

DOUMATERREIN RAALTE

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	WBD2021-032
Versienr	1.0
Datum	2 juni 2021
Status	Vrijgegeven
Opdrachtgever	BPD Ontwikkeling B.V.



© 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

Op het voormalige Doumaterrein in Raalte wordt een nieuwe woonwijk gerealiseerd met appartementen en grondgebonden woningen. De geplande nieuwbouw ligt in de nabijheid van de spoorlijn Zwolle – Almelo. 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 voor verschillende stedenbouwkundige uitwerkingen, zodat dit trillingsonderzoek bruikbaar is voor verschillende uitwerkingen.

De belangrijkste bevinding van het onderzoek is dat er geen overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder (de SBR B-richtlijn) worden verwacht in de geplande bebouwing. Door de beperkte rij snelheid (80 km/h) en de lichte reizigerstreinen zijn de trillingen relatief laag. Na doorrekening van varianten met meerdere types afmetingen, constructieve uitwerkingen, vloertypes en afstanden tot het spoor blijkt dat in een conventioneel gerealiseerd gebouw (dus geen grote, open staalconstructies of zeer lichte houtskeletbouw) de trillingen altijd lager zijn dan de streefwaarden voor trillingshinder. Er zijn daarom geen maatregelen of aanpassingen aan de geplande bebouwing nodig om te voldoen aan het beoordelingskader.

Alleen bij zeer lichte houtskeletbouw zijn overschrijdingen van het beoordelingskader mogelijk. Om dan toch te voldoen aan het beoordelingskader zijn bouwkundige optimalisaties nodig. Denk hierbij aan het verzwaren van de vloeren (kortere balkafstand, hogere balken of een kokervloer, d.w.z. een vloer die zowel aan de onderzijde als aan de bovenzijde is afgewerkt met constructief dragend plaatmateriaal). Met deze aanpassingen is ook met zeer lichte houtskeletbouw te voldoen aan het beoordelingskader.

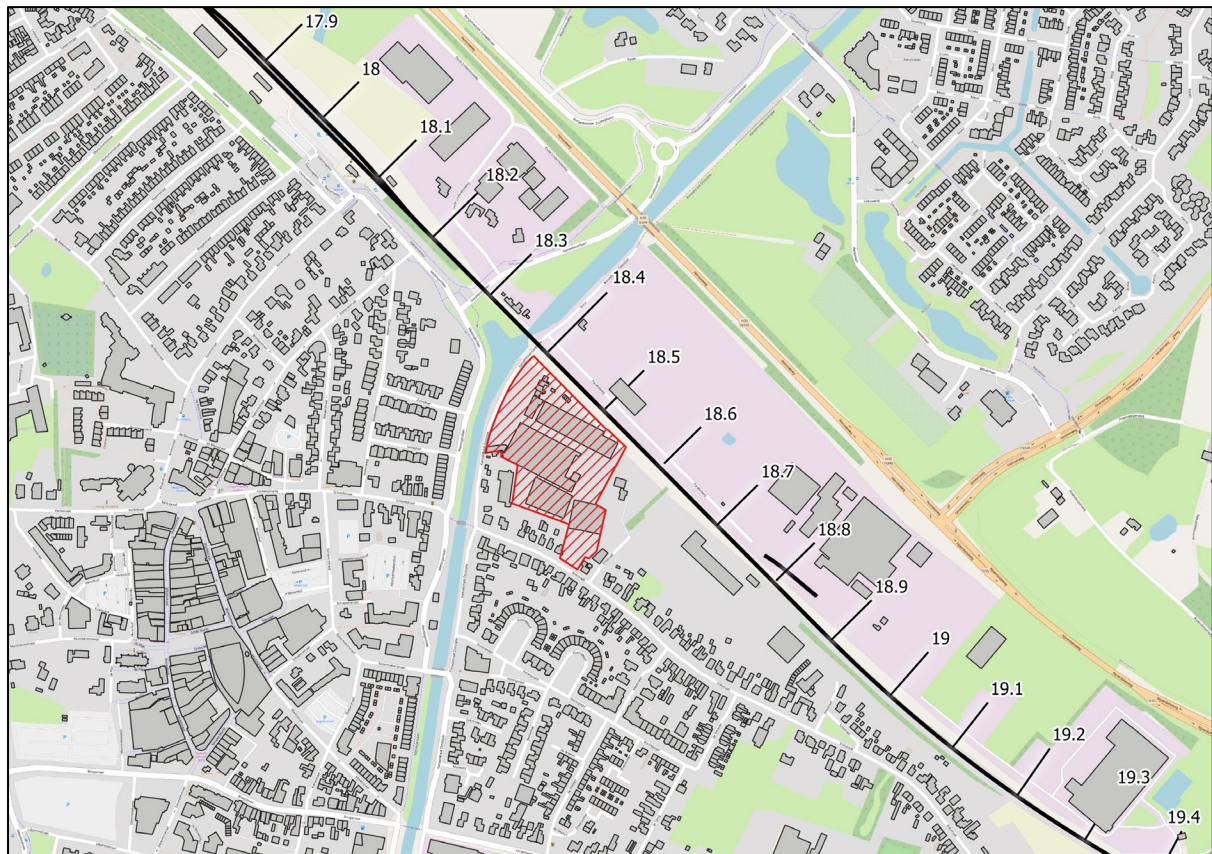
Inhoudsopgave

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	26

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Op het voormalige Doumaterrein in Raalte wordt een nieuwe woonwijk gerealiseerd met appartementen en grondgebonden woningen. De geplande nieuwbouw ligt in de nabijheid van de spoorlijn Zwolle – Almelo, 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 Doumaterrein Raalte

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 woning op basis van de

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

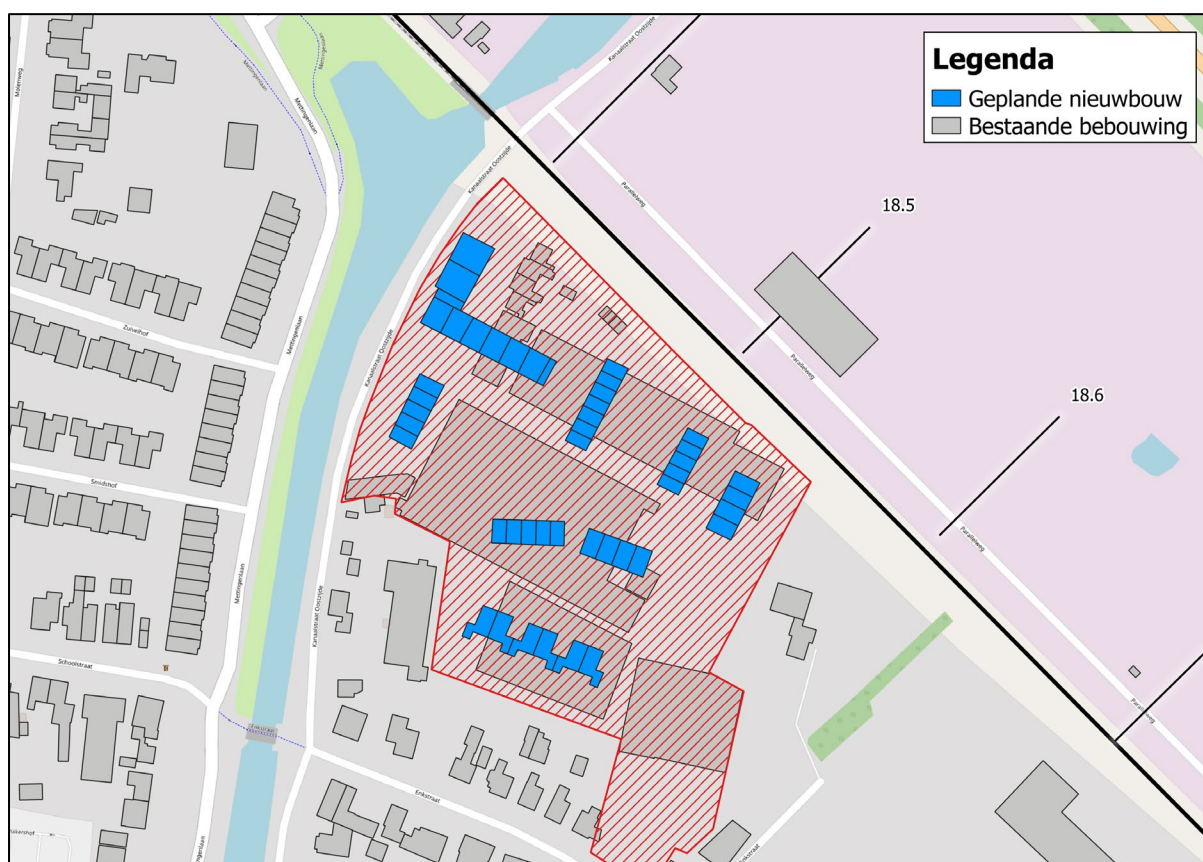
De bijlages bevatten technische informatie van het onderzoek, zoals een toelichting op de rekenmethodiek en grondonderzoek van nabijgelegen locaties.

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

De planlocatie bestaat op dit moment uit een gebied met verschillende soorten bebouwing, met verschillende functies (wonen en industrie). De bestaande bebouwing in het plangebied wordt gesloopt, waarna nieuwbouw wordt gerealiseerd in de vorm van appartementen (max. 6 bouwlagen) en grondgebonden woningen (max. 3 bouwlagen). Er zijn nog meerdere verkavelingsopties, optie 1 is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Bestaande en toekomstige bebouwing conform optie 1

De geplande nieuwbouw bevindt zich in een zone van 25 tot 150 meter van het spoor. De rijsnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. Er rijdt geen structureel goederenverkeer op deze spoorlijn. Er wordt geen verandering in het aantal reizigerstreinen 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	60 – 80 km/h	2.00	2.00	0.88
Intercity	60 – 80 km/h	1.00	0.00	0.00

Andere trillingsbronnen, zoals zwaar vracht- en landbouwverkeer, kan op korte afstand tot de overweg ook 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 appartementen (max. 6 bouwlagen) en grondgebonden woningen (max. 3 bouwlagen) gerealiseerd. Er liggen nog 3 opties voor een verkaveling voor, zie .



Figuur 3 Verkavelingsopties, van links naar rechts optie 1, 2 en 3

Er is op dit moment nog geen ontwerp van de bebouwing uitgewerkt, 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: <ul style="list-style-type: none"> Breedplaatvloeren 200, 250 en 280 mm, met 60 en 70 mm zandcement dekvloer Kanaalplaatvloeren 200 en 260 mm, met 60 en 70 mm zandcement dekvloer Ribbenvloeren Houten vloeren, diverse varianten
Hoogte	Meerdere varianten, 9.0 tot 18.0 meter
Lengte vloerveld	Meerdere varianten, 4.5 tot 11.0 meter
Breedte vloerveld	Meerdere varianten, 9.0 tot 13.0 meter
Constructietype	Meerdere varianten, voor de grondgebonden woningen: <ul style="list-style-type: none"> Prefab beton Kalkzandsteen/metselwerk Houtskeletbouw Voor de appartementen: <ul style="list-style-type: none"> Prefab beton In het werk gestort beton Kalkzandsteen/metselwerk Houtskeletbouw
Fundering	Meerdere varianten, op staal en op palen
Stijfheid gebouwen	Afhankelijk van de variant, betonnen skelet, kalkzandsteen/metselwerk of HSB stabiliteitswanden.

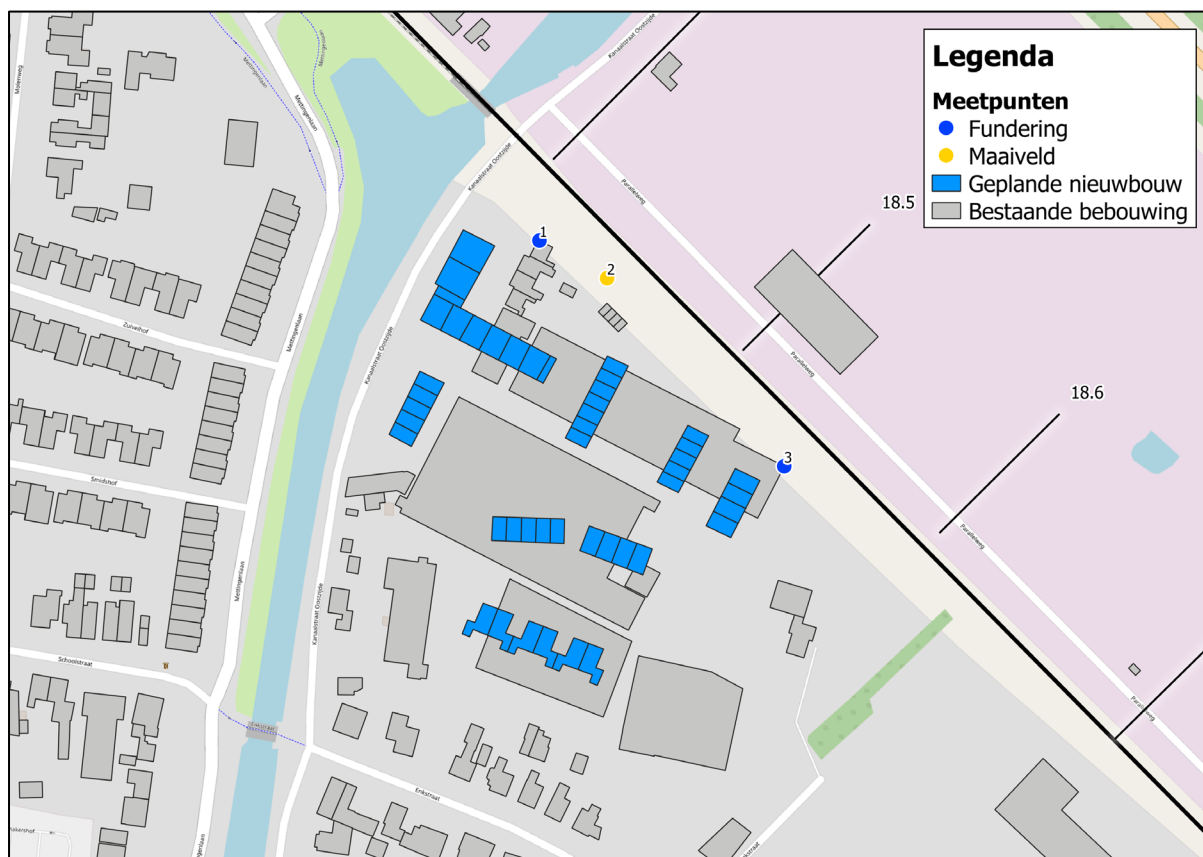
2.2.2 Gegevens ondergrond

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 drie punten, zie Figuur 4. De metingen zijn uitgevoerd van 26 april tot en met 4 mei 2021, en zijn verricht op maaiveld en aan de fundering van de bestaande bebouwing. De meetresultaten uit dit meetonderzoek geven we weer in hoofdstuk 4.



Figuur 4 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.¹

Deze SBR-richtlijn bestaat uit drie delen (deel A – schade in gebouwen, deel B – hinder voor personen in gebouwen en deel C – verstoring van gevoelige apparatuur) waarvan alleen deel B voor dit onderzoek relevant is. De afstand tussen het spoor en 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:

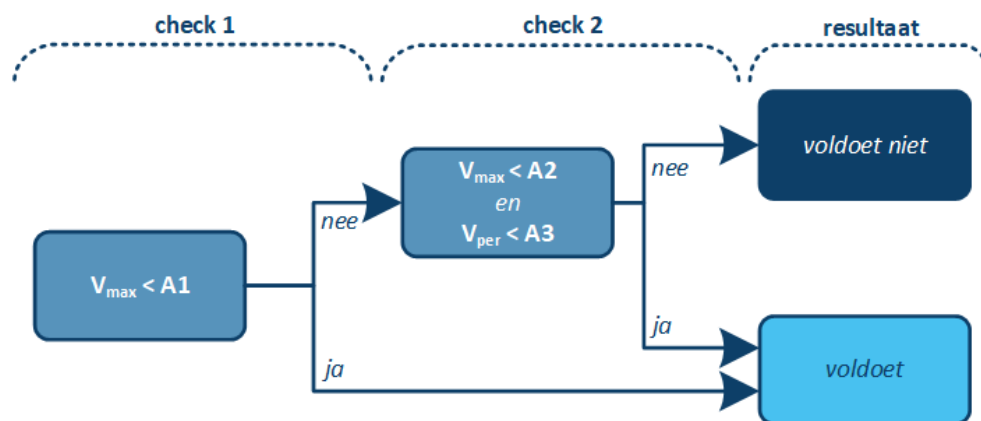
1. De richtlijn toetst zowel een maximaal optredende trillingssterkte (V_{max} , treedt op bij de trein die gedurende de meetperiode de hoogste trillingen veroorzaakt) als het tijdsgemiddelde van de trillingen (V_{per} , deze grootheid is in tegenstelling tot V_{max} dus ook afhankelijk van het aantal 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. In dit plan gaat het uitsluitend om bebouwing met een woonfunctie.

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

- c. De nacht, omdat de meeste hinder vaak in rust wordt ervaren. De streefwaarden voor overdag zijn ca. een factor 2 minder streng dan 's nachts.
3. Een woning kan op twee manieren voldoen aan de richtlijn: de trillingssterkte V_{max} moet lager zijn dan de onderste streefwaarde A1 (zie Tabel 3), óf V_{max} moet lager zijn dan de bovenste streefwaarde A2, waarbij tegelijkertijd de trillingsintensiteit V_{per} lager is dan de streefwaarde A3. Zie ook het schema in Figuur 5.

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 5 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

3.2 Rekenmethode

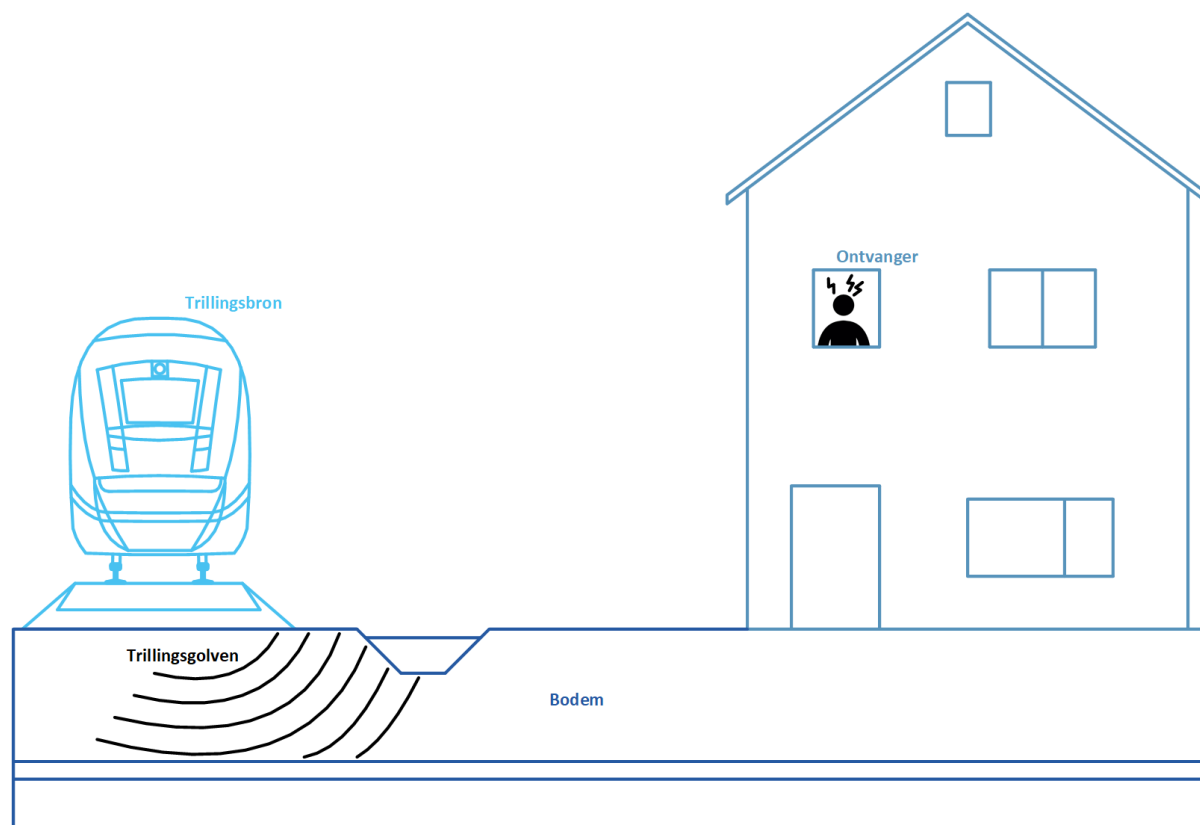
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde gebouwen, wordt op basis van metingen in de omgeving van de bebouwing een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande nieuwe bebouwing. Deze verwachte trillingen 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 6.

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



Figuur 6 Trillingen – het systeem van trillingsbron, de bodem als doorgeefmedium en het gebouw als ontvanger

3.2.2 De trillingsbron

In dit onderzoek zijn treinen de bron van de trillingen. De trillingen van het treinverkeer zijn gemeten door Alcedo op meerdere punten op maaiveld in het plangebied, dichtbij het spoor. 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 zandlagen met verschillende stijfheden, 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, 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.

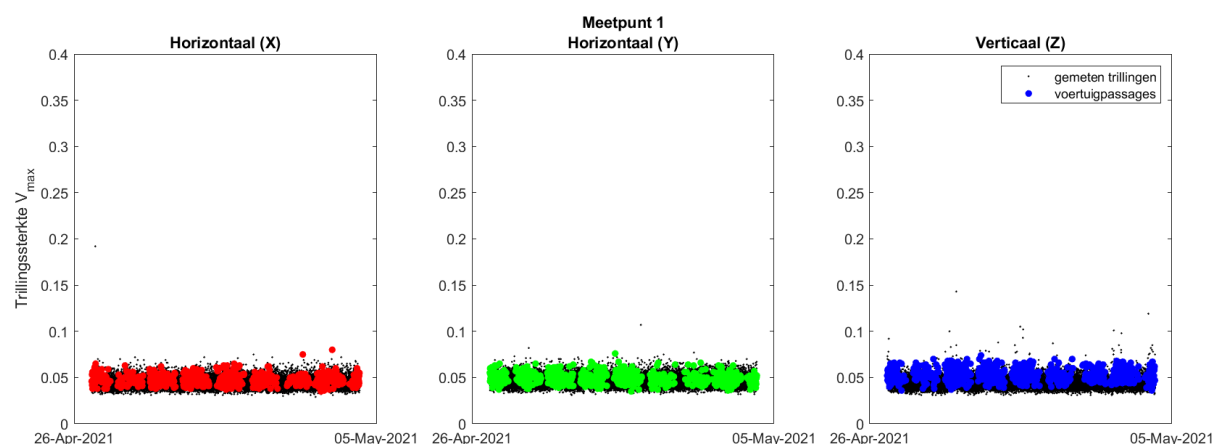
4 Verwachte trillingen in de woningen

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 een bestaand pand en op maaiveld in de nabijheid van de onderzoekslocatie. De trillingen aan de fundering van een bestaande woning (meetpunt 1) zijn weergegeven in Figuur 7. Overige gegevens uit de metingen hebben we opgenomen in bijlage III. In Figuur 7 valt het volgende op:

1. De trillingen zijn vergelijkbaar in alle richtingen.
2. De trillingen van de treinen zijn vergelijkbaar met de achtergrondtrillingen. Dit komt vooral doordat zwaar weg- en landbouwverkeer over de nabijgelegen spoorwegovergang voor hoge trillingen kan zorgen. Dit is vooral zichtbaar bij de verticale trillingen.



Figuur 7 Gemeten trillingen aan fundering bestaand pand (Kanaalstraat Oostzijde 3)

4.2 Trillingen in geplande nieuwbouw

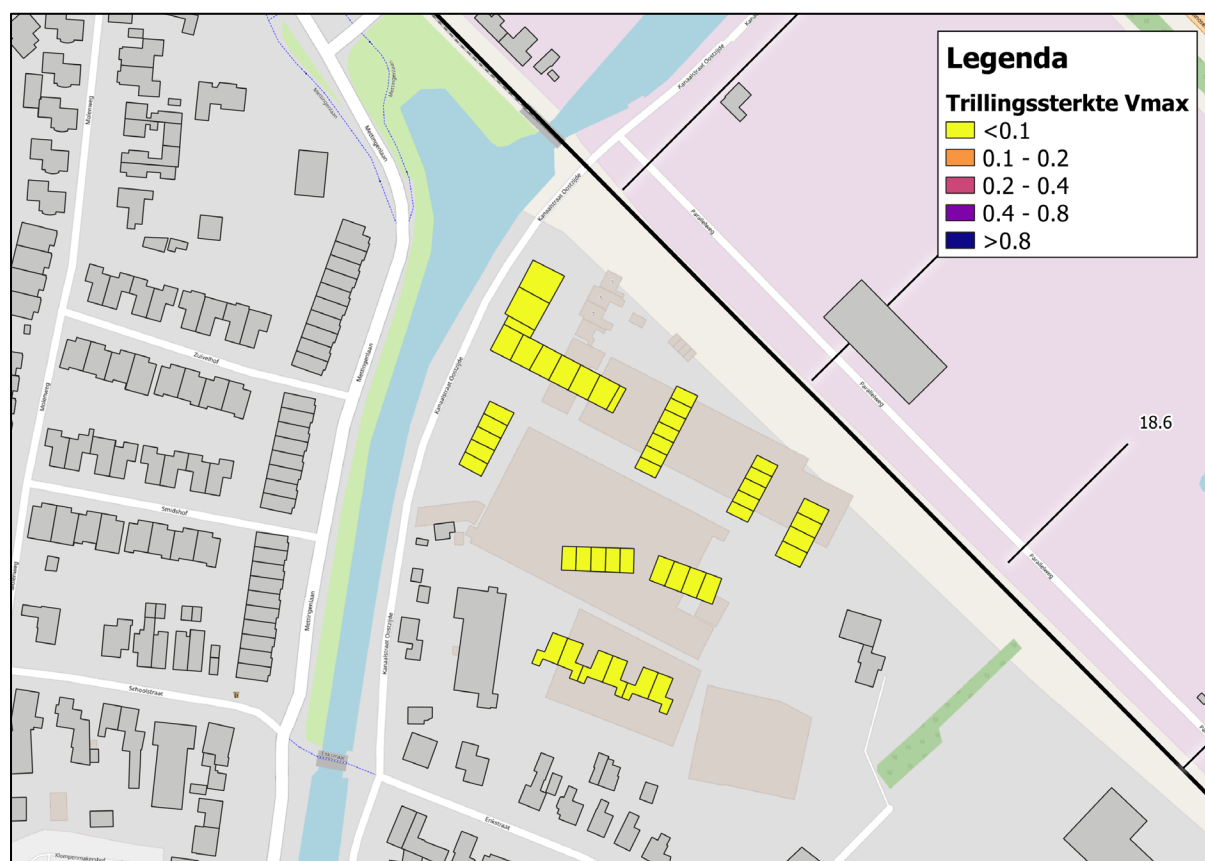
De geplande bebouwing is gemodelleerd op basis van de informatie uit Tabel 2. Het (frequentie-afhankelijke) gedrag van de geplande bebouwing is weergegeven in bijlage II. Met deze resultaten is bepaald in welke mate de trillingen worden versterkt tussen de huidige meetpunten en de vloeren in de toekomstige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

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 per bouwconcept, omdat per bouwconcept meerdere uitwerkingen mogelijk zijn, en de afstanden tot het spoor variëren.

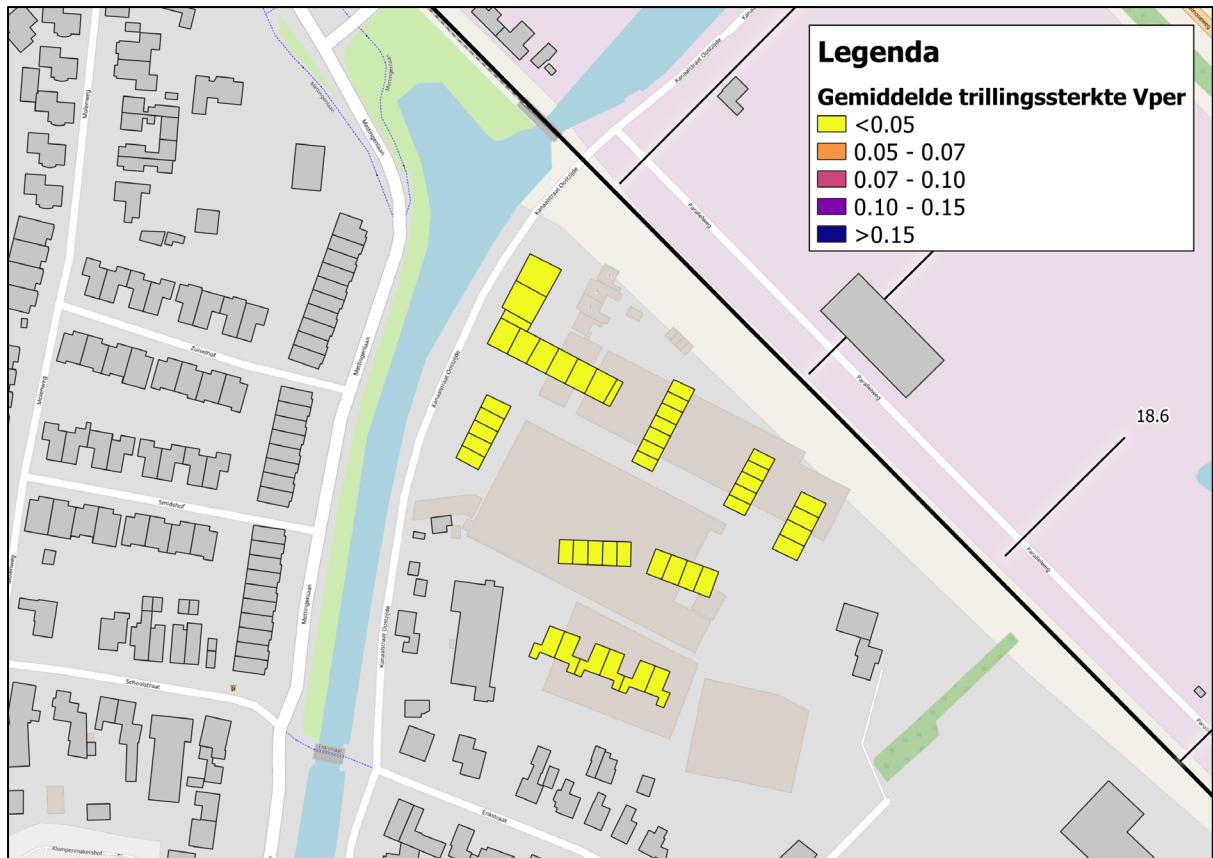
Tabel 4 Trillingen per type bouwconcept en beoordeling op SBR B-richtlijn

Bouwconcept	V_{max}	V_{per}	Beoordeling
Grondgebonden woningen			
Kalkzandsteen, metselwerk en kanaalplaatvloeren	0.0 – 0.1	< 0.01	Voldoet
Prefab beton met breedplaatvloeren	0.0 – 0.1	< 0.01	Voldoet
Houtskeletbouw	0.1 – 0.2	0.01 – 0.02	Voldoet
Appartementen			
Kalkzandsteen, metselwerk en kanaalplaatvloeren	0.1	< 0.01	Voldoet
Prefab beton met breedplaatvloeren	0.1	< 0.01	Voldoet
In het werk gestort beton met breedplaatvloeren	0.1	< 0.01	Voldoet
Houtskeletbouw	0.1 – 0.2	0.01 – 0.02	Voldoet

De resultaten hebben we grafisch weergegeven in Figuur 8 tot en met Figuur 10 voor een conventioneel bouwconcept (betonnen casco met kanaalplaatvloeren voor grondgebonden woningen, in het werk gestort beton met breedplaatvloeren voor appartementen). In de figuren is de bovengrens van de bandbreedte van de verwachte trillingen weergegeven.



Figuur 8 Bovengrens van de trillingssterkte V_{max} voor optie 1, conventioneel bouwconcept



Figuur 9 Bovengrens van de gemiddelde trillingssterkte V_{per} voor optie 1, conventioneel bouwconcept



Figuur 10 Beoordeling van de trillingen voor optie 1, conventioneel bouwconcept

Uit Tabel 4 en de hiervoor weergegeven figuren volgt dat er geen overschrijdingen van de streefwaarden zullen optreden. De trillingen zijn lager dan de streefwaarden, ongeacht de constructieve uitwerking (met uitzondering van zeer lichte houtskelet- of staalbouw). Uit de beschouwde varianten is wel het volgende te zien:

1. De trillingen zijn iets lager bij een constructie met meer dempende materialen:
 - a. Breedplaatvloeren hebben iets lagere trillingen dan kanaalplaatvloeren.
 - b. Constructies met kalkzandsteen en metselwerk hebben iets lagere trillingen dan constructies van beton.
2. Bij houtskeletbouw zijn de trillingen juist iets hoger, ondanks de hogere demping van de materialen. Dit komt door de lichtere constructie, deze wordt gemakkelijker in trilling gebracht. Ook bij houtskeletbouw (uitgezonderd zeer lichte bouw) wordt echter nog voldaan aan het beoordelingskader.
3. De trillingen zijn wat hoger dichtbij de overweg. Omdat hier een appartementengebouw met een grotere massa wordt gerealiseerd, zijn de trillingen ook hier echter nog ruim lager dan de streefwaarden.

Door de beperkte rijnsnelheid (80 km/h) en de lichte reizigerstreinen zijn de trillingen op deze locatie relatief laag, ongeacht het bouwconcept. Er zijn daarom geen maatregelen of aanpassingen aan de geplande bebouwing nodig om te voldoen aan het beoordelingskader. Alleen bij zeer lichte houtskeletbouw zijn overschrijdingen van het beoordelingskader mogelijk. Om dan toch te voldoen aan het beoordelingskader, zijn bouwkundige optimalisaties nodig. Denk hierbij aan het verzwaren van de vloeren (kortere balkafstand, hogere balken of een kokervloer, d.w.z. een vloer die zowel aan de onderzijde als aan de bovenzijde is afgewerkt met constructief dragend plaatmateriaal).

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. Er is op basis van bovenstaande informatie geen reden om te twijfelen aan de representativiteit van de berekeningen voor de toekomstige trillingen. Door te meten op meerdere punten hebben we variaties waar mogelijk meegenomen in de analyse en berekeningen. Met name rond de spoorwegovergang kunnen de trillingen als gevolg van zettingen variëren met de tijd. De trillingen zijn echter ruim lager dan de streefwaarden, zodat ook met een slechtere spoorligging niet zal leiden tot overschrijdingen van de streefwaarden.
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. 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.

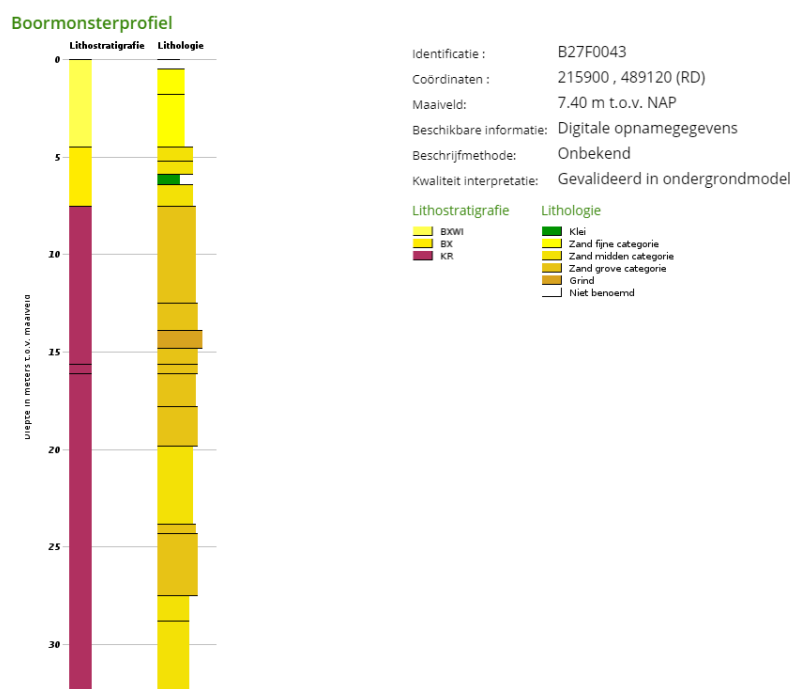
3. Ten aanzien van de gebouwen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en definitief ontwerp). Bovendien is het dynamische gedrag van bijvoorbeeld beton afhankelijk van de mate van gescheurdheid van het beton en zijn er 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.

Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek

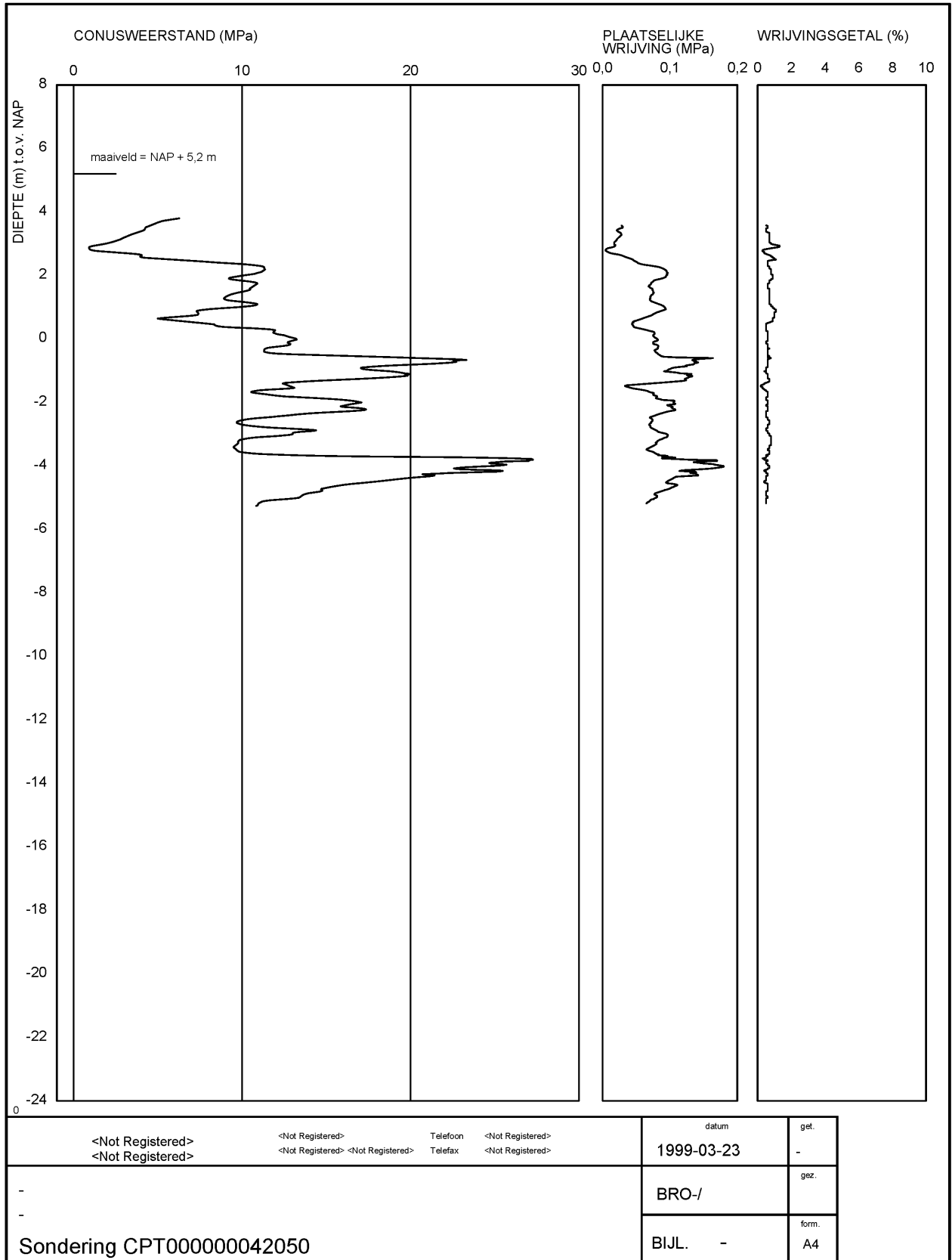
Deze bijlage bevat geotechnische achtergrondinformatie. Deze informatie is gebruikt om bijvoorbeeld de uitdemping van de trillingen met de afstand te bepalen. Daarnaast is deze informatie gebruikt in het rekenmodel waarmee de dynamische eigenschappen van de bebouwing worden bepaald.

Een grondboring in de nabijheid van het onderzoeksgebied (nr. B27F0043) is weergegeven in Figuur 11. Hier is te zien dat de bodem is opgebouwd uit zandlagen met verschillende structuren. Een dergelijke zandige bodem kent vaak een slechte uitdemping van de trillingen met de afstand, hierdoor kunnen trillingen ook op grotere afstand waarneembaar zijn.



Figuur 11 Boring nabij het onderzoeksgebied, B27F0043

Een representatieve sondering uit het onderzoeksgebied, waarin onder meer de conusweerstand te zien is, is weergegeven in Figuur 12.

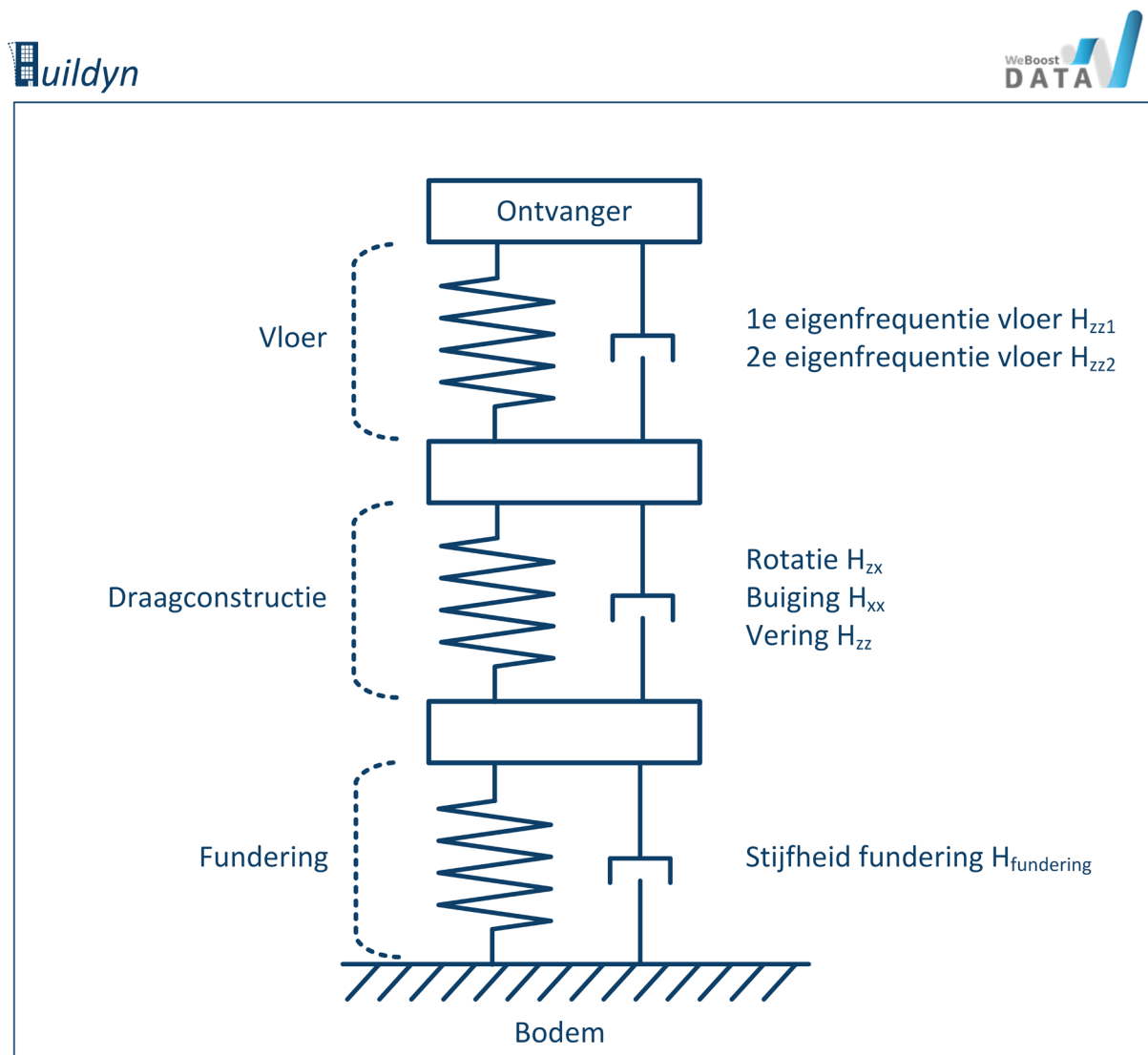


Figur 12 Sondering nabij het onderzoeksgebied, CPT000000042050

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. demping en stijfheden).

In Buildyn wordt een gebouw gemodelleerd door middel van gekoppelde massa-veersystemen, 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.

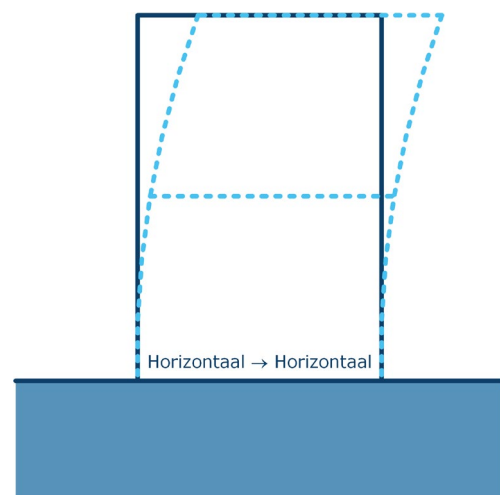
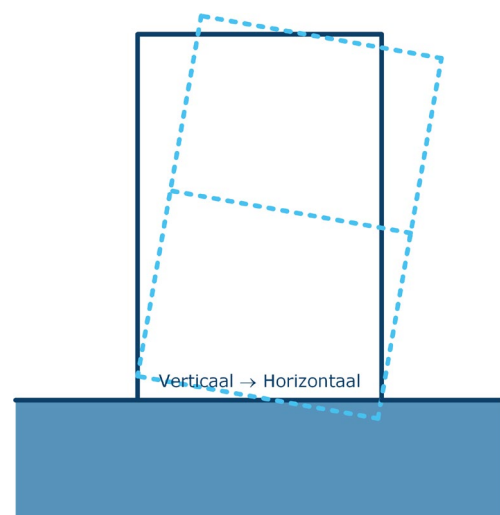
Dit effect noemen we H_{zx} , en is afhankelijk van:

- 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.

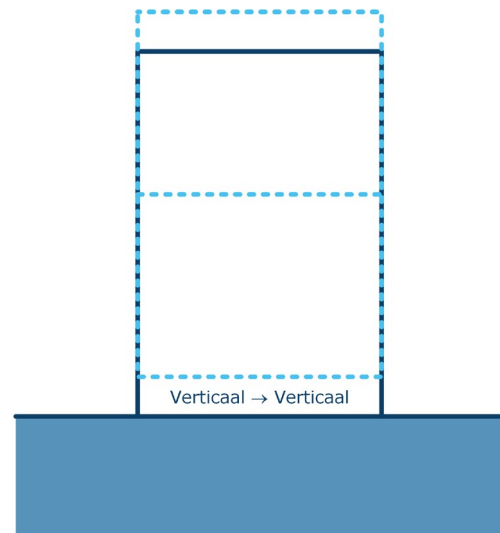
Dit effect noemen we H_{xx} , en is afhankelijk van:

- 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)



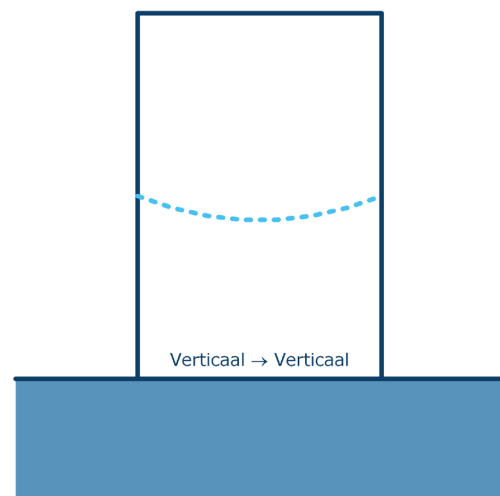
Vloeren

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:

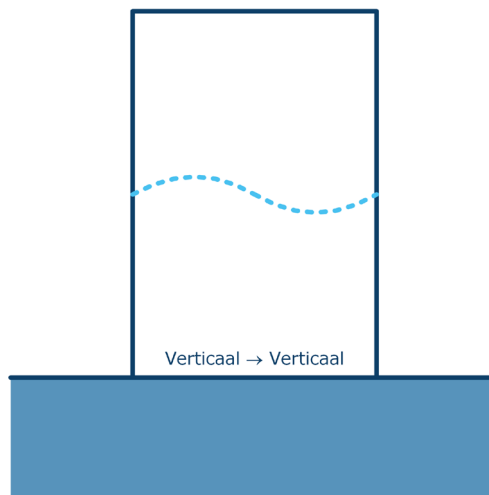
- Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- Afmetingen van de vloer
- Type oplegging



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.

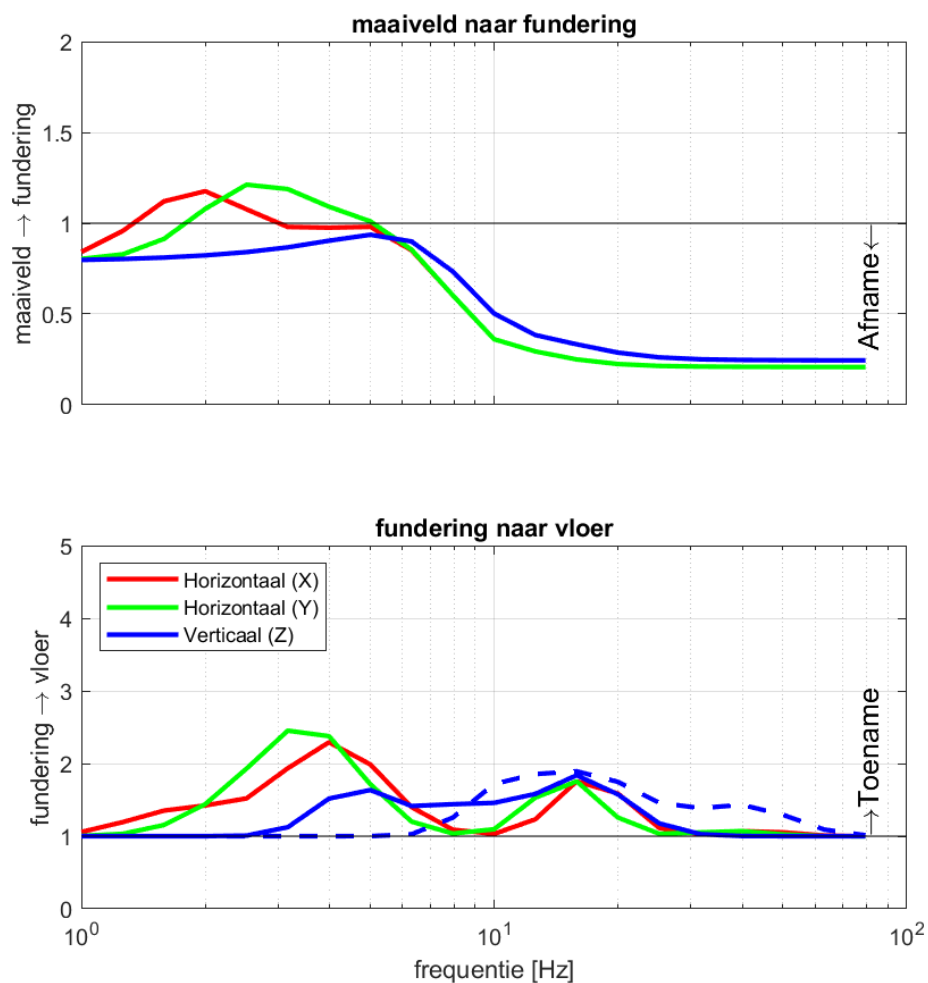
Dit effect noemen we H_{zz2} , en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1} .

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).

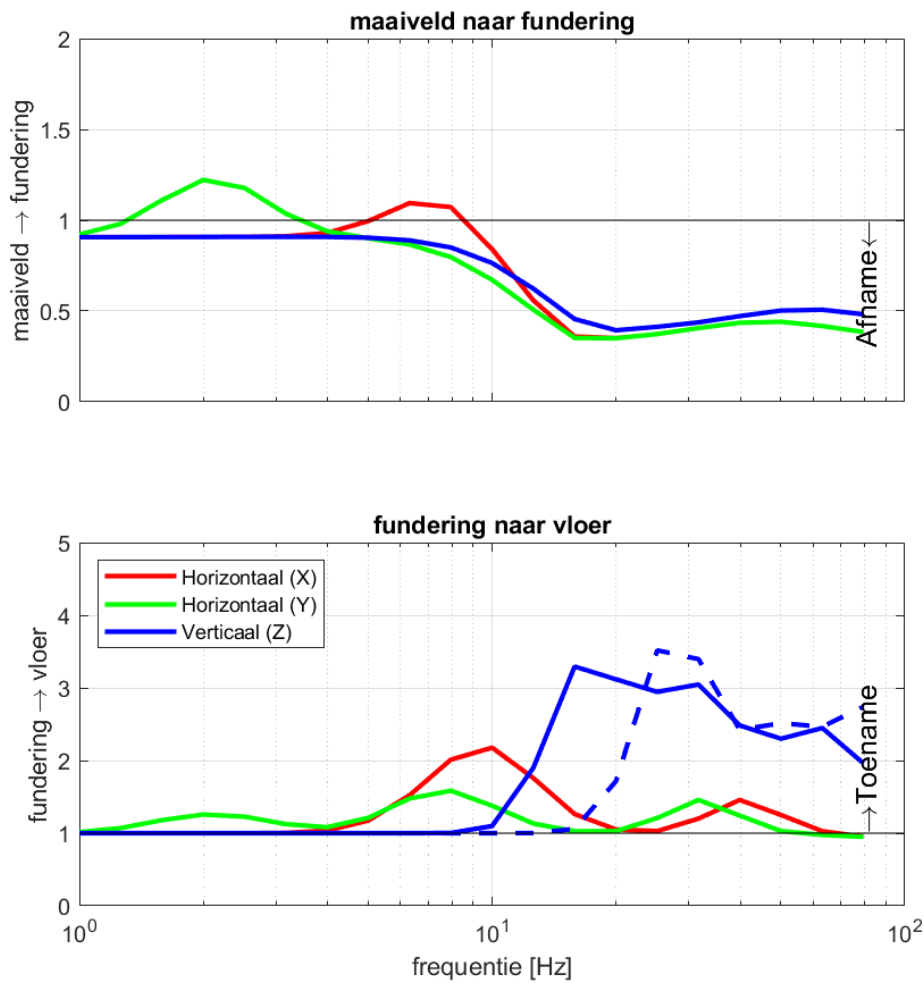


Resultaten

Ter illustratie zijn de resultaten uit de Buildyn-berekeningen voor een van de doorgerekende varianten weergegeven in Figuur 14 en Figuur 15.



Figuur 14 Buildyn-resultaten voor appartementen 18 meter hoog, vloeroverspanning 11 meter, breedplaatvloer 250 mm, afmetingen conform optie 1, casco in het werk gestort beton

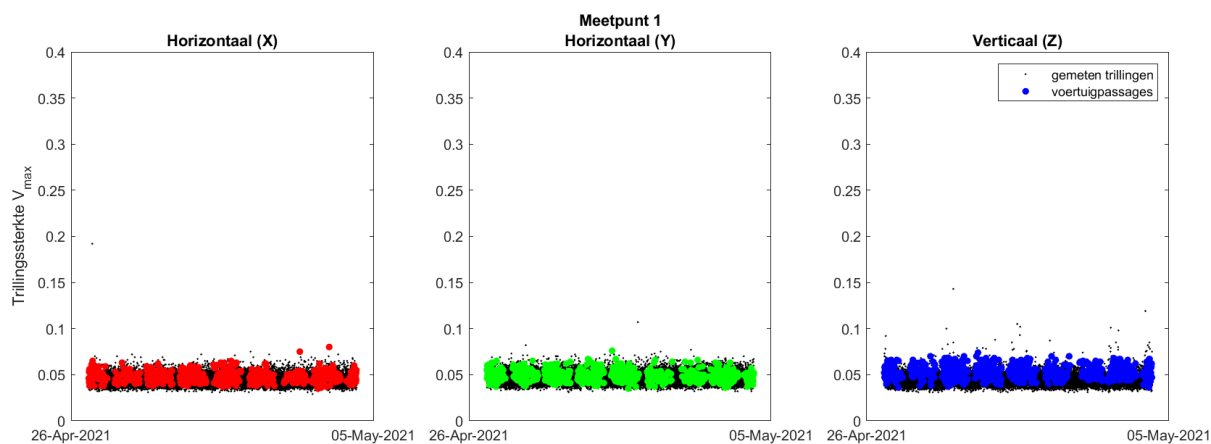


Figuur 15 Buildyn-resultaten voor grondgebonden rijwoningen 9 m hoog, vloeroverspanning 4.8 m, kanaalplaatvloer 200 mm, afmetingen conform optie 1, casco van prefab beton met metselwerk

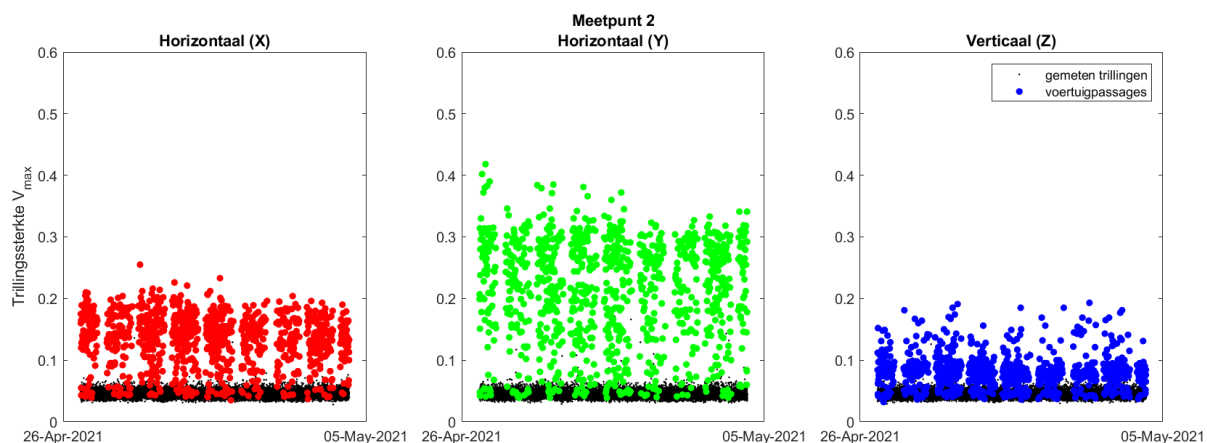


Resultaten metingen

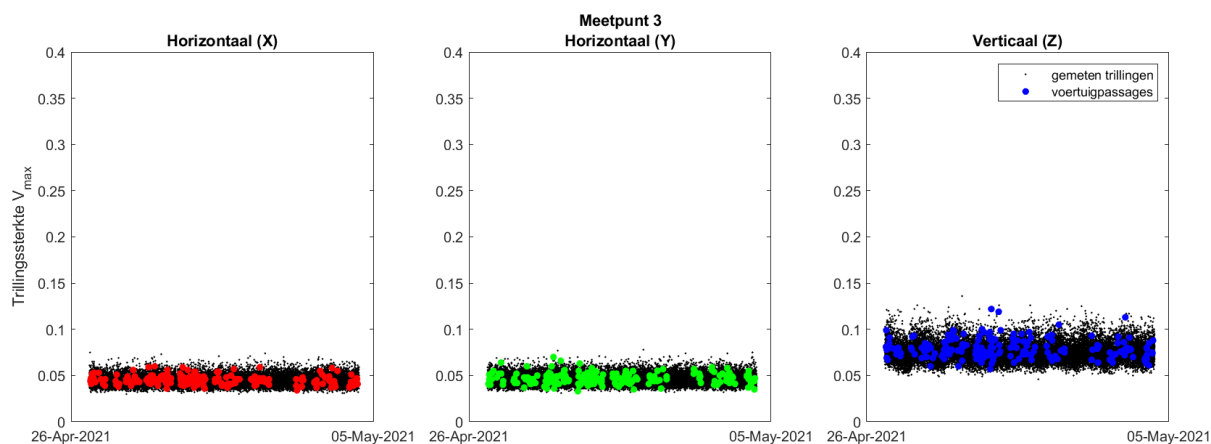
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



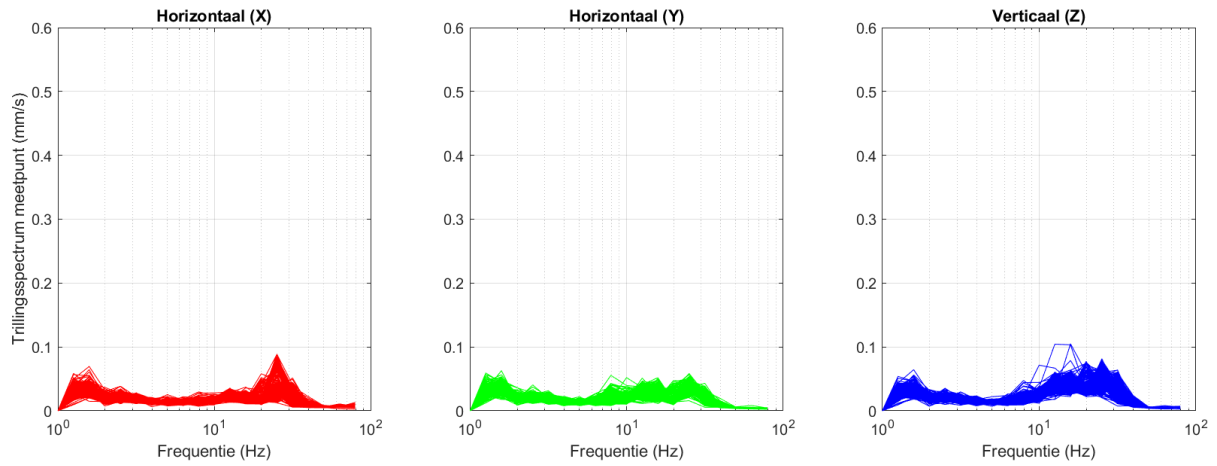
Figuur 16 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (fundering Kanaalstraat Oostzijde 3)



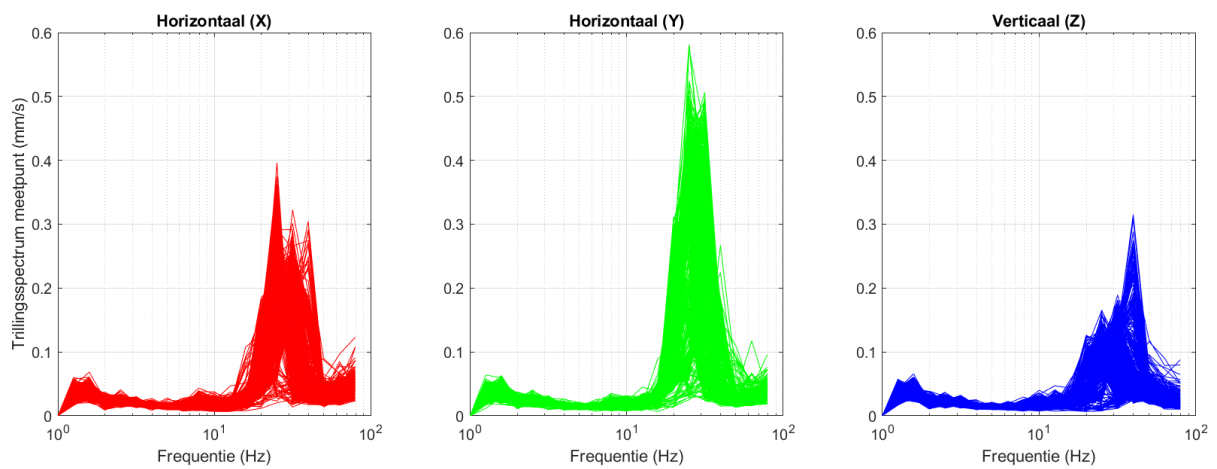
Figuur 17 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (maaiveld)



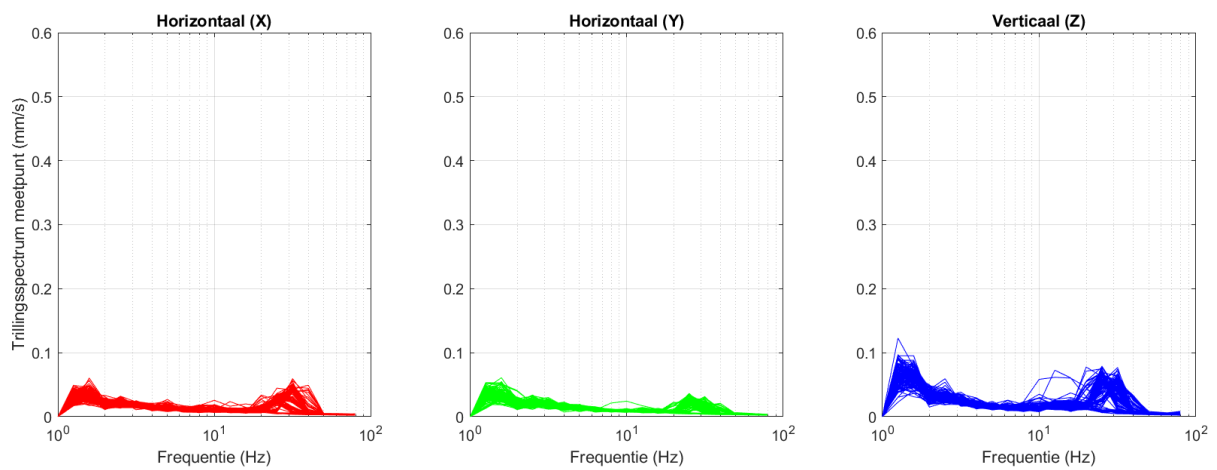
Figuur 18 Gemeten trillingen bij meetpunt 3 (fundering opstal, oostzijde plangebied)



Figuur 19 Tertsbandspectra bij meetpunt 1



Figuur 20 Tertsbandspectra bij meetpunt 2



Figuur 21 Tertsbandspectra bij meetpunt 3