

WEEBOOST



TRILLINGSONDERZOEK T.B.V. NIEUWBOUW

**KOP VAN DE
HANDELSKADE**

COLOFON

Auteur Thijmen van der Veen
thijmen@we-boost.nl

Controle en vrijgave Pieter Boon
pieter@we-boost.nl
+31 6 10 03 94 54

Projectcode *WBD2022-012*

Versienr *2.0*

Datum *28 april 2022*

Status *Definitief*

Opdrachtgever *Explorius*



Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van metingen van

ALCEDO 

© 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

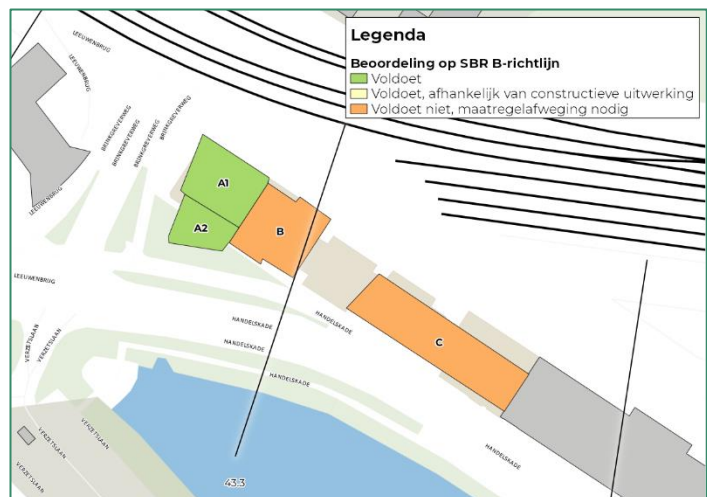
Aan de Handelskade in Deventer wordt nieuwbouw ontwikkeld. De bestaande bebouwing wordt gesloopt en vervangen door bebouwing met een woon-, kantoor- en horecafunctie. Het plangebied bevindt zich ten westen van de spoorlijn Deventer – Almelo/Zutphen. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet op voorhand worden uitgesloten. In 2017 is door Alcedo onderzoek verricht naar trillingshinder, hierop is een advies uitgebracht door de Omgevingsdienst met het verzoek om het onderzoek te actualiseren op de volgende onderdelen:

1. Onderzoek uitvoeren conform de in 2019 verschenen Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen.
2. Onderzoek actualiseren o.b.v. ontwikkelingen van het plan.
3. Betrekken van de Omgevingswet (vermoedelijk van toepassing per 1-1-2023).

Doel van het voorliggende onderzoek is daarom om vast te stellen of er sprake zal zijn van trillingshinder in de nieuw te realiseren 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)). 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 in de bouwblokken met een kantoor- en horecafunctie wordt voldaan aan de streefwaarden uit het beoordelingskader voor trillingshinder, de SBR B-richtlijn. In de twee bouwblokken met een woonbestemming, blok B en C (zie figuur hiernaast) worden wel overschrijdingen van het beoordelingskader verwacht. Het gaat om een beperkt aantal overschrijdingen (2 per week, kan bij een toename van het aantal goederentreinen toenemen naar maximaal 1 per dag), veroorzaakt door zware goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte. De overschrijdingen treden vooral op op de hoger gelegen verdiepingen.



Omdat er overschrijdingen van het beoordelingskader worden verwacht, is onderzoek gedaan naar mitigerende maatregelen. Hierbij is zowel gekeken naar maatregelen aan het spoor, in de bodem als naar maatregelen aan het geplande gebouw.

AFWEGING VAN MAATREGELEN

Omdat overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder niet overal zijn uit te sluiten, is een maatregelafweging nodig. In dit onderzoek hebben we een groot aantal maatregelen en bouwkundige optimalisaties onderzocht.

Uit dit onderzoek volgt dat maatregelen aan het spoor en in de bodem gezien de hoge kosten niet doelmatig zijn. Verder geldt dat het gebouw al relatief zwaar geconstrueerd wordt, dit zorgt al voor relatief lagere trillingen. Verdere optimalisaties (zoals het verstijven van kolommen, balken en wandschijven of het toepassen van een hogere sterkteklasse van beton) hebben maar zeer beperkt effect op de trillingen.

Overschrijdingen van het beoordelingskader zijn alleen te voorkomen met één van de volgende maatregelen:

1. Het fors verzwaren van de fundering door de palen veel langer te maken (minimaal 65 meter lang, 750 mm dik (bijv. Tubex)). Nadelen van deze oplossing zijn:
 - a. Aanpassing brengt hoge kosten met zich mee.
 - b. Bestaand gebouw heeft ook een paalfundering, bij grotere paaldiameter conflicteren meer palen met bestaande paalfundering. Deze palen moeten dan getrokken worden, wat hoge kosten en risico's (breuk) met zich mee brengt. Technisch daarmee riskant.
 - c. Een paallengte van 65 meter gaat door het tweede watervoerende pakket heen (op ca. 50 meter diepte), is daarmee technisch risicovol en voor het Waterschap niet acceptabel.
2. Het afveren van de fundering door stalen veerdozen aan te brengen tussen de paalkoppen en de funderingsbalken, afgeveerd op een eigenfrequentie van maximaal 3 Hz. Nadelen van deze maatregel zijn:
 - a. Maatregel brengt zeer hoge kosten met zich mee (meer dan € 1.000.000 per bouwblok).
 - b. Bij bouwblok B ontstaat een risico op instabiliteit i.r.t. windhinder, gezien de lage eigenfrequentie van de afvering en de hoogte van het gebouw.
 - c. Constructief complex, gebouw moet worden losgekoppeld van overige bouwdelen, met risico op instabiliteit. Kosten van bouwkundige aanpassingen kunnen zeer hoog zijn.

Gezien de technische risico's en hoge kosten van maatregelen in relatie tot het beperkte aantal overschrijdingen, kan echter worden gemotiveerd dat deze maatregelen niet doelmatig zijn, omdat het plan dan (kosten)technisch niet uitvoerbaar wordt. Het beoordelingskader voor trillingshinder, de SBR B-richtlijn, biedt ook de mogelijkheid tot het maken van een dergelijke afweging, mits goed gemotiveerd. Ook zonder deze maatregelen kan daarom, met een beroep op bijlage 5 van de SBR B-richtlijn, worden gemotiveerd dat er geen onaanvaardbaar woon- en leefklimaat ontstaat in de geplande bebouwing. Argumenten daarvoor zijn:

- 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 (zoals hier, gezien de technische risico's en hoge kosten).



- Er is sprake van een beperkt aantal overschrijdingen. Het gaat om 2 overschrijdingen per week. Dit aantal kan in de toekomst, bij een toename van het aantal goederentreinen, toenemen naar minder dan 1 per dag. De overschrijdingen worden veroorzaakt door goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte. 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 uit de SBR B-richtlijn, maar wel aan de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties uit de SBR B-richtlijn. In de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties is een zekere mate van gewenning 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 de nieuwe woningen. Ook zonder maatregelen tegen trillingen ontstaat in de geplande bebouwing daarom geen onacceptabele situatie: de trillingen zijn daar immers (veel) lager dan in andere, al bestaande bebouwing rond deze locatie.



INHOUDSOPGAVE

I.	INLEIDING	9
1.1.	Aanleiding	9
1.2.	Doel	9
1.3.	Leeswijzer	10
2.	SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN	12
2.1.	Situatie	12
2.2.	Uitgangspunten	13
3.	BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE	16
3.1.	Trillingen en wetgeving	16
3.2.	De SBR-richtlijn	16
3.3.	Rekenmethode	17
4.	VERWACHTE TRILLINGEN	21
4.1.	Meetresultaten	21
4.2.	Trillingen in geplande bebouwing	21
5.	MITIGERENDE MAATREGELEN	25
5.1.	Nut en noodzaak van maatregelen	25
5.2.	Analyse resultaten	25
5.3.	Maatregelen aan de trillingsbron	26
5.4.	Maatregelen in de bodem	26
5.5.	Maatregelen aan de gebouwen	28
5.6.	Advies voor maatregelen	29
5.7.	Onzekerheden in het onderzoek	30
II.	GRONDONDERZOEK	32
III.	REKENMODEL	34



III. RESULTATEN METINGEN

38

IV. DETAILS MAATREGELEN

45

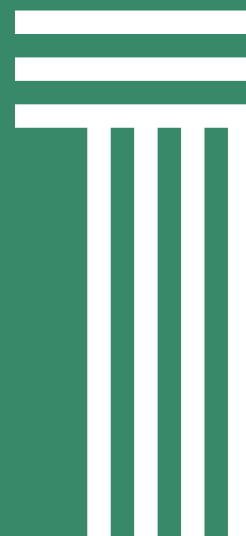




INLEIDING



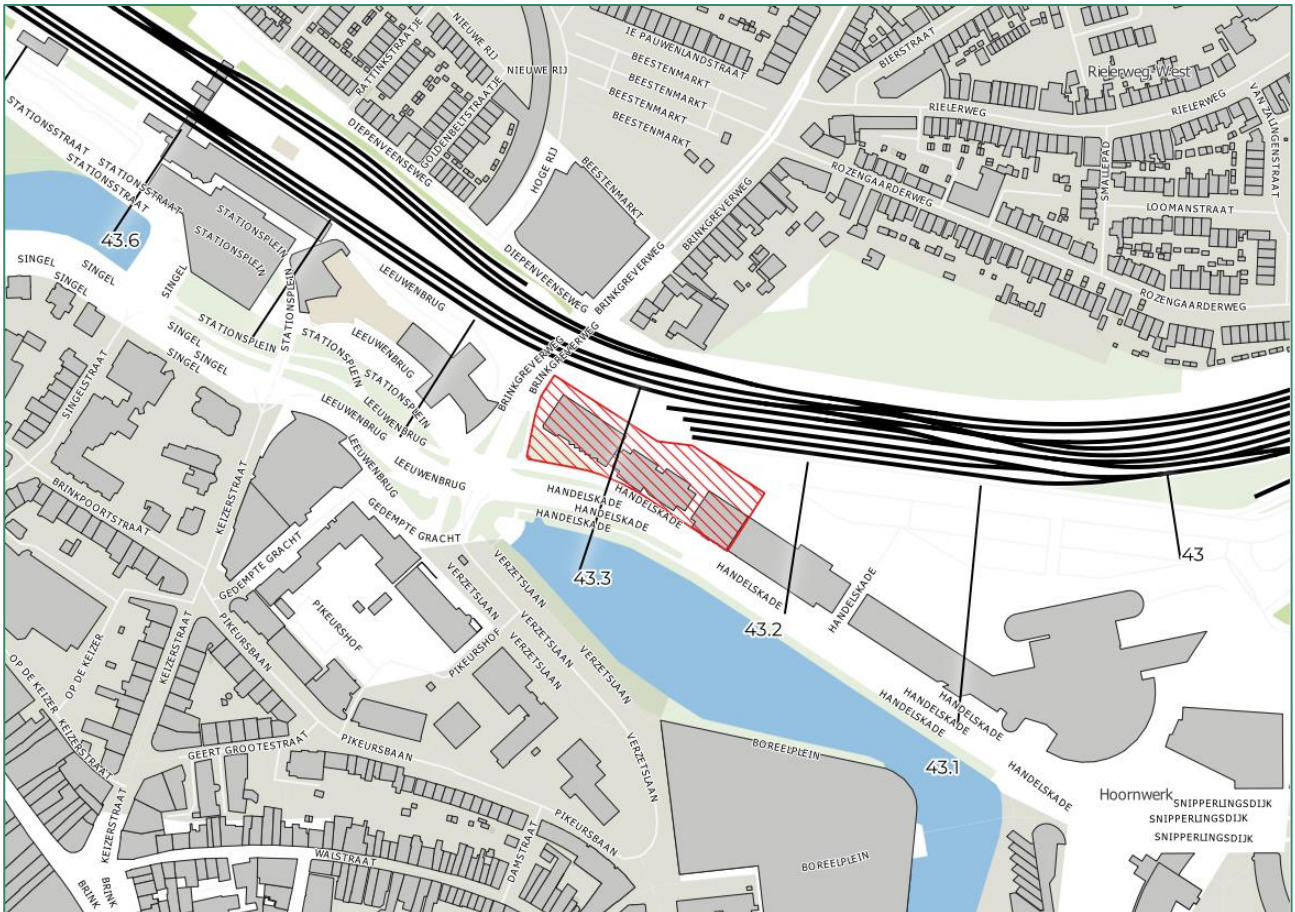
In dit hoofdstuk geven we een korte omschrijving van de inhoud van dit onderzoek: de aanleiding, het doel van het onderzoek en een beknopte leeswijzer om informatie snel te kunnen vinden.



INLEIDING

1.1. AANLEIDING

Aan de Handelskade in Deventer wordt nieuwbouw ontwikkeld. De bestaande bebouwing wordt gesloopt en vervangen door bebouwing met een woon-, kantoor- en horecafunctie. Het plangebied bevindt zich ten westen van de spoorlijn Deventer – Almelo/Zutphen, zie Figuur 1. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet op voorhand worden uitgesloten.



Figuur 1 Plangebied

In 2017 is door Alcedo onderzoek verricht naar trillingshinder, hierop is een advies uitgebracht door de Omgevingsdienst met het verzoek om het onderzoek te actualiseren op de volgende onderdelen:

1. Onderzoek uitvoeren conform de in 2019 verschenen Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen.
2. Onderzoek actualiseren o.b.v. ontwikkelingen van het plan.
3. Betrekken van de Omgevingswet (vermoedelijk van toepassing per 1-1-2023).

1.2. DOEL

Doel van dit onderzoek is om het eerdere onderzoek te actualiseren, en daarmee 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 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 mitigerende maatregelen.

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.



SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN

2.1. SITUATIE

Op de planlocatie, gelegen tussen het spoor en de Handelskade in Deventer, bevindt zich momenteel bebouwing met een kantoor- en horecafunctie. De bestaande bebouwing wordt gesloopt en vervangen door nieuwbouw met verschillende functies: de westelijke bouwdelen (bouwblok A) hebben een kantoorfunctie (met in de plint ruimte voor horeca), de toren (bouwblok B) bevat koopappartementen met horeca in de plint, en het oostelijke gebouw C bevat huurwoningen. De bestaande en geplande bebouwing is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Bestaande en geplande bebouwing op de planlocatie

De geplande nieuwbouw bevindt zich in een zone van 18 tot 80 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 IMA-2021 (voortuitblik voor spoorvervoer) wordt er een toename van het aantal goederentreinen verwacht, van de huidige 18 tot 20 treinen per dag naar 50 tot 67 goederentreinen per dag (beide richtingen samen). Er wordt geen toename van het aantal reizigerstreinen voorzien.

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

Type trein	Rijsnelheid	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Sprinter	40 km/h	2.00	2.00	0.50
Intercity	40 km/h	4.50	4.25	1.25

Type trein	Rijsnelheid	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Goederentrein	40 km/h	0.37	0.39	0.37

Andere trillingsbronnen, zoals zwaar wegverkeer, zullen naar verwachting niet voor waarneembare trillingen in de bebouwing zorgen, en zijn in dit onderzoek niet nader kwantitatief beschouwd.

2.2. UITGANGSPUNTEN

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

2.2.1. GEGEVENS BEBOUWING

Er is een Voorlopig Ontwerp (VO) van de bebouwing beschikbaar, van 21 februari 2021. Omdat nog niet alle keuzes vaststaan, hebben we een aantal varianten doorgerekend qua materialisatie en stijfheid, zodat we robuuste uitspraken kunnen doen over de verwachte trillingen. Een impressie van de gebouwen is weergegeven in Figuur 3. In Tabel 2 zijn de beschouwde constructievarianten weergegeven. Het rekenmodel voor de bebouwing is hierop gebaseerd.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

Parameter	Eigenschappen
Vloertype	<ul style="list-style-type: none"> Bouwdeel A: kanaalplaatvloer 200 mm, 70 mm zandcement dekvloer Bouwdeel B: Leidingsplaatvloer 260 mm met zwevende dekvloer Bouwdeel C: Leidingsplaatvloer 260 mm met zwevende dekvloer
Hoogte	<ul style="list-style-type: none"> Bouwdeel A: Tot 21.6 meter Bouwdeel B: 52.2 meter Bouwdeel C: 27.6 meter
Lengte vloerveld	<ul style="list-style-type: none"> Bouwdeel A: 5.0 tot 7.8 meter Bouwdeel B: 5.45 meter Bouwdeel C: 7.55 meter
Breedte vloerveld	6.0 tot 12.0 meter
Constructietype	Diverse varianten: <ul style="list-style-type: none"> Kalkzandsteen en metselwerk Prefab beton (wanden, balken en kolommen), diverse wanddiktes (250 tot 400 mm) en stijfheden In-situ beton (wanden, balken en kolommen), diverse wanddiktes (250 tot 400 mm) en stijfheden
Fundering	Op palen, ca. 20 meter lang, Ø 550 mm

2.2.2. GEGEVENS ONDERGROND

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

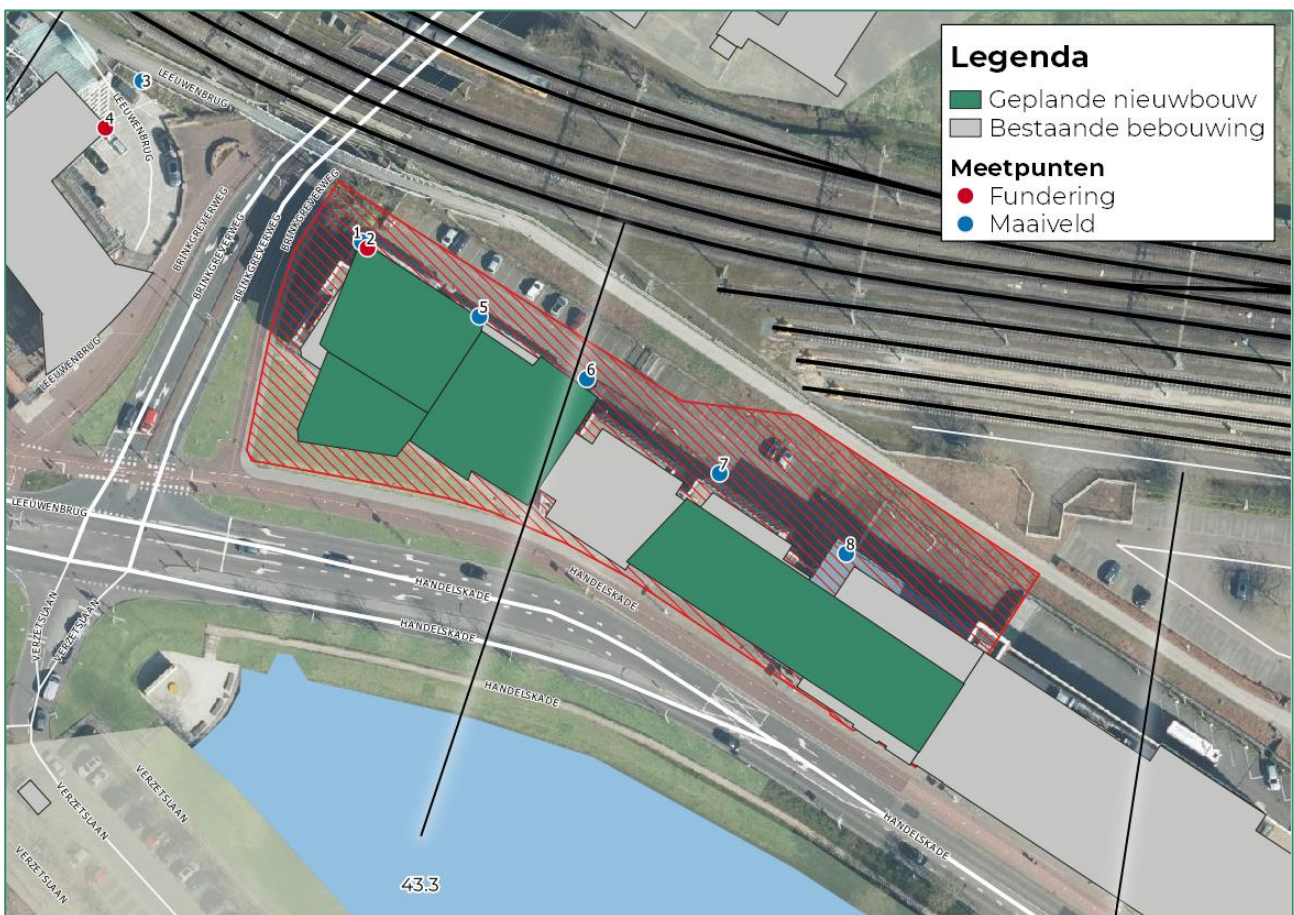




Figuur 3 Gepland programma

2.2.3. MEETRESULTATEN

Zoals te zien in Figuur 4 zijn door Alcedo op acht locaties metingen uitgevoerd. Het gaat hierbij om zes meetpunten op het maaiveld en twee meetpunten aan de fundering van de bestaande bebouwing. De metingen zijn uitgevoerd van 29 maart tot 7 april 2022.



Figuur 4 Meetpunten



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 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 grootte 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.



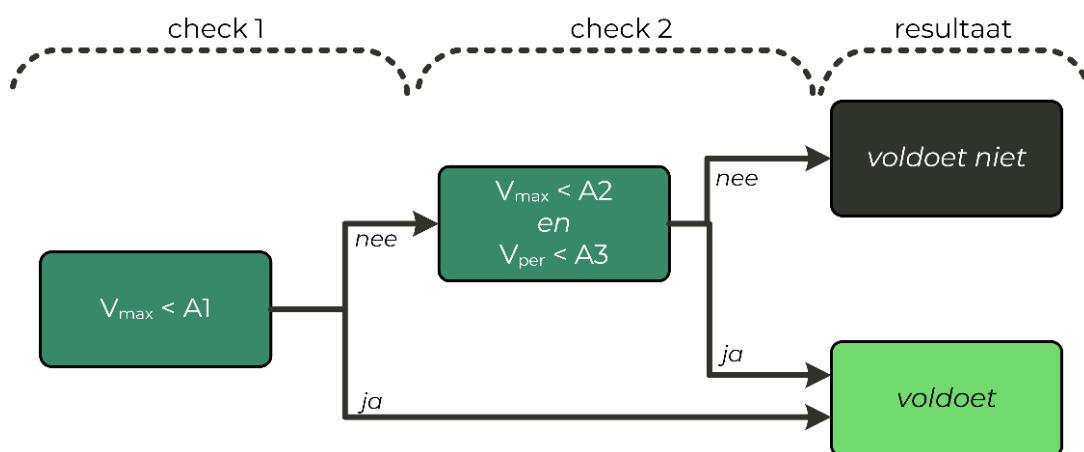
een zekere mate van gewenning en er zijn minder mogelijkheden om de trillingen te reduceren.

- 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 woon-, kantoor- en horecafunctie. De horecafuncties vallen buiten het beoordelingskader.
- 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 en kantoor

Situatie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Wonen, nieuwe situatie	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
Wonen, bestaande situatie	0.2	0.8	0.10	0.2	0.4	0.10
Kantoor, nieuwe situatie	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
Kantoor, bestaande situatie	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15



Figuur 5 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

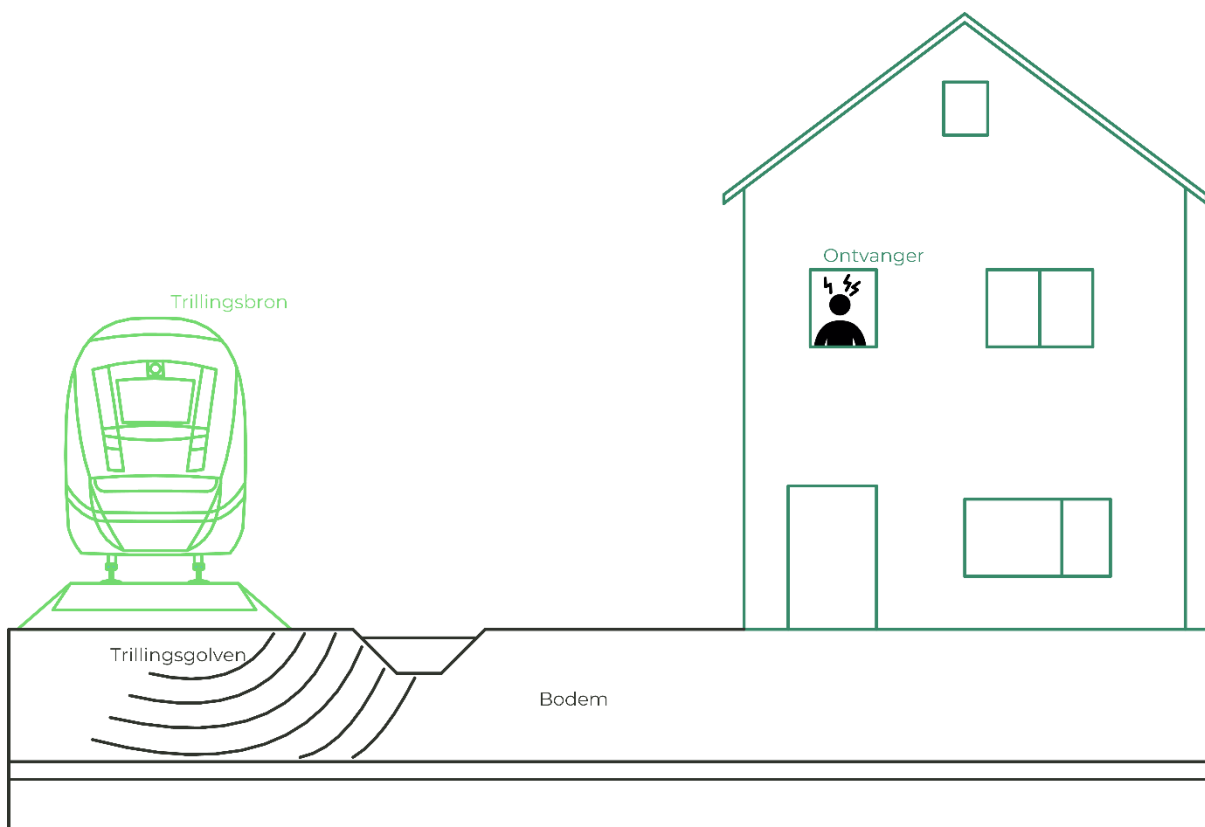
3.3. REKENMETHODE

In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde gebouwen, wordt op basis van metingen in de omgeving van de bebouwing (op maaiveld en aan bestaande bebouwing) een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande nieuwe bebouwing. Deze verwachte trillingen zijn afhankelijk van de constructieve eigenschappen van de geplande bebouwing, maar ook van de bodem, de afstand tot het spoor en natuurlijk de gemeten trillingen. 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 6 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 en aan de fundering van bestaande gebouwen. 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, hier en daar komen ook kleilagen voor, zie bijlage I. De uitdemping van de trillingen met de afstand is bepaald met een

rekenmodel op basis van deze bodemopbouw voor een zo betrouwbaar mogelijke predictie van de trillingen.

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





VERWACHTE TRILLINGEN



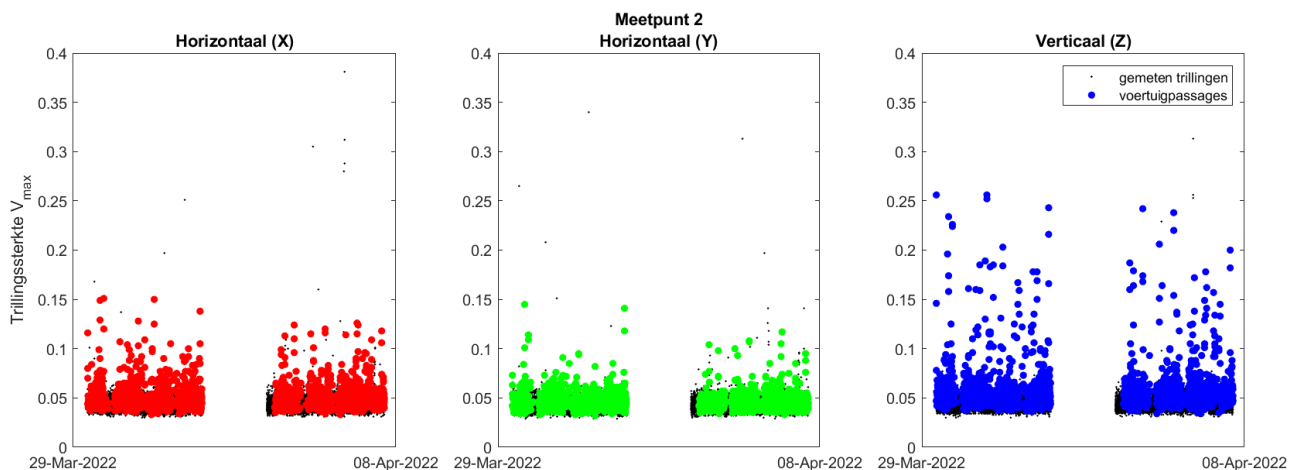
In dit hoofdstuk wordt eerst een korte toelichting gegeven op de meetresultaten, daarna worden de verwachte trillingen in de geplande bebouwing gegeven. Hierbij is gebruik gemaakt van de beoordelingsmethode en de rekenmethodiek zoals toegelicht in het voorgaande hoofdstuk.



VERWACHTE TRILLINGEN

4.1. MEETRESULTATEN

Alcedo heeft metingen uitgevoerd op maaiveld en aan de fundering van bestaande gebouwen, waaronder het te slopen pand aan de westzijde van het plangebied. De trillingen op dit meetpunt, aan de fundering van het bestaande gebouw, zijn weergegeven in Figuur 7. Overige gegevens uit de metingen hebben we opgenomen in bijlage III. In Figuur 7 valt op dat vooral in verticale richting de trillingen hoger zijn dan de achtergrondtrillingen. De hogere trillingen zijn afkomstig van goederentreinen, de trillingen van reizigerstreinen zijn laag.



Figuur 7 Gemeten trillingen aan fundering bestaande bebouwing

4.2. TRILLINGEN IN GEPLANDE BEBOUWING

De geplande bebouwing is gemodelleerd op basis van de informatie uit Tabel 2. Een voorbeeld van het (frequentie-afhankelijke) gedrag van de geplande bebouwing is 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 bebouwing.

De resultaten per gebouw hebben we weergegeven in Tabel 4, samen met een beoordeling van de trillingen. De trillingen zijn weergegeven als een bandbreedte, omdat de trillingen afhankelijk zijn van de constructieve uitwerking. **Oranje** arcering geeft aan dat er sprake is van een overschrijding van de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn.

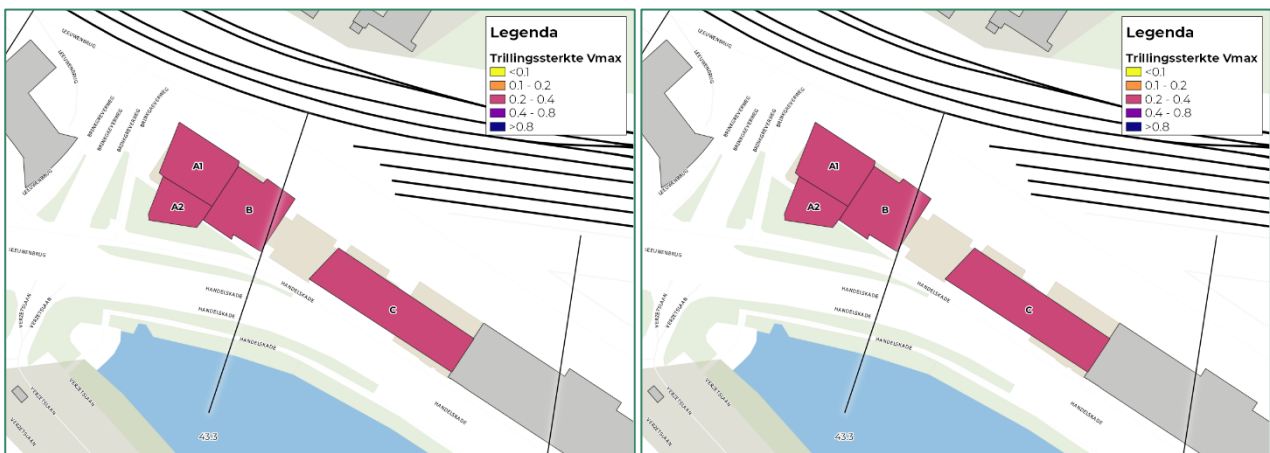
Tabel 4 Trillingen per bouwdeel en beoordeling op SBR B-richtlijn (zie voor nummering Figuur 10)

Bouwdeel	V_{\max}	V_{per}	Beoordeling
A (noord)	0.3 – 0.4	0.01 – 0.02	Voldoet
A (zuid)	0.2 – 0.3	0.00 – 0.01	Voldoet
B	0.3 – 0.4	0.02 – 0.03	Voldoet niet, minder dan 1 overschrijding per dag
C	0.3 – 0.4	0.01 – 0.02	Voldoet niet, minder dan 1 overschrijding per dag

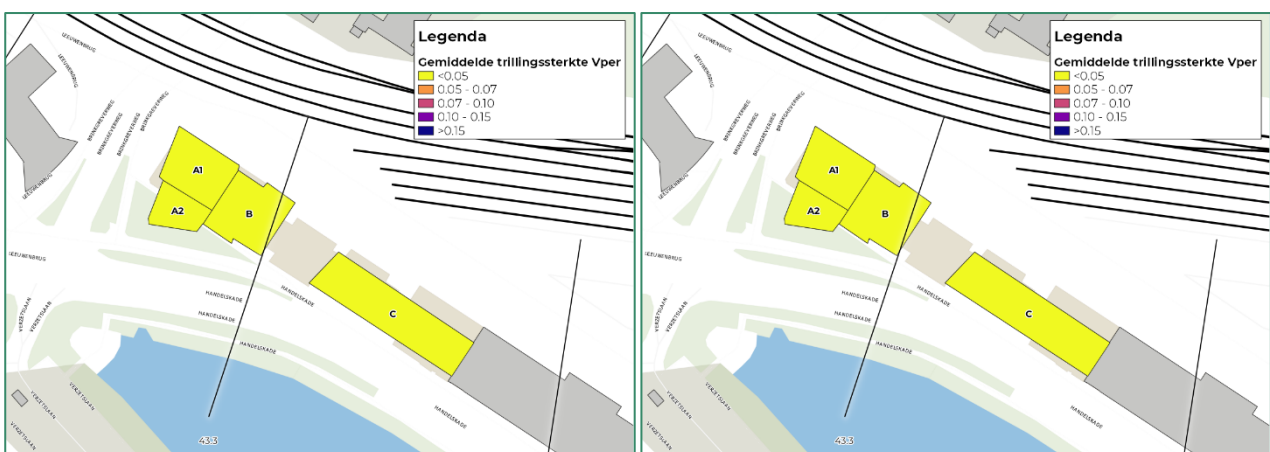
De resultaten (onder- en bovengrens van de trillingen, en beoordeling) zijn grafisch weergegeven in Figuur 9, Figuur 10 en Figuur 10. Samengevat geldt het volgende:

- ▶ De trillingen zijn relatief het hoogst in de bouwdelen A, deze liggen het dichtst bij het spoor. Omdat hier een kantoorfunctie op zit, met minder strenge streefwaarden, voldoen deze aan de SBR B-richtlijn. Qua indeling van het plangebied is dit dus een logische keuze.
- ▶ De trillingen zijn het hoogst in de hoger gelegen gebouwdelen, vooral omdat de inverting van het gebouw op de eigen constructie daar een rol gaat spelen.
- ▶ Tijdens de meting waren de trillingen in de nacht (als de streefwaarden voor gebouwen met een woonfunctie strenger zijn) vergelijkbaar aan de trillingen overdag. In de beoordeling is daarom geen nader onderscheid gemaakt tussen de trillingen overdag en 's nachts (wanneer de streefwaarden strenger zijn).
- ▶ De hoogte van de trillingen is beperkt afhankelijk van de verdere constructieve uitwerking. Uit de variantenanalyse blijkt bijvoorbeeld dat de trillingen lager zijn bij zwaardere bouw: in-situ beton geeft lagere trillingen dan prefab beton (stijvere verbindingen), dikkere wanden geven lagere trillingen dan dunnere wanden, en hogere sterkte betonklassen (bijv. C55/67) geven lagere trillingen dan lagere sterkteklassen (bijv. C30/37).

Omdat er sprake is van overschrijdingen van het beoordelingskader, geven we in het volgende hoofdstuk concrete handvatten voor de optimalisatie van de constructie en voor maatregelen.



Figuur 8 Trillingssterkte V_{max} , links ondergrens, rechts de bovengrens



Figuur 9 Gemiddelde trillingssterkte V_{per} , links de ondergrens, rechts de bovengrens





Figuur 10 Beoordeling trillingen aan SBR B-richtlijn





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 zware goederentreinen zijn overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder mogelijk in de gebouwen met een woonfunctie (gebouwen B en C). De hoogte van de trillingen is daarbij afhankelijk van de constructieve uitwerking van de gebouwen.

In dit hoofdstuk beschrijven we de mogelijke maatregelen en bouwkundige optimalisaties waarmee de trillingen kunnen worden voorkomen.

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 het plangebied als *matige hinder*. Vervolgens geeft deze bijlage aan dat matige hinder kan worden geaccepteerd onder een aantal voorwaarden:

1. De mate waarin de trillingssterkte voorkomt. Hiervoor geldt dat de gemiddelde trillingssterkte V_{per} een goede indicatie is. De gemiddelde trillingssterkte in het plangebied is overal lager dan de streefwaarde. Alleen goederentreinen zorgen voor overschrijdingen van de streefwaarden. Het gaat daardoor om een relatief beperkt aantal overschrijdingen: 2 per week in de huidige situatie, wat kan toenemen tot bijna 1 per dag na de voorziene intensivering van het aantal goederentreinen. Het gaat hierbij om treinen met een afwijkend trillingsniveau.
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.

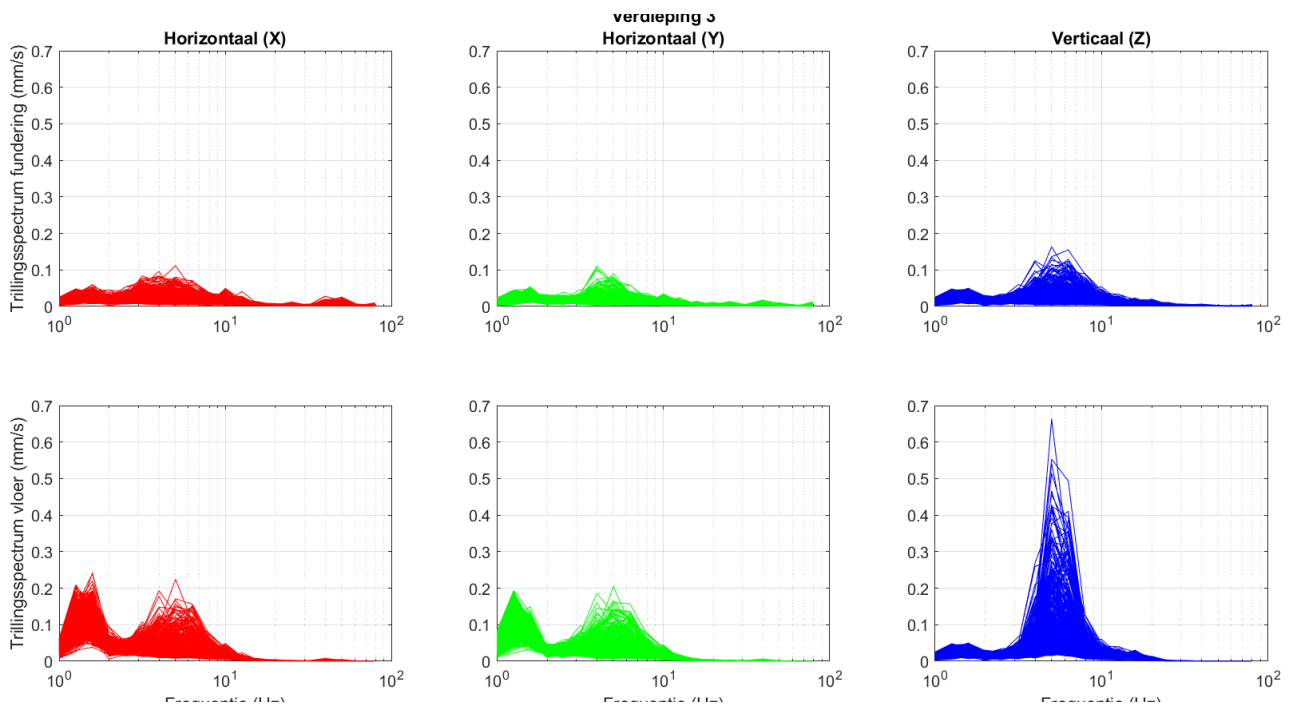
Omdat voorwaarde 2 niet van toepassing is, geldt dus dat de matige hinder in het plangebied niet zonder meer kan worden geaccepteerd. Daarom gaan we hierna in op maatregelen om de trillingen te reduceren. Om effectieve maatregelen te treffen, stellen we eerst vast bij welke trillingsfrequenties vooral 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 de gebouwen. Daarbij bespreken we ook bouwkundige optimalisaties.

5.2. ANALYSE RESULTATEN

Om te bepalen welke trillingsrichting en trillingsfrequenties in de gebouwen maatgevend zijn, is een nadere analyse uitgevoerd van de verwachte trillingen, zie Figuur 11. In deze figuur is de trillingssnelheid per treinpassage weergegeven als tertsbandspectrum op de fundering en de hoogste verdieping van bouwblok B, 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 verticale richting. De trillingen zijn vooral hoog tussen de 4 en 8 Hz. Het gaat om relatief laagfrequente trillingsgolven, afkomstig van goederentreinen, die in het gebouw worden versterkt door de eigenfrequenties van wanden en vloeren. Maatregelen en optimalisaties moeten vooral effectief zijn tegen de trillingen tussen 4 en 8 Hz.





Figuur 11 Verwachte trillingen op fundering (boven) en op hoogste verdieping (onder) van bouwblok B

In de volgende subparagrafen wordt ingegaan op mogelijke maatregelen aan de trillingsbron, in de bodem of aan de gebouwen.

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 minder effectief of niet inpasbaar: goedkopere maatregelen zoals onder sleeper pads en ballastmatten hebben onvoldoende effect tegen de laagfrequente trillingen van de goederentreinen, en verlagen van de rijnsnelheid is, gezien de al lage snelheid, niet effectief.

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 alle sporen waar de doorgaande goederentreinen rijden (in ieder geval de twee perronsporen), over een lengte van ca. 200 meter per spoor. De kosten van deze maatregel bedragen ca. € 2.0 tot € 3.0 mln². Kosten voor tijdelijk vervoer van treinreizigers en herstel van de omgeving zijn hierin niet meegenomen.

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 trillingsscherm van piepschuim (EPS), beton, damwand, jet-grout (soil-mix methode voor beton) of het aanbrengen van een spoorsloot. Nadeel van deze maatregelen is dat

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

deze vaak hoge kosten met zich meebrengen en dat ze (met uitzondering van een spoorstoot) niet aanpasbaar zijn aan toekomstige situaties.

Bovendien, een trillingsscherm is alleen effectief dicht bij de bron of dicht bij de ontvanger. Gezien de omvang van het plangebied is een locatie op de noordoostelijke plangrens het meest voor de hand liggend. Om de bouwblokken met een overschrijding af te schermen, is een trillingsscherm van ca. 140 meter lengte nodig, zie Figuur 12.



Figuur 12 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)	15 – 30%	€ 3.7 – 5.8 mln
Jet-grout wand	10 – 25%	€ 2.9 – 4.6 mln
Damwand (intrillen)	0 – 10%	€ 1.6 – 2.6 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
Betonnen wand, bekleed met rubber	25 – 40%	€ 4.5 – 7.1 mln
Damwand met EPS (piepschuim)	10 – 30%	€ 2.1 – 3.4 mln
Damwand met sleuf (luchtspouw)	10 – 25%	€ 3.2 – 5.1 mln
L-wand 4.0 m diep	0 – 5%	€ 0.2 – 0.4 mln
L-wand 4.0 m diep, bekleed met rubber	0 – 10%	€ 0.4 – 0.8 mln
CSM-wand (Cutter Soil Mix of Mix-In-Place)	5 – 10%	€ 2.1 – 3.3 mln
Trillingsscherm EPS (piepschuim), 1 m dik, 5.0 m diep	0 – 10%	€ 0.4 – 0.7 mln
Spoorsloot 2.5 m diep	5 – 15%	€ 0.1 – 0.2 mln
Spoorsloot 2.5 m diep, i.c.m. prefab L-wand, 4 m diep	10 – 20%	€ 0.2 – 0.4 mln

De minimaal benodigde reductie per bouwdeel bedraagt 30% voor bouwdeel B, en 20% voor bouwdeel C. Geen van de maatregelen heeft met zekerheid voldoende effect voor beide bouwblokken. Meest effectief is een betonnen trillingsscherm van 25 meter diep en 0.5 meter dik, bekleed met 100 mm rubber of 800 mm EPS (piepschuim) tot minimaal 10 meter diepte. De kosten van deze maatregel bedragen tussen de € 4.5 en 7.1 mln., en zijn daarmee nog hoger dan maatregelen aan het spoor. Andere, goedkopere maatregelen zijn nog steeds relatief kostbaar, en minder effectief.

Tenslotte, voor al deze maatregelen geldt, net als bij maatregelen aan het spoor, dat ze niet of slecht aanpasbaar zijn aan toekomstige situaties, en relatief weinig effect hebben op de laagfrequente trillingen van de goederentreinen. Bovendien zijn de genoemde kosten exclusief kosten voor het verleggen van kabels en leidingen, vergunningverlening en herinrichten van de openbare ruimte op naastgelegen percelen. De totale kosten worden daarmee hoger.

5.5. MAATREGELEN AAN DE GEBOUWEN

Tenslotte zijn ook maatregelen en optimalisaties aan de bebouwing mogelijk. Mogelijke maatregelen zijn het verzwaren van de vloeren (of verkleinen van de beukmaat), een stijvere constructie, een zwaardere fundering of het afveren van de fundering door middel van stalen veren. 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, reductie t.o.v. prefab betonnen constructie met 260 mm appartementenvloeren

Maatregel	Effect	Kosten ⁴
Toepassen van meer dempende materialen (kalkzandsteen, metselwerk)	0 – 5%	< 2% SK
In-situ beton i.p.v. prefab beton	0 – 10%	< 2% SK
Stijvere balken, kolommen en wandschijven (bijv. hogere sterkteklasse)	5 – 10%	< 2% SK

⁴ SK = Stichtingskosten



Maatregel	Effect	Kosten ⁴
Zwaardere vloer toepassen	0 – 5%	< 2% SK
Ontkoppelen van de vloeren	0%	2 – 3% SK
Ontkoppelen van de fundering (afveren, op max. 3 Hz)	55 – 65%	6 – 10% SK
Inpakken van de fundering met 150 mm rubber	0 – 10%	2 – 4% SK
Afschermen van de fundering met 1 m dik EPS	5 – 10%	< 1% SK
Afschermen van de fundering met bijv. L-wand of MIP-wand	5 – 15%	< 1% SK
Zwaardere fundering (dikkere en langere palen)	25 – 45%	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 5 Hz, zie bijlage IV voor een voorbeelduitwerking). Hiermee zijn de trillingen in beide bouwblokken te reduceren tot onder de streefwaarden. De kosten van deze maatregel bedragen tussen de € 7.000 en € 20.000 per appartement, en zijn daarmee hoog. Met het fors verzwaren van de fundering (door grotere paaldiameters en langere palen te gebruiken) is ook te voldoen aan het beoordelingskader. Andere maatregelen (ook combinaties van maatregelen) zijn onvoldoende effectief om te voldoen aan het beoordelingskader.

5.6. ADVIES VOOR MAATREGELEN

In de bouwblokken met een woonbestemming zijn overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder niet uit te sluiten, vooral niet op de hoger gelegen verdiepingen. De hoge trillingen worden veroorzaakt door goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte, de trillingen van reizigerstreinen voldoen wel aan de streefwaarden voor trillingshinder.

In de bouwblokken B en C is sprake van een beperkt aantal overschrijdingen: 2 per week in de huidige situatie, dit kan toenemen naar maximaal 1 per dag na de mogelijke intensivering van het goederenvervoer. Deze overschrijdingen zijn alleen te voorkomen met de volgende maatregelen:

1. Het fors verzwaren van de fundering door de palen veel langer te maken (minimaal 65 meter lang, 750 mm dik (bijv. Tubex)). Nadelen van deze oplossing zijn:
 - a. Aanpassing brengt hoge kosten met zich mee.
 - b. Bestaand gebouw heeft ook een paalfundering, bij grotere paaldiameter conflicteren meer palen met bestaande paalfundering. Deze palen moeten dan getrokken worden, wat hoge kosten en risico's (breuk) met zich mee brengt. Technisch daarmee riskant.
 - c. Een paallengte van 65 meter gaat door het tweede watervoerende pakket heen (op ca. 50 meter diepte), is daarmee technisch risicovol en voor het Waterschap niet acceptabel.
2. Het afveren van de fundering door stalen veerdozen aan te brengen tussen de paalkoppen en de funderingsbalken, afgeveerd op een eigenfrequentie van maximaal 3 Hz. Nadelen van deze maatregel zijn:
 - a. Maatregel brengt zeer hoge kosten met zich mee (meer dan € 1.000.000 per bouwblok).
 - b. Bij bouwblok B ontstaat een risico op instabiliteit i.r.t. windhinder, gezien de lage eigenfrequentie van de afvering en de hoogte van het gebouw.



- c. Constructief complex, gebouw moet worden losgekoppeld van overige bouwdelen, met risico op instabiliteit. Kosten van bouwkundige aanpassingen kunnen zeer hoog zijn.

Met bovengenoemde maatregelen zijn ook incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder te voorkomen. Gezien de technische risico's en hoge kosten van maatregelen in relatie tot het beperkte aantal overschrijdingen, kan echter worden gemotiveerd dat deze maatregelen niet doelmatig zijn, omdat het plan dan (kosten)technisch niet uitvoerbaar wordt. Het beoordelingskader voor trillingshinder, de SBR B-richtlijn, biedt ook de mogelijkheid tot het maken van een dergelijke afweging, mits goed gemotiveerd. Ook zonder maatregelen kan daarom, met een beroep op bijlage 5 van de SBR B-richtlijn, worden gemotiveerd dat er geen onaanvaardbaar woon- en leefklimaat ontstaat in de geplande bebouwing. Argumenten daarvoor zijn:

- 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 (zoals in dit geval, gezien de technische risico's en hoge kosten).
- Er is sprake van een beperkt aantal overschrijdingen. Het gaat om 2 overschrijdingen per week, dit kan in de toekomst, bij een toename van het aantal goederentreinen, toenemen naar minder dan 1 per dag. De overschrijdingen worden veroorzaakt door goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte. 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 uit de SBR B-richtlijn, maar wel aan de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties uit de SBR B-richtlijn. In de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties is een zekere mate van gewenning 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 de nieuwe woningen. Ook zonder maatregelen tegen trillingen ontstaat in de geplande bebouwing daarom geen onacceptabele situatie: de trillingen zijn daar immers (veel) lager dan in andere, al bestaande bebouwing rond deze locatie.

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, wel is bekend dat die vooral rond kunstwerken (zoals de onderdoorgang Churchillplein) vaak slechter is. 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 diverse afstanden 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 geïkt 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.

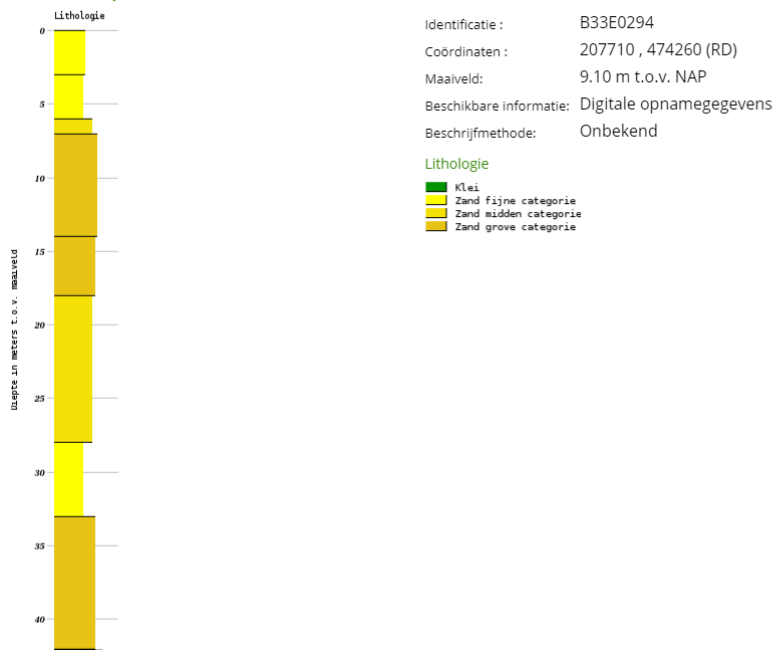


GRONDONDERZOEK

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.

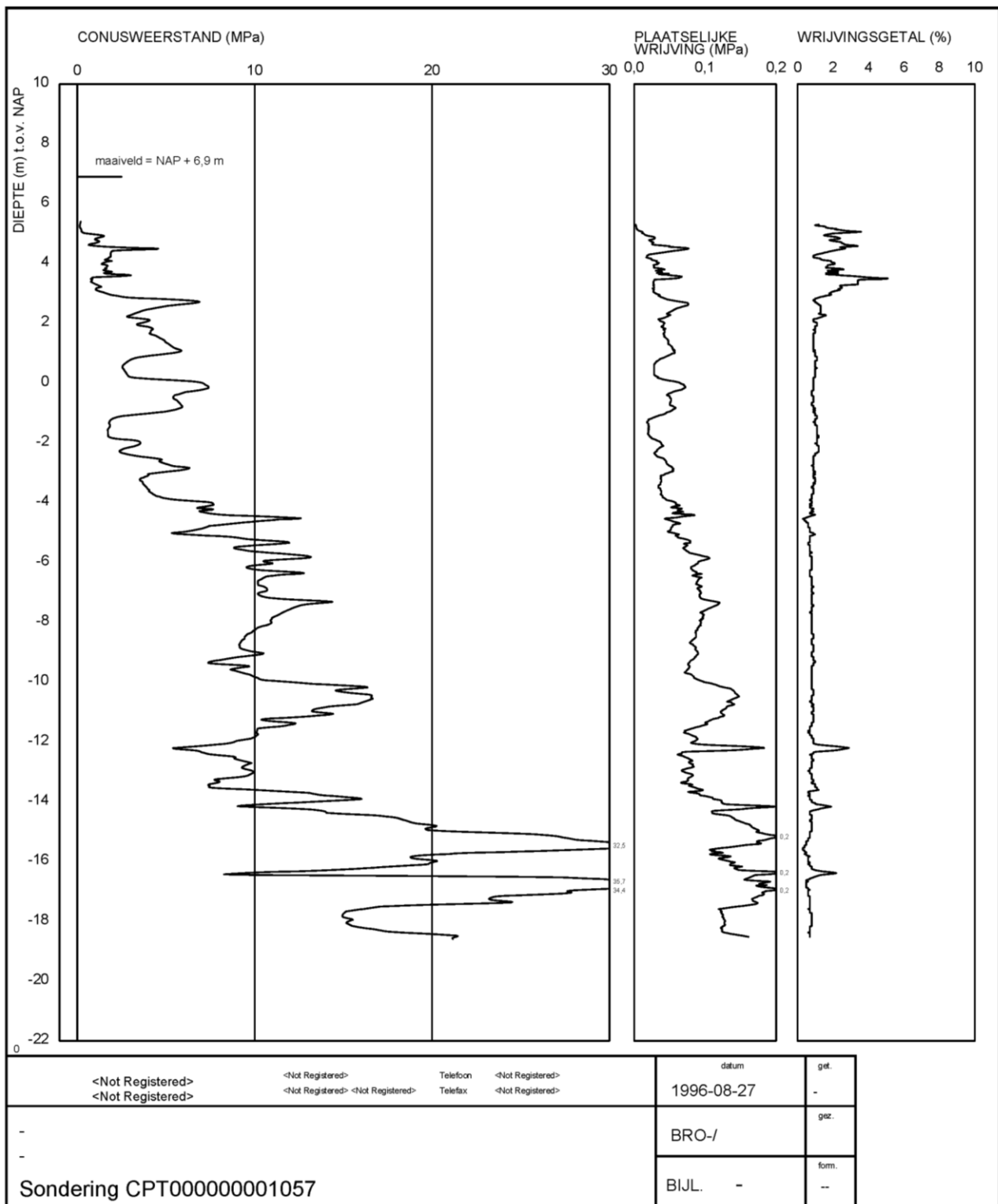
Een grondboring in de nabijheid van het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur 13. De bodem is vooral opgebouwd uit zandlagen. Op andere boringen is in de bovenste meters een kleipakket zichtbaar, de bodem wisselt in dit gebied dan ook relatief sterk. In de berekeningen is hiermee rekening gehouden door verschillende bodemmodellen te hanteren.

Boormonsterprofiel



Figuur 13 Boring in het onderzoeksgebied

Een representatieve sondering uit het onderzoeksgebied, waarin onder meer de conusweerstand te zien is, is weergegeven in Figuur 14. Ook hier is te zien dat in de bovenste bodemlagen klei aanwezig is, met daaronder een zandpakket.



Figuur 14 Sondering nabij het onderzoeksgebied

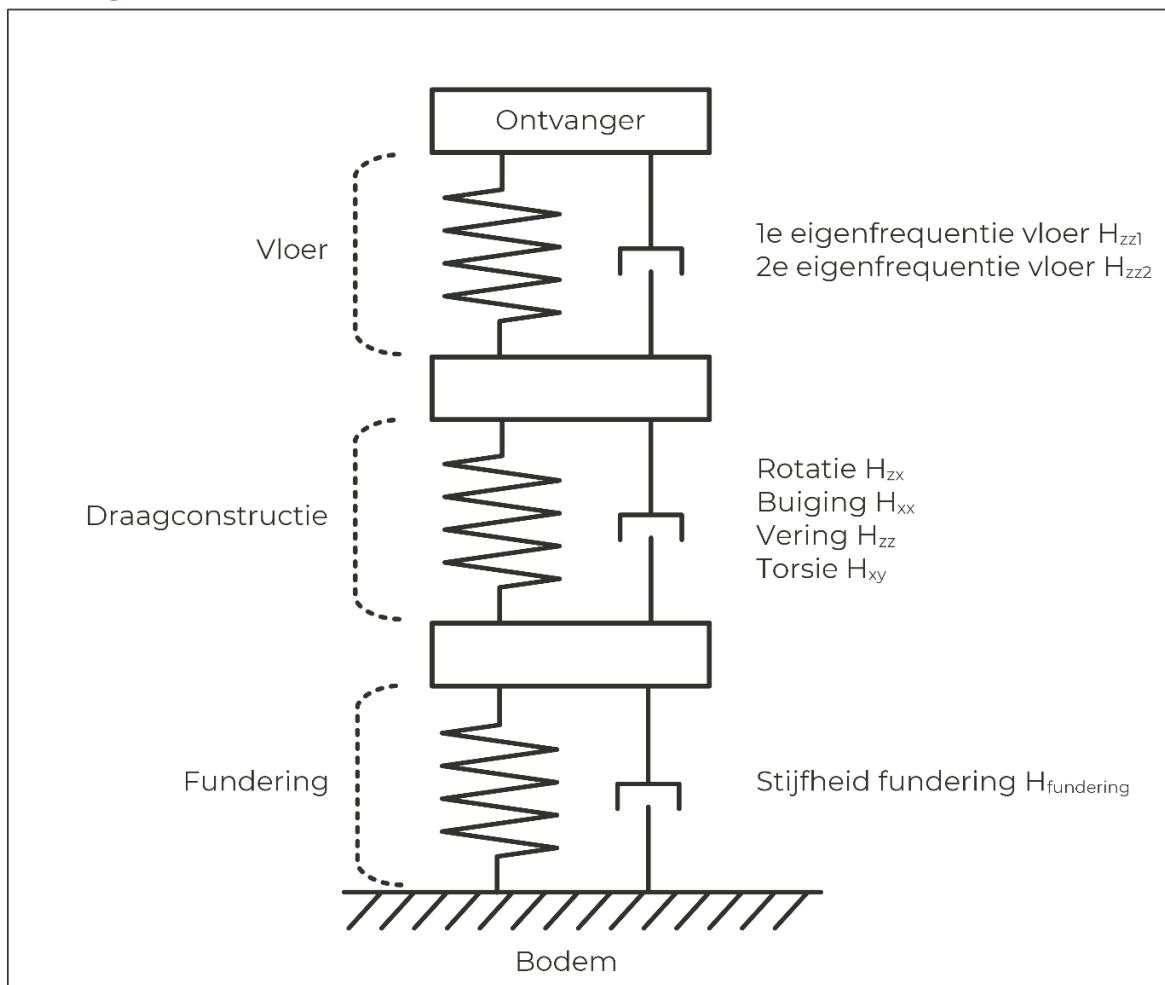
REKENMODEL

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 15. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 15, 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

WB



Figuur 15 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.

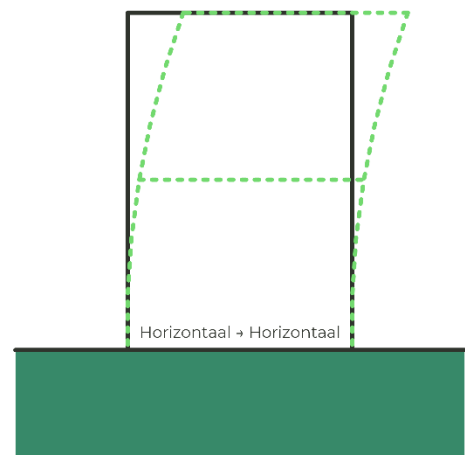
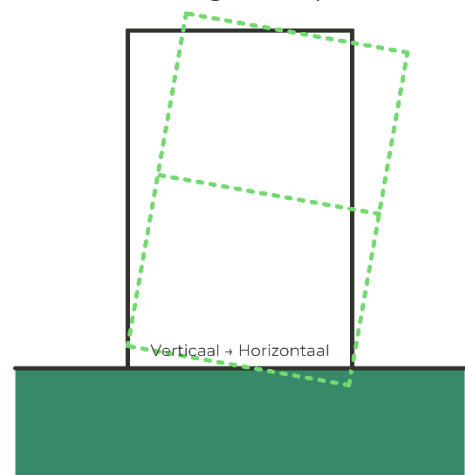
Dit effect noemen we H_{zx} , en is afhankelijk van:

- » 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

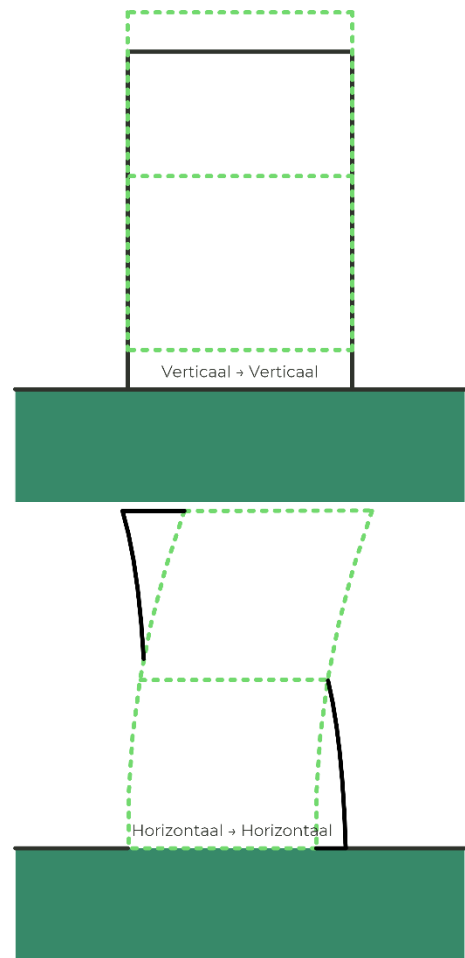


Het derde principe, dat van vering van het gebouw op zijn fundatie, is rechts weergegeven. Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappe onderlaag of lokaal slappere elementen (denk aan kolommen en balkenstructuren). Dit effect noemen we H_{zz} , en is afhankelijk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



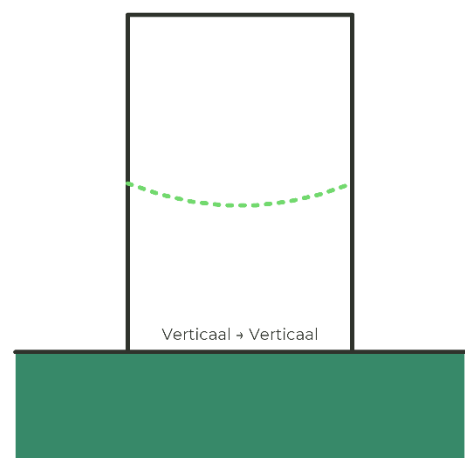
VLOEREN

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:

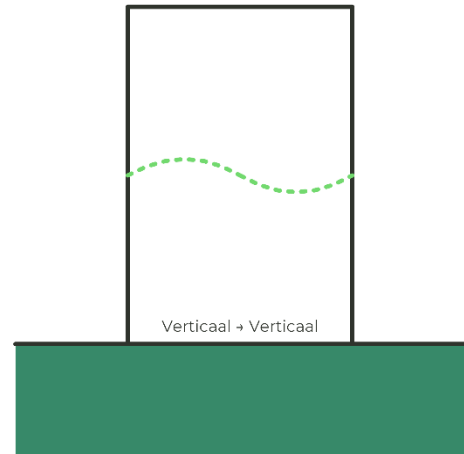
- Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- Afmetingen van de vloer
- Type oplegging



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.

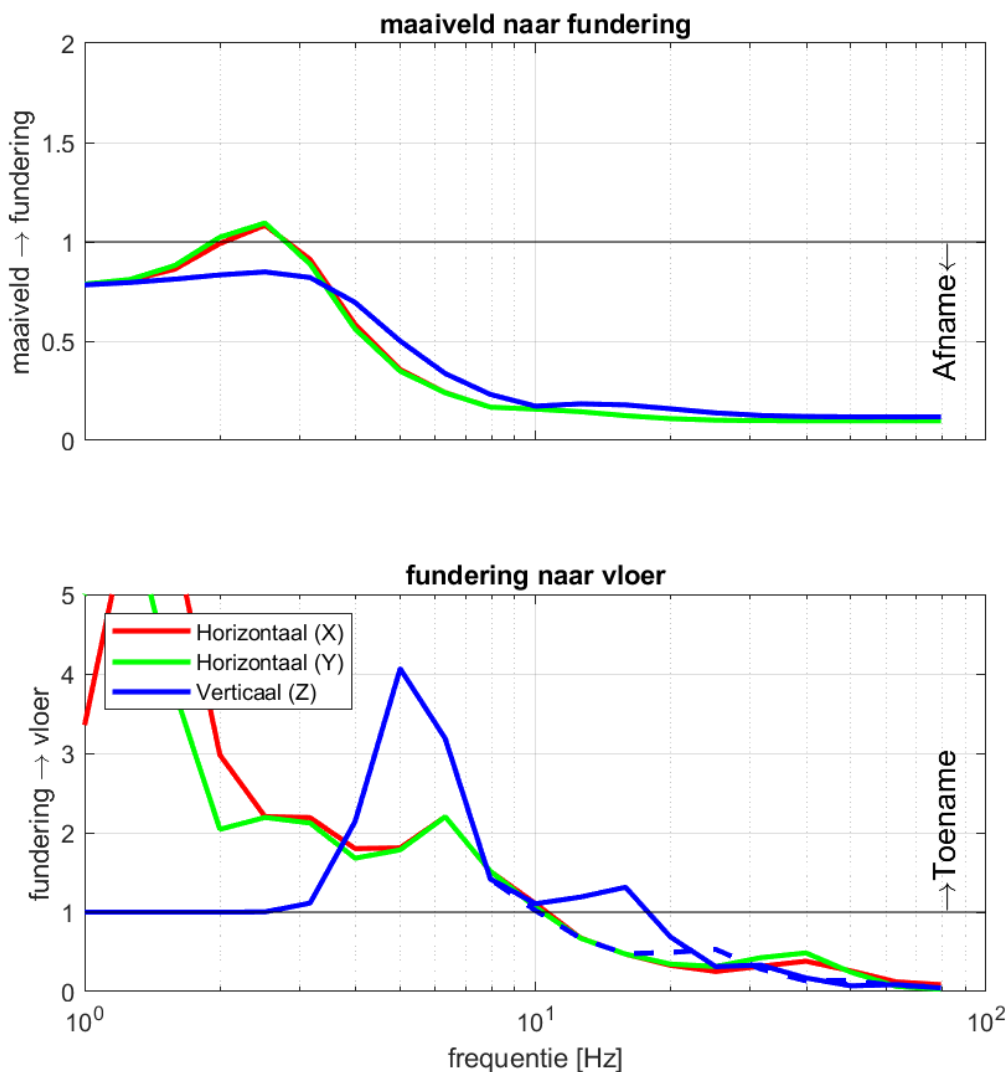
Dit effect noemen we H_{zz2} , en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1} .

Uiteindelijk zorgen alle gebouwbevingen 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

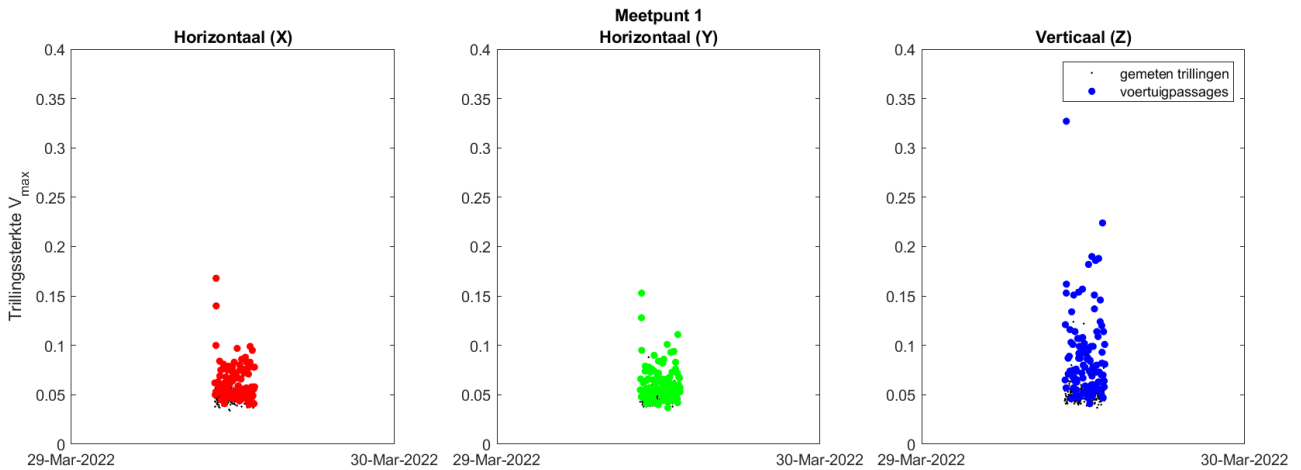
Ter illustratie zijn de resultaten uit de Buildyn-berekeningen voor het maatgevende punt op de hoogste verdieping van toren B weergegeven in Figuur 16.



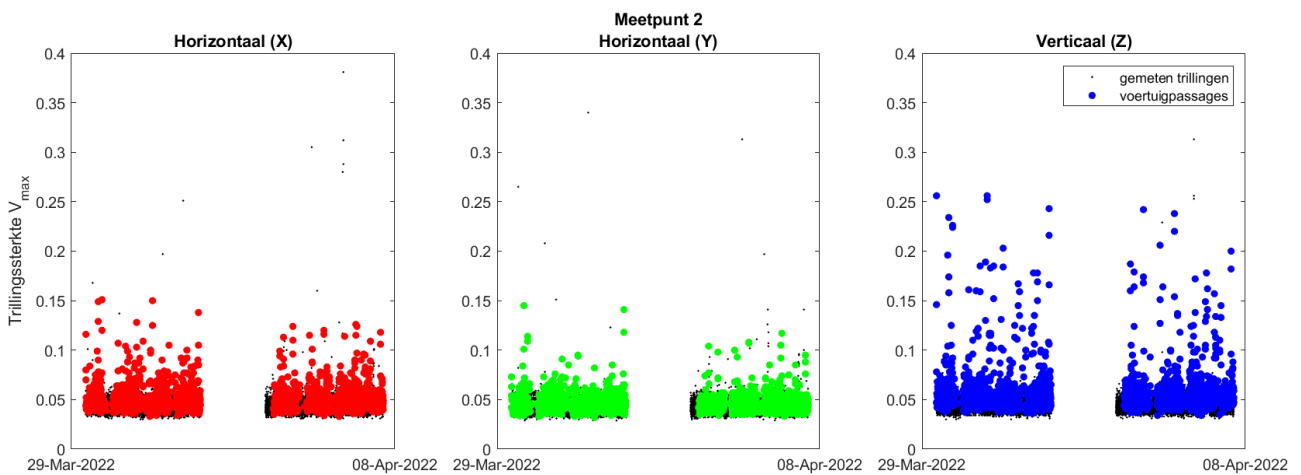
Figuur 16 Buildyn-resultaten voor bovenste verdieping van gebouw B, 5,45 m vloeroverspanning, 260 mm appartementenvloer. Doorgaande lijn verticaal is midden vloer, onderbroken lijn is op $\frac{1}{4}$ en $\frac{3}{4}$ van overspanning

RESULTATEN METINGEN

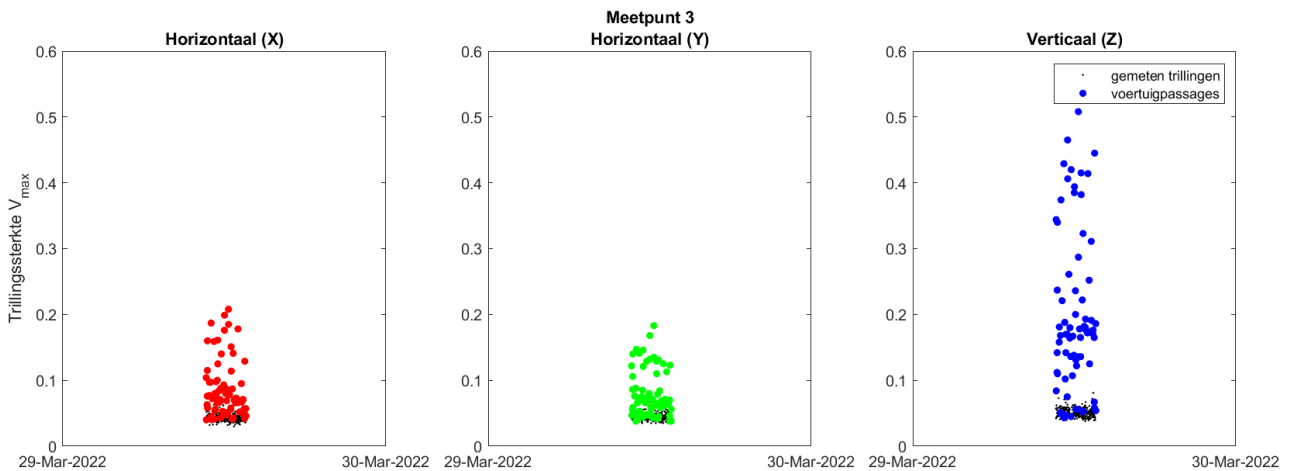
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



Figuur 17 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (maaiveld bij bestaand gebouw, 17 meter van spoor)

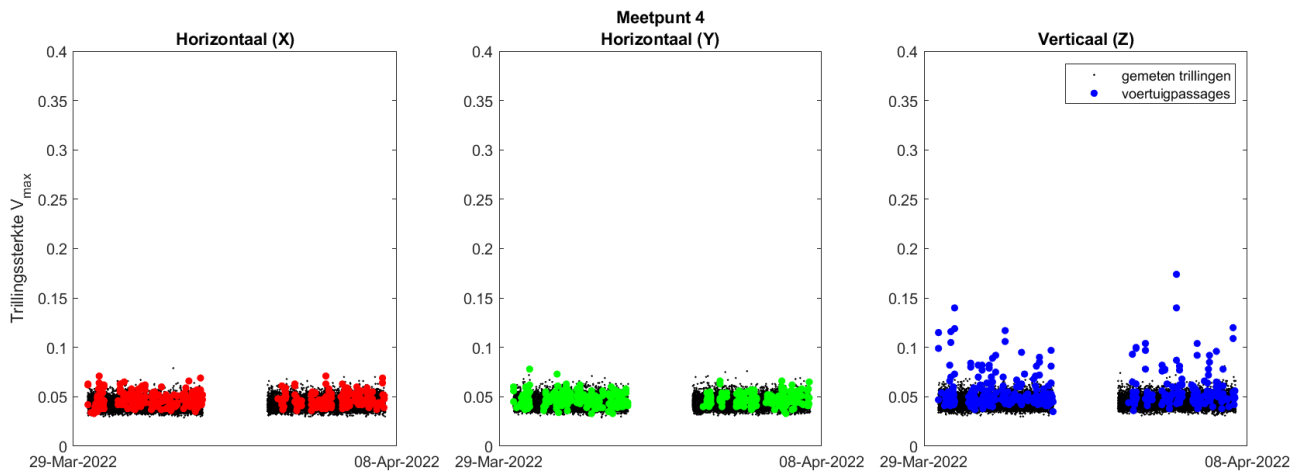


Figuur 18 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (fundering bestaand gebouw, 18 meter van spoor)

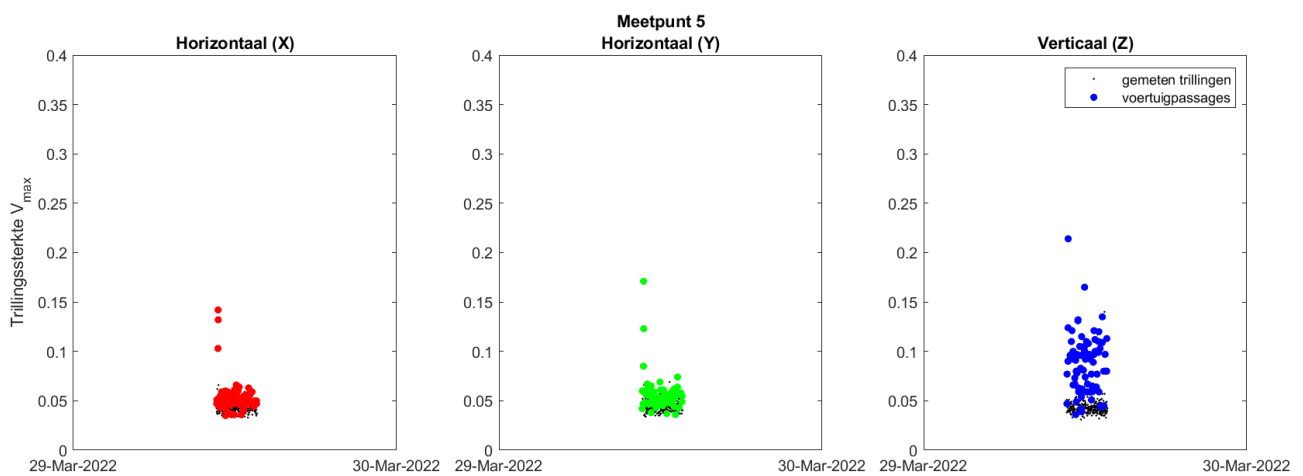


Figuur 19 Gemeten trillingen bij meetpunt 3 (maaiveld bij Leeuwenbrug, 10 meter van spoor)

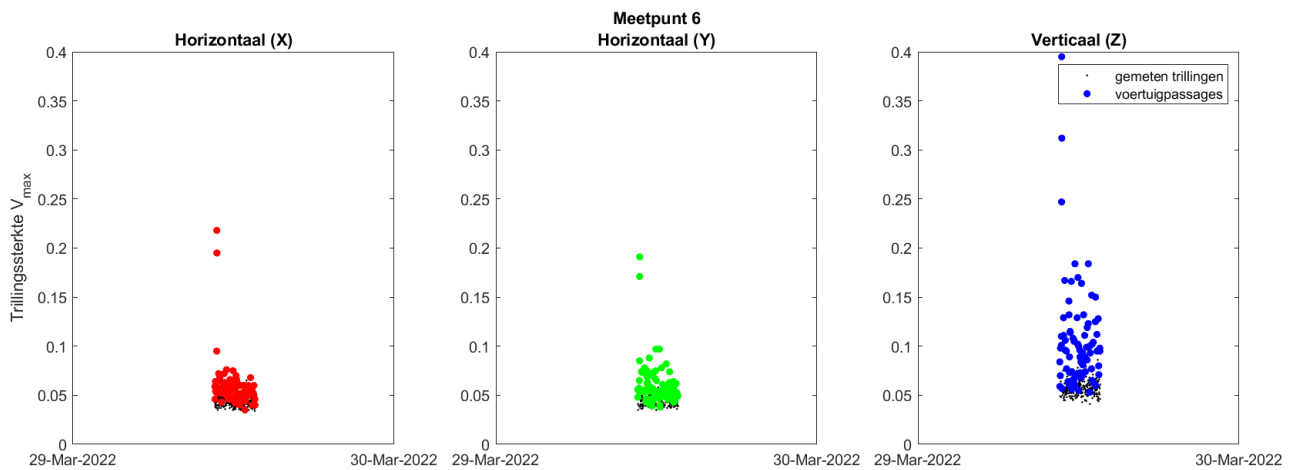




Figuur 20 Gemeten trillingen bij meetpunt 4 (fundering Leeuwenbrug, 19 meter van spoor)

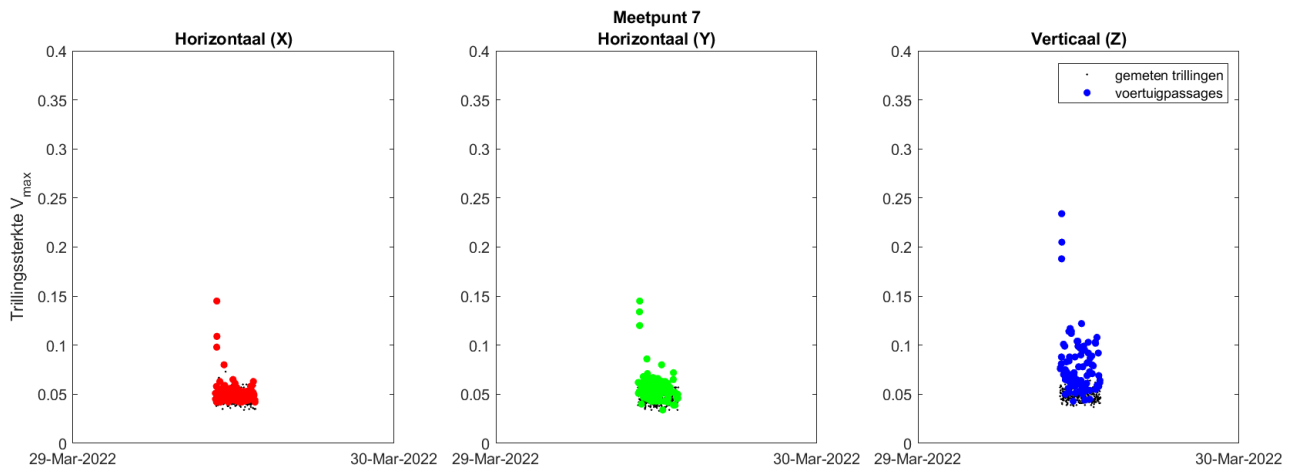


Figuur 21 Gemeten trillingen bij meetpunt 5 (maaiveld, 24 meter van spoor)

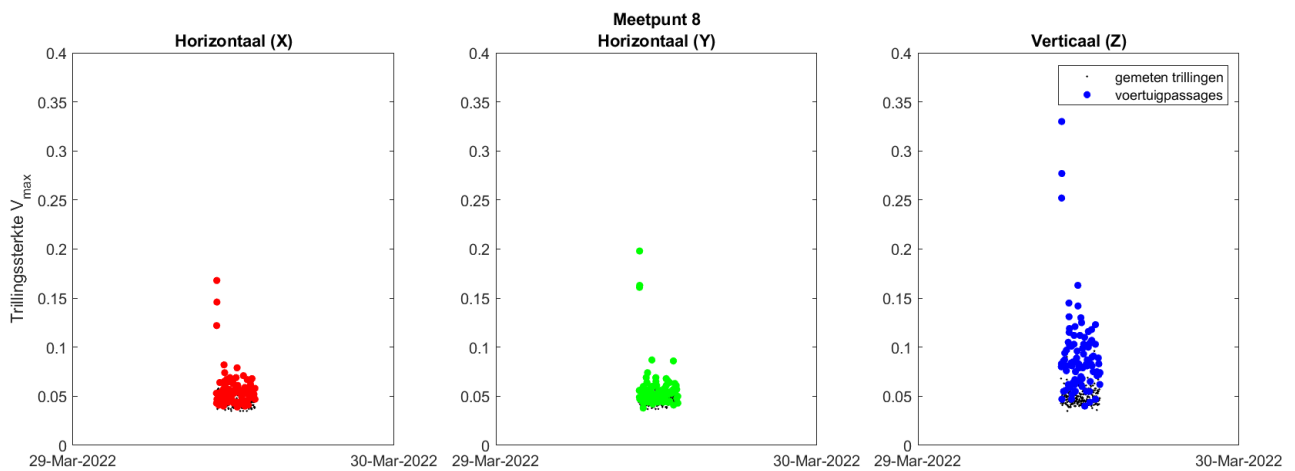


Figuur 22 Gemeten trillingen bij meetpunt 6 (maaiveld, 28 meter van spoor)

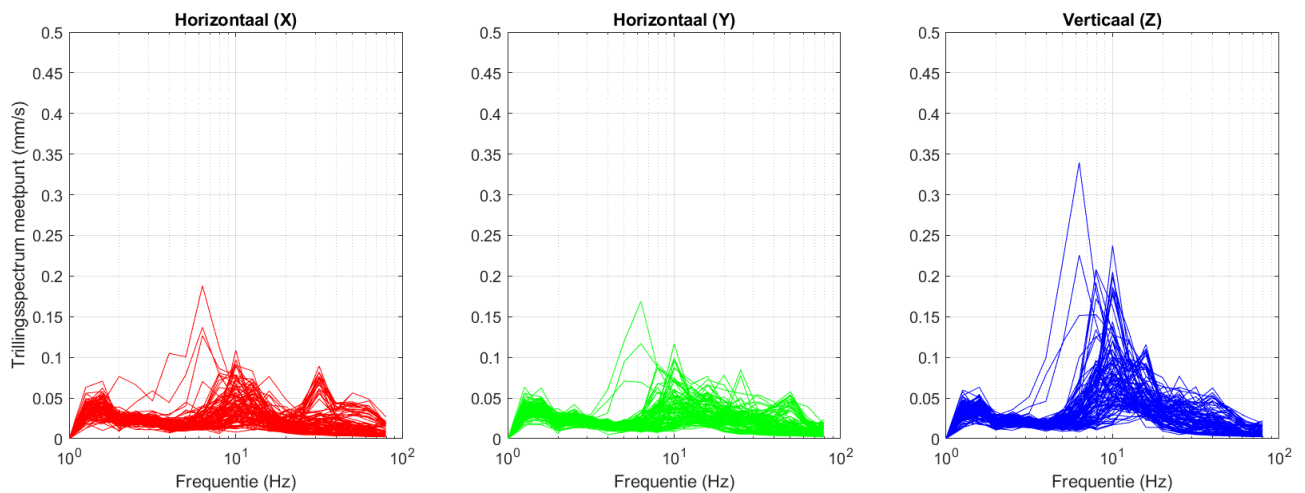




Figuur 23 Gemeten trillingen bij meetpunt 7 (maaiveld, 38 meter van spoor)

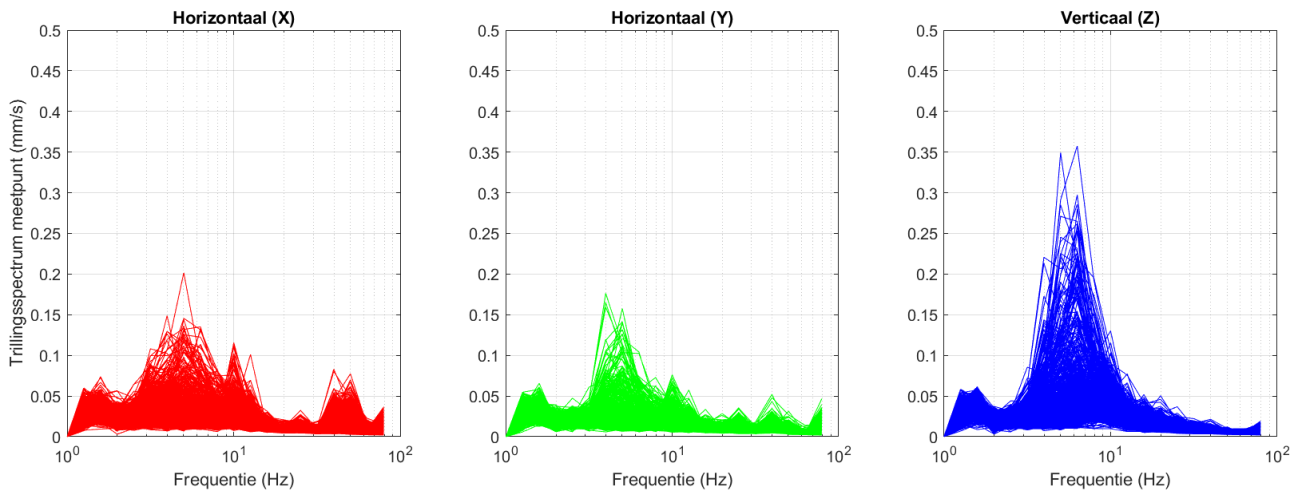


Figuur 24 Gemeten trillingen bij meetpunt 8 (maaiveld, 48 meter van spoor)

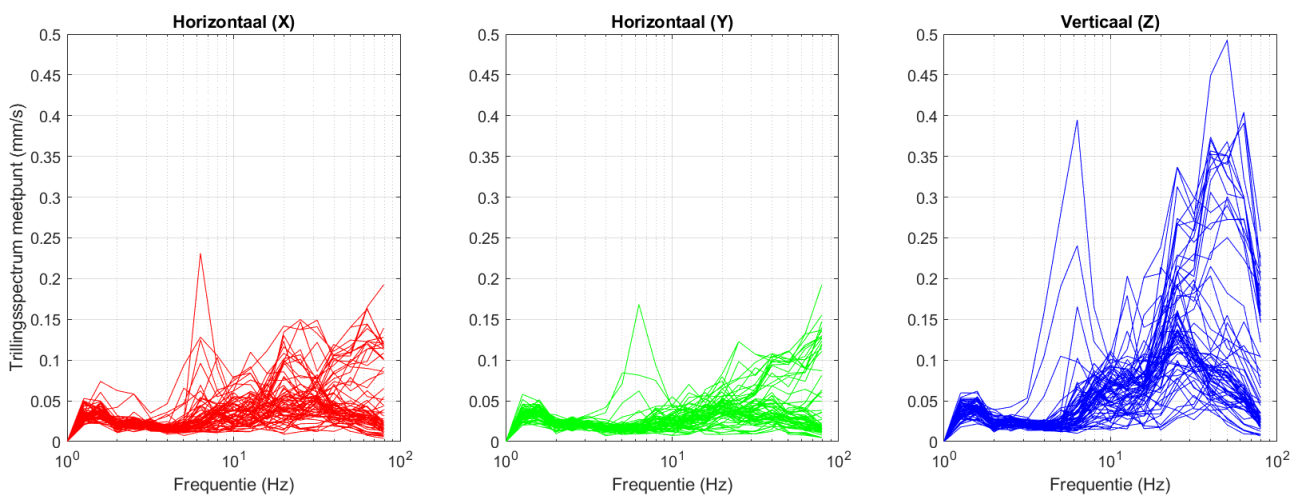


Figuur 25 Tertsbandspectra bij meetpunt 7

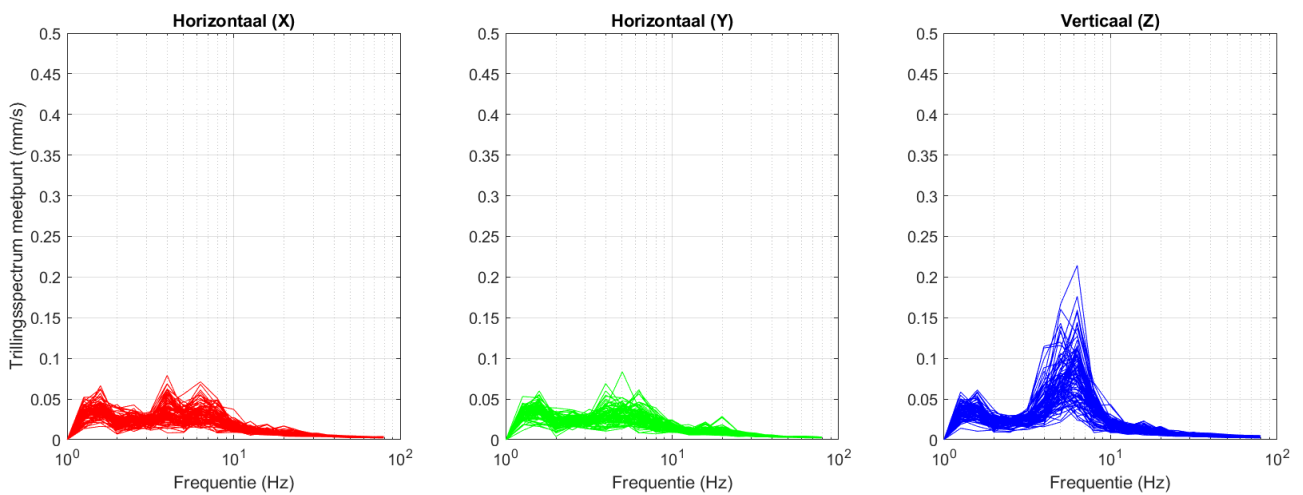




Figuur 26 Tertsbandspectra bij meetpunt 2

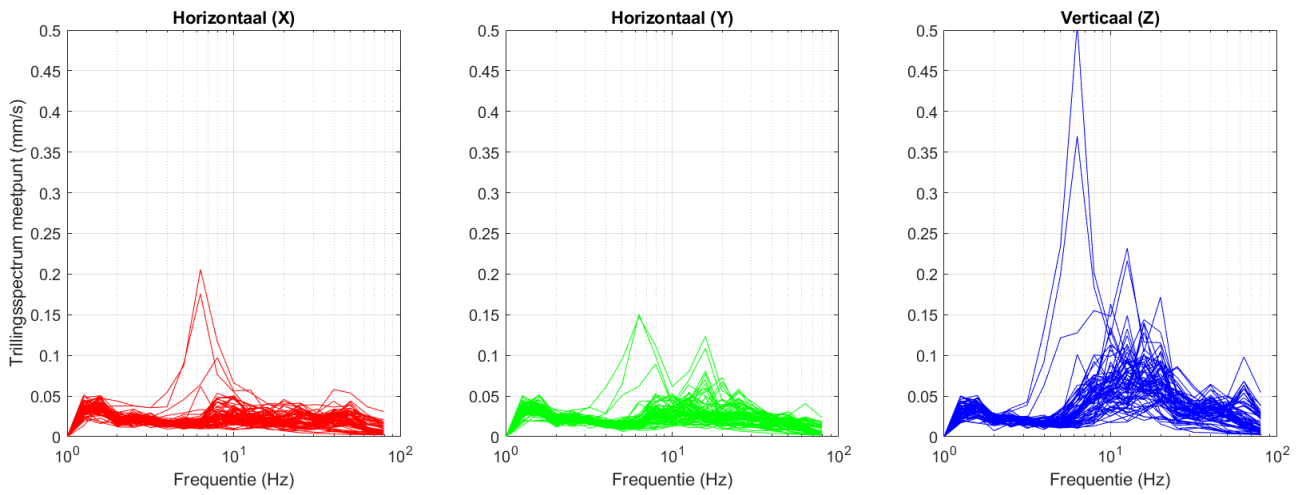


Figuur 27 Tertsbandspectra bij meetpunt 3

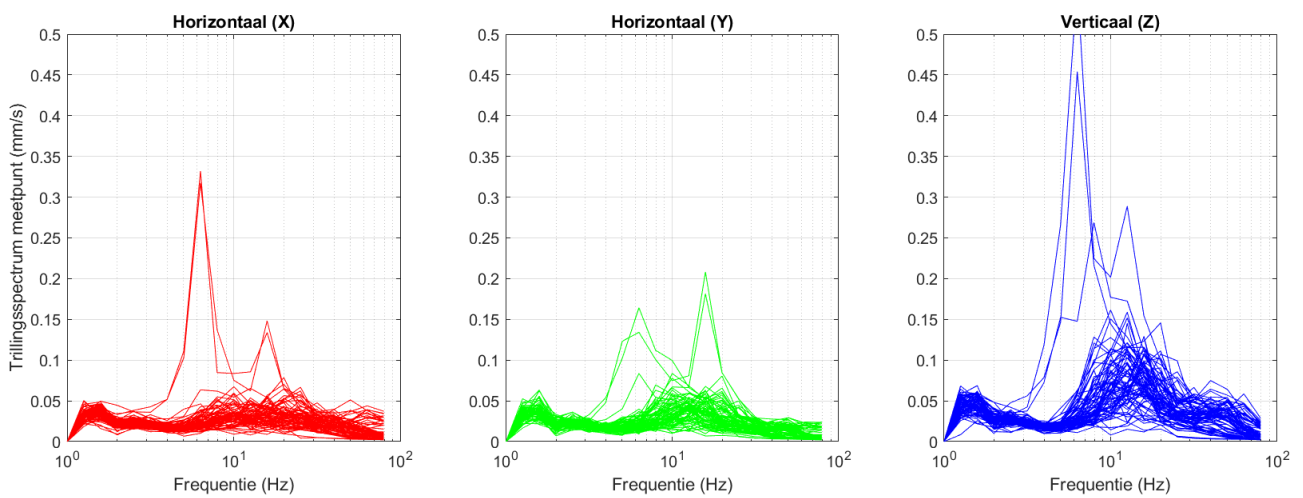


Figuur 28 Tertsbandspectra bij meetpunt 4

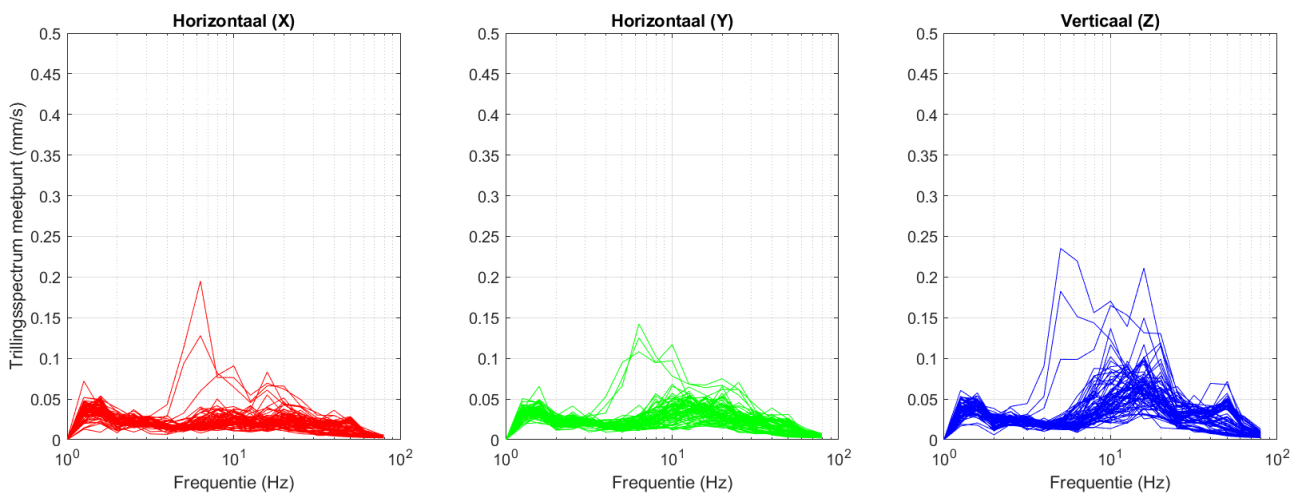




Figuur 29 Tertsbandspectra bij meetpunt 5

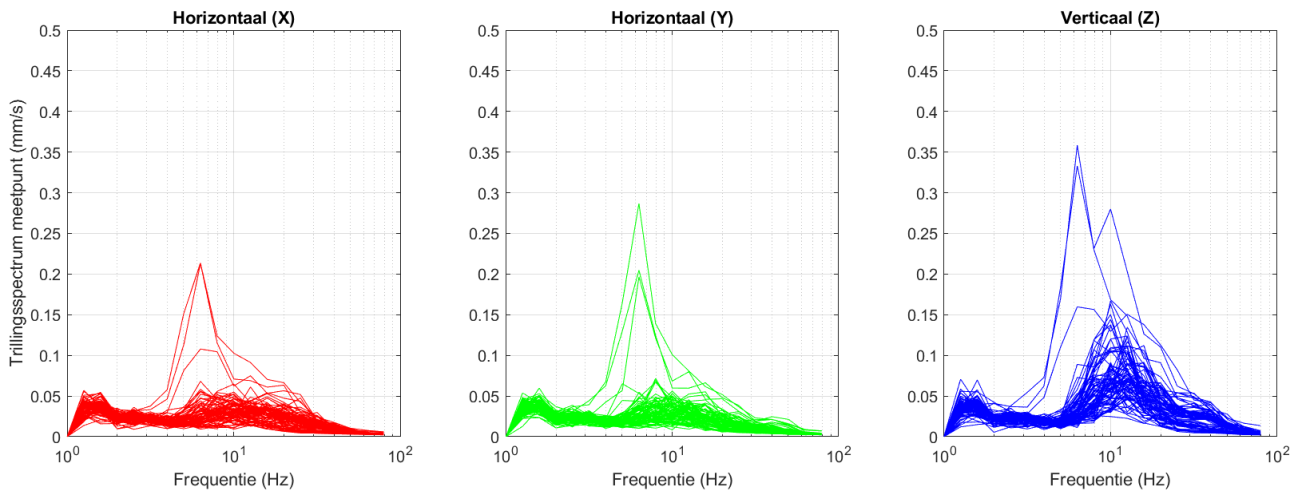


Figuur 30 Tertsbandspectra bij meetpunt 6



Figuur 31 Tertsbandspectra bij meetpunt 7



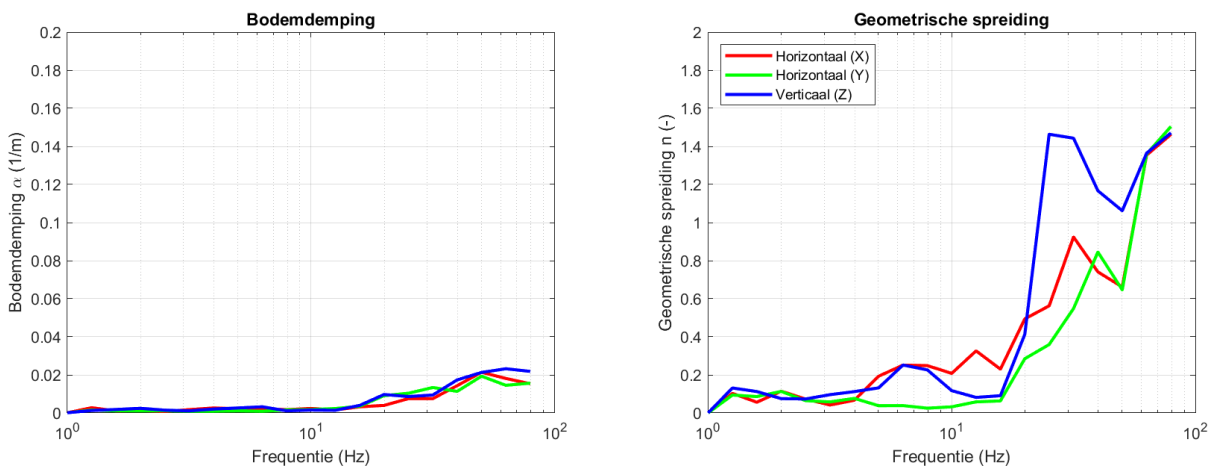


Figuur 32 Tertsbandspectra bij meetpunt 8

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

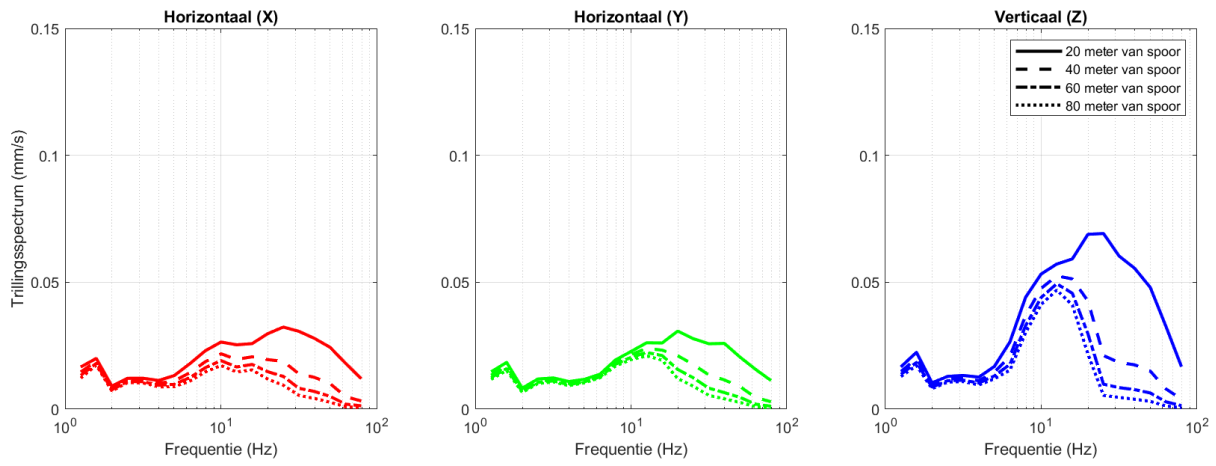
$$V(f, r) = V_0(f, r_0) \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^{n(f)} \cdot e^{-\alpha \cdot (r-r_0)} \quad (1)$$

In deze vergelijking staat V voor de trillingsnelheid, f voor de frequentie, r voor de afstand tot de trillingsbron, r_0 voor de referentieafstand (hier 20 m), n voor de geometrische spreidingsfactor en α voor de bodemdemping. De geometrische spreiding en bodemdemping zijn weergegeven in Figuur 33.



Figuur 33 Bodemdemping α (links) en geometrische spreiding n (rechts) als functie van de frequentie, boven voor positie middenin plangebied, onder voor positie rechts in plangebied

De gemiddelde trillingspectra op 20, 40, 60 en 80 meter van het spoor zijn weergegeven in Figuur 34. Hier is te zien dat vooral boven de 10 Hz de trillingen sterk uitdempnen met de afstand. De laagfrequente trillingen van goederentreinen (vooral onder de 10 Hz) zijn daarentegen ook op grotere afstand van het spoor nog goed zichtbaar.



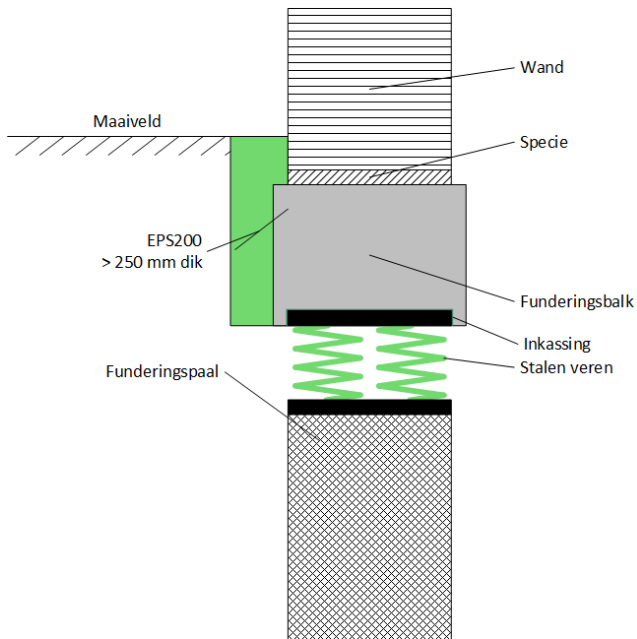
Figuur 34 Gemiddelde trillingsspectra op 20, 40, 60 en 80 meter van het spoor



DETAILS MAATREGELEN

Deze bijlage bevat achtergrondinformatie en principedetails van de besproken maatregelen.

Een principeschets van een afgeveerde fundering met stalen veerdozen is weergegeven in Figuur 35. Een foto van een concrete toepassing bij eengezinswoningen in Prinsenbeek is weergegeven in Figuur 36 (fundering op staal, bij fundering op palen worden de stalen veerdozen vaak aangebracht op de paalkoppen, in een inkassing in de funderingsbalken). Aan de zijkant kan de bodem van de woning worden geïsoleerd door het aanbrengen van bijvoorbeeld een laag EPS.



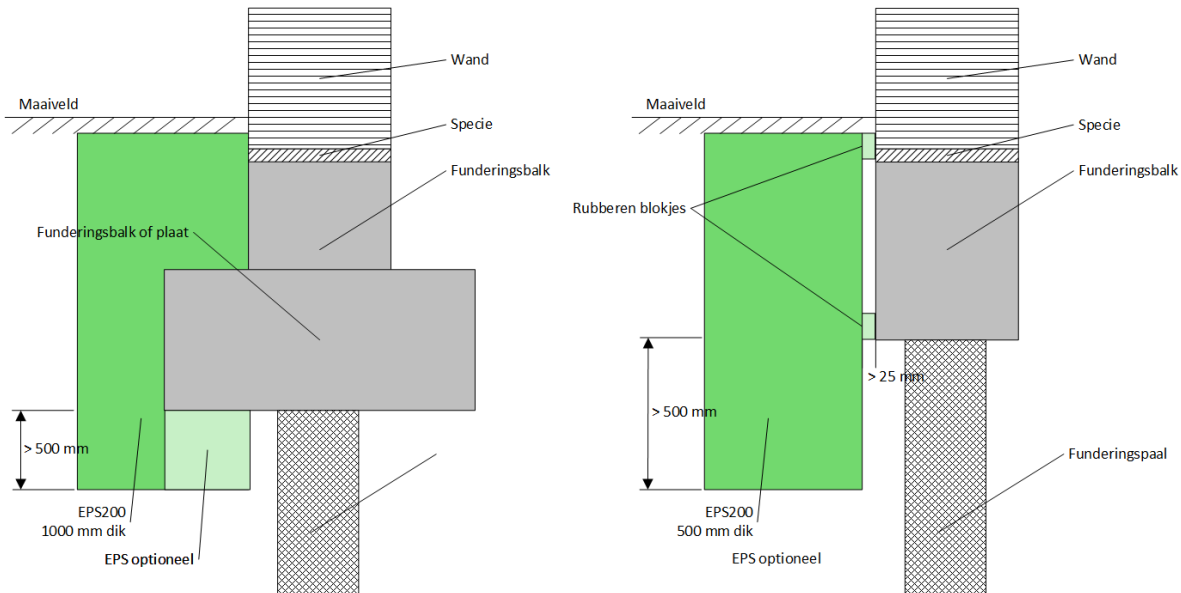
Figuur 35 Principeschets afgeveerde fundering (hier met stalen veerdozen, fundering op staal)



Figuur 36 Dubbele fundering met stalen veerdozen (project in Prinsenbeek)

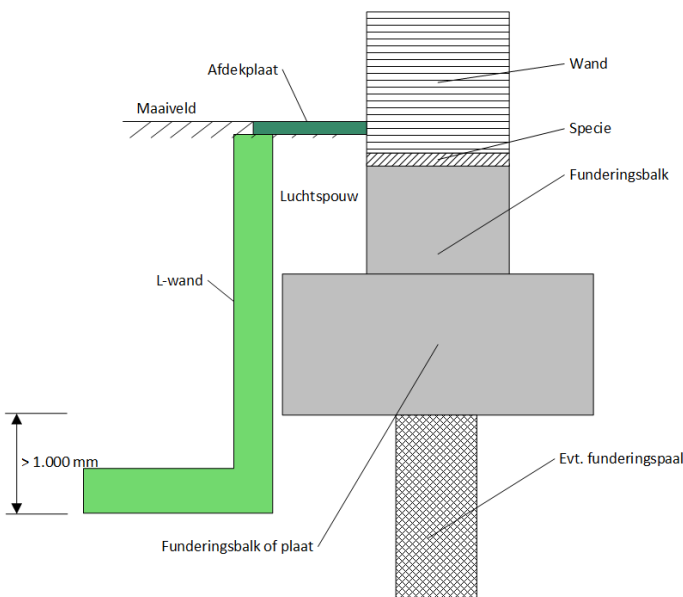
Een principeschets van het bekleden van de fundering met EPS (piepschuim) is weergegeven in Figuur 37. De EPS-kwaliteit dient wat zwaarder te zijn dan standaard i.v.m. de gronddruk. Hier is EPS200 aangegeven. De minimaal benodigde dikte voor voldoende reductie is zo'n 1000 mm, om opdrijven te voorkomen moet dit tot de GHG-waarde van het grondwaterpeil worden

aangebracht en verankerd worden aan de fundering. Een principeschets is weergegeven in Figuur 37. Een geringere dikte is ook mogelijk, mits gebruik wordt gemaakt van een luchtsponw van minimaal 25 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 37 Fundering met EPS-scherm ervoor (links) en met EPS en luchtsponw (rechts)

Een principeschets van het plaatsen van een L-wand direct voor de fundering is rechts weergegeven in Figuur 38. Belangrijk hierbij is dat een luchtsponw nodig is (geen contact tussen L-wand en fundering), 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 38 L-wand met luchtsponw voor fundering