



WEEBOOST

TRILLINGSONDERZOEK T.B.V. NIEUWBOUW

**BUITENLUST
DIEMEN**

COLOFON

Auteur	Marjolein Hordijk marjolein@we-boost.nl
Controle en vrijgave	Pieter Boon pieter@we-boost.nl +31 6 10 03 94 54
Projectcode	WBD2022-043
Versienr	2.0
Datum	12 december 2022
Status	Definitief
Opdrachtgever	Gemeente Diemen en Rochdale



Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van metingen van



© We-Boost 2022

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 zuidoostzijde van de woonwijk Buitenlust in het noorden van Diemen wordt nieuwbouw gerealiseerd. De sportvelden op de planlocatie zullen hierbij plaats maken voor een appartementencomplex met sociale huurwoningen. Dit complex zal bestaan uit twee aan elkaar geschakelde bouwvolumes van 12,5 en 18,5 meter hoog. Het plangebied ligt tussen de spoorlijnen Watergraafsmeer – Duivendrecht/Weesp en Amsterdam – Weesp. 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 bebouwing, 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 maaiveld en met 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 conclusie van het onderzoek is dat er ten aanzien van trillingshinder geen onaanvaardbaar woon- en leefklimaat ontstaat in de geplande bebouwing. Weliswaar zijn overschrijdingen van het beoordelingskader niet uit te sluiten, maar het gaat om beperkte, incidentele (maximaal 2 per week) overschrijdingen, veroorzaakt door zware goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte op de spoorlijn Amsterdam – Weesp. Hierbij geldt dat het hogere, verder van het spoor vandaan gelegen bouwdeel wat gevoeliger is voor de trillingen van deze treinen dan het lagere bouwdeel.

Om de situatie ten aanzien van trillingshinder in de bebouwing te verbeteren, kunnen maatregelen worden getroffen. In het onderzoek is hiernaar gekeken, met als doel om vast te stellen met welke maatregelen het mogelijk is om volledig te voldoen aan de streefwaarden voor trillingshinder. Hierbij is zowel gekeken naar maatregelen aan het spoor, in de bodem als naar maatregelen aan de geplande gebouwen.

AFWEGING VAN MAATREGELEN

Uit het onderzoek naar maatregelen volgt dat maatregelen aan het spoor (hoewel effectief) niet doelmatig zijn (kosten bedragen meer dan € 110.000 per appartement met een overschrijding), maatregelen in de bodem (trillingsschermen) zijn nog kostbaarder en mogelijk onvoldoende effectief. Met maatregelen aan de gebouwen zijn de trillingen wel te reduceren tot onder de streefwaarden.

Op basis van het maatregelenonderzoek adviseren we om het volgende af te wegen in de verdere uitwerking van het project:

1. Is het mogelijk om de **fundering** van het gebouw te verzwaren? Zo zorgt een paallengte van 25 meter voor zo'n 20 procent lagere trillingen vergeleken met een paallengte van 12 meter. Ook een grotere paaldiameter zorgt voor lagere trillingen.
2. Is het mogelijk om het gebouw te realiseren via **in het werk gestort beton**? Een in het werk gestorte betonnen constructie (via tunnelbouwmethode) is stijver en kent meer demping, waardoor de trillingen lager zijn.
3. Is het mogelijk om de **wanden** van (met name het hogere bouwdeel) wat zwaarder te construeren? Denk hierbij aan dikkere wanden, of een hogere betonkwaliteit (C50/60 of C55/67 i.p.v. C30/37).

Alleen met een combinatie van al deze maatregelen zijn ook de incidentele overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder te voorkomen. Als tijdens de verdere uitwerking blijkt dat deze maatregelen niet haalbaar zijn (vanwege bijvoorbeeld technische risico's of kostenoverwegingen), dan kan worden gemotiveerd dat ook zonder maatregelen geen onaanvaardbaar woon- en leefklimaat ten aanzien van trillingshinder ontstaat in de woningen. Het beoordelingskader voor trillingshinder, de SBR B-richtlijn, biedt de mogelijkheid tot het maken van een dergelijke afweging, mits goed gemotiveerd. Met een beroep op bijlage 5 van de SBR B-richtlijn kunnen hierbij de volgende argumenten worden gebruikt:

- Er is sprake van *matige hinder*, een situatie die volgens bijlage 5 van de SBR B-richtlijn kan worden geaccepteerd als er sprake is van een beperkt aantal overschrijdingen (zoals in dit geval) en maatregelen niet goed zijn te treffen (bijvoorbeeld vanwege forse technische risico's of hoge kosten).
- Er is sprake van een beperkt aantal overschrijdingen. Het gaat om minder dan 1 overschrijding per dag. Bovendien voldoet de gemiddelde trillingssterkte V_{per} ruimschoots aan de streefwaarden, een indicatie dat het om een beperkt aantal passages met hogere trillingen gaat.
- De trillingen voldoen weliswaar niet aan de strenge streefwaarden voor nieuwbouw, maar wel aan de soepeler streefwaarden voor bestaande bouw. In die laatste streefwaarden is een zeker gewinningseffect meegenomen.
- De woningen worden gerealiseerd in een zone dichtbij het spoor, waar nu ook al bebouwing is gerealiseerd die soms ook dicht bij het spoor staat. Het gaat bovendien om oudere, meer trillingsgevoelige bebouwing, waar de trillingen dus hoger zullen zijn dan in dit nieuwe, zwaar geconstrueerde gebouw. Ook zonder maatregelen tegen trillingen ontstaat in de geplande bebouwing daarom geen onacceptabele situatie: de trillingen zijn daar immers (veel) lager dan in andere, al bestaande bebouwing rond deze locatie.



INHOUDSOPGAVE

I.	INLEIDING	8
1.1.	Aanleiding	8
1.2.	Doel	8
1.3.	Leeswijzer	9
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.	De SBR-richtlijn	15
3.3.	Rekenmethode	16
4.	VERWACHTE TRILLINGEN IN DE WONINGEN	20
4.1.	Meetresultaten	20
4.2.	Trillingen in geplande nieuwbouw	20
5.	MITIGERENDE MAATREGELEN	24
5.1.	Nut en noodzaak van maatregelen	24
5.2.	Analyse resultaten	24
5.3.	Maatregelen aan de trillingsbron	25
5.4.	Maatregelen in de bodem	25
5.5.	Maatregelen aan de gebouwen	27
5.6.	Advies voor maatregelen	28
5.7.	Onzekerheden in het onderzoek	29
II.	GRONDONDERZOEK	30
III.	GEBRUIKT REKENMODEL	32



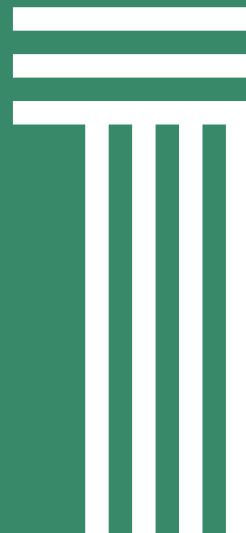




INLEIDING



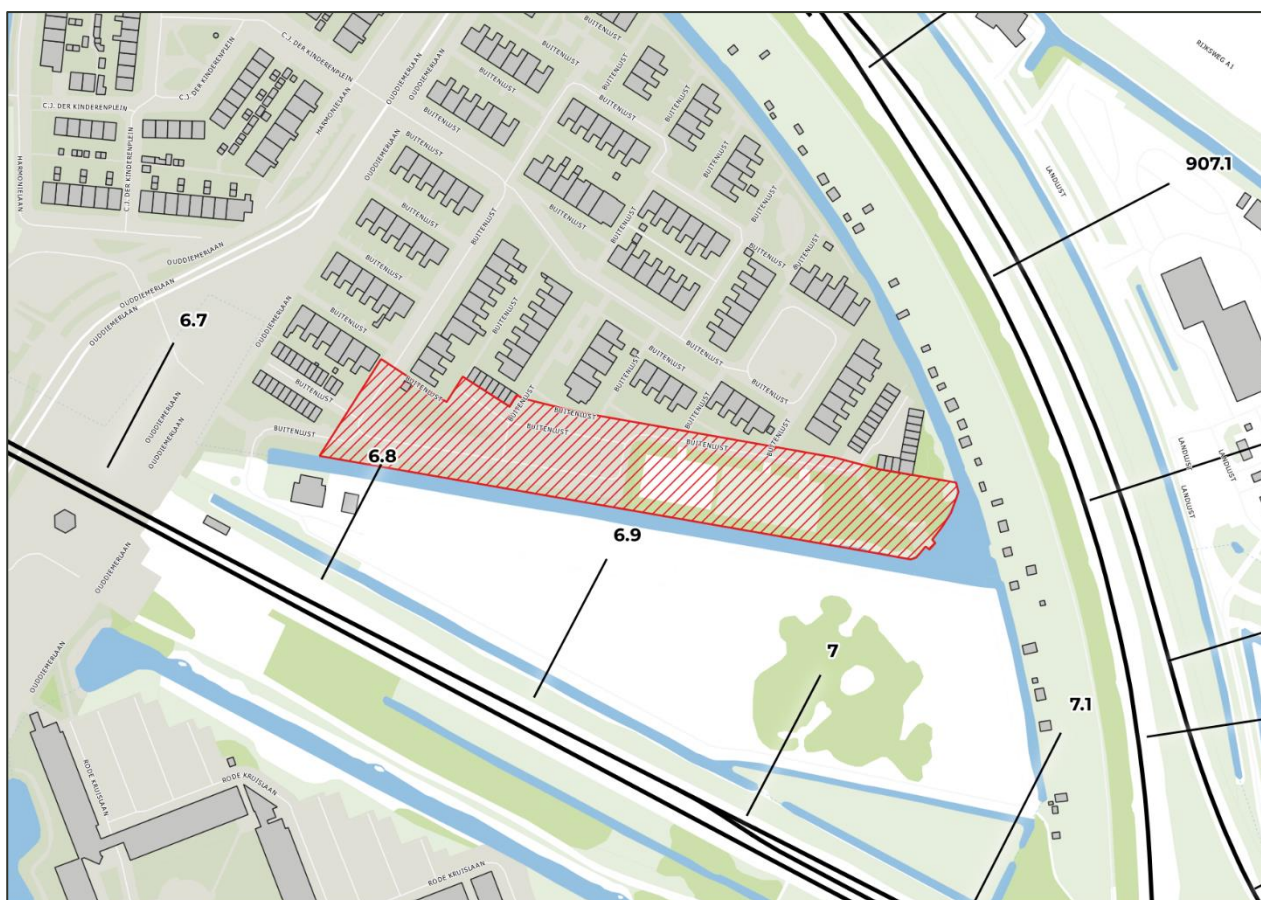
In dit hoofdstuk geven we een korte omschrijving van de inhoud van dit onderzoek: de aanleiding, het doel van het onderzoek en een beknopte leeswijzer om informatie snel te kunnen vinden.



INLEIDING

1.1. AANLEIDING

Aan de zuidoostzijde van de woonwijk Buitenlust in het noorden van Diemen wordt nieuwbouw gerealiseerd. De sportvelden op de planlocatie zullen hierbij plaats maken voor een appartementencomplex met sociale huurwoningen. Dit complex zal bestaan uit twee aan elkaar geschakelde bouwvolumes van 12,5 en 18,5 meter hoog. Het plangebied ligt tussen de spoorlijnen Watergraafsmeer – Duivendrecht/Weesp en Amsterdam – Weesp, zie Figuur 1. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet op voorhand worden uitgesloten.



Figuur 1 Plangebied nieuwbouw Liebergpark Hilversum

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 bebouwing, conform de in de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* omschreven aanpak. Deze trillingen toetsen we aan het van toepassing zijnde beoordelingskader. Als we overschrijdingen van het beoordelingskader verwachten, dan geven we aan met welke constructieve aanpassingen of maatregelen kan worden voldaan aan de streefwaarden uit het beoordelingskader.

1.3. LEESWIJZER

Wij beschrijven de situatie in het onderzoeksgebied en de uitgangspunten in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 lichten we het beoordelingskader en de gevolgde rekenmethodiek toe. Met behulp van de uitgangspunten berekenen we de trillingen in de woning op basis van de gemeten trillingen en de eigenschappen van het gebouw. Het resultaat van deze stap wordt in hoofdstuk 4 beschreven. In hoofdstuk 5 gaan we in op maatregelen.

De bijlages bevatten technische informatie van het onderzoek, zoals een toelichting op de rekenmethodiek, grondonderzoek en detailinformatie over maatregelen.





SITUATIEBESCHRIJVING



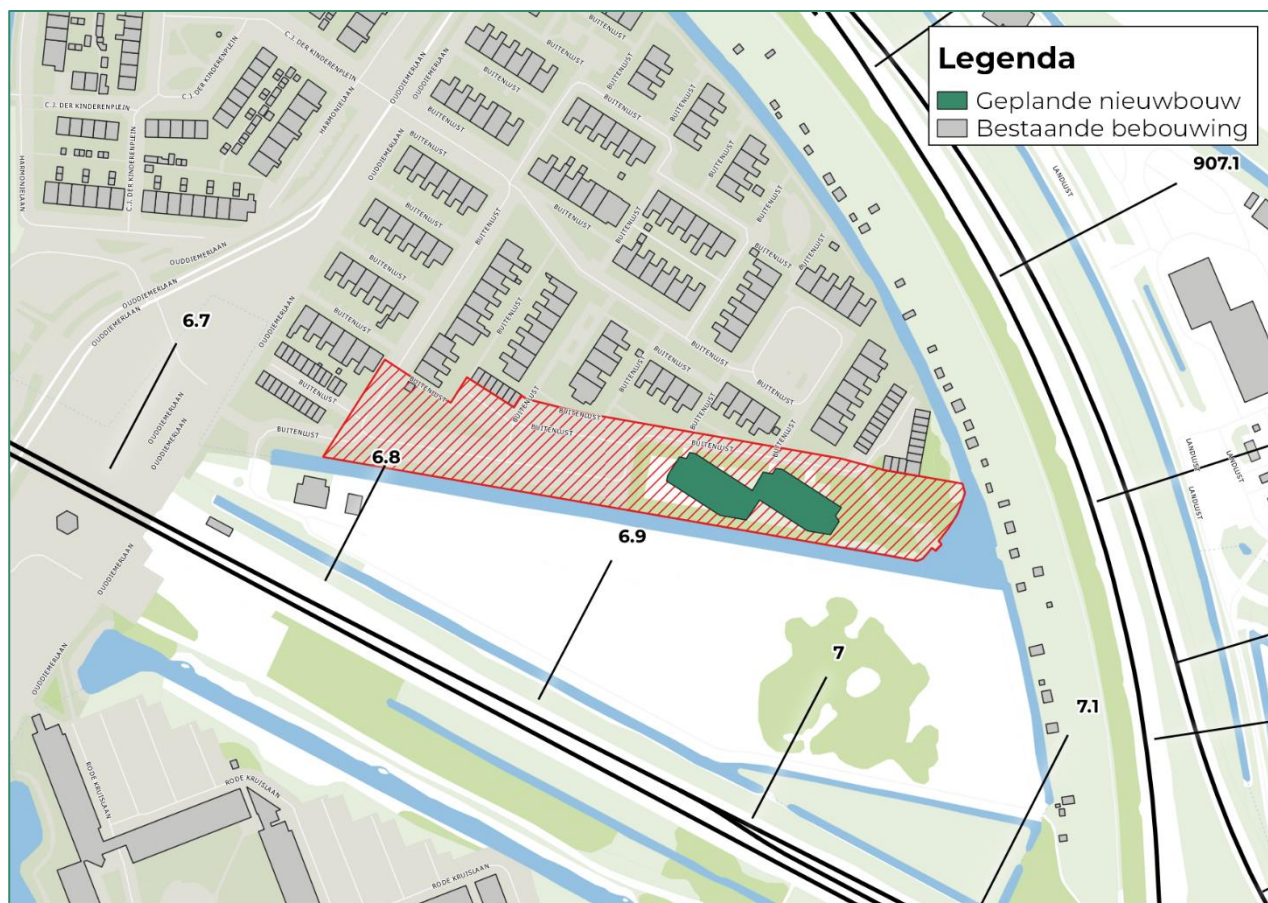
In dit hoofdstuk wordt een toelichting gegeven op de beoogde toekomstige situatie en worden de uitgangspunten van het onderzoek weergegeven.



2. SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN

2.1. SITUATIE

De geplande bebouwing zal in de plaats komen van twee sportveldjes, gelegen aan de zuidoostzijde van de wijk Buitenlust. De bebouwing zal bestaan uit twee geschakelde bouwvolumes van 12,5 (westzijde) en 18,5 (oostzijde) meter hoog, zie Figuur 2. Hierin komen appartementen in de sociale huursector.



Figuur 2 Bestaande, te slopen en toekomstige bebouwing

De geplande nieuwbouw bevindt zich in een zone van 90 tot 130 meter van het spoor. De rijsnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. Deze gegevens zijn gebaseerd op het Geluidsregister Spoor en gegevens van de vervoerders. Volgens de Integrale Mobiliteitsanalyse Spoor (IMA-2021) wordt er geen verandering in het aantal reizigers- en goederentreinen 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	40 – 80 km/h	4.00	4.00	2.50
Intercity	130 km/h	4.00	4.00	1.37
Internationale treinen	130 km/h	0.42	0.25	0.13
Goederentrein	80 – 90 km/h	0.03	0.05	0.03

Andere trillingsbronnen, zoals zwaar wegverkeer, zullen gezien de afstand tot de bebouwing niet leiden tot voelbare trillingen, en zijn daarom niet nader kwantitatief beschouwd in dit onderzoek.

2.2. UITGANGSPUNTEN

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

2.2.1. GEGEVENS BEBOUWING

Tabel 2 geeft een overzicht van de belangrijkste eigenschappen van de bebouwing zoals deze in het rekenmodel zijn meegenomen. Gezien het vroege stadium zijn nog niet alle constructieve details bekend. Daarom hebben wij verschillende varianten doorgerekend.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

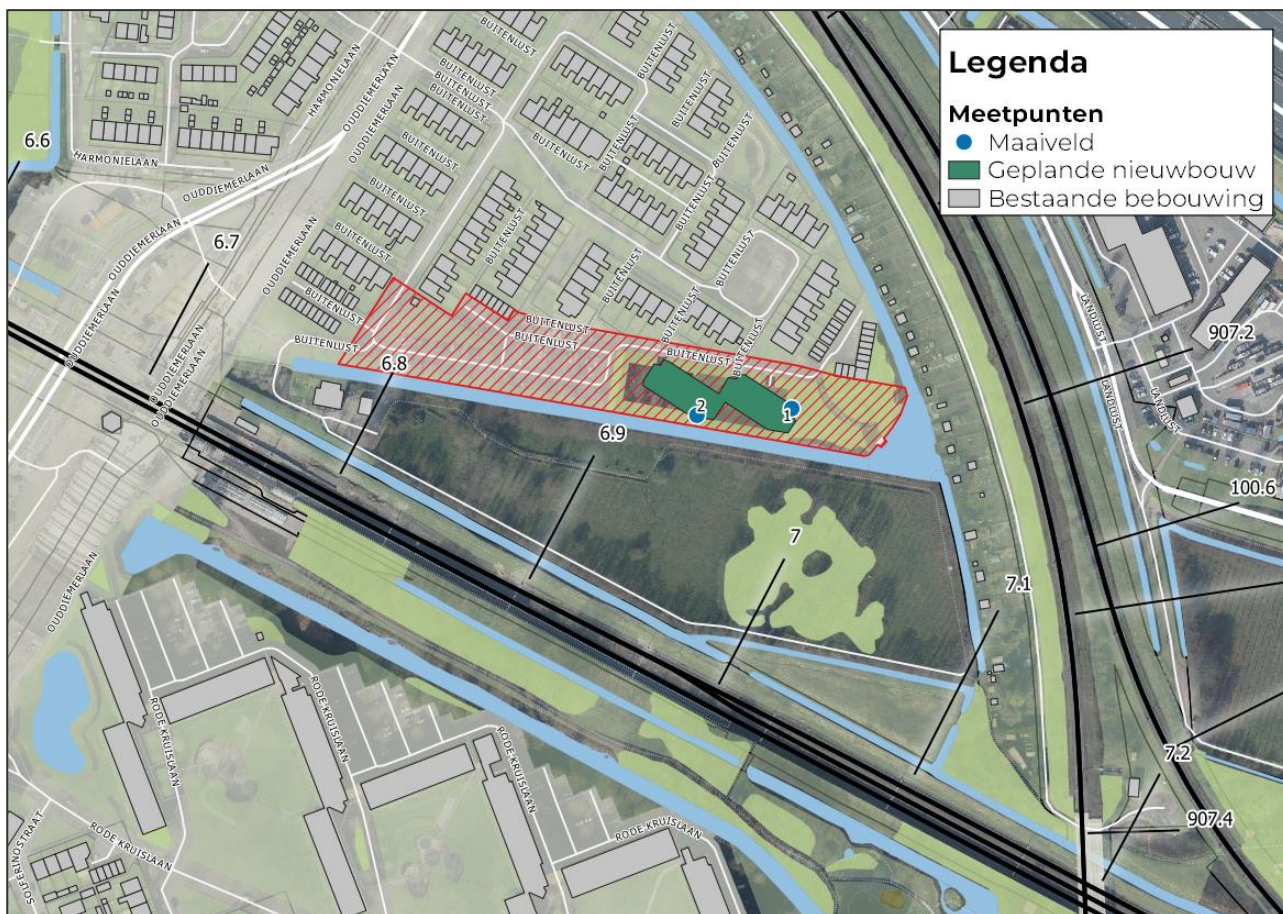
Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Meerdere varianten: • Breedplaatvloer 250, 280 en 320 mm, met 70 mm zandcement dekvloer • Appartementenvloer 260 mm, met 70 mm zandcement dekvloer
Hoogte	12.5 tot 18.5 meter
Lengte vloerveld	5.4 tot 7.2 meter
Constructietype	Meerdere varianten: • In het werk gestort beton, afgewerkt met metselwerk of gevelelementen • Prefab beton, afgewerkt met metselwerk of gevelelementen
Fundering	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 het onderzoeksgebied op twee punten, zie Figuur 3. De metingen zijn uitgevoerd van 27 oktober tot en met 7 november 2022, en zijn verricht op maaiveld. De meetresultaten uit dit meetonderzoek geven we weer in hoofdstuk 4.



Figuur 3 Meetpunten in het onderzoeksgebied



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 juli 2023 wordt de Omgevingswet (Ow) naar verwachting 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. DE SBR-RICHTLIJN

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 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

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.

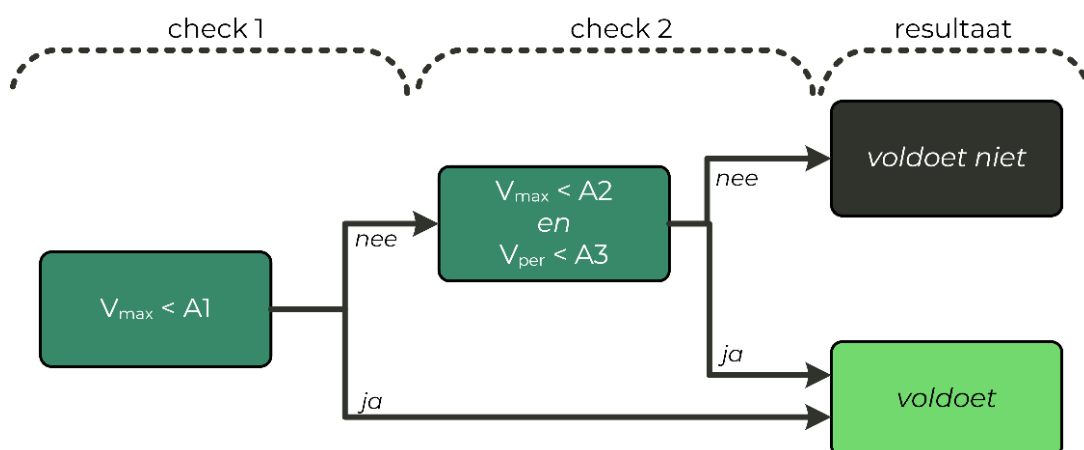
een zekere mate van gewenning en er zijn minder mogelijkheden om de trillingen te reduceren.

- 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 5.

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
Nieuwe situatie	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
Bestaande situatie	0.2	0.8	0.10	0.2	0.4	0.10



Figuur 4 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

3.3. REKENMETHODE

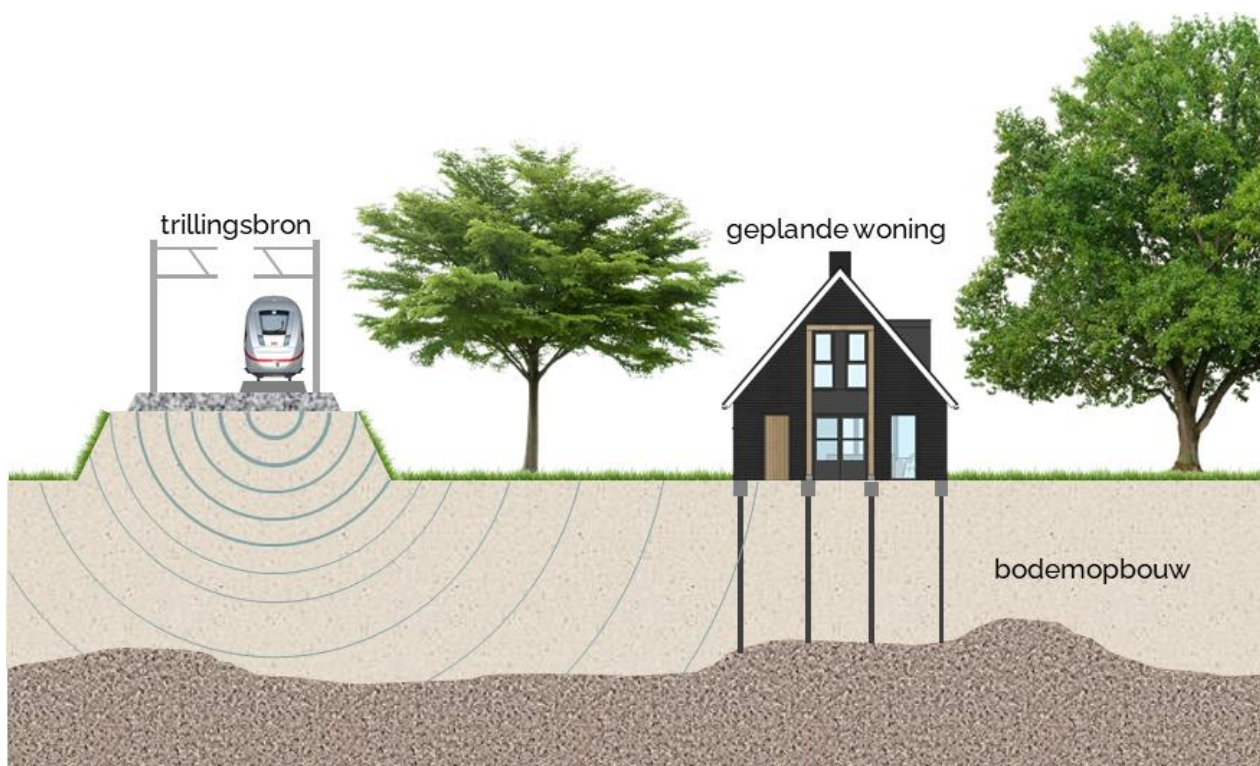
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerd gebouwen, wordt op basis van metingen op maaiveld een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande bebouwing in de eindsituatie. Deze verwachte trillingen zijn afhankelijk van de constructieve eigenschappen van de 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 6.

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

3.3.2. DE TRILLINGSBRON

In dit onderzoek zijn treinen de bron van de trillingen. De trillingen van het treinverkeer zijn gemeten door Alcedo op meerdere punten op maaiveld in het plangebied. 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 veen- en kleilagen, 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.

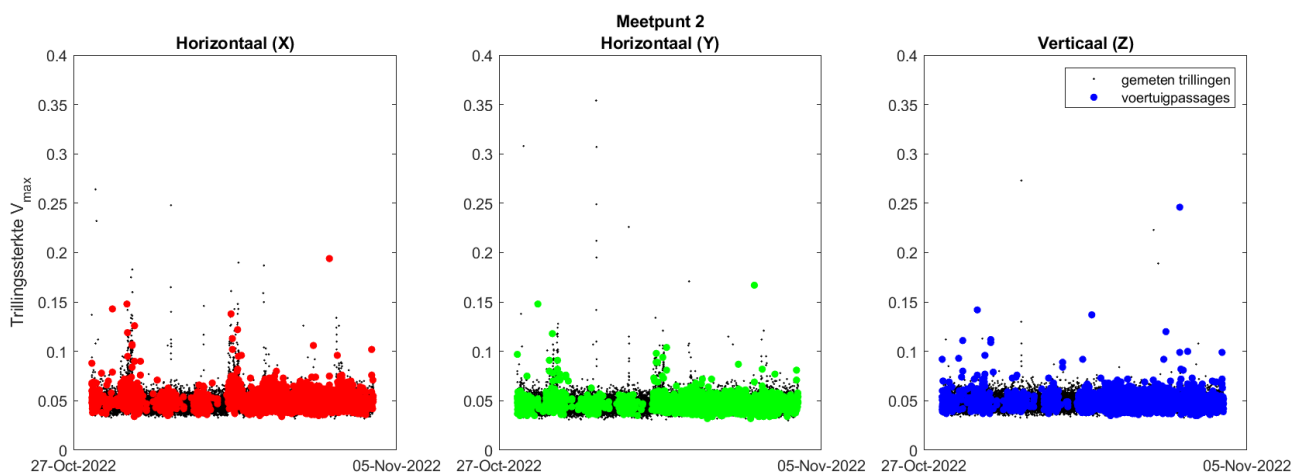


VERWACHTE TRILLINGEN IN DE WONINGEN

4.1. MEETRESULTATEN

Alcedo heeft metingen uitgevoerd op twee punten op maaiveld. De trillingen op meetpunt 2 (het dichtst bij de doorgaande spoorlijn), zijn weergegeven in Figuur 6. Overige gegevens uit de metingen hebben we opgenomen in bijlage III. In Figuur 6 valt het volgende op:

- De trillingen zijn maatgevend in verticale Z-richting. De hoogste trillingen worden veroorzaakt door goederentreinen. De trillingen zijn tot op grote afstand voelbaar door de lage trillingsfrequenties, die slecht uitdempsen met de afstand. Een goederentrein vanuit de richting Amsterdam geeft een sterk afwijkende trillingssterkte.
- De trillingen van reizigerstreinen zijn over het algemeen laag door de lage rijsnelheid en de grote afstand tot het spoor.



Figuur 6 Gemeten trillingen op maaiveld bij meetpunt 1

4.2. TRILLINGEN IN GEPLANEDE NIEUWBOW

De geplande bebouwing is gemodelleerd op basis van de beschouwde varianten. Voorbeelden van het (frequentie-afhankelijke) gedrag van de geplande bebouwing zijn weergegeven in bijlage II. Met deze resultaten is bepaald in welke mate de trillingen worden versterkt tussen de huidige meetpunten en de vloeren in de toekomstige woningen. Met deze overdrachten is op basis van de meting bepaald wat de trillingen in de toekomst zullen zijn. Deze resultaten zijn weergegeven in Tabel 4, samen met een beoordeling van de trillingen. Overschrijdingen van de streefwaarden zijn **oranje** gearceerd, mogelijke overschrijdingen zijn **geel** gearceerd.

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

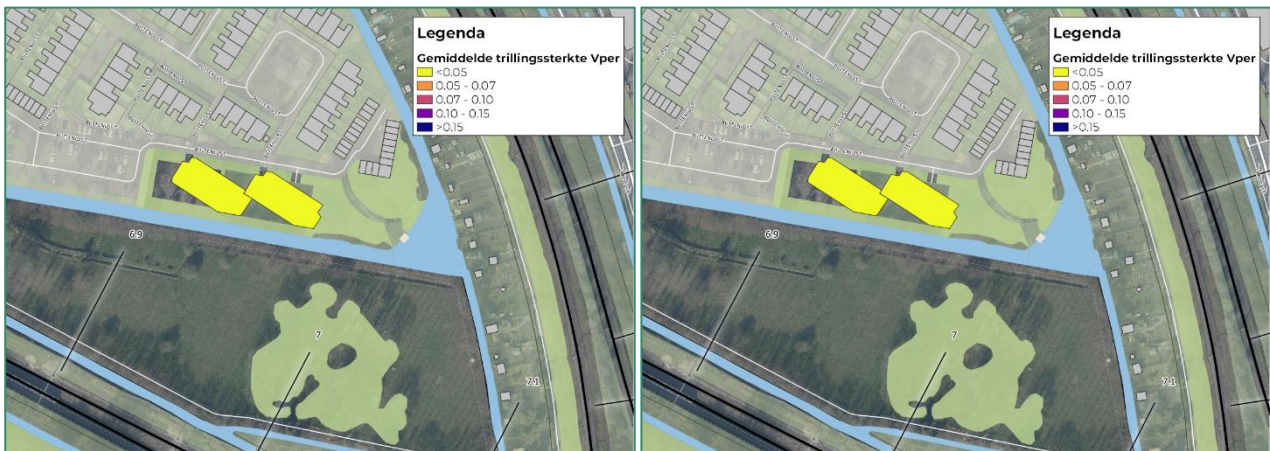
Bouwdeel	V _{max, dag}	V _{max, nacht}	V _{per}	Beoordeling
12.5 meter hoog	0.3 – 0.4	0.2 – 0.3	0.01 – 0.03	Voldoet mogelijk niet
18.5 meter hoog	0.4 – 0.5	0.3 – 0.4	0.01 – 0.03	Voldoet niet

De resultaten (bovengrens van de trillingen) hebben we grafisch weergegeven in Figuur 7 en Figuur 8. Een beoordeling van de trillingen is weergegeven in Figuur 9.

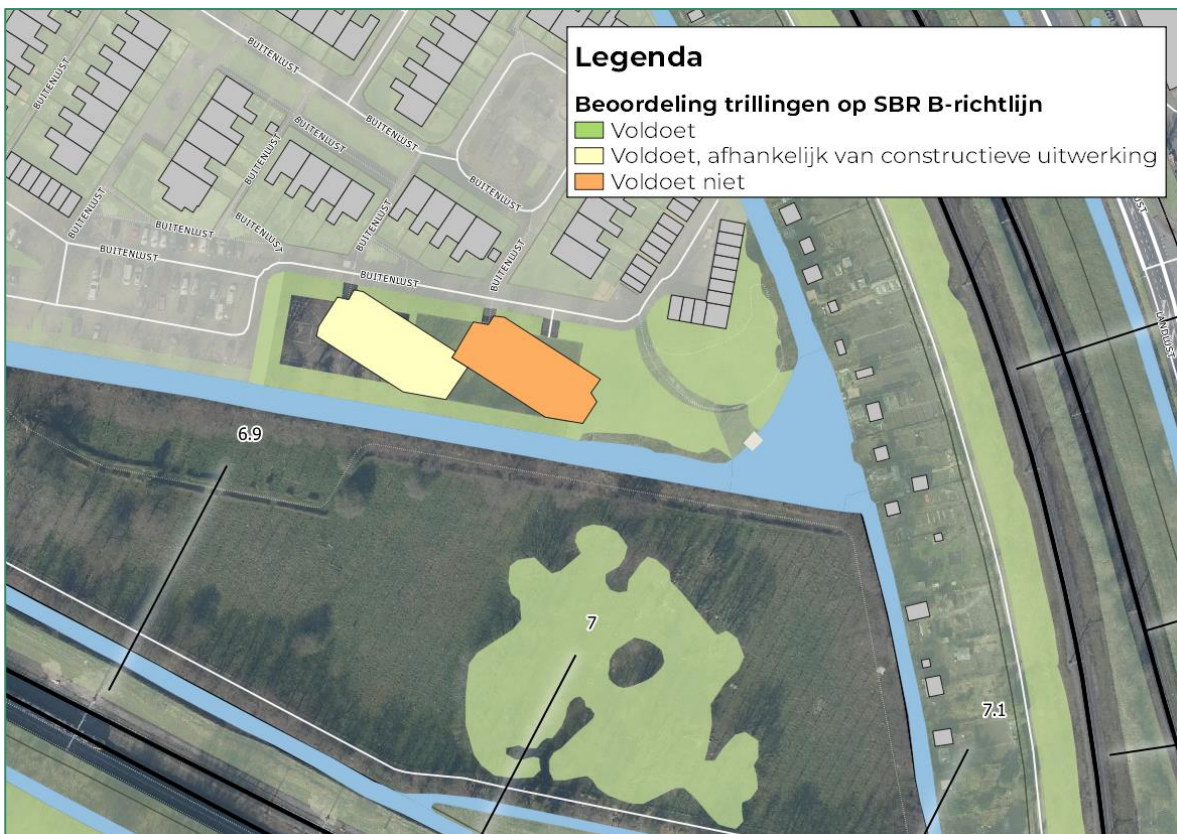




Figuur 7 Trillingssterkte V_{max} tijdens dag en avond (links) en in de nacht (rechts)



Figuur 8 Gemiddelde trillingssterkte V_{per} tijdens dag en avond (links) en in de nacht (rechts)



Figuur 9 Beoordeling van de trillingen

Samengevat geldt het volgende:

- In het hogere bouwdeel zijn de trillingen hoger dan in het lagere bouwdeel. Dat komt doordat het gebouw door de grotere hoogte wat gevoeliger is voor de laagfrequente trillingen van de goederentreinen. Deze trillingen dempen slecht uit met de afstand, de grotere afstand tot het spoor heeft daardoor maar weinig effect.
- De trillingen van de spoorlijn Watergraafsmeer – Duivendrecht/Weesp zijn lager dan de streefwaarden: het gaat hier om rangeerverkeer op lage rijsnelheid. Ook de reizigerstreinen en de meeste goederentreinen op de spoorlijn Amsterdam – Weesp hebben trillingen onder de streefwaarden. Incidenteel passeren echter zware goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte, die zorgen voor overschrijdingen van de streefwaarden.
- In een in het werk gestorte betonnen constructie zijn de trillingen door de hogere stijfheid en demping zo'n 5 tot 10 procent lager dan in een prefab betonnen constructie. Het lagere bouwdeel voldoet bij een in het werk gestorte constructie, maar niet bij een prefab betonnen constructie.
- Een zwaardere fundering zorgt voor een forse afname van de trillingen.

Omdat er overschrijdingen van het beoordelingskader mogelijk zijn, wordt in het volgende hoofdstuk aandacht besteed aan maatregelen.





MAATREGELEN



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

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



MITIGERENDE MAATREGELEN

Door de passage van goederentreinen zijn overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder mogelijk. 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 als *matige hinder*. Vervolgens geeft deze bijlage aan dat matige hinder kan worden geaccepteerd onder een aantal voorwaarden:

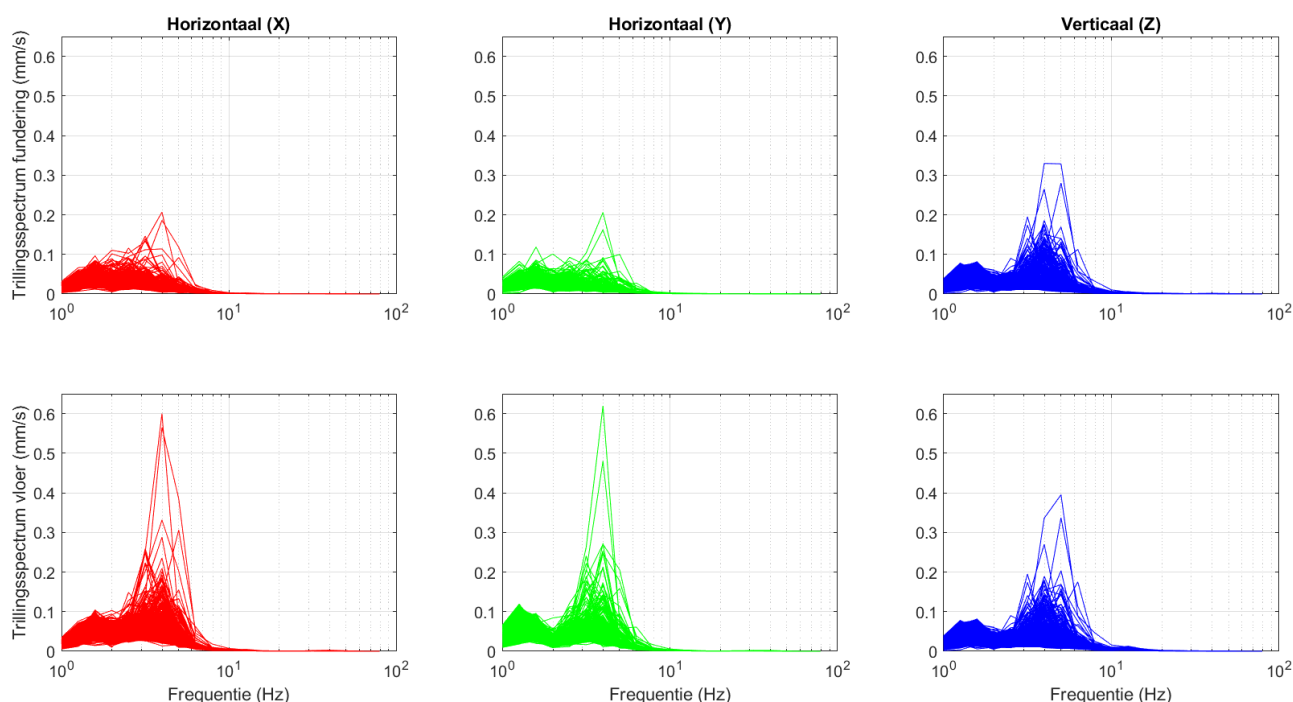
1. De mate waarin de trillingssterkte voorkomt. Hiervoor geldt dat de gemiddelde trillingssterkte V_{per} een goede indicatie is. De gemiddelde trillingssterkte is met een maximale waarde van 0.03 ruim lager dan de streefwaarde (0.05). Het gaat bovendien om een beperkt aantal overschrijdingen: maximaal 2 per week, dus een beperkt aantal overschrijdingen.
2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. Hiervoor geldt dat de trillingen van wegverkeer lager zijn dan van het treinverkeer. Van een maskerend effect is dus geen sprake.
3. De mogelijkheid tot het treffen van reducerende maatregelen. Het is conform bestaande jurisprudentie gebruikelijk om hierbij een afweging te maken tussen de kosten en het effect van de maatregelen, maar ook aspecten als duurzaamheid en impact op de omgeving kunnen worden meegenomen in deze afweging.

Gelet op bovenstaande dient een afweging plaats te vinden waarbij maatregelen worden afgewogen op doelmatigheid (kosten vs. effect). Daarom gaan we hierna in op maatregelen om de trillingen te reduceren. Om effectieve maatregelen te treffen, stellen we eerst vast bij welke trillingsfrequenties vooral hoge trillingen optreden. Daarna gaan we in op maatregelen die mogelijk zijn aan de trillingsbron (de trein of het spoor), maatregelen in de bodem en maatregelen aan het gebouw. Daarbij bespreken we ook bouwkundige optimalisaties.

5.2. ANALYSE RESULTATEN

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

Uit Figuur 11 volgt dat de hoogste trillingen optreden in de horizontale richtingen. De trillingen zijn vooral hoog tussen 3 en 5 Hz. Het gaat om relatief laagfrequente trillingsgolven, afkomstig van goederentreinen, die in het gebouw worden versterkt door buiging en rotatie van het gebouw. Maatregelen en optimalisaties moeten vooral effectief zijn tegen de trillingen bij die frequenties. In de volgende subparagrafen wordt ingegaan op mogelijke maatregelen aan de trillingsbron, in de bodem of aan de gebouwen.



Figuur 10 Verwachte trillingen op fundering (boven) en op hoogste verdieping (onder)

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). De meeste effectieve maatregel aan het spoor is het toepassen van een betonplaat met ballastmat onder het spoor. Veel andere maatregelen aan het spoor zijn niet effectief of niet inpasbaar: goedkopere maatregelen zoals under sleeper pads en ballastmatten hebben onvoldoende effect tegen de laagfrequente trillingen van de goederentreinen, en verlagen van de rijnsnelheid is op dit drukke traject niet mogelijk.

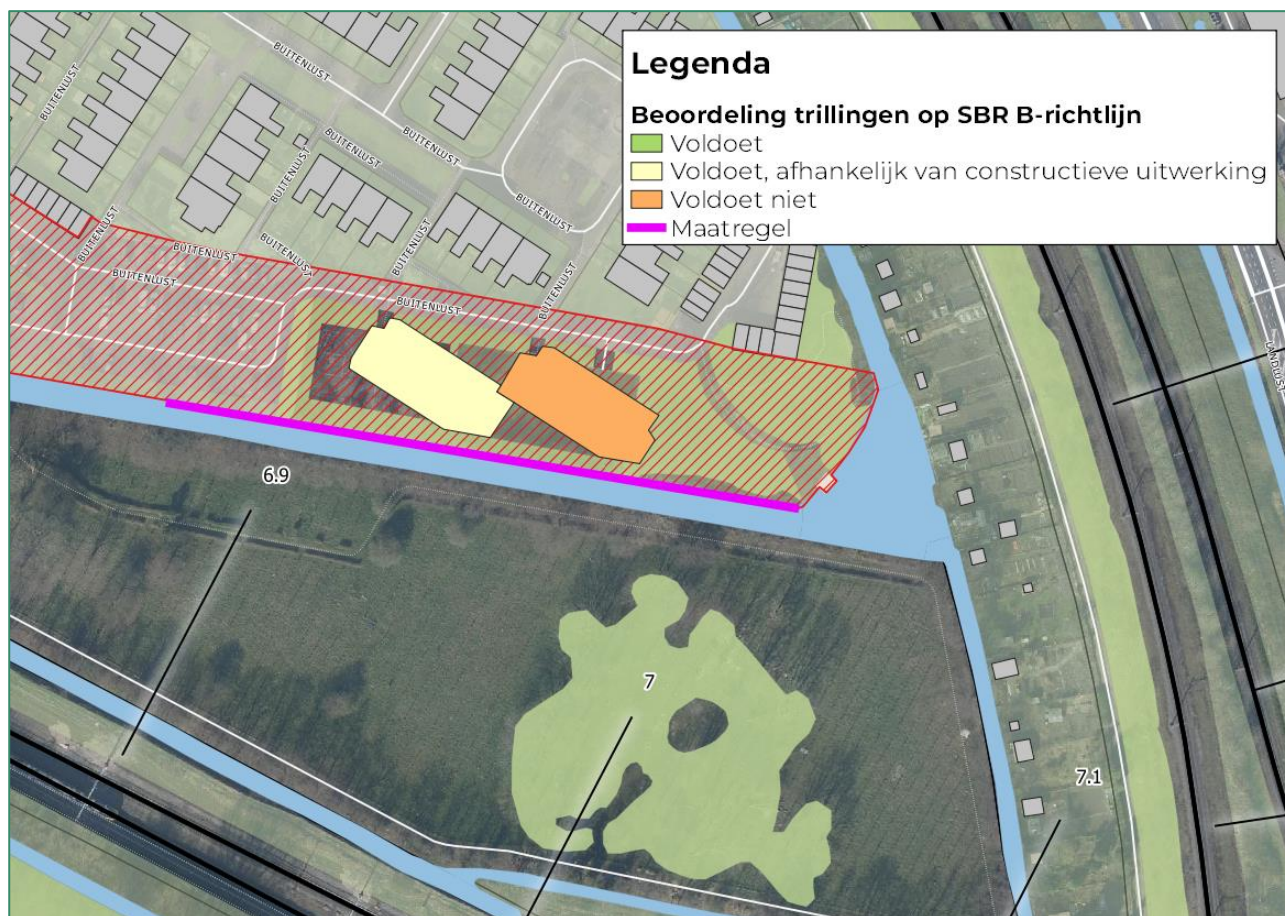
Nadeel van maatregelen aan het spoor zijn de hoge kosten hiervan (m.n. doordat een buitendienststelling nodig is), bovendien vallen deze maatregelen buiten het plangebied. De betonplaat met ballastmat moet worden toegepast onder beide doorgaande sporen, over een lengte van 450 meter per spoor. De kosten van deze maatregel bedragen ca. € 4.3 tot € 6.9 mln², wat neerkomt op meer dan € 110.000 per appartement met een mogelijke overschrijding. Kosten voor tijdelijk vervoer van treinreizigers en herstel van de omgeving zijn hierin niet meegenomen. Maatregelen in het spoor zijn daarmee ruim 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. De dubbele waterpartij tussen spoor en bebouwing dempt de trillingen echter al fors, aanvullende trillingsschermen hebben daarom maar zeer beperkt effect. Voorbeelden van trillingsschermen zijn schermen van piepschuim (EPS), beton, een damwand, jet-grout (soil-mix methode voor beton) of het fors verdiepen van de waterpartij. Nadeel van deze maatregelen is dat deze vaak hoge kosten met zich meebrengen en dat ze niet of slecht aanpasbaar zijn aan toekomstige situaties.

² Ter indicatie: ProRail hanteert bij doelmatigheidsafwegingen een bedrag van € 47.000 per adres

Om de gebouwen af te schermen is een trillingsscherm nodig op de zuidelijke perceelgrens, over een lengte van 150 meter, zie Figuur 11.



Figuur 11 Locatie van mogelijk trillingsscherm

De diepte van een scherm moet, gezien de dominante trillingsfrequenties, voor veel schermtypes minimaal 25 meter 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)	10 – 20%	€ 4.0 – 6.1 mln
Jet-grout wand	5 – 15%	€ 3.1 – 4.9 mln
Damwand (intrillen)	0 – 5%	€ 2.0 – 3.1 mln
Betonnen wand, bekleed met rubber	15 – 30%	€ 4.8 – 7.4 mln
Damwand met EPS (piepschuim)	5 – 20%	€ 3.0 – 4.6 mln
Damwand met sleuf (luchtspouw)	5 – 15%	€ 4.0 – 6.2 mln

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

Maatregel	Effect	Kosten ³
L-wand 4.0 m diep	0 – 5%	€ 0.2 – 0.4 mln
CSM-wand (Cutter Soil Mix of Mix-In-Place)	0 – 5%	€ 2.2 – 3.5 mln
Trillingsscherm EPS (piepschuim), 1 m dik, 5.0 m diep	0 – 5%	€ 0.4 – 0.7 mln
Verdiepen waterpartij naar 5 meter	10 – 15%	€ 0.2 – 0.4 mln

Om te voldoen aan het beoordelingskader is minimaal 25% afname van de trillingen nodig, mits het gebouw via in het werk gestort beton wordt gerealiseerd. Bij een prefab betonnen constructie is een hoger reductiepercentage nodig.

De enige maatregel die mogelijk voldoende effectief is, is een betonnen keerwand van 25 meter diep en 0.5 meter breed, bekleed met 100 mm dik rubber of 1000 mm EPS (piepschuim) tot 10 meter onder maaiveld. Deze maatregel kost tussen de € 4.8 en € 7.4 mln, en is daarmee nog kostbaarder dan maatregelen aan het spoor. Bovendien, ook met deze maatregel is er nog een kans dat niet wordt voldaan aan het beoordelingskader.

5.5. MAATREGELEN AAN DE GEBOUWEN

Tenslotte zijn ook maatregelen of verdere optimalisaties aan de bebouwing mogelijk. Het globale effect en de kosten van de mogelijke maatregelen aan de gebouwen zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Mogelijke maatregelen aan de gebouwen

Maatregel	Effect	Kosten ⁴
Stijvere constructie (in het werk gestort beton i.p.v. prefab beton)	5 – 10%	< 1% SK
Hogere sterkteklasse beton (bijv. C50/60 of C55/67 i.p.v. C30/37)	5 – 10%	< 4% SK
Dikkere wanden	5 – 10%	< 2% SK
Zwaardere vloer toepassen (dikker)	0%	< 2% SK
Inpakken van de fundering met 150 mm rubber	0%	€ 0.4 – 0.7 mln.
Afschermen van de fundering met 1 m dik EPS	0 - 5%	€ 0.3 – 0.4 mln.
Aanbrengen van stalen veerdozen tussen fundering ($f_e \leq 3$ Hz)	0%	4 – 7% SK
Zwaardere fundering (dikkere, langere palen)	10 – 25%	3 – 5% SK

Meest effectief is het fors verzwaren van de fundering, bijvoorbeeld door gebruik te maken van langere, dikkere palen. Een paallengte van 25 meter met een diameter van 500 mm zorgt bijvoorbeeld voor 20 tot 25 procent lagere trillingen ten opzichte van een paallengte van 12 meter bij een diameter van 400 mm. Andere optimalisaties, zoals in het werk gestort beton i.p.v. prefab beton, en een zwaarder, stijver betonskelet, zorgen ook voor een afname van de trillingen, maar het effect is dan beperkter.

⁴ SK = Stichtingskosten

5.6. ADVIES VOOR MAATREGELEN

In de geplande bebouwing zijn incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder niet uit te sluiten. De hoge trillingen worden veroorzaakt door goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte, de trillingen van reizigerstreinen en de meeste goederentreinen voldoen wel aan de streefwaarden voor trillingshinder. Het gaat daardoor om maximaal 2 overschrijdingen per week, dus ruim minder dan 1 per dag. Hierbij geldt dat het verder van het spoor gelegen, maar hogere bouwdeel wat gevoeliger is voor trillingen dan het lagere bouwdeel.

Vervolgens is een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. Uit dit onderzoek volgt dat maatregelen aan het spoor (hoewel effectief) niet doelmatig zijn (kosten bedragen meer dan € 110.000 per appartement met een overschrijding), maatregelen in de bodem (trillingsschermen) zijn nog kostbaarder, en mogelijk onvoldoende effectief. Met maatregelen aan de gebouwen zijn de trillingen wel te reduceren tot onder de streefwaarden.

Op basis van het maatregelenonderzoek adviseren we om het volgende af te wegen in de verdere uitwerking van het project:

1. Is het mogelijk om de **fundering** van het gebouw te verzwaren? Zo zorgt een paallengte van 25 meter voor zo'n 20 procent lagere trillingen vergeleken met een paallengte van 12 meter. Ook een grotere paaldiameter zorgt voor lagere trillingen.
2. Is het mogelijk om het gebouw te realiseren via **in het werk gestort beton**? Een in het werk gestorte betonnen constructie (via tunnelbouwmethode) is stijver en kent meer demping, waardoor de trillingen lager zijn.
3. Is het mogelijk om de **wanden** van (met name het hogere bouwdeel) wat zwaarder te construeren? Denk hierbij aan dikkere wanden, of een hogere betonkwaliteit (C50/60 of C55/67 i.p.v. C30/37).

Alleen met een combinatie van al deze maatregelen zijn ook de incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder te voorkomen. Als tijdens de verdere uitwerking blijkt dat deze maatregelen niet haalbaar zijn (vanwege bijvoorbeeld technische risico's of kostenoverwegingen), dan kan worden gemotiveerd dat ook zonder maatregelen geen onaanvaardbaar woon- en leefklimaat ten aanzien van trillingshinder ontstaat in de woningen. Het beoordelingskader voor trillingshinder, de SBR B-richtlijn, biedt de mogelijkheid tot het maken van een dergelijke afweging, mits goed gemotiveerd. Met een beroep op bijlage 5 van de SBR B-richtlijn kunnen hierbij de volgende argumenten worden gebruikt:

- Er is sprake van *matige hinder*, een situatie die volgens bijlage 5 van de SBR B-richtlijn kan worden geaccepteerd als er sprake is van een beperkt aantal overschrijdingen (zoals in dit geval) en maatregelen niet goed zijn te treffen (bijvoorbeeld vanwege forse technische risico's of hoge kosten).
- Er is sprake van een beperkt aantal overschrijdingen. Het gaat om minder dan 1 overschrijding per dag. Bovendien voldoet de gemiddelde trillingssterkte V_{per} ruimschoots aan de streefwaarden, een indicatie dat het om een beperkt aantal passages met hogere trillingen gaat.
- De trillingen voldoen weliswaar niet aan de strenge streefwaarden voor nieuwbouw, maar wel aan de soepeler streefwaarden voor bestaande bouw. In die laatste streefwaarden is een zeker gewinningseffect meegenomen.



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

5.7. ONZEKERHEDEN IN HET ONDERZOEK

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

- Ten aanzien van de trillingsbron: de natuurlijke variatie als gevolg van spooronderhoud en de temperatuur kunnen zorgen voor zo'n 30% variatie in de trillingen, afhankelijk van de spoorconstructie en de bodemopbouw. Er is gemeten in een klimatologisch als normaal te typeren periode. Er is geen informatie bekend over de huidige status van de spoorligging. Door te meten op meerdere punten hebben we variaties waar mogelijk meegenomen in de analyse en berekeningen. Er is op basis van bovenstaande informatie geen reden om te twijfelen aan de representativiteit van de berekeningen voor de toekomstige trillingen.
- Ten aanzien van de bodem geldt dat met name op korte afstand tot het spoor variaties in de trillingen mogelijk zijn door lokale variaties in de bodem. Door op meerdere punten te meten is de invloed van deze variaties meegenomen in de berekeningen. Bovendien is op grotere afstand van het spoor gemeten. De invloed van de onzekerheid in de bodem is daarmee meegenomen in de analyse, de impact op de resultaten is daardoor beperkt.
- Ten aanzien van de gebouwen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en definitief ontwerp). Bovendien is het dynamische gedrag van bijvoorbeeld beton afhankelijk van de mate van gescheurdheid van het beton en zijn er natuurlijke variaties in materiaalgedrag (van bijvoorbeeld hout, metselwerk en beton). In de berekeningen is gerekend met een verwachtingswaarde van de trillingen op basis van een aan de hand van praktijkmetingen 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 (nr. B32A0119) is weergegeven in Figuur 12. De bodem is vooral opgebouwd uit veen- en kleilagen. In dit soort bodems zijn laagfrequente trillingen vaak dominant, wat ook in de resultaten van het onderzoek is te zien.

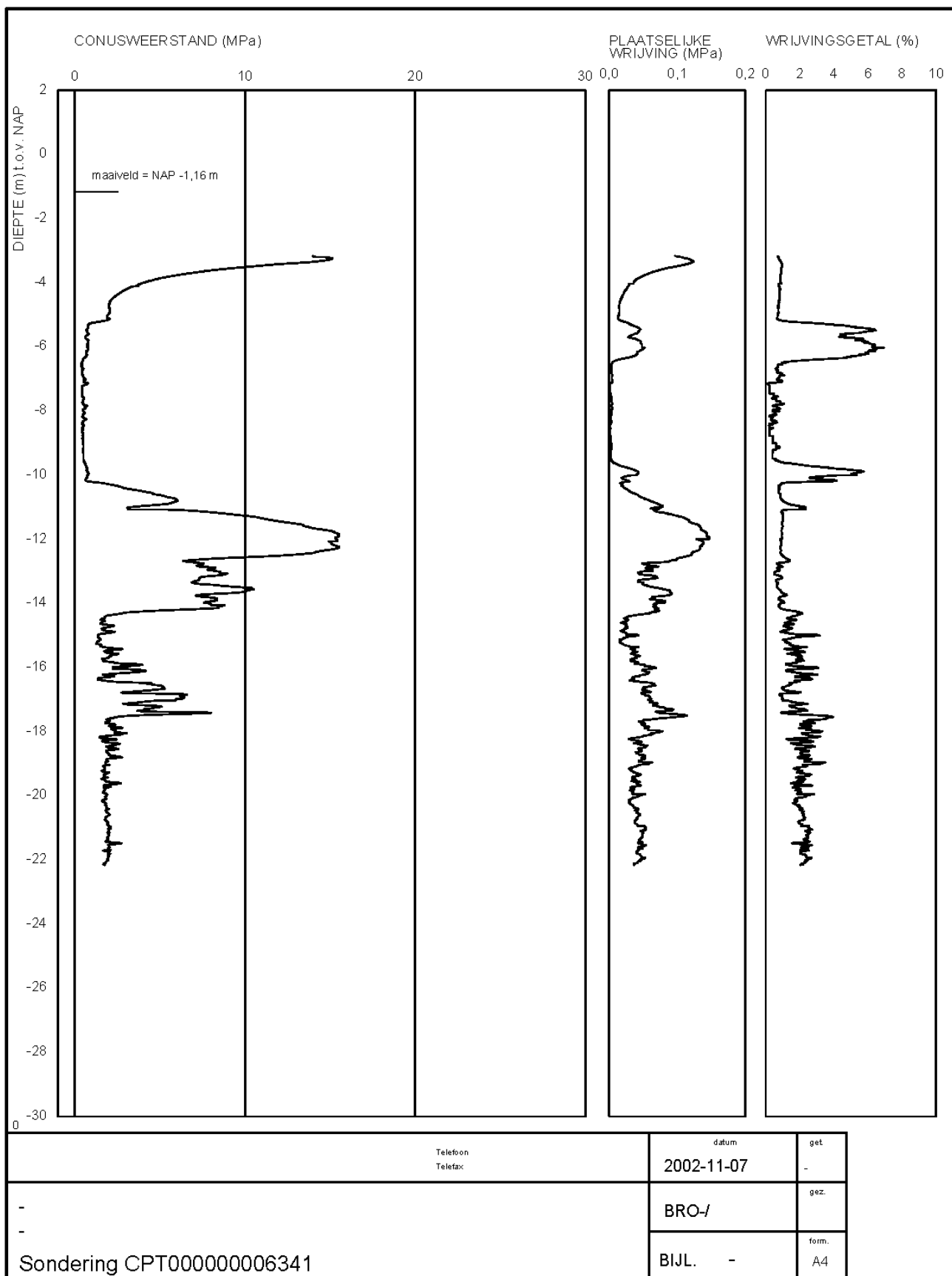
Boormonsterprofiel



Figuur 12 Boring nabij het onderzoeksgebied

Een representatieve sondering uit de nabijheid van het onderzoeksgebied, waarin onder meer de conusweerstand te zien is, is weergegeven in Figuur 13. Ook hier is de slappe bodemopbouw te zien.



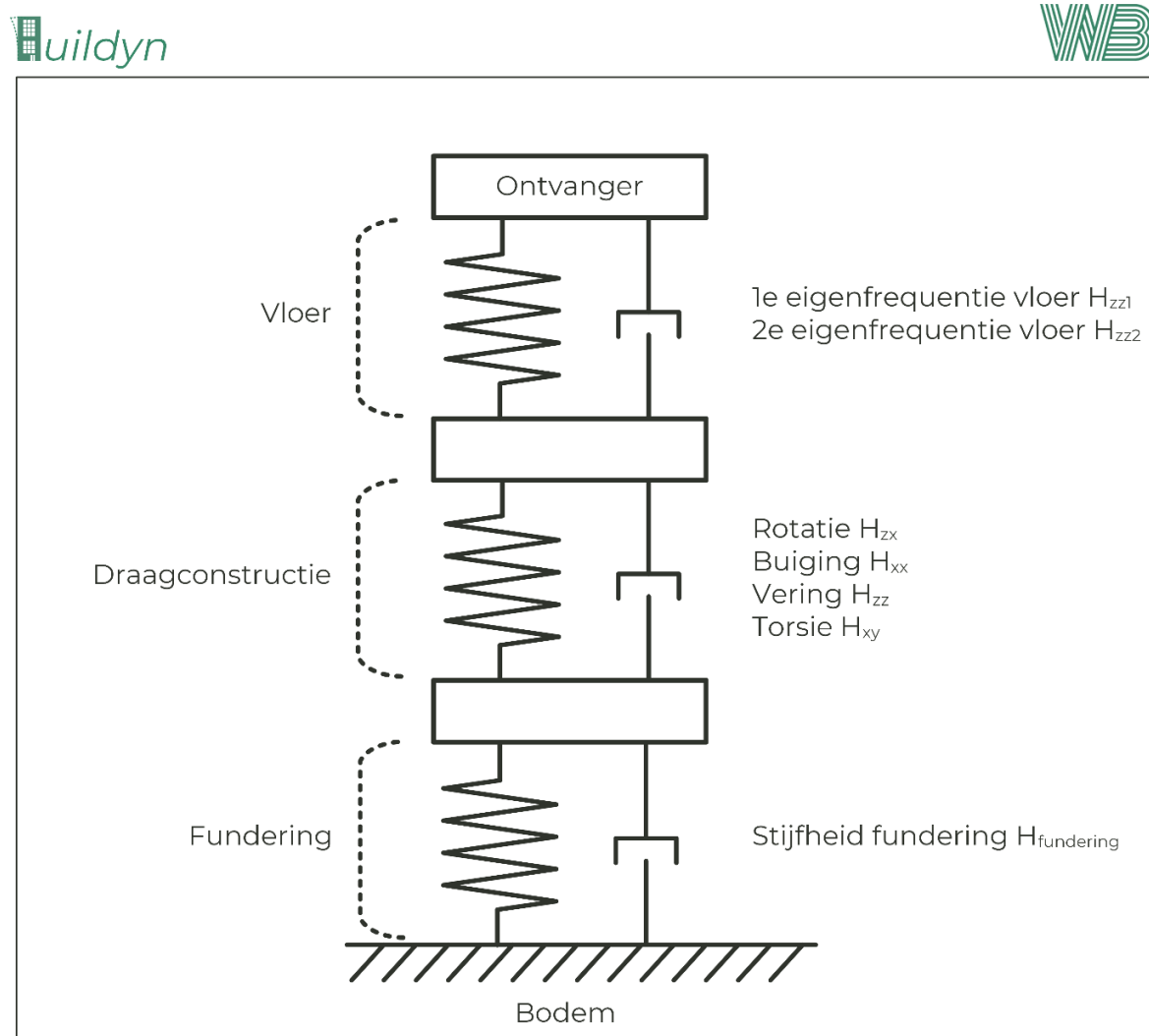


Figuur 13 Sondering nabij het onderzoeksgebied

III GEBRUIKT REKENMODEL

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van het rekenmodel Buildyn om de trillingen in de geplande bebouwing te berekenen. In Buildyn wordt de dynamische responsie van een gebouw berekend met behulp van een beam-element model (BEM). Buildyn is met behulp van een slim algoritme gekalibreerd met meer dan 600 praktijkmetingen. Uit evaluatiemetingen blijkt dat het model hierdoor een nauwkeurigheid heeft die vrijwel altijd significant beter is dan een Eindige Elementenmodel. Dat komt doordat de resultaten van het Buildyn-model gebaseerd zijn op werkelijke (as-built) data, terwijl een Eindige Elementenmodel zeer gevoelig is voor de gebruikte input t.a.v. bijv. demping en stijfheden. Qua detailniveau, zoals omschreven in de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* (Tabel 10.3), gaat het om een model op niveau IV: een 3D-model, mits lokale onderdelen (zoals uitkragingen) zijn mee gemodelleerd omdat de empirische praktijkdata hierop minder nauwkeurig is.

In Buildyn wordt een gebouw gemodelleerd door middel van gekoppelde massa-veersystemen, zie Figuur 14. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 14, 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.



Figuur 14 Principe van Buildyn met een gebouw als gekoppeld massaveersysteem. Rechts de verschillende componenten van het rekenmodel

FUNDERING

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

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

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

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

DRAAGCONSTRUCTIE

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

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

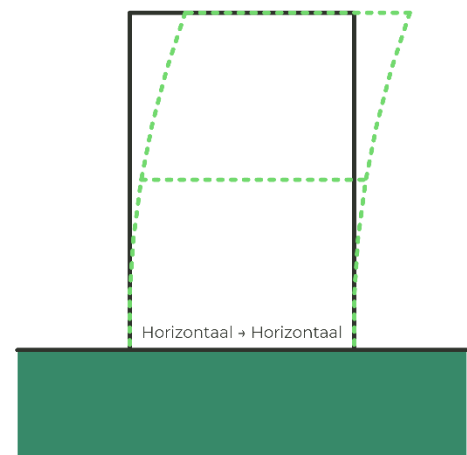
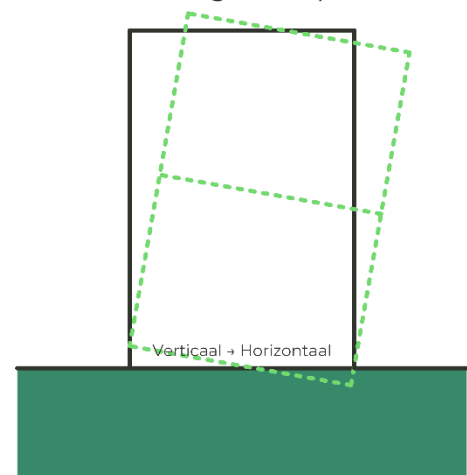
Dit effect noemen we H_{zx} , en is afhankelijk van:

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

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

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

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

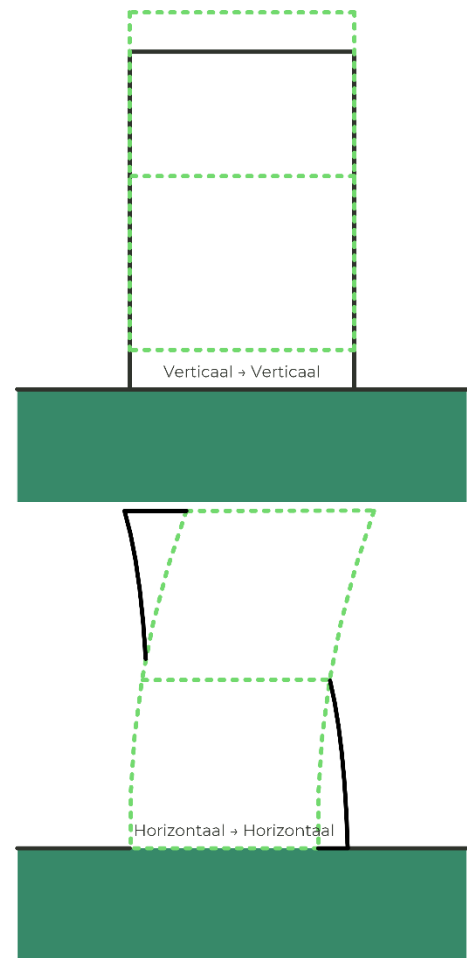


Het derde principe, dat van vering van het gebouw op zijn fundatie, is rechts weergegeven. Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappe onderlaag of lokaal slappere elementen (denk aan kolommen en balkenstructuren). Dit effect noemen we H_{zz} , en is afhankelijk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

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

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

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



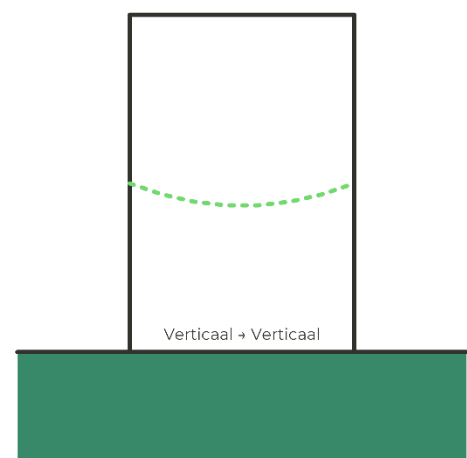
VLOEREN

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

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

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

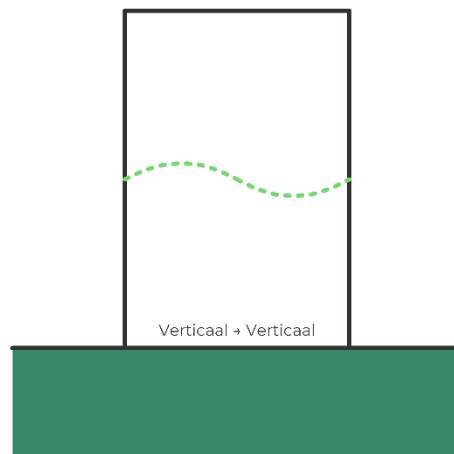
- » Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- » Afmetingen van de vloer
- » Type oplegging



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

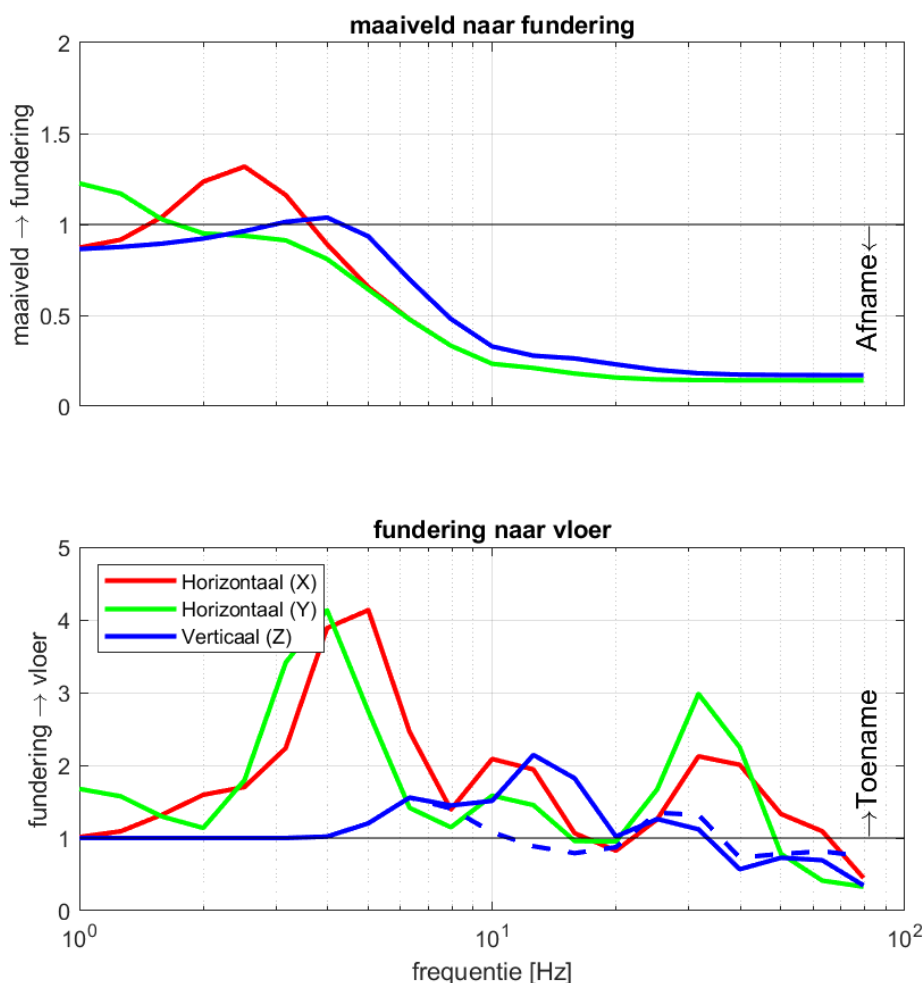
Dit effect noemen we H_{zz2} , en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1} .

Uiteindelijk zorgen alle 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 voor een appartement op de bovenste verdieping van het hoogste bouwblok weergegeven in Figuur 15.

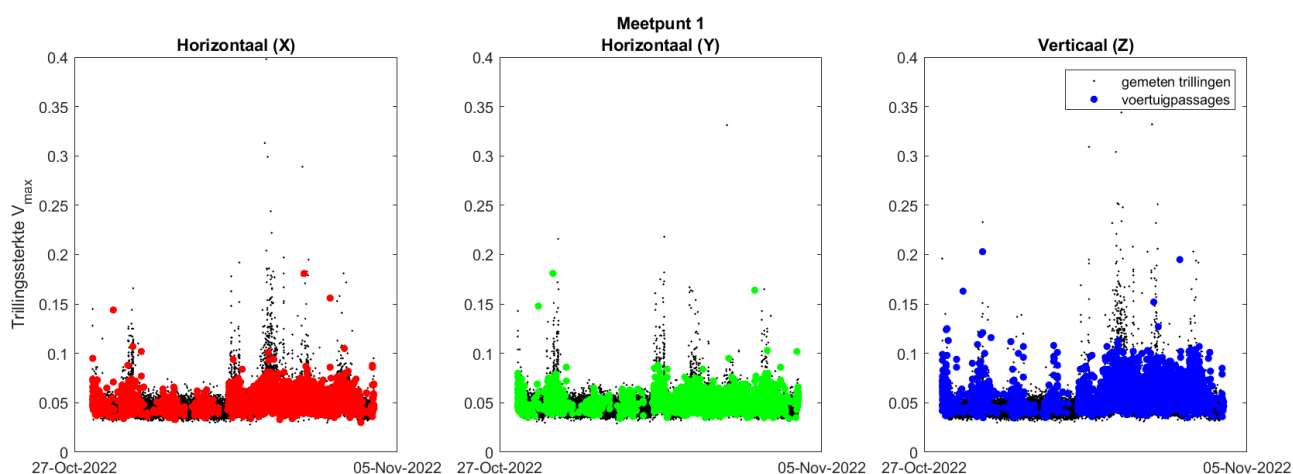


Figuur 15 Rekenresultaten voor appartement op bovenste verdieping, doorgetrokken lijn is midden vloerveld, onderbroken lijn is op $\frac{1}{4}$ van de overspanning

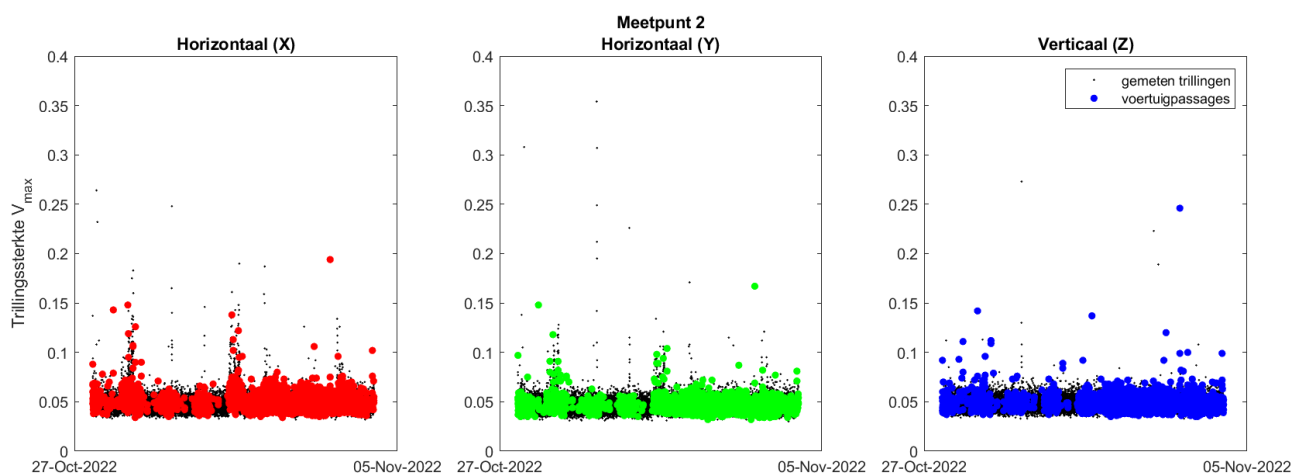


RESULTATEN METINGEN

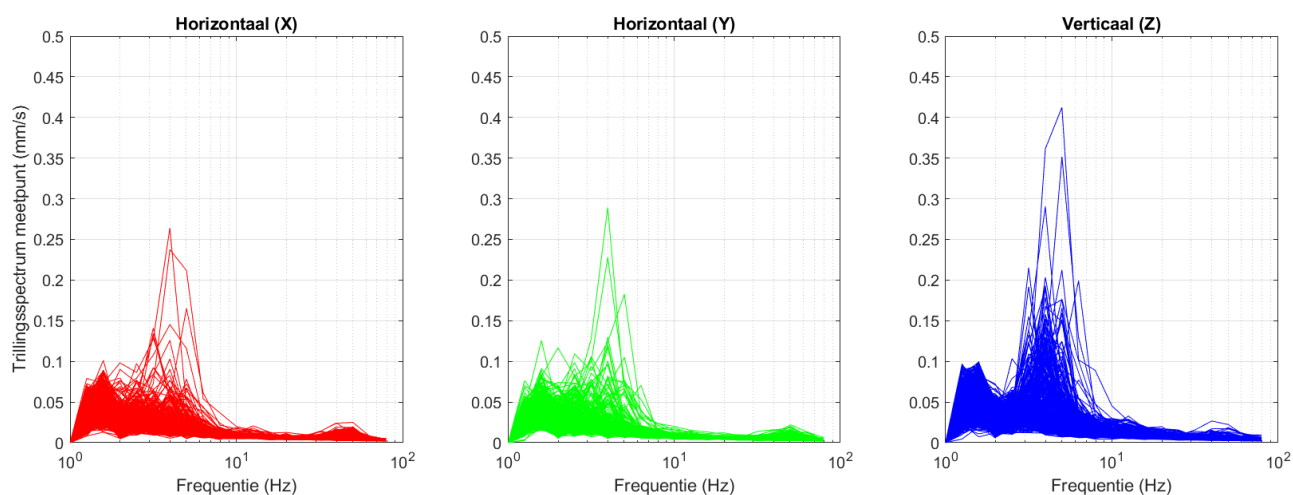
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



Figuur 16 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (maaveld, nabij spoorlijn Watergraafsmeer – Duivendrecht / Weesp)

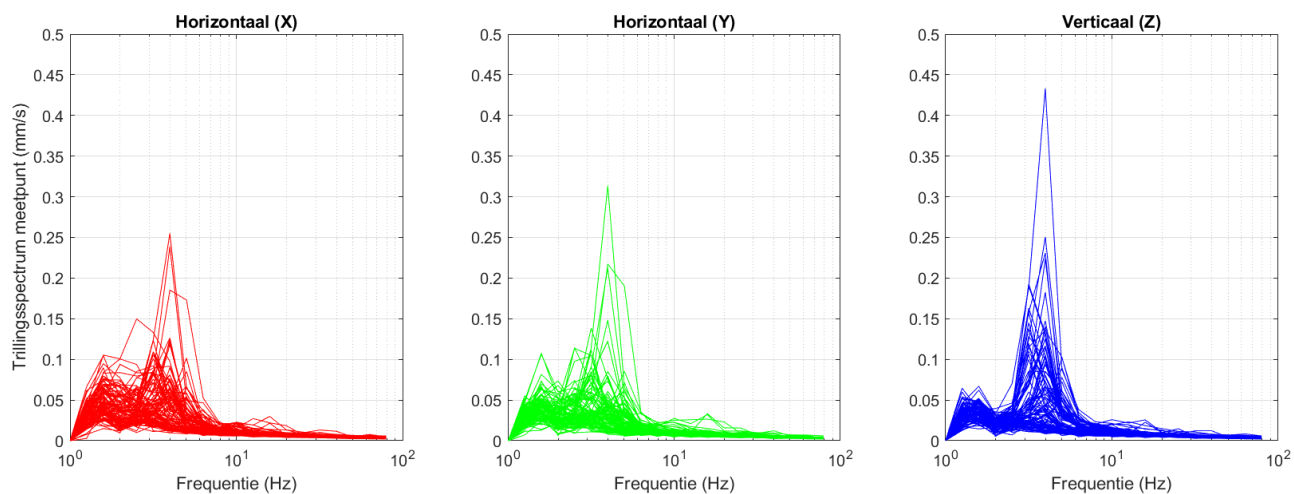


Figuur 17 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (maaveld, nabij spoorlijn Amsterdam – Weesp)



Figuur 18 Tertsbandspectra bij meetpunt 1





Figuur 19 Tertsbandspectra bij meetpunt 2