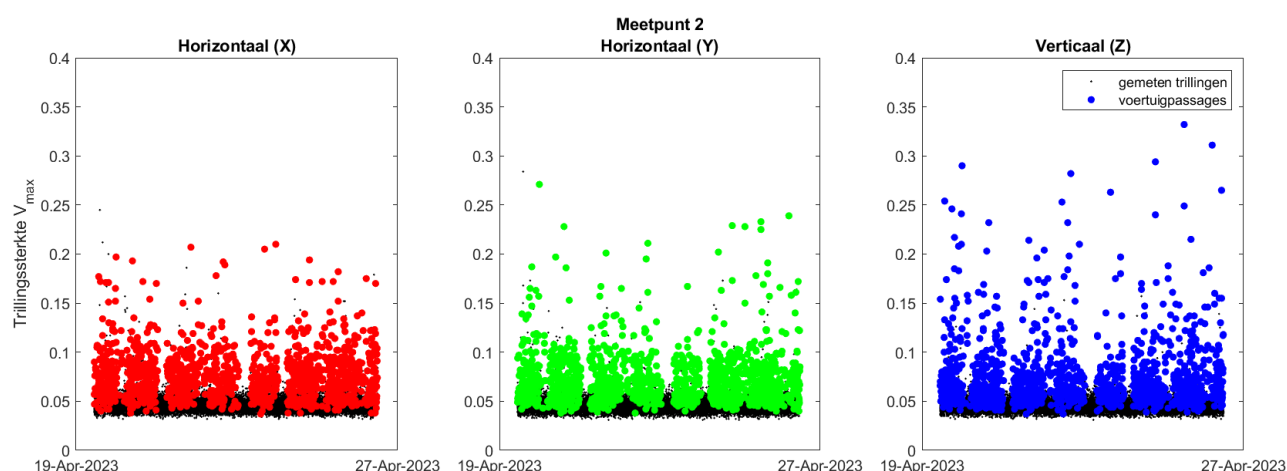


VERWACHTE TRILLINGEN

4.1. MEETRESULTATEN

Alcedo heeft metingen uitgevoerd op maaiveld. De trillingen op het meetpunt in het midden van het plangebied zijn weergegeven in Figuur 6, voor de andere meetpunten zijn deze en andere figuren van de metingen opgenomen in bijlage III. In Figuur 6 valt op dat de trillingen maatgevend zijn in verticale Z-richting, maar ook in de andere meetrichtingen zijn relatief hoge trillingen gemeten. De hoogste trillingen worden veroorzaakt door goederentreinen, incidenteel veroorzaakt zwaar landbouw- en vrachtverkeer ook hoge trillingen, maar deze trillingen worden door de fundering van de gebouwen sterker uitgedempt dan de trillingen van de treinen.

De trillingen van reizigerstreinen zijn veel lager dan de trillingen van goederentreinen.



Figuur 6 Gemeten trillingen op maaiveld, meetpunt 2

4.2. TRILLINGEN IN GEPLANDE GEBOUWEN

De bebouwing is gemodelleerd op basis van de input uit hoofdstuk 2. Het trillingsgedrag van de geplande gebouwen is weergegeven in Bijlage II. Met de modelresultaten zijn de trillingen in de toekomstige woningen bepaald. De resultaten hebben we weergegeven in Tabel 4, samen met een beoordeling van de trillingen. **Oranje** arcering geeft aan dat er sprake is van een overschrijding van de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn, **gele** arcering geeft aan dat een overschrijding afhankelijk is van de constructieve uitwerking.

Tabel 4 Trillingen per gebouwtype en beoordeling op SBR B-richtlijn

Gebouwtype	V _{max} , dag	V _{max} , nacht	V _{per}	Beoordeling
Vrijstaande woningen	0.4 - 0.8	0.5 - 0.8	0.02 - 0.04	Voldoet niet, 1 tot 8 overschrijdingen per dag
Twee-onder-een-kap woningen	0.5 - 0.8	0.5 - 0.9	0.02 - 0.04	Voldoet niet, 3 tot 9 overschrijdingen per dag
Rug-aan-rugwoningen	0.4 - 0.8	0.5 - 0.8	0.02 - 0.04	Voldoet niet, 1 tot 7 overschrijdingen per dag
Erfwoningen	0.5 - 0.8	0.5 - 0.9	0.02 - 0.04	Voldoet niet, 3 tot 9 overschrijdingen per dag

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



- Er zijn overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder in de geplande bebouwing. Dat komt vooral doordat al op maaiveld hoge trillingssterktes zijn gemeten, iets wat we vaker terugzien in de omgeving van Bathmen. De zware goederentreinen in combinatie met de stijve bodem (waarin de trillingen slecht uitdempen) zorgen voor relatief hoge trillingsniveaus in de woningen.
- Uit de variantenstudie blijkt het volgende:
 - ✿ De trillingen zijn lager bij een zwaardere constructie (dikkere vloeren of wanden) en bij een stijvere constructie (betonnen casco zorgt voor lagere trillingen dan kalkzandsteen casco). Dit soort constructies wordt minder makkelijk in trilling gebracht. Houtskeletbouw is extra gevoelig voor trillingen.
 - ✿ De trillingen zijn lager bij een breedplaatvloer dan bij een kanaalplaatvloer.
 - ✿ De trillingen zijn lager bij een fundering op palen dan bij een fundering op staal. Generiek geldt dat hoe zwaarder de fundering, hoe lager de trillingen in de woningen.
- De hoogste trillingen worden veroorzaakt door goederentreinen, de trillingen van reizigerstreinen voldoen wel aan het beoordelingskader.

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





MAATREGELEN



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

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



MITIGERENDE MAATREGELEN

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

5.1. NUT EN NOODZAAK VAN MAATREGELEN

Voor de afweging van maatregelen geeft bijlage 5 van de SBR B-richtlijn handvatten. Deze bijlage classificeert de trillingen in de woningen als *matige hinder*, in de twee-onder-een-kapwoningen kan, bij een ongunstige constructieve uitwerking, ook sprake zijn van *hinder*. Vervolgens geeft deze bijlage aan dat (matige) hinder kan worden geaccepteerd onder een aantal voorwaarden:

1. De mate waarin de trillingssterkte voorkomt. Hiervoor geldt dat de gemiddelde trillingssterkte V_{per} een goede indicatie is. Die voldoet in de woningen ruim aan de streefwaarden. Afhankelijk van de constructieve uitwerking is sprake van een beperkt aantal overschrijdingen per dag (enkele treinen) tot meerdere overschrijdingen per dag.
2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. Wegverkeer zorgt niet voor noemenswaardige trillingen in de geplande bebouwing, hoewel zwaar landbouw- en vrachtverkeer incidenteel wel voor voelbare trillingen kan zorgen. Van een maskerend effect is daarmee niet echt sprake.
3. De mogelijkheid tot het treffen van reducerende maatregelen. Het is conform bestaande jurisprudentie gebruikelijk om hierbij een afweging te maken tussen de kosten en het effect van de maatregelen, maar ook aspecten als duurzaamheid en impact op de omgeving kunnen worden meegenomen in deze afweging.

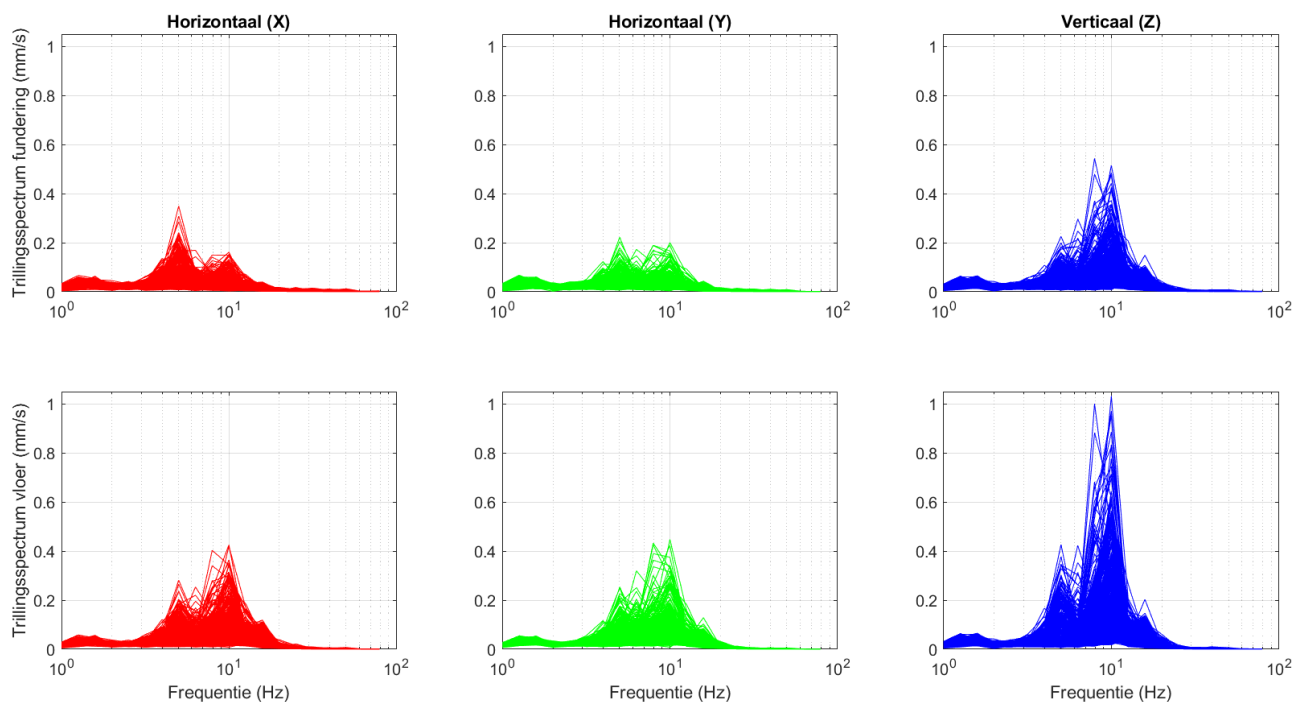
Gelet op bovenstaande dienen we conform de SBR B-richtlijn dus maatregelen af te wegen op doelmatigheid. Om de effectiviteit van maatregelen te toetsen, stellen we eerst vast bij welke trillingsfrequenties vooral hoge trillingen optreden. Daarna gaan we in op maatregelen die mogelijk zijn aan de trillingsbron (de trein of het spoor), maatregelen in de bodem en maatregelen aan de gebouwen. Daarbij bespreken we ook bouwkundige optimalisaties.

5.2. ANALYSE RESULTATEN

Om te bepalen welke trillingsrichting en trillingsfrequenties maatgevend zijn, is een analyse uitgevoerd van de verwachte trillingen, zie Figuur 7 voor een van de woningen (meest westelijke vrijstaande woning) voor een van de onderzochte constructieve varianten. In deze figuur is de trillingssnelheid per treinpassage weergegeven als tertsbandspectrum op de fundering en op de vloer. Voor de overige woningen geldt iets vergelijkbaars, hoewel de trillingen op de vloer natuurlijk wel verschillen tussen de constructieve uitwerkingen, en van woning tot woning. Uit deze figuur kan worden afgeleid bij welke frequentie en in welke trillingsrichting de trillingen het hoogst zijn. Uit Figuur 7 volgt dat de hoogste trillingen optreden in de verticale richting. Dit komt met name door opslingering van de trillingen door de vloeren. De trillingen zijn in dit geval vooral hoog rond de 10 Hz, door een combinatie van het inveren van het gebouw op zichzelf en de eigenfrequentie van de vloeren. Bij andere constructieve uitwerkingsvarianten zien we dat de trillingen hoog zijn tussen de 6 en 12,5 Hz. Maatregelen moeten vooral effectief zijn tegen trillingen bij die frequenties, omdat daar de meeste trillingsenergie zit.

Om te voldoen aan de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn is een reductie van maximaal 65 procent van de trillingen nodig, afhankelijk van de constructieve uitwerking. Bij een qua trillingen

goed ontworpen constructie (breedplaatvloeren, zware constructie) is nog steeds zo'n 50 procent reductie van de trillingen nodig om volledig te voldoen aan het beoordelingskader.



Figuur 7 Verwachte trillingen in meest westelijke (vrijstaande) woning, boven op fundering, onder midden vloer, constructie met kalkzandsteen, metselwerk en 200 mm kanaalplaatvloer

5.3. MAATREGELEN AAN DE TRILLINGSBRON

De meest effectieve manier om de trillingen te reduceren, is het nemen van maatregelen aan de trillingsbron (het spoor of de treinen). Effectieve maatregelen zijn bijvoorbeeld het significant verlagen van de rijnsnelheid van de treinen (naar bijv. 40 km/h), het weren van goederentreinen, een betonplaat met ballastmat of het afveren van het spoor. Goedkopere maatregelen, zoals under sleeper pads, zijn onvoldoende effectief tegen de relatief laagfrequente trillingen.

Nadeel van maatregelen aan het spoor zijn de hoge kosten hiervan (m.n. doordat een buitendienststelling nodig is), bovendien vallen deze maatregelen buiten het plangebied. Het omleiden van goederentreinen of een verlaging van de rijnsnelheid is niet realiseerbaar (i.v.m. de dienstregeling op dit druk bereden spoor met weinig passeermogelijkheden), een betonplaat met ballastmat en het afveren van het spoor leiden tot zeer hoge kosten (€ 2.9 tot € 4.5 mln. voor een betonplaat met ballastmat, en € 9.3 tot 14.4 mln. voor een afgeveerd spoor over beide sporen, over een lengte van ongeveer 300 meter per spoor). Deze kosten zijn ruim hoger dan het richtbedrag voor maatregelen dat ProRail hanteert bij doelmatigheidsafwegingen (€ 63.168 per woning (peil januari 2023), dus totaal hier bijna € 0.9 mln.), en staan niet in verhouding tot de bouwsom van de woningen. Maatregelen aan het spoor zijn daarom niet doelmatig.

5.4. MAATREGELEN IN DE BODEM

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



Een trillingsscherm is alleen effectief dicht bij de bron of dicht bij de ontvanger. Gezien de ligging van het plangebied is een sloot hier ruimtetechnisch niet inpasbaar. De enige logische plek voor een trillingsscherm is op de noordelijke perceelgrens. Om het plangebied af te schermen, is een trillingsscherm van ca. 150 meter lengte nodig, zie Figuur 8.



Figuur 8 Mogelijke locatie van trillingsscherm

De diepte van een scherm moet, gezien de dominante trillingsfrequenties, voor veel schermtypes minimaal 20 meter diep zijn om echt effectief te zijn. Mogelijke maatregelen in de bodem met een inschatting van het effect en de kosten zijn weergegeven in Tabel 5.

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

Maatregel	Effect	Kosten ³
Betonnen wand (diepwandmethode)	15 – 30%	€ 3.2 – 5.0 mln.
Jet-grout wand	10 – 25%	€ 2.6 – 4.1 mln.
Damwand (intrillen)	5 – 10%	€ 1.6 – 2.5 mln.
Betonnen wand, bekleed met rubber	20 – 55%	€ 3.8 – 6.0 mln.
Damwand met EPS (piepschuim)	10 – 25%	€ 2.5 – 3.9 mln.

³ Totale investeringskosten, incl. BTW, prijspeil januari 2023, met een bandbreedte van +/-25%. Kosten zijn exclusief kosten voor grondverwerving, verleggen van kabels en leidingen en kosten voor een vergunningsprocedure. De werkelijke kosten van maatregelen zullen daardoor hoger uitvallen.

Maatregel	Effect	Kosten ³
Damwand met sleuf (luchtspouw)	10 – 25%	€ 3.2 – 5.0 mln.
L-wand 4.0 m diep	0 – 10%	€ 0.2 – 0.4 mln.
L-wand 4.0 m diep, bekleed met rubber	0 – 10%	€ 0.5 – 0.8 mln.
CSM-wand (Cutter Soil Mix of Mix-In-Place)	0 – 5%	€ 1.8 – 2.9 mln.
Trillingsscherm EPS (piepschuim), 1 m dik	0 – 10%	€ 0.5 – 0.9 mln.

Zoals in bovenstaand overzicht is te zien, gaat het stuk voor stuk om kostbare maatregelen met maar een beperkt effect. Dat komt doordat trillingsschermen altijd een deel van de trillingsenergie door laten, en dat dit deel groter is bij laagfrequente trillingen. Er is geen oplossing met de 65 procent effect, alleen bij een qua trillingen geoptimaliseerde constructie kunnen de wat duurdere schermtypes *mogelijk* zorgen voor de benodigde 50 procent aanvullende trillingsreductie.

De meest effectieve maatregel is een betonnen trillingsscherm van 20 meter diep en 0.5 meter breed, tot 8 meter diepte bekleed met minimaal 100 mm rubber of 1000 mm EPS. De kosten van deze maatregel bedragen tussen de € 3.8 en € 6.0 mln., en zijn daarmee nog hoger dan maatregelen aan het spoor. Dergelijke kosten staan niet in verhouding tot de bouwsom van de geplande woningen. Bovendien, ook met deze maatregel zijn overschrijdingen van het beoordelingskader nog niet volledig uit te sluiten. Ook maatregelen in de bodem zijn daarmee niet doelmatig.

5.5. OPTIMALISATIES VAN DE GEBOUWEN

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

Tabel 6 Mogelijke maatregelen aan de gebouwen

Maatregel	Effect	Kosten ⁴
Toepassen breedplaat- i.p.v. kanaalplaatvloeren	15 – 30%	< 2% SK
Slappere vloeren (eigenfrequentie < 6.5 Hz)	5 – 20%	< 1% SK
Stijvere vloeren (eigenfrequentie > 13 Hz)	20 – 45%	< 3% SK
Ontkoppelen van de fundering (afveren, op max. 4 Hz)	65 – 80%	6 – 10% SK
Inpakken van de fundering met 150 mm rubber	5 – 10%	2 – 4% SK
Afschermen van de fundering met 1000 mm dik EPS	10 – 15%	< 2% SK
Afschermen van de fundering met 3 m diepe L-wand	5 – 20%	< 1% SK

⁴ SK = Stichtingskosten

Maatregel	Effect	Kosten ⁴
Palenfundering i.p.v. balkenfundering	10 – 20%	2 – 4% SK
Zwaardere fundering (betonplaat)	5 – 20%	3 – 5% SK

Meest effectief is het ontkoppelen van de fundering (toepassen van stalen veerdozen tussen de fundering en afgeveerd op een lage frequentie van maximaal 4 Hz, zie bijlage IV voor een voorbeelduitwerking). Met deze maatregel is in alle gebouwen volledig te voldoen aan het beoordelingskader. Het betreft wel een kostbare maatregel, met geschatte kosten tussen de € 15.000 en € 30.000 per woning⁵.

Minder kostbaar en minder effectief is het verzwaren van de vloeren. Door voor de vloeren een eigenfrequentie boven de 13 Hz te kiezen, worden de trillingen in het gebouw veel minder versterkt. Zo'n hoge eigenfrequentie kan worden bereikt door andere vloertypes, kortere vloeroverspanningen (door kleinere beukmaat of extra dragende tussenwand) of een dikkere vloer te gebruiken, zie Tabel 7 voor geadviseerde vloertypes per overspanning. In deze tabel geeft een **groene** arcering aan dat het vloertype een eigenfrequentie hoger dan 13 Hz heeft, en **gele** arcering dat de eigenfrequentie lager is dan 6.5 Hz. Ook met een geoptimaliseerde vloer is echter nog sprake van overschrijdingen van de streefwaarden.

Tabel 7 Geadviseerde vloertypes per overspanning

Overspanning	Kanaalplaatvloer 200	Kanaalplaatvloer 260	Kanaalplaatvloer 320	Breedplaatvloer 200	Breedplaatvloer 250	Breedplaatvloer 280	Breedplaatvloer 320	Advies
4.5 meter								Breedplaatvloer 200
5.0 meter								Breedplaatvloer 250
5.5 meter								Breedplaatvloer 280
6.0 meter								Breedplaatvloer 320
6.5 meter								Beperk overspanning met extra tussenwanden
7.0 meter								Breedplaatvloer 200 of kleinere overspanning
7.5 meter								Breedplaatvloer 200 of kleinere overspanning
8.0 meter								Breedplaatvloer 200 of kleinere overspanning

5.6. AFWEGING VAN MAATREGELEN

In de geplande woningen zijn overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder niet uit te sluiten. Dat komt vooral door de trillingen van (zware) goederentreinen, die in de zandige

⁵ Genoemde bovengrens is bruikbaar richtbedrag voor vrijstaande woning, ondergrens voor de rug-aan-rugwoningen. De erfwoningen en twee-onder-een-kapwoningen vallen hier tussenin, met geschatte kosten rond € 22.500.

bodem slecht uitdempen. De hoogte van de trillingen hangt sterk af van de constructie, maar bij een qua trillingen ongunstige constructie kan tot wel 9 keer per dag sprake zijn van treinen met trillingen die hoger zijn dan de streefwaarden voor trillingshinder. Dit kan zorgen voor overlast.

Uit het onderzoek naar maatregelen volgt dat maatregelen aan het spoor en in de bodem niet doelmatig zijn, vooral door de zeer hoge kosten en bij maatregelen in de bodem ook de beperkte effectiviteit. Bouwkundige optimalisaties kunnen de trillingen wel sterk verminderen. We adviseren om de volgende optimalisaties af te wegen tijdens het verdere ontwerpproces:

1. Vermijd lichte bouw, zoals houtskeletbouw en staalconstructies. Deze zijn erg gevoelig voor trillingen.
2. Kies indien mogelijk voor breedplaatvloeren met ingeklemde oplegging, en een zo hoog mogelijke eigenfrequentie, maar in ieder geval boven de 13 Hz. Dat laatste kan bereikt worden door het beperken van de vloeroverspanning (smallere beukmaat of extra dragende tussenwanden (evt. gedeelte van de woningen)), of door dikkere vloeren te gebruiken. Met deze maatregel zijn de trillingen met maximaal 45 procent te verminderen. Het aantal overschrijdingen neemt af van gemiddeld 4 naar 1 per dag. Met een slappe vloer (eigenfrequentie lager dan 6.5 Hz) zijn de trillingen van de treinen ook te verminderen, maar de vloeren zijn dan gevoeliger voor trillingen door lopen.
3. Zorg voor een zo zwaar mogelijke fundering, liefst een 500 mm dikke betonnen plaatfundering of onderheide fundering (geboord paalsysteem, 7 meter paallengte en 450 mm paaldiameter). Door de zware fundering wordt het gebouw minder makkelijk in trilling gebracht, en nemen de trillingen met zo'n 10 tot 20 procent af. Het aantal overschrijdingen neemt af van gemiddeld 4 naar gemiddeld 2,5 per dag, en in combinatie met een zwaardere vloer (maatregel 2) naar minder dan 1 per dag.

Andere optimalisaties, zoals het afschermen of inpakken van de fundering, hebben maar beperkt effect. Volledig voldoen aan de streefwaarden voor trillingshinder is alleen mogelijk met een afgeveerde fundering (dubbele fundering met daartussen stalen veerdozen, afgeveerd op maximaal 4 Hz). Deze oplossing (zie Bijlage IV) wordt vaker toegepast langs het spoor, en zorgt voor een hoog comfortniveau, maar brengt hoge kosten met zich mee (tussen de € 15.000 en € 30.000).

5.7. ONZEKERHEDEN IN HET ONDERZOEK

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

- Ten aanzien van de trillingsbron: de natuurlijke variatie als gevolg van spooronderhoud en de temperatuur kunnen zorgen voor zo'n 30% variatie in de trillingen, afhankelijk van de spoorconstructie en de bodemopbouw. Er is gemeten in een klimatologisch als normaal te typeren periode. Er is geen informatie bekend over de huidige status van de spoorligging. Door te meten op meerdere punten hebben we variaties waar mogelijk meegenomen in de analyse en berekeningen. Er is op basis van bovenstaande informatie geen reden om te twijfelen aan de representativiteit van de berekeningen voor de toekomstige trillingen.
- Ten aanzien van de bodem geldt dat met name op korte afstand tot het spoor variaties in de trillingen mogelijk zijn door lokale variaties in de bodem. Omdat het plangebied op wat grotere afstand van het spoor is gepland, is de invloed van deze variaties beperkt. Door op meerdere punten te meten is de invloed van deze variaties meegenomen in de berekeningen. De invloed hiervan op de resultaten is daardoor beperkt.



- Ten aanzien van de gebouwen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en definitief ontwerp). Bovendien is het dynamische gedrag van bijvoorbeeld beton afhankelijk van de mate van gescheurdheid van het beton en zijn er natuurlijke variaties in materiaalgedrag (van bijvoorbeeld hout, metselwerk en beton). In de berekeningen is gerekend met een verwachtingswaarde van de trillingen op basis van een aan de hand van praktijkmetingen geijkt rekenmodel. Hiermee wordt een resultaat verkregen dat representatief is voor de toekomstige situatie.

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



GRONDONDERZOEK

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

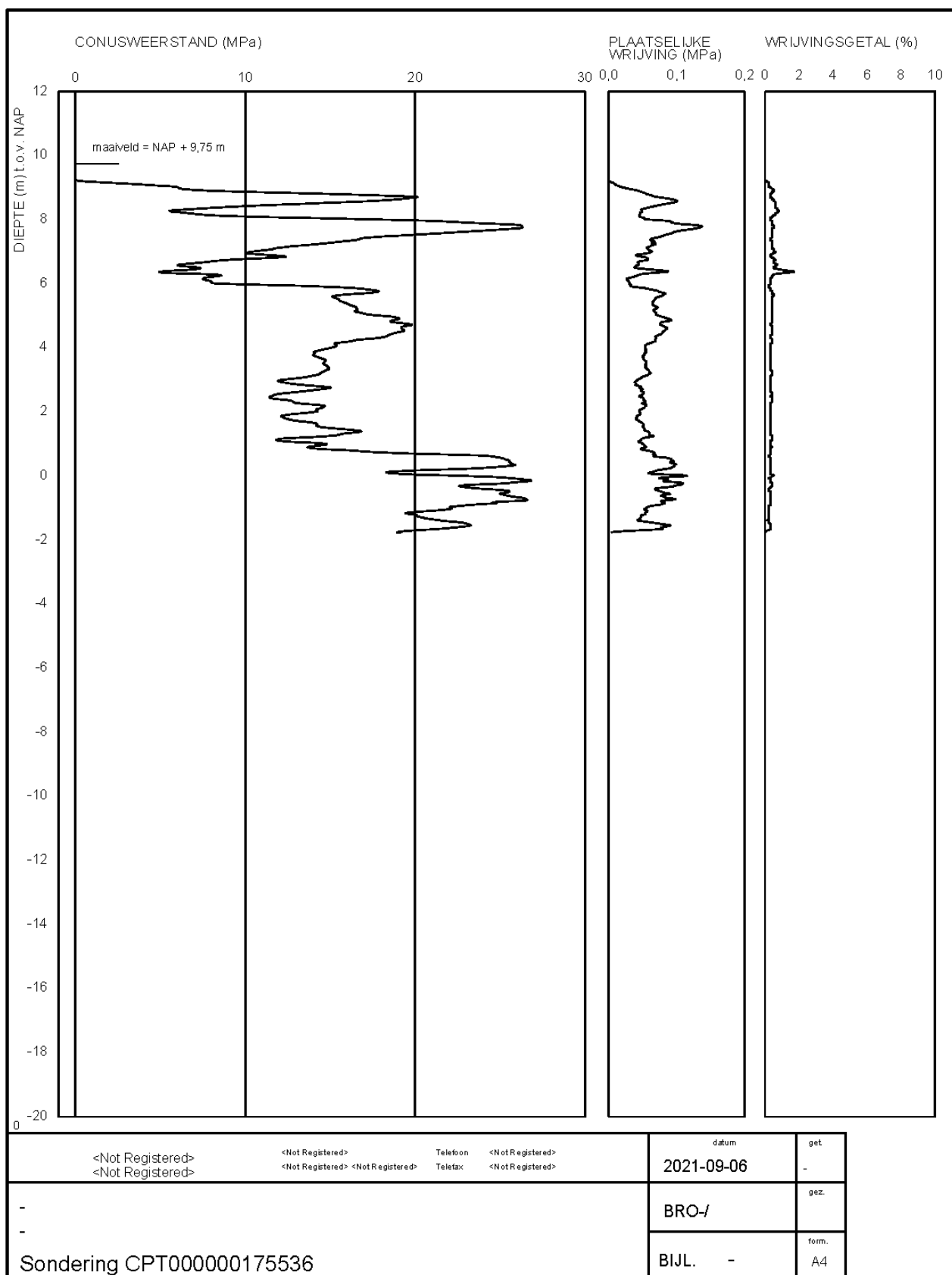
Een grondboring in de nabijheid van het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur 9. Uit de grondboring blijkt dat de bodem is opgebouwd uit stijve zandlagen. Bij een zandige bodem dempen de trillingen slecht uit met de afstand, en kunnen trillingen tot op grote afstand van het spoor voelbaar zijn.

Boormonsterprofiel



Figuur 9 Boring in het onderzoeksgebied

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



Figuur 10 Sondering nabij het onderzoeksgebied

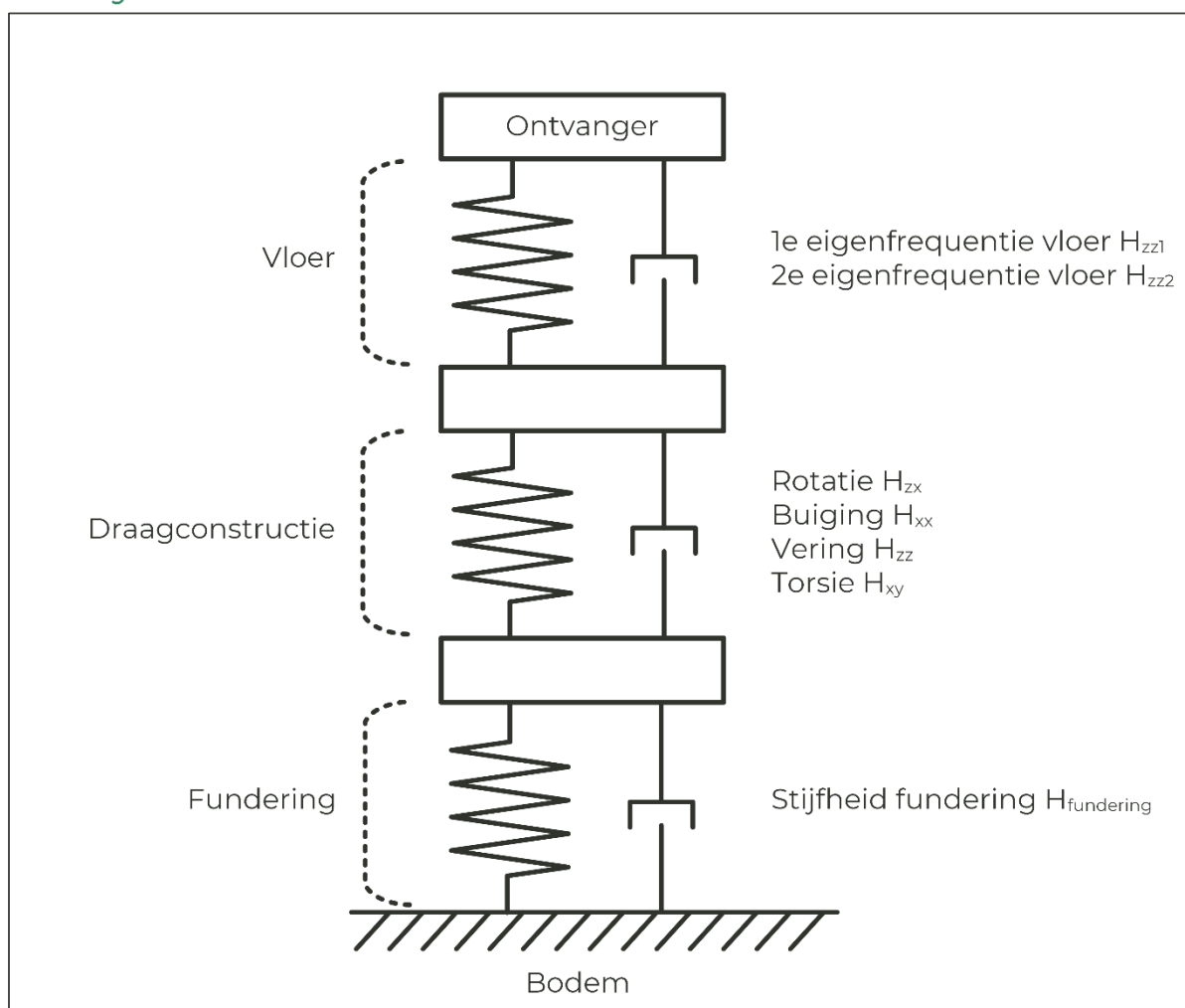
REKENMODEL

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

In Buildyn wordt een gebouw gemodelleerd door middel van gekoppelde massa-veersystemen, zie Figuur 11. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 11, worden in deze bijlage nader toegelicht. Afhankelijk van de constructie van het gebouw wordt de draagconstructie als één (lage bebouwing, starre bebouwing), of als meerdere elementen (hoge bebouwing, slappere bebouwing) gemodelleerd.

Buildyn

WVB



Figuur 11 Principe van Buildyn met een gebouw als gekoppeld massaveersysteem. Rechts de verschillende componenten van het rekenmodel

FUNDERING

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

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

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

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

DRAAGCONSTRUCTIE

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

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

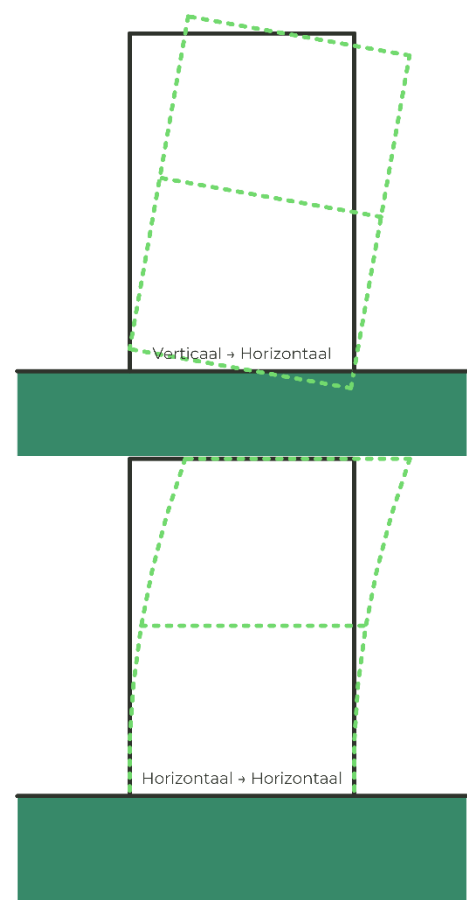
Dit effect noemen we H_{zx} , en is afhankelijk van:

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

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

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

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

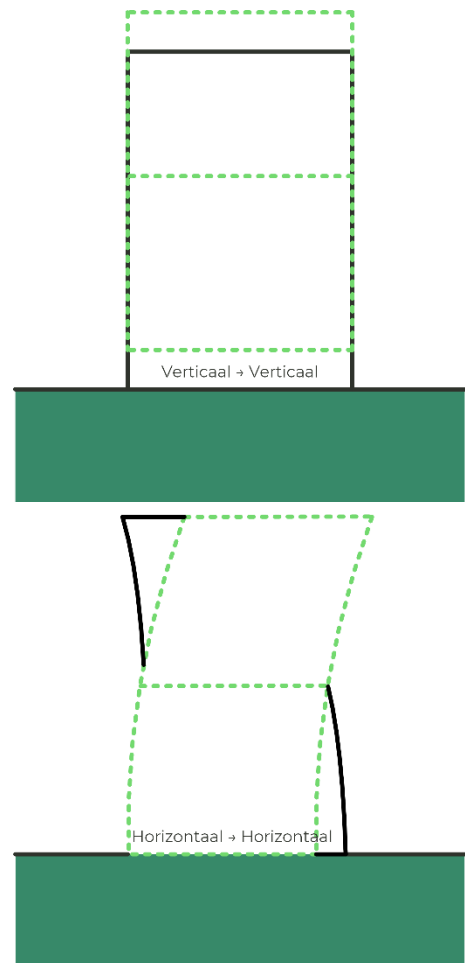


Het derde principe, dat van vering van het gebouw op zijn fundatie, is rechts weergegeven. Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappe onderlaag of lokaal slappere elementen (denk aan kolommen en balkenstructuren). Dit effect noemen we H_{zz} , en is afhankelijk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

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

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

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



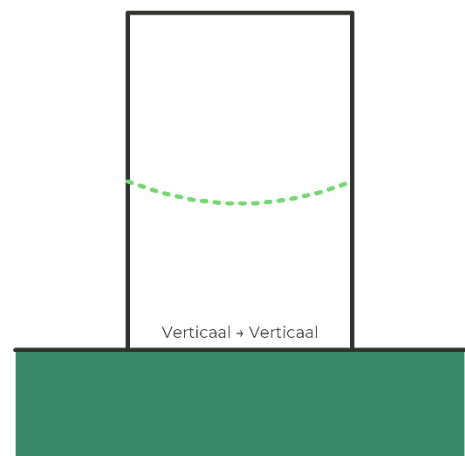
VLOEREN

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

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

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

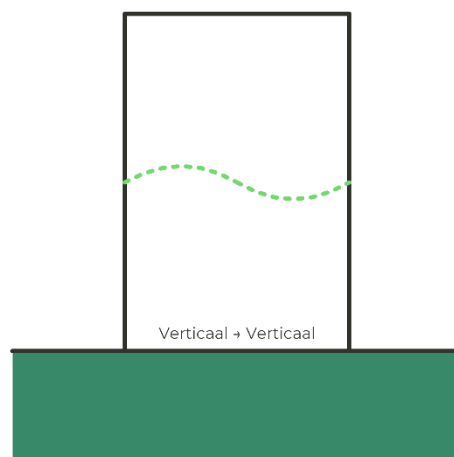
- Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- Afmetingen van de vloer
- Type oplegging



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

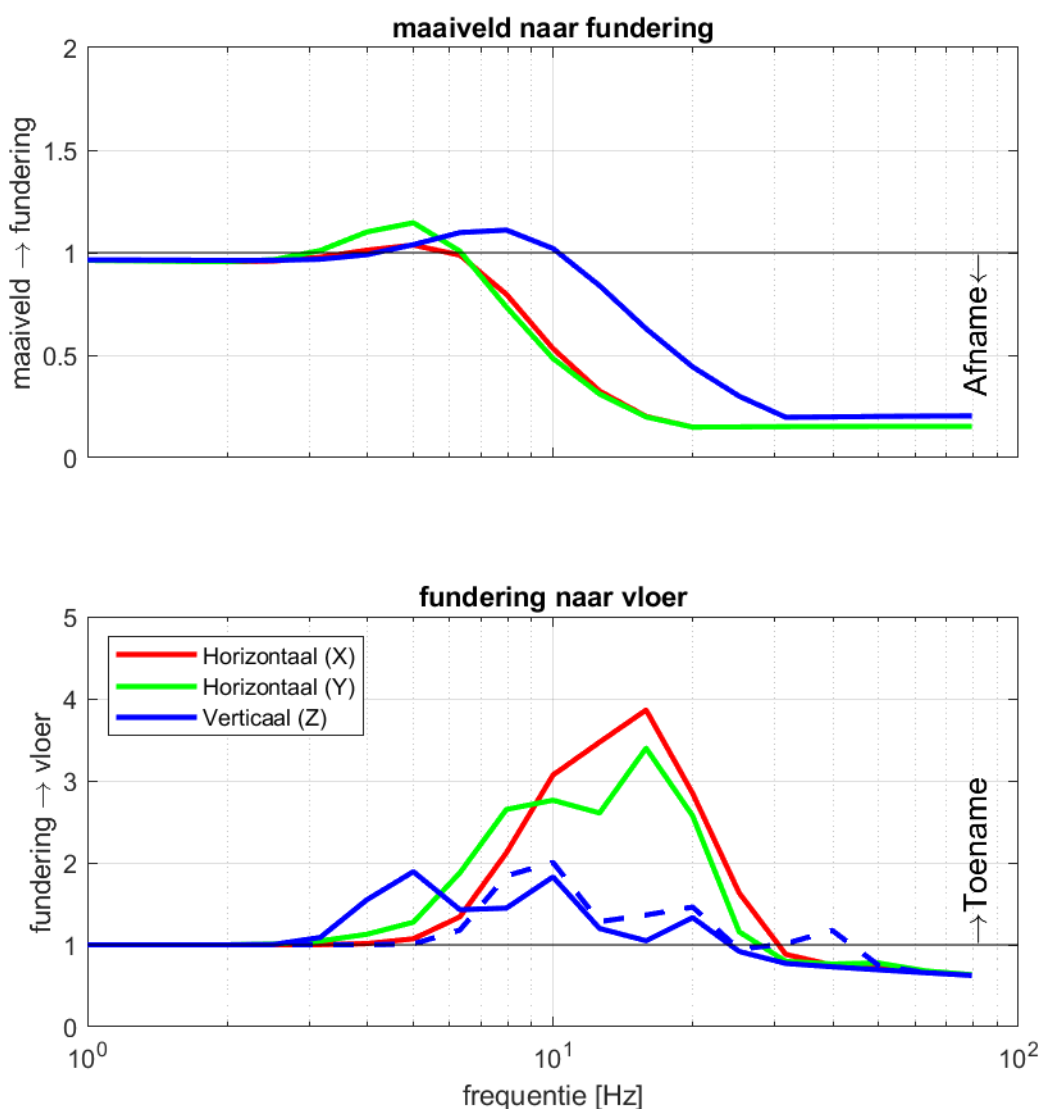
Dit effect noemen we H_{zz2} , en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1} .

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



RESULTATEN

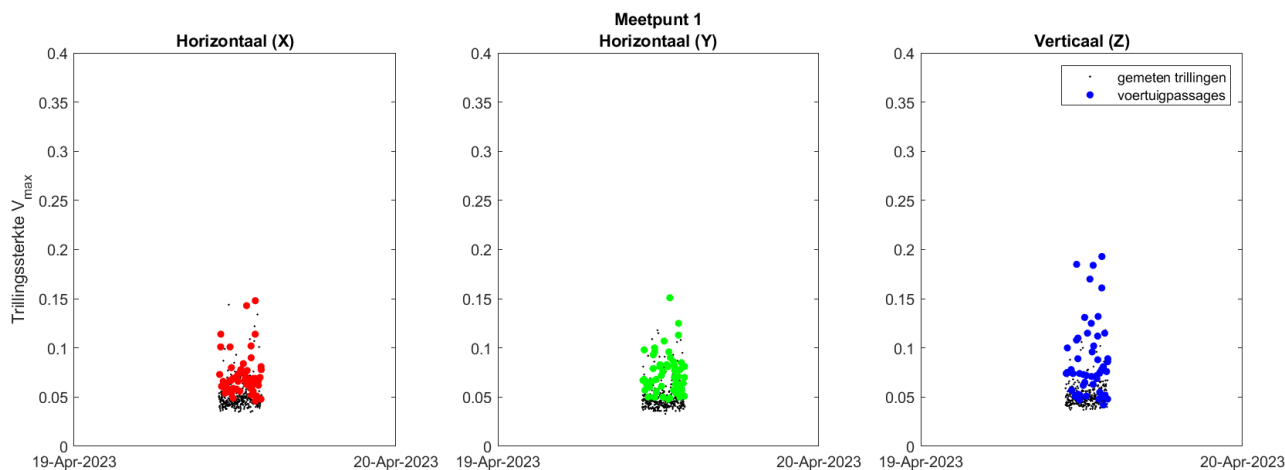
Ter illustratie zijn de resultaten uit de Buildyn-berekeningen weergegeven in Figuur 12 voor een vrijstaande woning met 200 mm kanaalplaatvloer en constructie van kalkzandsteen.



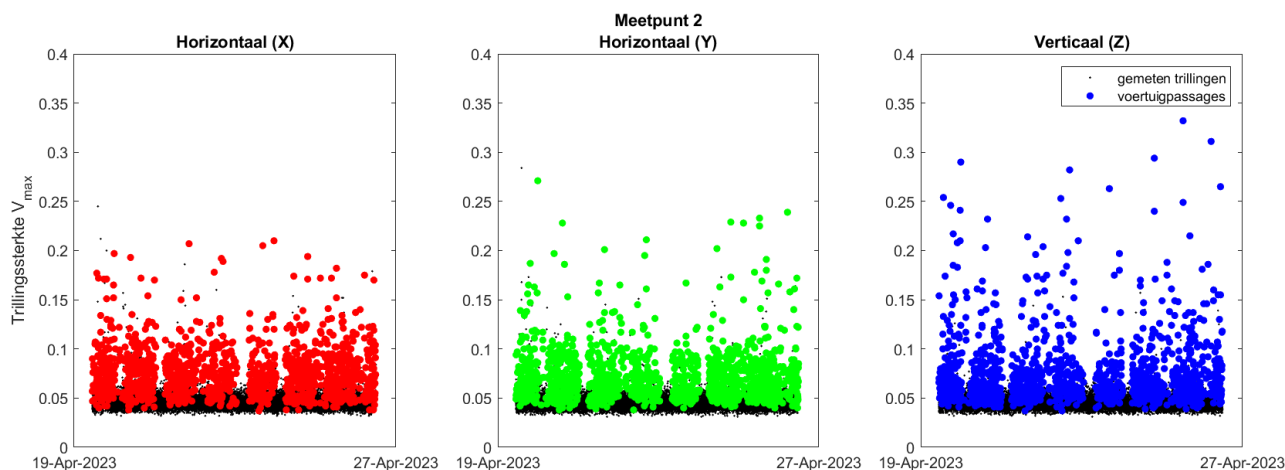
Figuur 12 Buildyn-resultaten voor vrijstaande woning met 200 mm kanaalplaatvloer. Doorgetrokken lijn verticaal is midden vloer, onderbroken lijn is op $\frac{1}{4}$ en $\frac{3}{4}$ van overspanning

RESULTATEN METINGEN

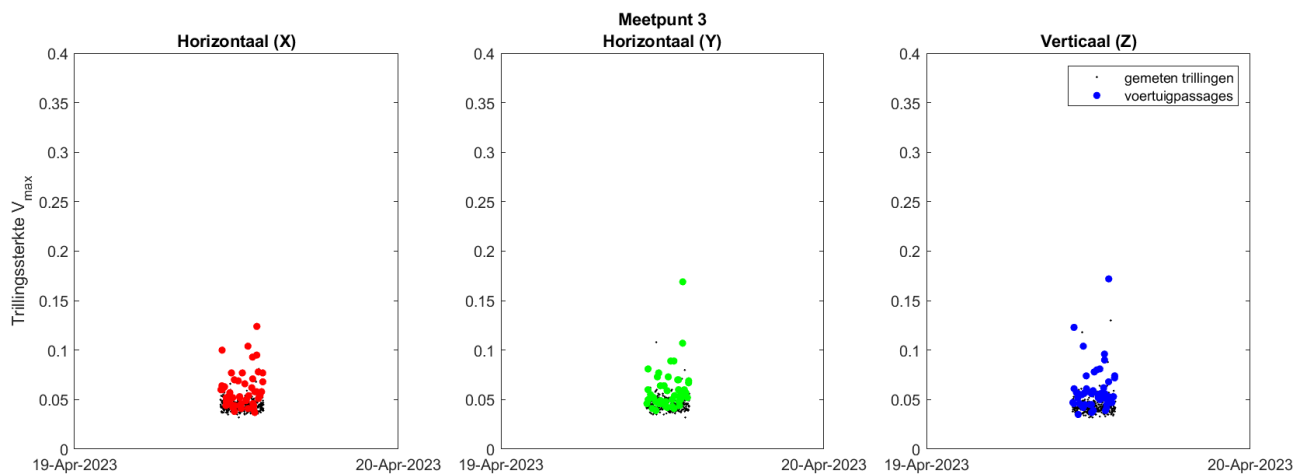
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



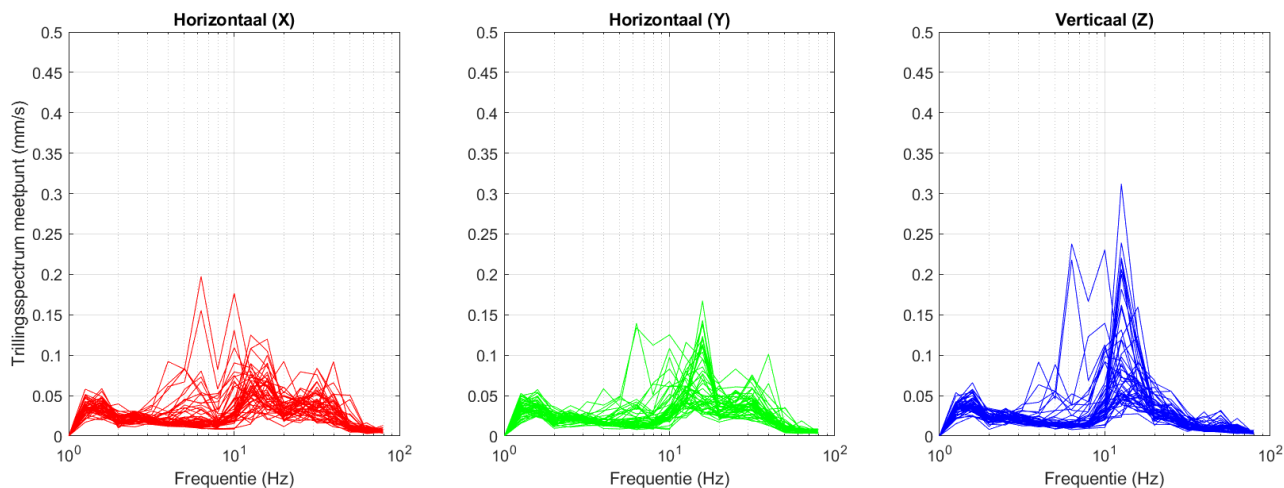
Figuur 13 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (maaiveld, links in plangebied)



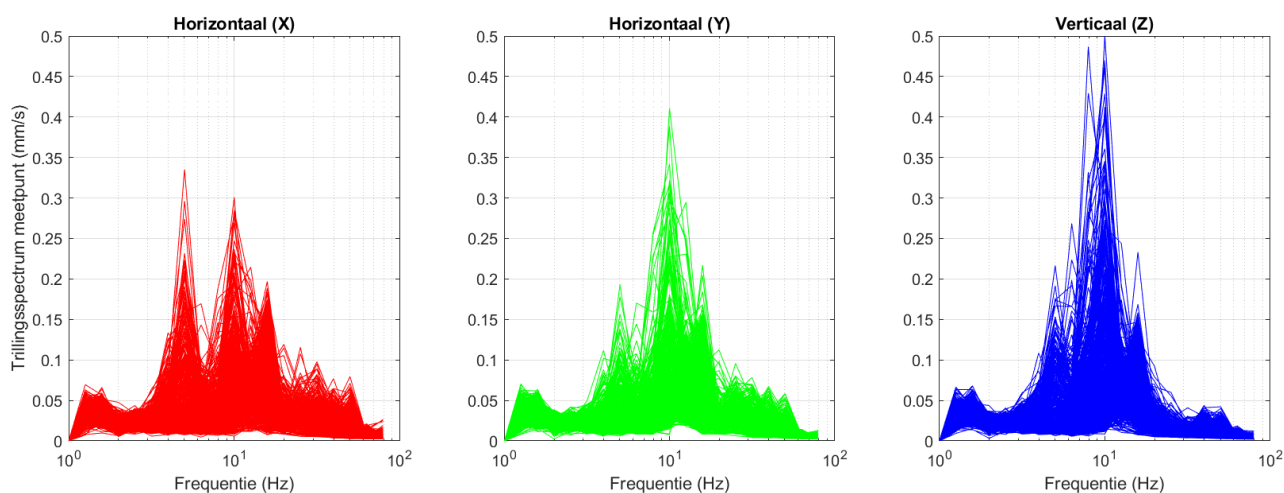
Figuur 14 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (maaiveld, midden plangebied)



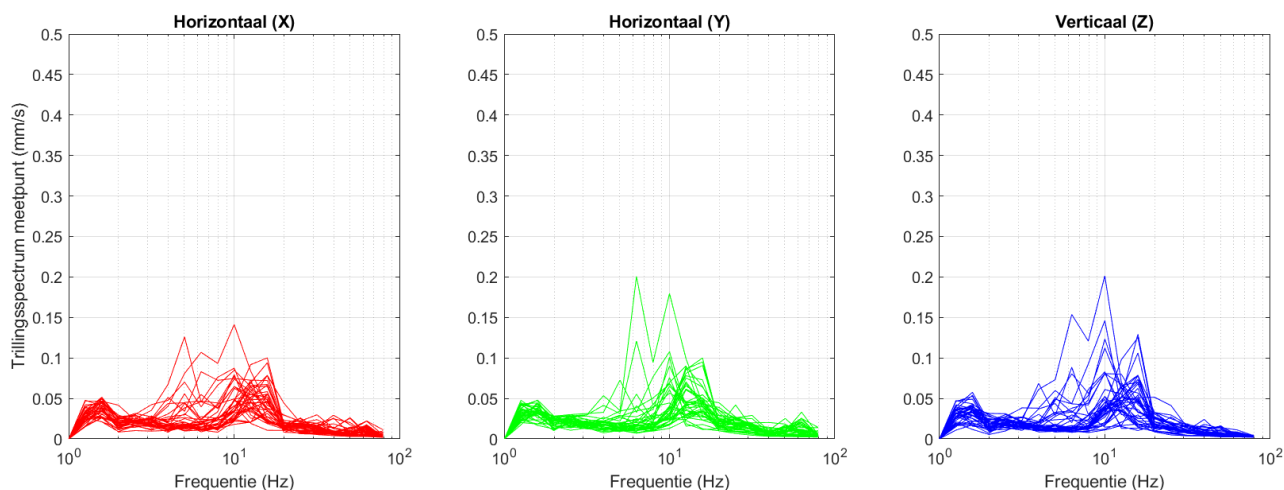
Figuur 15 Tertsbandspectra bij meetpunt 3 (maaiveld, rechts in plangebied)



Figuur 16 Tertsbandspectra bij meetpunt 1



Figuur 17 Tertsbandspectra bij meetpunt 2

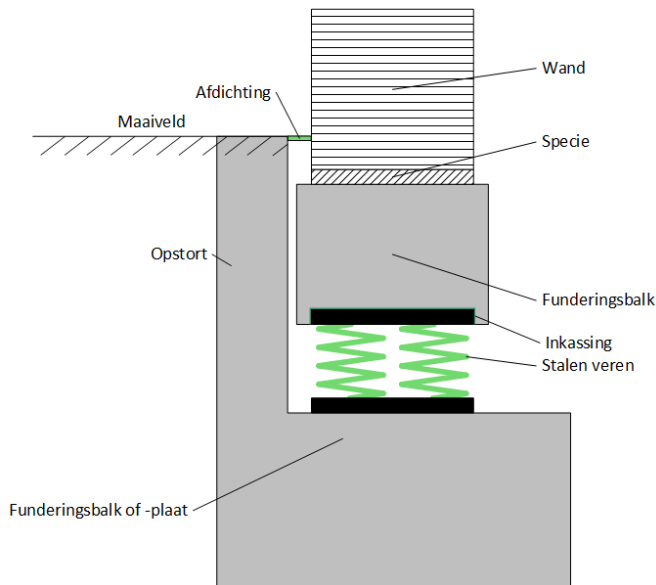


Figuur 18 Tertsbandspectra bij meetpunt 3

IV DETAILS MAATREGELEN

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

Een principeschets van een afgeveerde fundering met stalen veerdozen is weergegeven in Figuur 19. Een foto van een concrete toepassing bij eengezinswoningen in Prinsenbeek is weergegeven in Figuur 20. Aan de zijkant kan de bodem van de woning worden geïsoleerd door het aanbrengen van bijvoorbeeld een laag EPS, of, zoals in Figuur 19, met een opstort op de funderingsplaat.



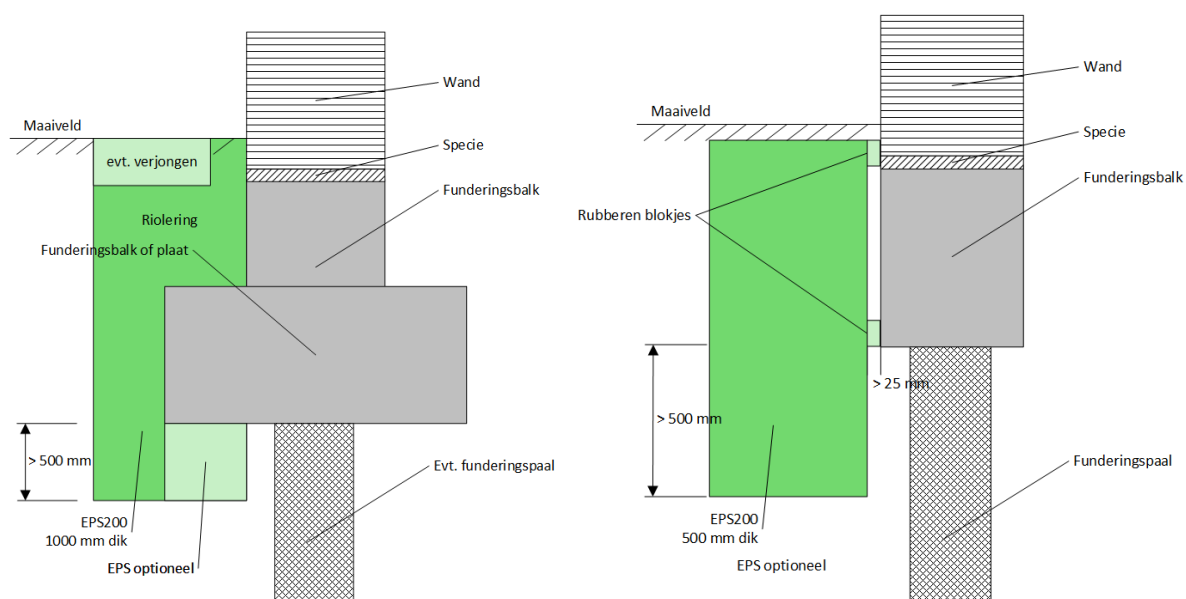
Figuur 19 Principeschets afgeveerde fundering (fundering op staal)



Figuur 20 Dubbele fundering met stalen veerdozen (project in Prinsenbeek)

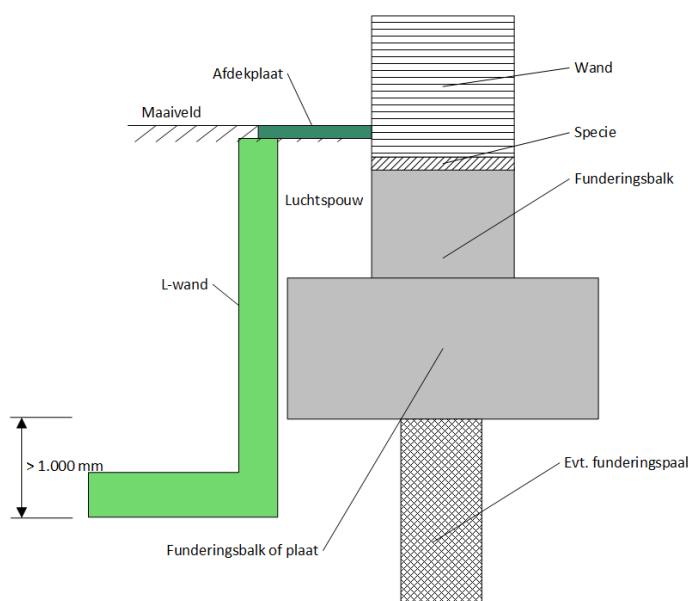
Een principeschets van het bekleden van de fundering met EPS (piepschuim) is weergegeven in Figuur 21. De EPS-kwaliteit dient wat zwaarder te zijn dan standaard i.v.m. de gronddruk. Hier is EPS200 aangegeven. De minimaal benodigde dikte voor voldoende reductie is zo'n 1000 mm, om opdrijven te voorkomen moet dit tot de GHG-waarde van het grondwaterpeil worden aangebracht en verankerd worden aan de fundering. Een geringere dikte is ook mogelijk, mits

gebruik wordt gemaakt van een luchtspouw van minimaal 30 mm breed (afgedekt om vuilophoping te voorkomen). Verder dient het EPS dieper te zijn dan de funderingsbalken, bij voorkeur minimaal 500 mm onder de onderzijde van de funderingsbalk. Minder diep is mogelijk, maar leidt tot een lagere effectiviteit.



Figuur 21 Fundering met EPS-scherm ervoor (links) en met EPS en luchtspouw (rechts)

Een principeschets van het plaatsen van een L-wand direct voor de fundering is rechts weergegeven in Figuur 22. Belangrijk hierbij is dat een luchtspouw nodig is (geen contact tussen L-wand en fundering, of opvangen met rubberen afstandhouders van minimaal 30 mm dik), en dat deze dient te worden afgedekt met een afdekplaat. De L-wand moet in ieder geval ruim (minimaal 500, liefst 1.000 mm) lager liggen dan de onderzijde van de funderingsbalk of plaat om effectief te zijn, bij een paalfundering is de effectiviteit lager omdat een deel van de trillingen via de palen het gebouw ingaat.



Figuur 22 L-wand met luchtspouw voor fundering