

BURG. GALLEESTRAAT 58 VORDEN

Trillingsonderzoek t.b.v. nieuwbouw



Colofon

Auteur	████████████████████ ████████████████████
Controle en vrijgave	██████████ ██████████████████ ██████████████████
Projectcode	<i>WBD2021-019</i>
Versienr	<i>1.0</i>
Datum	<i>11 juni 2021</i>
Status	<i>Vrijgegeven</i>
Opdrachtgever	<i>KOLD B.V.</i>



© We-Boost Data 2021

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

De kern van dit rapport

Op een perceel aan de Burgemeester Galleestraat 58 in Vorden worden 8 appartementen gerealiseerd. Het plangebied bevindt zich in de nabijheid van de spoorlijn Zuthpen – Winterswijk. Gezien de 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 in de nabijheid van de bouwlocatie en modelberekeningen van de toekomstige bebouwing onderzocht wat de trillingen zullen zijn in de toekomstige bebouwing.

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 woning. Door de relatief grote afstand tot het spoor (70 meter), de beperkte rijsnelheid (30 tot 50 km/h) en de lichte reizigerstreinen zijn de trillingen op deze locatie relatief laag. Na doorrekening van varianten met meerdere types afmetingen, constructieve uitwerkingen, vloertypes en afstanden tot het spoor blijkt dat de trillingen t.g.v. treinverkeer 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.

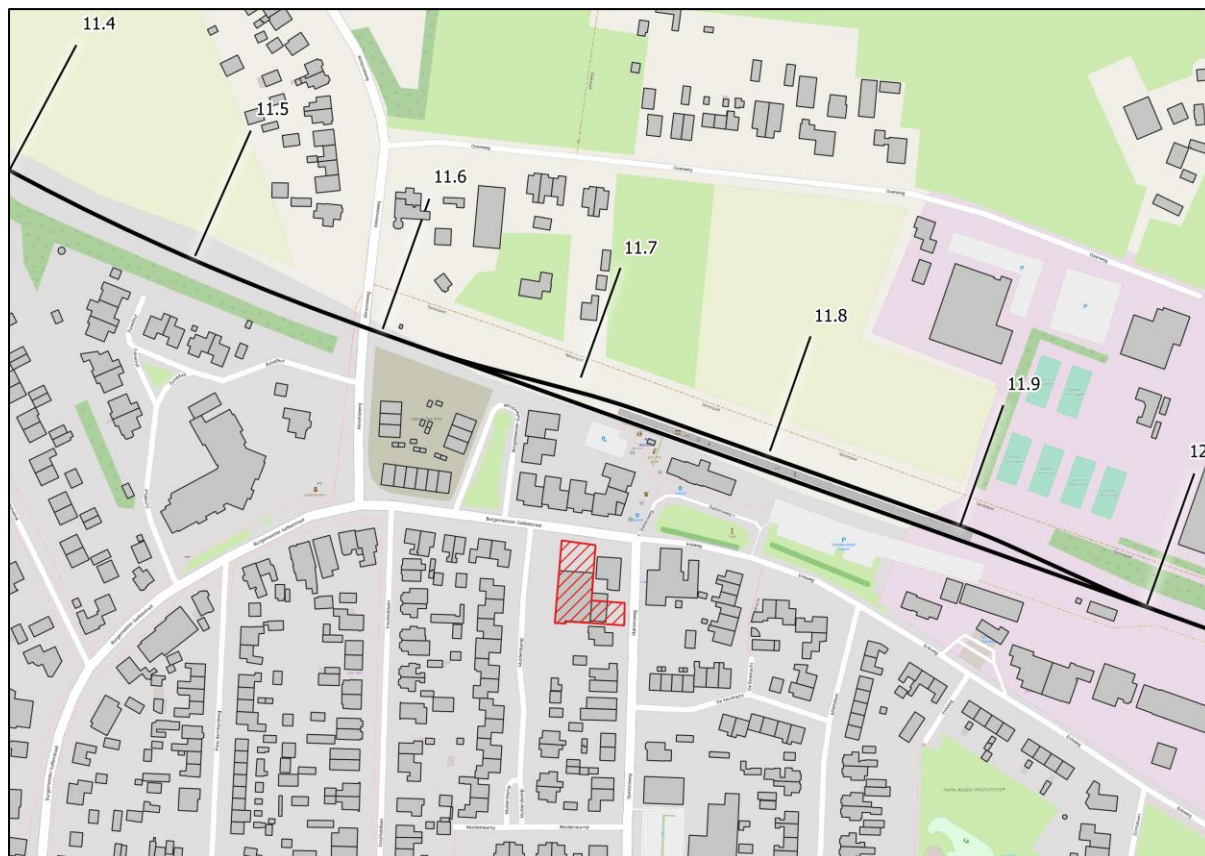
Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
1.1	Aanleiding	5
1.2	Doel	5
1.3	Leeswijzer	5
2	Situatie en uitgangspunten.....	7
2.1	Situatiebeschrijving	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	15
I	Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek.....	17
II	Bijlage rekenmodel Buildyn	19
	Fundering	20
	Draagconstructie	20
	Vloeren	21
	Resultaten.....	22
III	Resultaten metingen	23

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Op een perceel aan de Burgemeester Galleestraat 58 in Vorden worden 8 appartementen gerealiseerd. Het plangebied bevindt zich in de nabijheid van de spoorlijn Zuthpen – Winterswijk, zie Figuur 1. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet *op voorhand* worden uitgesloten.



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 (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 het onderzoeksgebied voor de geplande gebouwen op basis van de gemeten trillingen en de eigenschappen en functies van de gebouwen. Het resultaat van deze stap wordt in hoofdstuk 4 beschreven.

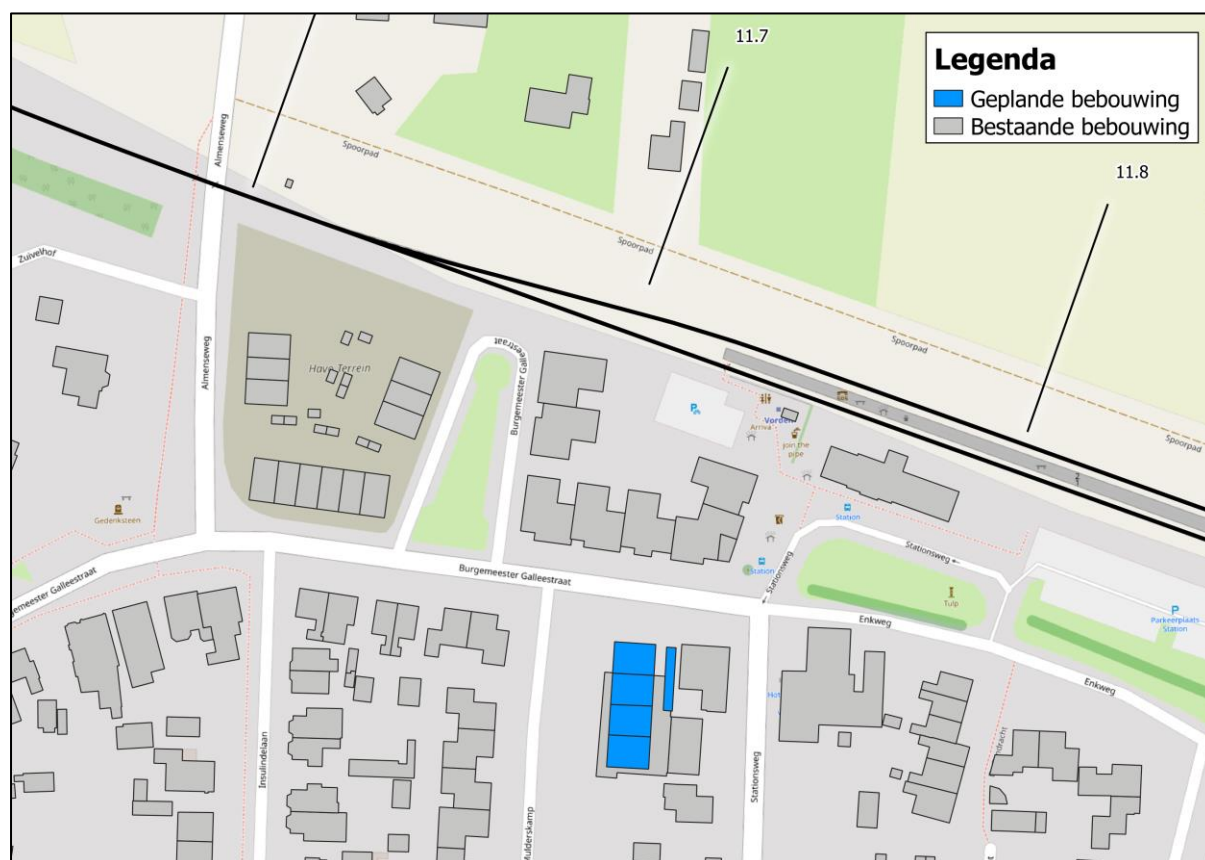
De bijlages bevatten technische informatie van het onderzoek, zoals een toelichting op de rekenmethodiek en relevant grondonderzoek.

2 Situatie en uitgangspunten

In dit hoofdstuk geven wij een toelichting op de beoogde toekomstige situatie in het plangebied en geven we de uitgangspunten van het onderzoek weer.

2.1 Situatiebeschrijving

De planlocatie bestaat op dit moment uit een perceel met daarop enkele opstallen. Deze opstallen worden gesloopt, en ervoor in de plaats komt een tweelaags appartementengebouw met 8 appartementen, zie Figuur 2.



Figuur 2 Bestaande en toekomstige bebouwing

De nieuwbouw bevindt zich op een afstand van zo'n 70 tot 100 meter van het spoor. Het aantal treinen per uur per richting en de rijsnelheid van de treinen zijn weergegeven in Tabel 1. Deze gegevens zijn gebaseerd op gegevens uit het Geluidsregister Spoor en gegevens van de vervoerder (Arriva). Er rijdt geen goederenverkeer op deze lijn. Voor reizigersverkeer geldt dat er geen verandering in het aantal treinen wordt voorzien.

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

Type trein	Rijsnelheid (km/h)	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Stoptrein Zuthpen – Winterswijk v.v.	30 – 50 km/h	2.00	1.75	0.38

Andere relevante trillingsbronnen zijn niet aanwezig in het plangebied. Alleen lokaal, rond drempels of eventueel bij klinkerwegen, kan wegverkeer op korte afstand voor voelbare

trillingen zorgen. Dergelijke drempels bevinden zich bijvoorbeeld in de Burgemeester Galleestraat. Gezien de afstand van de geplande nieuwbouw tot deze drempels zullen deze trillingen niet of nauwelijks voelbaar zijn in de geplande woningen. Wegverkeer is in dit onderzoek echter niet nader kwantitatief beschouwd.

2.2 Uitgangspunten

In deze paragraaf lichten wij de gebruikte uitgangspunten toe. In het volgende hoofdstuk (onder werkwijze) leggen we uit hoe deze uitgangspunten zijn verwerkt in de berekeningen.

2.2.1 Gegevens bebouwing

In het plangebied wordt een appartementengebouw gerealiseerd. Er is een schetsontwerp van de bebouwing beschikbaar (van 12 januari 2021), de voor trillingen meest relevante aspecten zijn weergegeven in Tabel 2. Omdat er nog geen uitgewerkt constructief ontwerp is, is in dit trillingsonderzoek met meerdere varianten gerekend, zodat het onderzoek representatief is voor meerdere uitwerkingen. Het rekenmodel voor de bebouwing is gebaseerd op Tabel 2.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

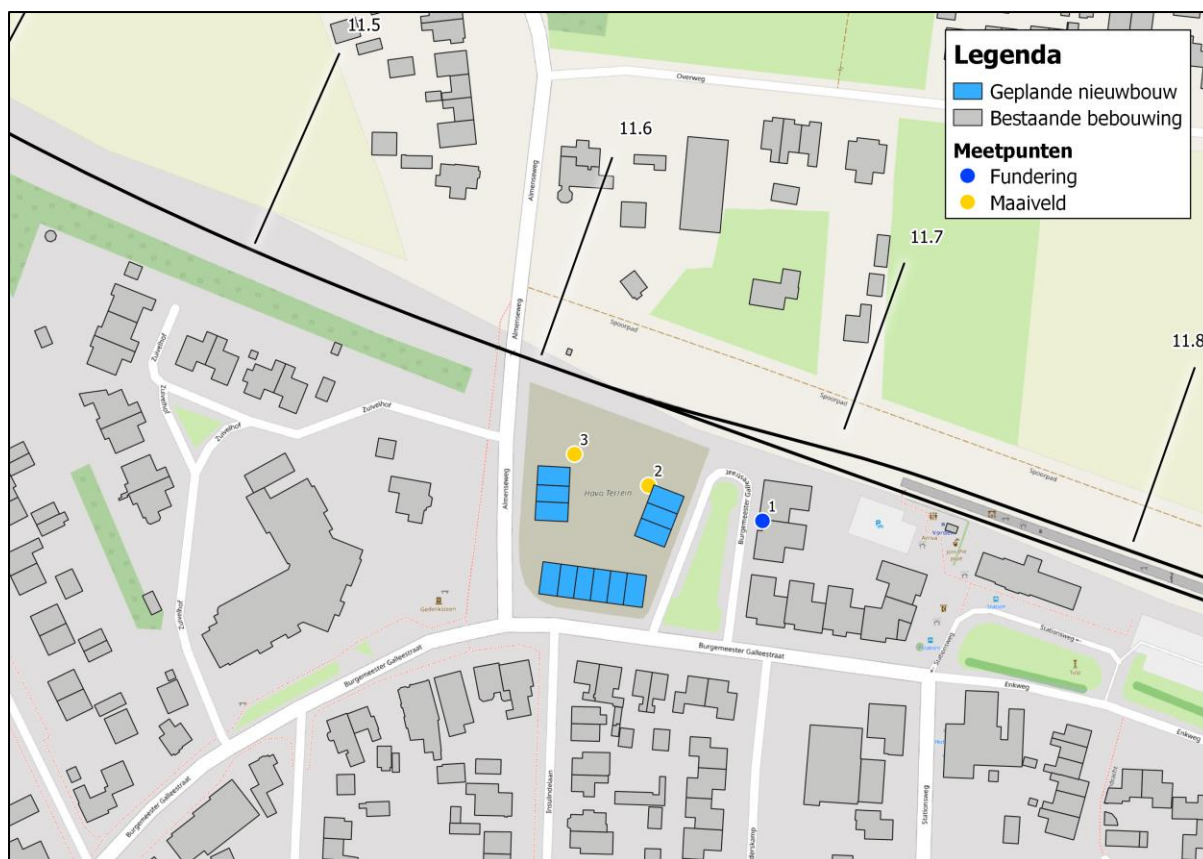
Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Meerdere varianten: • Ribbenvloeren met 60 en 70 mm zandcement dekvloer • Kanaalplaatvloeren 200 en 260 mm, met 60 en 70 mm zandcement dekvloer • Breedplaatvloeren 200 en 250 mm, met 60 en 70 mm zandcement dekvloer • Houten vloeren, diverse varianten
Hoogte	7.0 meter
Lengte vloerveld	7.0 tot 8.0 meter
Breedte vloerveld	9.0 tot 11.0 meter
Constructietype	Meerdere varianten: • Prefab beton • Kalkzandsteen/metselwerk • Houtskeletbouw
Fundering	Op staal

2.2.2 Gegevens ondergrond

Voor gegevens van de ondergrond is gebruik gemaakt van beschikbare boringen en sonderingen uit Dinoloket en bodemonderzoeken die in de 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 de nabijheid van het onderzoeksgebied. De metingen zijn uitgevoerd in november 2020. Er zijn metingen uitgevoerd op drie punten: twee in de nabijheid van het wissel, en een meetpunt aan nabij gelegen bestaande bebouwing, dichterbij het spoor, zie Figuur 3. De afname van de trillingen met de afstand (i.v.m. de grotere afstand van de geplande bebouwing tot het spoor) is bepaald met behulp van een rekenmodel op basis van de bodemsamenstelling. De meetresultaten van het meetonderzoek worden weergegeven in hoofdstuk 4.



Figuur 3 Meetpunten in en bij 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 geplande bebouwing is dermate groot dat er geen schade aan de gebouwen zal ontstaan, en verstoring van gevoelige apparatuur als gevolg van de realisatie van dit plan is ook niet aan de orde.

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

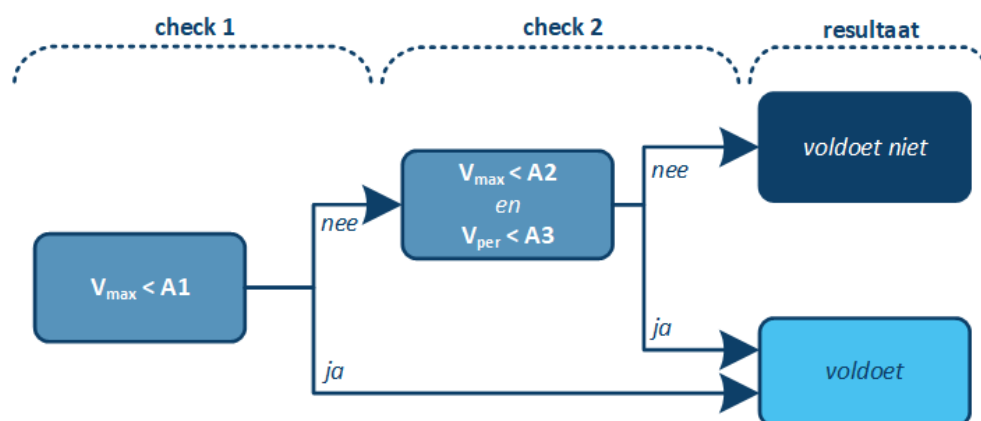
1. De richtlijn toetst zowel een maximaal optredende trillingssterkte (V_{max} , treedt op bij de trein die gedurende de meetperiode de hoogste trillingen veroorzaakt) als het tijdsgemiddelde van de trillingen (V_{per} , deze grootheid is in tegenstelling tot V_{max} dus ook afhankelijk van het aantal 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. In het voorliggende plan gaat het uitsluitend om gebouwen 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 4.

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

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



Figuur 4 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

3.2 Rekenmethode

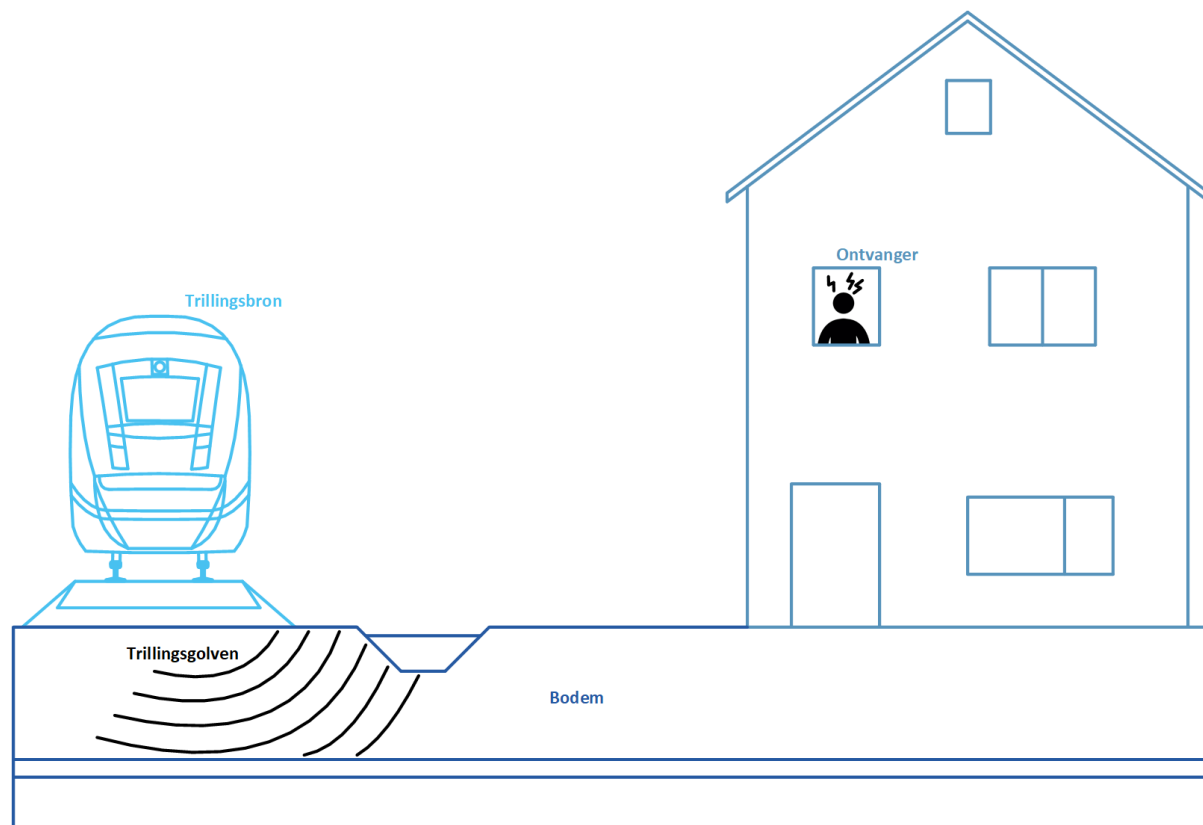
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde gebouwen, wordt op basis van metingen aan bestaande bebouwing een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande nieuwe bebouwing. Deze verwachte trillingen zijn afhankelijk van de constructieve eigenschappen van de geplande bebouwing, maar ook van de bodem, de afstand tot het spoor en natuurlijk de gemeten trillingen. Daarnaast worden de trillingen op maaiveld in de nabijheid van de geplande bebouwing geanalyseerd. 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-effen 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. Er ligt een wissel nabij het plangebied, dat voor hogere trillingen kan zorgen. De trillingen van het treinverkeer zijn gemeten door Alcedo op meerdere punten in en bij het plangebied, onder meer aan de fundering van een bestaand pand en op maaiveld. 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 voornamelijk uit zandlagen, zie bijlage I. De uitdemping van de trillingen met de afstand is bepaald met een rekenmodel op basis van deze bodemopbouw voor een zo betrouwbaar mogelijke predictie van de trillingen.

3.2.4 Het gebouw

De trillingen gaan via de fundering een gebouw binnen. Afhankelijk van het type fundering, de bodem, de massa en afmetingen van het gebouw zal de fundering de trillingen meer of minder uitdempen. Vervolgens worden de trillingen in het gebouw weer versterkt door bewegingen van het gebouw en de vloeren. Het gebouwgedrag is in dit onderzoek bepaald op basis van de bodemopbouw, de constructieve eigenschappen en de gebruikte

materialen van de gebouwen. Hiervoor maken we gebruik van het rekenmodel Buildyn, een zogenaamd beam-element model (BEM) waarin de gebouwen gemodelleerd en doorgerekend zijn. De resultaten van het model zijn geijkt met praktijkresultaten uit metingen. Een toelichting op het rekenmodel Buildyn is gegeven in bijlage II.

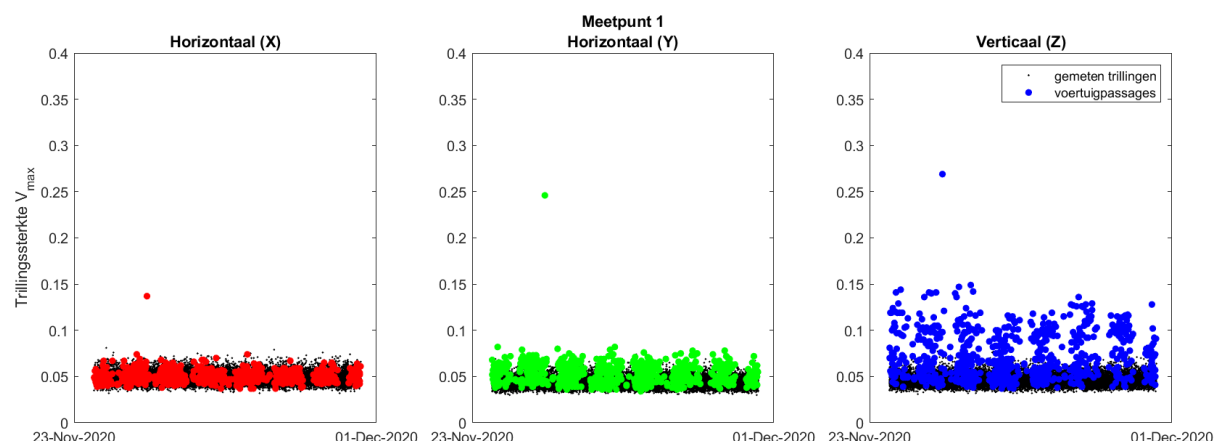
4 Verwachte trillingen in de woningen

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

4.1 Meetresultaten

Alcedo heeft metingen uitgevoerd aan onder meer de fundering van een nabijgelegen pand, dicht bij het spoor. De drie meetpunten bevinden zich op ca. 25 meter van het spoor, zie Figuur 3. De trillingen op meetpunt 1 zijn weergegeven in Figuur 6. In Figuur 6 valt het volgende op:

1. De trillingen zijn maatgevend in verticale richting, vergeleken met de horizontale X- en Y-richting zijn hier de hoogste trillingen gemeten.
2. De trillingen worden veroorzaakt door stoptreinen die hier volgens dienstregeling rijden. De uitschieter rond 0.27 (verticale Z-richting), die ook in de horizontale richtingen te zien is, betreft een meting van een op hoge snelheid passerende trein (werktrein of doorgaande trein), die incidenteel passeerde.



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

Uit de metingen op maaiveld bij het wissel (zie bijlage III) valt op dat de trillingen bij het wissel wat hoger zijn. Dat is gebruikelijk, een wissel is een onderbreking in het spoor en daarmee een extra bron van trillingen. Met name treinen richting Zutphen zorgen voor hogere trillingen, doordat deze het wissel in scheefstand berijden. Deze hogere trillingen zijn het sterkst te zien in horizontale richting, loodrecht op het spoor.

4.2 Trillingen in geplande nieuwbouw

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

tussen de fundering en een maatgevend punt op de vloeren van de toekomstige gebouwen varieert per trillingsfrequentie en trillingsrichting (X, Y of Z).

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 bouwconcept en beoordeling op SBR B-richtlijn

Bouwconcept	V_{max}	V_{per}	Beoordeling
Kalkzandsteen, kanaalplaatvloeren	0.1	0.00	Voldoet
Prefab beton, kanaalplaatvloeren	0.1	0.00	Voldoet
Prefab beton, breedplaatvloeren	0.1	0.00	Voldoet
In het werk gestort beton, breedplaatvloeren	0.1	0.00	Voldoet
Houtskeletbouw	0.1 – 0.2	0.00	Voldoet

Uit Tabel 4 volgt dat er geen overschrijdingen van de streefwaarden zullen optreden. De trillingen zijn lager dan de streefwaarden, ongeacht de constructieve uitwerking van de woningen. Uit de beschouwde varianten is wel het volgende te zien:

1. In een concept met beton en breedplaatvloeren zijn de trillingen zo'n 10 tot 15 procent lager dan in een bouwconcept met kalkzandsteen en kanaalplaatvloeren. De trillingen zijn deels lager door de iets grotere demping van een breedplaatvloer, deels door de hogere stijfheid en zwaardere constructie bij een betonnen casco t.o.v. een kalkzandsteen casco. Beide aspecten dragen dus bij aan iets lagere trillingen.
2. Bij houtskeletbouw zijn de trillingen zo'n 5 tot 15 procent hoger, omdat houten bebouwing lichter is en daardoor wat makkelijker in trilling wordt gebracht. Ook voor de trillingen van wegverkeer (t.g.v. zwaar vrachtverkeer over de drempel in de Burgemeester Galleestraat) is lichte houtskeletbouw een minder logische keuze.

Door de relatief grote afstand tot het spoor, de beperkte rijsnelheid (30 tot 50 km/h, uitgezonderd incidentele leeg materieelritten die op hoge snelheid passeren) 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.

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 kan zorgen voor zo'n 30% variatie in de trillingen, afhankelijk van de spoorconstructie en de bodemopbouw. Er is gemeten in een klimatologisch als normaal te typeren periode. Er is geen informatie bekend over de status van de spoorligging op het moment van de metingen, wel is bekend dat de trillingen van wissels sterk afhankelijk zijn van de onderhoudsstatus. Gezien de grote afstand tot het wissel is de invloed hiervan op de trillingen echter vrijwel nihil. Er is op basis van bovenstaande informatie geen reden om te twijfelen aan de representativiteit van de berekeningen voor de toekomstige trillingen.

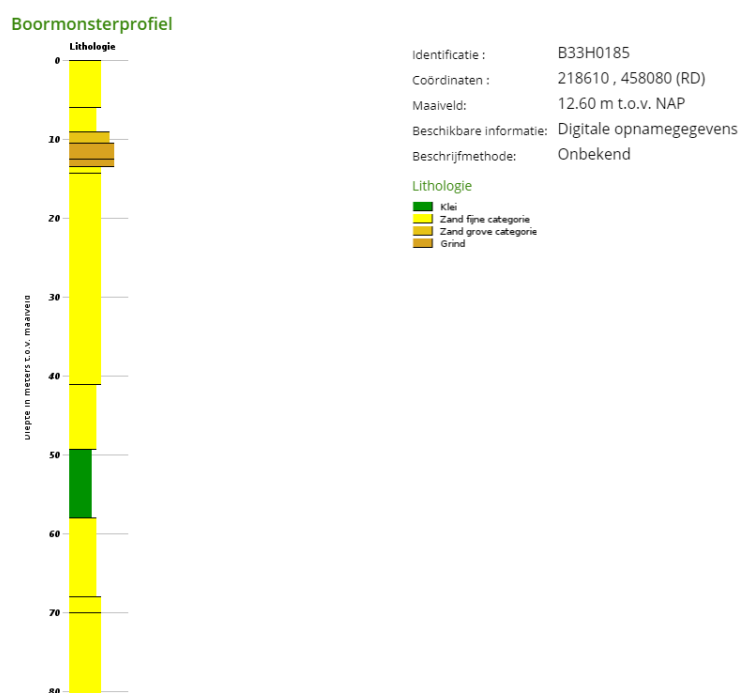
2. Ten aanzien van de bodem geldt dat met name op korte afstand tot het spoor variaties in de trillingen mogelijk zijn door lokale variaties in de bodem. Omdat op verschillende posities is gemeten, en de bebouwing vooral op grotere afstand van het spoor wordt gerealiseerd, is de invloed van die lokale 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 zijn er natuurlijke variaties in materiaalgedrag (van bijvoorbeeld hout). In de berekeningen is gerekend met een verwachtingswaarde van de trillingen op basis van een aan de hand van praktijkmetingen geijkt rekenmodel, en zijn meerdere varianten doorgerekend. Hiermee wordt een resultaat verkregen dat representatief is voor de toekomstige situatie.

Bovenstaande onzekerheden geven geen aanleiding tot andere conclusies van het onderzoek.

Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek

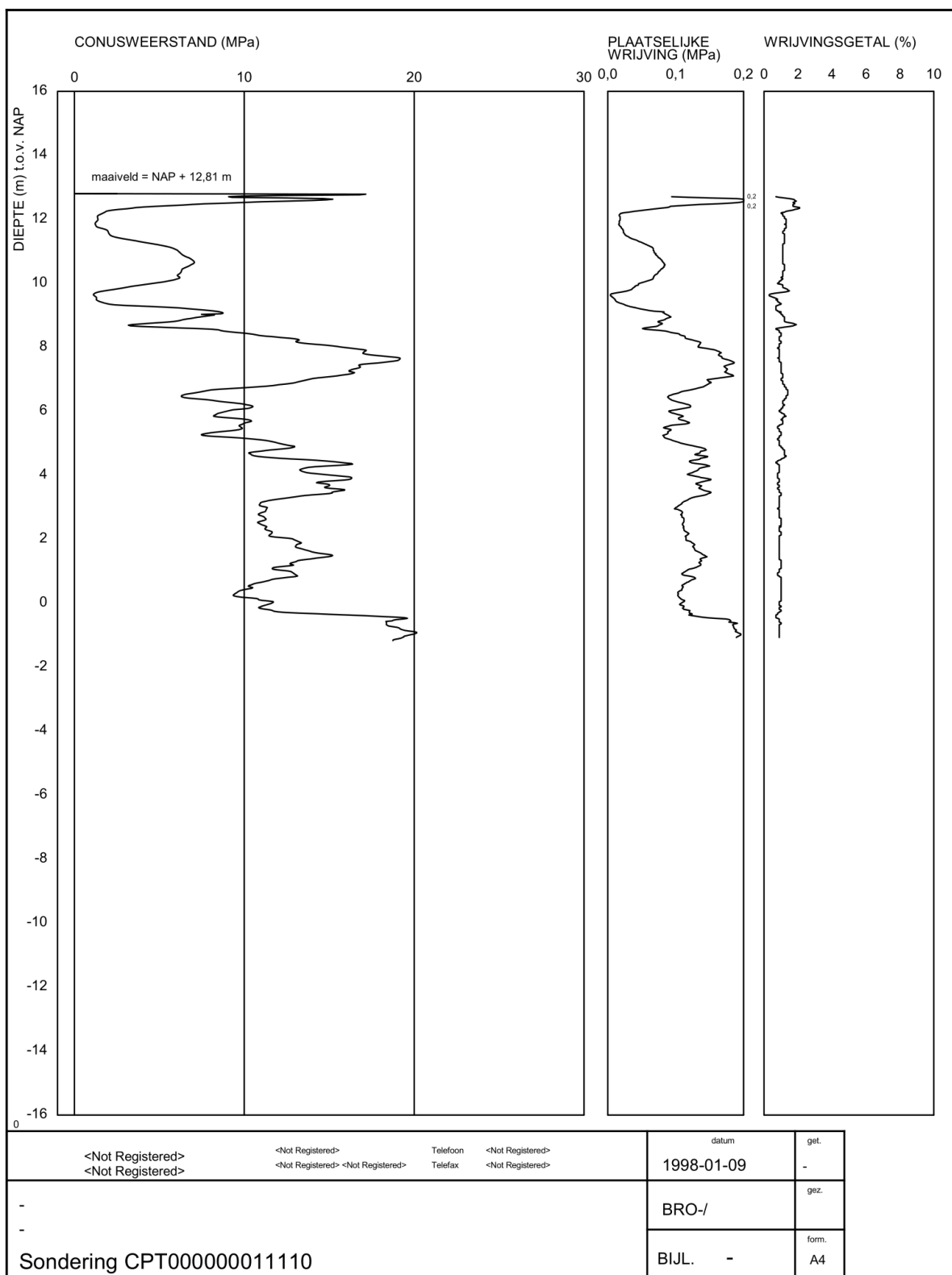
Deze bijlage bevat geotechnische achtergrondinformatie. Deze informatie is gebruikt om bijvoorbeeld de uitdemping van de trillingen met de afstand te bepalen. Daarnaast is deze informatie gebruikt in het rekenmodel waarmee de dynamische eigenschappen van de bebouwing worden bepaald.

Een boring in het onderzoeksgebied (nr. B33H0185) is weergegeven in Figuur 7. Hier is te zien dat de bodem voornamelijk is opgebouwd uit zandlagen. Met name door de aanwezigheid van zand in de toplagen dempen de trillingen relatief slecht uit met de afstand.



Figuur 7 Boring in het onderzoeksgebied, B33H0185

Een representatieve sondering nabij het onderzoeksgebied, waarin de stijfheid van de bodem t.g.v. de aanwezigheid van zandlagen zichtbaar is, is weergegeven in Figuur 8.

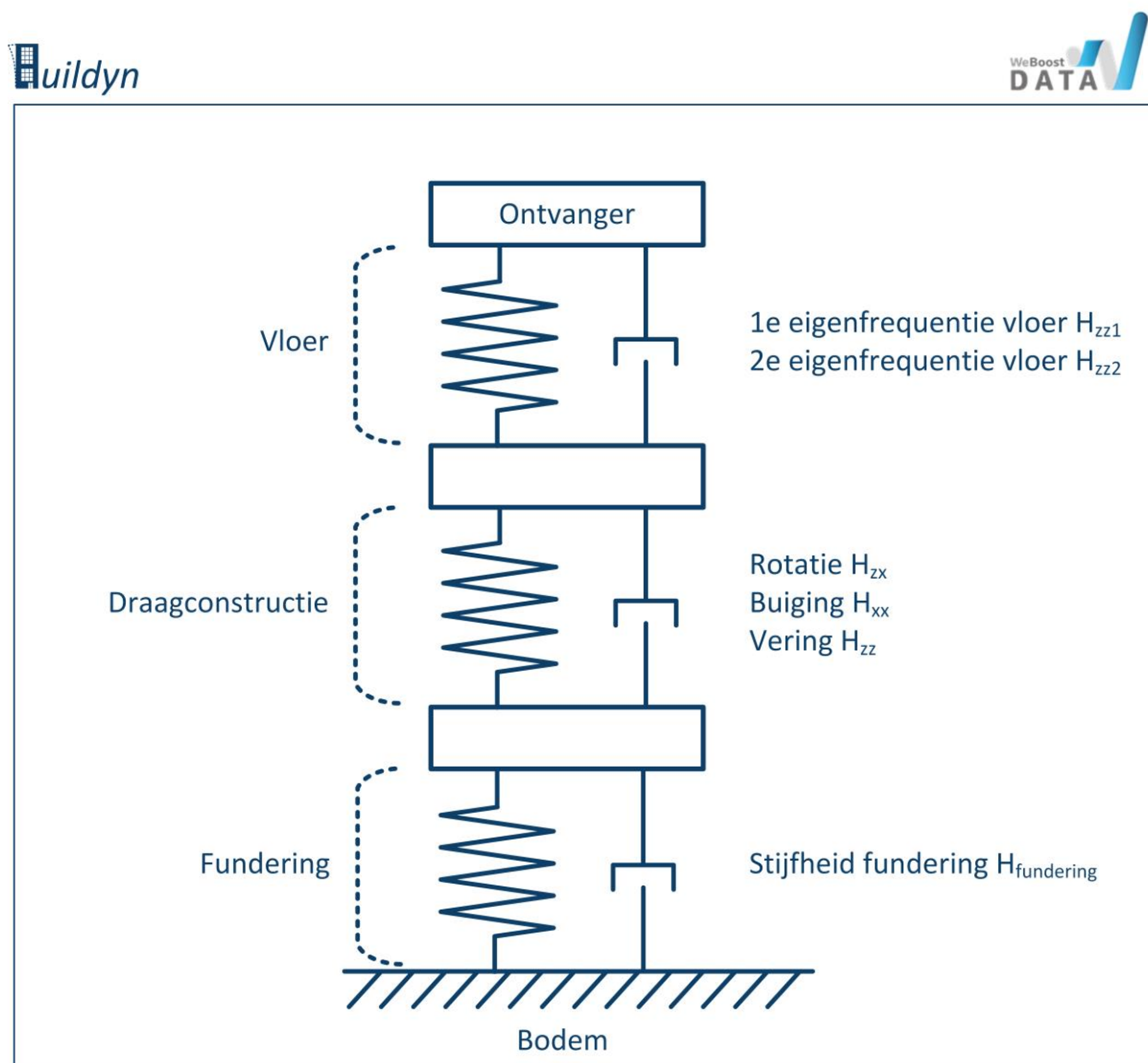


Figuur 8 Sondering nabij het onderzoeksgebied, CPT000000011110

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 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)
- 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.

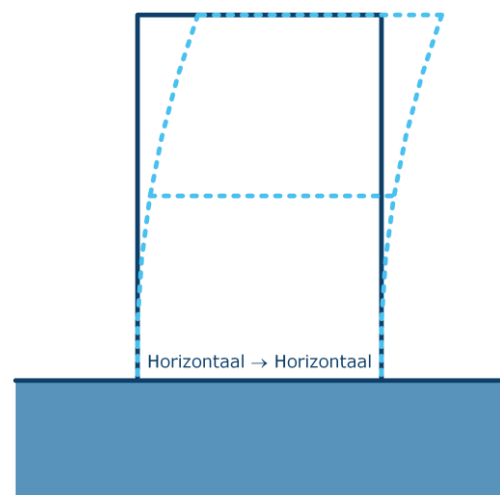
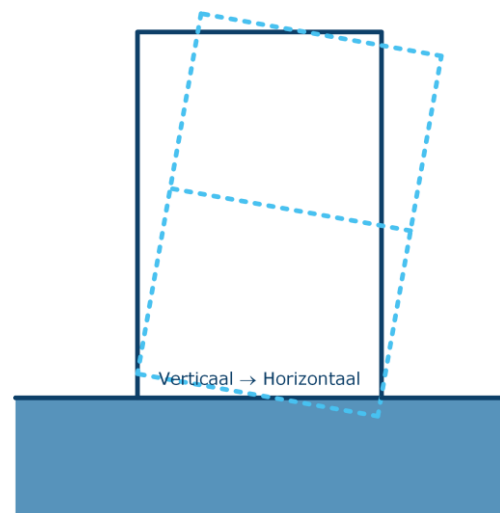
Dit effect noemen we H_{zx} , en is afhankelijk van:

- 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.

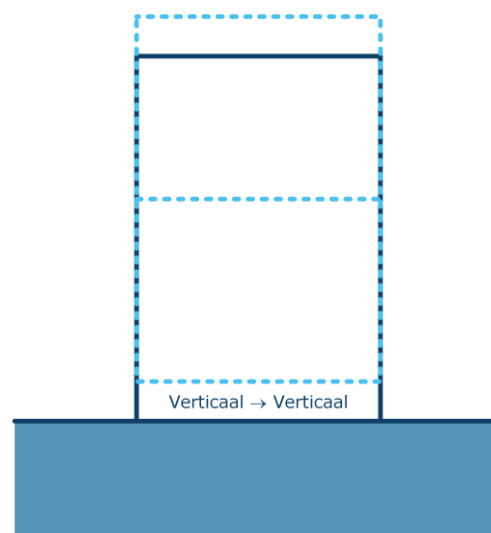
Dit effect noemen we H_{xx} , en is afhankelijk van:

- 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)



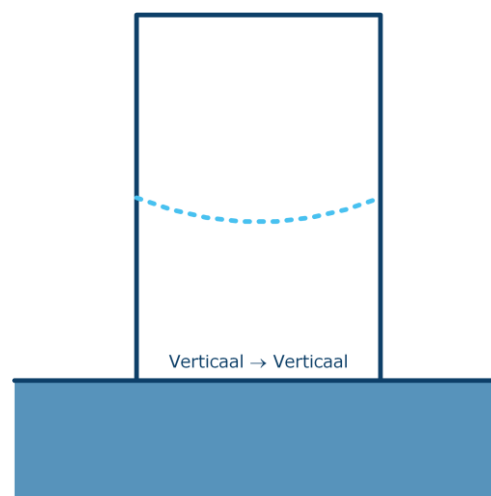
Vloeren

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:

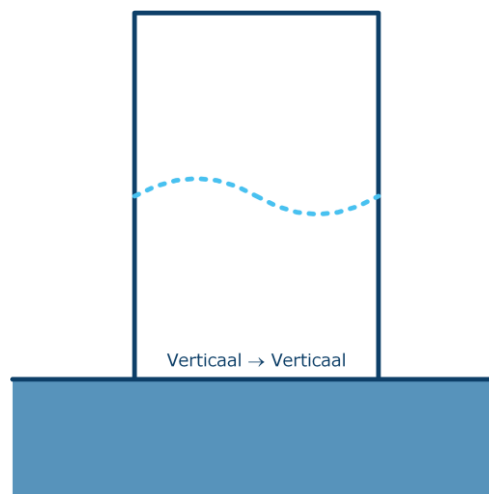
- Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- Afmetingen van de vloer
- Type oplegging



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.

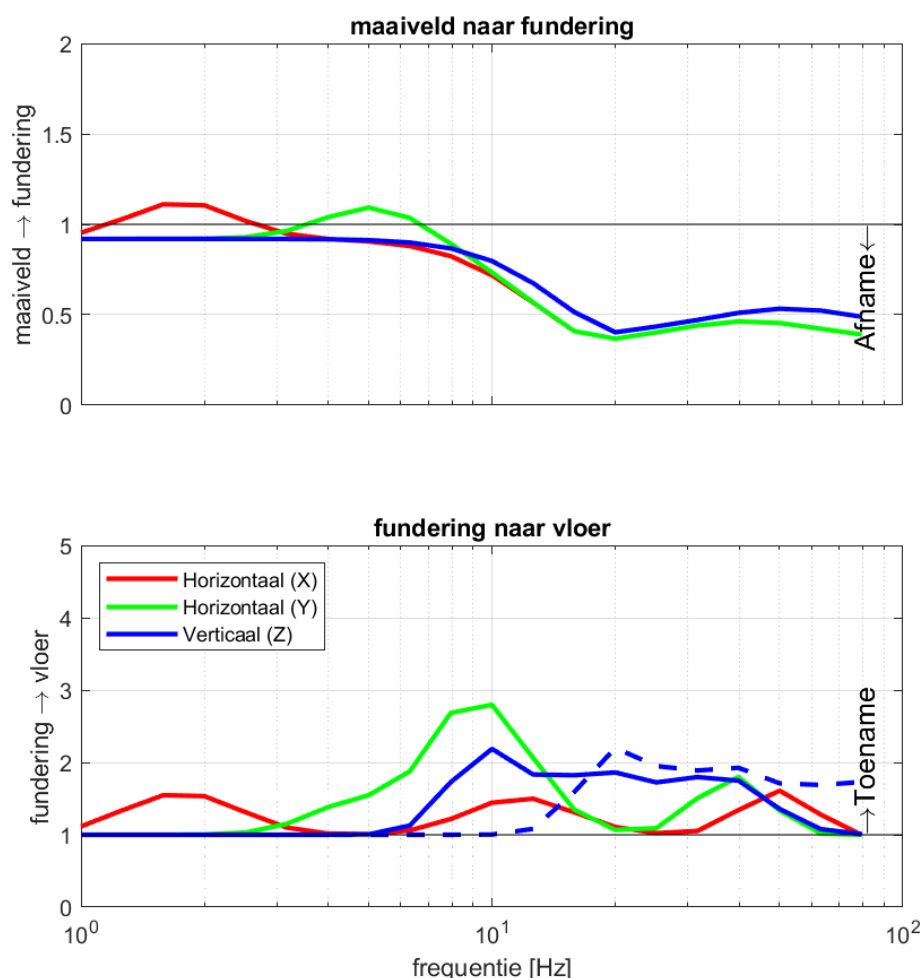
Dit effect noemen we H_{zz2} , en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1} .

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 varianten (prefab beton, 250 mm breedplaatvloer) weergegeven in Figuur 10.

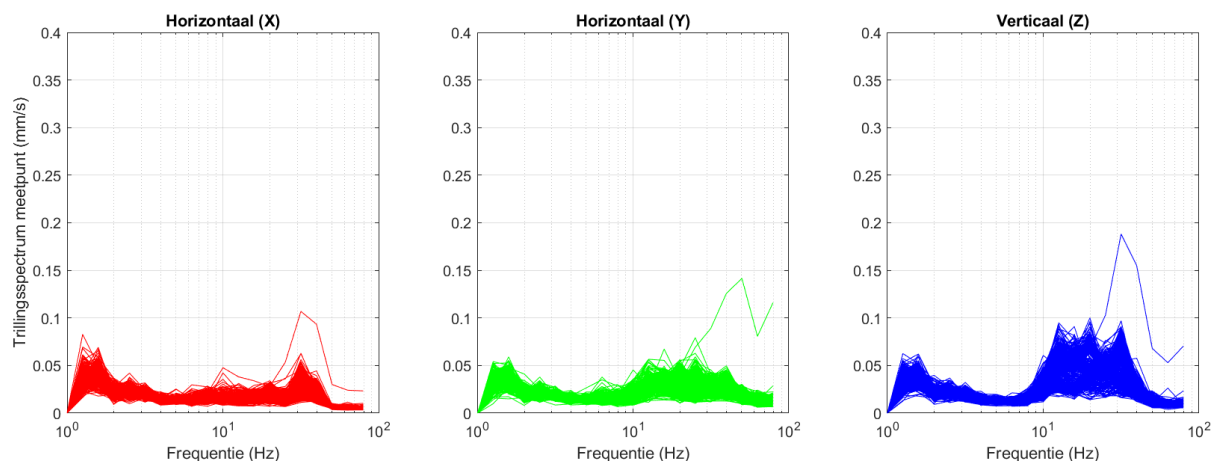


Figuur 10 Rekenresultaten voor het gebouwedrag (boven overdracht van maaiveld naar fundering, onder van fundering naar vloer op hoogste verdieping). Onderbroken lijn is kwart van vloerveld

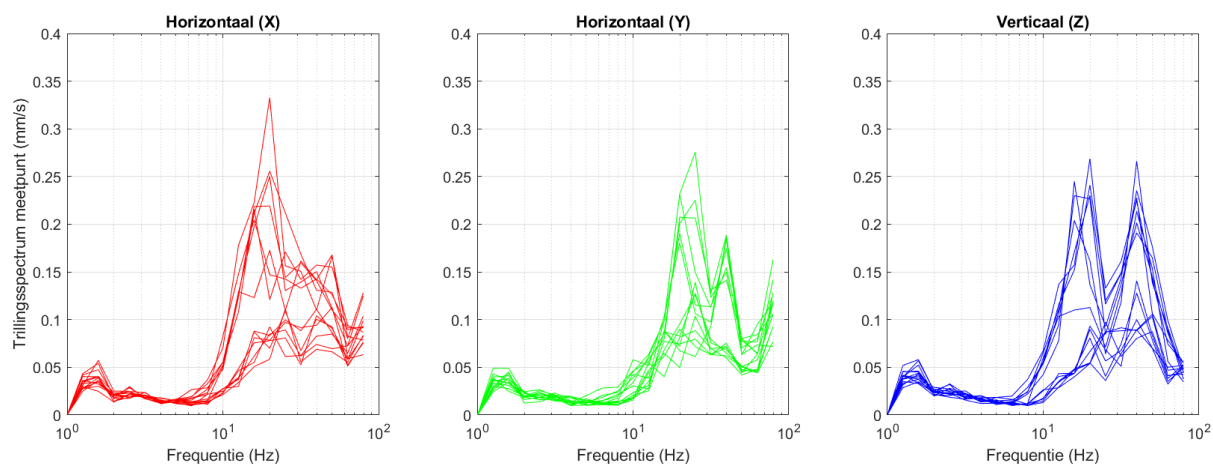


Resultaten metingen

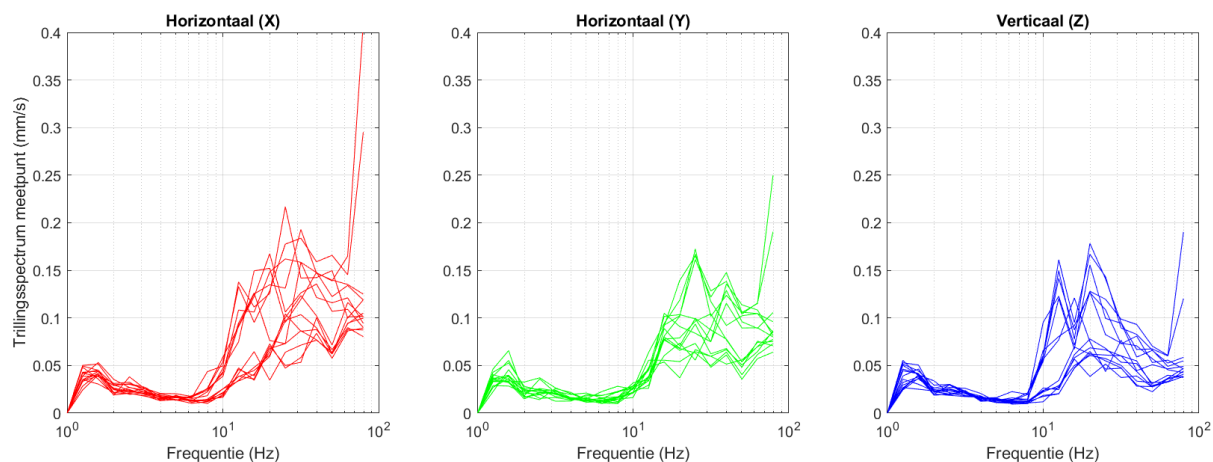
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de tertsbandspectra van de gemeten trillingen per treinpassage weergegeven.



Figuur 11 Tertsbandspectra bij meetpunt 1



Figuur 12 Tertsbandspectra bij meetpunt 2



Figuur 13 Tertsbandspectra bij meetpunt 3