

**WV  
EBOOST**



**TRILLINGSONDERZOEK T.B.V. NIEUWBOUW**

---

**LAGE BOTHOFSTRAAT  
ENSCHEDÉ**

# COLOFON

Auteur



Controle en vrijgave



Projectcode

*WBD2023-021*

Versienr

*2.0*

Datum

*28 juni 2023*

Status

*Definitief*

Opdrachtgever

*Gemeente Enschede*

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van metingen van



© We-Boost 2023

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



## DE KERN VAN DIT RAPPORT

Op de hoek van de Lage Bothofstraat met de Oostburgweg in Enschede wordt nieuwbouw gerealiseerd op een braakliggend terrein. Het betreft 8 grondgebonden woningen. De geplande nieuwbouw ligt dichtbij de spoorlijn Enschede - Gronau. Daardoor kunnen trillingen van treinverkeer als hinderlijk worden ervaren.

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

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

### CONCLUSIES

De belangrijkste conclusie van het onderzoek is dat wordt voldaan aan het beoordelingskader, mits geen houtskeletbouw of lichte staalbouw wordt toegepast. Met conventionele bouw (betonnen of kalkzandsteen skelet, betonnen vloeren) wordt voldaan aan het beoordelingskader.

Ook vanuit het perspectief van trillingen door wegverkeer (m.n. incidenteel zwaar wegverkeer over de drempels in de Lage Bothofstraat) wordt geadviseerd om geen lichte bouw (houtskeletbouw of staalbouw) toe te passen. Door lichte bouw te vermijden zijn er geen overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder, en hoeft verder geen rekening te worden gehouden met trillingen tijdens de verdere uitwerking van het plan.

# INHOUDSOPGAVE

<b>I.</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>6</b>
1.1.	Aanleiding	6
1.2.	Doel	6
1.3.	Leeswijzer	6
<b>2.</b>	<b>SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN</b>	<b>9</b>
2.1.	Situatie	9
2.2.	Uitgangspunten	10
<b>3.</b>	<b>BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE</b>	<b>13</b>
3.1.	Trillingen en wetgeving	13
3.2.	Beoordelingskader trillingshinder	13
3.3.	Rekenmethode	14
<b>4.</b>	<b>VERWACHTE TRILLINGEN</b>	<b>18</b>
4.1.	Meetresultaten	18
4.2.	Trillingen in geplande gebouwen	18
4.3.	Onzekerheden in het onderzoek	19
<b>I.</b>	<b>GRONDONDERZOEK</b>	<b>21</b>
<b>II.</b>	<b>REKENMODEL</b>	<b>23</b>
<b>III.</b>	<b>RESULTATEN METINGEN</b>	<b>27</b>

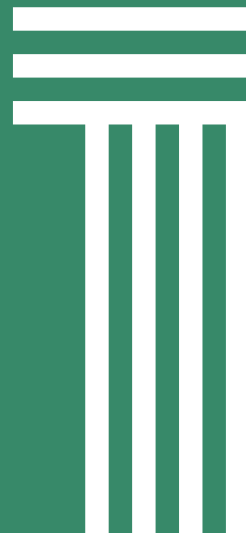




## INLEIDING



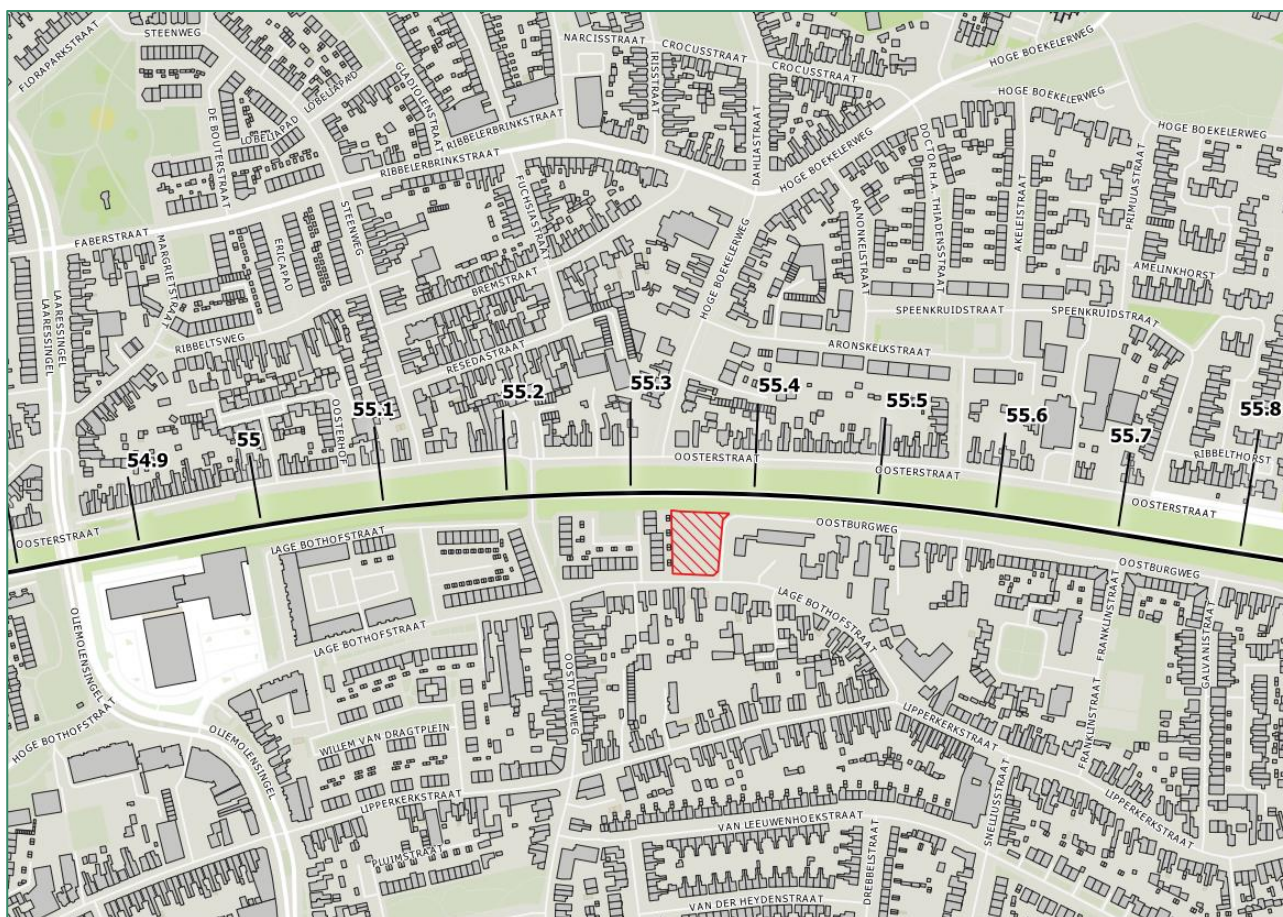
In dit hoofdstuk geven we een korte omschrijving van de inhoud van dit onderzoek: de aanleiding, het doel van het onderzoek en een beknopte leeswijzer om informatie snel te kunnen vinden.



# INLEIDING

## 1.1. AANLEIDING

Op de hoek van de Lage Bothofstraat met de Oostburgweg in Enschede wordt nieuwbouw gerealiseerd op een braakliggend terrein. De geplande nieuwbouw ligt dichtbij de spoorlijn Enschede - Gronau, zie Figuur 1. Daardoor kunnen trillingen van treinverkeer als hinderlijk worden ervaren.



Figuur 1 Plangebied

## 1.2. DOEL

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

## 1.3. LEESWIJZER

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

trillingen en de eigenschappen van de gebouwen. Het resultaat van deze stap wordt in hoofdstuk 4 beschreven.

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

In het plangebied bevindt zich momenteel een grasveld en een parkeerterrein. Hier worden in totaal 8 woningen gerealiseerd. De bestaande en geplande bebouwing is weergegeven in Figuur 2.



*Figuur 2 Huidige en toekomstige bebouwing rond de planlocatie*

De bebouwing is gepland in een zone van ca. 25 tot 60 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. Er rijden geen goederentreinen op dit traject. 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	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Stoptrein	100 - 1100 km/h	2.00	2.00	0.75

Andere trillingsbronnen, zoals zwaar wegverkeer, kunnen ook voor voelbare trillingen zorgen, met name over de drempels in de Lage Bothofstraat. Het aantal zware vrachtbewegingen is echter beperkt. In dit onderzoek is wegverkeer niet kwantitatief beschouwd. Globaal geldt dat zware bouw zorgt voor minder hinder van trillingen door wegverkeer. Lichte bouw (zoals houtskeletbouw of houten vloeren) dient te worden vermeden, met name in de woningen dichtbij de Lage Bothofstraat.

## 2.2. UITGANGSPUNTEN

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

### 2.2.1. GEGEVENS BEBOUWING

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

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Meerdere varianten beschouwd: <ul style="list-style-type: none"><li>• Kanaalplaatvloer 200 en 260 mm, 70 mm zandcement dekvloer</li><li>• Breedplaatvloer 200 en 250 mm, 70 mm zandcement dekvloer</li><li>• Houten balkenvloer</li></ul>
Hoogte	6 tot 9 meter
Lengte vloerveld	4.8 tot 5.4 meter
Constructietype	Meerdere varianten beschouwd: <ul style="list-style-type: none"><li>• Kalkzandsteen en metselwerk</li><li>• Prefab beton en metselwerk</li><li>• Houtskeletbouw</li></ul>
Fundering	Op staal

### 2.2.2. GEGEVENS ONDERGROND

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

### 2.2.3. MEETRESULTATEN

Zoals te zien in Figuur 3 zijn door Alcedo op vijf locaties metingen uitgevoerd. Het gaat hierbij om vier meetpunten op maaiveld en een meetpunt aan een bestaande gebouw naast de planlocatie, op een vergelijkbare afstand tot het spoor. De metingen zijn uitgevoerd van 16 tot 23 juni 2023. Er waren geen afwijkingen in het treinverkeer in deze periode.

De meting heeft een meetduur van een week, conform de eisen uit de SBR B-richtlijn, om de trillingen van de treinen betrouwbaar vast te leggen. Op een aantal meetpunten is korter gemeten, deze meetpunten zijn gebruikt om de (frequentie-afhankelijke) verhouding tussen die specifieke meetpunten en het meetpunt van een week vast te leggen. Zo ontstaat inzicht in het effect van de variatie van de trillingen in het plangebied. Vervolgens is die verhouding gebruikt om de trillingen op alle meetpunten over de hele meetduur vast te stellen (methode conform



RIVAS en CargoVibes onderzoeken). De metingen zijn uitgevoerd met FrogWatch trillingsmeters, die voldoen aan de eisen uit de SBR-richtlijnen<sup>1</sup>.



*Figuur 3 Meetpunten*

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





# **BEOORDELINGSKADER**



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



# **BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE**

## **3.1. TRILLINGEN EN WETGEVING**

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

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

## **3.2. BEOORDELINGSKADER TRILLINGSHINDER**

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

---

<sup>2</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.



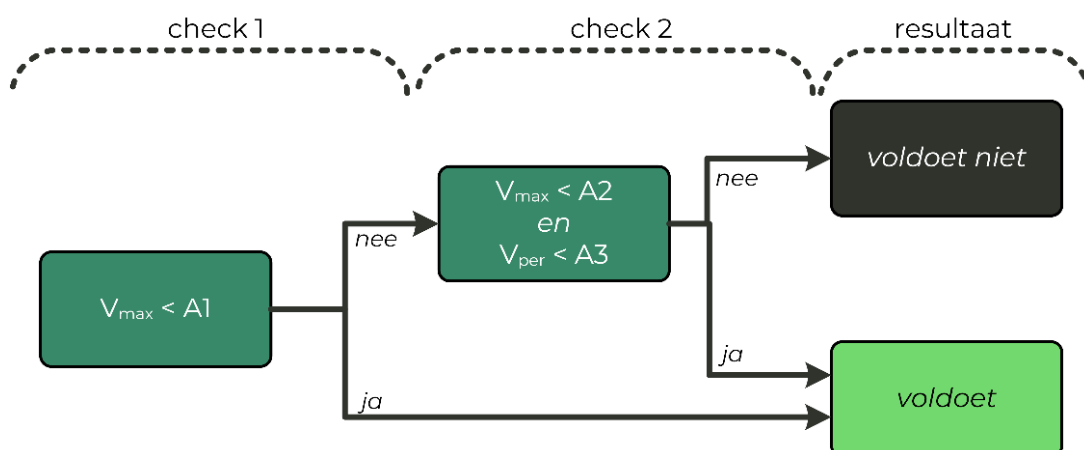
een zekere mate van gewenning en er zijn minder mogelijkheden om de trillingen te reduceren.

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

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

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

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



Figuur 4 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

### 3.3. REKENMETHODE

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

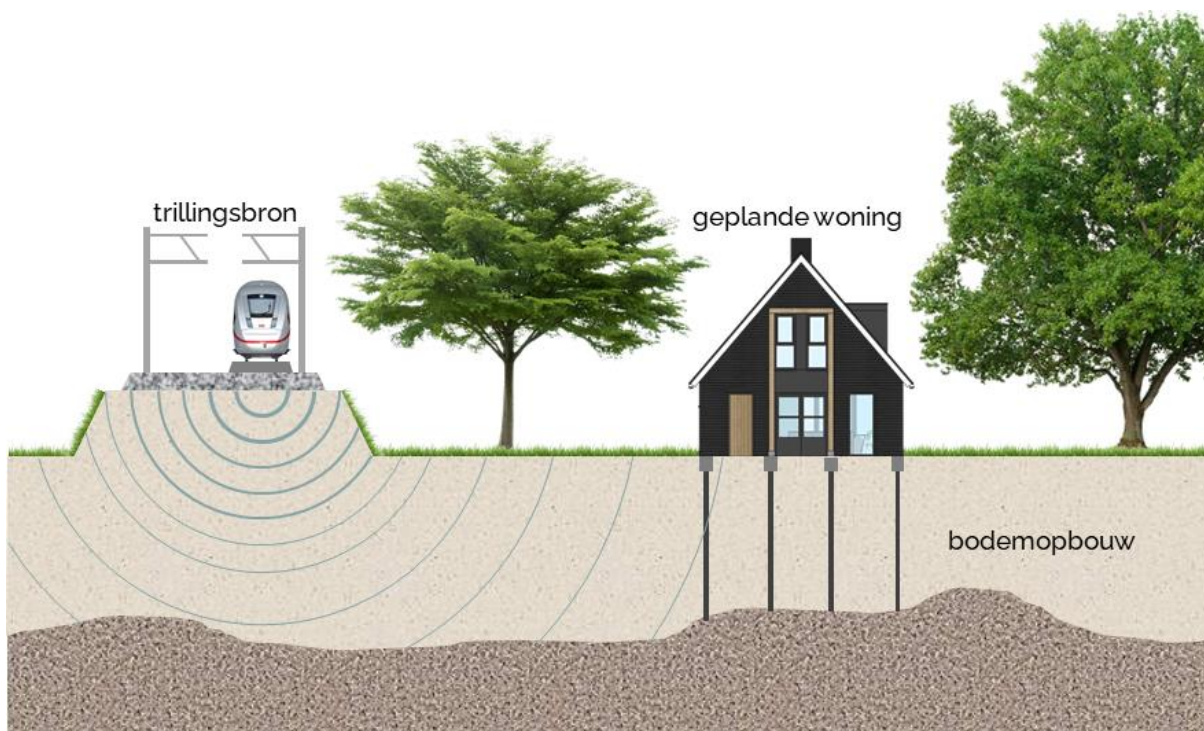
#### 3.3.1. TRILLINGEN – VAN TRILLINGSBRON NAAR GEBOUW

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



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

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



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

### **3.3.2. DE TRILLINGSBRON**

In dit onderzoek zijn treinen de bron van de trillingen. De trillingen van het treinverkeer zijn gemeten door Alcedo op punten op maaiveld en aan een bestaande gebouw op een vergelijkbare afstand tot het spoor. De beoordeling van de trillingen in de geplande bebouwing heeft plaatsgevonden op basis van deze metingen. Hierbij is in het rekenmodel gecorrigeerd voor afstand tot het spoor en verschillen in gebouweigenschappen (constructie en fundering bijvoorbeeld).

### **3.3.3. DE BODEM**

De bodem op deze locatie bestaat voornamelijk uit zand-, klei- 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.

### **3.3.4. 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



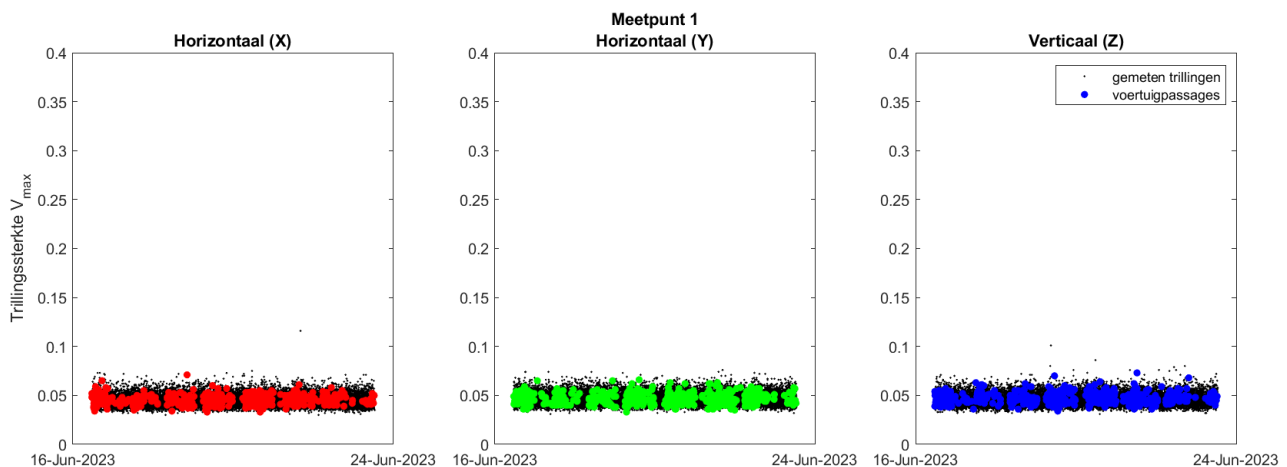
In dit hoofdstuk wordt eerst een korte toelichting gegeven op de meetresultaten, daarna worden de verwachte trillingen in de geplande bebouwing gegeven. Hierbij is gebruik gemaakt van de beoordelingsmethode en de rekenmethodiek zoals toegelicht in het voorgaande hoofdstuk.



# **VERWACHTE TRILLINGEN**

## 4.1. MEETRESULTATEN

Alcedo heeft metingen uitgevoerd op maaiveld en aan een bestaand gebouw. De trillingen op het meetpunt aan het gebouw zijn weergegeven in Figuur 6, voor de andere meetpunten zijn deze en andere figuren van de metingen opgenomen in bijlage III. In Figuur 6 valt op dat de trillingen aan de fundering van het gebouw erg laag zijn, en meestal wegvallen in de achtergrondtrillingen. De hoogste trillingen zijn afkomstig van zwaar wegverkeer dat incidenteel door de Lage Bothofstraat of de Oostburgweg rijdt.



Figuur 6 Gemeten trillingen aan fundering bestaand gebouw, meetpunt 1

## 4.2. TRILLINGEN IN GEPLANDE GEBOUWEN

De bebouwing is gemodelleerd op basis van de input uit hoofdstuk 2. Het trillingsgedrag van de geplande gebouwen is weergegeven in Bijlage II. Met de modelresultaten zijn de trillingen in de toekomstige woningen bepaald. De resultaten hebben we weergegeven in Tabel 4, samen met een beoordeling van de trillingen. De resultaten zijn weergegeven als een bandbreedte, omdat de trillingen afhankelijk zijn van de positie van het gebouw (dichtbij het spoor zijn de trillingen hoger, verder weg zijn ze lager), de constructieve uitwerking, maar ook verschillen tussen de begane grond en de verdiepingen. **Oranje** arcering geeft aan dat er een overschrijding is van de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn.

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

Constructietype	$V_{\max, \text{dag}}$	$V_{\max, \text{nacht}}$	$V_{\text{per}}$	Beoordeling
Betonnen skelet	0.1 - 0.2	0.1 - 0.2	0.00	Voldoet
Kalkzandsteen skelet	0.1 - 0.2	0.1 - 0.2	0.00	Voldoet
Houtskeletbouw	0.2 - 0.3	0.2 - 0.3	0.01 - 0.03	Voldoet niet, overschrijdingen in de nacht

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

- Met conventionele bouw (beton of metselwerk) wordt voldaan aan het beoordelingskader voor trillingshinder. De trillingen zijn relatief laag door de lichte treinen.



- Met lichtere bouw (houtskeletbouw, staalbouw) zijn overschrijdingen in de nacht mogelijk, omdat dit type gebouw makkelijker in trilling wordt gebracht. Het gaat dan om de twee woningen dichtbij het spoor, zie Figuur 7.



Figuur 7 Beoordeling van de trillingen

- De trillingen zijn hoger op de verdieping dan op de begane grond, in het gebouw worden de trillingen door de constructie versterkt.
- Uit de variantenstudie blijkt het volgende:
  - De trillingen zijn lager bij een zwaardere constructie (dikkere vloeren of wanden) en bij een stijvere constructie (betonnen casco zorgt voor lagere trillingen dan kalkzandsteen casco). Dit soort constructies wordt minder makkelijk in trilling gebracht. outskeletbouw is extra gevoelig voor trillingen en dient te worden vermeden.
  - De trillingen zijn lager bij een breedplaatvloer dan bij een kanaalplaatvloer.
  - De trillingen zijn lager bij een zwaardere fundering (zware balkenfundering of een dikke betonnen plaatfundering).

### 4.3. 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 20% 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, maar bij doorgaand spoor is de invloed hiervan doorgaans beperkt. 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. De invloed hiervan op de resultaten is daardoor beperkt.
- Ten aanzien van de gebouwen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en definitief ontwerp). Bovendien is het dynamische gedrag van bijvoorbeeld beton afhankelijk van de mate van gescheurdheid van het beton en zijn er natuurlijke variaties in materiaalgedrag (van bijvoorbeeld hout, metselwerk en beton). In de berekeningen is gerekend met een verwachtingswaarde van de trillingen op basis van een aan de hand van praktijkmetingen geïkt rekenmodel. Hiermee wordt een resultaat verkregen dat representatief is voor de toekomstige situatie.

Bovenstaande onzekerheden hebben geen invloed op de conclusies van dit onderzoek. Ook met deze onzekerheden wordt voldaan aan het beoordelingskader.

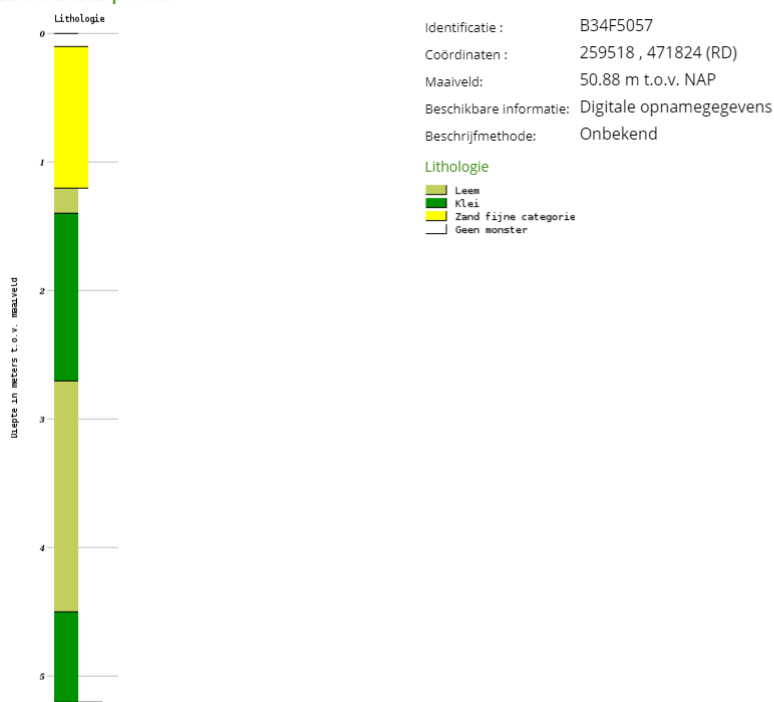


# GRONDONDERZOEK

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 8. Uit de grondboring blijkt dat de bodem is opgebouwd uit klei-, veen- en zandlagen. Bij een dergelijke gelaagde bodem kunnen trillingen zich erg grillig gedragen. In de metingen is hier rekening mee gehouden door te meten op verschillende afstanden tot het spoor en op meerdere plekken in het plangebied.

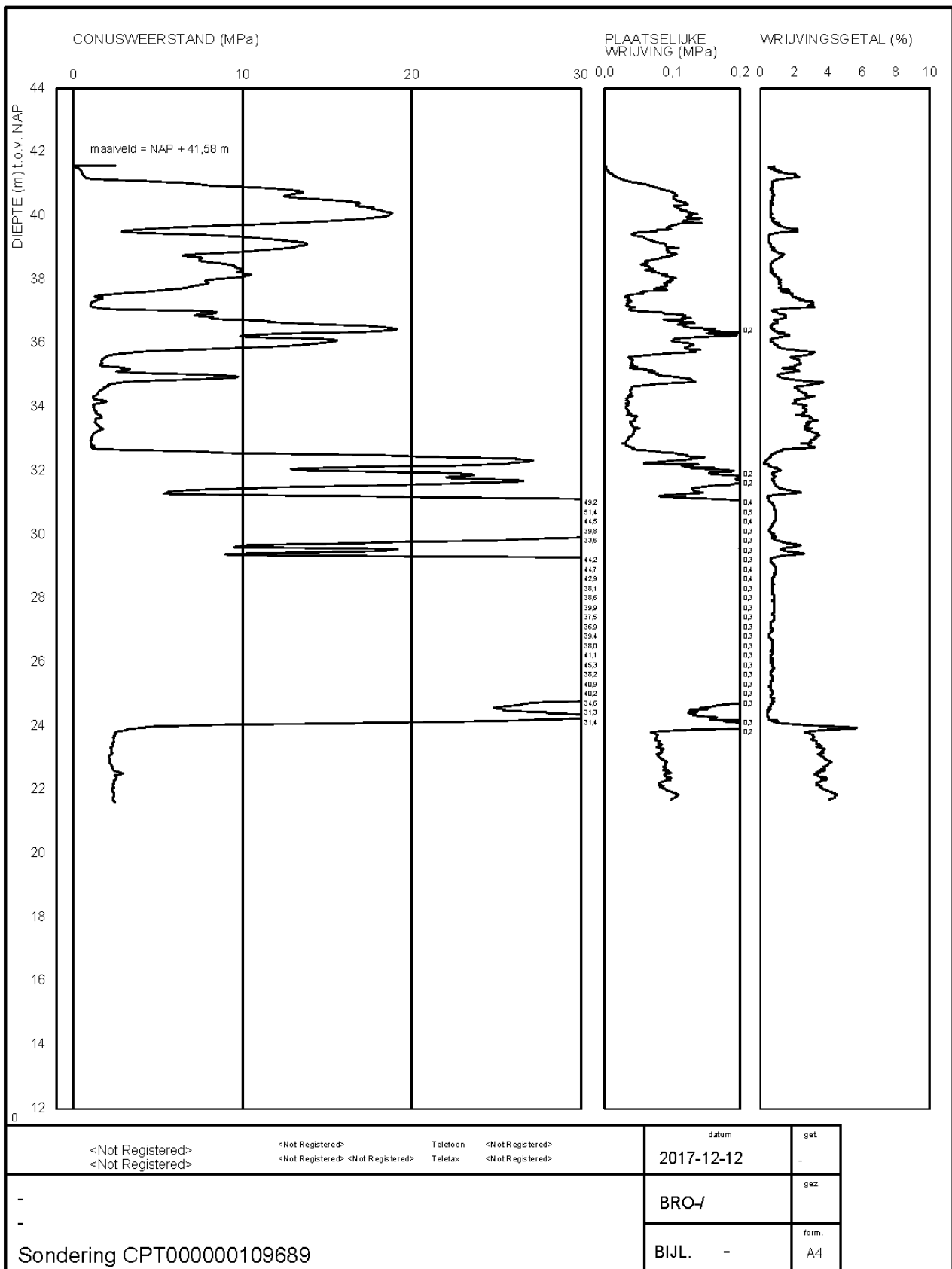
## Boormonsterprofiel



*Figuur 8 Boring in het onderzoeksgebied*

Een representatieve sondering uit het onderzoeksgebied, waarin onder meer de conusweerstand te zien is, is weergegeven in Figuur 9. Ook hier is te zien dat de bodem sterk gelaagd is opgebouwd.





Figuur 9 Sondering nabij het onderzoeksgebied

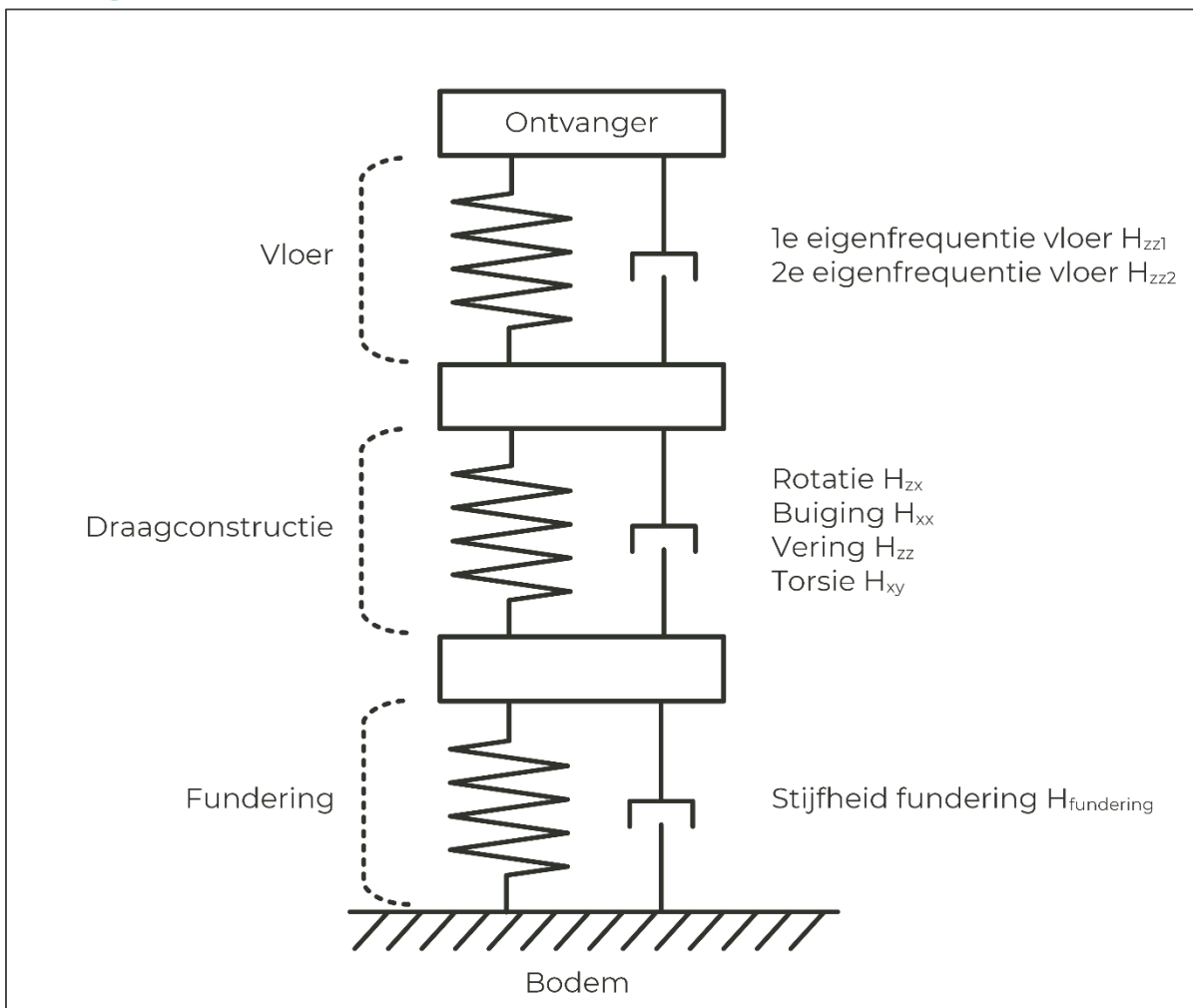


# REKENMODEL

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

In Buildyn wordt een gebouw gemodelleerd door middel van gekoppelde massa-veersystemen, zie Figuur 10. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 10, 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



Figuur 10 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.

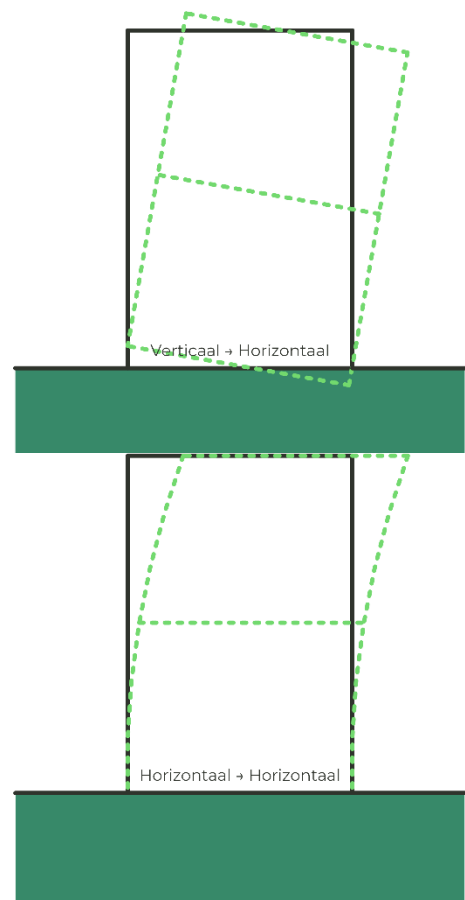
Dit effect noemen we  $H_{zx}$ , en is afhankelijk van:

- 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



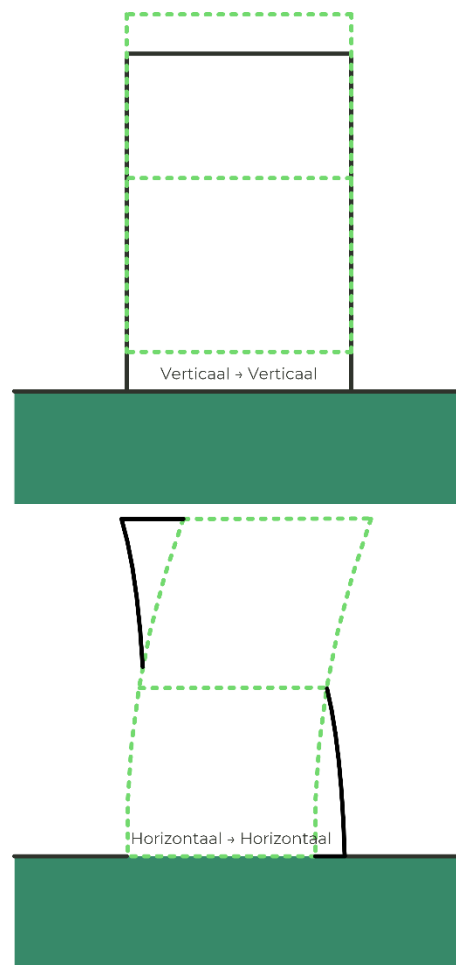


Het derde principe, dat van vering van het gebouw op zijn fundatie, is rechts weergegeven. Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappe onderlaag of lokaal slappere elementen (denk aan kolommen en balkenstructuren). Dit effect noemen we  $H_{zz}$ , en is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



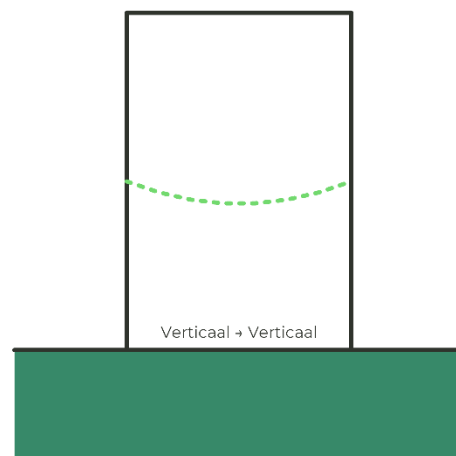
## VLOEREN

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:

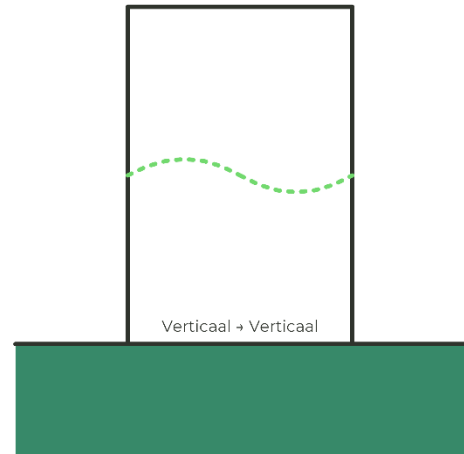
- Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- Afmetingen van de vloer
- Type oplegging



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.

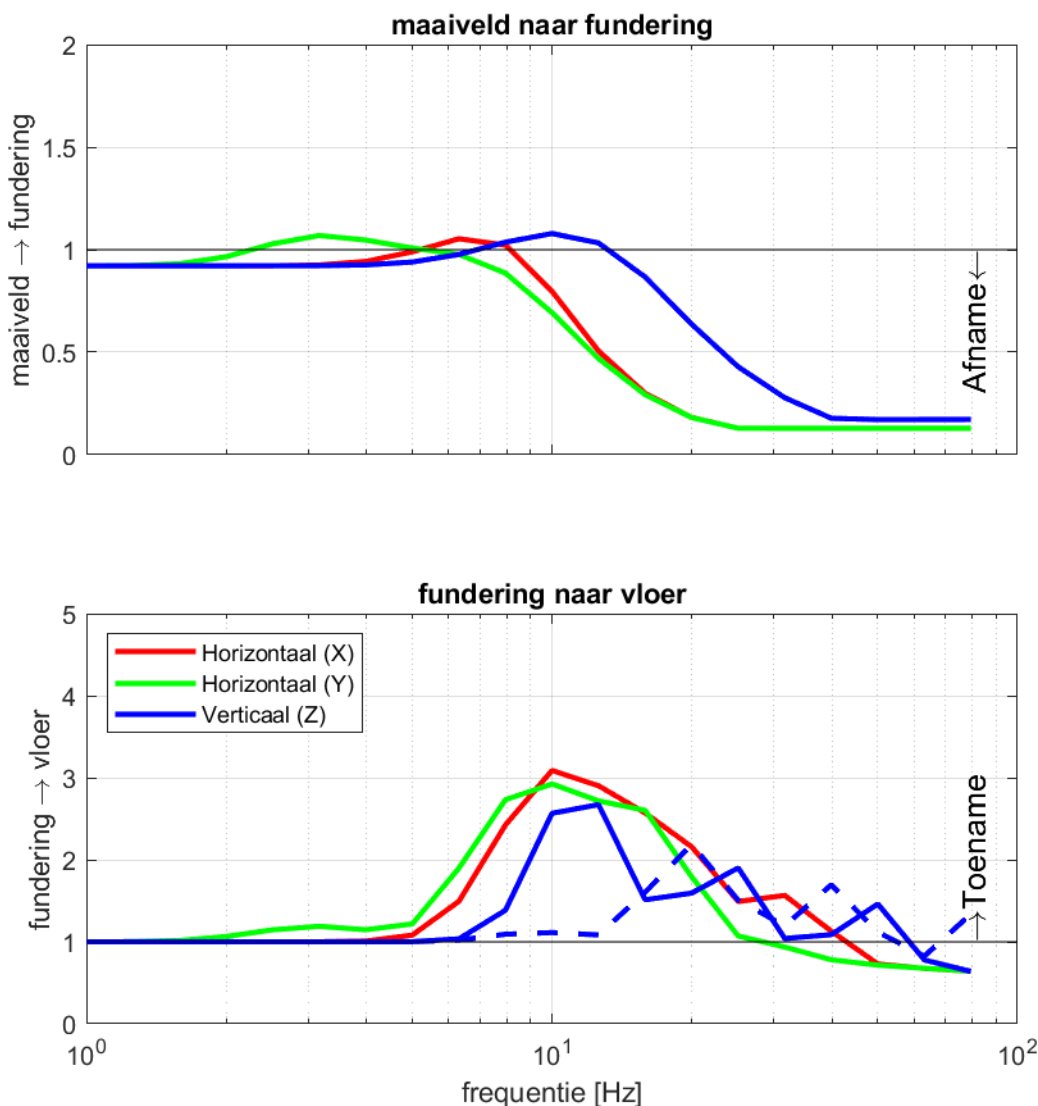
Dit effect noemen we  $H_{zzz}$ , en is afhankelijk van dezelfde parameters als  $H_{zz}$ .

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  $H_{zz}$  en de  $H_{zzz}$ -beweging, omdat beide niet op hetzelfde punt kunnen optreden ( $H_{zz}$  is maximaal in het midden van de vloer,  $H_{zzz}$  op een kwart van de randen).



## RESULTATEN

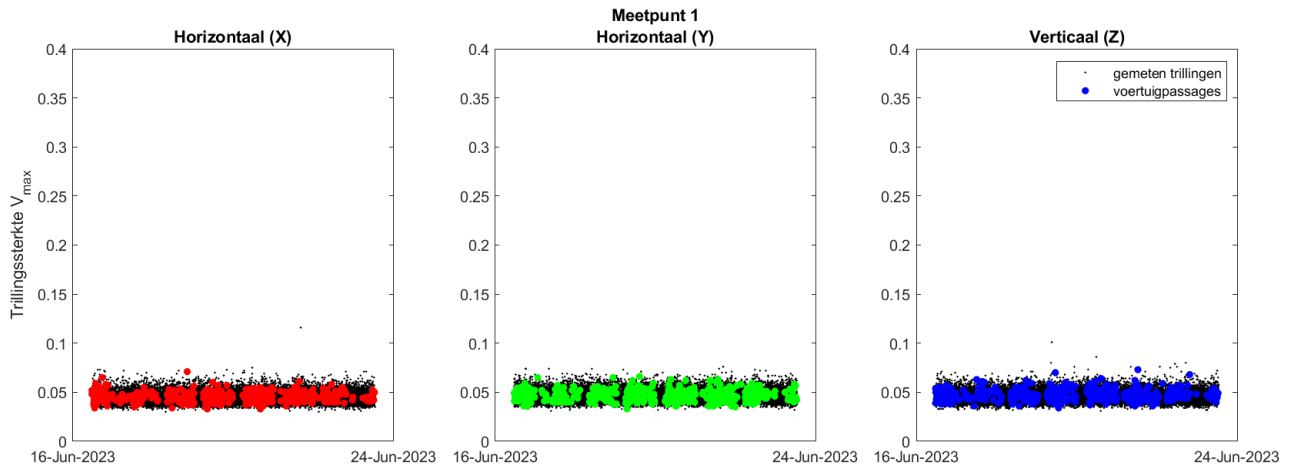
Ter illustratie zijn de resultaten uit de Buildyn-berekeningen voor een van de rekenresultaten weergegeven in Figuur 11.



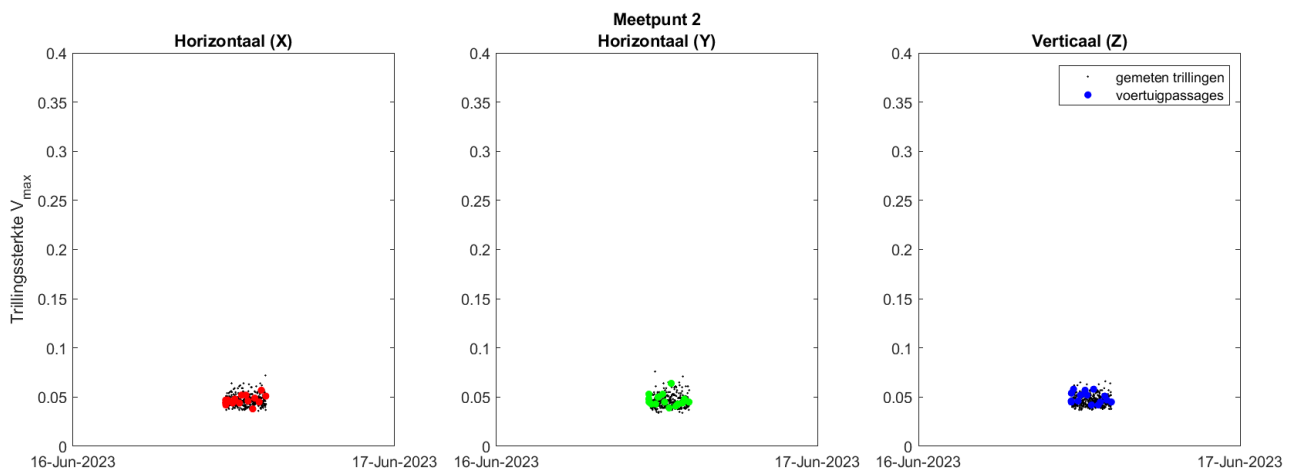
Figuur 11 Buildyn-resultaten voor 2e verdieping, kalkzandsteen met 200 mm kanaalplaatvloer. Doorgaande lijn verticaal is midden vloer, onderbroken lijn is op  $\frac{1}{4}$  en  $\frac{3}{4}$  van overspanning

# RESULTATEN METINGEN

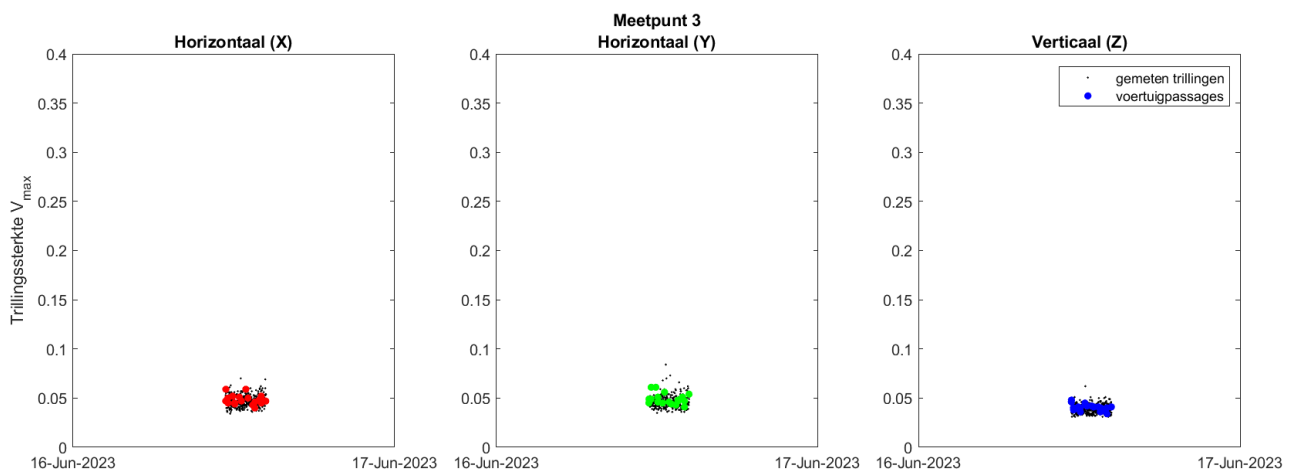
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



Figuur 12 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (fundering bestand gebouw)

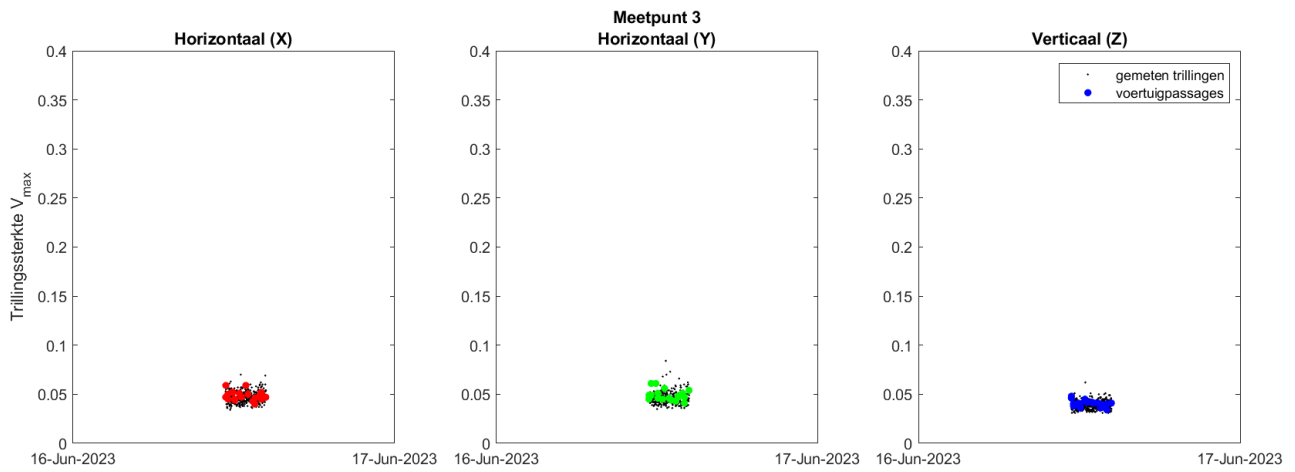


Figuur 13 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (maaiveld, dichtbij funderingspunt)

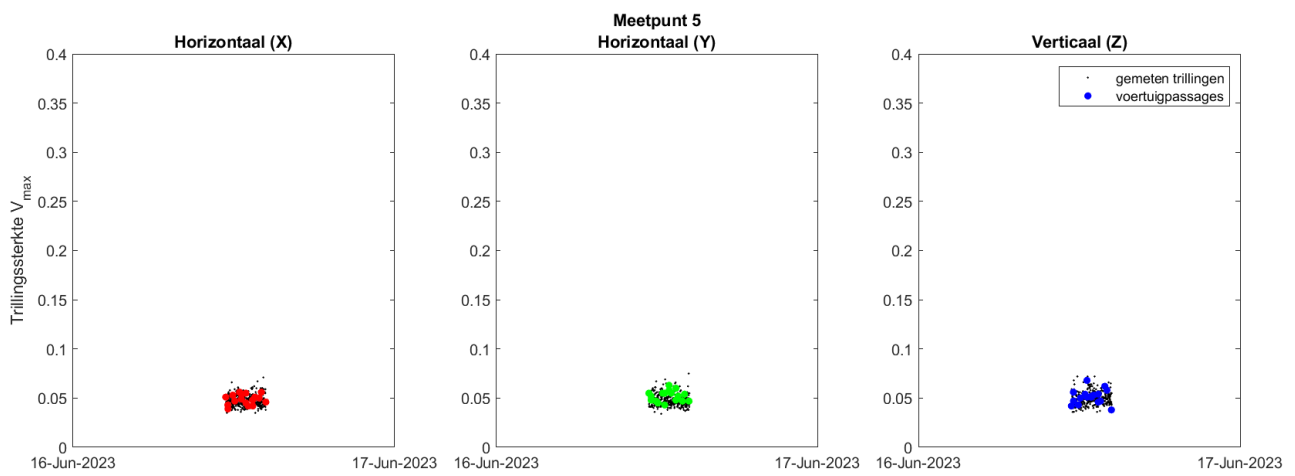


Figuur 14 Gemeten trillingen bij meetpunt 3 (maaiveld, ter plekke van geplande gebouwen aan Oostburgweg)

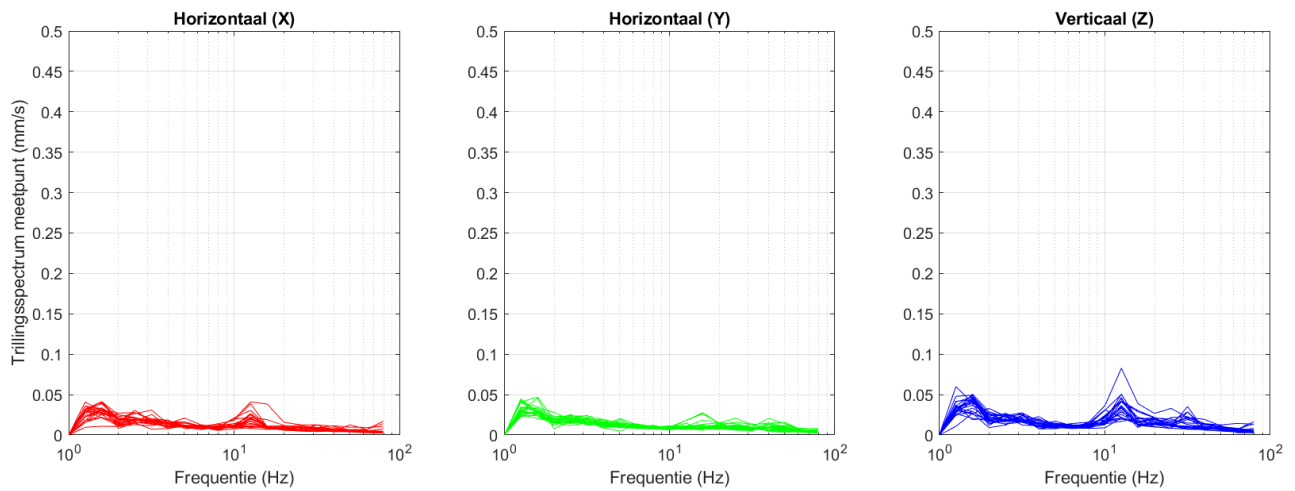




Figuur 15 Gemeten trillingen bij meetpunt 4 (maaiveld, ter plekke van geplande gebouwen aan Lage Bothofstraat)

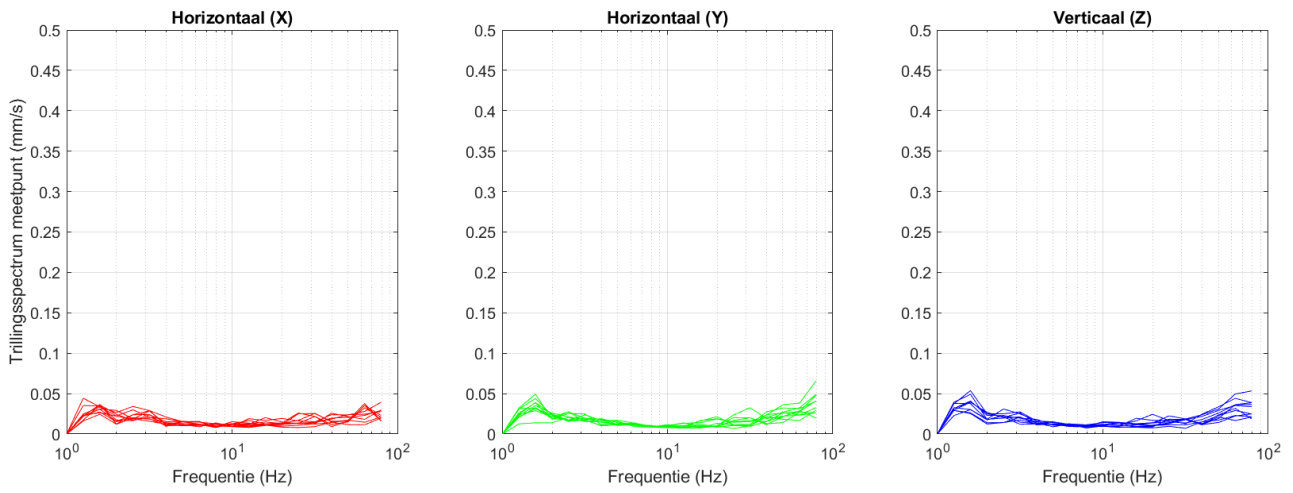


Figuur 16 Gemeten trillingen bij meetpunt 5 (maaiveld, Oostburgweg)

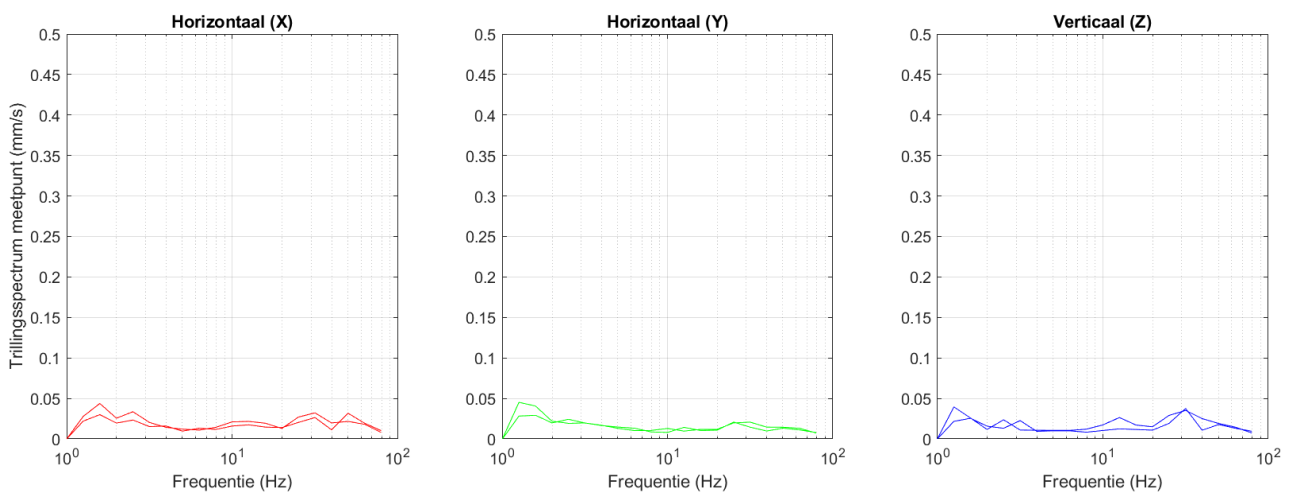


Figuur 17 Tertsbandspectra bij meetpunt 1

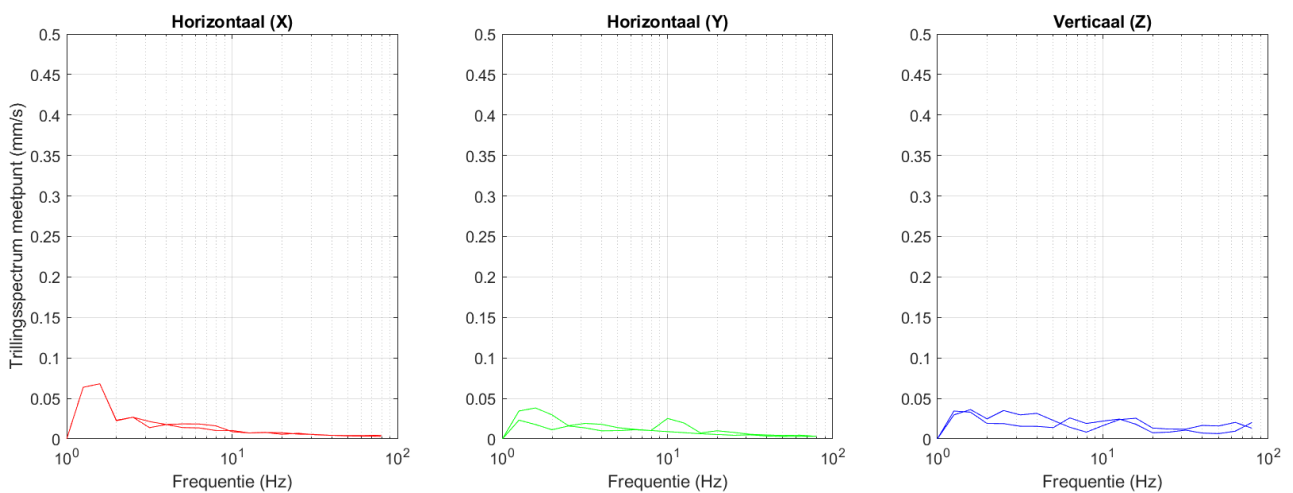




Figuur 18 Tertsbandspectra bij meetpunt 2

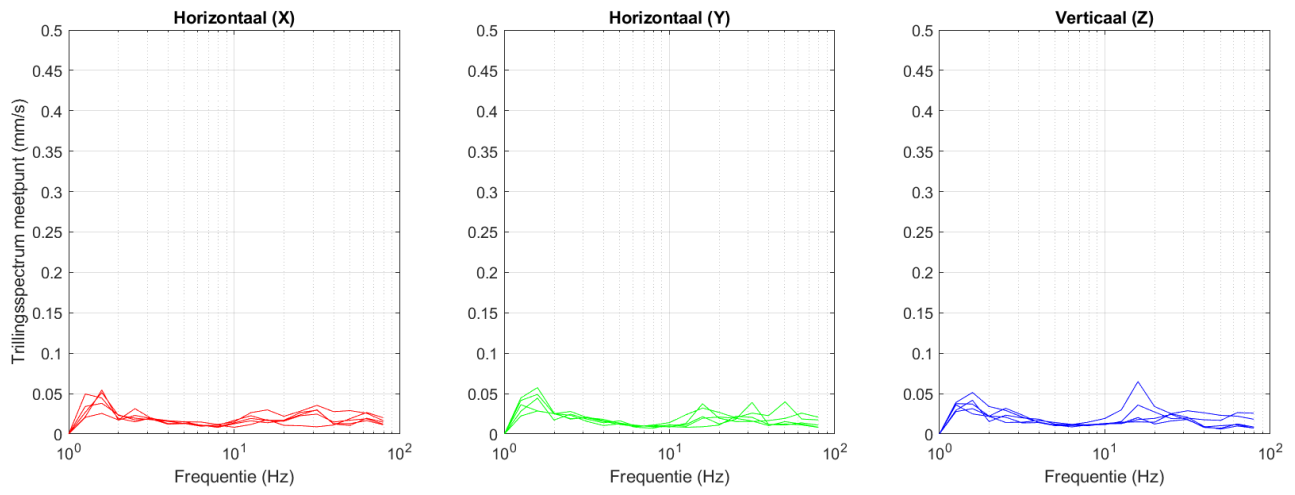


Figuur 19 Tertsbandspectra bij meetpunt 3



Figuur 20 Tertsbandspectra bij meetpunt 4





Figuur 21 Tertsbandspectra bij meetpunt 5

