

JOHAN GREIVESTRAAT AMSTERDAM

Trillingsonderzoek t.b.v. nieuwbouw



Colofon

Auteur	Thijmen van der Veen thijmen@we-boost.nl
Controle en vrijgave	Pieter Boon pieter@we-boost.nl +31 6 10 03 94 54
Projectcode	WBD2021-022
Versienr	1.0
Datum	21 mei 2021
Status	Vrijgegeven
Opdrachtgever	De Key



© 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.

De kern van dit rapport

Aan de Johan Greivestraat worden drie appartementencomplexen gerealiseerd. De geplande nieuwbouw ligt in de nabijheid van de spoorlijn Schiphol – Amsterdam Centraal. 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.

In dit onderzoek is met behulp van metingen op de bouwlocatie en modelberekeningen van de toekomstige bebouwing onderzocht wat de trillingen zullen zijn in de toekomstige bebouwing. Hiervoor zijn meerdere constructieve uitwerkingsvarianten onderzocht, zodat dit trillingsonderzoek bruikbaar is voor verschillende uitwerkingen van het huidige Voorlopig Ontwerp (VO).

De belangrijkste bevinding van het onderzoek is dat het voorgestelde ontwerp bij een standaard bouwconcept conform het huidige VO (dus met breedplaatvloeren en een in het werk gestort of prefab betonnen casco) voldoet aan het beoordelingskader (de SBR B-richtlijn). Door de relatief grote afstand tot het spoor in combinatie met de slappe bodem (waardoor de trillingen snel uitdempen) en de aanwezigheid van een sloot tussen het spoor en de geplande nieuwbouw, zijn de trillingen relatief laag. Er zijn dus geen maatregelen of aanpassingen aan de geplande bebouwing nodig om te voldoen aan het beoordelingskader.

Bij een constructieve uitwerking in houtskeletbouw zijn wel overschrijdingen mogelijk, doordat de constructie dan lichter is, en daardoor gevoeliger voor trillingen. We adviseren daarom om geen houtskeletbouw toe te passen, of anders constructieve aanpassingen te doen. Denk hierbij aan het verzwaren van de kern en kolommen (twee keer zo stijf als constructief benodigd) en het verzwaren van de vloer (kortere balkafstand, hogere balken of een kokervloer). Met deze aanpassingen is ook met houtskeletbouw te voldoen aan het beoordelingskader.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
1.1	Aanleiding	5
1.2	Doel	5
1.3	Leeswijzer	5
2	Situatie en uitgangspunten	7
2.1	Situatie	7
2.2	Uitgangspunten	8
3	Beoordelingskader	10
3.1	Beoordelingskader	10
3.2	Rekenmethode	11
4	Verwachte trillingen in de woningen	14
4.1	Meetresultaten	14
4.2	Trillingen in geplande nieuwbouw	14
4.3	Onzekerheden in het onderzoek	17
I	Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek	19
II	Bijlage rekenmodel Buildyn	21
	Fundering	22
	Draagconstructie	22
	Vloeren	23
	Resultaten	24
III	Resultaten metingen	25

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Aan de Johan Greivestraat in Amsterdam worden drie appartementencomplexen gerealiseerd. De geplande nieuwbouw ligt in de nabijheid van de spoorlijn Schiphol – Amsterdam Centraal, zie Figuur 1. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet *op voorhand* worden uitgesloten.



Figuur 1 Plangebied nieuwbouw

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. 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 aanpassingen 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 de appartementen op basis

van de gemeten trillingen en de eigenschappen van het gebouw. Het resultaat van deze stap wordt in hoofdstuk 4 beschreven.

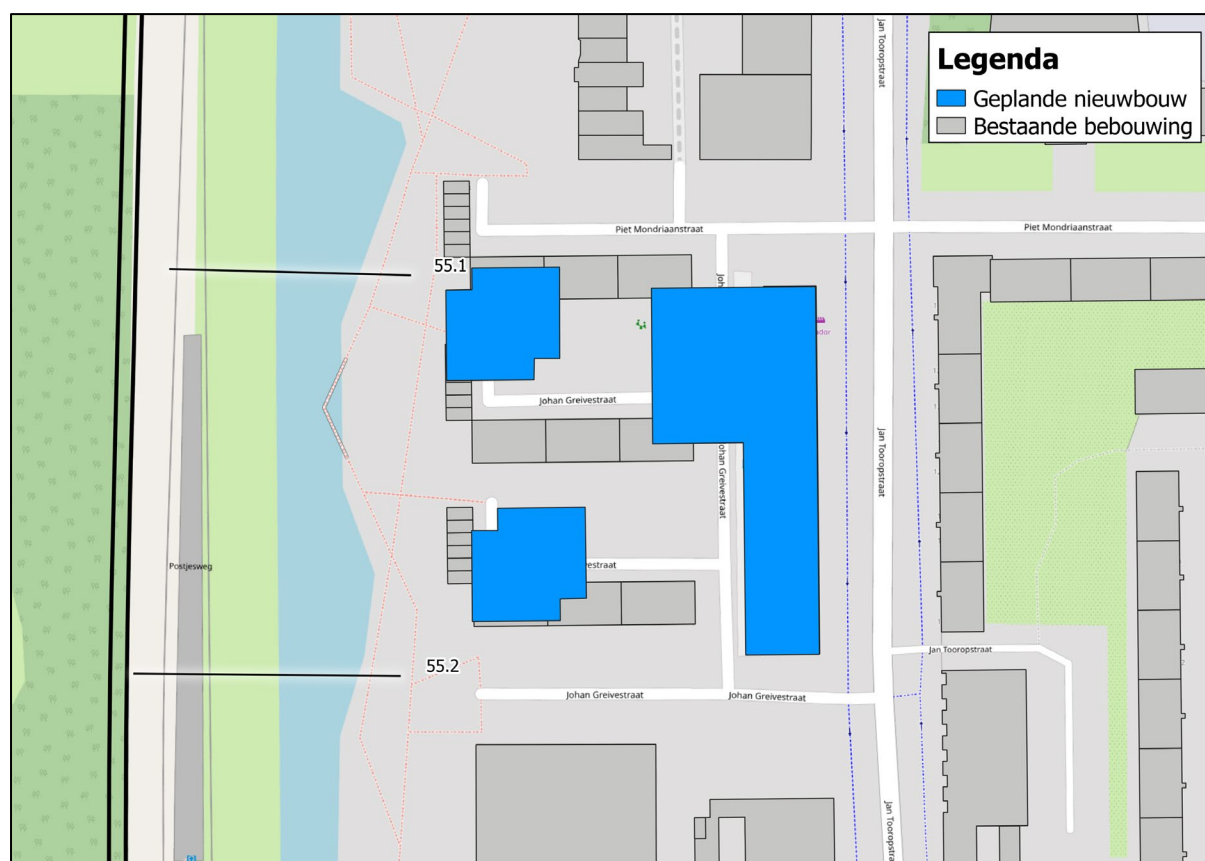
De bijlages bevatten technische informatie van het onderzoek, zoals een toelichting op de rekenmethodiek en grondonderzoek van nabijgelegen locaties.

2 Situatie en uitgangspunten

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

2.1 Situatie

In het plangebied staan op dit moment vier flatgebouwen. De geplande nieuwbouw betreft een appartementencomplex en twee woontorens dicht bij het spoor, zie Figuur 2.



Figuur 2 Bestaande en toekomstige bebouwing

De geplande nieuwbouw bevindt zich op een afstand van zo'n 75 tot 150 meter van het spoor. Tussen het spoor en de geplande bebouwing bevindt zich een metrolijn en een waterpartij. De rijsnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. Deze gegevens zijn gebaseerd op gegevens uit het Geluidsregister Spoor en gegevens van de vervoerders. Er rijdt geen structureel goederenverkeer op deze locatie. Vanwege Covid-19 rijden er momenteel minder treinen overdag¹. In de berekeningen is hiervoor gecorrigeerd. Door de geplande verplaatsing van de internationale treinen van

¹ Minder internationale treinen, 4 i.p.v. 6 sprinters per uur per richting, 2 i.p.v. 4 IC Directs per uur per richting

Amsterdam Centraal naar Amsterdam Zuid, zullen Thalys, Eurostar en IC Direct Amsterdam-Brussel niet meer passeren, terwijl het aantal sprinters toeneemt naar 8 per uur (Airportsprinters). In de berekeningen is rekening gehouden met deze wijzigingen.

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

Type trein	Rijksnelheid	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Sprinter	60 – 80 km/h	6.00	6.00	3.00
Intercity	100 – 120 km/h	0.00	0.00	0.75
IC Direct	100 – 120 km/h	4.00	3.25	0.75
Thalys/Eurostar	100 – 120 km/h	2.42	1.00	0.38

Tussen het spoor en de bebouwing ligt een metrolijn, deze metro's stoppen op het nabijgelegen metrostation Postjesweg en hebben daarom een lage rijksnelheid. In de metingen zijn deze metro's ook beschouwd, maar gezien de lage rijksnelheid en het feit dat het om lichtere voertuigen gaat dan treinen, zullen metro's naar verwachting niet maatgevend zijn. Tenslotte, ook zwaar wegverkeer kan op korte afstand tot de weg voor voelbare trillingen zorgen, maar is niet nader kwantitatief beschouwd in dit onderzoek.

2.2 Uitgangspunten

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

2.2.1 Gegevens bebouwing

In het plangebied worden een appartementencomplex en twee woontorens gerealiseerd. Er is op dit moment nog geen definitief ontwerp van de bebouwing uitgewerkt (alleen SO van 2 april 2021 en VO), daarom wordt in de berekeningen gerekend met een aantal constructievarianten, zie Tabel 2. Het rekenmodel voor de bebouwing is gebaseerd op Tabel 2.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

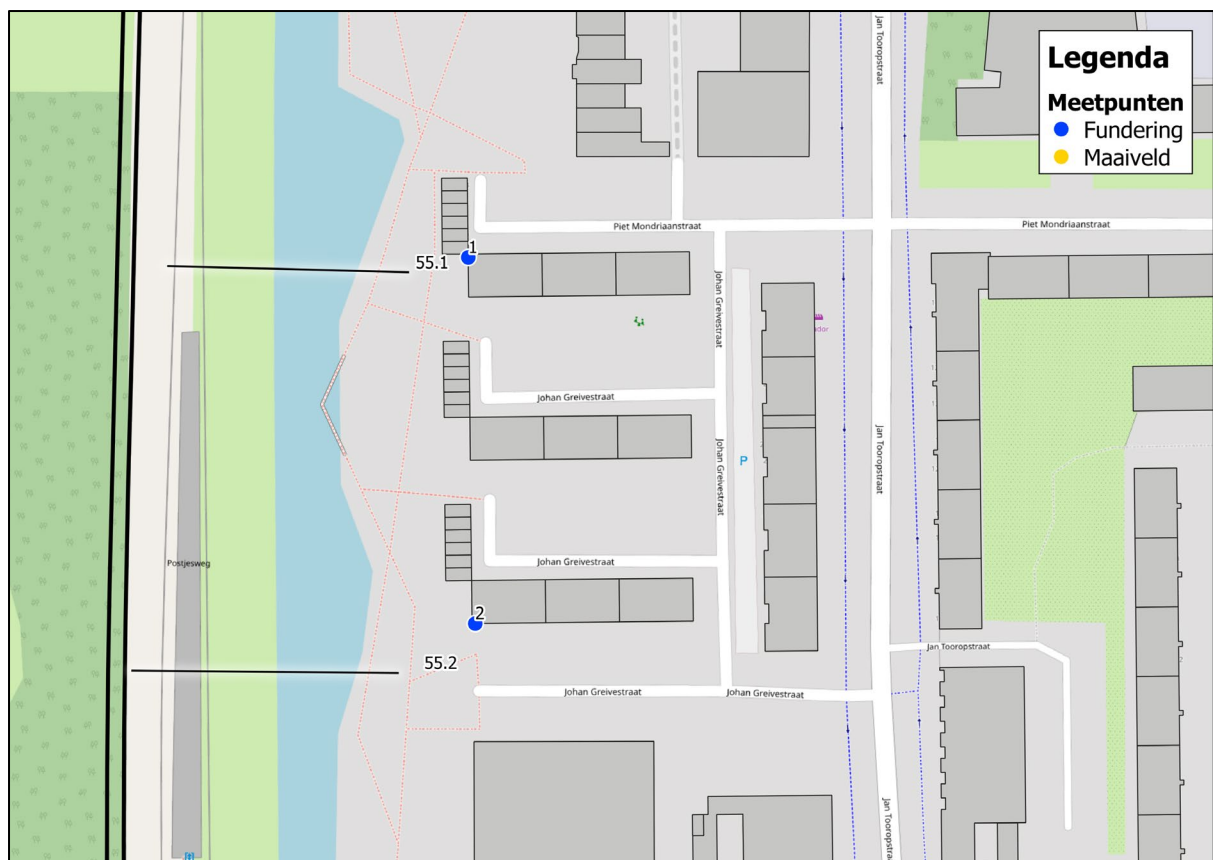
Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Meerdere varianten: - Breedplaatvloeren, 200 en 250 mm dik, met 60 en 70 mm zandcement - Houtskeletbouw, meerdere vloerbalktypes (275 x 75, 300 x 100, 320 x 100) en balkafstanden (400 tot 600 mm), en zowel als conventionele als kokervloer (aan onderzijde afgewerkt met multiplex).
Hoogte	15 tot 20 meter voor het middelhoge complex 35 tot 40 meter voor de woontorens
Lengte vloerveld	3 tot 8 meter
Breedte vloerveld	6 tot 13.5 meter
Type constructie	Meerdere varianten: - Prefab betonbouw, verschillende stijfheden - In het werk gestort beton, verschillende stijfheden - Metselwerk en kalkzandsteen, met betonnen kern - Houtskeletbouw, verschillende stijfheden
Fundering	Op palen
Stijfheid gebouwen	Meerdere varianten: - Betonnen wanden - Kalkzandsteen wanden - Houtskeletbouw

2.2.2 Gegevens ondergrond

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

2.2.3 Meetresultaten

Door Alcedo zijn metingen uitgevoerd in het onderzoeksgebied op twee punten, zie Figuur 3. De metingen zijn uitgevoerd van 3 tot en met 10 mei 2021, en zijn verricht op twee punten aan de fundering van de bestaande bebouwing. De meetresultaten uit dit meetonderzoek geven we weer in hoofdstuk 4.



Figuur 3 Meetpunten in 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.²

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 woningen is dermate groot dat er geen schade aan de gebouwen zal ontstaan, en verstoring van gevoelige apparatuur als gevolg van de realisatie van dit plan is ook niet aan de orde.

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

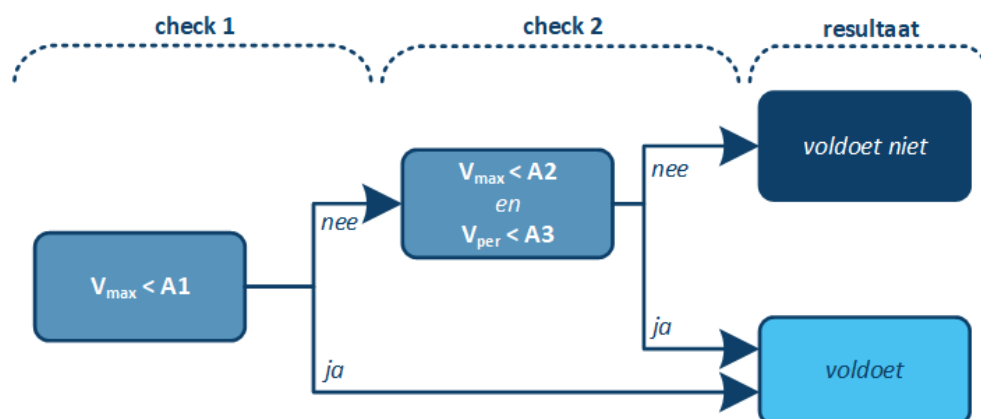
1. De richtlijn toetst zowel een maximaal optredende trillingssterkte (V_{max} , treedt op bij de trein die gedurende de meetperiode de hoogste trillingen veroorzaakt) als het tijdsgemiddelde van de trillingen (V_{per} , deze grootheid is in tegenstelling tot V_{max} dus ook afhankelijk van het aantal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

² 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.

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

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

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



Figuur 4 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

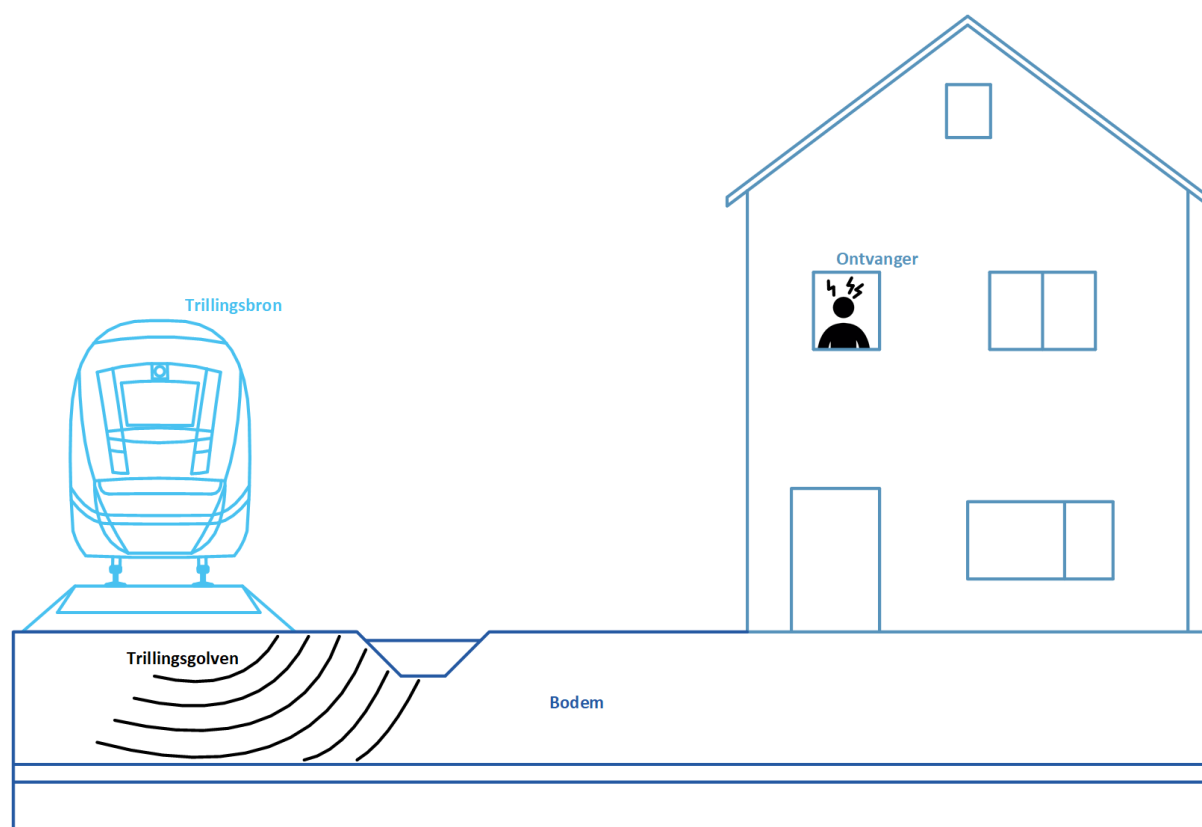
3.2 Rekenmethode

In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde gebouwen, wordt op basis van metingen aan de 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 system 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 twee punten aan de fundering van de bestaande bebouwing in het plangebied. 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 slappere veen- en kleilagen, zie bijlage I. Op grotere diepten bevinden zich ook stijvere zandbodemplagen. 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, een aantal mogelijkheden voor de constructieve eigenschappen en voor de gebruikte materialen van de gebouwen. Hiervoor maken we gebruik van het rekenmodel Buildyn, een zogenaamd beam-element model (BEM) waarin het gebouw gemodelleerd en doorgerekend wordt. De resultaten van het model zijn geijkt

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

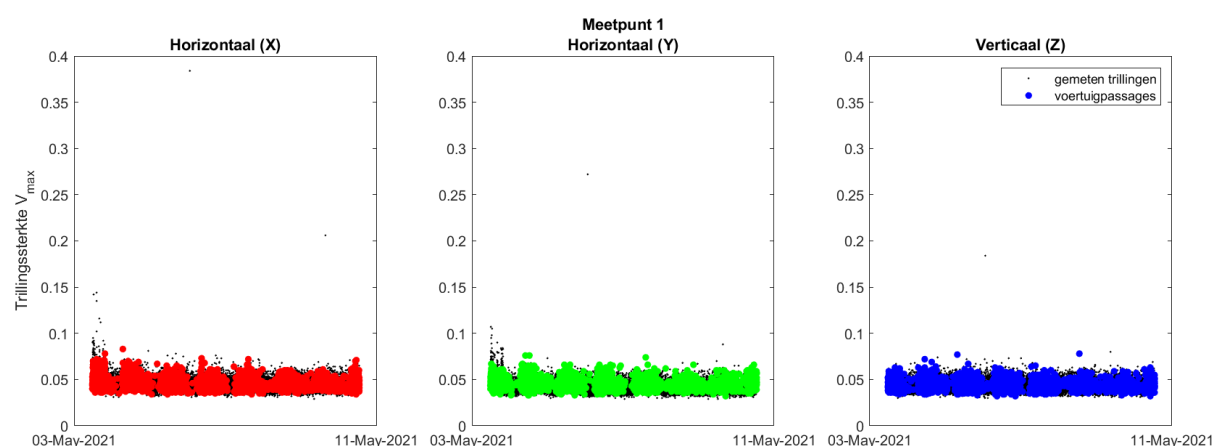
4 Verwachte trillingen in de woningen

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

4.1 Meetresultaten

Alcedo heeft metingen uitgevoerd aan de fundering van bestaande bebouwing in het plangebied. De trillingen aan de fundering op meetpunt 1 zijn weergegeven in Figuur 6. Overige gegevens uit de metingen hebben we opgenomen in bijlage III. In Figuur 6 valt het volgende op:

1. De trillingen zijn in alle drie de richtingen ongeveer even hoog, waarbij de hoogst gemeten waarde zich in horizontale X-richting bevindt, met een waarde van ca. 0.08.
2. De trillingen van de treinen zijn vergelijkbaar met de achtergrondtrillingen (zoals van wegverkeer of lokaal verkeer). De trillingen van metro's zijn, zoals verwacht, niet waarneembaar boven de achtergrondtrillingen.



Figuur 6 Gemeten trillingen aan de fundering

4.2 Trillingen in geplande nieuwbouw

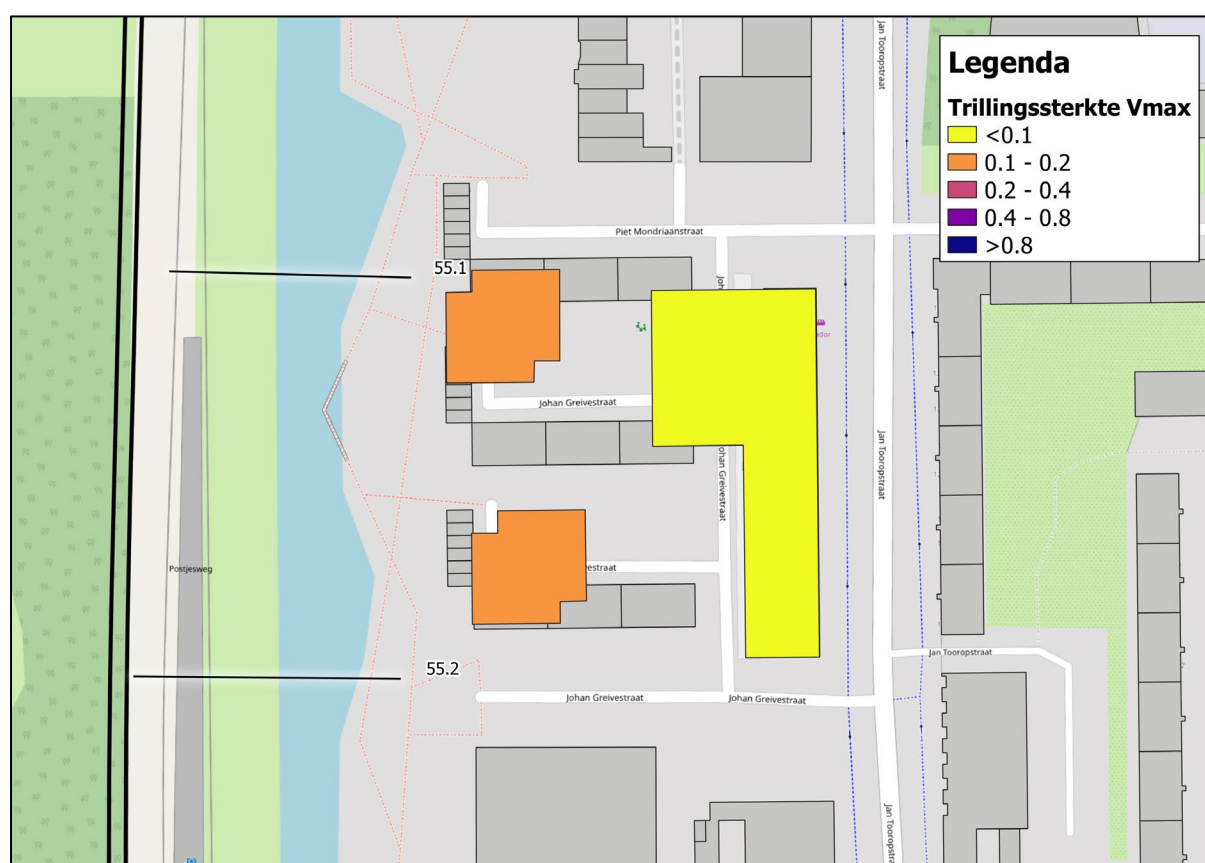
De geplande bebouwing is gemodelleerd op basis van de informatie uit Tabel 2. Het (frequentie-afhankelijke) gedrag van de geplande bebouwing is weergegeven in bijlage II. Met deze resultaten is bepaald in welke mate de trillingen worden versterkt tussen de huidige meetpunten en de vloeren in de toekomstige woningen. Hierbij wordt beoordeeld op de bovenste verdieping, waar de hoogste trillingen worden verwacht.

Met deze overdrachten is op basis van de meting bepaald wat de trillingen in de toekomst zullen zijn. Deze resultaten zijn weergegeven in Tabel 4, samen met een beoordeling van de trillingen. De trillingen zijn weergegeven als een bandbreedte, omdat binnen elk bouwconcept meerdere varianten zijn beschouwd. De overschrijdingen van de richtlijn zijn oranje gearceerd.

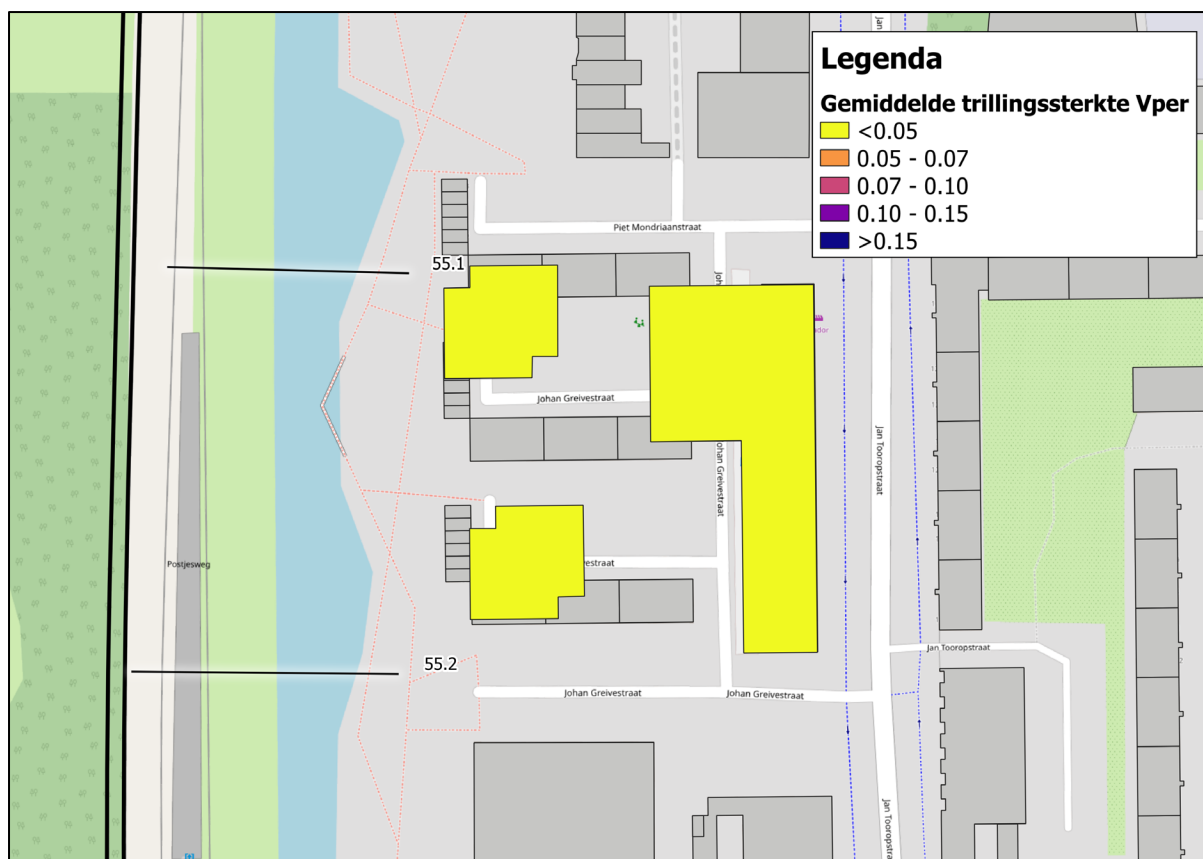
Tabel 4 Trillingen per type bouwconcept en beoordeling op SBR B-richtlijn

Bouwconcept	V_{max}	V_{per}	Beoordeling
Torens (Marktwoningen)			
Prefab betonnen casco	0.1 – 0.2	0.01 – 0.02	Voldoet
In het werk gestort betonnen casco	0.1 – 0.2	0.01 – 0.02	Voldoet
Kalkzandsteen en metselwerk	0.1 – 0.2	0.01 – 0.02	Voldoet
Houtskeletbouw	0.2 – 0.3	0.02 – 0.04	Voldoet mogelijk, afhankelijk van uitwerking
Sociaal woonblok			
Prefab betonnen casco	0.1	0.00	Voldoet
In het werk gestort betonnen casco	0.1	0.00	Voldoet
Kalkzandsteen en metselwerk	0.1	0.00	Voldoet
Houtskeletbouw	0.1	0.00	Voldoet

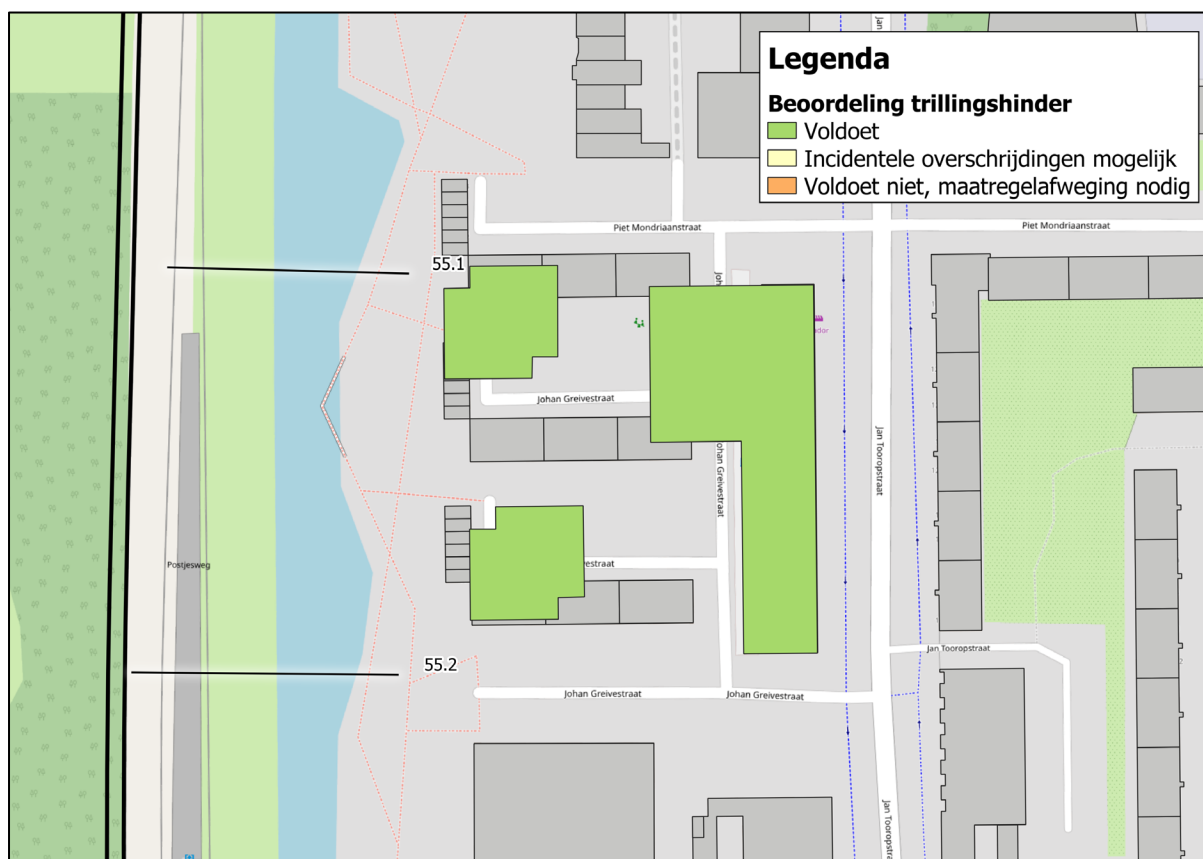
De resultaten hebben we grafisch weergegeven in Figuur 7 tot en met Figuur 9 voor een conventioneel bouwconcept (betonnen casco met breedplaatvloeren). In de figuren is de bovengrens van de bandbreedte van de verwachte trillingen weergegeven.



Figuur 7 Bovengrens van de trillingssterkte V_{max}



Figuur 8 Bovengrens van de gemiddelde trillingssterkte V_{per}



Figuur 9 Beoordeling van de trillingen

Uit Tabel 4 en de hiervoor weergegeven figuren volgt dat er geen overschrijdingen van de streefwaarden zullen optreden bij conventionele bouw. De trillingen zijn lager dan de streefwaarden. Uit de beschouwde varianten is wel het volgende te zien:

1. De trillingen zijn iets lager bij een constructie met meer dempende materialen (zoals metselwerk en kalkzandsteen, of met meer tussenwanden zoals bij een deel van de jongerenwoningen). De trillingen zijn hoger bij een constructie van houtskeletbouw, door de lichtere constructie die makkelijker in trilling wordt gebracht.
2. De trillingen zijn iets lager bij een hogere eigenfrequentie van de vloer. Een hogere eigenfrequentie kan worden bereikt door een dikkere vloerconstructie (bijv. 250 mm i.p.v. 200 mm breedplaatvloer) of door kleinere vloeroverspanningen (bijv. 5 of 6 meter i.p.v. 8 of 9 meter). Bij houtskeletbouw geldt dat een kleinere balkafstand, kortere vloeroverspanningen, hogere balken en een kokervloer (vloer aan onderzijde ook afgewerkt met multiplex plaat) zorgen voor lagere trillingen door de hogere eigenfrequentie van de vloer.
3. De trillingen zijn lager bij een stijvere constructie (in het werk gestort beton geeft minder trillingen dan prefab beton). Ook een zwaardere kern (dikkere wanden, meer dwarsverbanden) geeft lagere trillingen.

Door de relatief grote afstand tot het spoor en de dempende werking van de tussengelegen spoor sloot zijn de trillingen op deze locatie relatief laag. Alleen bij houtskeletbouw zijn overschrijdingen van het beoordelingskader mogelijk.

Bij een bouwconcept met een betonnen kern en breedplaatvloeren, of een concept met kalkzandsteen en metselwerk, zijn geen maatregelen of aanpassingen nodig om te voldoen aan het beoordelingskader voor trillingen. Bij een houtskelet bouwconcept zijn wel aanpassingen nodig om te voldoen aan het beoordelingskader. Denk hierbij aan het verzwaren van de kern en kolommen (twee keer zo stijf als constructief benodigd) en het verzwaren van de vloer (kortere balkafstand, hogere balken of een kokervloer).

4.3 Onzekerheden in het onderzoek

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

1. Ten aanzien van de trillingsbron: de natuurlijke variatie als gevolg van spooronderhoud en de temperatuur kunnen zorgen voor zo'n 30% variatie in de trillingen, afhankelijk van de spoorconstructie en de bodemopbouw. Er is gemeten in een klimatologisch als normaal te typeren periode. Er is geen informatie bekend over de huidige status van de spoorligging. Meestal is de variatie op grotere afstand van het spoor, zoals bij dit project, relatief beperkt. Bovendien, door te meten op meerdere punten hebben we deze variaties 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.
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 op grotere afstand van het spoor is gemeten, is de invloed van die lokale variaties beperkt.

3. Ten aanzien van de gebouwen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en definitief ontwerp). Bovendien is het dynamische gedrag van bijvoorbeeld beton afhankelijk van de mate van gescheurdheid van het beton en zijn er natuurlijke variaties in materiaalgedrag (van bijvoorbeeld hout, metselwerk en beton). In de berekeningen is gerekend met een verwachtingswaarde van de trillingen op basis van een aan de hand van praktijkmetingen geijkt rekenmodel. Hiermee wordt een resultaat verkregen dat representatief is voor de toekomstige situatie.

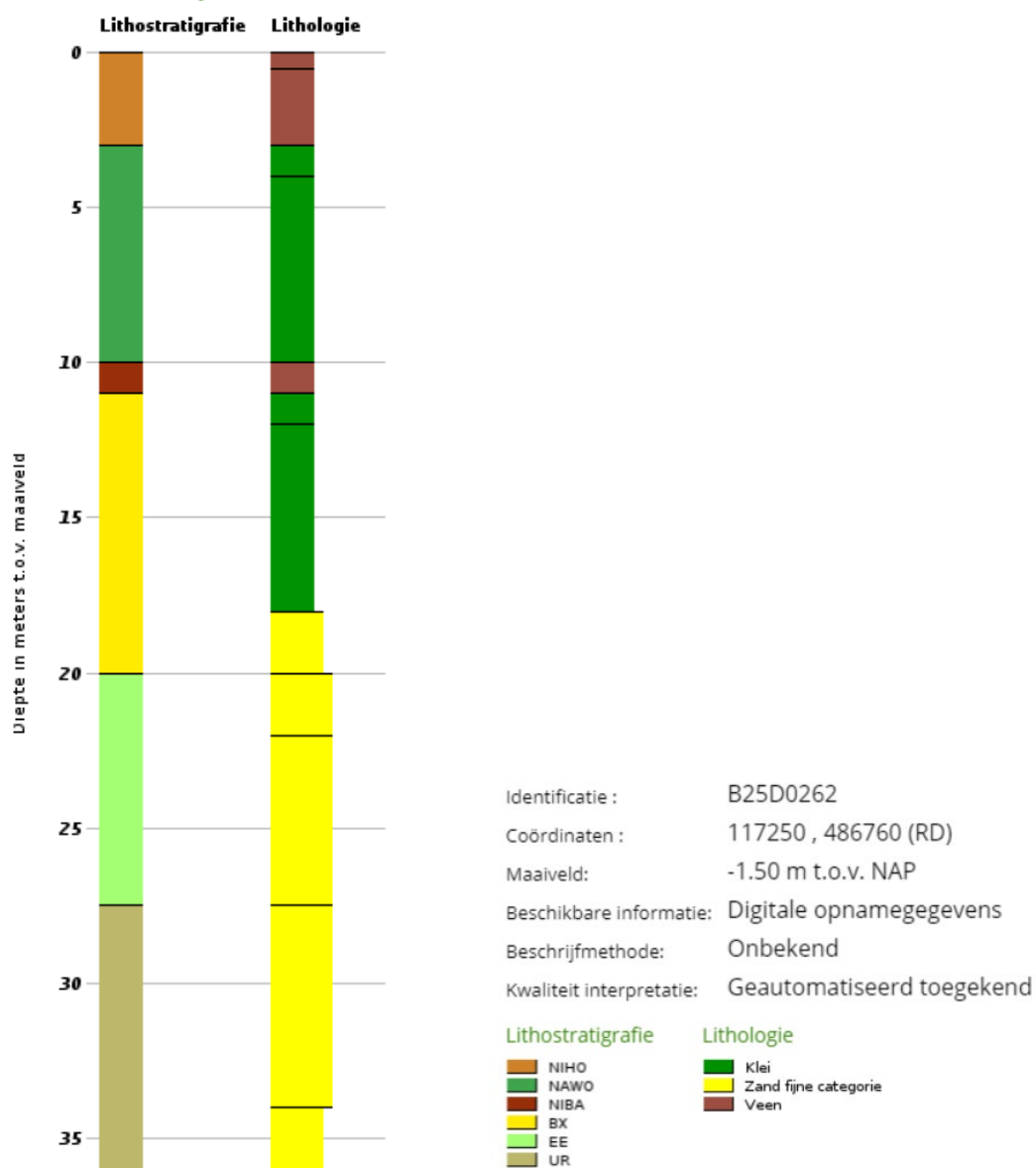
Bovenstaande onzekerheden hebben geen invloed op de conclusies van dit onderzoek: ook wanneer deze onzekerheden worden meegenomen, zijn maatregelen gezien de lage trillingen niet nodig bij conventionele betonbouw. Alleen bij houtskeletbouw zijn constructieve optimalisaties nodig.

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.

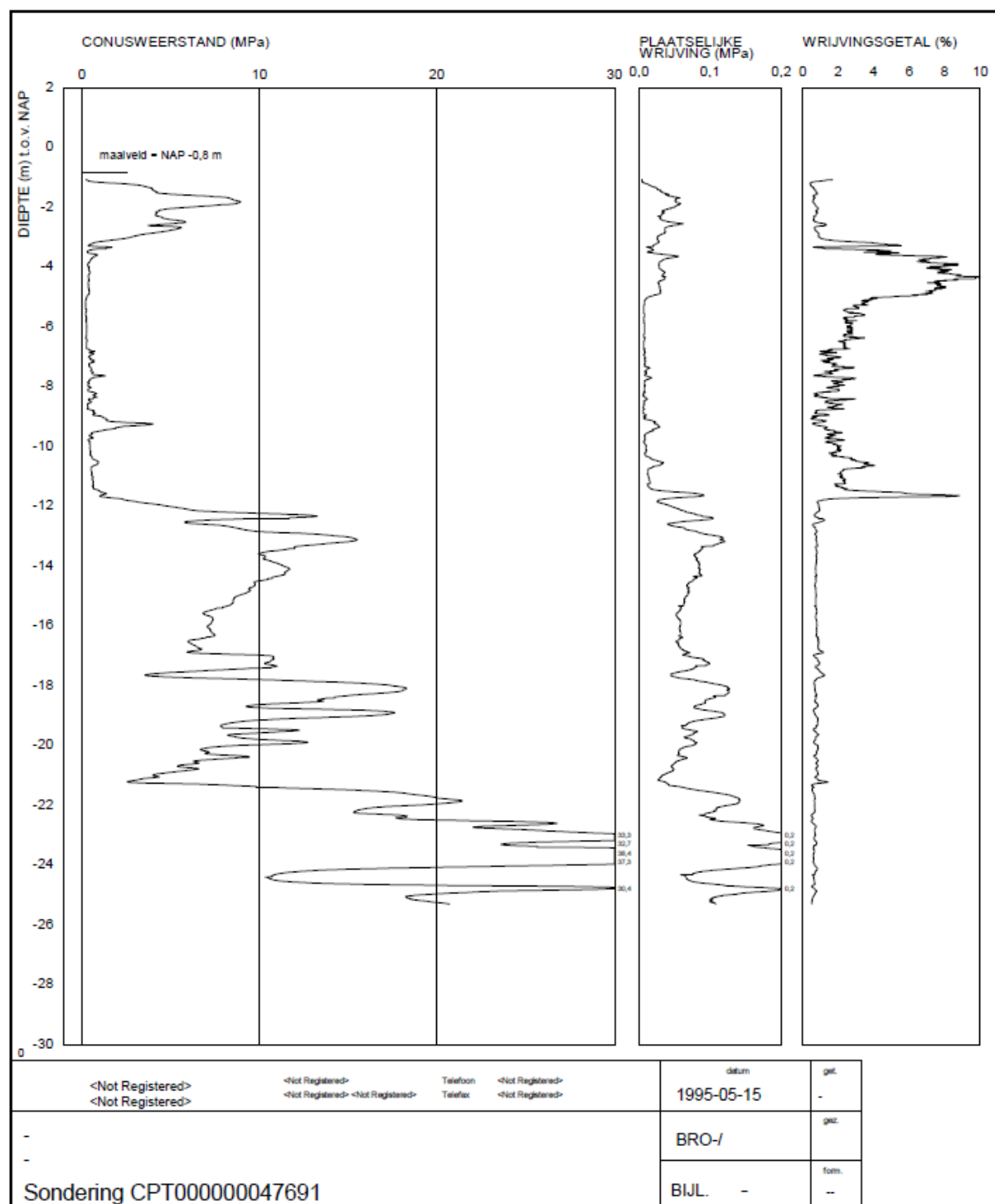
Een grondboring in de nabijheid van het onderzoeksgebied (nr. B25D0262) is weergegeven in Figuur 7. Hier is te zien dat de bodem in de eerste meters is opgebouwd uit slappe veen- en kleilagen, met op grotere diepte ook zandlagen. Door de slappe bodem dempen de trillingen relatief snel uit.

Boormonsterprofiel



Figuur 10 Boring nabij het onderzoeksgebied, B25D0262

Een representatieve sondering uit het onderzoeksgebied, waarin onder meer de conusweerstand te zien is, is weergegeven in Figuur 8.

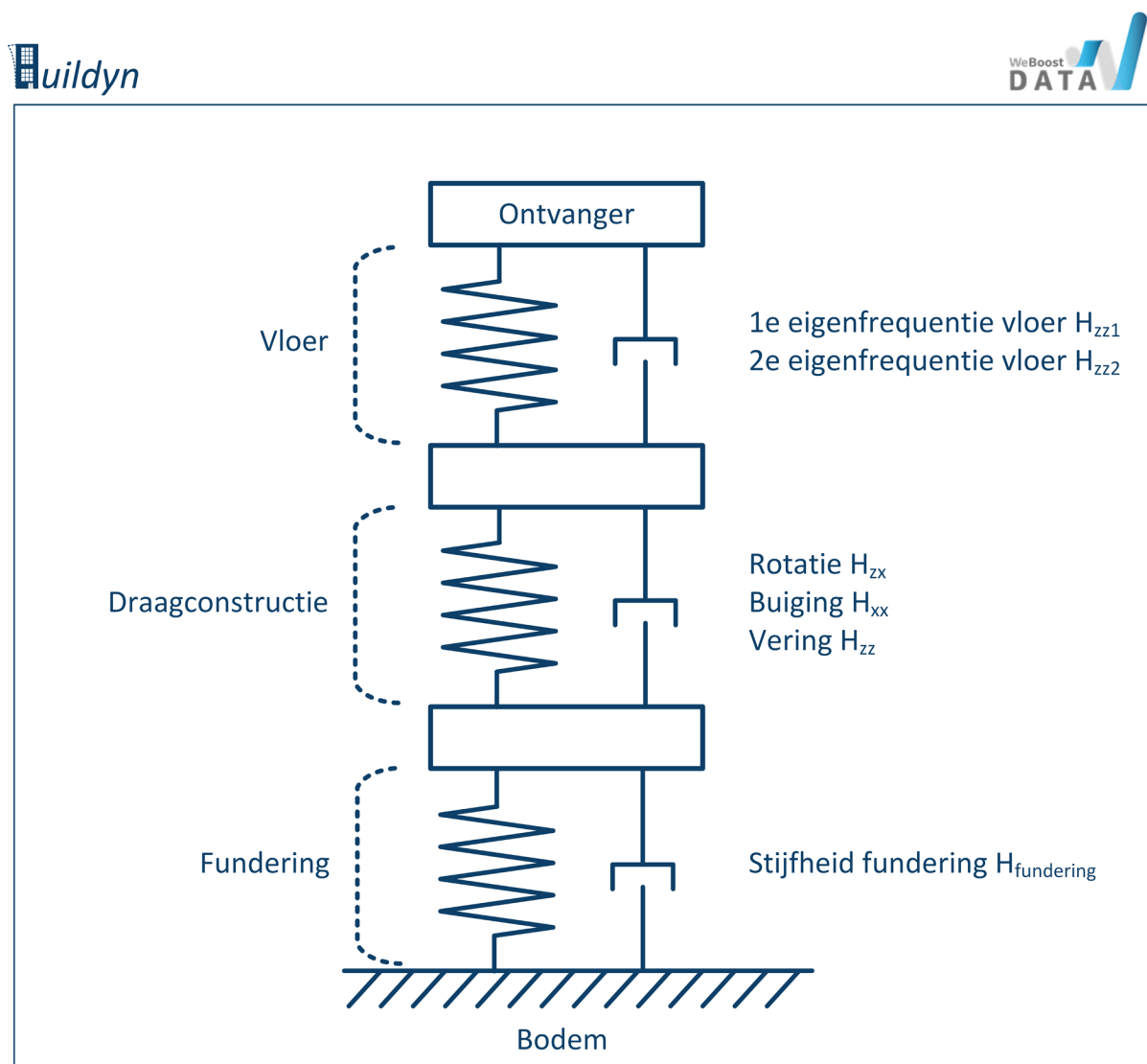


Figuur 11 Sondering nabij het onderzoeksgebied, CPT000000047691

Bijlage rekenmodel Buildyn

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. De resultaten van het model zijn met behulp van een algoritme gemodelleerd op basis van praktijkresultaten (meer dan 200 metingen in gebouwen). Daarmee wordt een nauwkeurigheid verkregen die vaak beter is dan een eindige elementenmodel, omdat de resultaten zo sterk leunen op de praktijk (terwijl een eindige elementenmodel zeer gevoelig is voor de gebruikte input t.a.v. bijv. damping en stijfheden).

In Buildyn wordt een gebouw gemodelleerd door middel van gekoppelde massa-veersystemen, zie Figuur 9. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 9, worden in deze bijlage nader toegelicht.



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

Fundering

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

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

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

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

Draagconstructie

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

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

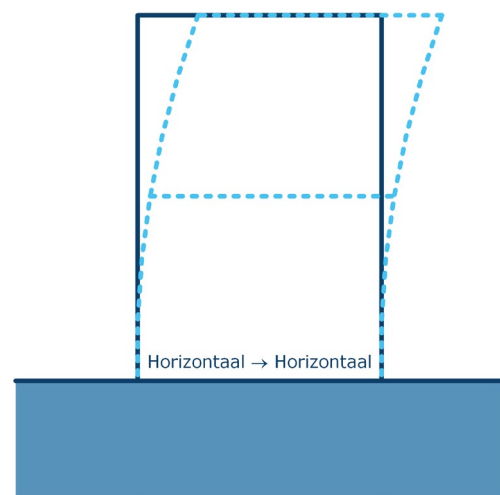
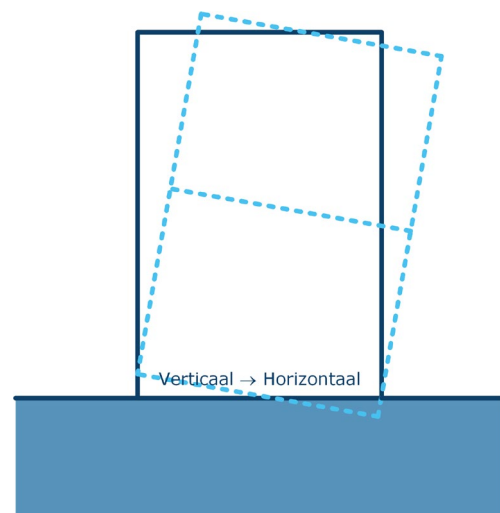
Dit effect noemen we H_{zx} , en is afhankelijk van:

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

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

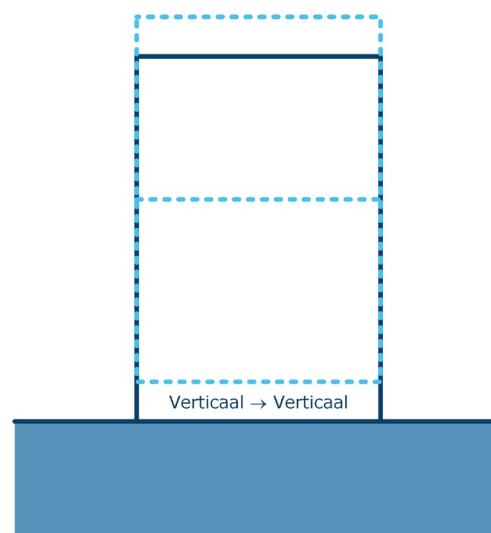
Dit effect noemen we H_{xx} , en is afhankelijk van:

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



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

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



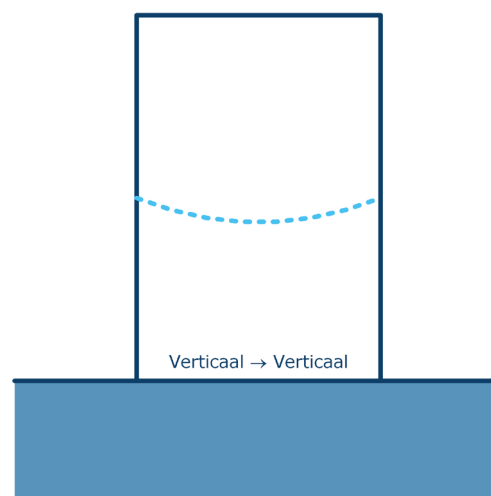
Vloeren

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

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

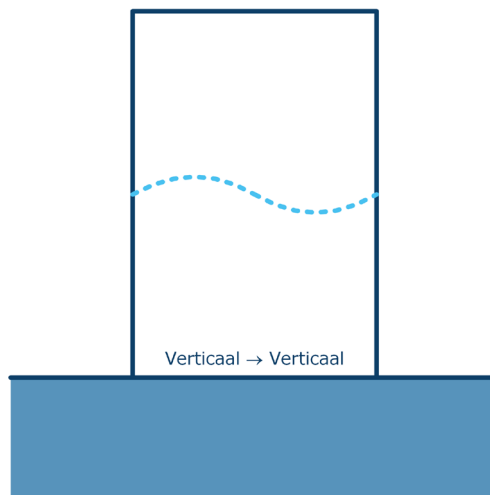
- Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- Afmetingen van de vloer
- Type oplegging



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 prinsipschets rechts.

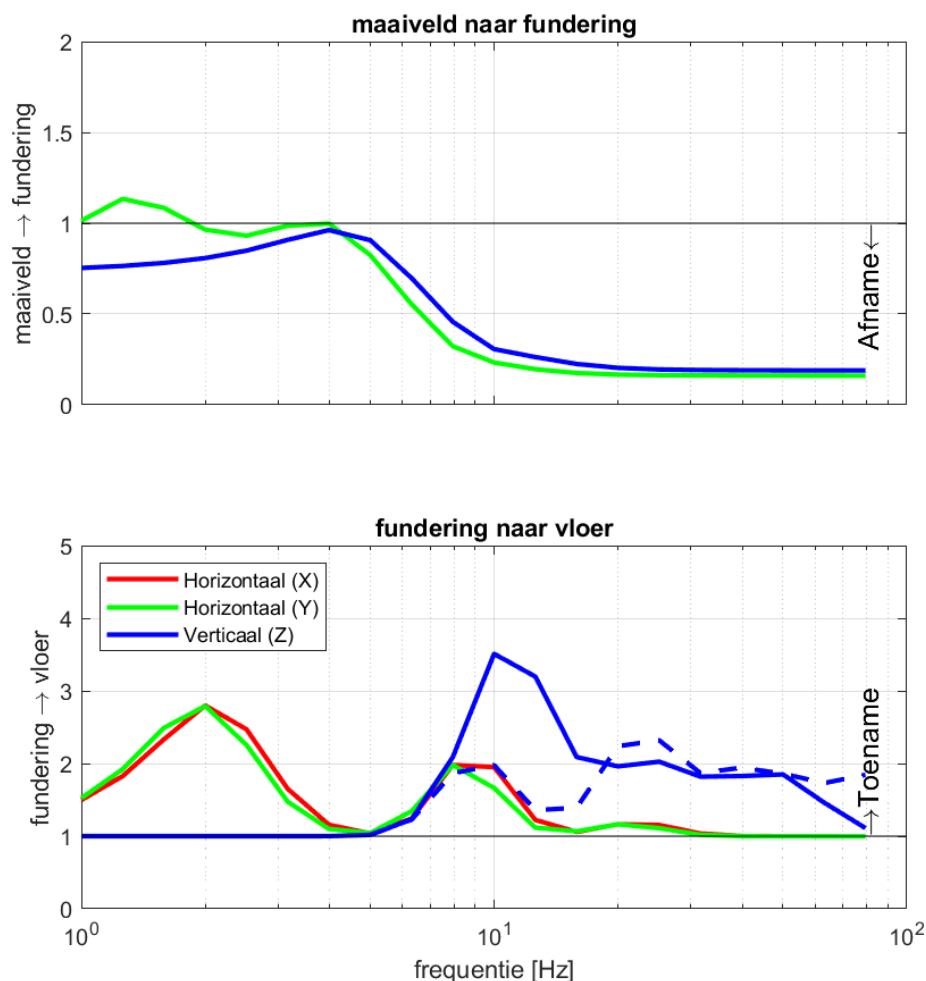
Dit effect noemen we H_{zz2} , en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1} .

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



Resultaten

Ter illustratie zijn de resultaten uit de Buildyn-berekeningen voor een van de doorgerekende varianten weergegeven in Figuur 10.

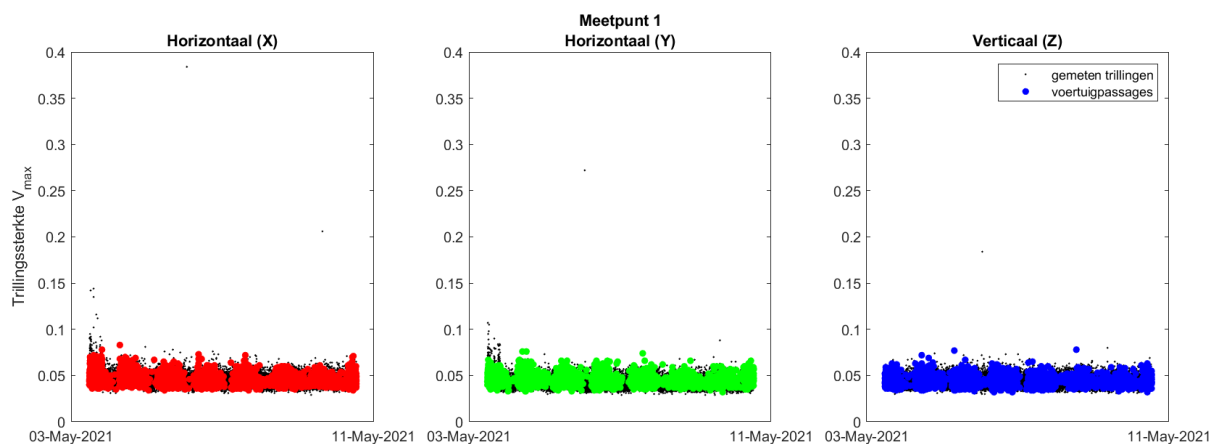


Figuur 13 Buildyn-resultaten voor een appartement op de hoogste verdieping in een van de torens, 200 mm breedplaatvloer en 6 m vloeroverspanning, i.h.w.g. betonnen casco

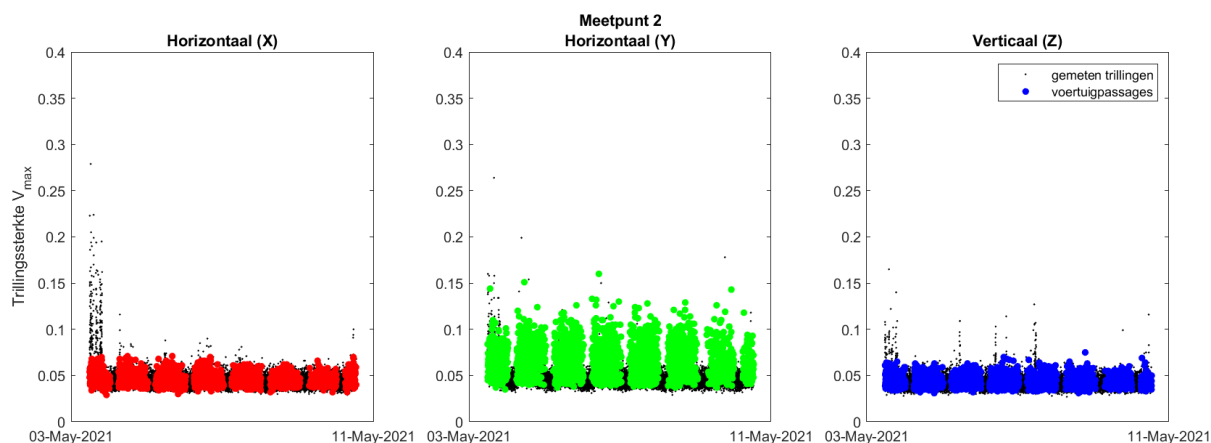


Resultaten metingen

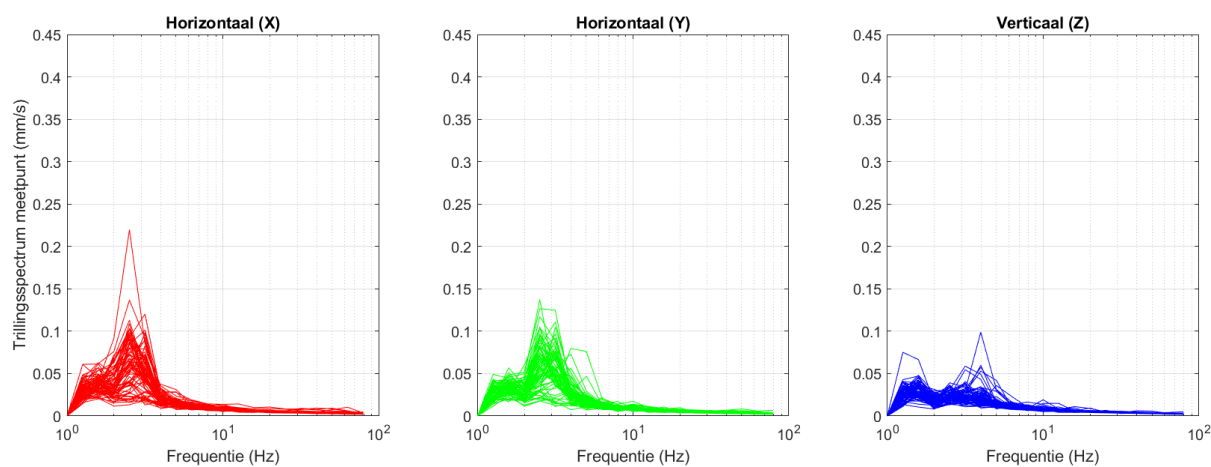
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



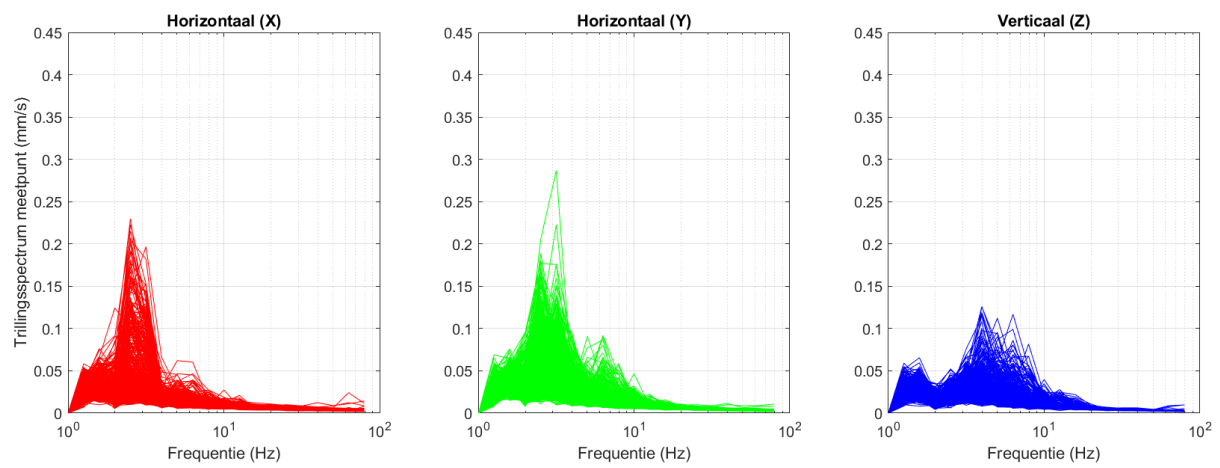
Figuur 14 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (fundering, noordelijke bebouwing)



Figuur 15 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (fundering, zuidelijke bebouwing)



Figuur 16 Tertsbandspectra bij meetpunt 1



Figuur 17 Tertsbandspectra bij meetpunt 2