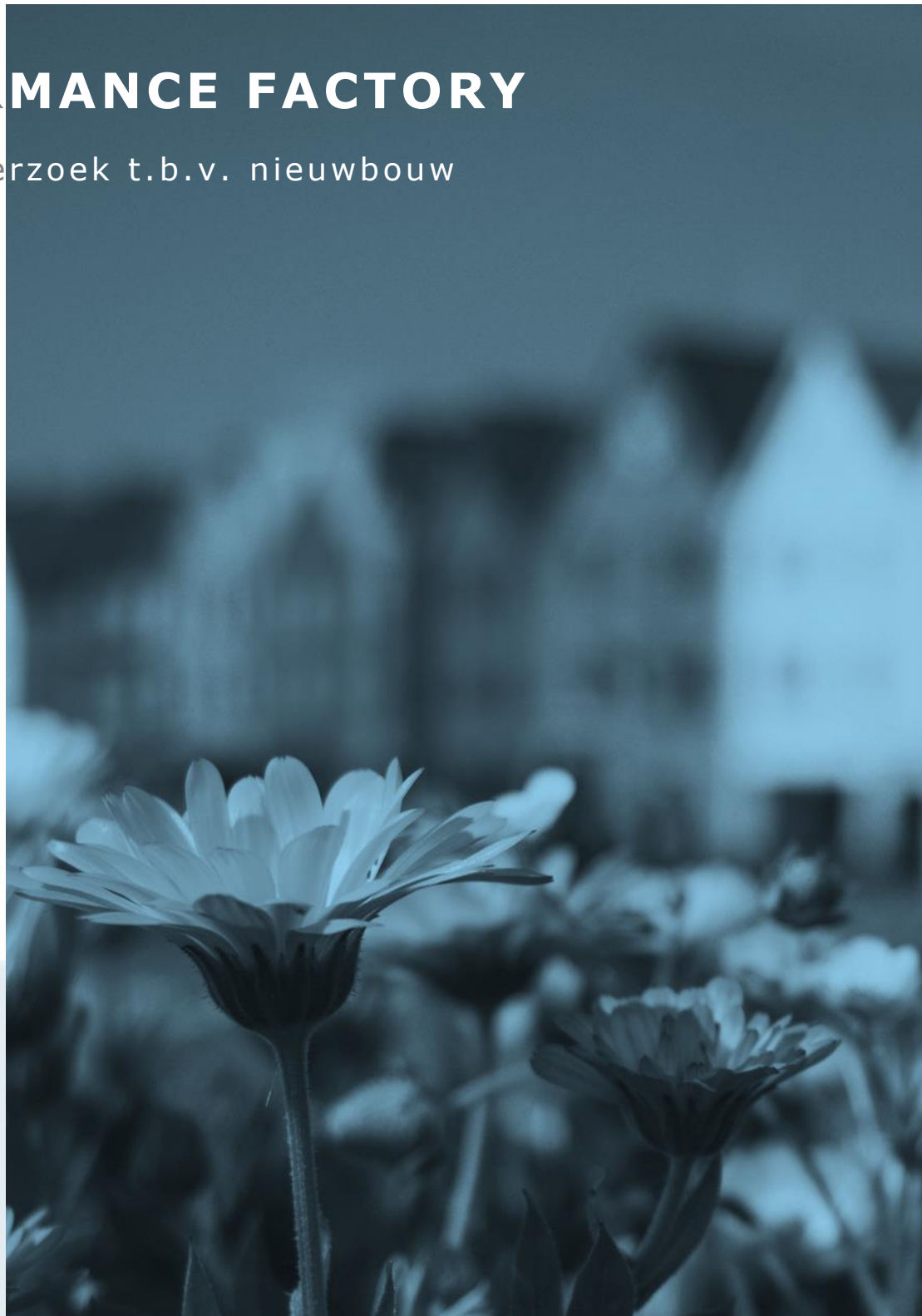


# PERFORMANCE FACTORY

Trillingsonderzoek t.b.v. nieuwbouw



WBD2031

29 januari 2021  
versie 1.0

# Colofon

<b>Auteur</b>	Thijmen van der Veen <a href="mailto:thijmen@we-boost.nl">thijmen@we-boost.nl</a>
<b>Controle en vrijgave</b>	Pieter Boon <a href="mailto:pieter@we-boost.nl">pieter@we-boost.nl</a> +31 6 10 03 94 54
<b>Projectcode</b>	WBD2031
<b>Versienr</b>	1.0
<b>Datum</b>	29 januari 2021
<b>Status</b>	Vrijgegeven
<b>Opdrachtgever</b>	Domijn



© We-Boost Data 2021

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

## Managementsamenvatting

Op het Bothofterrein in de nabijheid van de Performance Factory in Enschede worden 198 woningen op een commerciële plint gerealiseerd. De locatie wordt op dit moment gebruikt als parkeerterrein. Het plangebied bevindt zich in de nabijheid van de spoorlijn Enschede – Gronau. 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 de geplande bebouwing, en zo ja, met welke maatregelen deze hinder is te voorkomen.

De belangrijkste bevinding van het onderzoek is dat er geen overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder (de SBR B-richtlijn) worden verwacht in de geplande woningen. Door de grote afstand van de geplande nieuwbouw tot het spoor zijn de trillingen van treinen lager dan de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn. Daarnaast rijden er enkel stoptreinen op het traject, deze treinen genereren doorgaans lagere trillingen dan sneltreinen en goederentreinen. De trillingen zijn hoger naarmate een bouwblok dichterbij de spoorwegovergang of dichterbij het spoor ligt, en ook bij een oriëntatie parallel aan het spoor. In alle gevallen wordt echter nog voldaan aan het beoordelingskader.

Er zijn daarom geen maatregelen of aanpassingen aan de geplande bebouwing nodig om te voldoen aan het beoordelingskader.

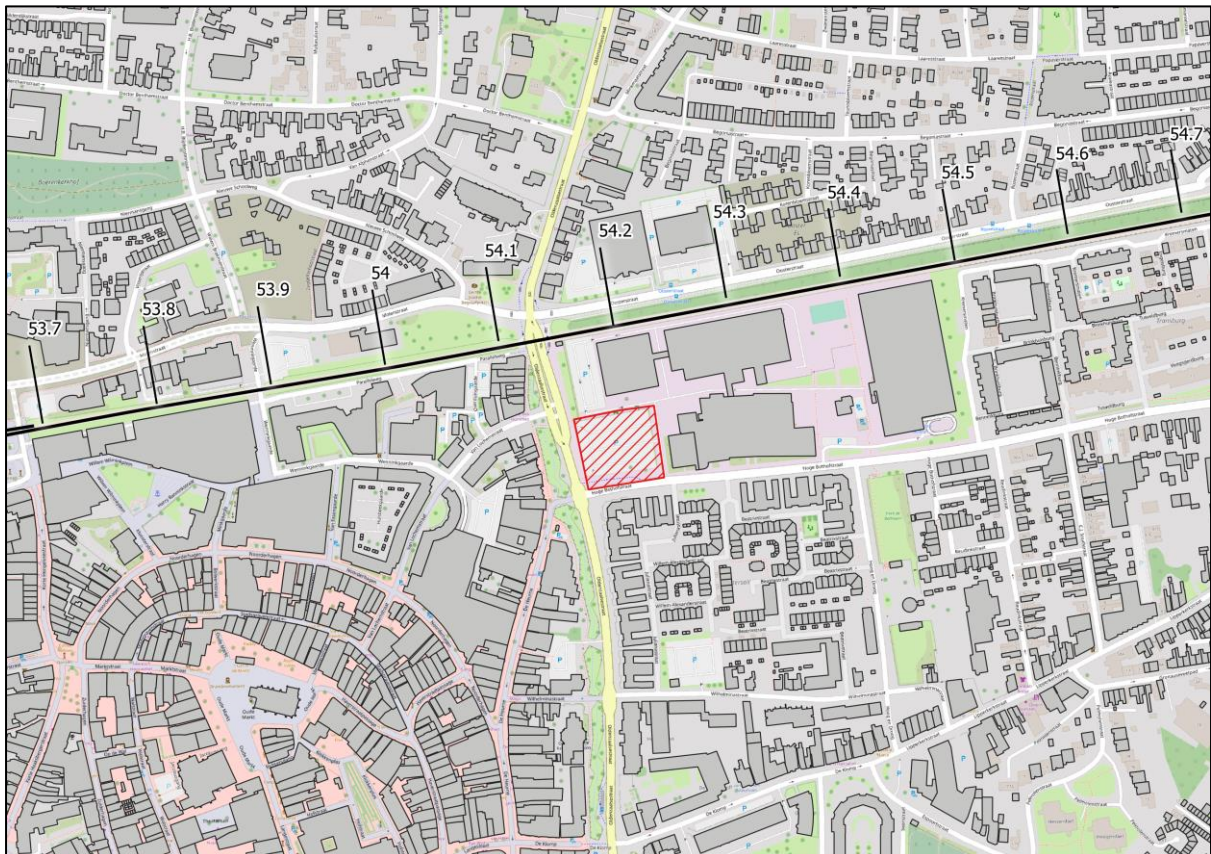
# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>5</b>
1.1	Aanleiding .....	5
1.2	Doel .....	5
1.3	Leeswijzer .....	6
<b>2</b>	<b>Situatie en uitgangspunten</b> .....	<b>7</b>
2.1	Situatiebeschrijving .....	7
2.2	Uitgangspunten .....	8
<b>3</b>	<b>Beoordelingskader</b> .....	<b>10</b>
3.1	Beoordelingskader.....	10
3.2	Rekenmethode .....	11
<b>4</b>	<b>Verwachte trillingen in de woningen</b> .....	<b>14</b>
4.1	Meetresultaten.....	14
4.2	Trillingen in geplande nieuwbouw .....	14
4.3	Onzekerheden in het onderzoek.....	17
<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b> .....	<b>19</b>
<b>I</b>	<b>Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek</b> .....	<b>20</b>
<b>II</b>	<b>Bijlage Rekenmodel Buildyn</b> .....	<b>22</b>
	Fundering .....	23
	Draagconstructie .....	23
	Vloeren .....	24
	Resultaten .....	25
<b>III</b>	<b>Bijlage meetresultaten</b> .....	<b>26</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Op het Bothofterrein in de nabijheid van de Performance Factory in Enschede worden 198 appartementen en een commerciële plint gerealiseerd. De locatie wordt op dit moment gebruikt als parkeerterrein. Het plangebied bevindt zich in de nabijheid van de spoorlijn Enschede – Gronau, zie Figuur 1. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet *op voorhand* worden uitgesloten.



Figuur 1 Plangebied Performance Factory Enschede

## 1.2 Doel

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

### 1.3 Leeswijzer

Wij beschrijven de situatie in het onderzoeksgebied en de uitgangspunten in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 lichten we het beoordelingskader en de gevolgde rekenmethodiek toe. Met behulp van de uitgangspunten berekenen we de trillingen in het onderzoeksgebied voor de geplande bebouwing op basis van de gemeten trillingen en de eigenschappen en functies van de bebouwing. Het resultaat van deze stap wordt in hoofdstuk 4 beschreven. In hoofdstuk 5 geven we de conclusies en aanbevelingen.

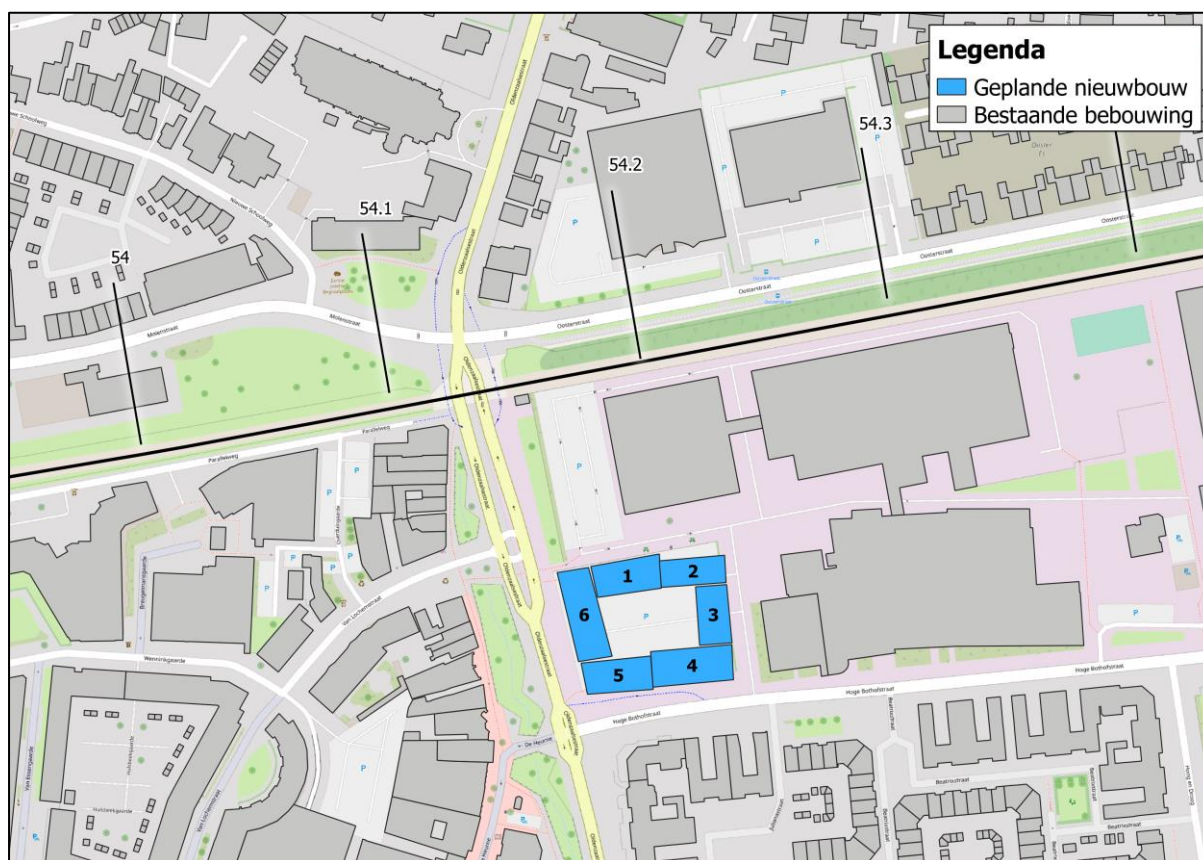
De bijlages bevatten technische informatie van het onderzoek, zoals een toelichting op de rekenmethodiek en relevant grondonderzoek.

## 2 Situatie en uitgangspunten

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

### 2.1 Situatiebeschrijving

De planlocatie wordt op dit moment gebruikt als parkeerterrein. De geplande bebouwing bestaat uit zes blokken met appartementen en ruimte voor commerciële activiteiten op de begane grond, zie Figuur 2. De nieuwbouw varieert in hoogte tussen vier en zeven bouwlagen.



Figuur 2 Bestaande en toekomstige bebouwing

De nieuwbouw bevindt zich op een afstand van 75 tot 115 meter van het spoor, deels met bestaande bebouwing tussen het spoor en de geplande nieuwbouw. Het aantal treinen per uur per richting en de rijsnelheid van de treinen zijn weergegeven in Tabel 1. Deze gegevens zijn gebaseerd op gegevens uit het Geluidsregister Spoor en gegevens van de vervoerder (DB). Er vindt geen structureel goederenvervoer plaats. Er wordt geen verandering in het aantal treinen voorzien.

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

Type trein	Rijsnelheid (km/h)	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Stoptrein	60 – 100 km/h	2.00	2.00	0.75

Lokaal, zwaar wegverkeer zal naar verwachting niet voor voelbare trillingen in de nieuwbouw zorgen, gezien de vlakke wegopbouw (asfalt, geen drempels of asfaltschades). Wegverkeer is in dit onderzoek niet nader kwantitatief beschouwd.

## 2.2 Uitgangspunten

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

### 2.2.1 Gegevens bebouwing

In het plangebied worden 198 appartementen en commerciële ruimten gerealiseerd. Er is een voorlopig ontwerp van de bebouwing beschikbaar (van 30 september 2020). De voor trillingen meest relevante aspecten zijn weergegeven in Tabel 2. Het rekenmodel voor de bebouwing is gebaseerd op Tabel 2.

*Tabel 2 Eigenschappen bebouwing*

Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Houten vloer, diverse varianten doorgerekend
Hoogte	15.5 tot 21.5 m
Lengte vloerveld	3.85 m
Breedte vloerveld	11.5 m
Fundering	Op palen
Constructietype	Modulaire houtskeletbouw met gevels van metselwerk Begane grond staal-betonconstructie

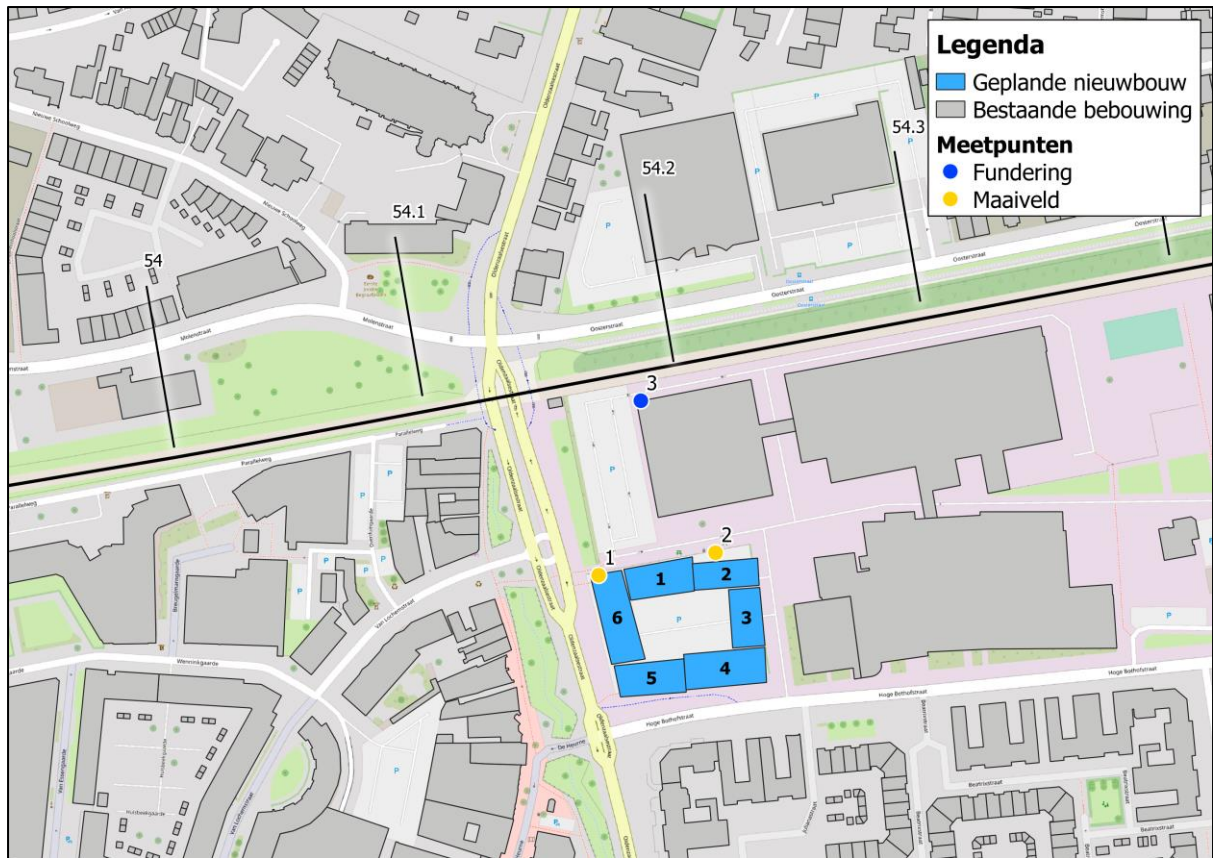
### 2.2.2 Gegevens ondergrond

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 op drie punten in en nabij het onderzoeksgebied, zie Figuur 3. De metingen zijn uitgevoerd in januari 2021, en zijn verricht op maaiveld ter hoogte van de geplande nieuwbouw en aan de fundering van een bestaand pand langs het spoor. De meetresultaten van het meetonderzoek geven we weer in hoofdstuk 4.





Figuur 3 Meetpunten in en bij het onderzoeksgebied

# 3 Beoordelingskader

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

## 3.1 Beoordelingskader

Er bestaat in Nederland geen wettelijk kader voor de beoordeling van trillingshinder in gebouwen. Wel geldt dat in het kader van een goede ruimtelijke ordening kan worden verzocht om trillingen mee te nemen bij de wijziging van bestemmingsplannen waar trillingen een rol kunnen spelen. Op basis van jurisprudentie wordt al enkele decennia gebruik gemaakt van de SBR-richtlijn om trillingen in gebouwen te beoordelen.<sup>1</sup>

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

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

1. De richtlijn toetst zowel een maximaal optredende trillingssterkte ( $V_{max}$ , treedt op bij de trein die gedurende de meetperiode de hoogste trillingen veroorzaakt) als het tijdsgemiddelde van de trillingen ( $V_{per}$ , deze grootheid is in tegenstelling tot  $V_{max}$  dus ook afhankelijk van het aantal treinen).
2. De richtlijn maakt in de beoordeling onderscheid tussen verschillende situaties, en toetst daarbij strenger in:
  - a. Nieuwbouwsituaties (nieuwe gebouwen, nieuw spoor, aanleg van wissels). Bij bestaande situaties zijn de streefwaarden minder streng, er wordt dan uitgegaan van een zekere mate van gewenning en er zijn minder mogelijkheden om de trillingen te reduceren.
  - b. Gebouwen met een overnachtingsfunctie (woningen, ziekenhuizen). De meeste hinder wordt vaak in rust ervaren. Bij gebouwen met een niet-overnachtingsfunctie (kantoren, scholen) gelden minder strenge streefwaarden. Winkels, sport- en industriepanden vallen buiten de richtlijn. In het huidige plan gaat het om woonfuncties in combinatie met een commerciële plint. De commerciële ruimtes vallen buiten het beoordelingskader.

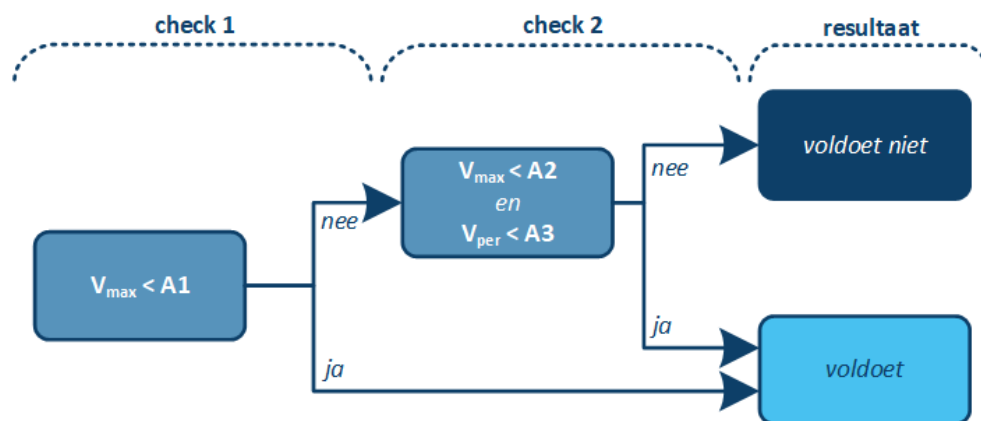
---

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

- c. De nacht, omdat de meeste hinder vaak in rust wordt ervaren. De streefwaarden voor overdag zijn ca. een factor 2 minder streng dan 's nachts.
3. Een woning kan op twee manieren voldoen aan de richtlijn: de trillingssterkte  $V_{max}$  moet lager zijn dan de onderste streefwaarde A1 (zie Tabel 3), óf  $V_{max}$  moet lager zijn dan de bovenste streefwaarde A2, waarbij tegelijkertijd de trillingsintensiteit  $V_{per}$  lager is dan de streefwaarde A3. Zie ook het schema in Figuur 4.

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

Situatie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Nieuwe situatie	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
Bestaande situatie	0.2	0.8	0.10	0.2	0.4	0.10



Figuur 4 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

## 3.2 Rekenmethode

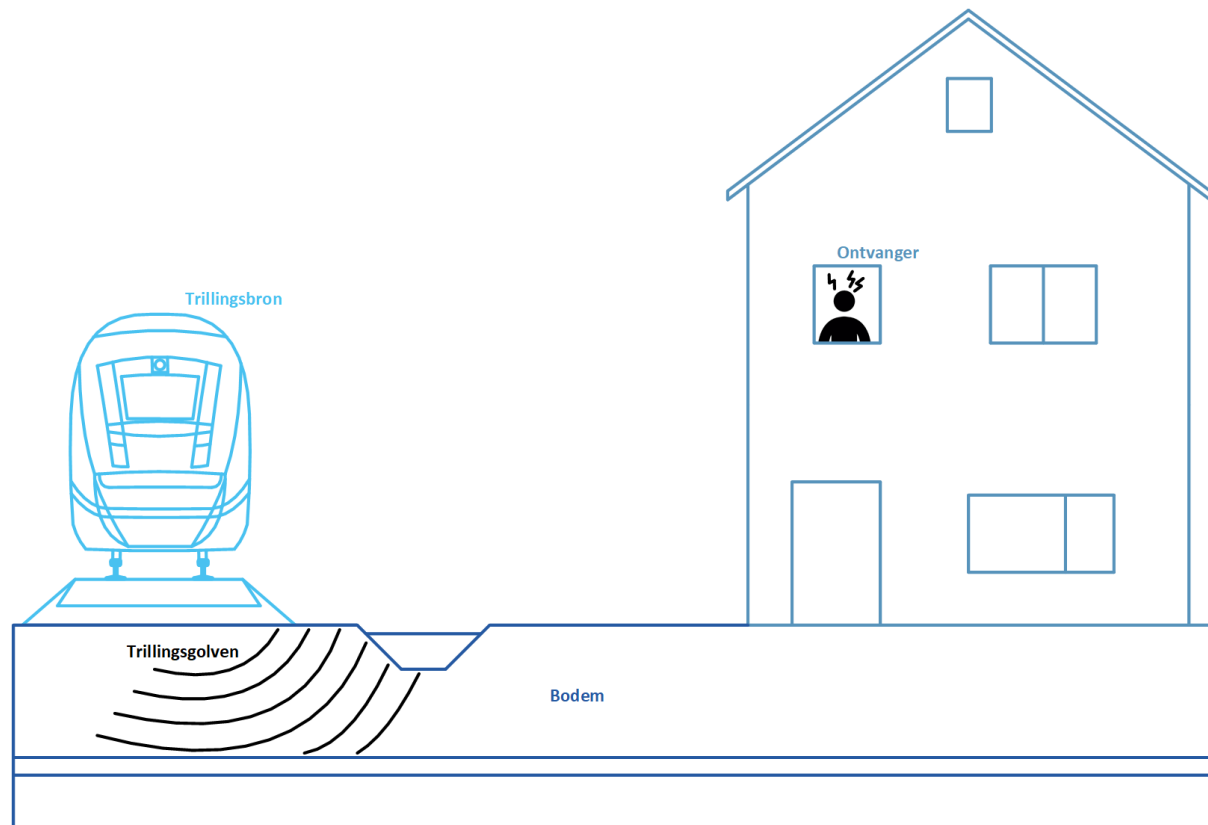
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde gebouwen, wordt op basis van metingen aan bestaande bebouwing een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande nieuwe bebouwing. Deze verwachte trillingen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

### 3.2.1 Trillingen – van trillingsbron naar gebouw

Trillingen ontstaan doordat een bewegend object (een trein, tram of vrachtwagen bijvoorbeeld) over een niet-efen ondergrond rijdt. Door de massa en beweging van het voertuig, variaties in de ondergrond (die per definitie niet perfect vlak is) en variaties in de rondheid van de wielen van het voertuig ontstaan spanningen in de bodem die zich door de bodem verplaatsen. Afhankelijk van de opbouw van de bodem en de aanwezigheid van obstakels (zoals sloten en damwanden) verplaatsen de trillingen zich diep of juist ondiep door de bodem. Gebouwen worden daardoor in trilling gebracht. Afhankelijk van hoe het gebouw is geconstrueerd, worden bepaalde trillingen meer of minder versterkt in het gebouw. Deze trillingen kunnen als hinderlijk worden ervaren door personen in gebouwen. Dit hele systeem van trillingsbron (hier de trein), overdrachtsmedium (de

bodem, waardoor de trillingen zich verplaatsen) en ontvanger (het gebouw met daarin de personen die de hinder ervaren) is schematisch weergegeven in Figuur 5.

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



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

### 3.2.2 De trillingsbron

In dit onderzoek zijn treinen de bron van de trillingen. De trillingen van het treinverkeer zijn gemeten door Alcedo op meerdere punten in (de omgeving van) het plangebied, onder meer op maaiveld en aan de fundering van bestaande bebouwing. De beoordeling van de trillingen in de geplande bebouwing heeft plaatsgevonden op basis van deze metingen.

### 3.2.3 De bodem

De bodem op deze locatie bestaat hoofdzakelijk uit een zand- en leemlagen, zie bijlage I. De uitdemping van de trillingen met de afstand is bepaald met een rekenmodel op basis van deze bodemopbouw voor een zo betrouwbaar mogelijke predictie van de trillingen.

### 3.2.4 Het gebouw

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

een zogenaamd beam-element model (BEM) waarin de gebouwen gemodelleerd en doorgerekend zijn. De resultaten van het model zijn geïkt met praktijkresultaten uit metingen. Een toelichting op het rekenmodel Buildyn is gegeven in bijlage II.

# 4 Verwachte trillingen in de woningen

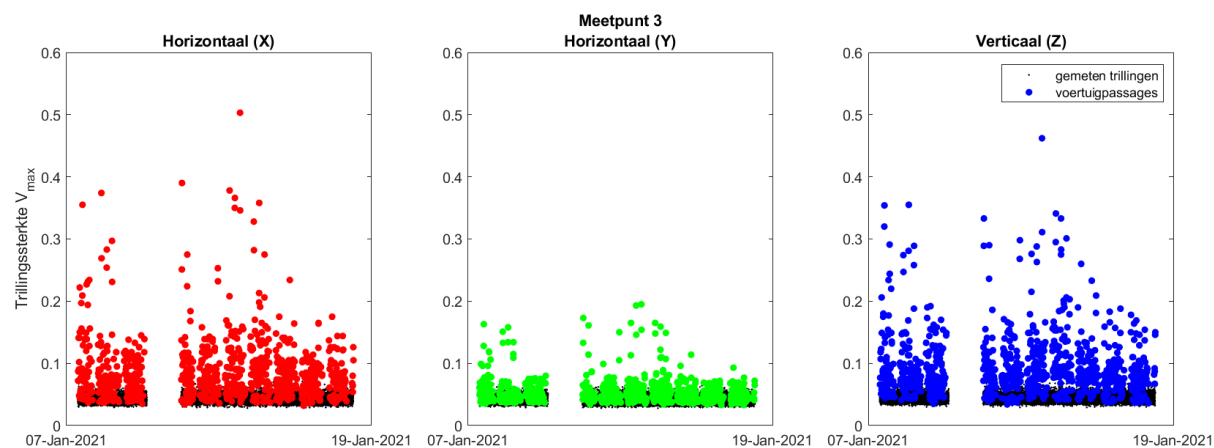
In dit hoofdstuk wordt eerst een korte toelichting gegeven op de meetresultaten, daarna worden de verwachte trillingen in de geplande bebouwing gegeven. Hierbij is gebruik gemaakt van de beoordelingsmethode en de rekenmethodiek zoals toegelicht in het voorgaande hoofdstuk.

## 4.1 Meetresultaten

Alcedo heeft metingen uitgevoerd aan de fundering van bestaande panden en op maaiveld in de nabijheid van de onderzoekslocatie. De trillingen op meetpunt 3 (fundering bestaand gebouw) zijn weergegeven in Figuur 6.

In Figuur 6 valt het volgende op:

1. De trillingen zijn maatgevend in de verticale richting, maar ook in horizontale X-richting (loodrecht op het spoor) zijn de trillingen hoog. Opvallend is dat de laatste dagen van de meting de trillingen lager zijn, mogelijk dat er tijdens de eerste dagen een trein met een afwijkend trillingsniveau reed (bijv. slechter wielonderhoud).
2. Door de korte afstand tot het spoor (ca. 9.5 m) zijn de trillingen hoog. De nieuwbouw wordt op aanzienlijk grotere afstand tot het spoor gerealiseerd (minimaal 75 m afstand). De uitdemping van de trillingen met de afstand is bepaald met behulp van de andere meetpunten, zie bijlage III.



Figuur 6 Gemeten trillingen op meetpunt 3 (fundering van bestaand pand nabij het spoor)

## 4.2 Trillingen in geplande nieuwbouw

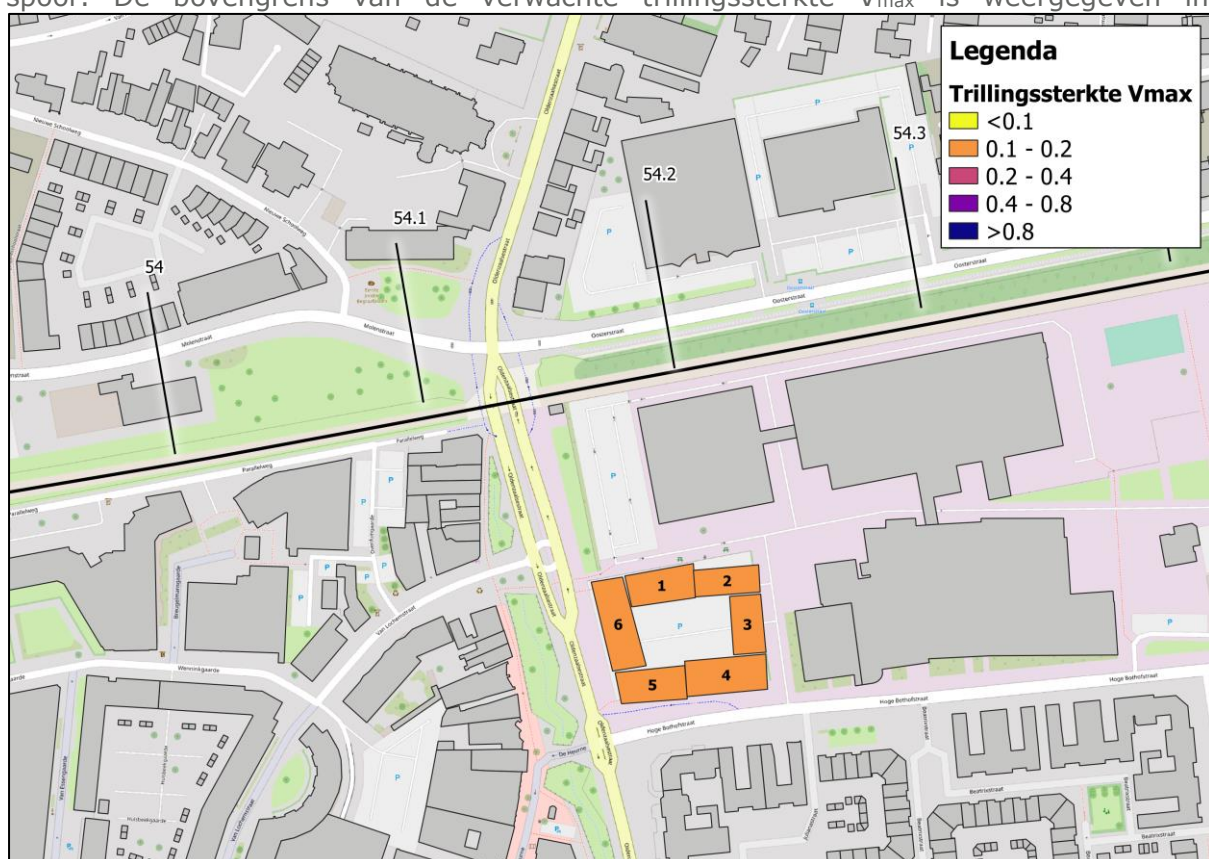
De geplande gebouwen zijn gemodelleerd op basis van de input uit hoofdstuk 2. Het (frequentie-afhankelijke) gedrag van de gebouwen is weergegeven in bijlage II. Met deze resultaten is bepaald in welke mate de trillingen worden versterkt tussen de huidige meetpunten en de vloeren in de toekomstige woningen. De versterking van de trillingen tussen de fundering en een maatgevend punt op de hoogste verdieping van de toekomstige gebouwen varieert per trillingsfrequentie en trillingsrichting (X, Y of Z).

Met deze overdrachten is op basis van de metingen bepaald wat de verwachte trillingen zullen zijn in de woningen (resultaten zijn weergegeven op de hoogste verdieping, op lagere verdiepingen worden lagere trillingen verwacht). De resultaten voor de trillingssterkte  $V_{max}$ , de trillingsintensiteit  $V_{per}$  en de beoordeling van de trillingen aan de SBR B-richtlijn (zie hoofdstuk 3) zijn weergegeven in Tabel 4.

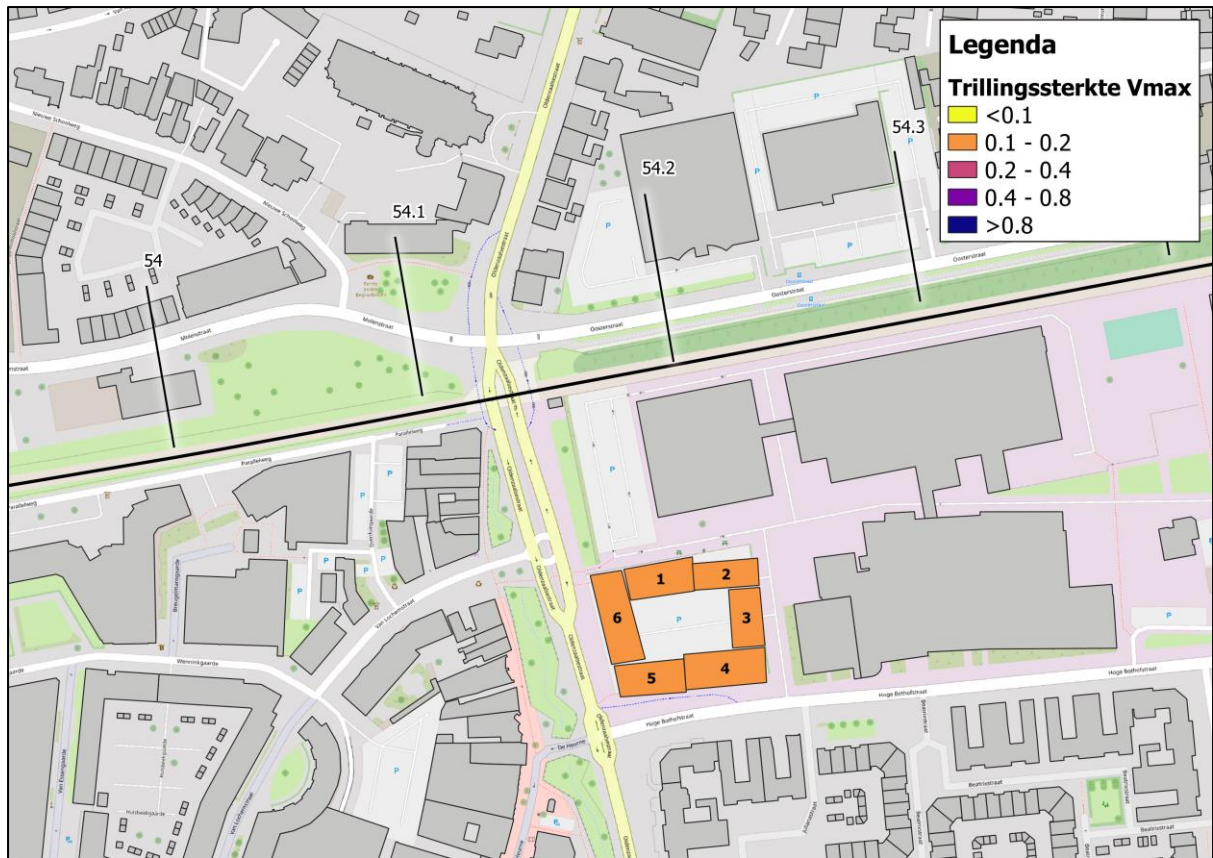
Tabel 4 Trillingen per bouwblok en beoordeling op SBR B-richtlijn (bouwbloknummers corresponderen met bouwbloknummers in Figuur 2)

Bouwblok	$V_{max}$	$V_{per}$	Beoordeling
1	0.2	0.00 - 0.01	Voldoet
2	0.2	0.00	Voldoet
3	0.2	0.00	Voldoet
4	0.2	0.00	Voldoet
5	0.2	0.00	Voldoet
6	0.2	0.00	Voldoet

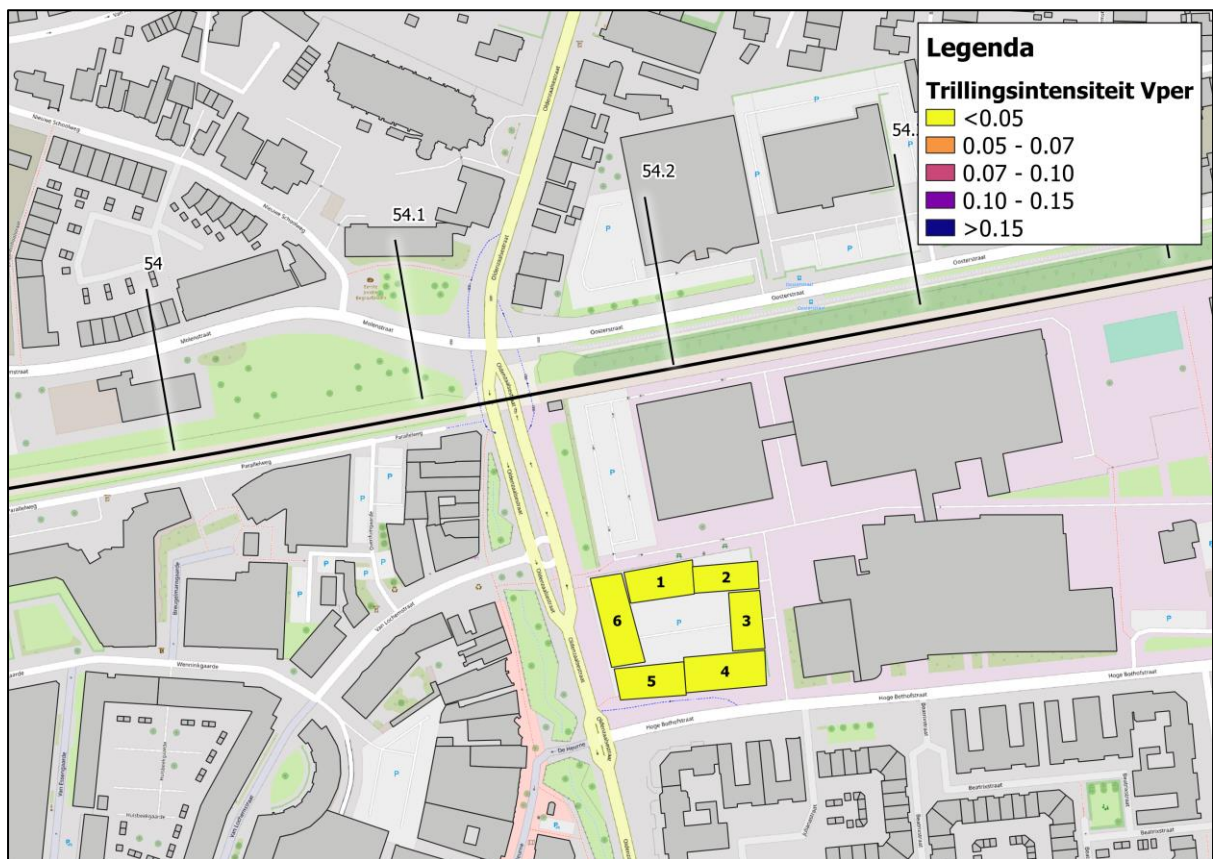
Uit Tabel 4 volgt dat er geen overschrijdingen van de streefwaarden zullen optreden. De trillingen zijn lager dan de streefwaarden, ongeacht de vloerconstructie (binnen de kaders van het Bouwbesluit). Wel geldt dat de trillingen lager zijn in de bouwblokken verder van het spoor en met een oriëntatie haaks op het spoor, dan bij een oriëntatie parallel aan het spoor. De bovengrens van de verwachte trillingssterkte  $V_{max}$  is weergegeven in



Figuur 7, de verwachte trillingsintensiteit  $V_{per}$  in Figuur 8 en de beoordeling van de trillingen aan de SBR B-richtlijn (zie hoofdstuk 3) is weergegeven in Figuur 9.

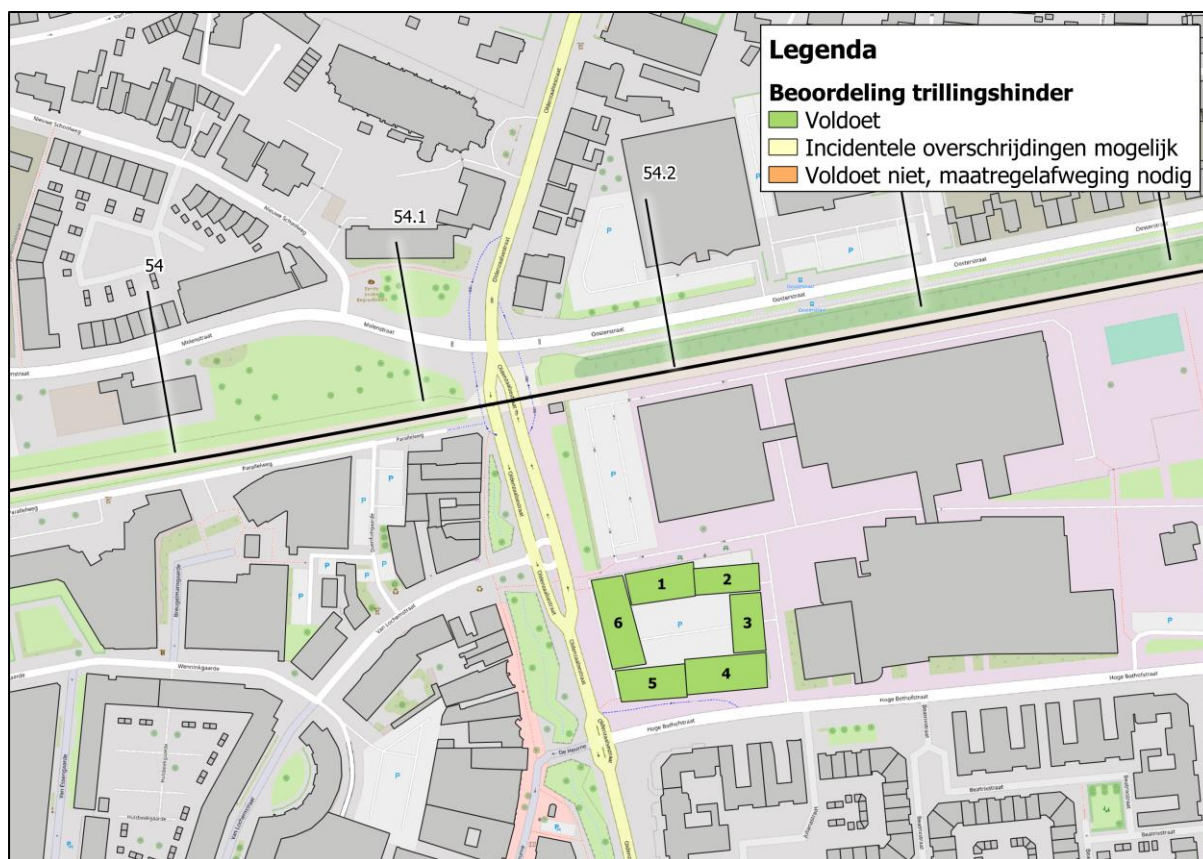


Figuur 7 Trillingssterkte  $V_{max}$  per bouwblok



Figuur 8 Trillingsintensiteit  $V_{per}$  per bouwblok





Figuur 9 Beoordeling van de trillingen aan de SBR B-richtlijn voor nieuwe situaties

Er zijn geen overschrijdingen van het beoordelingskader. Ook de meest nabij het spoor gelegen bouwblokken vallen binnen het beoordelingskader voor trillingshinder. Omdat de trillingen voldoen aan het beoordelingskader zijn er geen maatregelen of aanpassingen nodig.

### 4.3 Onzekerheden in het onderzoek

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

1. Ten aanzien van de trillingsbron: de natuurlijke variatie als gevolg van spooronderhoud en de temperatuur kan zorgen voor zo'n 30% variatie in de trillingen, afhankelijk van de spoorconstructie en de bodemopbouw. Er is gemeten in een klimatologisch als normaal te typeren periode. Er is geen informatie bekend over de status van de spoorligging op het moment van de metingen, wel is bekend dat die sterk kan variëren rond spoorwegovergangen. Ook in de huidige metingen valt op dat de meetpunten dicht bij de spoorwegovergang hogere trillingen geven dan meetpunten verder weg. Er is op basis van bovenstaande informatie geen reden om te twifelen aan de representativiteit van de berekeningen.
2. Ten aanzien van de bodem geldt dat met name op korte afstand tot het spoor variaties in de trillingen mogelijk zijn door lokale variaties in de bodem. Omdat ook op grotere afstand van het spoor is gemeten, is de invloed van die lokale variaties beperkt.
3. Ten aanzien van de gebouwen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en definitief ontwerp). Bovendien zijn er natuurlijke variaties in materiaalgedrag (van bijvoorbeeld

hout). In de berekeningen is gerekend met een verwachtingswaarde van de trillingen op basis van een aan de hand van praktijkmetingen geïjkt rekenmodel, en zijn meerdere varianten doorgerekend. Hiermee wordt een resultaat verkregen dat representatief is voor de toekomstige situatie.

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

## 5 Conclusies en aanbevelingen

In dit onderzoek zijn de verwachte trillingen in nieuw te bouwen woningen op het Bothofterrein in de nabijheid van de Performance Factory in Enschede bepaald. Uit het onderzoek volgt dat er *geen* overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder (de SBR B-richtlijn) worden verwacht.

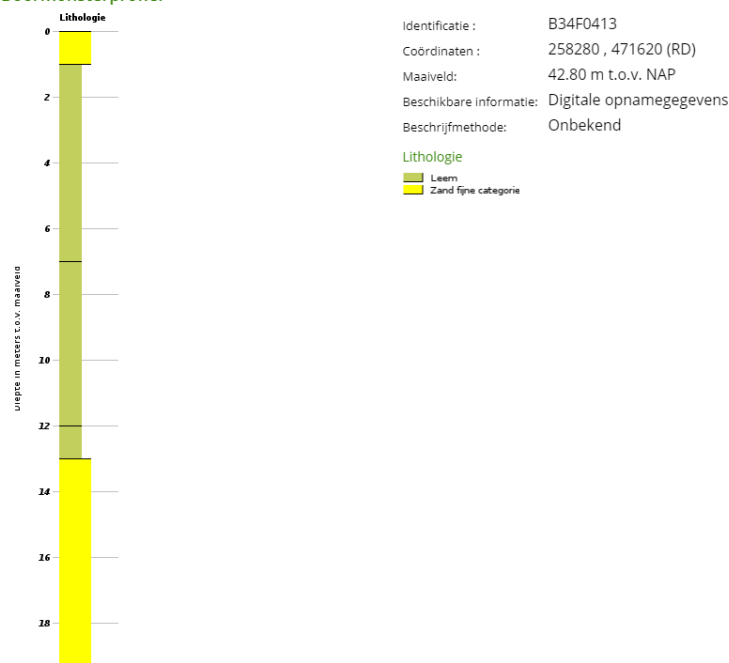
Door de grote afstand van de geplande nieuwbouw tot het spoor zijn de trillingen van treinen lager dan de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn. Daarnaast rijden er enkel stoptreinen op het traject, deze treinen genereren doorgaans lagere trillingen dan sneltreinen en goederentreinen. De trillingen zijn het laagst in bouwblokken verder van het spoor en met een oriëntatie haaks op het spoor. Er zijn geen maatregelen of aanpassingen aan de geplande bebouwing nodig om te voldoen aan het beoordelingskader.

## Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek

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

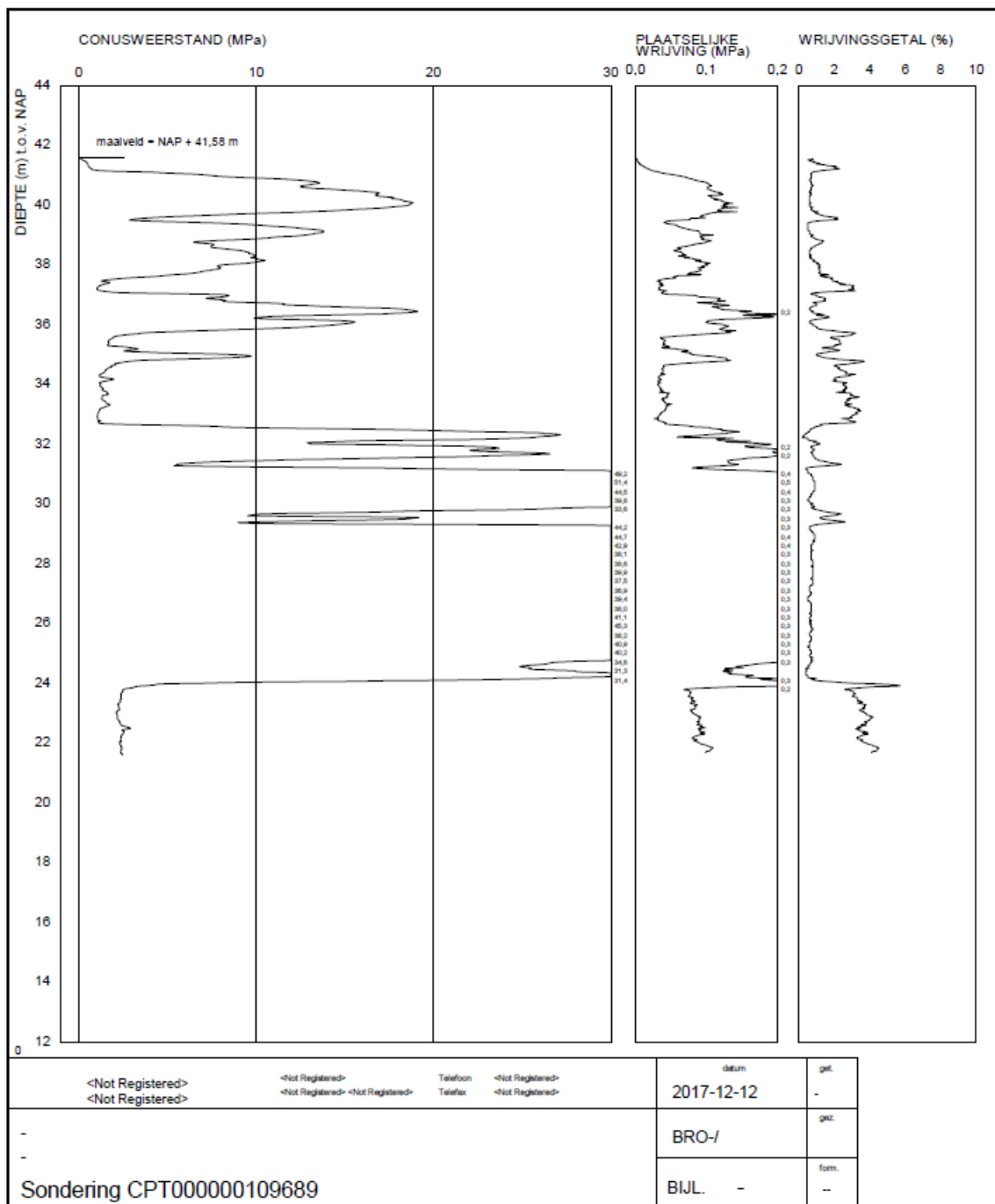
Een boring in het onderzoeksgebied (nr. B34F0413) is weergegeven in Figuur 10. Hier is te zien dat de bodem voornamelijk is opgebouwd uit zand- en leemlagen. Op andere boringen in de buurt zijn ook kleilagen zichtbaar. Door de gelaagde bodem en de aanwezigheid van zand- en leemlagen dempen de trillingen relatief slecht uit met de afstand.

### Boormonsterprofiel



*Figuur 10 Boring nabij het onderzoeksgebied, B34F0413*

Een representatieve sondering uit het onderzoeksgebied, waarin ook de gelaagde bodem zichtbaar is (aan de wisselende conusweerstand en wrijving), is weergegeven in Figuur 11.

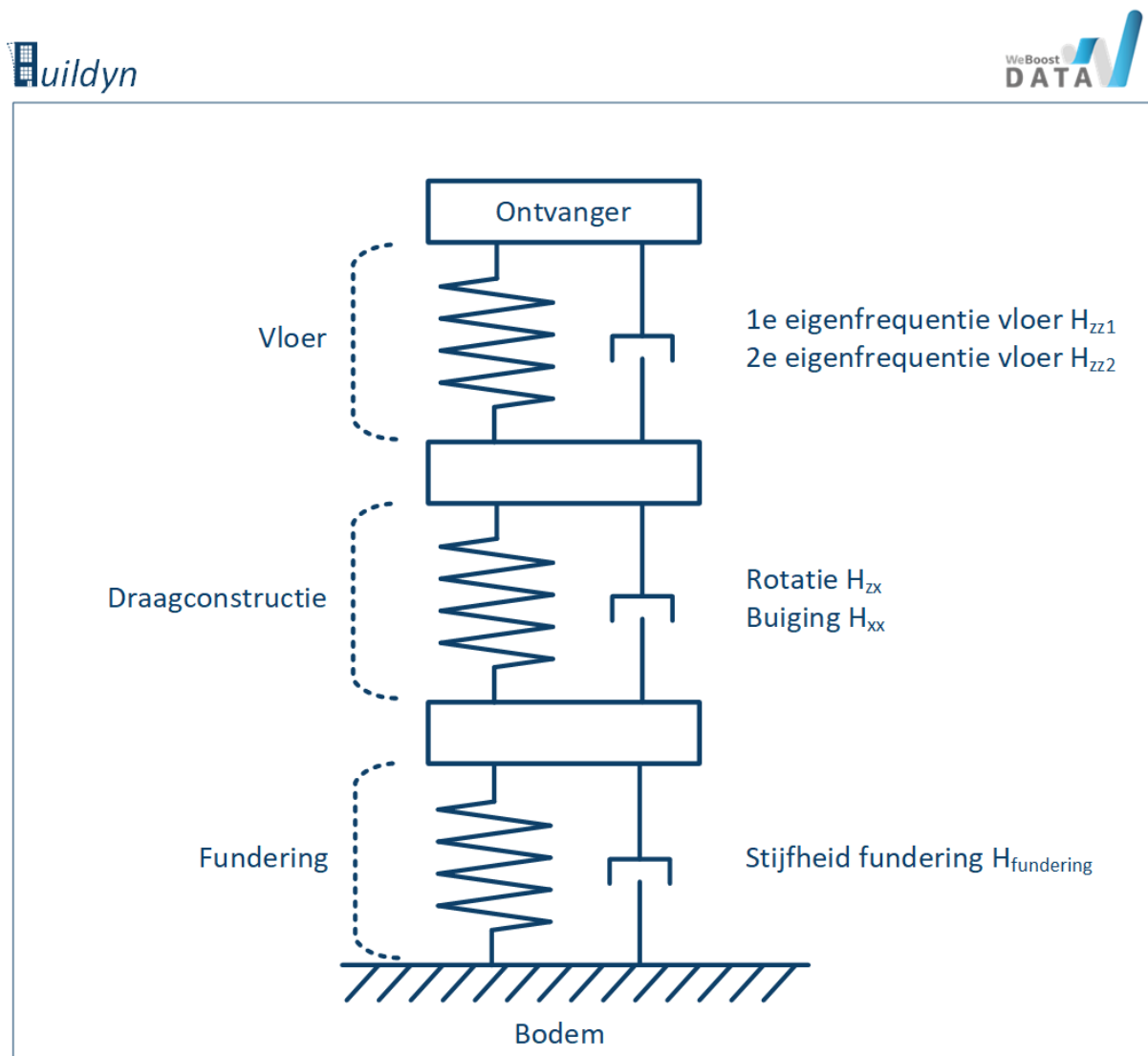


Figuur 11 Sondering nabij het onderzoeksgebied, CPT000000109689

## Bijlage Rekenmodel Buildyn

In dit rapport is gebruik gemaakt van het door We-Boost Data ontwikkelde rekenmodel Buildyn om de trillingen in de geplande bebouwing te berekenen. Buildyn is een zogenaamd beam-element model (BEM) waarin een gebouw gemodelleerd en doorgerekend wordt. De resultaten van het model zijn geijkt met praktijkresultaten uit ruim 200 metingen in gebouwen. Dit model bestaat uit een aantal modules, deze worden in deze bijlage kort toegelicht.

In Buildyn wordt een gebouw gemodelleerd door middel van gekoppelde massaveersystemen, zie Figuur 12. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 12, worden in deze bijlage nader toegelicht.



Figuur 12 Principe van Buildyn met een gebouw als gekoppeld massaveersysteem. Rechts de verschillende componenten van het rekenmodel

## Fundering

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

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

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

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

## Draagconstructie

De trillingen worden door de draagconstructie vaak versterkt. Hierbij zijn meerdere effecten te onderscheiden, waarbij met name rotatie van het gebouw als geheel (op de ondergrond), doorbuiging en vering van het gebouw op zijn fundatie een rol spelen.

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

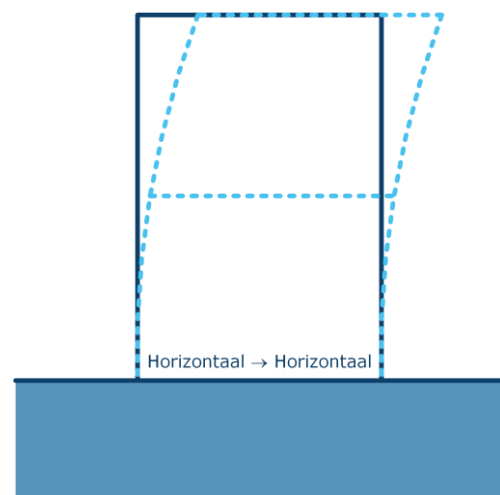
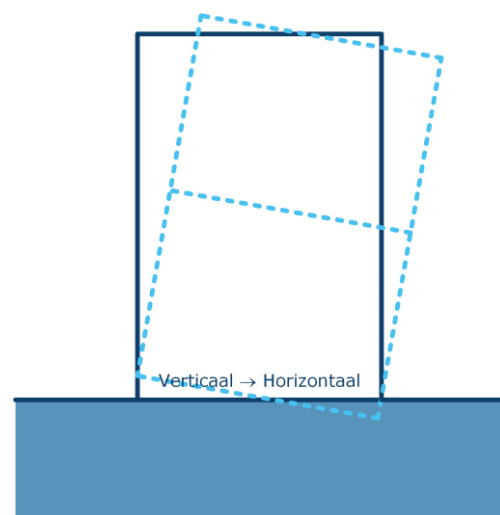
Dit effect noemen we  $H_{zx}$ , en is afhankelijk van:

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

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

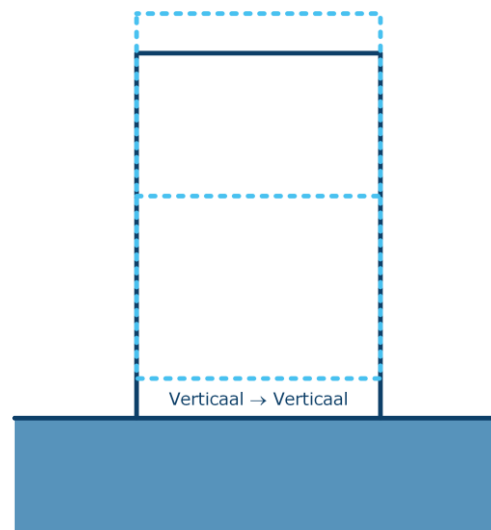
Dit effect noemen we  $H_{xx}$ , en is afhankelijk van:

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



Het derde principe, dat van vering van het gebouw op zijn fundatie, is rechts weergegeven. Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappe onderlaag. Dit effect noemen we  $H_{zz}$ , en is afhankelijk van:

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



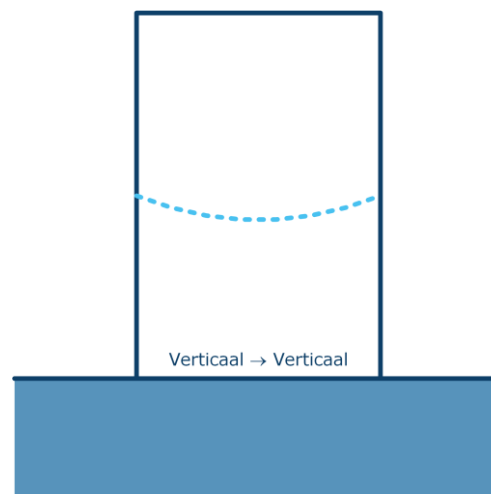
## Vloeren

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

De eerste buigmodus van de vloer (bij de eerste eigenfrequentie) is simpele doorbuiging, zoals weergegeven in de principeschets rechts. Met name de eigenfrequentie (de frequentie waarvoor de vloer gevoelig is) en de 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

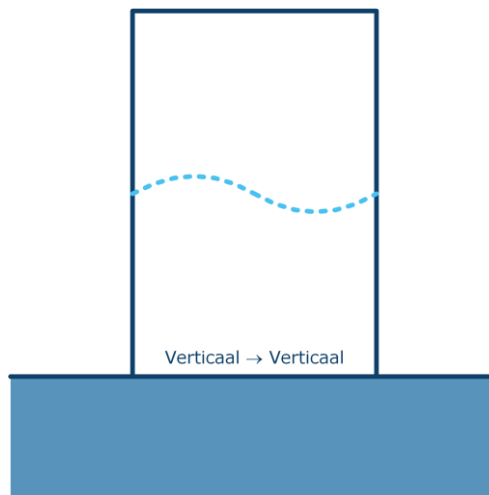




Bij de tweede buigmodus van de vloer (bij de tweede eigenfrequentie) zijn de trillingen maximaal op ongeveer  $\frac{1}{4}$  van het vloerveld, zie de princieschets rechts.

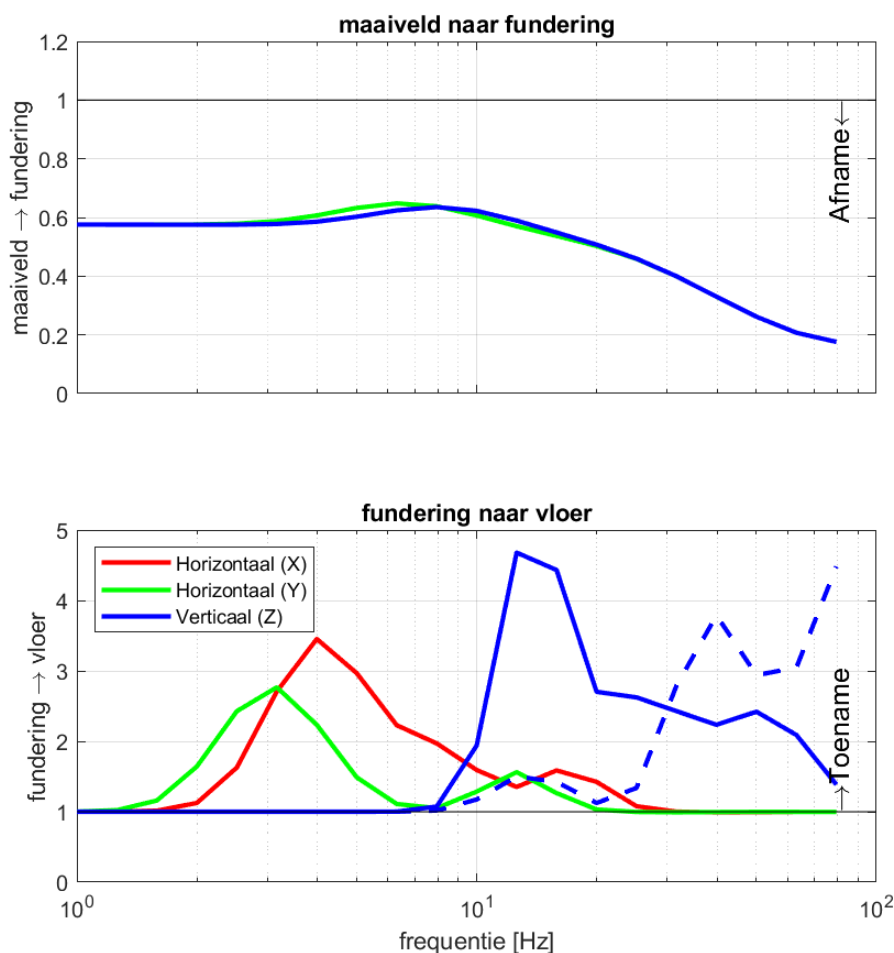
Dit effect noemen we  $H_{zz2}$ , en is afhankelijk van dezelfde parameters als  $H_{zz1}$ .

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



## Resultaten

De resultaten uit de Buildyn-berekeningen voor het bouwblok het dichtst bij het spoor (bouwblok 1), zijn weergegeven in Figuur 13.

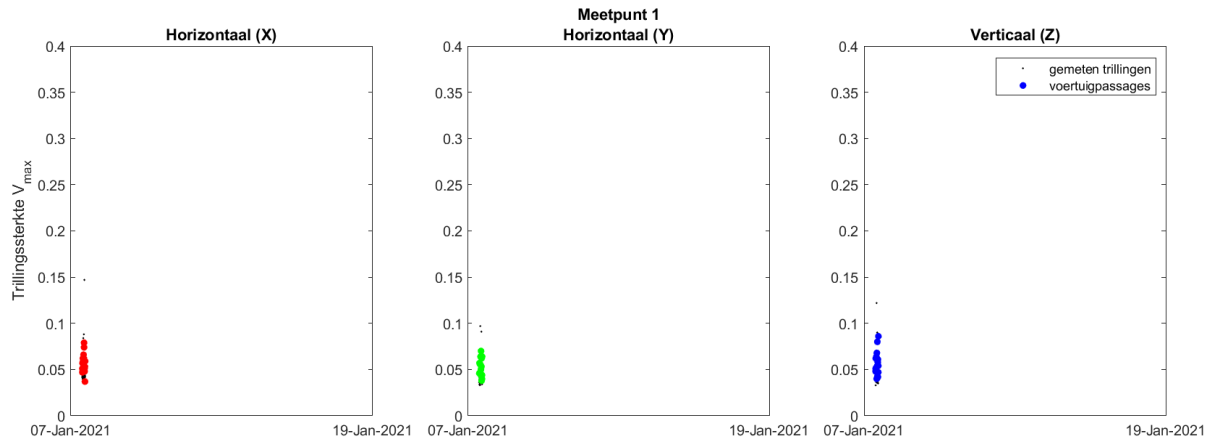


Figuur 13 Buildyn-resultaten voor het bouwblok dichtst bij het spoor. Midden vloer is weergegeven als doorgetrokken blauwe lijn, de overdracht op een kwart van de randen als een onderbroken blauwe lijn.

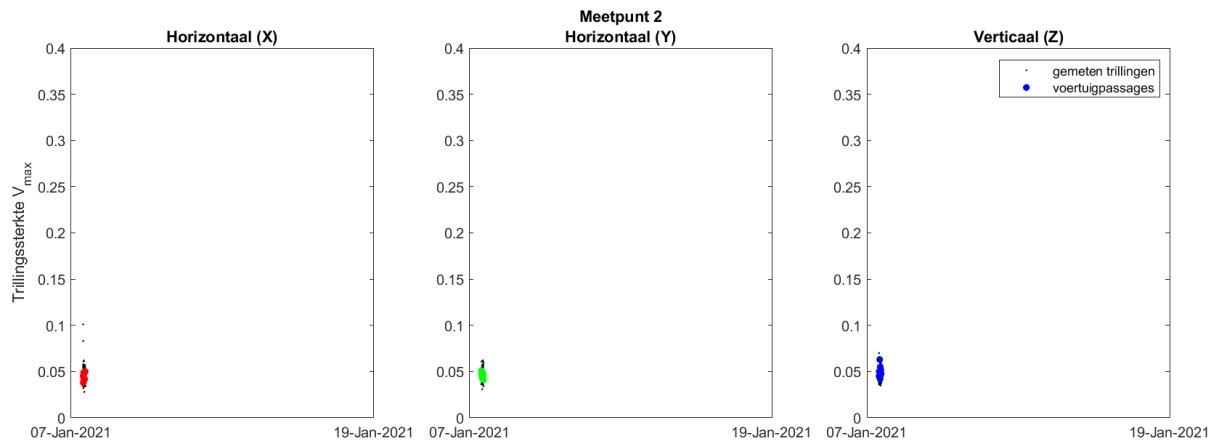


## Bijlage meetresultaten

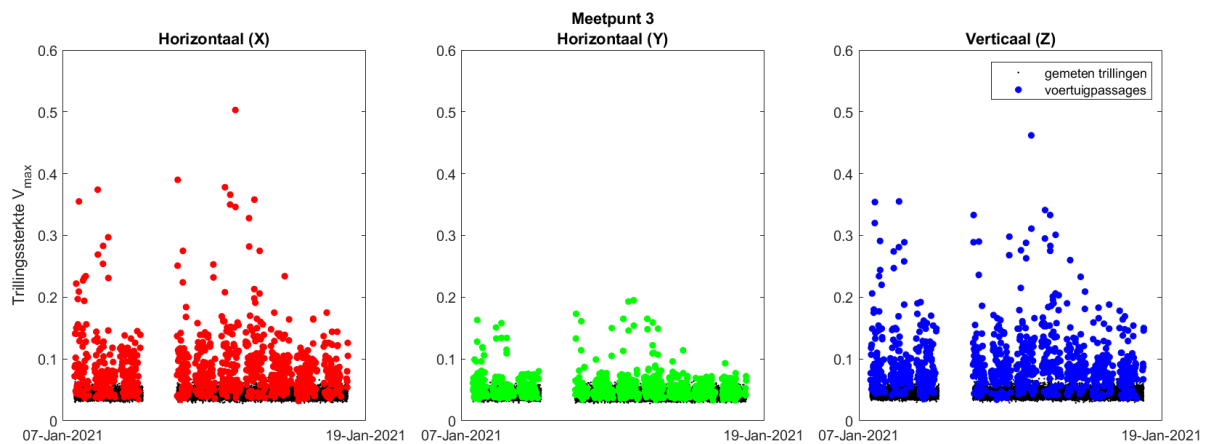
Deze bijlage bevat de resultaten van de trillingsmetingen. Per meetpunt is de trillingssterkte ( $V_{max}$ ) per 30 seconden als functie van de tijd weergegeven.



Figuur 14 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 1 (korte meting op maaiveld)

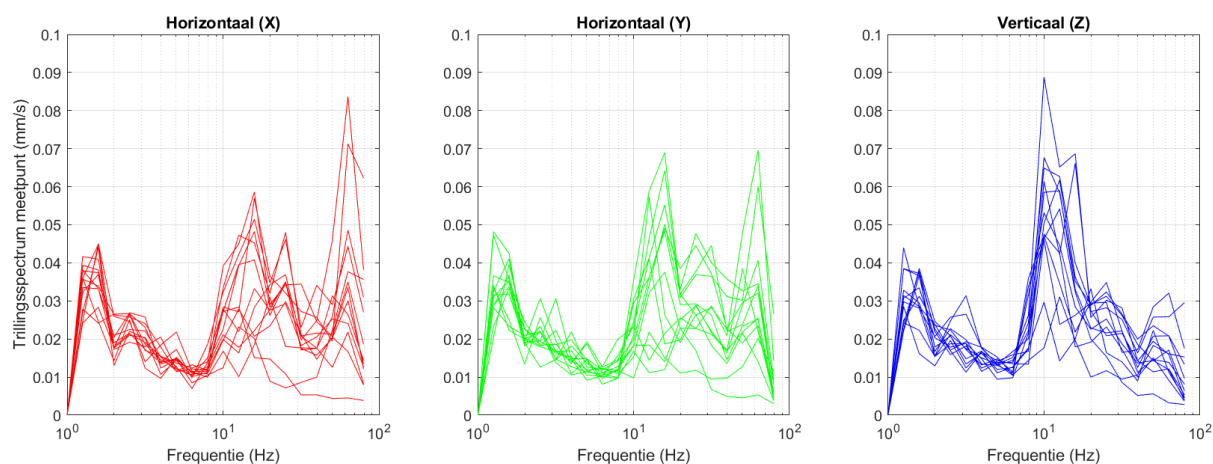


Figuur 15 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 2 (korte meting op maaiveld)

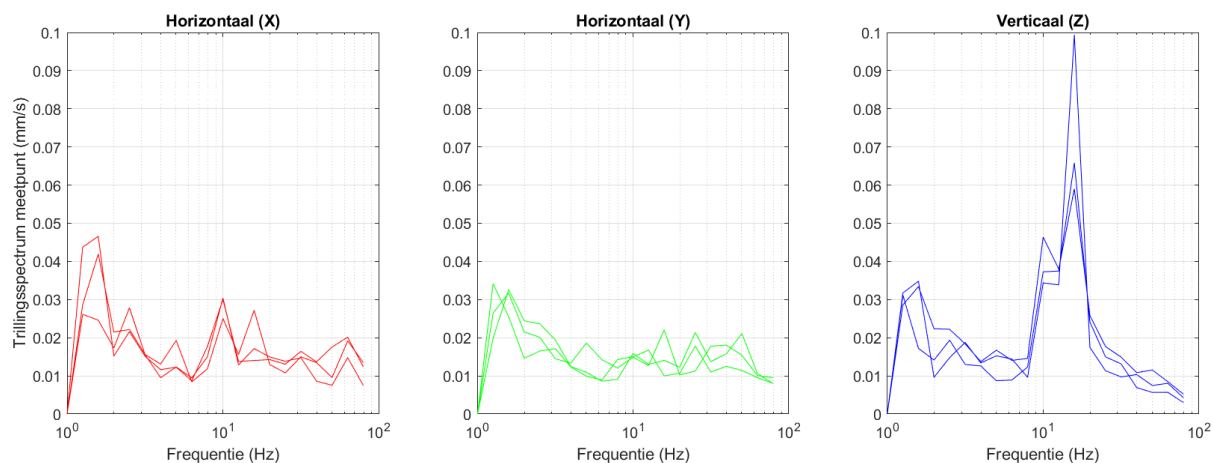


Figuur 16 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 3 (lange meting aan fundering gebouw)

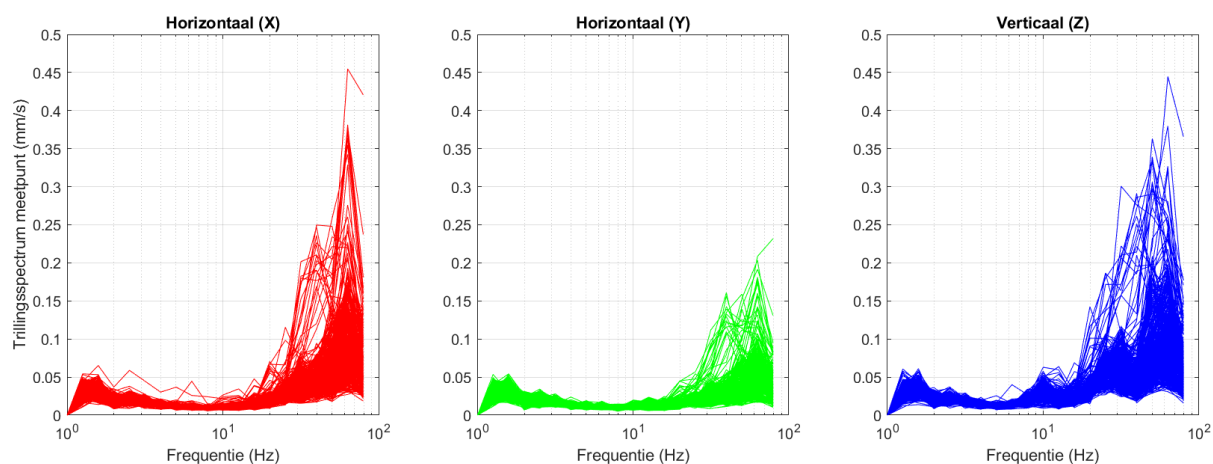
Op de meetpunten zijn ook trillingspectra geregistreerd. Deze trillingspectra zijn vertaald naar tertsbandspectra (1/3 octaafbandspectra) en weergegeven in de hierna volgende figuren.



*Figuur 17 Trillingspectra op meetpunt 1 (maaiveld, korte meting)*

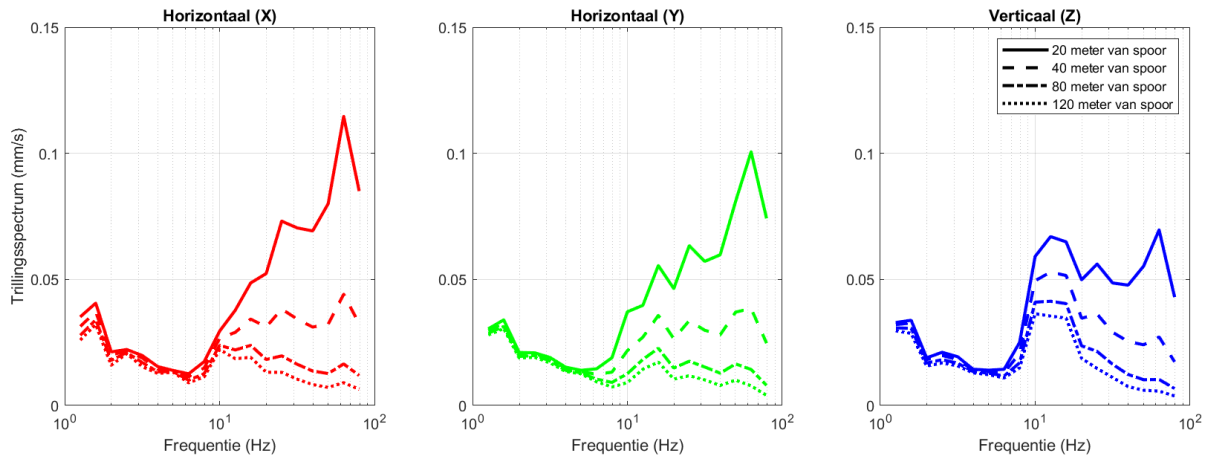


*Figuur 18 Trillingspectra op meetpunt 2 (maaiveld, korte meting)*



*Figuur 19 Trillingspectra op meetpunt 3 (fundering, lange meting)*

De gemiddelde trillingspectra op 20, 40, 80 en 120 meter van het spoor zijn weergegeven in Figuur 20. Hier is te zien dat de trillingen met name bij hogere frequenties snel uitdoven met de afstand, rond de 10 Hz is de afname minder sterk.

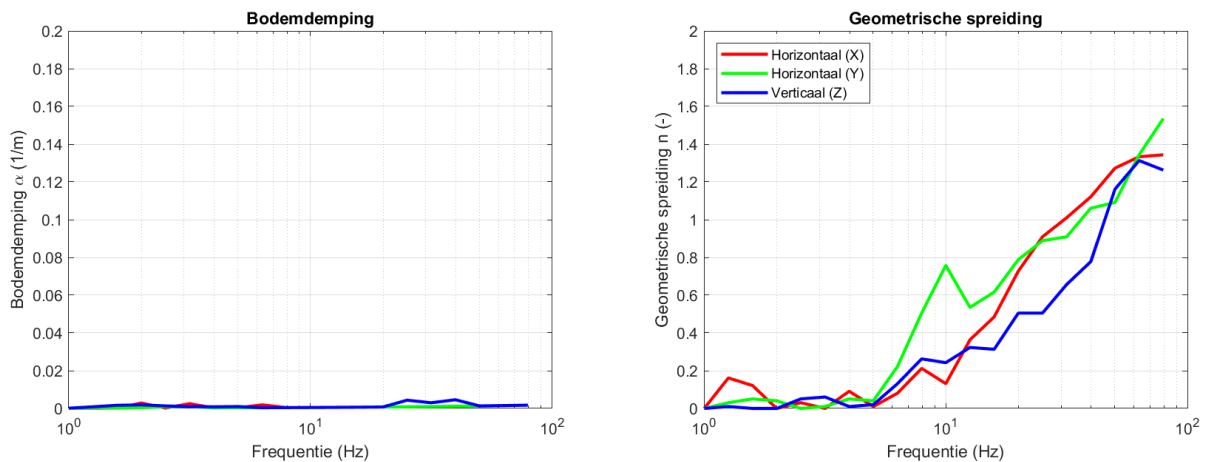


Figuur 20 Trillingspectra op 20, 40, 80 en 120 meter van het spoor

Met behulp van deze trillingspectra is de uitdemping van de trillingen met de afstand bepaald. Voor deze uitdemping van de trillingen met de afstand wordt de Barkanvergelijking gebruikt (zie vergelijking 1).

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

Hierbij is  $V(r)$  de trillingssterkte op een willekeurige afstand  $r$ ,  $r_0$  is een referentieafstand (hier 20 meter),  $\alpha$  is de bodemdemping (zie Figuur 21) en  $n$  is de geometrische uitspreiding van de trillingsgolf (zie Figuur 21). Deze resultaten zijn gebruikt om de uitdemping van de trillingen met de afstand te bepalen.



Figuur 21 Bodemdemping  $\alpha$  (links) en geometrische spreidingsfactor  $n$  (rechts) in het plangebied