

# ACMESA-TERREIN ASSEN

Trillingsonderzoek t.b.v. nieuwbouw



WBD2021-001

19 februari 2021  
versie 1.0

# Colofon

<b>Auteur</b>	Tijmen 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>	<i>WBD2021-001</i>
<b>Versienr</b>	<i>1.0</i>
<b>Datum</b>	<i>19 februari 2021</i>
<b>Status</b>	<i>Vrijgegeven</i>
<b>Opdrachtgever</b>	<i>BEMOG Projectontwikkeling</i>



© 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 voormalige Acmesaterrein in het centrum van Assen wordt een woongebied met laag- en hoogbouw gerealiseerd, als onderdeel van de Oranjebuurt in Assen. Het plangebied bevindt zich in de nabijheid van de spoorlijn Meppel – Groningen. 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, ongeacht de constructieve uitwerking (binnen het kader van het stedenbouwkundig ontwerp) in de deelgebieden het Lint en de Straathof wordt voldaan aan het beoordelingskader, de SBR B-richtlijn. Door de passage van enkele goederentreinen met afwijkende trillingsniveaus zijn incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader echter niet uit te sluiten voor de woningen in deelgebied de Laan en in de Toren (eerstelijnsbebouwing). Het gaat dan om maximaal 1 overschrijding per dag, de trillingen zijn het hoogst in het zuidelijke deel van het plangebied, mogelijk doordat de wegtunnel de trillingen beter doorgeeft richting de achtergelegen bebouwing. Het aantal woningen met een overschrijding en de mate van overschrijding zijn sterk afhankelijk van de verdere constructieve uitwerking van de plannen.

Omdat de trillingen in een deel van het plan niet voldoen aan het beoordelingskader, hebben wij een maatregelonderzoek uitgevoerd. Op basis daarvan concluderen wij het volgende:

1. Maatregelen aan het spoor of de treinen vallen buiten de planologische grenzen van het onderzoeksgebied en zijn zeer kostbaar. Deze maatregelen zijn niet doelmatig.
2. Maatregelen in de bodem (zoals trillingsschermen) zijn zeer kostbaar en ruimtetechnisch lastig inpasbaar. Bovendien zijn deze maatregelen altijd kostbaarder dan maatregelen aan de bebouwing.
3. Met maatregelen (bouwkundige optimalisaties) aan de bebouwing kan worden voldaan aan het beoordelingskader. Hierbij adviseren wij het volgende voor de constructieve uitwerking van de plannen:
  - a. Pas een bouwkundig concept toe met een betonnen casco en breedplaatvloeren, dit leidt tot de laagste trillingen in de woningen. Andere bouwconcepten, zoals houtskeletbouw of een conventioneel bouwconcept van kalkzandsteen en metselwerk in combinatie met kanaalplaat- of ribbenvloeren, leiden tot hogere trillingen in de woningen. Met een betonnen casco en breedplaatvloeren zijn er alleen nog incidentele overschrijdingen (maximaal 1 of 2 treinen per week) in de drie meest zuidelijk gelegen woningen in de Laan.
  - b. Zorg voor een eigenfrequentie van de vloeren van minimaal 15 Hz voor de grondgebonden woningen in de Laan. Dit kan bereikt worden door de vloeroverspanning te beperken of de vloerdikte te vergroten.

- c. Als bovenstaande aanpassingen niet mogelijk zijn, overweeg dan om de fundering van de grondgebonden woningen in de Laan zwaarder uit te voeren, bijvoorbeeld door de paaldiameter van de funderingspalen significant te vergroten (groter dan geotechnisch gezien noodzakelijk is), of door in plaats van een balkenfundering een zware plaatfundering toe te passen (min. 700 mm dik).

Deze maatregelen leiden weliswaar tot meerkosten, maar met deze maatregelen is wel te voldoen aan de streefwaarden voor trillingshinder. Indien geen van bovenstaande ontwerpoptimalisaties bij de verdere uitwerking doelmatig blijkt te zijn (omdat de meerkosten bijvoorbeeld niet opwegen tegen het effect), dan kan op basis van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn worden beargumenteerd dat er geen onacceptabele situatie ontstaat in de geplande bebouwing: er is in de geplande woningen sprake van matige hinder, een situatie die kan worden geaccepteerd als de kosten of impact van maatregelen niet in verhouding staan tot het bereikte effect. Verder geldt dat het gaat om incidentele overschrijdingen (maximaal 1 per dag), en bovendien zullen de trillingen lager zijn dan de trillingen die momenteel optreden in de bestaande (oudere, en dus trillingsgevoeliger) bebouwing aan de Hendrik de Ruitersstraat.

Op basis van bovenstaande afwegingen kan worden gemotiveerd dat in het licht van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn ook zonder maatregelen tegen trillingen geen onacceptabele situatie ontstaat in de geplande bebouwing.

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>6</b>
1.1	Aanleiding.....	6
1.2	Doel.....	6
1.3	Leeswijzer.....	7
<b>2</b>	<b>Situatie en uitgangspunten</b> .....	<b>8</b>
2.1	Situatiebeschrijving.....	8
2.2	Uitgangspunten.....	9
<b>3</b>	<b>Beoordelingskader</b> .....	<b>11</b>
3.1	Beoordelingskader.....	11
3.2	Rekenmethode.....	12
<b>4</b>	<b>Verwachte trillingen in de woningen</b> .....	<b>15</b>
4.1	Meetresultaten.....	15
4.2	Trillingen in geplande nieuwbouw.....	15
4.3	Maatregelen.....	18
4.4	Onzekerheden in het onderzoek.....	23
<b>5</b>	<b>Conclusies</b> .....	<b>24</b>
<b>I</b>	<b>Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek</b> .....	<b>26</b>
<b>II</b>	<b>Bijlage Rekenmodel Buildyn</b> .....	<b>28</b>
	Fundering.....	29
	Draagconstructie.....	29
	Vloeren.....	30
	Resultaten.....	31
<b>III</b>	<b>Bijlage meetresultaten</b> .....	<b>32</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Op het voormalige Acmesaterrein in het centrum van Assen wordt een woongebied met laag- en hoogbouw gerealiseerd, als onderdeel van de Oranjebuurt in Assen. Het plangebied bevindt zich in de nabijheid van de spoorlijn Meppel – Groningen, zie Figuur 1. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet *op voorhand* worden uitgesloten.



Figuur 1 Plangebied Acmesaterrein Assen

## 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 optimalisaties of maatregelen wel wordt 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 gebouwen op basis van de gemeten trillingen en de eigenschappen en functies van de gebouwen. 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.

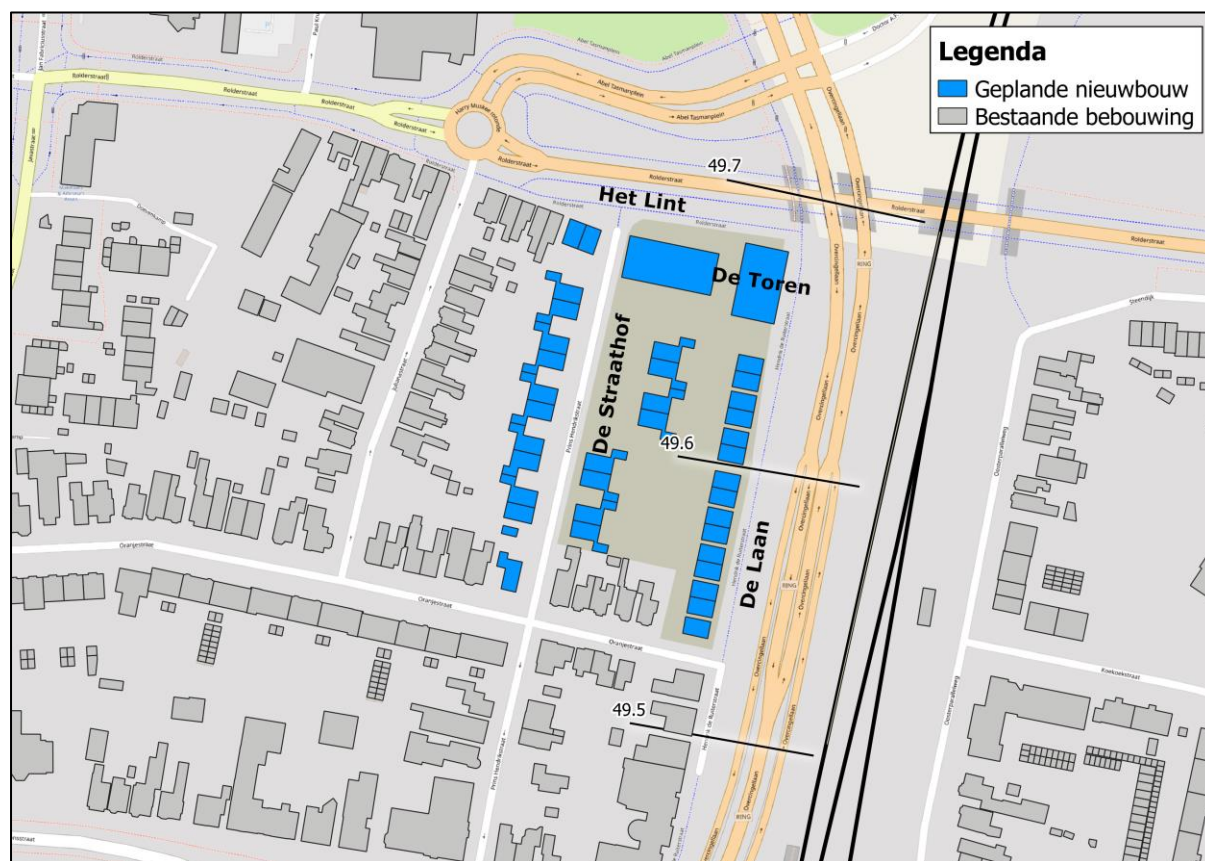


## 2 Situatie en uitgangspunten

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 bestaat op dit moment uit een braakliggend terrein. De geplande bebouwing bestaat uit grondgebonden woningen en appartementen, waarbij de laatste voornamelijk in de vorm van een woontoren worden gerealiseerd, zie Figuur 2. Het plangebied bestaat uit vier deelgebieden: het Lint aan de Rolderstraat, de Laan aan de Overcingellaan, de Straathof aan de Prins Hendrikstraat en de Toren op de hoek van de Rolderstraat en de Overcingellaan, met onderin een parkeergarage.



Figuur 2 Bestaande en toekomstige bebouwing

De nieuwbouw bevindt zich op een afstand van zo'n 50 tot 130 meter van het spoor. Tussen het spoor en het plangebied bevindt zich een doorgaande weg, die in een tunnel onder station Assen doorgaat. Deze ondertunneling begint aan de Overcingellaan. Ten zuiden van het plangebied bevindt zich de Oranjestraat, een rustige weg voor lokaal verkeer, ten noorden bevindt zich de drukke Rolderstraat, die in een tunnel onder het spoor doorgaat.

Het aantal treinen per uur per richting en de rijnsnelheid van de treinen zijn weergegeven in Tabel 1. Deze gegevens zijn gebaseerd op gegevens uit het Geluidsregister Spoor en



gegevens van vervoerders (NS, ProRail). Volgens de NMCA spoor 2030-2040 (vooruitblik voor goederenvervoer) wordt geen significante toename verwacht van de huidige drie tot vijf goederentreinen per dag. Er wordt ook geen verandering voor reizigerstreinen voorzien. Vanaf 2023 wil NS met een snelle intercity gaan rijden naar Groningen, deze halteert echter ook op station Assen.

*Tabel 1 Aantal treinen per uur per richting (gemiddeld, beide richtingen samen)*

Type trein	Rijsnelheid (km/h)	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Sprinter	40 – 50 km/h	2.83	2.00	0.38
Intercity	40 – 50 km/h	2.00	2.00	0.63
Goederen	70 – 80 km/h	0.07	0.11	0.07

Andere relevante trillingsbronnen zijn niet aanwezig in het plangebied. Alleen lokaal, rond drempels of bij klinkerwegen, kan wegverkeer op korte afstand voor voelbare trillingen zorgen. Rond het huidige plangebied gaat het vooral om geasfalteerde wegen, de trillingen van dit soort wegen zijn beperkt. Op de lokale wegen dichtbij het plangebied (klinkerwegen) rijdt uitsluitend bestemmingsverkeer, zodat de trillingen van wegverkeer in het plangebied beperkt zullen zijn. Wegverkeer is in dit onderzoek daarom 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 woningen gerealiseerd. Er is een voorlopig ontwerp van de bebouwing beschikbaar (van 30 september 2020). Omdat er nog geen uitgewerkt constructie Definitief Ontwerp (DO) beschikbaar is, hebben we drie constructieconcepten doorgerekend, passend binnen het stedenbouwkundig kader:

1. Concept I: (prefab) betonnen gevels met breedplaatvloeren. Binnen dit concept zijn meerdere varianten beschouwd.
2. Concept II: conventioneel wanden-vloeren concept met kanaalplaatvloeren. De wanden zijn van kalkzandsteen en metselwerk, of van prefab beton met metselwerk. Binnen dit concept zijn meerdere varianten beschouwd.
3. Concept III: houtskeletbouw concept met houten vloeren. De wanden zijn van HSB en afgewerkt met houten of kunststof panelen, of met metselwerk. Binnen dit concept zijn meerdere varianten beschouwd.

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	Concept I: Breedplaatvloeren, diverse afmetingen Concept II: Kanaalplaatvloeren, diverse afmetingen Concept III: Houten vloeren, diverse afmetingen

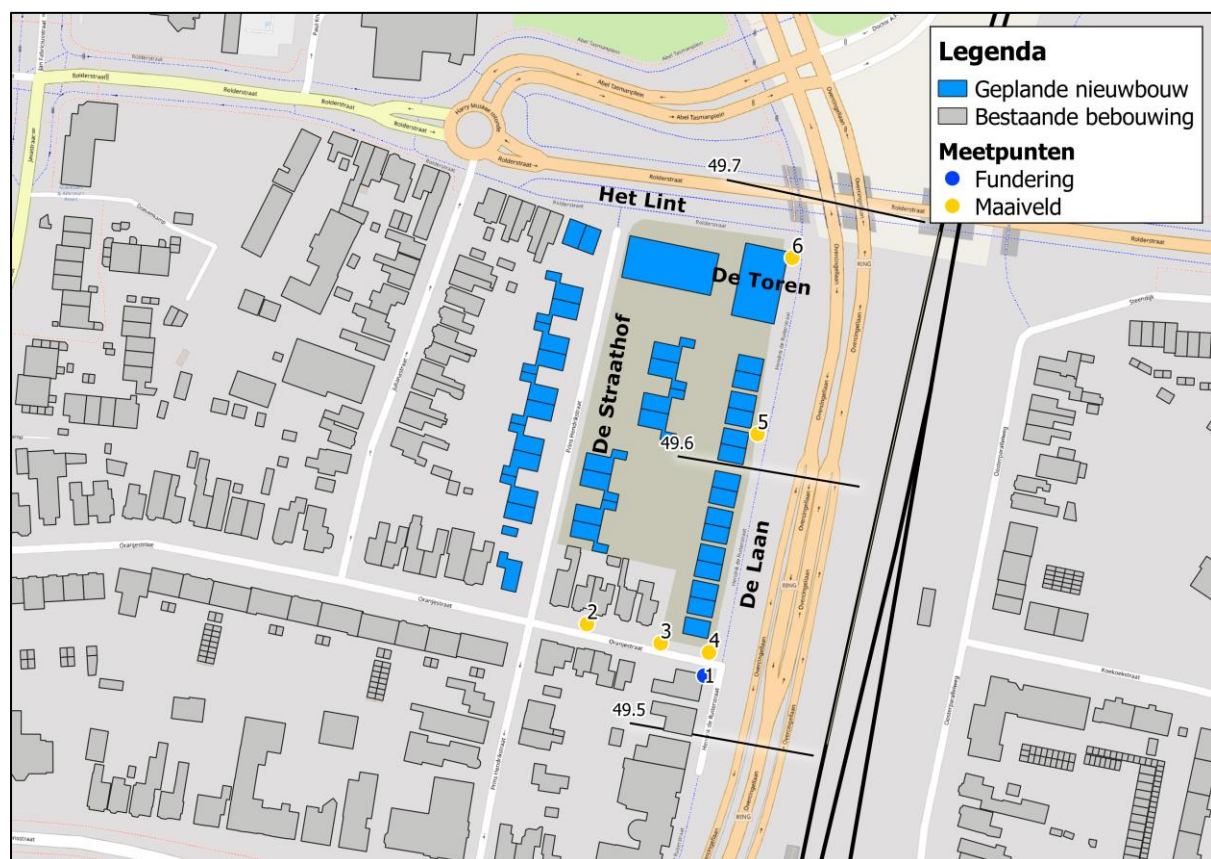
Parameter	Eigenschappen
Hoogte	7.5 tot 10.0 m voor Het Lint 7.5 m voor De Laan 7.5 tot 10.0 m voor De Straathof 35.0 m voor De Toren
Lengte vloerveld	6.2 tot 8.0 m
Breedte vloerveld	16.1 m voor De Toren 9.5 tot 10.0 m voor Het Lint, De Laan en De Straathof
Constructietype	Concept I: (Prefab) betonnen wanden en vloeren (of i.h.w.g. beton) Concept II: Conventioneel wanden-vloeren concept Concept III: Houtskeletbouw
Fundering	Op palen

## 2.2.2 Gegevens ondergrond

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

## 2.2.3 Meetresultaten

Door Alcedo zijn metingen uitgevoerd in en nabij het onderzoeksgebied. De metingen zijn uitgevoerd in de laatste week van januari 2021, en zijn verricht op maaiveld op meerdere punten in het plangebied, parallel aan het spoor en aan de fundering van bestaande bebouwing naast het plangebied, zie Figuur 3. De meetresultaten van het meetonderzoek geven we weer in hoofdstuk 4.



Figuur 3 Meetpunten nabij 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 de gemiddelde trillingssterkte (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.

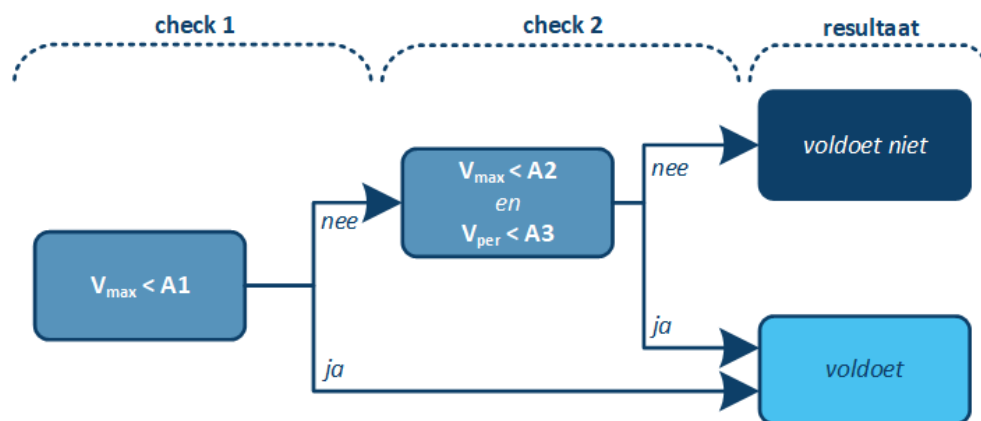
---

<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 gemiddelde trillingssterkte  $V_{per}$  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

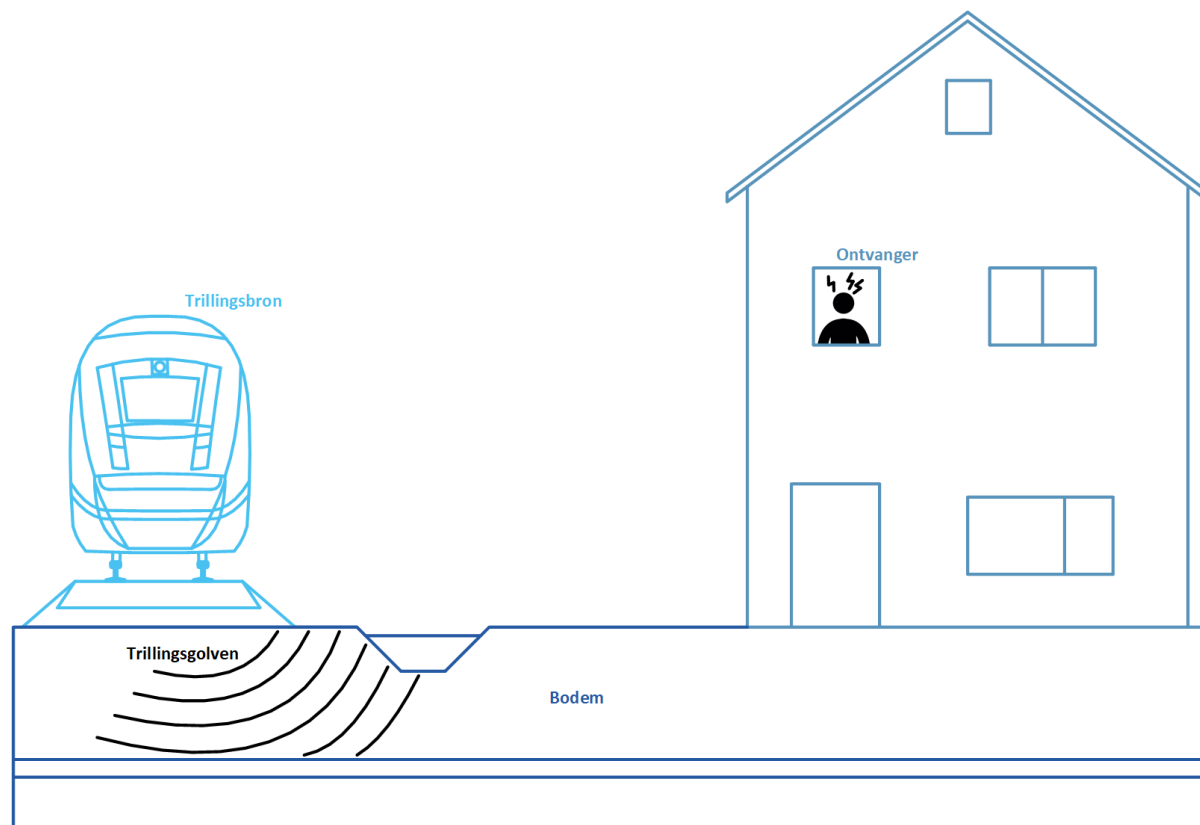
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde gebouwen, wordt op basis van metingen aan bestaande bebouwing een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande nieuwe bebouwing. Deze verwachte trillingen 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 aan de fundering van bestaande panden. 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 zand-, leem- en kleilagen, zie bijlage I. De uitdemping van de trillingen met de afstand is bepaald met een rekenmodel op basis van deze bodemopbouw voor een zo betrouwbaar mogelijke predictie van de trillingen.

### 3.2.4 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 geijkt met praktijkresultaten uit metingen. Een toelichting op het rekenmodel Buildyn is gegeven in bijlage II.



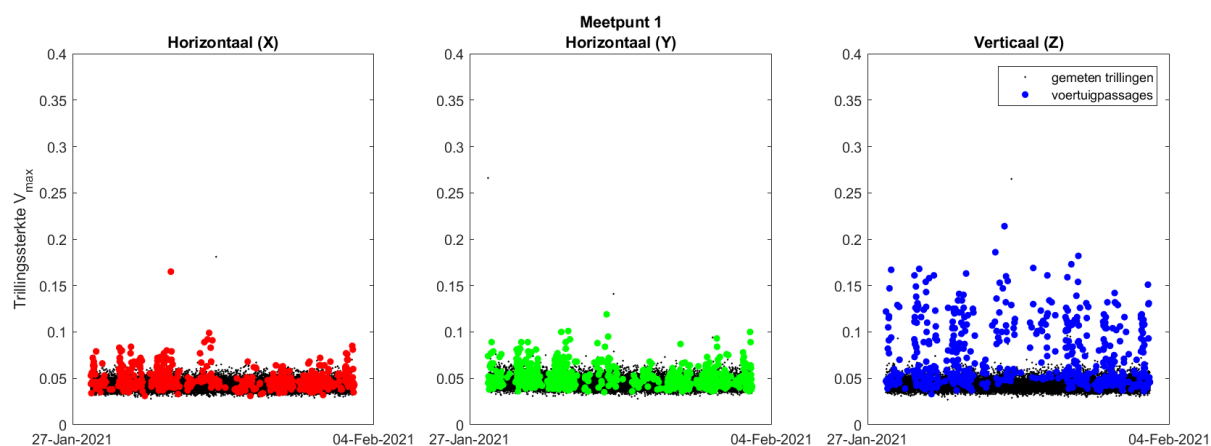
# 4 Verwachte trillingen in de woningen

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 een bestaand pand en op maaiveld in de nabijheid van de onderzoekslocatie. Meetpunt 1, aan de fundering van een bestaand pand, bevindt zich op ca. 49 meter van het spoor. De meetpunten op maaiveld bevinden zich op 46 tot 98 meter van het spoor, zie Figuur 3. De trillingen op meetpunt 1 zijn weergegeven in Figuur 6. In Figuur 6 valt het volgende op:

1. De trillingen zijn maatgevend in verticale richting, de hoogst gemeten waarde heeft een trillingssterkte van ca. 0.21.
2. De uitschieter in horizontale X-richting betreft een passage van een goederentrein met een afwijkende trillingssterkte.
3. De hoogste trillingen worden veroorzaakt door goederentreinen. Deze hebben een grotere onafgeveerde massa die hogere trillingen veroorzaken, ook is de afvering en de wielonrondheid van goederentreinen vaak slechter dan van reizigerstreinen. De meeste intercity's en sprinters geven een lager trillingsniveau. Dit komt door de lagere snelheid vanwege de stop op station Assen.



Figuur 6 Gemeten trillingen op meetpunt 1 (fundering bestaand pand)

## 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 voor appartementen op de hoogste verdieping, op lagere verdiepingen worden lagere trillingen verwacht). De resultaten voor de trillingssterkte  $V_{max}$ , de gemiddelde trillingssterkte  $V_{per}$  en de beoordeling van de trillingen aan de SBR B-richtlijn (zie hoofdstuk 3) zijn weergegeven in Tabel 4. De resultaten zijn weergegeven als bandbreedte voor de verschillende doorgerekende constructieve uitwerkingsvarianten. Overschrijdingen van het beoordelingskader zijn oranje gearceerd.

*Tabel 4 Trillingen per bouwblok en beoordeling op SBR B-richtlijn (namen bouwblokken corresponderen met deelgebieden in Figuur 2)*

Bouwblok	$V_{max}$	$V_{per}$	Beoordeling
Laan	0.3 – 0.4	0.02 – 0.03	Voldoet niet in enkele woningen, in overige woningen maximaal 2 overschrijdingen per week in toekomst mogelijk
Toren	0.2 – 0.3	0.01 – 0.02	Voldoet, maar maximaal 1 overschrijding per week in toekomst mogelijk
Lint	0.2	0.00 – 0.01	Voldoet
Straathof	0.1 – 0.2	0.00 – 0.02	Voldoet

De bovengrens van de verwachte trillingssterkte  $V_{max}$  is weergegeven in Figuur 7, de verwachte gemiddelde trillingssterkte  $V_{per}$  in Figuur 8 voor woningen volgens concept I en concept II, en de beoordeling van de trillingen aan de SBR B-richtlijn (zie hoofdstuk 3) is weergegeven in Figuur 9. In deze laatste figuur wordt aangegeven in welke woningen sowieso wordt voldaan aan het beoordelingskader, en voor welke woningen in het ontwerp rekening moet worden gehouden met trillingen of waarvoor een maatregelafweging nodig is.

Samengevat geldt het volgende:

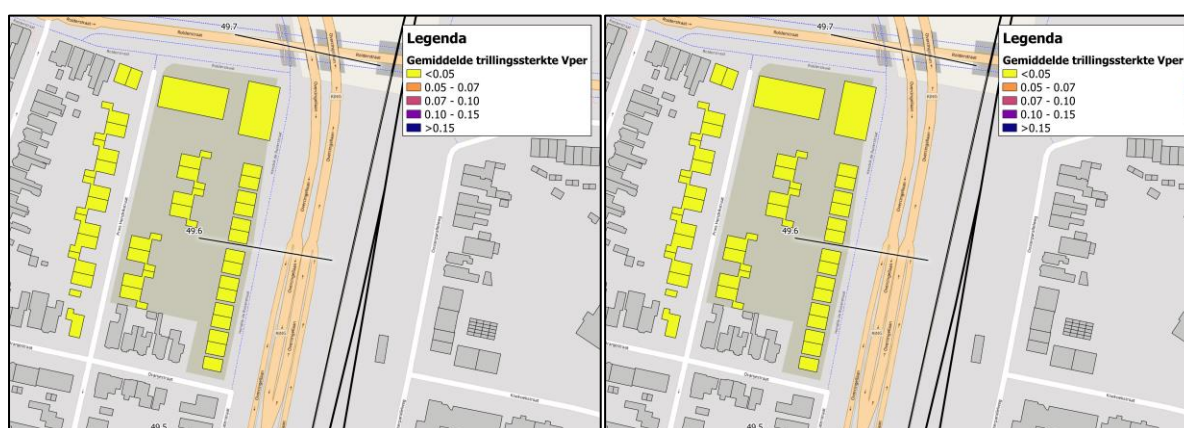
1. In de Straathof en het Lint wordt, ongeacht de constructieve uitwerking van de plannen, voldaan aan de streefwaarden.
2. Bij de Toren wordt voldaan aan de streefwaarden, behalve bij een zeer slappe, open bouwconstructie. Wel geldt, bij toepassing van concept II en III, dat weliswaar op dit moment wordt voldaan aan de streefwaarden, maar dat de maximale trillingssterkte  $V_{max}$  wel hoger is dan de streefwaarde voor de nacht. Omdat de trein met een afwijkende trillingssterkte nu overdag passeert (dan zijn de streefwaarden soepeler), wordt op dit moment voldaan aan het beoordelingskader. Deze treinen kunnen echter ook 's nachts passeren (bijvoorbeeld bij een wijziging in dienstregeling of routing, of een toename van het aantal goederentreinen), in dat geval is er een lichte overschrijding mogelijk, die maximaal 1 keer per week optreedt. Bij concept I (beton en breedplaatvloeren) wordt wel in alle gevallen voldaan aan het beoordelingskader, door de zwaardere, stijvere bouw.
3. Bij de Laan is het wel of niet voldoen aan het beoordelingskader voor de meeste woningen afhankelijk van de constructieve uitwerking. Hierbij geldt:
  - a. Bij de twee meest zuidelijk gelegen woningen zullen, ongeacht de constructieve uitwerking, incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader optreden.

Het gaat dan om minder dan 1 overschrijding per dag bij concept I, en ca. 1 per dag bij concept II en III.

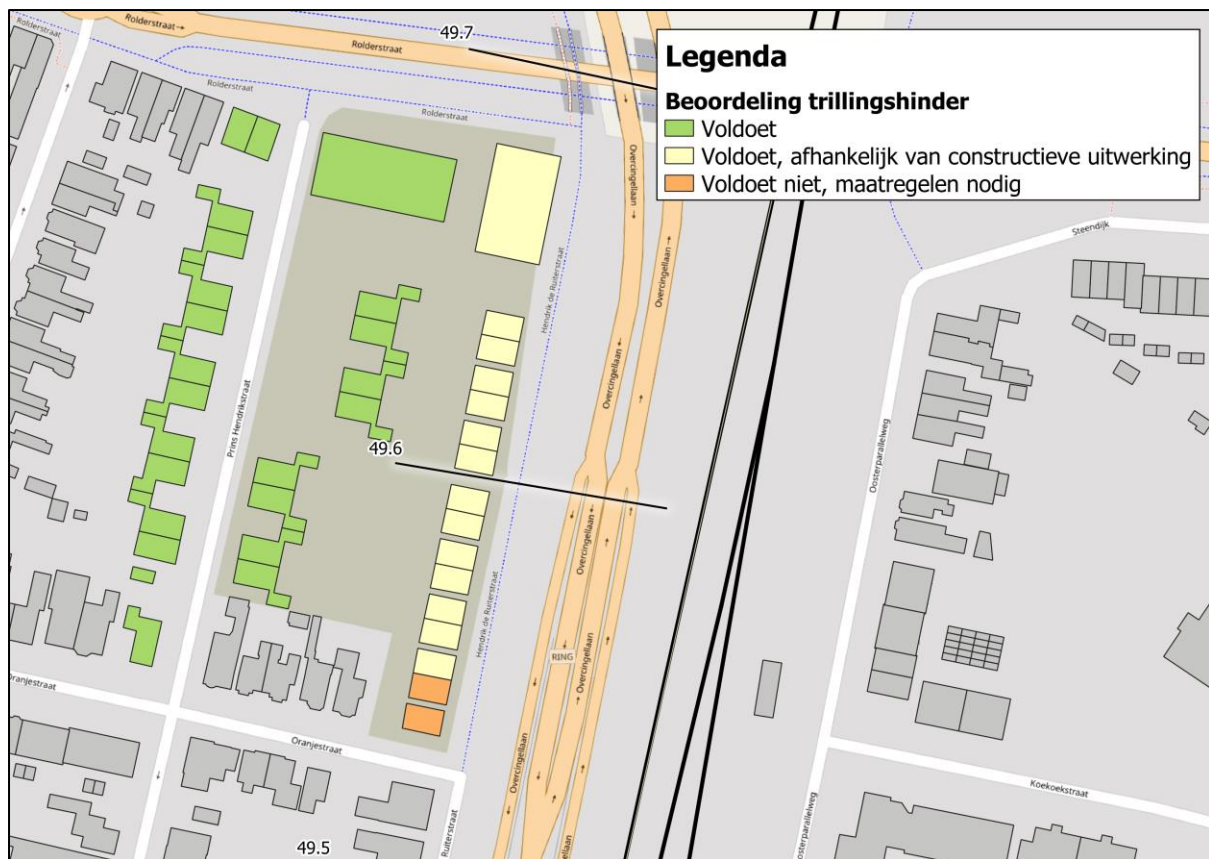
- b. Bij de overige woningen in de Laan wordt met concept I voldaan aan het beoordelingskader, terwijl bij concept II en III alleen bij een eigenfrequentie van de vloer van meer dan 15 Hz wordt voldaan aan het beoordelingskader. Anders zijn incidentele overschrijdingen (max. 1 of 2 per week) in deze woningen mogelijk.
- c. De tunnelbak in de Overcingellaan lijkt de trillingen te versterken. Hierdoor zijn de trillingen in het zuiden van het plangebied wat hoger. Deze versterking kan komen door de damwanden rond de tunnelbak die de bodem eromheen stijver hebben gemaakt, of doordat de eigenfrequentie van het tunneldak samenvalt met de maatgevende trillingen van de treinen rond de 10 Hz. Ook de gelaagde bodem (zand-, leem- en kleilagen) kan hierin een rol spelen.
- d. Verder zijn de trillingen iets hoger bij de bouwblokken in het midden van de Laan door het wissel in het verst weggelegen spoor.



Figuur 7 Trillingssterkte  $V_{max}$  per bouwblok, links voor concept I, rechts voor concept II



Figuur 8 Gemiddelde trillingssterkte  $V_{per}$  per bouwblok, links voor concept I, rechts voor concept II



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

### 4.3 Maatregelen

Omdat niet in alle woningen voldaan wordt aan het beoordelingskader, is voor de Laan en de Toren een maatregelafweging uitgevoerd. Deze afweging beschrijven we in deze paragraaf. 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:

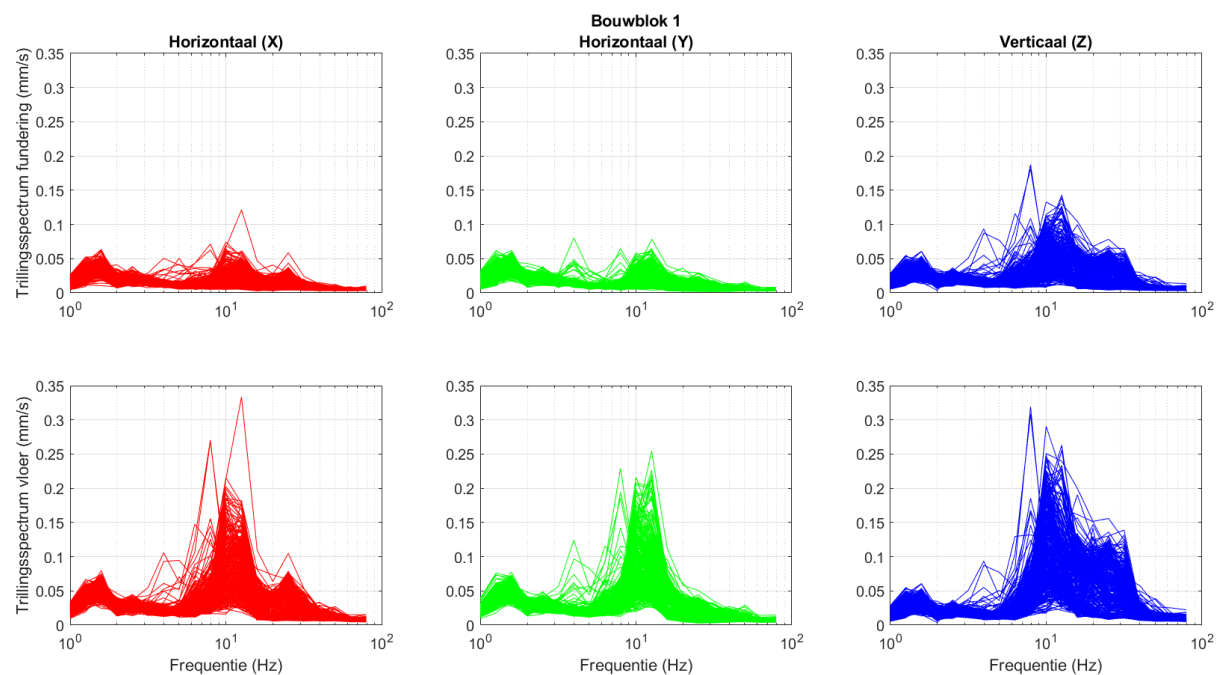
1. De mate waarin de trillingssterkte voorkomt. Hiervoor geldt dat de gemiddelde trillingssterkte  $V_{per}$  een goede indicatie is. Die is laag ( $V_{per}$  bedraagt ten hoogste 0.03, dus ruim lager dan de streefwaarde van 0.05). In de meeste woningen is ook sprake van een beperkt aantal overschrijdingen (vaak maar 1 of 2 per week), veroorzaakt door goederentreinen. In twee woningen aan de zuidzijde van het plangebied gaat het om meer overschrijdingen (ca. 1 per dag). Er is dus sprake van een beperkt aantal overschrijdingen, die het achterwege laten van een maatregel zouden kunnen rechtvaardigen.
2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. Daar is hier geen sprake van.
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, gaan we hierna in op maatregelen om de trillingen te reduceren. Om effectieve maatregelen te treffen, doen we eerst een nadere analyse van de verwachte trillingen. Zo stellen we 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.

#### 4.3.1 Analyse resultaten

Om te bepalen welke trillingsrichting en trillingsfrequenties in de gebouwen maatgevend zijn, is een nadere analyse uitgevoerd van de verwachte trillingen. Uit deze analyse volgt dat de hoogste trillingen optreden in de meest zuidelijk gelegen woningen in de Laan. De hoogste trillingen treden op in horizontale X-richting, loodrecht op het spoor, met name als gevolg van rotatie van het pand (hoogte en diepte van het pand vallen ongunstig samen met de trillingsgolven in de bodem). De trillingen zijn op de fundering al relatief hoog rond 10 Hz, en worden dan verder versterkt in de gebouwen, zie Figuur 10.

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



*Figuur 10 Trillingspectra van meest zuidelijk gelegen woning in de Laan. Boven de trillingen op de fundering, onder op de hoogste verdieping*

#### 4.3.2 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). Trillingen rond 10 Hz ontstaan vooral door afwijkingen in wielonrondheid van de treinen, en zijn vaak dominant bij gelaagde bodems. De hogerfrequente trillingen (boven de 15 Hz) kunnen worden gereduceerd met een ballastmat onder het spoor, de trillingen rond 10 Hz zijn echter moeilijk te reduceren, vooral aanpassingen aan het materieel (de treinen) zijn dan effectief. Generiek geldt voor maatregelen aan de trillingsbron dat deze buiten de scope van dit onderzoek vallen, omdat deze maatregelen allemaal buiten het plangebied moeten worden getroffen. Bovendien



brengen dergelijke maatregelen zeer hoge kosten met zich mee (o.a. door stagnatie van het treinverkeer gedurende langere tijd).

### 4.3.3 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 trillingsscherd van piepschuim (EPS), beton, jet-grout (soil-mix methode voor beton) of een damwand. Deze maatregelen hebben een aantal nadelen:

1. Ze zijn vooral effectief dicht op de trillingsbron (het spoor, maar valt buiten het plangebied) en (in mindere mate ook) dicht op de bebouwing. Dichtbij het spoor is hier bovendien lastig uitvoerbaar, omdat er nog een weg ligt tussen het spoor en de bebouwing, waardoor de werkruimte te beperkt is en een langdurige wegafsluiting noodzakelijk is. Bovendien is de ruimte in verband met ondergrondse obstakels vaak te klein om een trillingsscherd te realiseren. Meer voor de hand liggend is een maatregel direct voor de bebouwing, bijvoorbeeld onder het trottoir, over een lengte van ca. 170 meter. Probleem is echter dat deze maatregelen in het zuidelijke deel van het plangebied, waar de trillingen het hoogst zijn, lastig kunnen worden getroffen door de aanwezigheid van de tunnelbak: om de trillingen daar af te schermd is een grote diepte (naar verwachting ca. 15 tot 20 meter) nodig voor een trillingsscherd (dieper dan de tunnelbak). Dit brengt, afgezien van de inbrengbaarheid direct naast de tunnelbak en in de nabijheid van oude woningen, zeer hoge kosten met zich mee. Voor de meer noordelijk gelegen woningen kan een trillingsscherd wel effectief zijn.
2. De toekomstvastheid van de maatregelen is laag, ze zijn niet of zeer slecht aanpasbaar aan toekomstige wijzigingen aan het spoor of aan wijzigingen in het ruimtegebruik.
3. De kosten van deze maatregelen zijn hoog.

Mogelijke maatregelen in de bodem met een inschatting van het effect en de kosten voor een maatregel op de perceelgrens zijn weergegeven in Tabel 5.

*Tabel 5 Mogelijke maatregelen in de bodem*

Maatregel	Effect	Kosten <sup>2</sup>
Betonnen wand	10 – 30%	€ 2.0 – 3.2 mln
Jet-grout wand	5 – 15%	€ 2.0 – 3.2 mln
Damwand	0%	€ 1.9 – 2.9 mln
Beton met rubber	40 – 70%	€ 3.8 – 5.9 mln
Damwand met EPS	15 – 30%	€ 2.6 – 4.1 mln
Damwand met sleuf	10 – 25%	€ 3.6 – 5.6 mln
Prefab L-wand 3 m diep	20 – 35%	€ 0.7 – 1.2 mln
Prefab L-wand 4 m diep, bekleed met 120 mm rubber	25 – 40%	€ 1.2 – 2.0 mln
CSM-wand	0 – 10%	€ 0.8 – 1.4 mln

<sup>2</sup> Kosten zijn totale investeringskosten inclusief BTW, maar exclusief kosten voor verleggen van kabels en leidingen en grondverwerving.



Om in alle gevallen te voldoen aan het beoordelingskader, is 25 (concept I) tot 40 (concept II en III) procent reductie nodig. Uit het overzicht met maatregelen volgt dat de kosten van de maatregelen zonder uitzondering hoog zijn. De goedkoopste maatregel is een prefab L-wand van 3 meter diep, direct in het trottoir voor de bebouwing. Met deze maatregel zijn er in de meest zuidelijk gelegen drie woningen echter nog steeds incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader, terwijl de kosten zeer hoog zijn (€ 15.000 tot € 25.000 per woning (15 woningen aan de Laan, 34 appartementen in de Toren)). Wanneer in een deel van het plan met constructieve optimalisaties overschrijdingen worden voorkomen, nemen de kosten per woning alleen maar verder toe. Als de Toren bijvoorbeeld als concept I wordt gerealiseerd, dan nemen de kosten toe naar € 50.000 tot € 80.000 per woning. Om in alle woningen ongeacht de constructieve uitwerking te voldoen aan het beoordelingskader is een met rubber beklede prefab L-wand de meest kosteneffectieve oplossing, de kosten per woning bedragen dan € 25.000 tot € 40.000.

Gezien de hoge kosten, ook in relatie tot het beperkte aantal overschrijdingen, zijn maatregelen in de bebouwing altijd kosteneffectiever dan maatregelen in de bodem. Maatregelen in de bodem worden daarmee niet doelmatig geacht<sup>3</sup>.

#### 4.3.4 Maatregelen aan de gebouwen

Bij maatregelen aan de gebouwen is een breed scala aan maatregelen mogelijk. Die variëren van het gebruiken van materiaal met meer demping (een breedplaatvloer kent bijvoorbeeld meer demping dan een kanaalplaatvloer), het verzwaren van de constructie (zodat deze minder gevoelig is voor trillingen) tot het afveren van de fundering. Het globale effect en de kosten van de mogelijke maatregelen aan de woningen zijn weergegeven in Tabel 6. Een aantal maatregelen zit al verwerkt in de doorgerekende concepten, zo kent concept III al sterk dempende materialen, terwijl in concept I al breedplaatvloeren zijn toegepast en de constructie al stijver is gemaakt. Verder geldt dat niet alle maatregelen zomaar kunnen worden gecombineerd.

Tabel 6 Mogelijke maatregelen aan de gebouwen

Maatregel	Effect	Kosten <sup>4</sup>
Stijvere constructie (meer of dikker beton)	5 – 15%	< 3% SK
Breder maken van bebouwing in dwarsrichting	0 – 10%	5 – 12% SK
Breedplaatvloeren i.p.v. kanaalplaatvloeren	15 – 20%	< 2% SK
Toepassen van dempende materialen	5 – 15%	< 5% SK
Toepassen van dikkere vloeren of kortere vloeroverspanningen ( $f_e > 15$ Hz)	15 – 25%	< 5% SK
Ontkoppelen van de vloeren (afveren, maximaal op 10 Hz)	0 %	2 – 4% SK
Ontkoppelen van de fundering (afveren, maximaal op 5 Hz)	40 – 60 %	4 – 6% SK
Inpakken van de fundering, bijv. met rubberen platen	0 – 10 %	1 – 3% SK
Zwaardere fundering (700 mm dikke plaatfundering, of dikkere palen)	10 – 20%	2 – 4% SK

<sup>3</sup> ProRail hanteert voor het treffen van trillingsmaatregelen vaak een bedrag van € 47.000 in bestaande situaties. De kosten voor maatregelen in de bodem op deze locatie zijn hoger dan dit bedrag. Bovendien zal een dergelijke kostenverhoging per woning leiden tot onverkoopbare woningen, daarom wordt bij nieuwbouw vaak een (veel) lager (projectafhankelijk te motiveren) bedrag gehanteerd.

<sup>4</sup> SK = Stichtingskosten

Door meerdere maatregelen uit Tabel 6 te combineren kan in alle woningen in het plangebied worden voldaan aan het beoordelingskader.

#### 4.3.5 Afweging van maatregelen

Door de passage van enkele goederentreinen met afwijkende trillingsniveaus, zijn incidentele overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder voor nieuwe situaties niet uit te sluiten voor de woningen in deelgebied de Laan en in de Toren (eerstelijnsbebouwing). Het gaat om maximaal 1 overschrijding per dag, de trillingen zijn het hoogst in het zuidelijke deel van het plangebied. Daarom hebben we een maatregelafweging uitgevoerd op basis van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn.

Hieruit volgt dat maatregelen aan het spoor niet mogelijk zijn (vallen buiten het onderzoeksgebied, hoge kosten) en dat maatregelen in de bodem ook hoge kosten met zich meebrengen. Met maatregelen aan de bebouwing is wel te voldoen aan de streefwaarden voor trillingshinder. Daarom adviseren we om bij de verdere uitwerking van het project de volgende afwegingen te maken:

1. Is het mogelijk om voor de eerstelijnsbebouwing (Laan en Toren) een concept van betonnen wanden en breedplaatvloeren toe te passen? Door de grotere massa van een dergelijk bouwconcept en de grotere demping van breedplaatvloeren (vergeleken met kanaalplaat- of ribbenvloeren) zijn de trillingen dan lager. Met een dergelijk bouwconcept zijn er alleen nog in de drie meest zuidelijk gelegen woningen in de Laan incidentele overschrijdingen (maximaal 1 of 2 treinen per week).
2. Is het mogelijk om de eigenfrequenties van de vloeren voor de grondgebonden woningen in de Laan groter te laten zijn dan 15 Hz? Dit kan door de vloeroverspanning te beperken of de vloerdikte te vergroten (bijvoorbeeld van de standaard 200 mm naar 250/260 mm). Hiermee wordt voorkomen dat de trillingen van de treinen ongunstig samenvallen met de eigenfrequenties van de vloeren.
3. Als bovenstaande aanpassingen niet mogelijk zijn, overweeg dan om de fundering van de grondgebonden woningen zwaarder uit te voeren, bijvoorbeeld door de paaldiameter van de funderingspalen significant te vergroten (groter dan geotechnisch gezien noodzakelijk is), of door in plaats van een balkenfundering een zware plaatfundering toe te passen (min. 700 mm dik).

Deze maatregelen leiden weliswaar tot meerkosten, maar met deze maatregelen is wel te voldoen aan de streefwaarden voor trillingshinder. Indien geen van bovenstaande ontwerpoptimalisaties bij de verdere uitwerking doelmatig blijkt te zijn (omdat de meerkosten bijvoorbeeld niet opwegen tegen het effect), dan kan op basis van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn worden beargumenteerd dat er geen onacceptabele situatie ontstaat in de geplande bebouwing: er is in de geplande woningen sprake van matige hinder, een situatie die kan worden geaccepteerd als de kosten of impact van maatregelen niet in verhouding staan tot het bereikte effect. Verder geldt dat het gaat om incidentele overschrijdingen (maximaal 1 per dag), en zullen de trillingen lager zijn dan de trillingen die momenteel optreden in de bestaande (oudere, en dus trillingsgevoeliger) bebouwing aan de Hendrik de Ruitersstraat.

## 4.4 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. Er is op basis van bovenstaande informatie geen reden om te twijfelen aan de representativiteit van de berekeningen voor de toekomstige trillingen.
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 en op meerdere posities in het plangebied, 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 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 geïjkt rekenmodel. 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

In het voorliggende onderzoek zijn de verwachte trillingen in nieuw te bouwen woningen op het voormalige Acmeas-terrein in Assen bepaald. Omdat de gebouwen nog niet constructief zijn gedetailleerd, zijn meerdere uitwerkingsvarianten beschouwd. Uit het onderzoek volgt dat, ongeacht de constructieve uitwerking (binnen het kader van het stedenbouwkundig ontwerp) in de deelgebieden het Lint en de Straathof wordt voldaan aan het beoordelingskader, de SBR B-richtlijn. Door de passage van enkele goederentreinen met afwijkende trillingsniveaus zijn incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader echter niet uit te sluiten voor de woningen in deelgebied de Laan en in de Toren (eerstelijnsbebouwing). Het gaat om maximaal 1 overschrijding per dag, de trillingen zijn het hoogst in het zuidelijke deel van het plangebied, mogelijk doordat de wegtunnel de trillingen beter doorgeeft richting de achtergelegen bebouwing. Het aantal woningen met een overschrijding en de mate van overschrijding zijn sterk afhankelijk van de verdere constructieve uitwerking van de plannen.

Omdat de trillingen in een deel van het plan niet voldoen aan het beoordelingskader, hebben wij een maatregelonderzoek uitgevoerd. Op basis daarvan concluderen wij het volgende:

1. Maatregelen aan het spoor of de treinen vallen buiten de planologische grenzen van het onderzoeksgebied en zijn zeer kostbaar. Deze maatregelen zijn niet doelmatig.
2. Maatregelen in de bodem (zoals trillingsschermen) zijn zeer kostbaar en ruimtetechnisch lastig inpasbaar. Bovendien zijn deze maatregelen altijd kostbaarder dan maatregelen aan de bebouwing.
3. Met maatregelen (bouwkundige optimalisaties) aan de bebouwing kan worden voldaan aan het beoordelingskader. Hierbij adviseren wij het volgende voor de constructieve uitwerking van de plannen:
  - a. Pas een bouwkundig concept toe met een betonnen casco en breedplaatvloeren, dit leidt tot de laagste trillingen in de woningen. Andere bouwconcepten, zoals houtskeletbouw of een conventioneel bouwconcept van kalkzandsteen en metselwerk in combinatie met kanaalplaat- of ribbenvloeren, leiden tot hogere trillingen in de woningen. Met een betonnen casco en breedplaatvloeren zijn er alleen nog incidentele overschrijdingen (maximaal 1 of 2 treinen per week) in de drie meest zuidelijk gelegen woningen in de Laan.
  - b. Zorg voor een eigenfrequentie van de vloeren van minimaal 15 Hz voor de grondgebonden woningen in de Laan. Dit kan bereikt worden door de vloeroverspanning te beperken of de vloerdikte te vergroten.
  - c. Als bovenstaande aanpassingen niet mogelijk zijn, overweeg dan om de fundering van de grondgebonden woningen in de Laan zwaarder uit te voeren, bijvoorbeeld door de paaldiameter van de funderingspalen significant te vergroten (groter dan geotechnisch gezien noodzakelijk is), of door in plaats

van een balkenfundering een zware plaatfundering toe te passen (min. 700 mm dik).

Deze maatregelen leiden weliswaar tot meerkosten, maar met deze maatregelen is wel te voldoen aan de streefwaarden voor trillingshinder. Indien geen van bovenstaande ontwerpoptimalisaties bij de verdere uitwerking doelmatig blijkt te zijn (omdat de meerkosten bijvoorbeeld niet opwegen tegen het effect), dan kan op basis van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn worden beargumenteerd dat er geen onacceptabele situatie ontstaat in de geplande bebouwing: er is in de geplande woningen sprake van matige hinder, een situatie die kan worden geaccepteerd als de kosten of impact van maatregelen niet in verhouding staan tot het bereikte effect. Verder geldt dat het gaat om incidentele overschrijdingen (maximaal 1 per dag), en bovendien zullen de trillingen lager zijn dan de trillingen die momenteel optreden in de bestaande (oudere, en dus trillingsgevoeliger) bebouwing aan de Hendrik de Ruitersstraat.

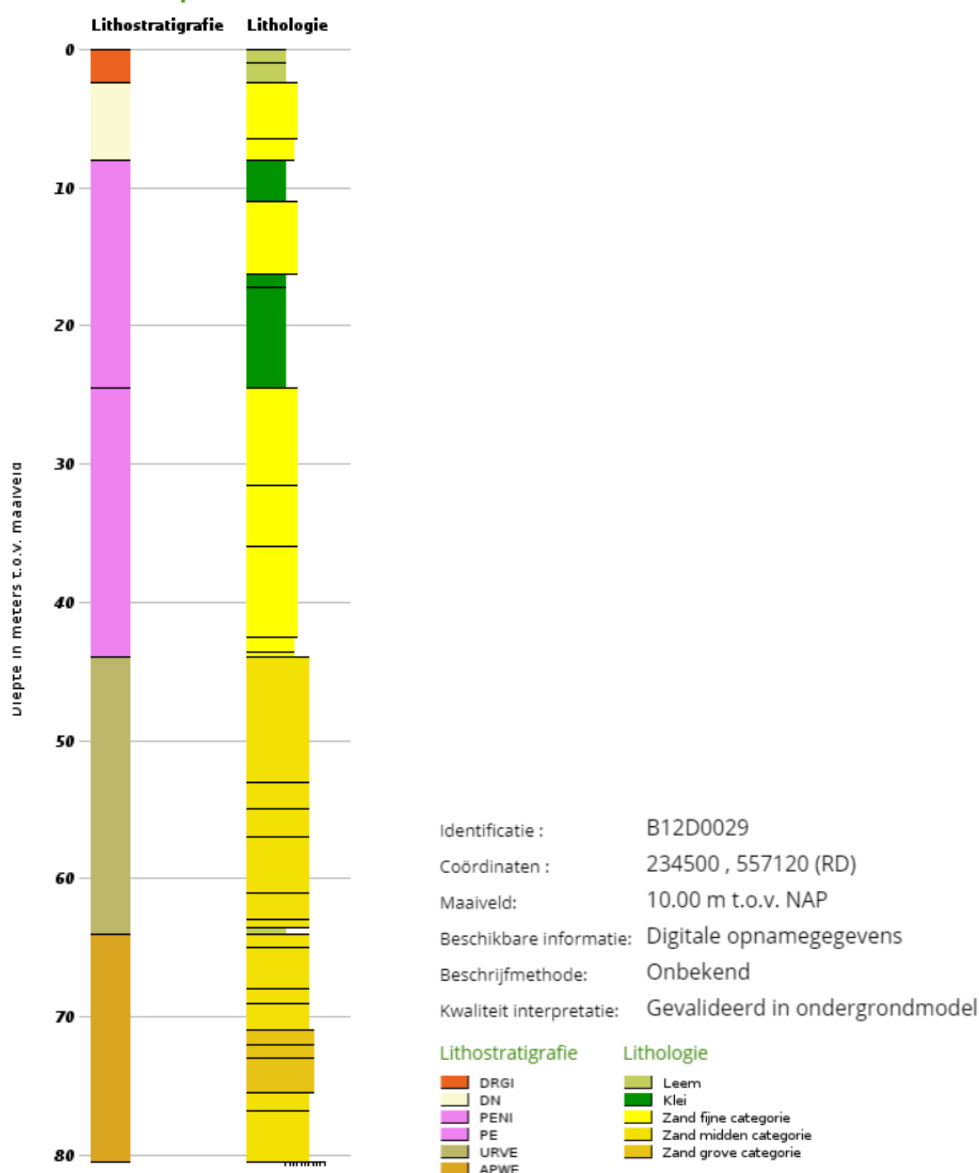
Op basis van bovenstaande afwegingen kan worden gemotiveerd dat in het licht van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn ook zonder maatregelen tegen trillingen geen onacceptabele situatie ontstaat in de geplande bebouwing.

## 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. B12D0029) is weergegeven in Figuur 11. Hier is te zien dat de bodem voornamelijk is opgebouwd uit zandlagen, bovenin het boormonsterprofiel komen klei- en leemlagen voor. Met name door de gelaagde opbouw en de aanwezigheid van zand in de toplagen dempen de trillingen slecht uit met de afstand.

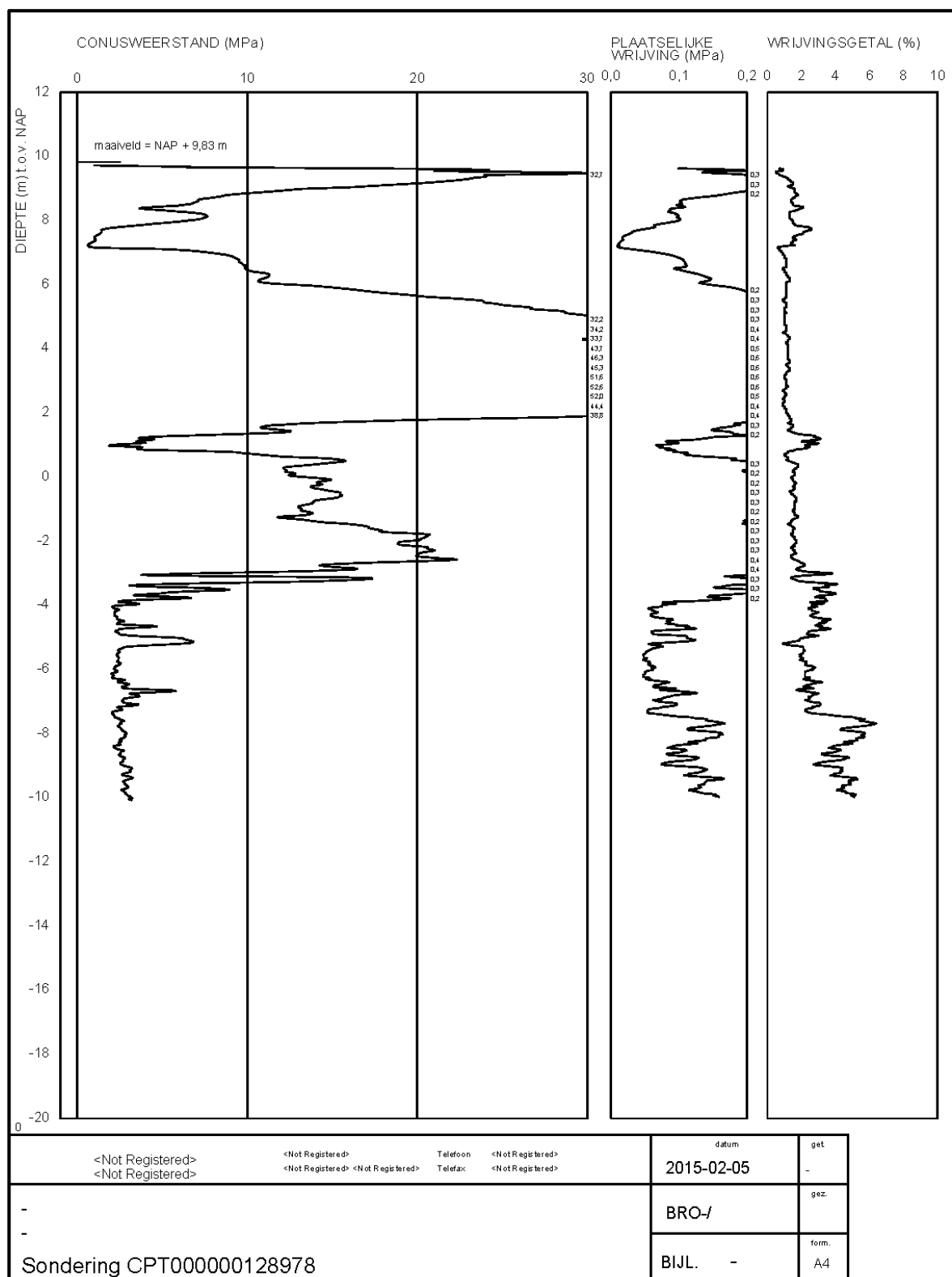
### Boormonsterprofiel



Figuur 11 Boring nabij het onderzoeksgebied, B12D0029



Een representatieve sondering uit het onderzoeksgebied, waarin de gelaagde bodemopbouw ook goed zichtbaar is, is weergegeven in Figuur 12.

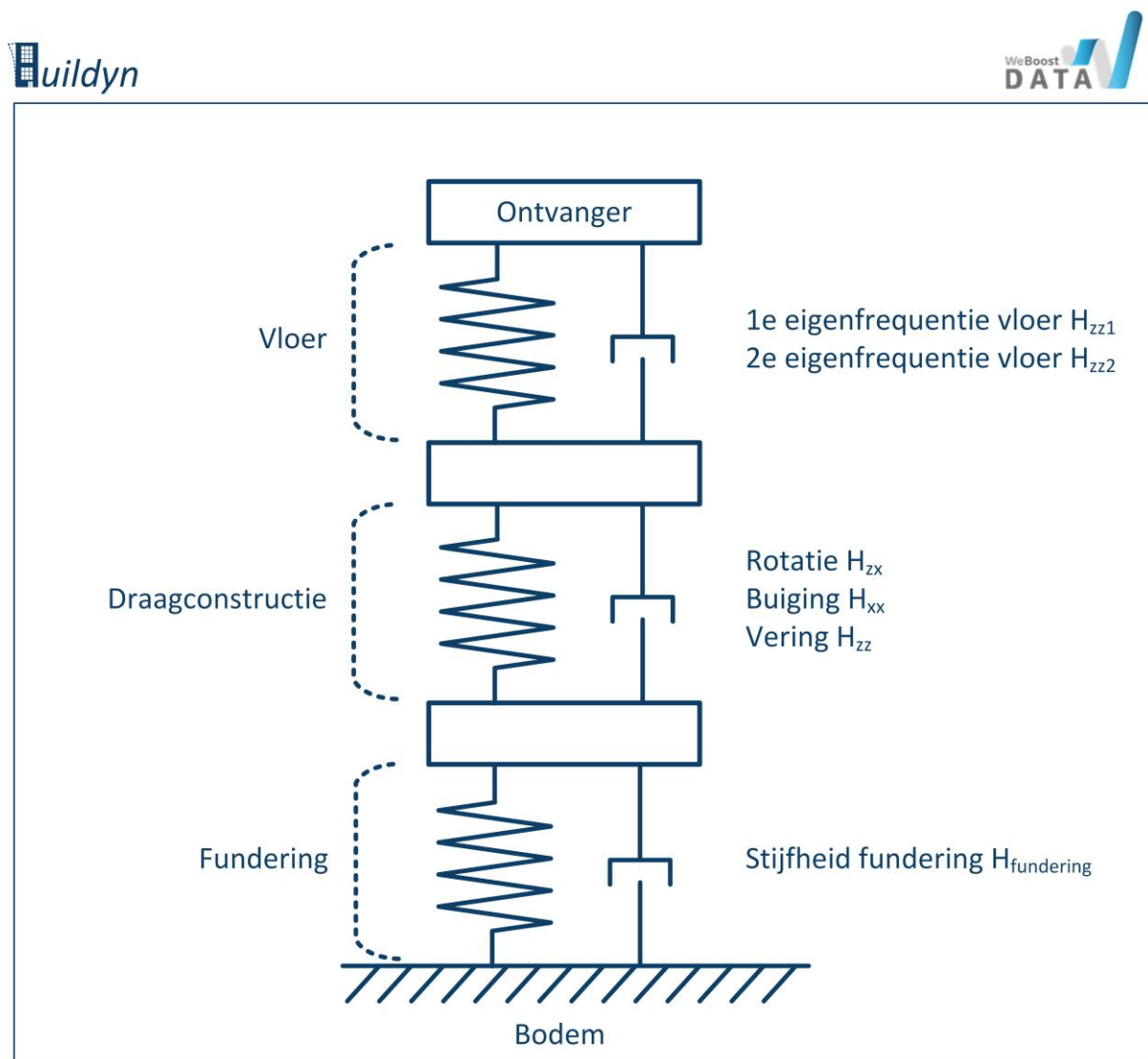


Figuur 12 Sondering nabij het onderzoeksgebied, CPT000000128978

## 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 geïkt 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 13. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 13, worden in deze bijlage nader toegelicht.



Figuur 13 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.

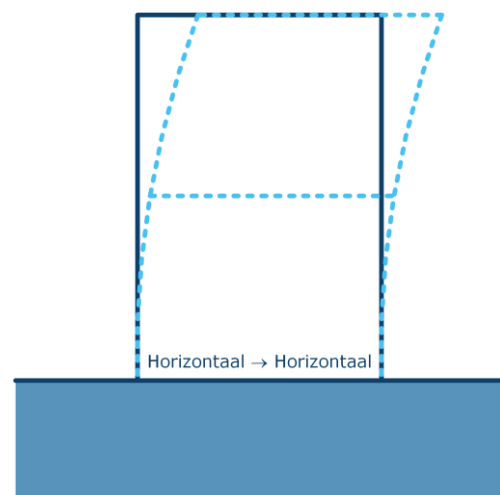
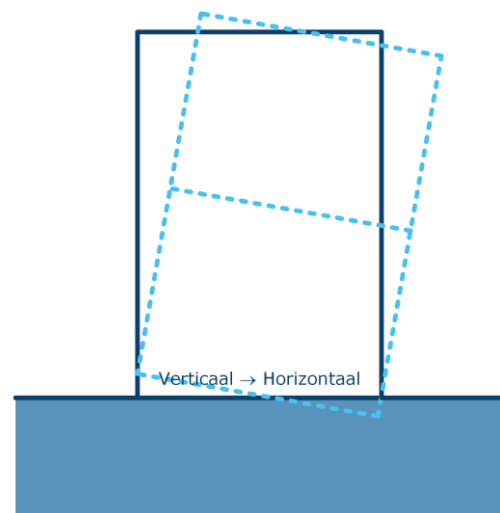
Dit effect noemen we  $H_{zx}$ , en is afhankelijk van:

- 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.

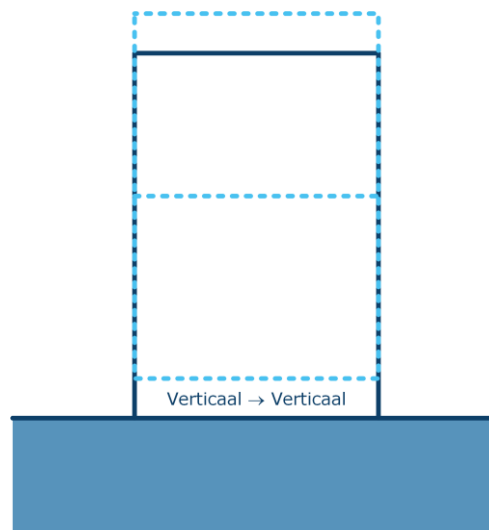
Dit effect noemen we  $H_{xx}$ , en is afhankelijk van:

- 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)



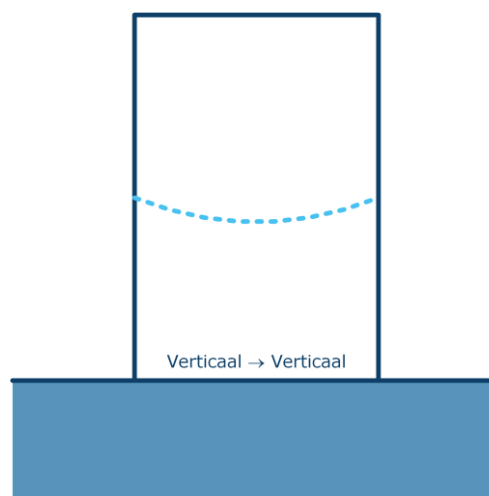
## Vloeren

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:

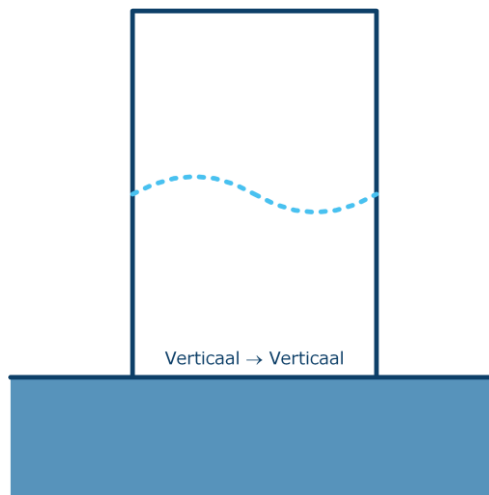
- Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- Afmetingen van de vloer
- Type oplegging



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 prinseschets rechts.

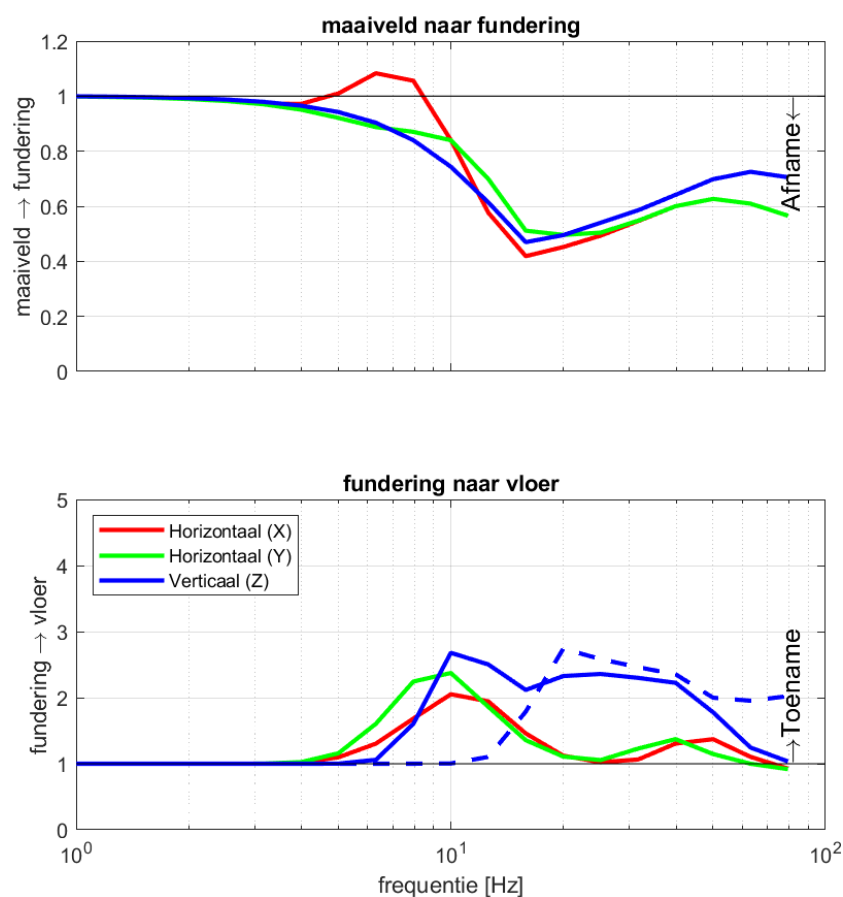
Dit effect noemen we  $H_{zz2}$ , en is afhankelijk van dezelfde parameters als  $H_{zz1}$ .

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 de meest zuidelijk gelegen woning aan de Laan, zijn weergegeven in Figuur 14, voor bouwconcept II met kanaalplaatvloeren van 200 mm.

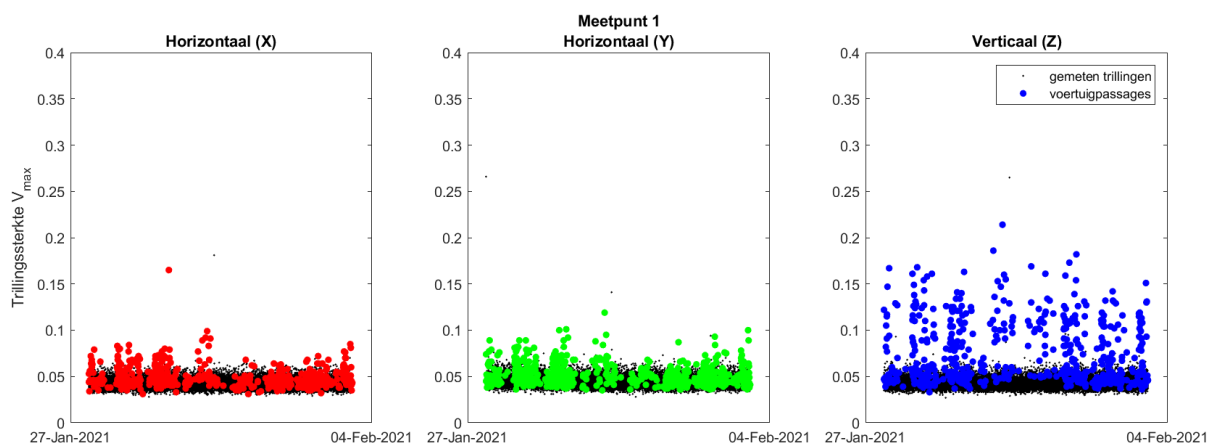


Figuur 14 Buildyn-resultaten voor de meest zuidelijke woning aan de Laan, bouwconcept II, kanaalplaatvloeren van 200 mm. Midden vloer is weergegeven als doorgetrokken blauwe lijn, de overdracht op een kwart van de randen als een onderbroken blauwe lijn.

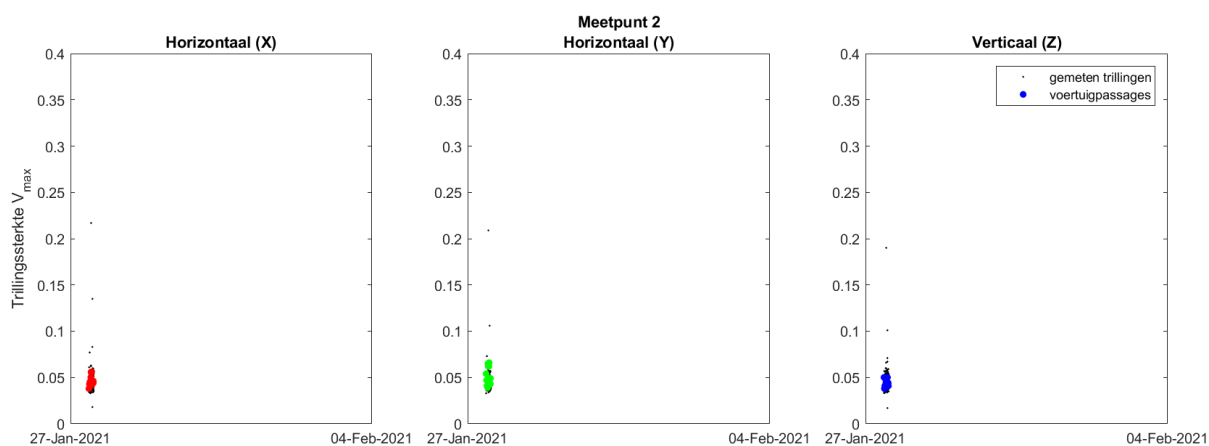


## Bijlage meetresultaten

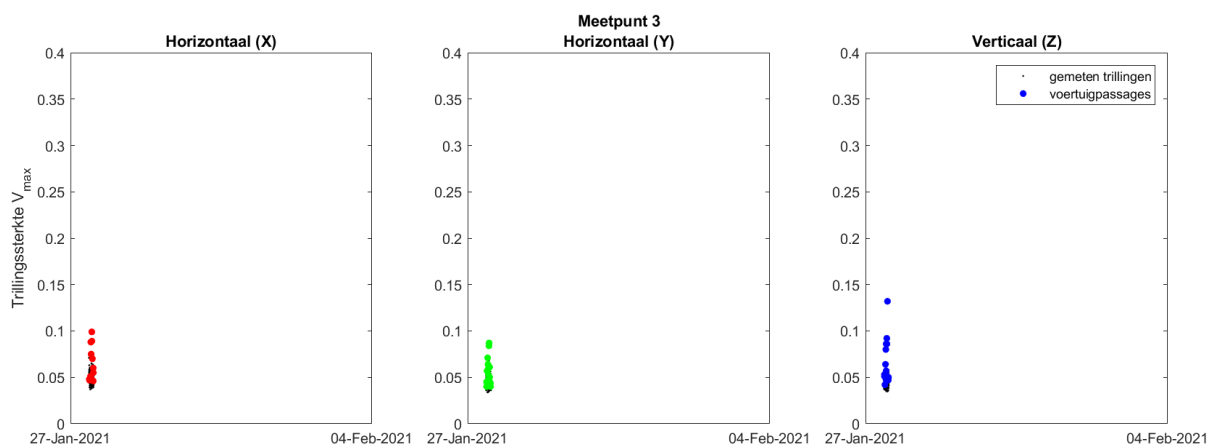
Deze bijlage bevat de resultaten van de trillingsmetingen. Per meetpunt is de trillingssterkte ( $V_{max}$ ) per 30 seconden als functie van de tijd weergegeven.



Figuur 15 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 1 (fundering Hendrik de Ruyterstraat 5)

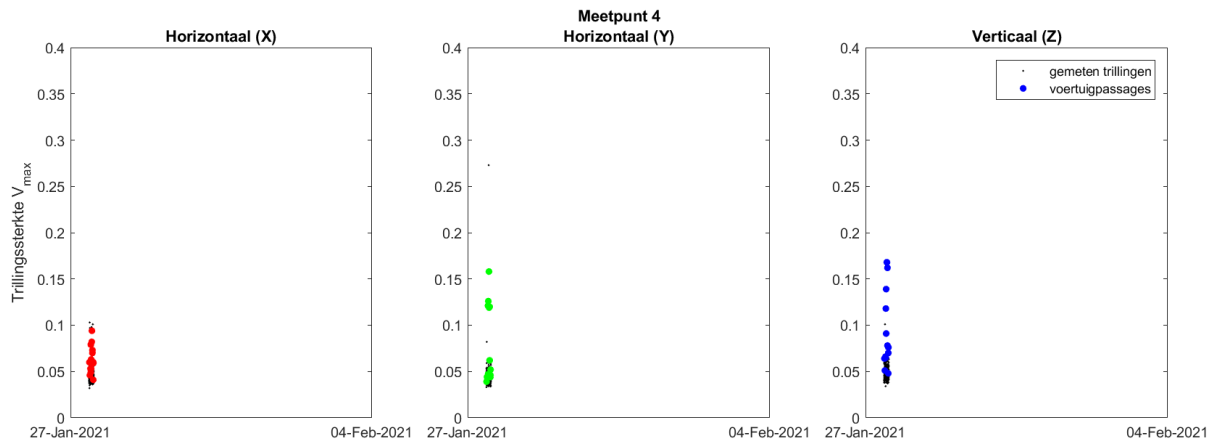


Figuur 16 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 2 (maaiveld)

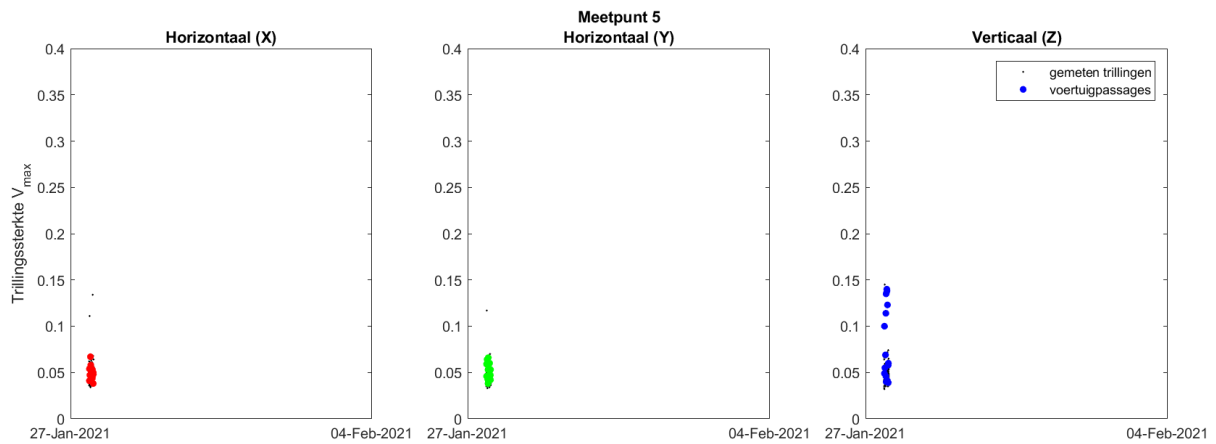


Figuur 17 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 3 (maaiveld)

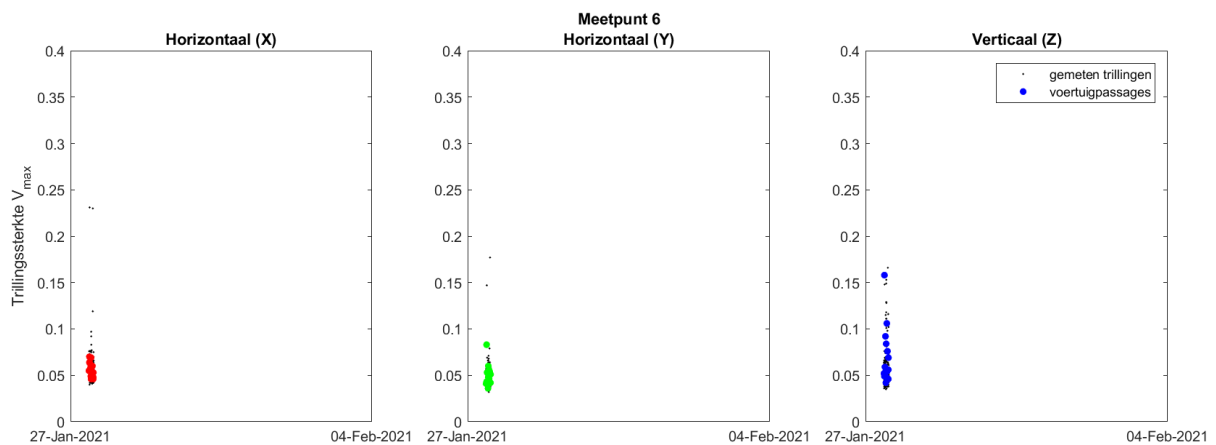




Figuur 18 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 4 (maaiveld)

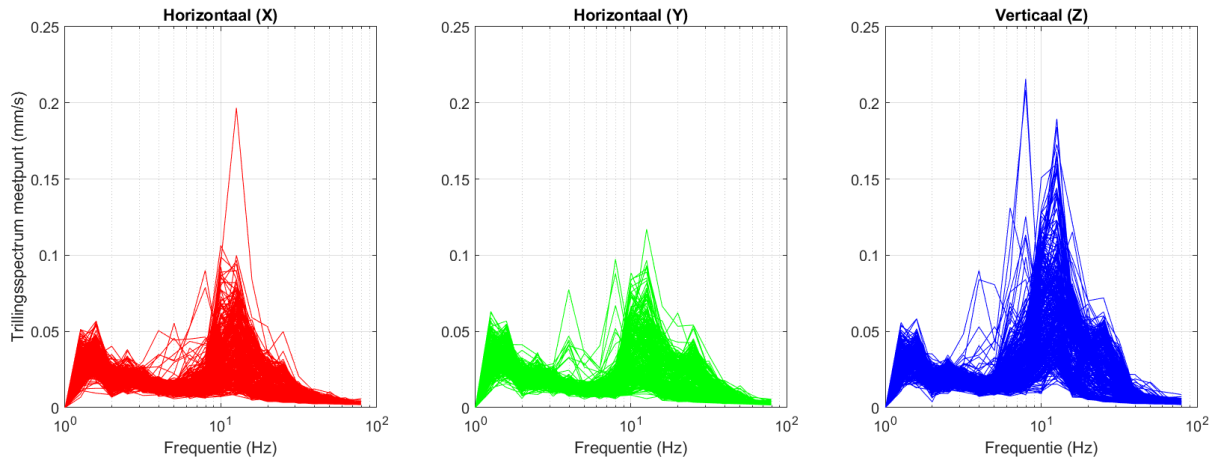


Figuur 19 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 5 (maaiveld)

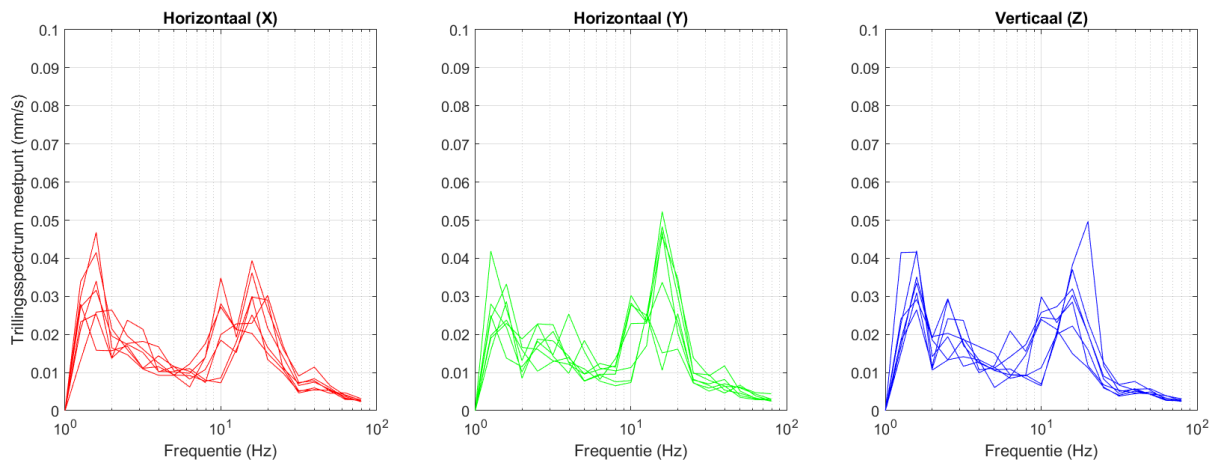


Figuur 20 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 6 (maaiveld)

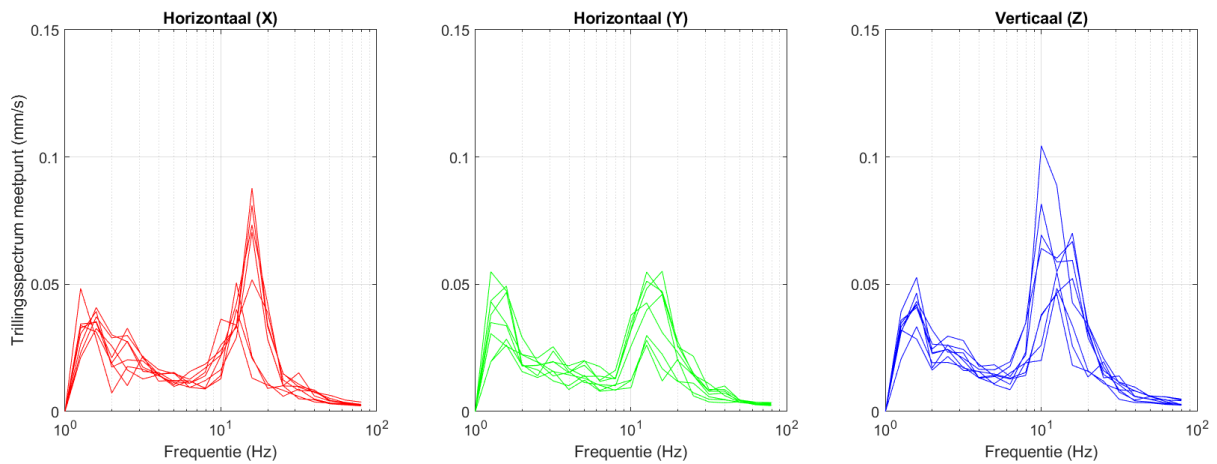
Op de meetpunten zijn ook trillingspectra geregistreerd. Deze trillingspectra zijn vertaald naar tertsbandspectra (1/3 octaafbandspectra) en weergegeven in de hierna volgende figuren.



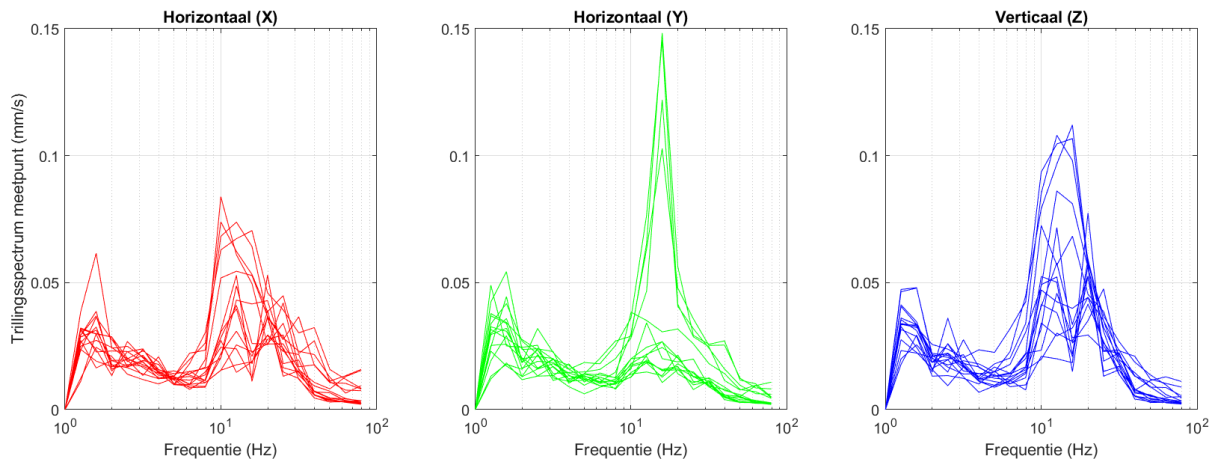
Figuur 21 Trillingspectra op meetpunt 1 (fundering Hendrik de Ruyterstraat 5)



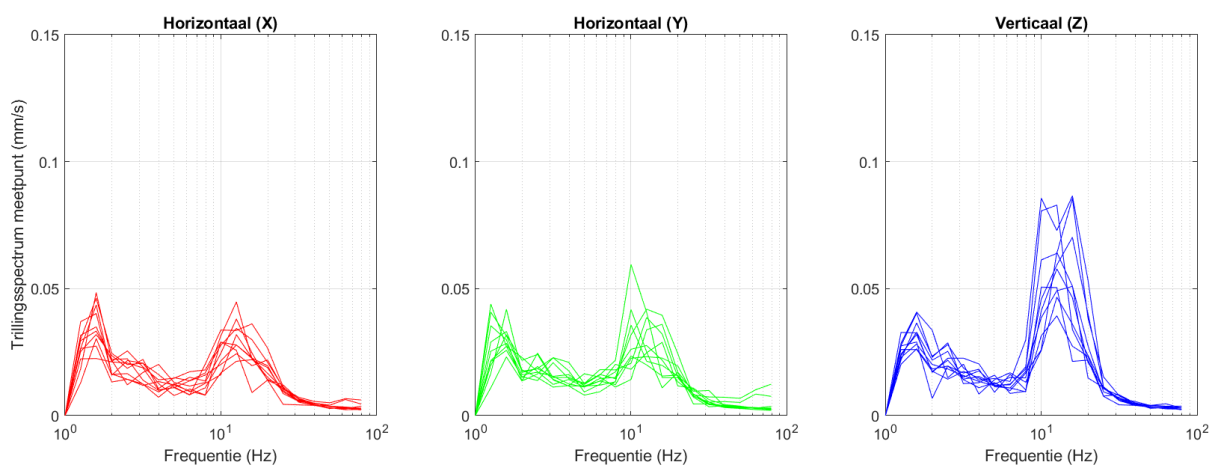
Figuur 22 Trillingspectra op meetpunt 2 (maaiveld)



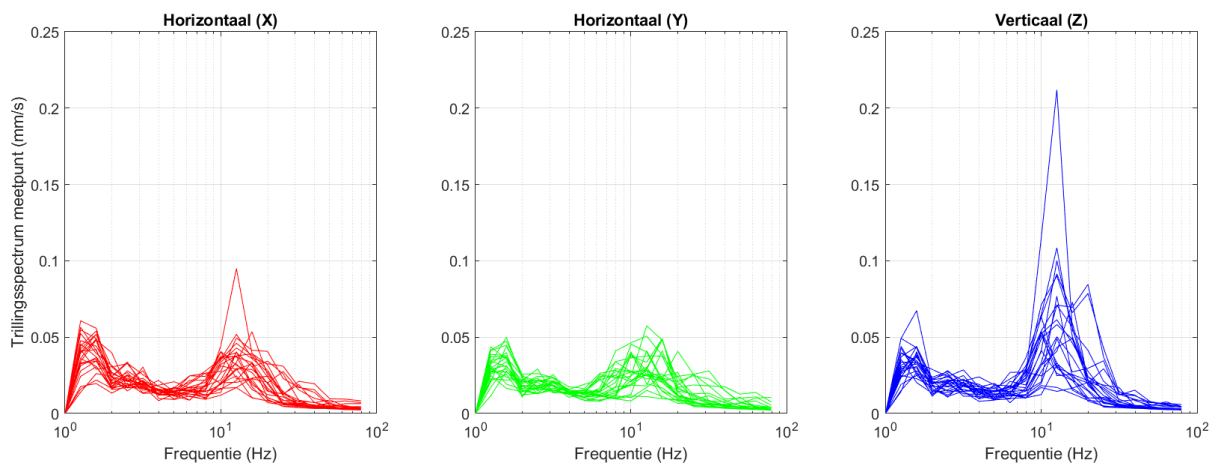
Figuur 23 Trillingspectra op meetpunt 3 (maaiveld)



*Figuur 24 Trillingspectra op meetpunt 4 (maaveld)*

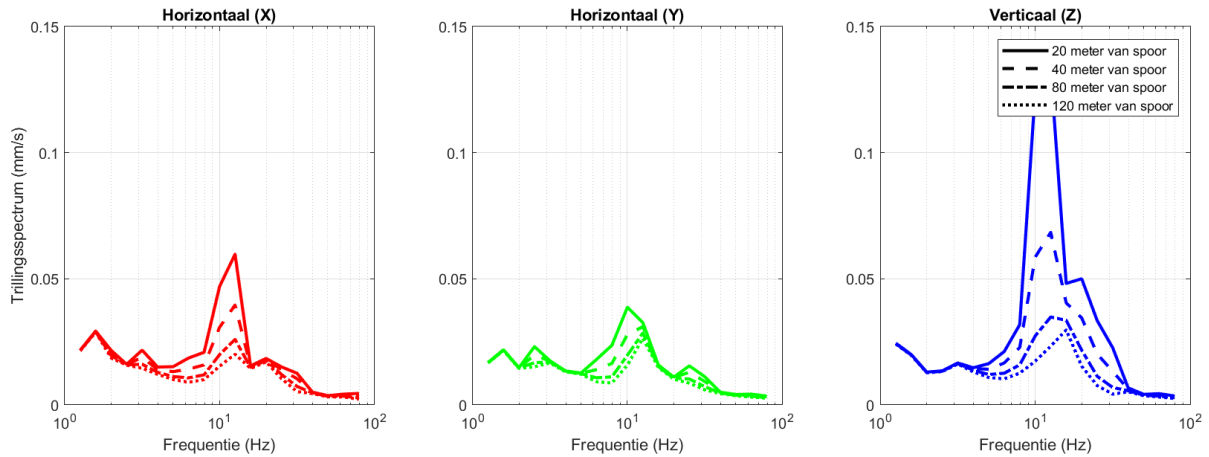


*Figuur 25 Trillingspectra op meetpunt 5 (maaveld)*



*Figuur 26 Trillingspectra op meetpunt 6 (maaveld)*

De gemiddelde trillingspectra op 20, 40, 80 en 120 meter van het spoor zijn weergegeven in Figuur 27. 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.

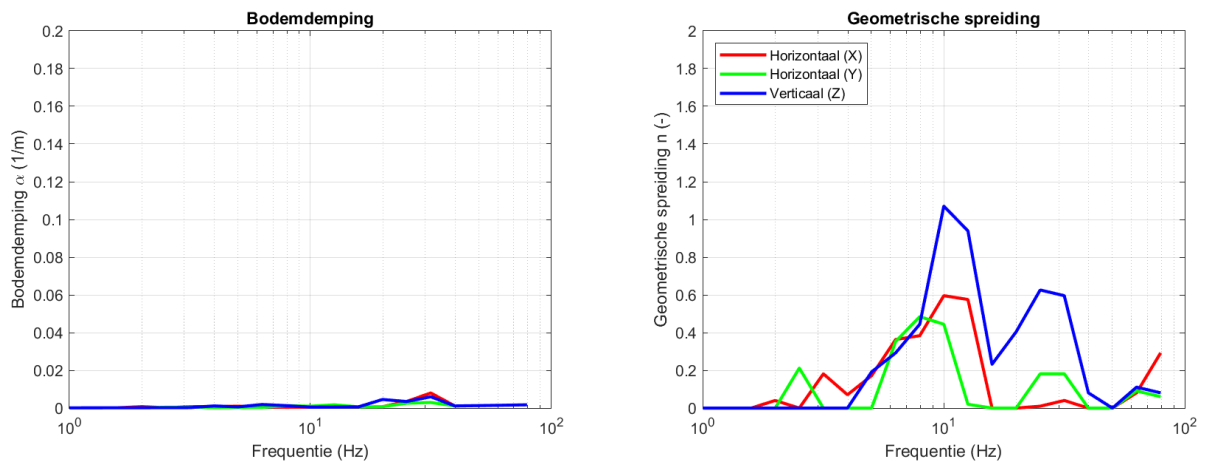


Figuur 27 Trilingspectra op 20, 40, 80 en 120 meter van het spoor

Met behulp van deze trilingspectra 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 trilingssterkte op een willekeurige afstand  $r$ ,  $r_0$  is een referentieafstand (hier 20 meter),  $\alpha$  is de bodemdemping (zie Figuur 28) en  $n$  is de geometrische uitspreiding van de trilingsgolf (zie Figuur 28). Deze resultaten zijn gebruikt om de uitdemping van de trillingen met de afstand te bepalen.



Figuur 28 Bodemdemping  $\alpha$  (links) en geometrische spreidingsfactor  $n$  (rechts) in het plangebied