

WEBOOST



TRILLINGSONDERZOEK T.B.V. NIEUWBOUW

STATIONSSTRAAT 26
WEHL

COLOFON

Auteur	Marjolein Hordijk marjolein@we-boost.nl
Controle en vrijgave	Pieter Boon pieter@we-boost.nl +31 6 10 03 94 54
Projectcode	WBD2022-013
Versienr	1.0
Datum	28 april 2022
Status	Definitief



Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van metingen van

ALCEDO 

© We-Boost 2022

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 Stationsstraat in Wehl, ter hoogte van nummer 26, wordt een nieuw kleinschalig appartementencomplex gerealiseerd met acht woningen. De geplande nieuwbouw ligt in de nabijheid van de spoorlijn Zevenaar – Winterswijk – Zutphen. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet op voorhand worden uitgesloten. Doel van het voorliggende onderzoek is om vast te stellen of er sprake zal zijn van trillingshinder in de nieuw te realiseren bebouwing, en zo ja, met welke maatregelen een aanvaardbaar woon- en leefklimaat kan worden gegarandeerd (e.e.a. conform de Wro art. 3.1, wat in wezen niet verandert in de Omgevingswet (art. 4.2)).

In dit onderzoek is met behulp van metingen op de bouwlocatie en modelberekeningen onderzocht wat de trillingen zullen zijn in de toekomstige bebouwing. Hiervoor zijn meerdere constructieve uitwerkingsvarianten onderzocht, passend binnen het schetsontwerp, zodat dit trillingsonderzoek bruikbaar is voor verschillende constructieve uitwerkingen. Hierbij volgen we de aanpak zoals voorgeschreven in de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

CONCLUSIES

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 rijsnelheid (maximaal 70 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.

Tenslotte, hoewel niet kwantitatief beschouwd in dit rapport, zien we uit de metingen dat wegverkeer voor hoge trillingen kan zorgen. Om hinderlijke trillingen van wegverkeer te vermijden, adviseren we om lichte houtskeletbouw te vermijden, en om de eigenfrequenties van vloeren lager te laten zijn dan 10 Hz. In de praktijk betekent dit dat de overspanning van de vloer bij een vloerdikte van 200 mm groter moet zijn dan 6.5 meter, bij een vloerdikte van 260 mm groter dan 7.5 meter en bij een vloerdikte van 320 mm groter dan 8.5 meter. Door die adviezen te volgen, wordt de kans op hinderlijke trillingen van wegverkeer sterk verminderd.

INHOUDSOPGAVE

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

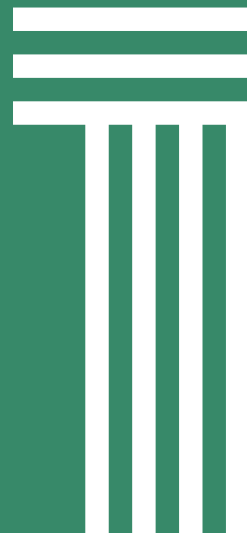




INLEIDING



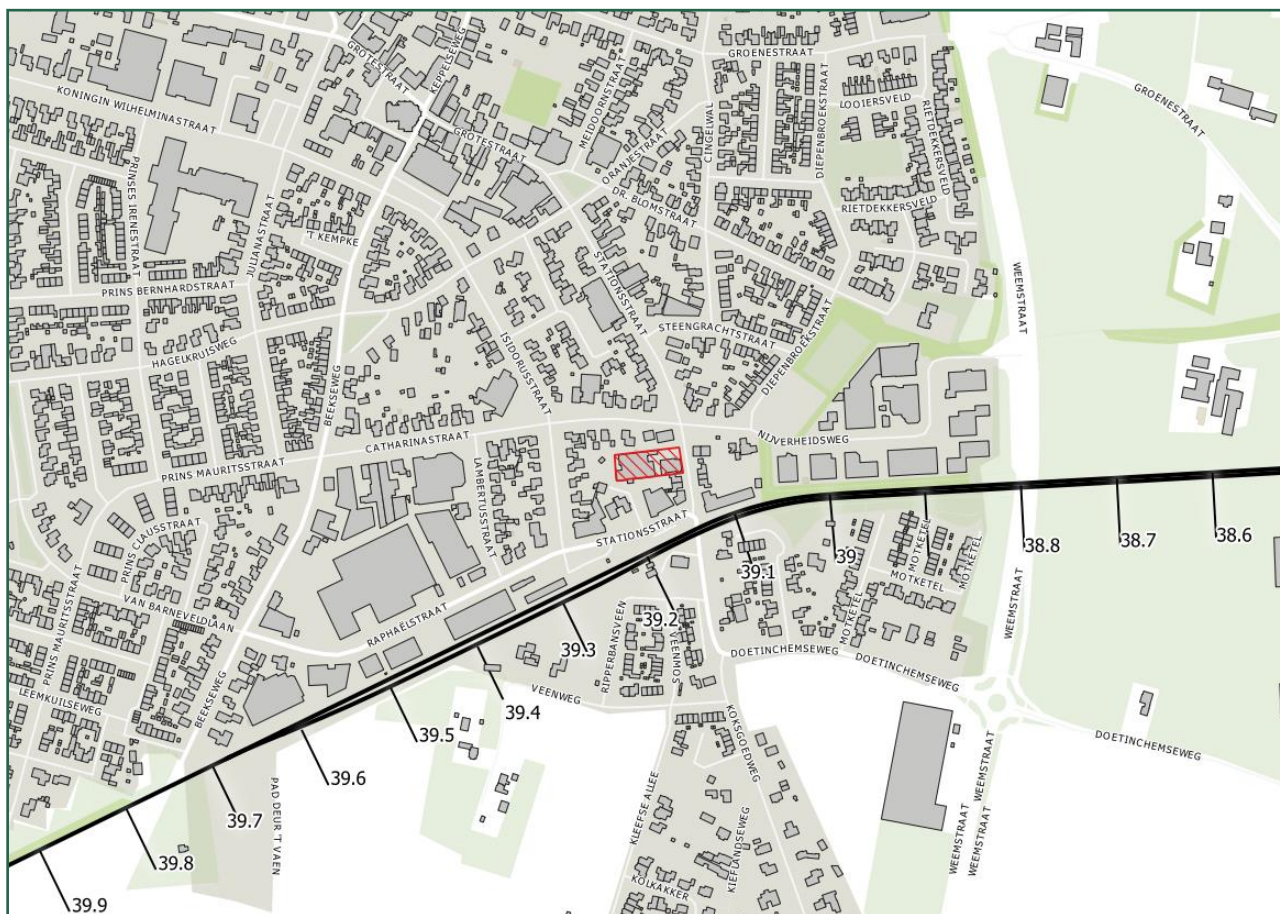
In dit hoofdstuk geven we een korte omschrijving van de inhoud van dit onderzoek: de aanleiding, het doel van het onderzoek en een beknopte leeswijzer om informatie snel te kunnen vinden.



INLEIDING

1.1. AANLEIDING

Aan de Stationsstraat in Wehl, ter hoogte van nummer 26, wordt een nieuw kleinschalig appartementencomplex gerealiseerd met acht woningen. De geplande nieuwbouw ligt in de nabijheid van de spoorlijn Zevenaar – Winterswijk - Zutphen, zie Figuur 1. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet op voorhand worden uitgesloten. Daarom is er een onderzoek naar trillingshinder in de geplande bebouwing uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn te vinden in dit rapport.



Figuur 1 Plangebied

1.2. DOEL

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

1.3. LEESWIJZER

Wij beschrijven de situatie in het onderzoeksgebied en de uitgangspunten in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 lichten we het beoordelingskader en de gevolgde rekenmethodiek toe. Met behulp

van deze 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 bodemonderzoek van nabijgelegen locaties.





SITUATIEBESCHRIJVING



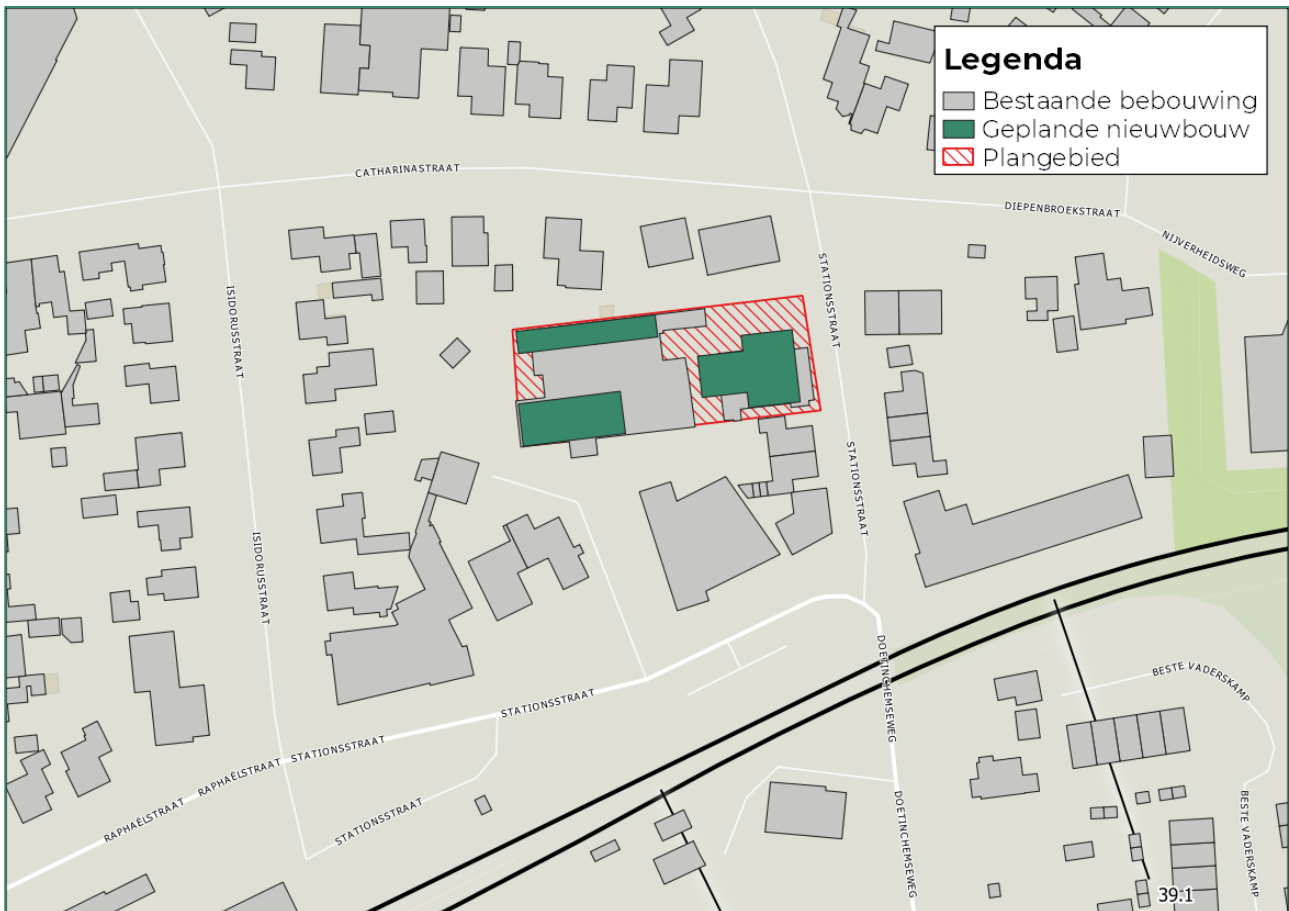
In dit hoofdstuk wordt een toelichting gegeven op de beoogde toekomstige situatie en worden de uitgangspunten van het onderzoek weergegeven.



2.1. SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN

2.1. SITUATIE

De planlocatie bestaat op dit moment uit een gebied met verschillende functies (wonen en industrie). De bestaande bebouwing in het plangebied wordt gesloopt, waarna nieuwbouw wordt gerealiseerd in de vorm van appartementen (maximaal 3 bouwlagen) en bijbehorende opstallen. De bestaande en geplande bebouwing is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Bestaande en geplande bebouwing op de planlocatie

Het geplande appartementencomplex bevindt zich in een zone van 60 tot 80 meter van het spoor. De rijsnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. De gegevens in Tabel 1 zijn gebaseerd op het Geluidsregister Spoor en gegevens van de vervoerders. Er rijdt geen structureel goederenverkeer op deze spoorlijn. Er wordt geen verandering in het aantal treinen voorzien.

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

Type trein	Rijsnelheid	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Sprinter	40 - 70 km/h	4.00	2.25	1.00

Andere trillingsbronnen, zoals zwaar vracht- en landbouwverkeer over de Stationsstraat, kan ook voor voelbare trillingen zorgen, maar is niet nader kwantitatief beschouwd in dit onderzoek. In de metingen zijn deze passages wel vastgesteld.

2.2. UITGANGSPUNTEN

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

2.2.1. GEGEVENS BEBOUWING

Er is nog geen definitief ontwerp van de bebouwing beschikbaar. Voor het uitvoeren van de berekeningen is daarom een aantal varianten doorgerekend, passend binnen de beschikbare schetsuitwerking, zodat dit rapport bruikbaar is voor verschillende constructieve uitwerkingen. Zo hebben we verschillende constructiewijzen en vloertypes doorgerekend, zodat we robuuste uitspraken kunnen doen over de verwachte trillingen. In Tabel 2 zijn de beschouwde constructievarianten weergegeven. Het rekenmodel voor de bebouwing is hierop gebaseerd.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Diverse varianten: • Kanaalplaatvloer 200, 260 en 320, met 70 mm zandcement dekvloer • Breedplaatvloer 200, 250 en 320 mm, met 70 mm zandcement dekvloer • Houten vloer, 300x100 en 275x75, hoh 400 mm
Hoogte	6.0 tot 9.0 meter
Lengte vloerveld	5.00 tot 8.00 meter
Breedte vloerveld	11.0 meter
Constructietype	Diverse varianten: • Kalkzandsteen en metselwerk • Prefab of i.h.w.g. beton (wanden, balken en kolommen) • Houtskeletbouw
Fundering	Op staal en op palen

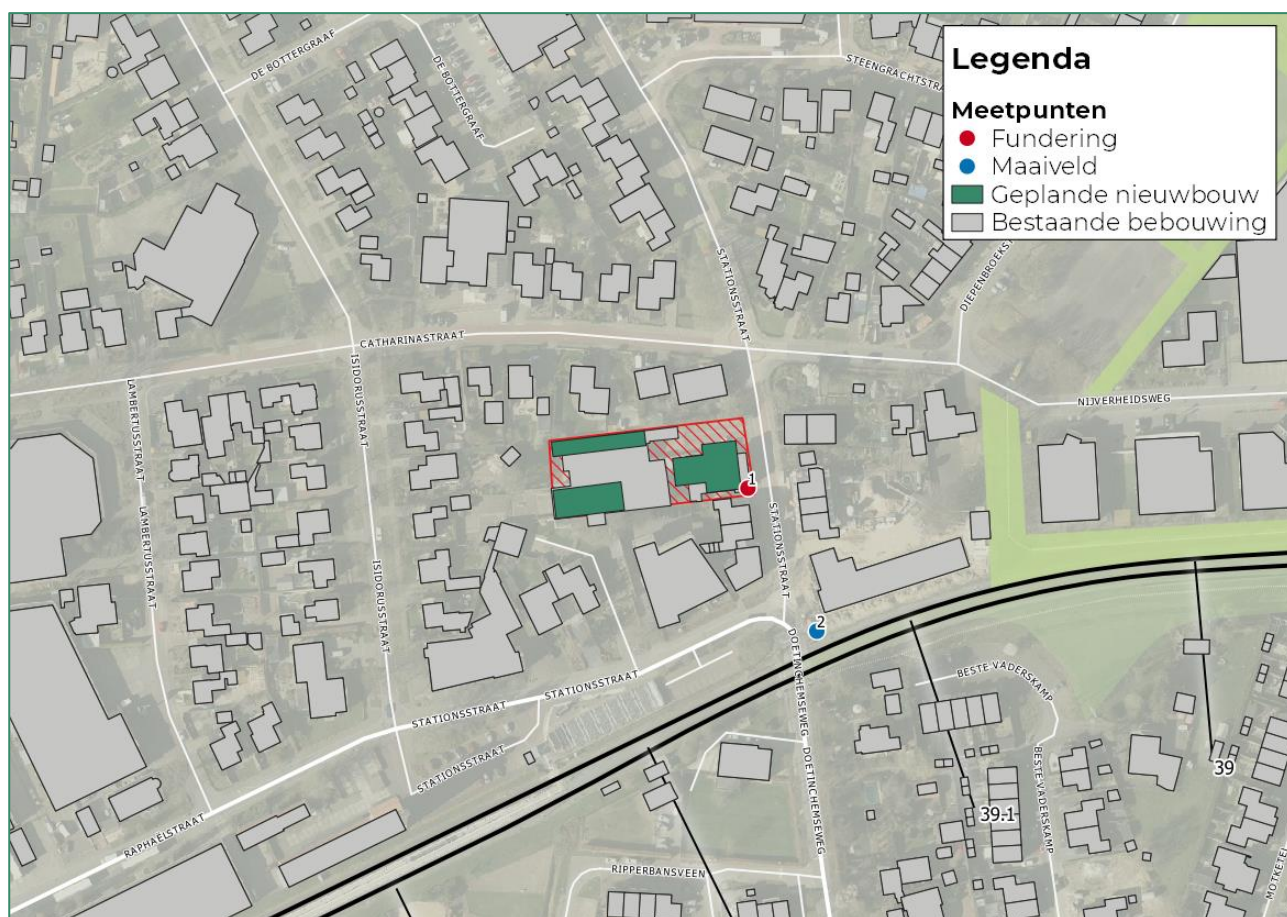
2.2.2. GEGEVENS ONDERGROND

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

2.2.3. MEETRESULTATEN

Zoals te zien in Figuur 3 zijn door Alcedo op twee locaties metingen uitgevoerd. De metingen zijn uitgevoerd van 8 tot en met 19 april 2022, en zijn verricht op maaiveld nabij het spoor en aan de fundering van de bestaande bebouwing.





Figuur 3 Meetpunten



BEOORDELINGSKADER



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



BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE

3.1. TRILLINGEN EN WETGEVING

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

Per 1 januari 2023 wordt de Omgevingswet (Ow) naar verwachting van kracht. Ook in de Ow zijn geen streef- en grenswaarden opgenomen voor trillingen afkomstig van hoofd- en spoorwegen. Het begrip 'goede ruimtelijke ordening' uit de Wro art. 3.1 is in de Ow vervangen door het begrip 'evenwichtige toedeling van functies aan locaties', art. 4.2. Vanuit dit artikel moet ook in het kader van een omgevingsplan onder de Ow trillingshinder (waar relevant) in kaart worden gebracht en betrokken worden bij de afweging in het kader van het beschermen van de fysieke leefomgeving. Net als onder de Wro zijn hulpmiddelen als de Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen en de SBR-richtlijn van toepassing om mogelijke trillingshinder in kaart te brengen respectievelijk te beoordelen.

3.2. DE SBR-RICHTLIJN

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

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

1. De richtlijn toetst zowel een maximaal optredende trillingssterkte (V_{max} , treedt op bij de trein die gedurende de meetperiode de hoogste trillingen veroorzaakt) als het tijdsgemiddelde van de trillingen (V_{per} , deze 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

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.

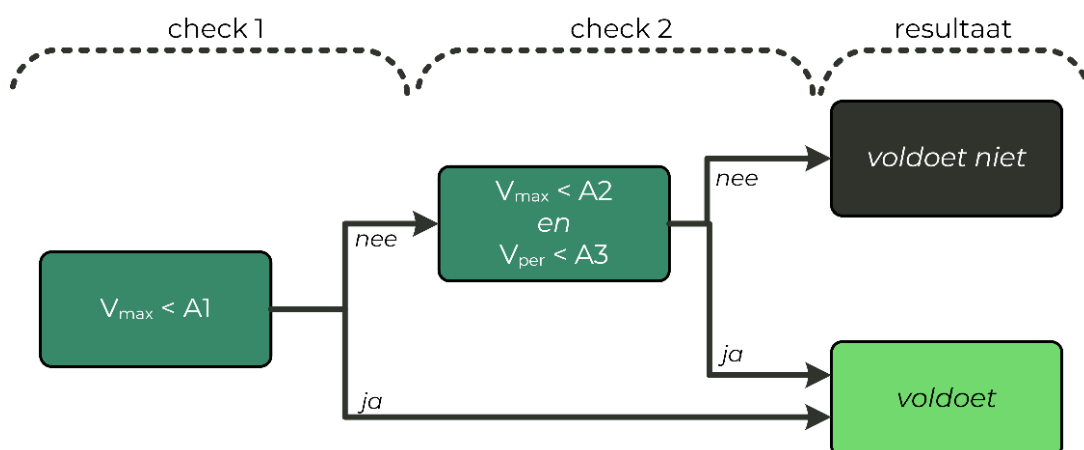
een zekere mate van gewenning en er zijn minder mogelijkheden om de trillingen te reduceren.

- 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 gebouwen met een woonfunctie.
- c. De nacht, omdat de meeste hinder vaak in rust wordt ervaren. De streefwaarden voor overdag zijn ca. een factor 2 minder streng dan 's nachts.

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

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

	Dag en avond			Nacht		
Situatie	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Wonen, nieuwe situatie	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
Wonen, bestaande situatie	0.2	0.8	0.10	0.2	0.4	0.10



Figuur 4 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

3.3. REKENMETHODE

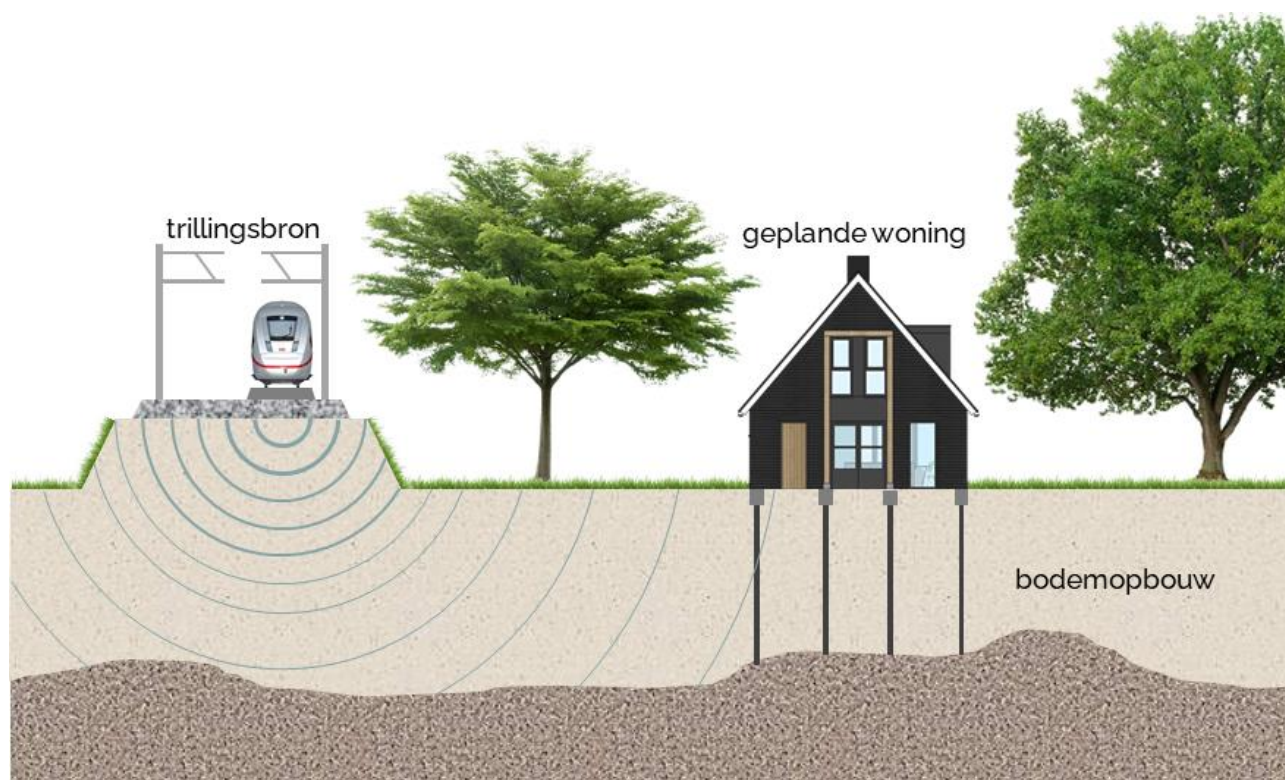
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde gebouwen, wordt op basis van metingen in de omgeving van de bebouwing (op maaiveld en aan bestaande bebouwing) een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande 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. In de volgende subparagrafen wordt beschreven hoe dat is vertaald naar een rekenmodel.

3.3.1. TRILLINGEN – VAN TRILLINGSBRON NAAR GEBOUW

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

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

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



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

3.3.2. DE TRILLINGSBRON

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

3.3.3. DE BODEM

De bodem op deze locatie bestaat voornamelijk 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.

De trillingen gaan via de fundering een gebouw binnen. Afhankelijk van het type fundering, de bodem, de massa en afmetingen van het gebouw zal de fundering de trillingen meer of minder uitdempen. Vervolgens worden de trillingen in het gebouw weer versterkt door bewegingen van het gebouw en de vloeren. Het gebouwgedrag is in dit onderzoek bepaald op basis van de bodemopbouw, de constructieve eigenschappen en de gebruikte materialen van de gebouwen. Hiervoor maken we gebruik van het rekenmodel Buildyn, een zogenaamd beam-element model (BEM) waarin het gebouw gemodelleerd en dynamisch doorgerekend wordt. De resultaten van het model zijn geijkt met praktijkresultaten uit metingen. Een toelichting op het rekenmodel Buildyn is gegeven in bijlage II.



VERWACHTE TRILLINGEN



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



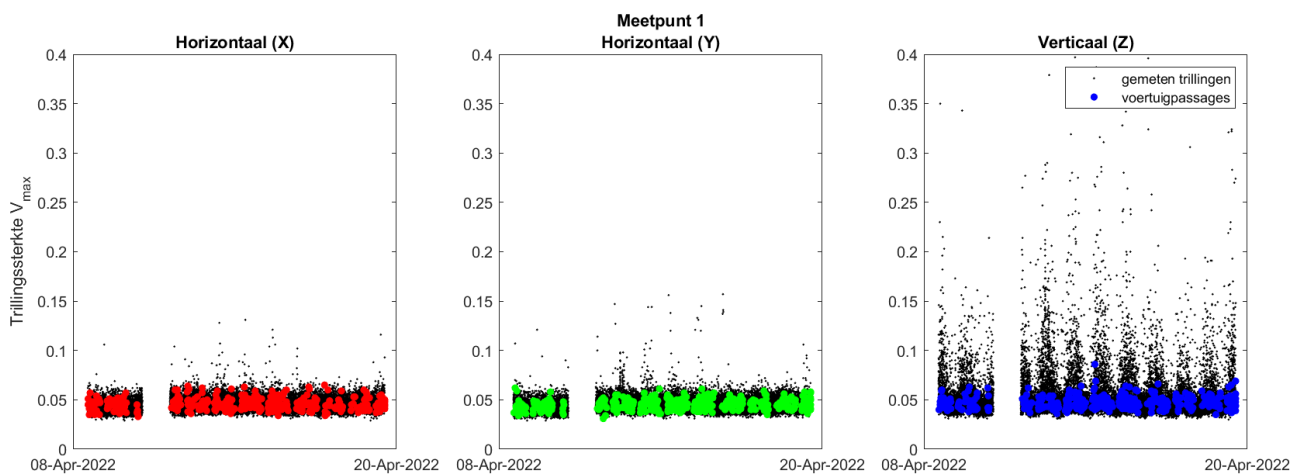


VERWACHTE TRILLINGEN

4.1. MEETRESULTATEN

Alcedo heeft metingen uitgevoerd op maaiveld en aan de fundering van het bestaande gebouw. De trillingen aan de fundering van het bestaande gebouw aan de Stationsstraat 26 zijn weergegeven in Figuur 6. Overige meetdata staat in bijlage III. In Figuur 6 valt het volgende op:

1. De trillingen zijn relatief laag, en vergelijkbaar in alle richtingen.
2. De trillingen van de treinen zijn, vooral in verticale richting, veel lager dan de achtergrondtrillingen. Zwaar landbouw- en vrachtverkeer over de Stationsweg zorgt aan de fundering van de huidige bebouwing voor hogere trillingen dan het treinverkeer.



Figuur 6 Gemeten trillingen aan fundering bestaande bebouwing (Stationsstraat 26)

4.2. TRILLINGEN IN GEPLANEDE BEBOUWING

De geplande bebouwing is gemodelleerd op basis van de informatie uit Tabel 2. Een voorbeeld van 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 bebouwing.

De resultaten hebben we weergegeven in Tabel 4, samen met een beoordeling van de trillingen. De trillingen zijn weergegeven als een bandbreedte, omdat de trillingen afhankelijk zijn van de constructieve uitwerking.

Tabel 4 Trillingen en beoordeling op SBR B-richtlijn

Bouwconcept	V_{max}^2	V_{per}	Beoordeling
Kalkzandsteen, metselwerk en kanaalplaatvloeren	0.1 – 0.2	< 0.01	Voldoet
Beton (prefab of i.h.w.g.) met breedplaatvloeren	0.1	< 0.01	Voldoet

² De weergegeven waarde voor V_{max} geldt voor zowel de dag- als nachtperiode, er is geen significant verschil in trillingssterkte tussen beide periodes, omdat dezelfde treinen zowel overdag als 's nachts passeren. In de toetsing en beoordeling is hier dan ook geen onderscheid in gemaakt.



Bouwconcept	$V_{\max}^2$	V_{per}	Beoordeling
Houtskeletbouw	0.1 – 0.2	< 0.01	Voldoet

We hebben in het onderzoek meerdere constructieve uitwerkingen beschouwd. Samengevat geldt het volgende:

- De trillingen zijn vooral afhankelijk van de eigenfrequentie van de vloer. Vloeren met een eigenfrequentie onder 10 Hz hebben relatief wat lagere trillingen dan vloeren met een hogere eigenfrequentie. Bij een eigenfrequentie van de vloer van meer dan 10 Hz vallen de trillingen van de treinen samen met de eigenfrequentie van de treinen. Concreet betekent dit dat dunnere vloeren en grotere vloeroverspanningen relatief wat lagere trillingen geven.
- Breedplaatvloeren geven relatief wat lagere trillingen dan kanaalplaatvloeren, vooral door de hogere demping van de vloer.
- Een zwaardere fundering, stijvere constructie of stijvere wanden heeft geen significant effect op de trillingen.
- Constructies met een sterkere demping (zoals houtskeletbouw) zorgen voor relatief wat lagere trillingen dan constructies met minder demping (zoals betonnen constructies).

Door de beperkte rij snelheid (maximaal 70 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.

Hoewel niet kwantitatief beschouwd in dit rapport, zien we uit de metingen dat wegverkeer voor hoge trillingen kan zorgen. Om hinderlijke trillingen van wegverkeer te vermijden, adviseren we om lichte houtskeletbouw te vermijden, alsmede eigenfrequenties van vloeren boven de 10 Hz. In de praktijk betekent dit het volgende:

- Bij een vloerdikte van 200 mm: geadviseerde vloeroverspanning groter dan 6.5 meter.
- Bij een vloerdikte van 260 mm: geadviseerde vloeroverspanning groter dan 7.5 meter.
- Bij een vloerdikte van 320 mm: geadviseerde vloeroverspanning groter dan 8.5 meter.

Door bovenstaande adviezen te volgen, wordt de kans op hinderlijke trillingen van wegverkeer sterk verminderd.

4.3. ONZEKERHEDEN IN HET ONDERZOEK

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

- Ten aanzien van de trillingsbron: de natuurlijke variatie als gevolg van spooronderhoud en de temperatuur kunnen zorgen voor zo'n 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, wel is bekend dat die vooral rond spoorwegovergangen vaak slechter is. 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 in het spoor variëren met de tijd. De trillingen zijn echter ruim lager dan de



streefwaarden, zodat ook een slechtere spoorligging hier naar verwachting niet zal leiden tot overschrijdingen van de streefwaarden.

- 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 van de onzekerheid in de bodem is daarmee meegenomen in de analyse, de impact op de resultaten is daardoor beperkt.
- Ten aanzien van het gebouw 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.

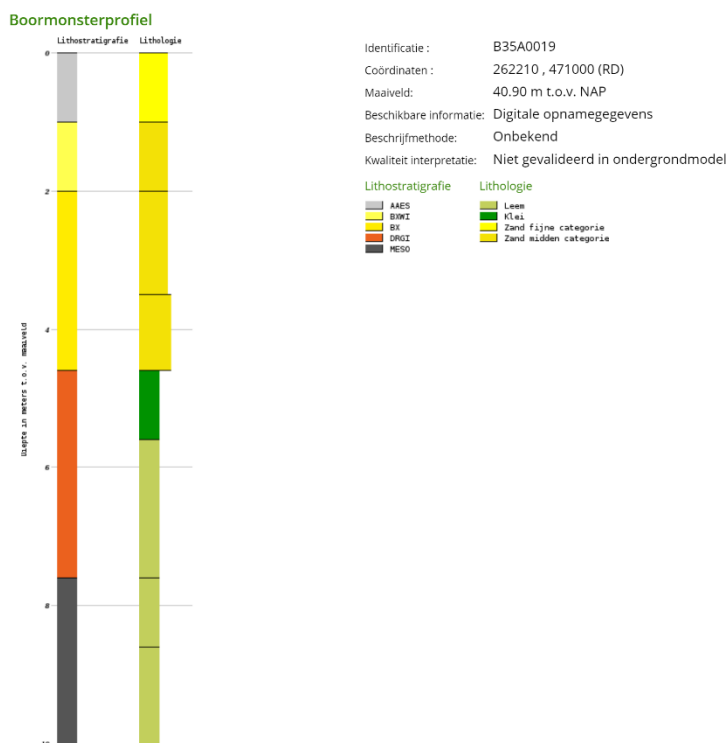
Bovenstaande onzekerheden hebben geen invloed op de conclusies van dit onderzoek: ook wanneer deze onzekerheden worden meegenomen, zijn maatregelen gezien de lage trillingen niet nodig.



GRONDONDERZOEK

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

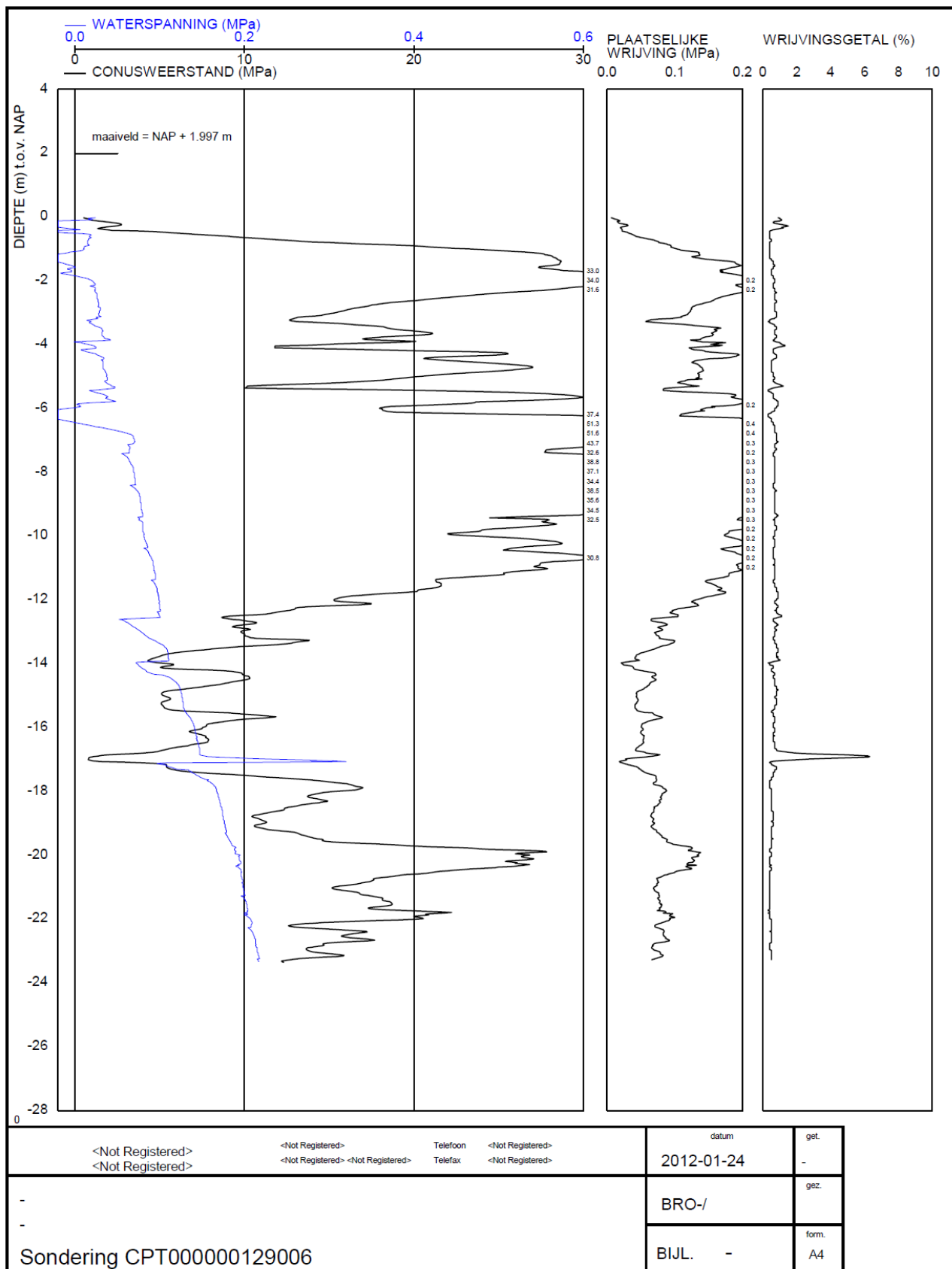
Een grondboring in de nabijheid van het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur 7. De toplaag van de bodem is vooral opgebouwd uit zandlagen, met op grotere diepte klei- en leemlagen. Op zandige bodems dempen de trillingen vaak slecht uit met de afstand.



Figuur 7 Boring uit de omgeving van het onderzoeksgebied

Een representatieve sondering uit de omgeving van het onderzoeksgebied, waarin onder meer de conusweerstand te zien is, is weergegeven in Figuur 8. Ook hier is de stijve bodemopbouw te zien.



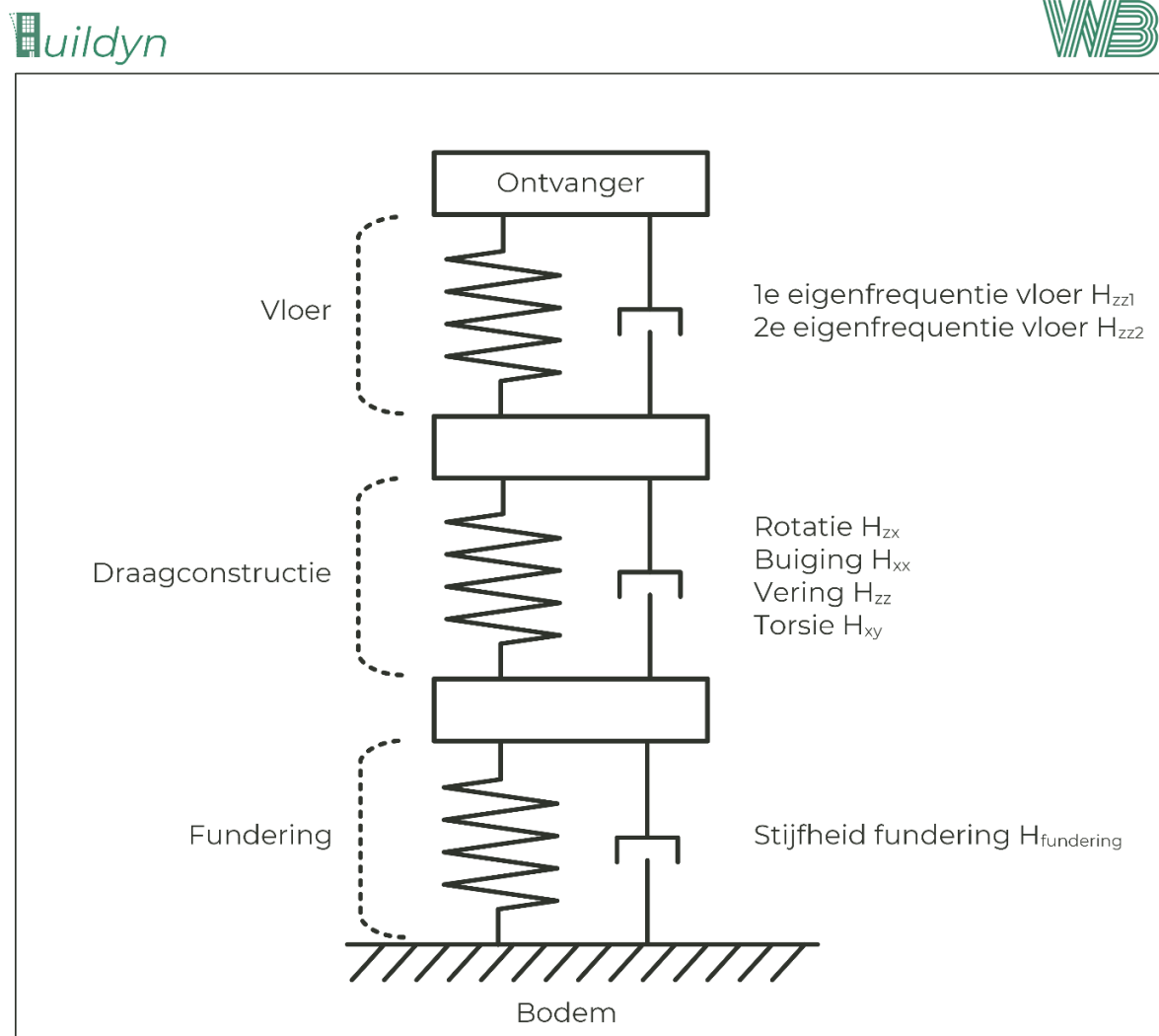


Figuur 8 Sondering nabij het onderzoeksgebied

REKENMODEL

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van het rekenmodel Buildyn om de trillingen in de geplande bebouwing te berekenen. In Buildyn wordt de dynamische responsie van een gebouw berekend met behulp van een beam-element model (BEM). Buildyn is met behulp van een slim algoritme gekalibreerd met meer dan 600 praktijkmetingen. Uit evaluatiemetingen blijkt dat het model hierdoor een nauwkeurigheid heeft die vrijwel altijd significant beter is dan een Eindige Elementenmodel. Dat komt doordat de resultaten van het Buildyn-model gebaseerd zijn op werkelijke (as-built) data, terwijl een Eindige Elementenmodel zeer gevoelig is voor de gebruikte input t.a.v. bijv. damping en stijfheden. Qua detailniveau, zoals omschreven in de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* (Tabel 10.3), gaat het om een model op niveau IV: een 3D-model, mits lokale onderdelen (zoals uitkragingen) zijn mee gemodelleerd omdat de empirische praktijkdata hierop minder nauwkeurig is.

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. Afhankelijk van de constructie van het gebouw wordt de draagconstructie als één (lage bebouwing, starre bebouwing), of als meerdere elementen (hoge bebouwing, slappere bebouwing) gemodelleerd.



Figuur 9 Principe van Buildyn met een gebouw als gekoppeld massaveersysteem. Rechts de verschillende componenten van het rekenmodel

FUNDERING

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

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

Vooral boven de 10 Hz worden trillingen uitgedempt door de fundering, bij slappe bodems en grote gebouwen kan ook al bij lagere frequenties damping optreden.

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

DRAAGCONSTRUCTIE

De trillingen worden door de draagconstructie vaak versterkt. Hierbij zijn meerdere effecten te onderscheiden, waarbij met name rotatie van het gebouw als geheel (op de ondergrond), doorbuiging en vering van het gebouw op zijn fundatie een rol spelen. Bij hogere of slappere gebouwen speelt ook doorbuiging en torsie (rotatie om een verticale as in het gebouw) een rol.

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

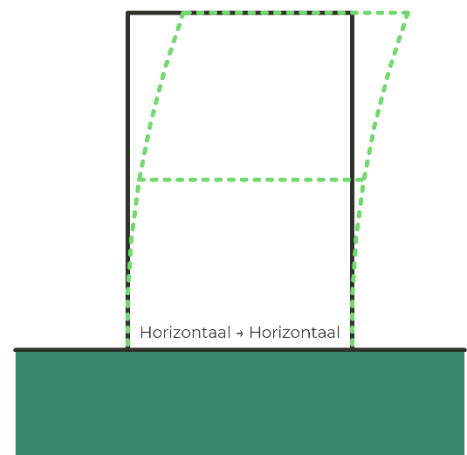
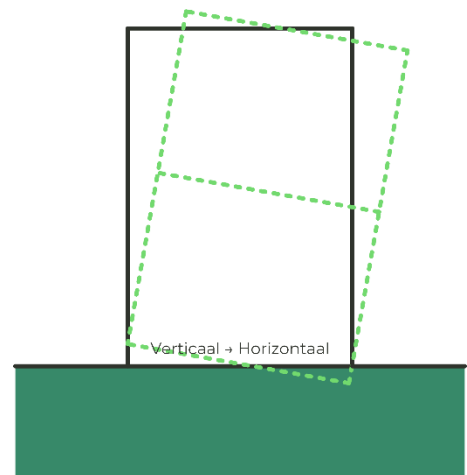
Dit effect noemen we H_{zx} , en is afhankelijk van:

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

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

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

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

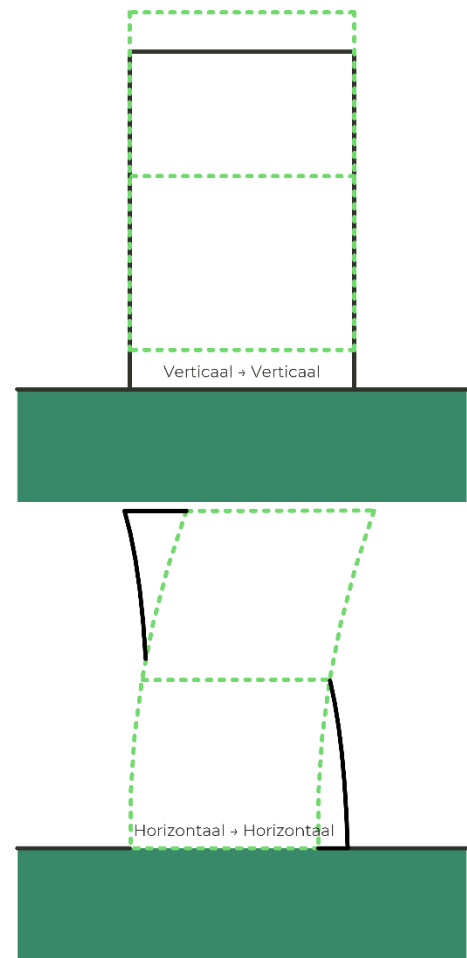


Het derde principe, dat van vering van het gebouw op zijn fundatie, is rechts weergegeven. Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappe onderlaag of lokaal slappere elementen (denk aan kolommen en balkenstructuren). Dit effect noemen we H_{zz} , en is afhankelijk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

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

Het vierde principe, dat van torsie van het gebouw, is rechts weergegeven. Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappere constructie. Dit effect noemen we H_{xy} , en is afhankelijk van:

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



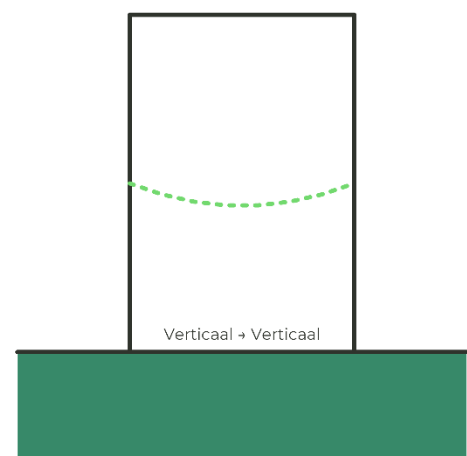
VLOEREN

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

De eerste buigmodus van de vloer (bij de eerste eigenfrequentie) is simpele doorbuiging, zoals weergegeven in de principeschets rechts. Met name de eigenfrequentie (de frequentie waarvoor de vloer gevoelig is) en de demping bepalen in hoeverre de trillingen worden opgeslingerd. De trillingen zijn het hoogst in het midden van de vloer.

Dit effect noemen we H_{zz1} , en is afhankelijk van:

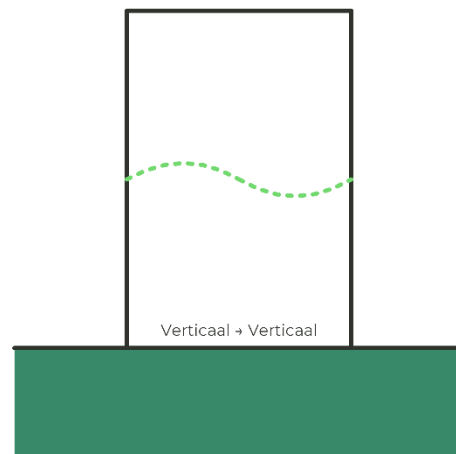
- » Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- » Afmetingen van de vloer
- » Type oplegging



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

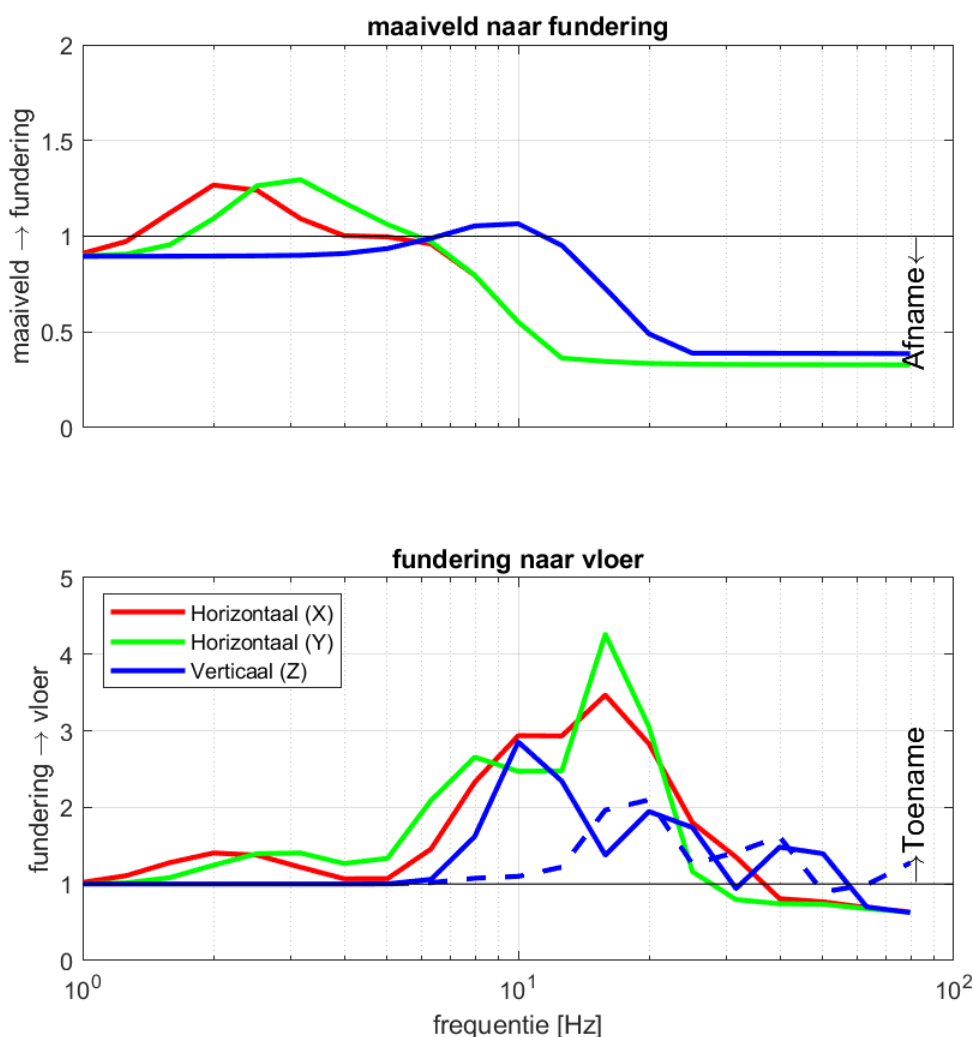
Dit effect noemen we H_{zz2} , en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1} .

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 het maatgevende punt op de hoogste verdieping van de appartementen weergegeven in Figuur 10.

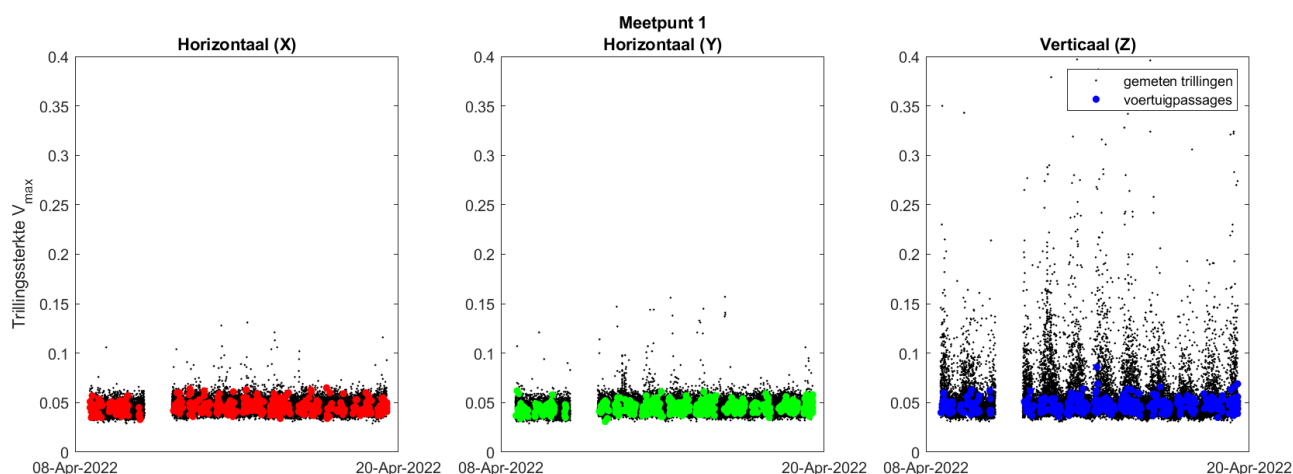


Figuur 10 Buildyn-resultaten voor bovenste verdieping appartementencomplex, 6 m beukmaat, 200 mm kanaalplaatvloer en kalkzandsteen en metselwerk constructie. Doorlopende lijn verticaal is midden vloer, onderbroken lijn is op $\frac{1}{4}$ en $\frac{3}{4}$ van overspanning

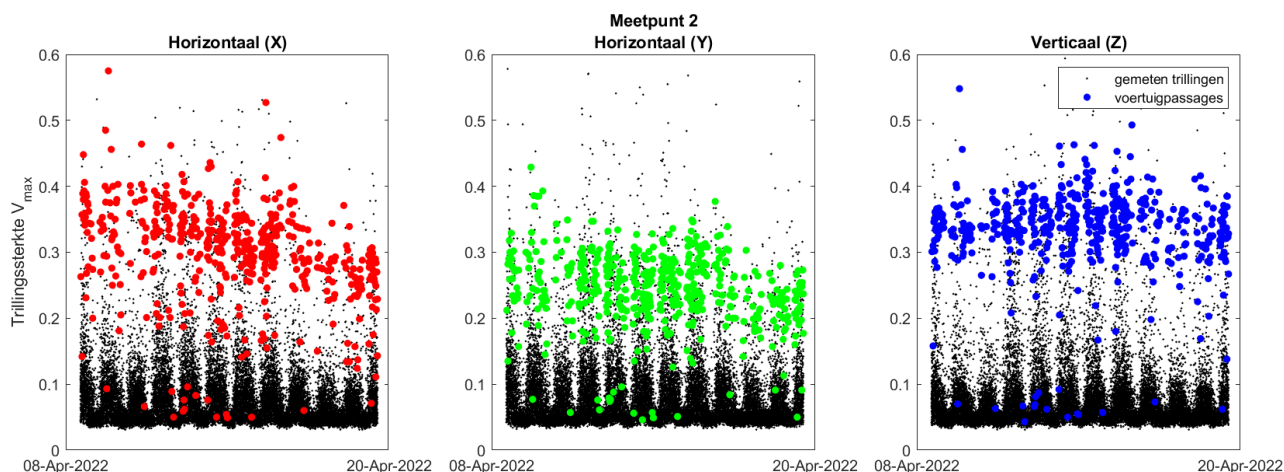


RESULTATEN METINGEN

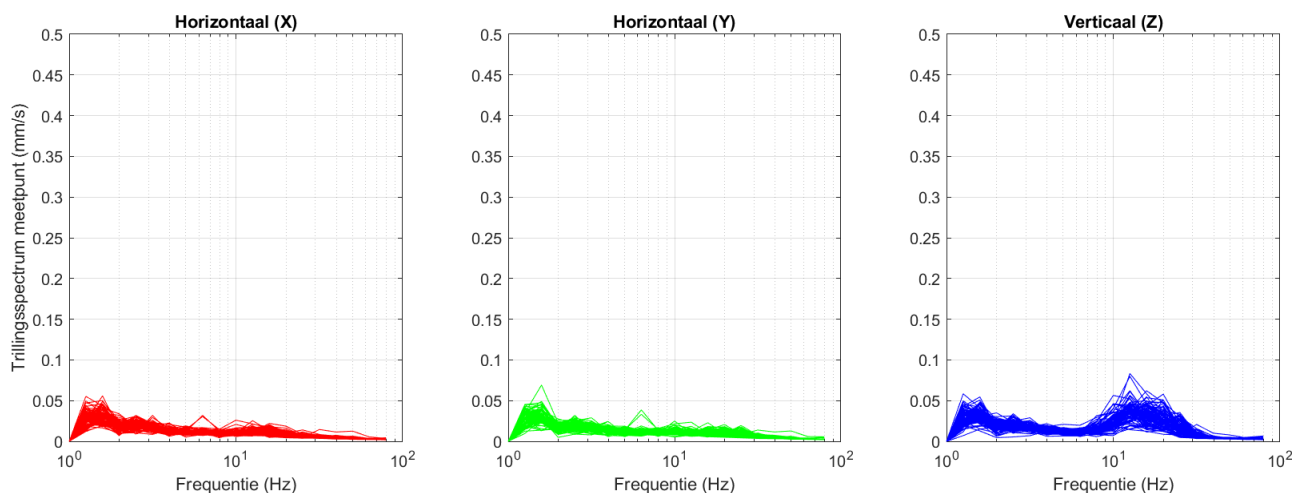
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



Figuur 11 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (fundering bestand gebouw Stationsstraat 26)

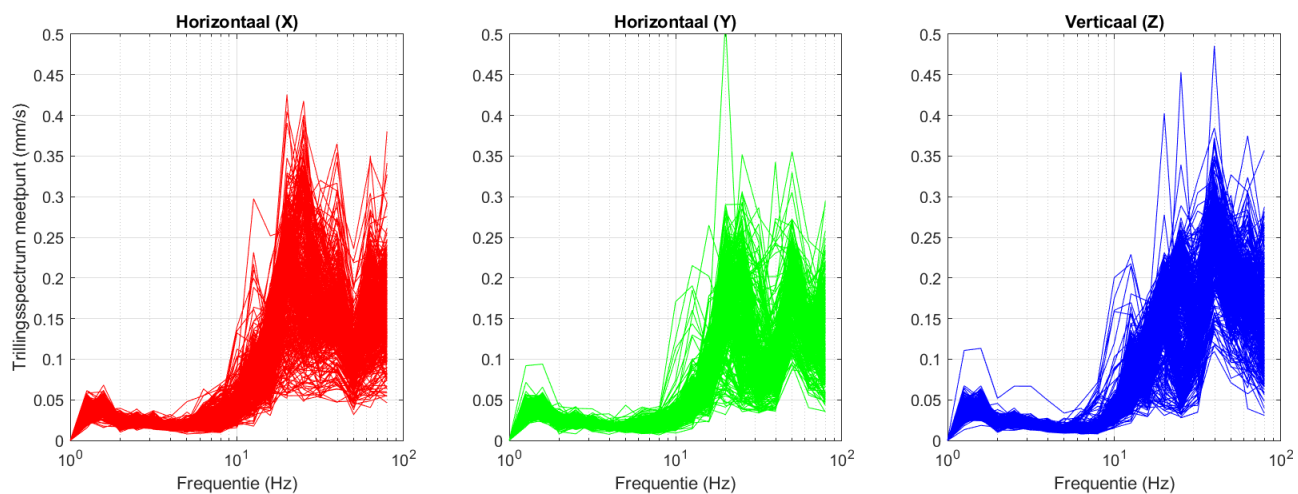


Figuur 12 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (maaiveld bij spoorwegovergang)



Figuur 13 Tertsbandspectra bij meetpunt 1





Figuur 14 Tertsbandspectra bij meetpunt 2