

DE REIGERSTRAAT DELDEN

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	WBD2021-029
Versienr	1.0
Datum	16 juli 2021
Status	Vrijgegeven
Opdrachtgever	Aveco de Bondt



© 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

Centraal in Delden wordt nieuwbouw gerealiseerd met appartementen en grondgebonden woningen. In het plangebied aan weerszijden van De Reigerstraat staan een sporthal en een school. De geplande nieuwbouw ligt in de nabijheid van de spoorlijn Zutphen – Hengelo. 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, passend binnen de stedenbouwkundige uitwerking, zodat dit trillingsonderzoek bruikbaar is voor verschillende uitwerkingen.

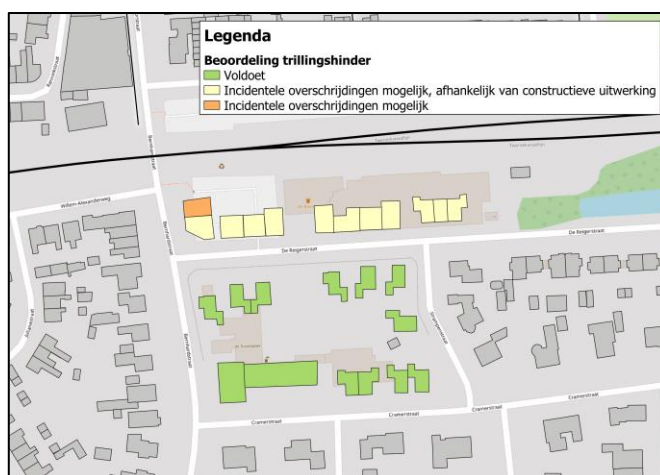
Conclusies

De belangrijkste conclusie van het onderzoek is dat overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder voor nieuwe situaties in de eerstelijnsbebouwing niet zijn uit te sluiten. Het gaat om een beperkt aantal overschrijdingen (maximaal 4 per week, dus minder dan 1 per dag), afhankelijk van de verdere constructieve uitwerking van de plannen.

De overschrijdingen zijn vooral het gevolg van goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte. Verder zijn de trillingen rond de overweg wat hoger.

Omdat de trillingen niet voldoen aan het beoordelingskader, hebben wij een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. De belangrijkste conclusies daarvan zijn:

1. Maatregelen aan het spoor of de treinen vallen buiten de planologische grenzen van het onderzoeksgebied, hebben vaak onvoldoende effect en brengen zeer hoge kosten met zich mee. Deze maatregelen, zoals het aanbrengen van een betonplaat onder het spoor of rubberen matjes onder de dwarsliggers (under sleeper pads), zijn daarom niet doelmatig.
2. Maatregelen in de bodem zijn al snel onvoldoende effectief en zeer kostbaar. De enige voldoende effectieve maatregel in de bodem (met rubber bekleed betonnen trillingsscherm van 10 meter diep op de noordelijke perceelgrens) kost meer dan € 80.000 per woning met een overschrijding. Maatregelen in de bodem zijn, gezien de hoge kosten en het incidentele aantal overschrijdingen, daarom ook niet doelmatig.
3. Met constructieve optimalisaties van het ontwerp zijn de trillingen wel te reduceren. Denk dan aan het verzwaren van de constructie (fundering, vloeren) en het vermijden



van open, lichte of slappe constructies (zoals houtskelet- of open staalbouw). Een echt effectieve maatregel is het afveren van de woningen (toepassen van trillingsisolatie tussen de fundering), maar de kosten van deze maatregel bedragen tussen de € 10.000 en € 25.000 per woning.

Aanbevelingen

Op basis van dit onderzoek adviseren wij bij de verdere uitwerking van de plannen het volgende te doen:

1. Zorg bij de verdere constructieve uitwerking van het plan ervoor dat de woningen qua trillingen zo optimaal mogelijk worden geconstrueerd:
 - a. Pas bij de **grondgebonden woningen** geen houtskeletbouw of open staalbouw toe, en bij de eerstelijnsbebouwing liefst wat zwaardere bouw (betonnen skelet). Met deze randvoorwaarden zijn overschrijdingen te voorkomen (waterpartij voor deze woningen fungeert ook al deels als trillingsdempende maatregel).
 - b. Pas bij de **appartementen** breedplaatvloeren toe, door de hogere stijfheid en demping zijn de trillingen lager dan bij kanaalplaatvloeren. Zorg voor een wat grotere dikte dan constructief benodigd, bijv. minimaal 280 mm. Met deze randvoorwaarden zijn overschrijdingen te voorkomen, met uitzondering van de 3 appartementen dichtbij de spoorwegovergang.
2. Overweeg aanvullende maatregelen bij de **appartementen** dichtbij de spoorwegovergang:
 - a. Een zwaardere fundering, bijvoorbeeld een 500 of liever 700 mm betonnen plaatfundering, een paalfundering met minimaal 500 mm dikke palen, of onderkeldering.
 - b. Als een zwaardere fundering niet mogelijk is, overweeg dan om dit gebouw af te schermen met een maatregel in de bodem. In combinatie met de hierboven genoemde constructieve randvoorwaarden kunnen overschrijdingen worden voorkomen door het realiseren van 3 meter diepe L-wand op de rand van het perceel, of dicht bij de bebouwing (mits een luchtsouw tussen de L-wand en de fundering van het pand wordt toegepast).
 - c. Meest effectief, robuust en toekomstvast is het afveren van de gebouwen. Hierbij worden stalen veerdozen (afgeveerd op maximaal 4 Hz) geplaatst tussen de fundering (tussen paalkoppen en randbalken). Dit is een zeer effectieve maatregel, waarmee de trillingen lager zijn dan de streefwaarden, maar de kosten van deze maatregel zijn met € 10.000 tot € 25.000 per woning hoog.

In het afwegen van de doelmatigheid van optimalisaties en maatregelen, kunnen, naast de kosten en impact op het realisatieproces de volgende trillingsaspecten worden meegewogen:

1. Het gaat om een beperkt aantal overschrijdingen (maximaal 4 per week, dus minder dan 1 per dag in de woningen het meest dichtbij de overweg), veroorzaakt door goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte. De trillingen van de meeste goederentreinen en alle reizigerstreinen voldoen wel aan het beoordelingskader.
2. De trillingen voldoen weliswaar niet aan de strenge streefwaarden voor nieuwbouw uit de SBR B-richtlijn, maar wel aan de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties uit de SBR B-richtlijn. In die soepeler streefwaarden voor bestaande situaties is een zekere mate van gewenning meegenomen.
3. De woningen worden gerealiseerd in een zone dichtbij het spoor, waar nu ook al bebouwing is gerealiseerd die dicht bij het spoor staat. Het gaat bovendien om oude, meer trillingsgevoelige bebouwing, waar de trillingen dus significant hoger zullen zijn dan in de nieuwe woningen. Ook zonder maatregelen tegen trillingen kan worden beargumenteerd dat er in de geplande bebouwing daarom geen onacceptabele situatie ontstaat: de trillingen zijn immers lager dan in andere, al bestaande bebouwing rond deze locatie.

Samenvatting

Samengevat geldt dat de trillingen niet voldoen aan het beoordelingskader, de SBR B-richtlijn. Met relatief eenvoudige constructieve optimalisaties (geen lichte constructies toepassen, wat dikkere breedplaatvloeren bij de appartementen) is voor vrijwel alle woningen te voldoen aan het beoordelingskader, met uitzondering van de appartementen dichtbij de spoorwegovergang. Om de trillingen ook daar te laten voldoen aan het beoordelingskader is een zwaardere fundering nodig, het afschermen van het gebouw door een trillingsscherm in de bodem of het afveren van de fundering. Met deze maatregelen zijn de trillingen in alle gebouwen te reduceren tot onder de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn. Of deze constructieve optimalisaties of maatregelen doelmatig zijn, hangt af van de verdere uitwerking van de plannen. In ieder geval bevat dit rapport de handvatten waarmee een constructeur of architect de plannen verder kan uitwerken, en waarmee de initiatiefnemer maatregelen of optimalisaties kan afwegen op doelmatigheid.

Ook wanneer uiteindelijk geen maatregelen zouden worden getroffen, is op basis van een motivatie met verwijzing naar meer trillingsgevoelige bebouwing op dezelfde afstand van het spoor rond het plangebied, hoge kosten van maatregelen en het beperkte aantal overschrijdingen, te motiveren dat er geen onacceptabel woon- en leefklimaat ontstaat in de geplande woningen.

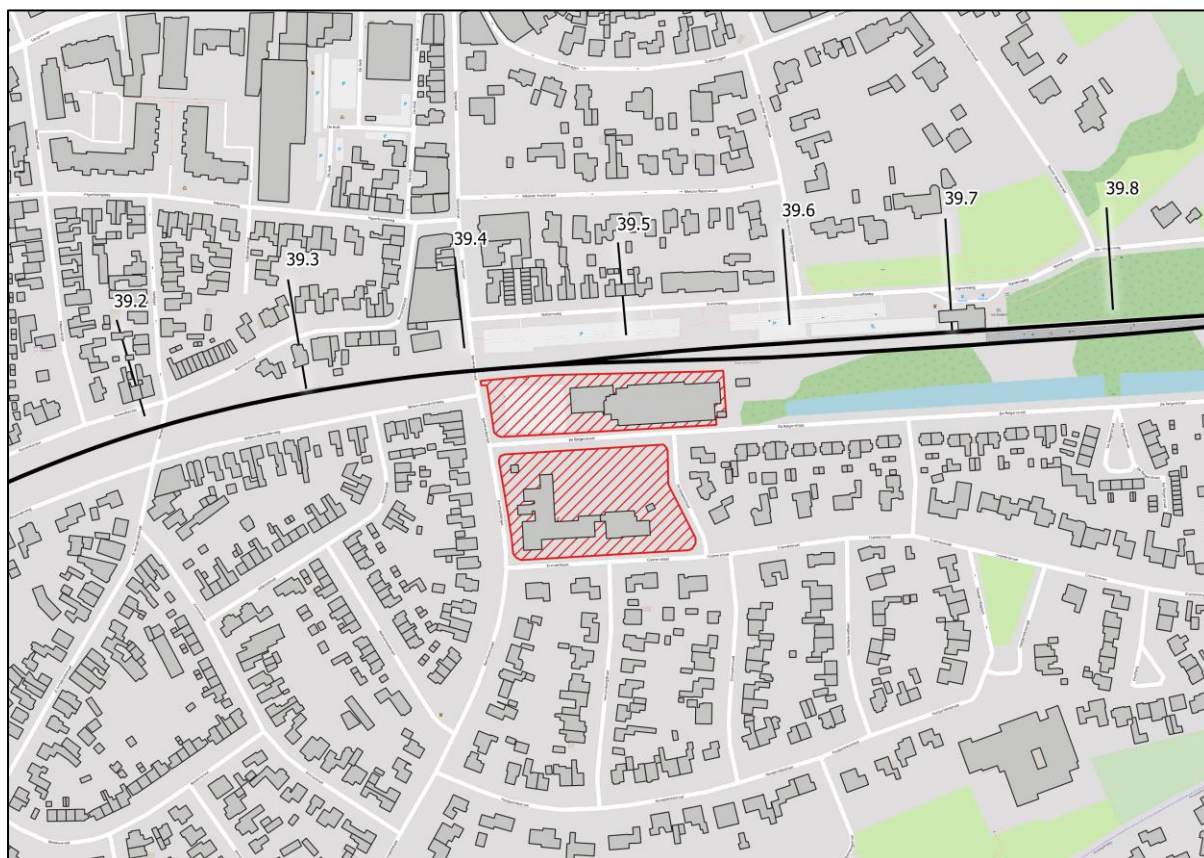
Inhoudsopgave

1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding	7
1.2	Doel	7
1.3	Leeswijzer	7
2	Situatie en uitgangspunten	9
2.1	Situatie	9
2.2	Uitgangspunten	10
3	Beoordelingskader	12
3.1	Beoordelingskader	12
3.2	Rekenmethode	13
4	Verwachte trillingen in de woningen	16
4.1	Meetresultaten	16
4.2	Trillingen in geplande nieuwbouw	16
4.3	Maatregelen	19
4.4	Onzekerheden in het onderzoek	25
I	Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek	26
II	Bijlage rekenmodel Buildyn	28
	Fundering	29
	Draagconstructie	29
	Vloeren	30
	Resultaten	31
III	Resultaten metingen	32
IV	Principedetails maatregelen	36

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Centraal in Delden wordt nieuwbouw gerealiseerd met appartementen en grondgebonden woningen. In het plangebied aan weerszijden van De Reigerstraat staan momenteel een sporthal en een school. De geplande nieuwbouw ligt in de nabijheid van de spoorlijn Zutphen – Hengelo, 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 De Reigerstraat Delden

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.

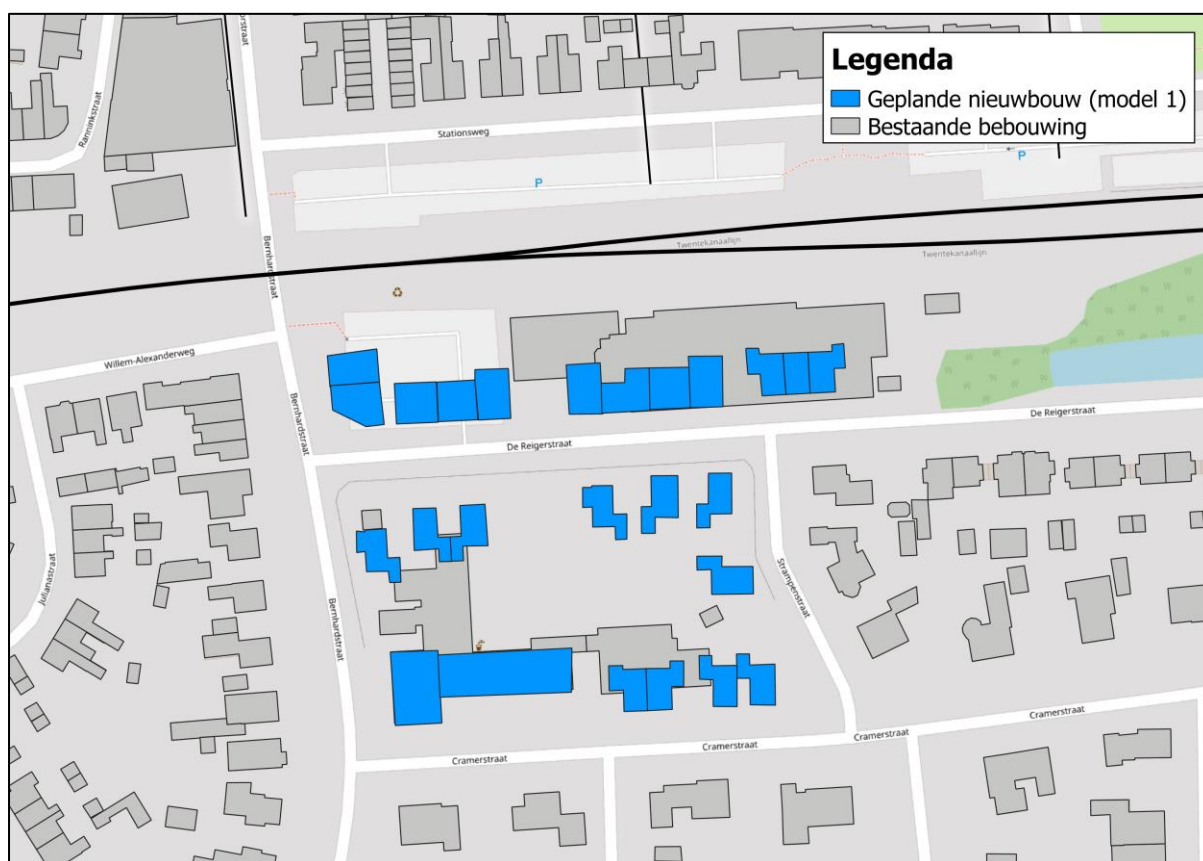
De bijlages bevatten technische informatie van het onderzoek, zoals een toelichting op de rekenmethodiek en grondonderzoek van nabijgelegen locaties.

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 een sporthal en een schoolgebouw. De sporthal wordt gesloopt en het schoolgebouw wordt getransformeerd of gesloopt, waarna nieuwbouw wordt gerealiseerd in de vorm van appartementen (max. 3 bouwlagen) en grondgebonden woningen (max. 3 bouwlagen). Vanwege de onzekerheid over de sloop of transformatie van het schoolgebouw zijn er nog 2 verkavelingsopties, optie 1 is weergegeven in Figuur 2. In optie 2 wordt de school gesloopt, en komen hiervoor in de plaats 4 vrijstaande woningen.



Figuur 2 Bestaande en toekomstige bebouwing conform model 1

De geplande nieuwbouw bevindt zich in een zone van 20 tot 100 meter van het spoor. De rijsnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. Deze gegevens zijn gebaseerd op het geluidsregister spoor en gegevens van de vervoerders. Volgens de NMCA spoor 2030-2040 (vooruitblik voor goederenvervoer) blijft het goederenverkeer beperkt tot maximaal 2 treinen per dag. Er wordt geen verandering in het aantal reizigerstreinen voorzien.

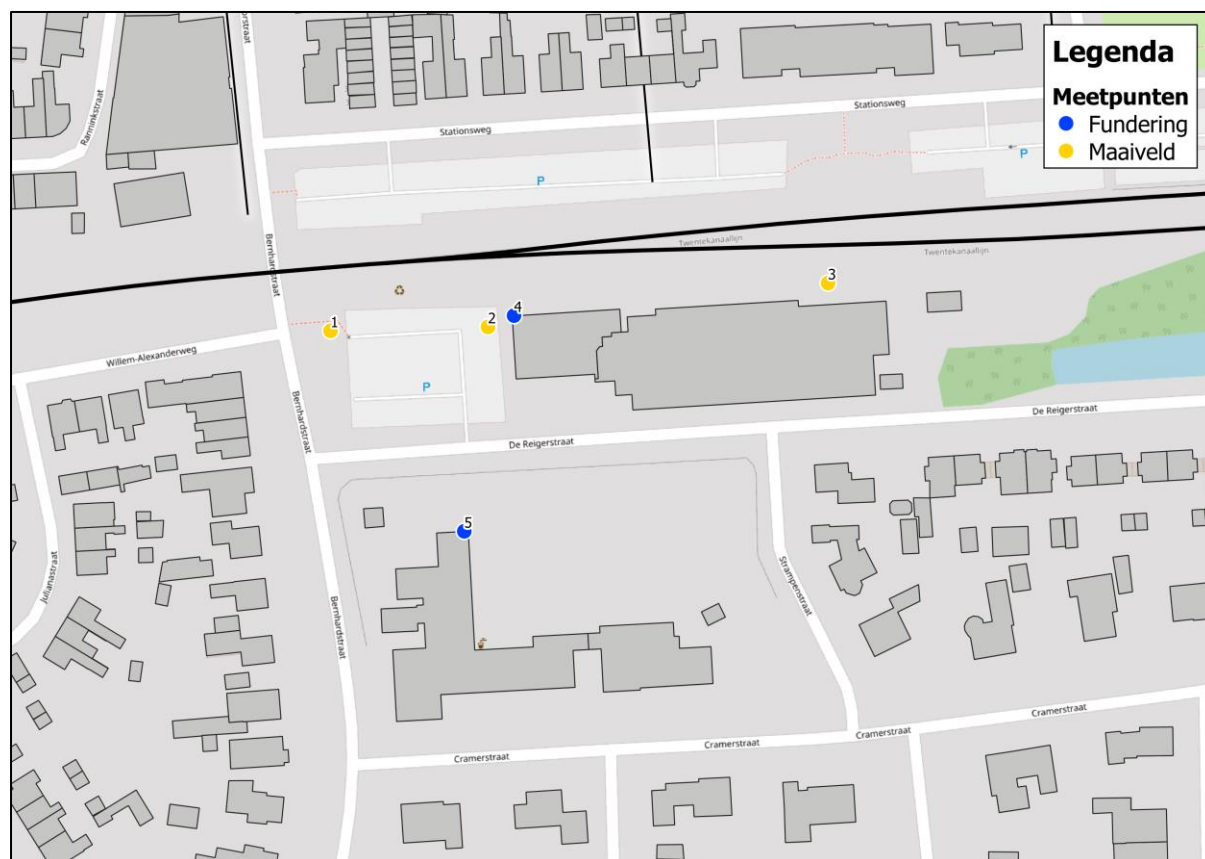
Parameter	Eigenschappen
	Houtskeletbouw
Fundering	Op palen
Stijfheid gebouwen	Afhankelijk van de variant, betonnen skelet, kalkzandsteen/metselwerk of HSB stabiliteitswanden.

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 vijf punten, zie Figuur 4. De metingen zijn uitgevoerd van 29 juni tot en met 6 juli 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:

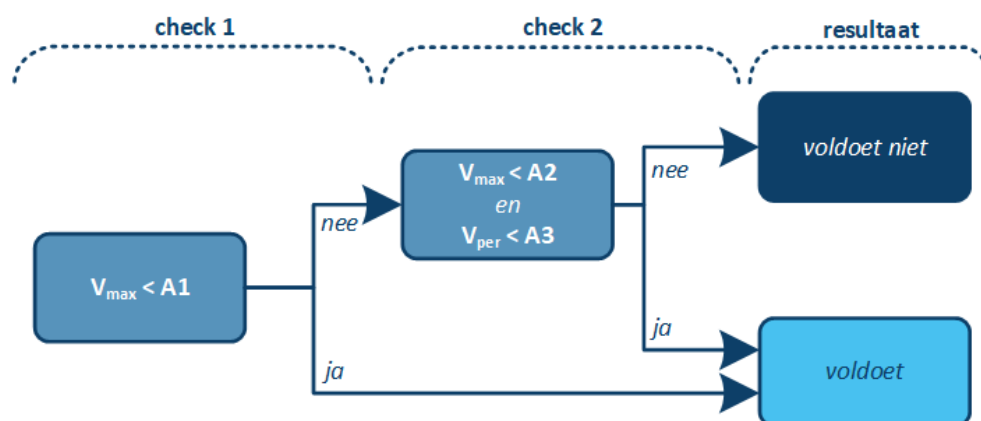
1. De richtlijn toetst zowel een maximaal optredende trillingssterkte (V_{max} , treedt op bij de trein die gedurende de meetperiode de hoogste trillingen veroorzaakt) als het tijdsgemiddelde van de trillingen (V_{per} , deze grootheid is in tegenstelling tot V_{max} dus ook afhankelijk van het aantal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

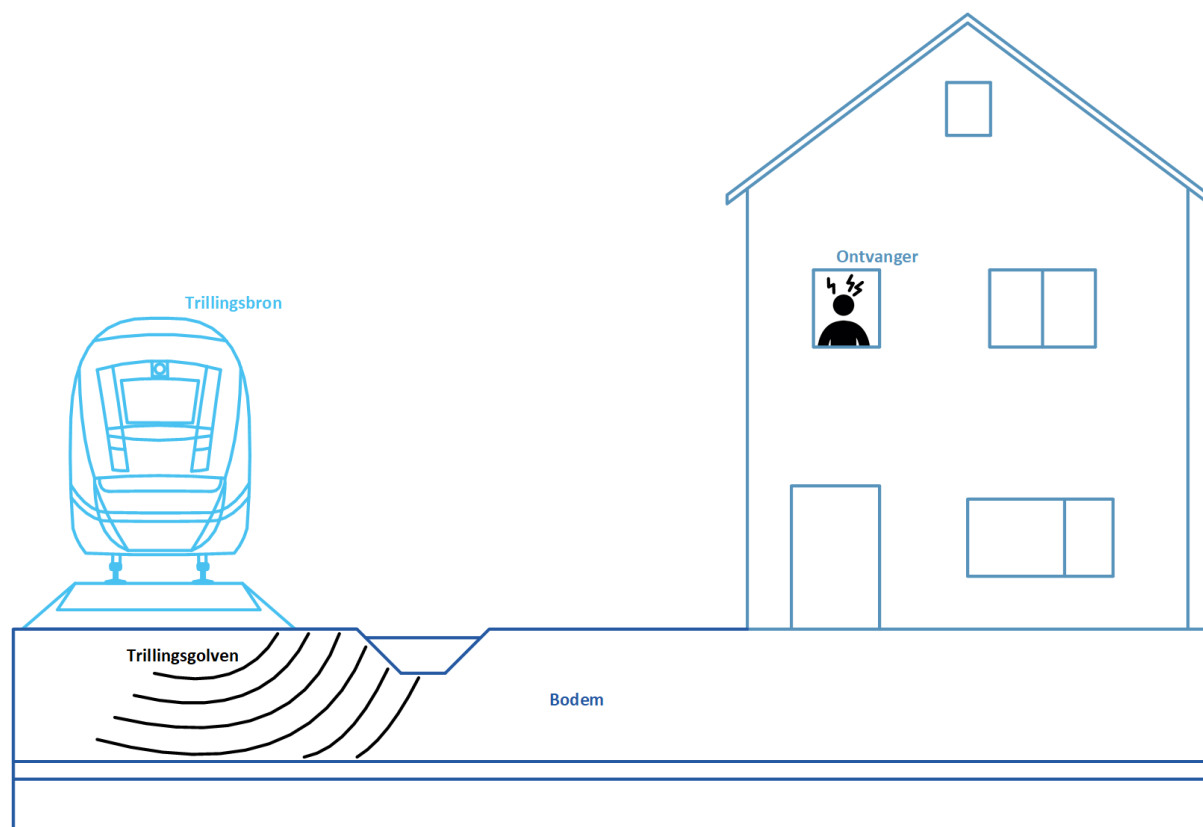
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde gebouwen, wordt op basis van metingen in de omgeving van de bebouwing (op maaiveld en aan bestaande gebouwen) een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande 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 system van trillingsbron, de bodem als doorgeefmedium en het gebouw als ontvanger

3.2.2 De trillingsbron

In dit onderzoek zijn treinen de bron van de trillingen. De trillingen van het treinverkeer zijn gemeten door Alcedo op meerdere punten op maaiveld in het plangebied en aan de fundering van bestaande bebouwing, 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 uit een combinatie van leem-, klei- 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.

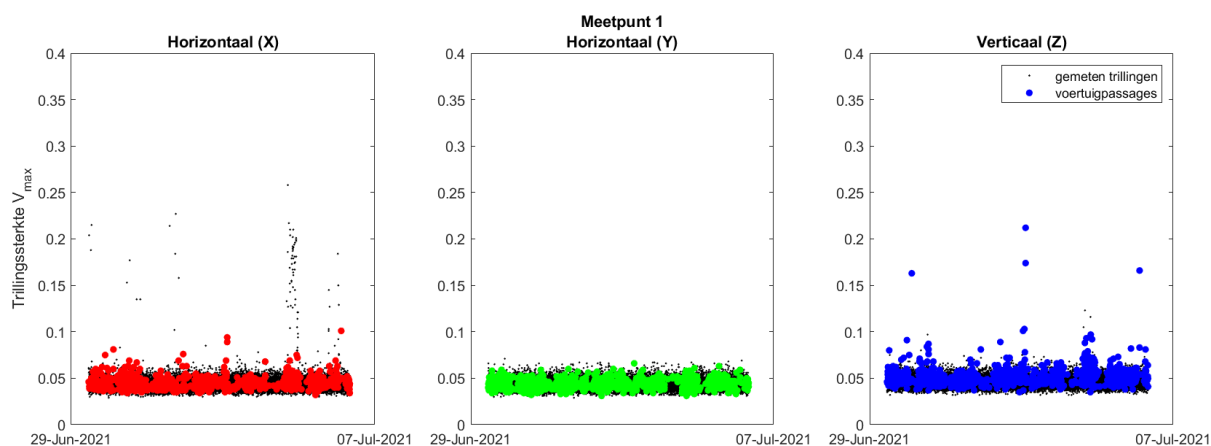
4 Verwachte trillingen in de woningen

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 twee bestaande panden en op maaiveld in de nabijheid van de onderzoekslocatie. De trillingen aan de fundering van de sporthal (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 maatgevend in verticale Z-richting. De hoogste trillingen worden veroorzaakt door enkele passerende goederentreinen met afwijkende trillingssterkte.
2. De trillingen van de meeste treinen zijn vergelijkbaar met de achtergrondtrillingen. Dit komt vooral doordat zwaar wegverkeer over de nabijgelegen spoorwegovergang voor hoge trillingen kan zorgen. Dit is vooral zichtbaar bij de horizontale trillingen. De trillingen van reizigerstreinen zijn laag door de lichte treinen en lage rijdsnelheid.



Figuur 7 Gemeten trillingen aan fundering sporthal (De Reigerstraat 1)

4.2 Trillingen in geplande nieuwbouw

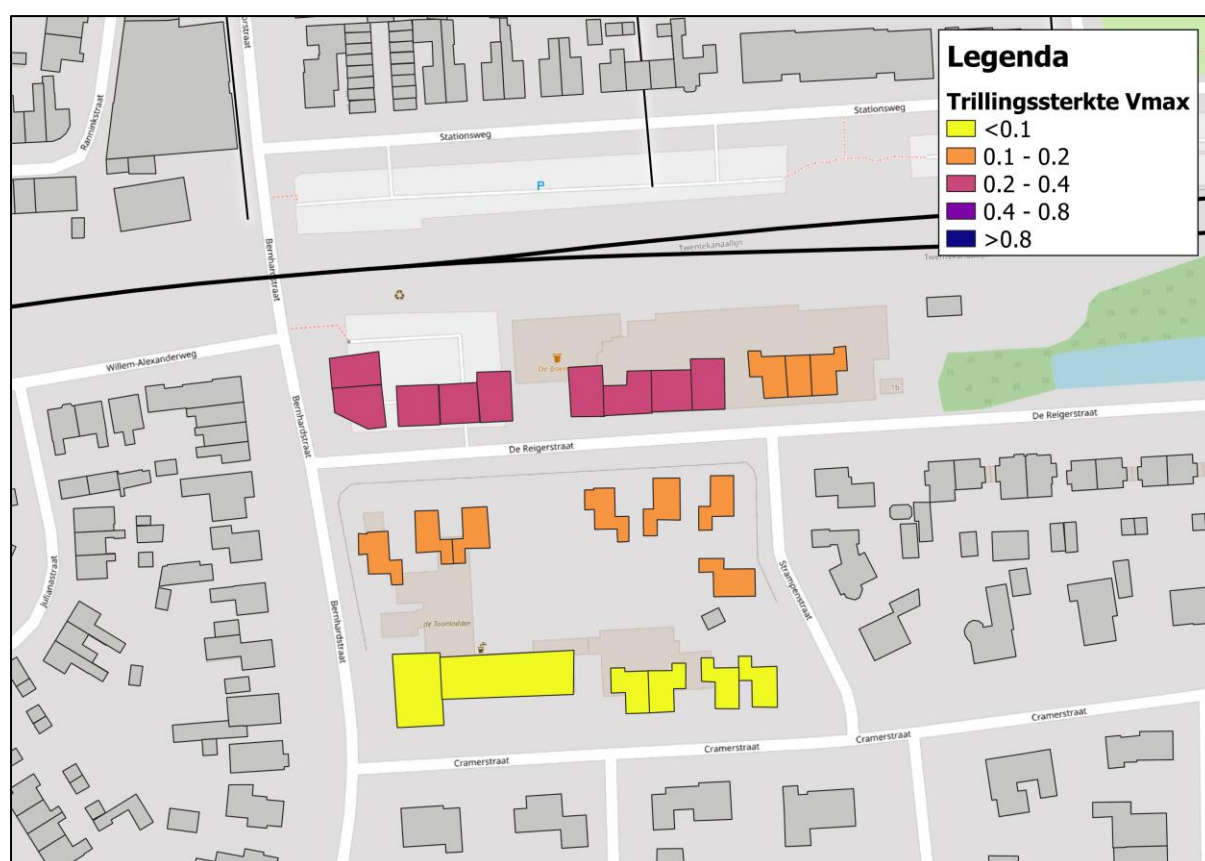
De geplande bebouwing is gemodelleerd op basis van de informatie uit Tabel 2. Het (frequentie-afhankelijke) gedrag van de geplande bebouwing is weergegeven in bijlage II. Met deze resultaten is bepaald in welke mate de trillingen worden versterkt tussen de huidige meetpunten en de vloeren in de toekomstige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

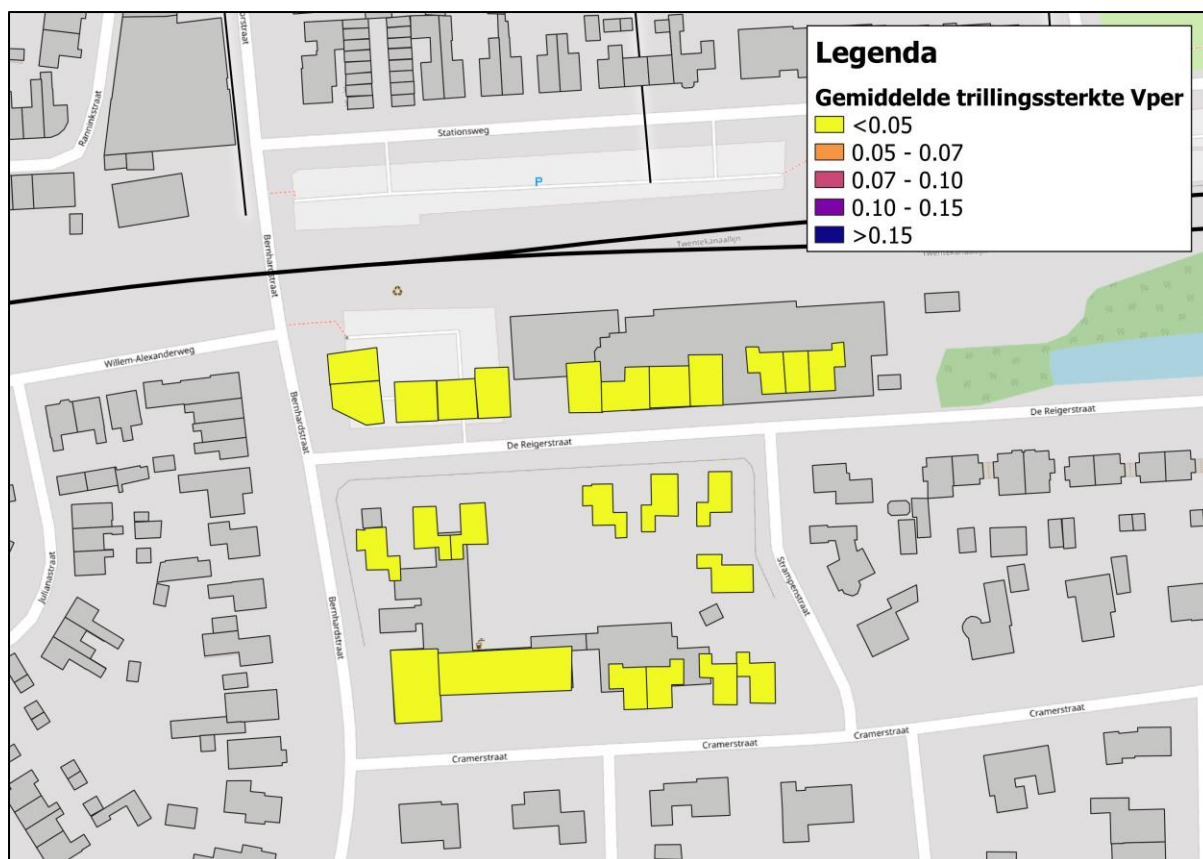
Tabel 4 Trillingen per type bouwconcept en beoordeling op SBR B-richtlijn

Bouwconcept	V_{max}	V_{per}	Beoordeling
Grondgebonden woningen			
Kalkzandsteen en kanaalplaatvloeren	0.1 – 0.2	0.01	Voldoet
Prefab beton met breedplaatvloeren	0.1 – 0.2	< 0.01	Voldoet
Houtskeletbouw	0.2 – 0.3	0.01 – 0.02	Voldoet niet, incidentele overschrijdingen mogelijk
Appartementen			
Kalkzandsteen en kanaalplaatvloeren	0.2 – 0.4	0.01 – 0.02	Voldoet niet, incidentele overschrijdingen mogelijk
Beton met breedplaatvloeren	0.2 – 0.4	< 0.01	Voldoet niet, incidentele overschrijdingen mogelijk
Houtskeletbouw	0.2 – 0.4	0.01 – 0.02	Voldoet niet, incidentele overschrijdingen mogelijk

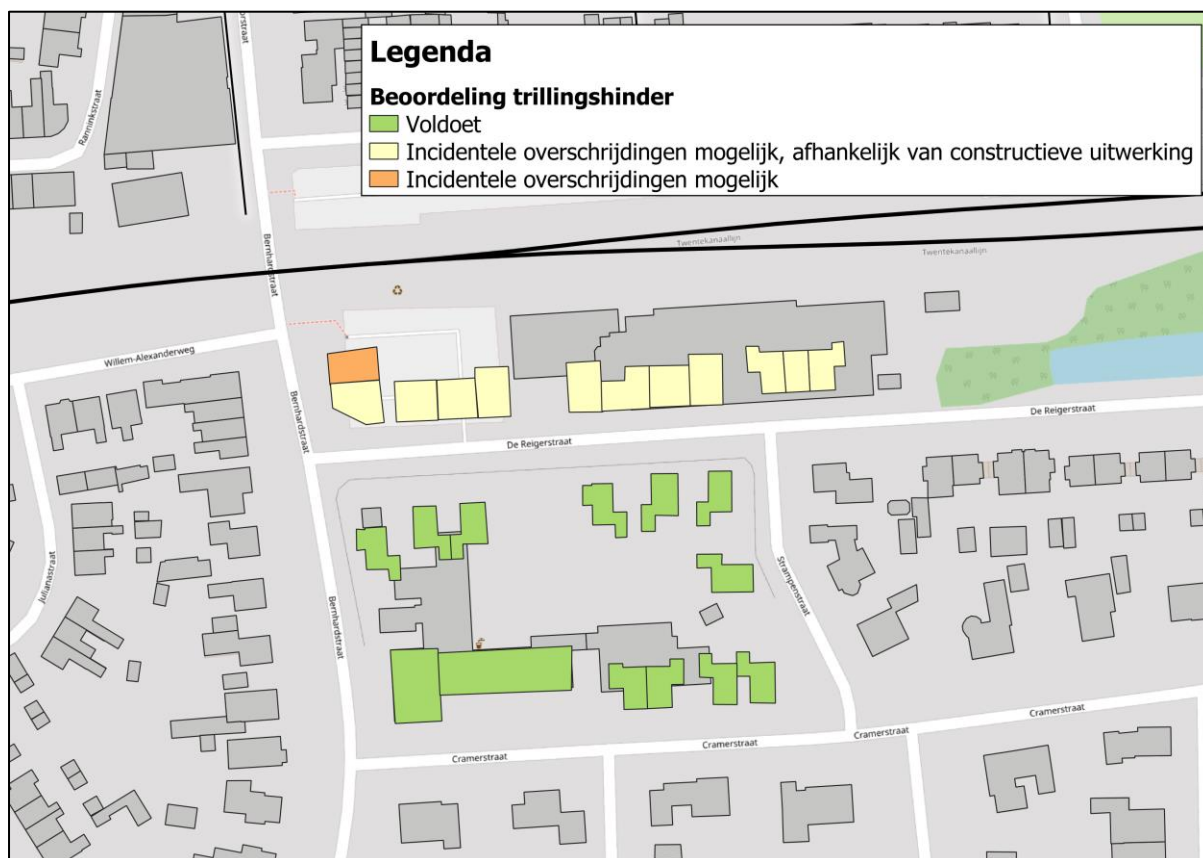
De resultaten hebben we grafisch weergegeven in Figuur 8 en Figuur 9 voor een conventioneel bouwconcept (betonnen casco met 200 (grondgebonden woningen) of 260 mm (appartementen) kanaalplaatvloeren). In de figuren is de bovengrens van de bandbreedte van de verwachte trillingen weergegeven. Een beoordeling van de trillingen voor alle bouwconcepten is weergegeven in Figuur 10.



Figuur 8 Bovengrens van de trillingssterkte V_{max} voor exploitatiemodel 1, conventioneel bouwconcept met kanaalplaatvloeren en prefab betonnen skelet



Figuur 9 Bovengrens van de gemiddelde trillingssterkte V_{per} voor exploitatiemodel 1, conventioneel bouwconcept met kanaalplaatvloeren en prefab betonnen skelet



Figuur 10 Beoordeling van de trillingen voor exploitatiemodel 1

Uit Tabel 4 en de hiervoor weergegeven figuren volgt dat er incidentele overschrijdingen van de streefwaarden kunnen optreden. Samengevat geldt het volgende:

1. De trillingssterkte V_{max} kan in de eerstelijnsbebouwing hoger zijn dan de streefwaarde A2 voor de nacht (0.2). Hier wordt dus, afhankelijk van de constructieve uitwerking van de gebouwen, mogelijk *niet voldaan* aan het beoordelingskader. Dit komt door de passage van enkele goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte. Rond de overweg, die een extra bron van trillingen is, zijn de trillingen daarbij iets hoger.
2. Alleen incidentele, qua trillingen afwijkende passages van goederentreinen zorgen mogelijk voor overschrijdingen van de streefwaarden. Het gaat hierbij om minder dan 1 overschrijding per dag. De overschrijdingen worden veroorzaakt door treinen die 's nachts passeren. Overdag wordt voldaan aan het beoordelingskader voor trillingen.
3. De constructieve uitwerking van de gebouwen heeft veel invloed op de trillingen:
 - a. Voor de grondgebonden woningen geldt dat alleen bij houtskeletbouw (licht bouwconcept) niet wordt voldaan aan het beoordelingskader, bij concepten met betonnen vloeren worden er geen overschrijdingen verwacht. De trillingen zijn bij de eerstelijnsbebouwing lager door de spoorsloot die daar wordt gerealiseerd, deze schermt de woningen af en zorgt voor wat lagere trillingen.
 - b. Voor de appartementen geldt dat bij een bouwconcept met breedplaatvloeren wordt voldaan aan het beoordelingskader in vrijwel alle appartementen, uitgezonderd de 3 appartementen die het dichtst bij de overweg liggen.

4.3 Maatregelen

Door de passage van enkele goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte wordt niet in alle woningen in het plan voldaan aan het beoordelingskader. Daarom hebben we een maatregelafweging uitgevoerd. Deze afweging beschrijven we in deze paragraaf.

Voor de afweging van maatregelen geeft bijlage 5 van de SBR B-richtlijn handvatten. Deze bijlage classificeert de trillingen in het plangebied als *matige hinder*. Vervolgens geeft deze bijlage aan dat matige hinder kan worden geaccepteerd onder een aantal voorwaarden:

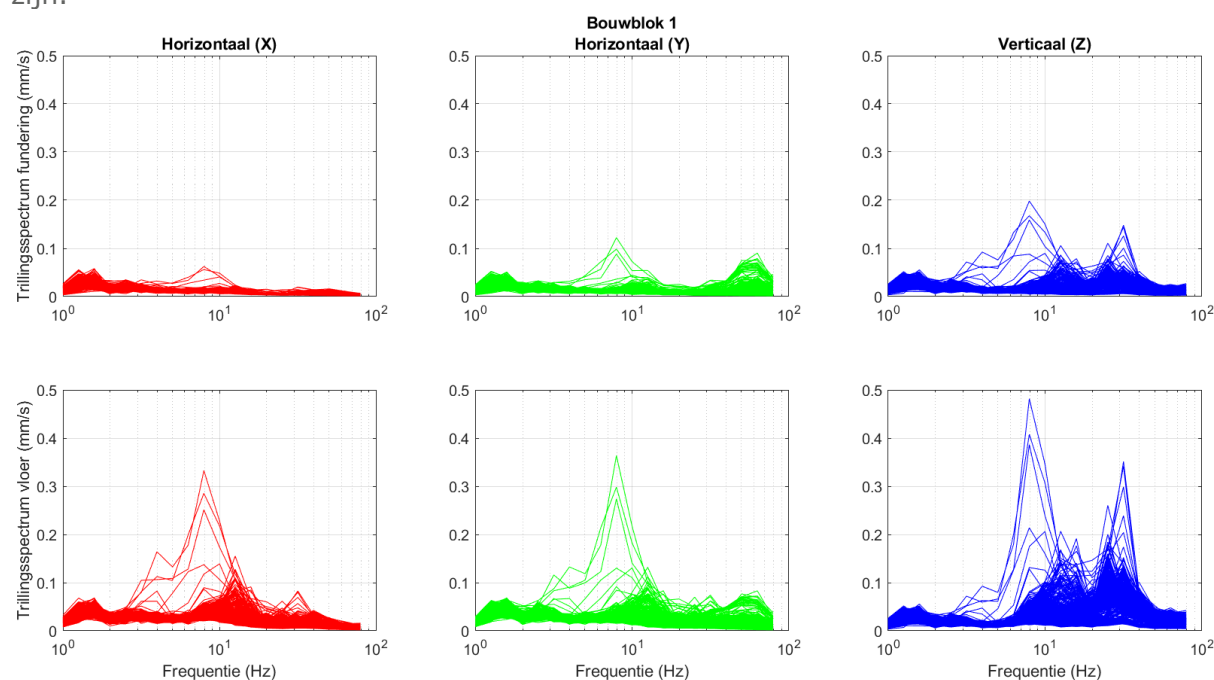
1. De mate waarin de trillingssterkte voorkomt. Hiervoor geldt dat de gemiddelde trillingssterkte V_{per} een goede indicatie is. Die is laag (V_{per} bedraagt maximaal 0.02, dus veel lager dan de streefwaarde van 0.05). Verder gaat het om een beperkt aantal overschrijdingen: in de appartementen met de meeste overschrijdingen gaat het om minder dan 1 trein per dag. Het incidentele karakter van de overschrijdingen in combinatie met de lage waarde van de gemiddelde trillingssterkte V_{per} kan het achterwege laten van een maatregel rechtvaardigen.
2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. Vooral rond de overweg (waar de trillingen van de treinen ook hoger zijn) zorgt wegverkeer ook voor hogere trillingen. De trillingen van de treinen zijn echter hoger dan de trillingen van wegverkeer, zodat er van een maskerend effect geen sprake is (dit is eerder een extra reden om bij deze bouwblokken extra aandacht te besteden aan het voorkomen van trillingen).

3. De mogelijkheid tot het treffen van reducerende maatregelen. Het is conform bestaande jurisprudentie gebruikelijk om hierbij een afweging te maken tussen de kosten en het effect van de maatregelen, maar ook aspecten als duurzaamheid en impact op de omgeving kunnen worden meegenomen in deze afweging.

Omdat voorwaarde 2 niet van toepassing is, gaan we hierna in op maatregelen om de trillingen te reduceren. Om effectieve maatregelen te treffen, doen we eerst een nadere analyse van de verwachte trillingen. Zo stellen we vast bij welke trillingsfrequenties vooral hoge trillingen optreden. Daarna gaan we in op maatregelen die mogelijk zijn aan de trillingsbron (de trein of het spoor), maatregelen in de bodem en maatregelen aan de gebouwen.

4.3.1 Analyse resultaten

Om te bepalen welke trillingsrichting en trillingsfrequenties in de gebouwen maatgevend zijn, is een nadere analyse uitgevoerd van de verwachte trillingen, zie Figuur 11. In deze figuur is de trillingssnelheid per treinpassage weergegeven als tertsbandspectrum op de fundering en de hoogste verdieping van de appartementen dichtbij het spoor. Hieruit kan worden afgeleid bij welke frequentie en in welke trillingsrichting de trillingen het hoogst zijn.



Figuur 11 Verwachte trillingen in appartementen dichtst bij overweg

Uit deze analyse volgt dat de hoogste trillingen optreden in zowel de verticale richting, op de hoogste verdieping. Dit komt met name door een combinatie van inverting van het pand en versterking van de trillingen door de vloeren. De trillingen zijn op de fundering al relatief hoog rond 8 en rond 30 Hz, en worden verder versterkt in het gebouw. Maatregelen die genomen worden moeten daarom vooral effectief zijn tegen trillingen bij die frequenties, omdat daar de meeste trillingsenergie zit. In de volgende subparagrafen wordt ingegaan op mogelijke maatregelen aan de trillingsbron, in de bodem of aan de gebouwen.

4.3.2 Maatregelen aan de trillingsbron

De meest effectieve manier om de trillingen te reduceren, is het nemen van maatregelen aan de trillingsbron (het spoor of de treinen), bijvoorbeeld door het toepassen van een zware betonplaat onder het spoor of het verwijderen van de overweg (vervangen door tunnel). Dit zijn zeer kostbare maatregelen met een lange realisatietijd, en forse inpassingsuitdagingen. Goedkopere maatregelen, zoals onder sleeper pads of ballastmatten, zijn onvoldoende effectief tegen de laagfrequente trillingen van de goederentreinen en niet goed toepasbaar rond een overweg (m.n. onder sleeper pads, ballastmatten zijn sowieso lastig inpasbaar in open maaiveldligging).

Nadeel van maatregelen aan het spoor zijn de hoge kosten hiervan (m.n. doordat een buitendienststelling nodig is), bovendien vallen deze maatregelen buiten het plangebied. Gezien de hoge kosten per woning voor deze maatregelen (naar schatting meer dan € 100.000 per woning met een mogelijke overschrijding), en gezien de beperkte en incidentele overschrijdingen zijn maatregelen aan het spoor daarom niet doelmatig.

4.3.3 Maatregelen in de bodem

Bij maatregelen in de bodem kan gedacht worden aan het toevoegen van obstakels in de bodem, die ervoor zorgen dat de gebouwen worden afgeschermd. Voorbeelden zijn het toevoegen van een spoorstoot, een trillingsscherm van piepschuim (EPS), beton, jet-grout (soil-mix methode voor beton) of een damwand. Nadeel van deze maatregelen is dat deze vaak hoge kosten met zich meebrengen en dat ze niet aanpasbaar zijn aan toekomstige situaties (met uitzondering van een spoorstoot).

Een trillingsscherm is alleen effectief dicht bij de bron of dicht bij de ontvanger. Gezien de ligging van het plangebied is de meest voor de hand liggende locatie een positie tussen het spoor en de eerstelijnsbebouwing. Om de woningen van de eerstelijnsbebouwing af te schermen, is een trillingsscherm van ca. 160 meter lengte, zie Figuur 12. Als men ervoor kiest enkel het appartementencomplex nabij de overweg aan de Bernhardstraat af te schermen (omdat in de overige woningen met bouwkundige optimalisaties kan worden voldaan aan het beoordelingskader), dan is een trillingsscherm van ca. 50 meter lengte nodig. Mogelijke maatregelen in de bodem met een inschatting van het effect en de kosten zijn weergegeven in Tabel 5 voor een trillingsscherm van 160 meter lang.

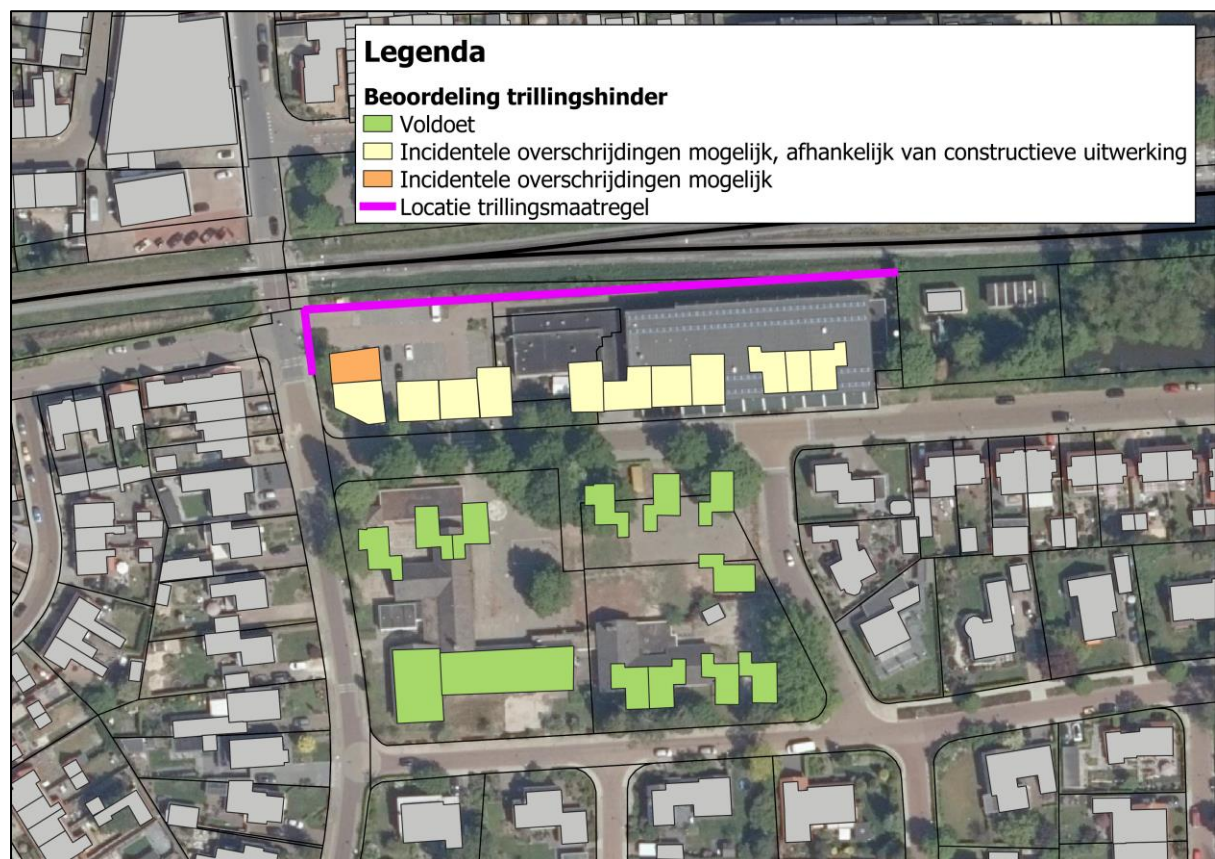
Tabel 5 Mogelijke maatregelen in de bodem, effect op trillingen en kosten

Maatregel	Effect	Kosten ²
Betonnen wand	25 – 50%	€ 1.7 – 2.8 mln
Jet-grout wand	15 – 35%	€ 1.8 – 2.9 mln
Damwand	10 – 20%	€ 1.1 – 1.8 mln
Betonnen wand, bekleed met rubber	45 – 70%	€ 2.3 – 3.6 mln
Damwand met EPS	15 – 25%	€ 1.8 – 2.9 mln
Damwand met sleuf	15 – 30%	€ 2.3 – 3.6 mln

² Totale investeringskosten, incl. BTW. Kosten zijn exclusief kosten voor grondverwerving, verleggen van kabels en leidingen en kosten voor een vergunningsprocedure. De werkelijke kosten van maatregelen zullen hoger uitvallen.

Maatregel	Effect	Kosten ²
Spoorsloot 2.0 m diep	20 – 35%	€ 0.1 – 0.3 mln
L-wand met sloot 2.0 m diep	25 – 45%	€ 0.2 – 0.4 mln
L-wand 3.0 m diep	15 – 25%	€ 0.2 – 0.4 mln
L-wand 3.0 m diep, bekleed met rubber	20 – 30%	€ 0.5 – 0.8 mln
CSM-wand	5 – 15%	€ 0.5 – 0.9 mln

Om in alle gevallen met een conventioneel bouwconcept (dus geen houtskeletbouw) te voldoen aan het beoordelingskader, is bijna 45 procent reductie van de trillingen nodig. De enige maatregel waarmee dit met zekerheid kan worden gehaald, is een met minimaal 100 mm dik, zacht rubber bekleed trillingsscherm van 10 meter diep en 0.5 meter breed. De kosten van een dergelijke maatregel bedragen tussen de € 80.000 en € 120.000 per woning met een mogelijke overschrijding (exclusief kosten voor het verleggen van kabels en leidingen en afstemming en vergunningverlening door ProRail). Andere maatregelen zijn onvoldoende effectief, en dus nog minder doelmatig. Gezien de zeer hoge kosten, ook i.r.t. het beperkte aantal overschrijdingen, zijn maatregelen in de bodem niet doelmatig³.



Figuur 12 Locatie van mogelijk trillingsscherm

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

Als de in Figuur 10 geel gearceerde woningen met bouwkundige optimalisaties worden verbeterd zodat hier geen overschrijdingen meer zijn van het beoordelingskader, dan is alleen een trillingsscherm nodig bij het appartementencomplex op de hoek bij de overweg, maar de kosten per appartement met een overschrijding zijn dan veel hoger.

4.3.4 Maatregelen aan de gebouwen

Bij maatregelen aan de woningen is een breed scala aan maatregelen mogelijk. Die variëren van het toepassen van een zwaardere fundering (zwaardere paalfundering, dikke betonnen plaatfundering of gebouwen onderkelders), het toepassen van meer dempende materialen (bijv. meer metselwerk i.p.v. beton, vermijden van staalconstructies en stalen balken) tot het ontkoppelen van de fundering of de vloeren door middel van stalen veren of een rubberen oplegging. Het globale effect en de kosten van de mogelijke maatregelen aan de woningen zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Mogelijke maatregelen aan de gebouwen (t.o.v. constructie van kalkzandsteen/metselwerk en kanaalplaatvloeren)

Maatregel	Effect	Kosten ⁴
Toepassen van dempende materialen	0 – 10%	< 3% SK
Toepassen breedplaat- i.p.v. kanaalplaatvloeren	10 – 20%	< 2% SK
Dikkere vloeren dan standaard (1 maat dikker)	5 – 10%	< 1% SK
Ontkoppelen van de vloeren	0 %	2 – 4% SK
Ontkoppelen van de fundering (afveren)	60 – 80%	6 – 10% SK
Inpakken van de fundering met rubber	10 – 25%	2 – 5% SK
Afschermen van de fundering met EPS	5 – 10%	< 2% SK
Zwaardere fundering (dikkere palen, betonplaat)	5 – 20%	3 – 5% SK

De enige echt effectieve maatregel, zeker voor het appartementencomplex het dichtst bij de overweg, is het afveren van de woningen (toepassen van bijvoorbeeld een betonnen plaatfundering, daarop stalen veerdozen, afgeveerd op een lage frequentie van maximaal 4 Hz, en daarop een conventionele balkenfundering, zie bijlage IV voor een voorbeeld). Hiermee zijn de trillingen in alle woningen te reduceren tot onder de streefwaarden voor trillingshinder, maar de kosten van deze maatregel bedragen tussen de € 10.000 en € 20.000 per woning. Deze maatregel wordt vooral toegepast wanneer op korte afstand van het spoor wordt gebouwd, maar is kostbaar en wordt daarom niet doelmatig geacht in het licht van de incidentele overschrijdingen, zeker wanneer in de constructieve uitwerking rekening wordt gehouden met de hierna gegeven optimalisaties.

4.3.5 Afweging van maatregelen

In het plangebied zijn overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder voor nieuwe situaties niet uit te sluiten. Het gaat om incidentele overschrijdingen (minder dan 1 overschrijding per dag in de woningen het dichtst bij het spoor).

Gezien de overschrijdingen is op basis van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn een maatregelafweging uitgevoerd. Hieruit volgt dat maatregelen aan het spoor of in de bodem

⁴ SK = Stichtingskosten

niet doelmatig zijn, gezien de zeer hoge kosten, ook in relatie tot het incidentele aantal overschrijdingen.

Met optimalisaties aan de constructie van de woningen zijn de trillingen wel te verminderen. Daarom adviseren wij in de verdere uitwerking van de plannen om de volgende adviezen mee te nemen:

1. Zorg bij de verdere constructieve uitwerking van het plan ervoor dat de woningen qua trillingen zo optimaal mogelijk worden geconstrueerd:
 - d. Pas geen houtskeletbouw of open staalbouw toe, maar pas bij voorkeur zware bouw toe (in ieder geval bij de eerstelijnsbebouwing). Daarmee zijn voor de grondgebonden woningen overschrijdingen te vermijden.
 - e. Pas bij de appartementen breedplaatvloeren toe, deze kennen een hogere demping dan kanaalplaatvloeren en zorgen voor meer stijfheid van het gebouw, waardoor de trillingen lager zullen zijn. Pas hierbij bij voorkeur wat dikkere vloeren toe dan constructief benodigd, bijv. minimaal 280 mm dikke breedplaatvloeren. Daarmee zijn voor alle appartementen, met uitzondering van de 3 appartementen dichtbij de spoorwegovergang, overschrijdingen te vermijden.
3. Overweeg aanvullende maatregelen bij de appartementen dichtbij de spoorwegovergang:
 - a. Overweeg om een zwaardere fundering toe te passen, bijvoorbeeld een dikke (minimaal 500 mm, liefst 700 mm) betonnen plaatfundering, of een paalfundering met minimaal 500 mm dikke palen, of het gebouw te onderkelderen.
 - b. Als een zwaardere fundering niet mogelijk is, overweeg dan om dit gebouw af te schermen met een maatregel in de bodem. In combinatie met breedplaatvloeren is nog ruim 20 procent trillingsreductie nodig voor dit pand, wat gerealiseerd kan worden met een minimaal 3 meter diepe L-wand op de rand van het perceel, of dicht bij de bebouwing (mits een luchtsponw tussen de L-wand en de fundering van het pand wordt toegepast).
 - c. Echt effectief en robuust is het toepassen van trillingsisolatie (stalen veerdozen tussen een dubbele fundering). Dit is een zeer effectieve maatregel, waarmee de trillingen lager zijn dan de streefwaarden, maar de kosten van deze maatregel zijn met € 10.000 tot € 25.000 per woning hoog.

In het afwegen van de doelmatigheid van optimalisaties en maatregelen, kunnen, naast de kosten en impact op het realisatieproces de volgende trillingsaspecten worden meegewogen:

4. Het gaat om een beperkt aantal overschrijdingen (maximaal 4 per week, dus minder dan 1 per dag in de woningen het meest dichtbij de overweg), veroorzaakt door goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte. De trillingen van de meeste goederentreinen en alle reizigerstreinen voldoen wel aan het beoordelingskader.

5. De trillingen voldoen weliswaar niet aan de strenge streefwaarden voor nieuwbouw uit de SBR B-richtlijn, maar wel aan de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties uit de SBR B-richtlijn. In die soepeler streefwaarden voor bestaande situaties is een zekere mate van gewenning meegenomen.
6. De woningen worden gerealiseerd in een zone dichtbij het spoor, waar nu ook al bebouwing is gerealiseerd die dicht bij het spoor staat. Het gaat bovendien om oude, meer trillingsgevoelige bebouwing, waar de trillingen dus significant hoger zullen zijn dan in de nieuwe woningen. Ook zonder maatregelen tegen trillingen kan worden beargumenteerd dat er in de geplande bebouwing daarom geen onacceptabele situatie ontstaat: de trillingen zijn immers lager dan in andere, al bestaande bebouwing rond deze locatie.

4.4 Onzekerheden in het onderzoek

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

1. Ten aanzien van de trillingsbron: de natuurlijke variatie als gevolg van spooronderhoud en de temperatuur 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 dit 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 geïjkt rekenmodel. Hiermee wordt een resultaat verkregen dat representatief is voor de toekomstige situatie.

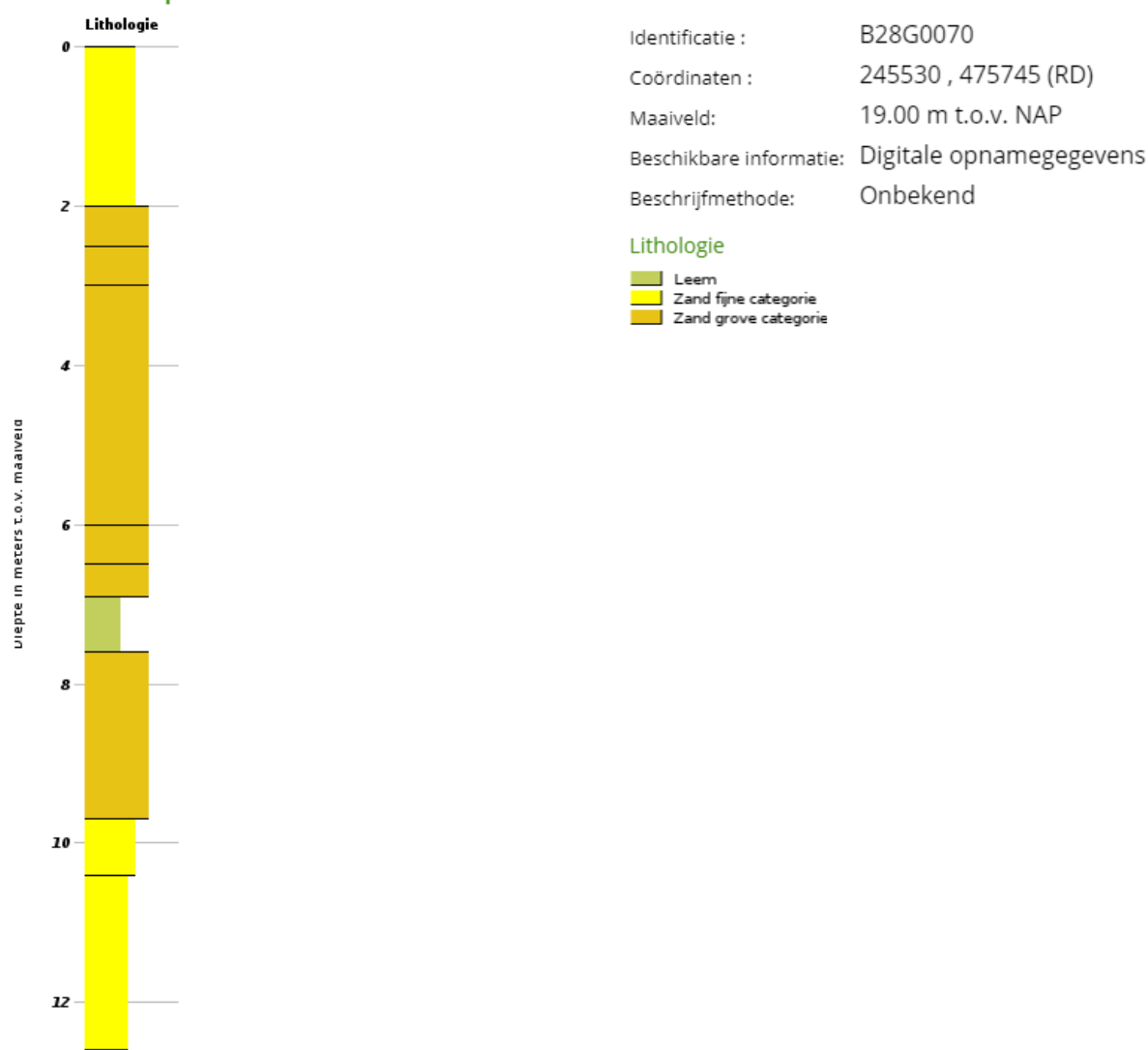
Bovenstaande onzekerheden hebben geen invloed op de conclusies van dit onderzoek.

Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek

Deze bijlage bevat geotechnische achtergrondinformatie. Deze informatie is gebruikt om bijvoorbeeld de uitdamping 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. B28G0070) is weergegeven in Figuur 13. In deze boring is de bodem in de eerste meters opgebouwd uit zand- en leemlagen. In andere boringen zijn meer kleiachtige lagen en leemlagen te zien.

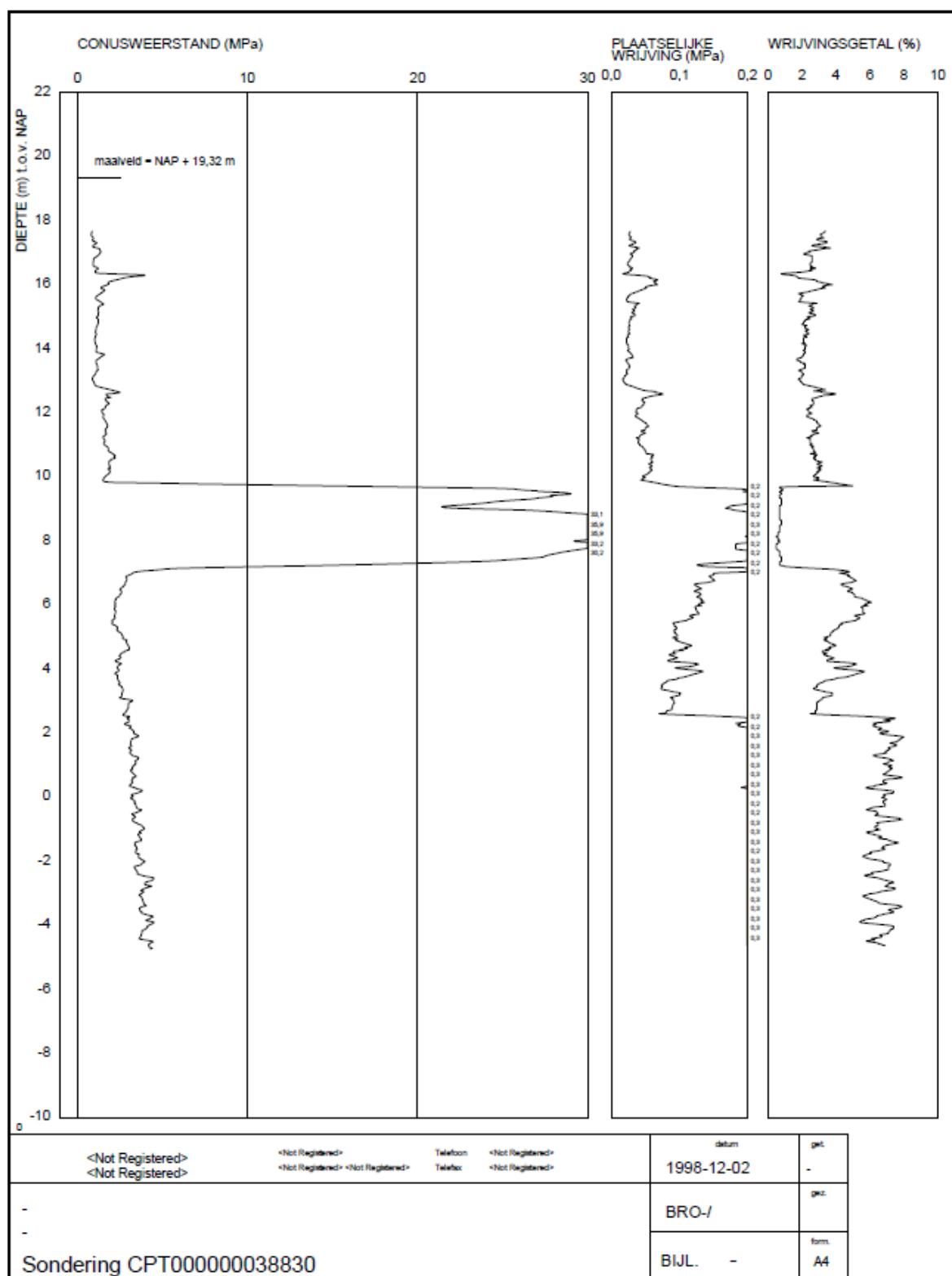
Boormonsterprofiel



Figuur 13 Boring nabij het onderzoeksgebied, B28G0070

Een representatieve sondering uit de nabijheid van het onderzoeksgebied, waarin onder meer de conusweerstand te zien is, is weergegeven in Figuur 14. Ook hier is te zien dat,

met uitzondering van een laag tussen 7 en 10 m boven NAP (zand), er vooral sprake is van klei- en leemlagen (lage conusweerstand, relatief veel wrijving).

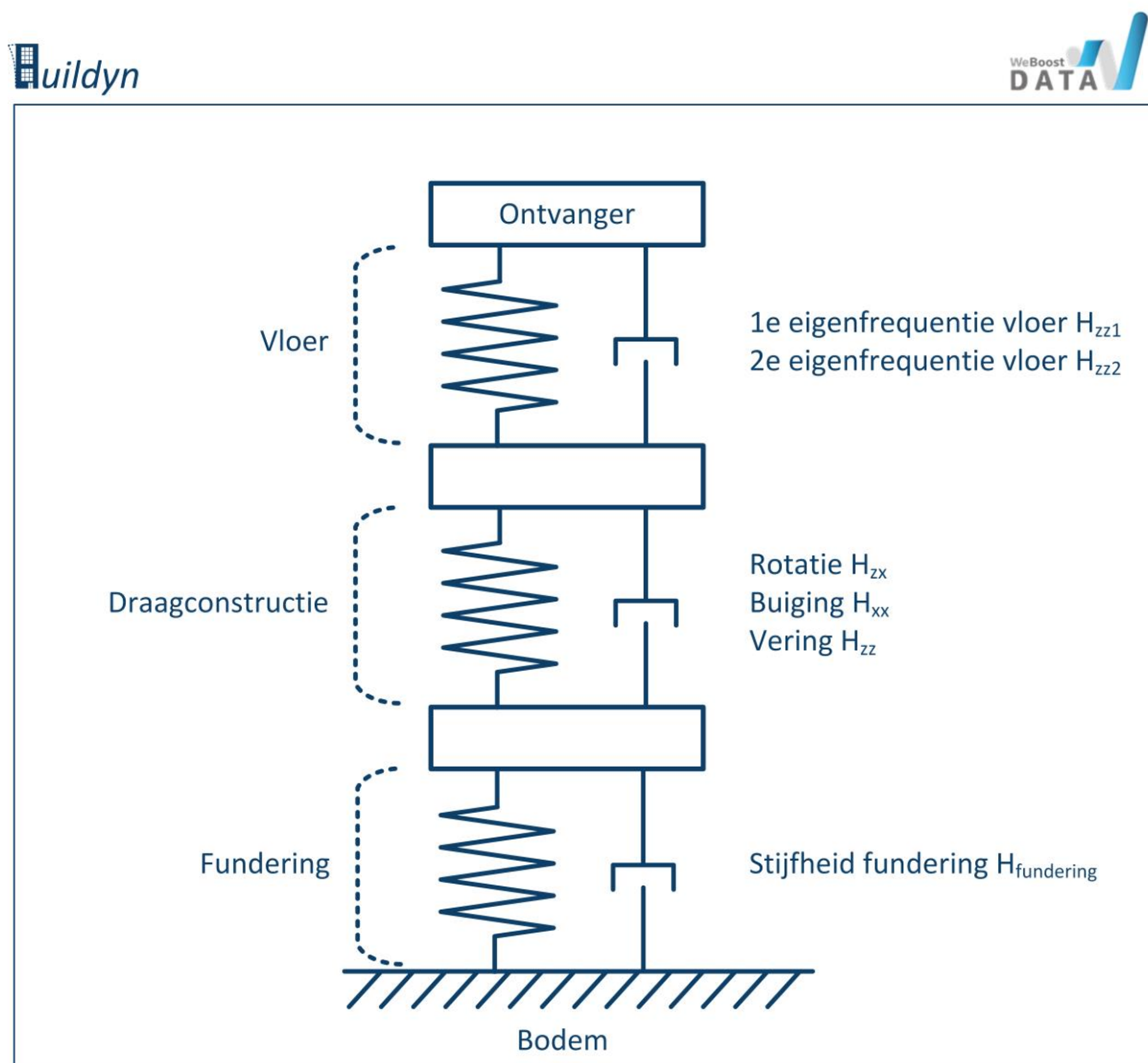


Figuur 14 Sondering nabij het onderzoeksgebied, CPT000000038830

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 15. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 15, worden in deze bijlage nader toegelicht.



Figuur 15 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.

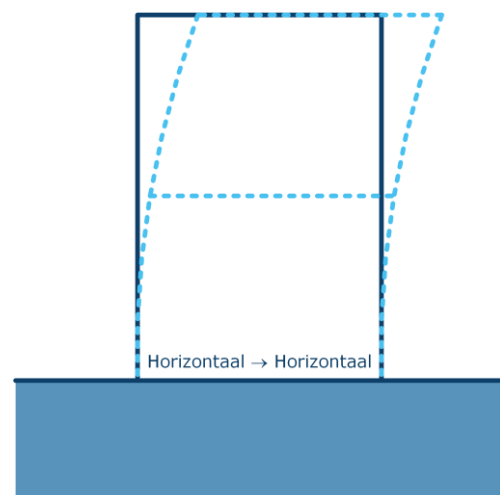
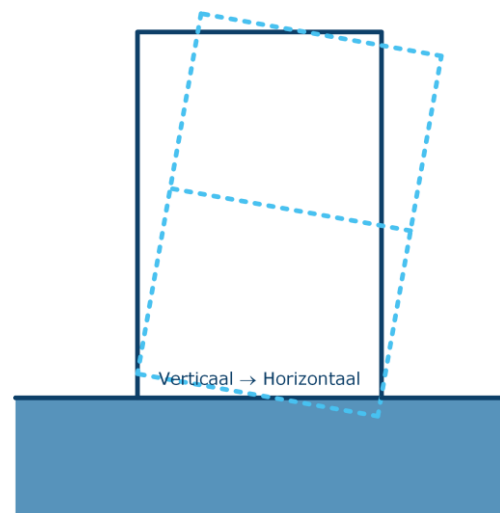
Dit effect noemen we H_{zx} , en is afhankelijk van:

- 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.

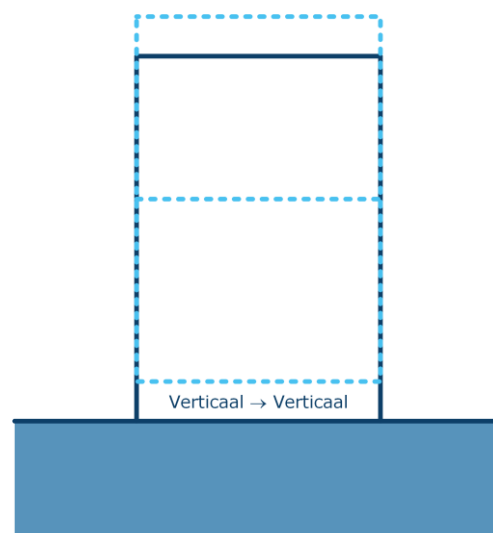
Dit effect noemen we H_{xx} , en is afhankelijk van:

- 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)



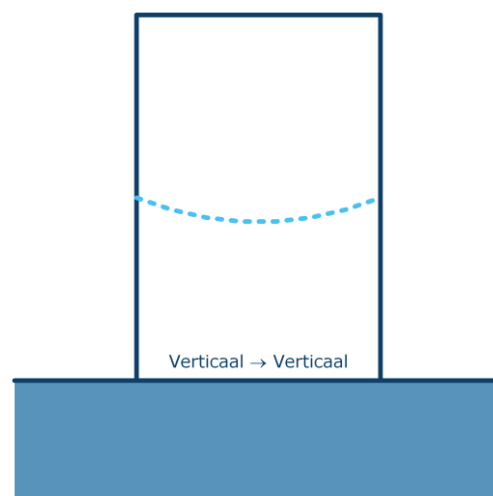
Vloeren

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:

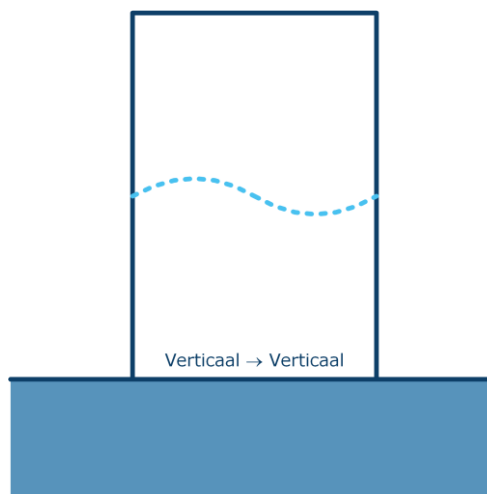
- Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- Afmetingen van de vloer
- Type oplegging



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 prinsescheits rechts.

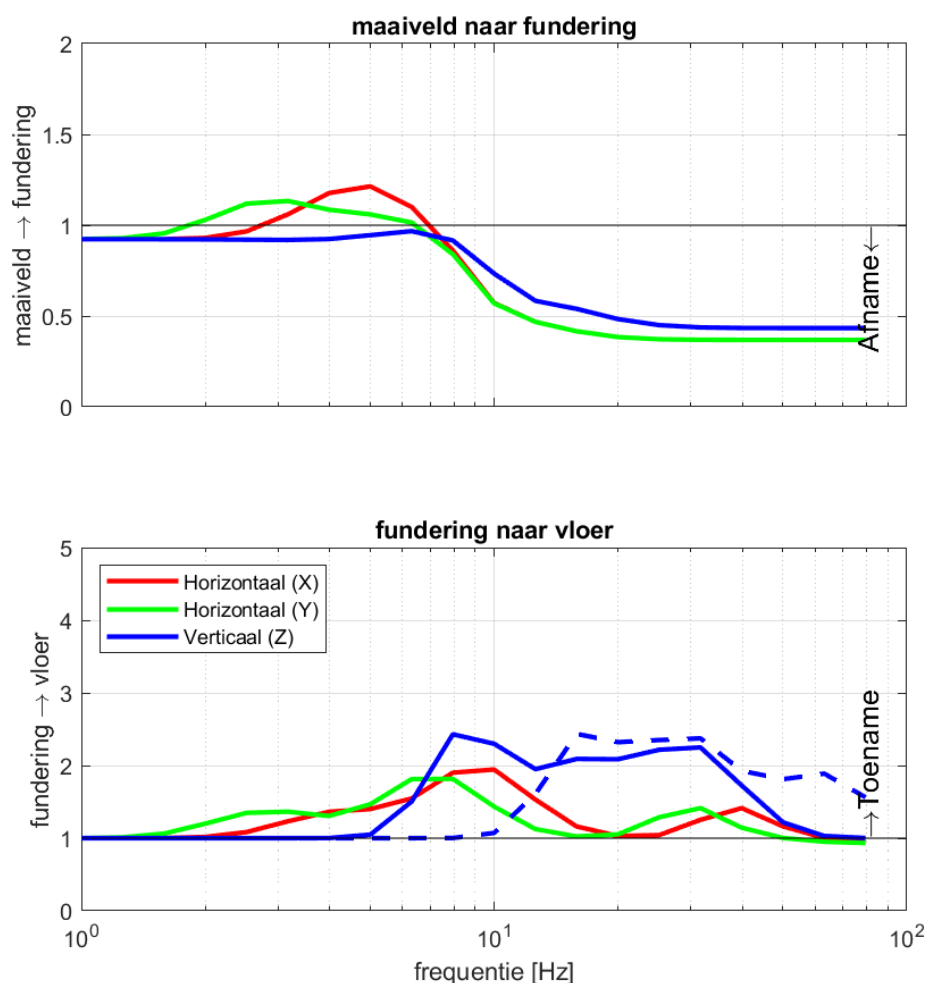
Dit effect noemen we H_{zz2} , en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1} .

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 16.

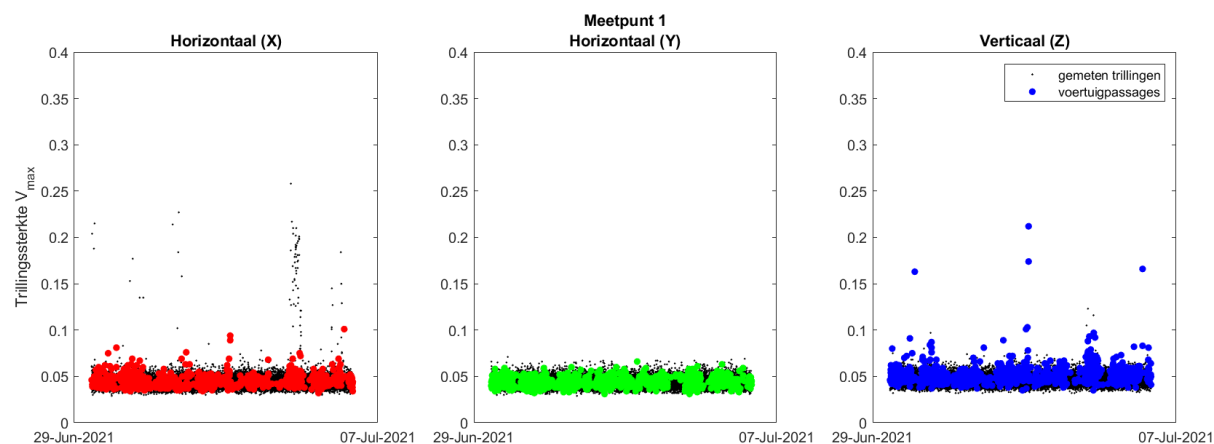


Figuur 16 Buildyn-resultaten voor appartementen 9 meter hoog, vloeroverspanning 8 meter, kanaalplaatvloer 260 mm, casco van prefab beton

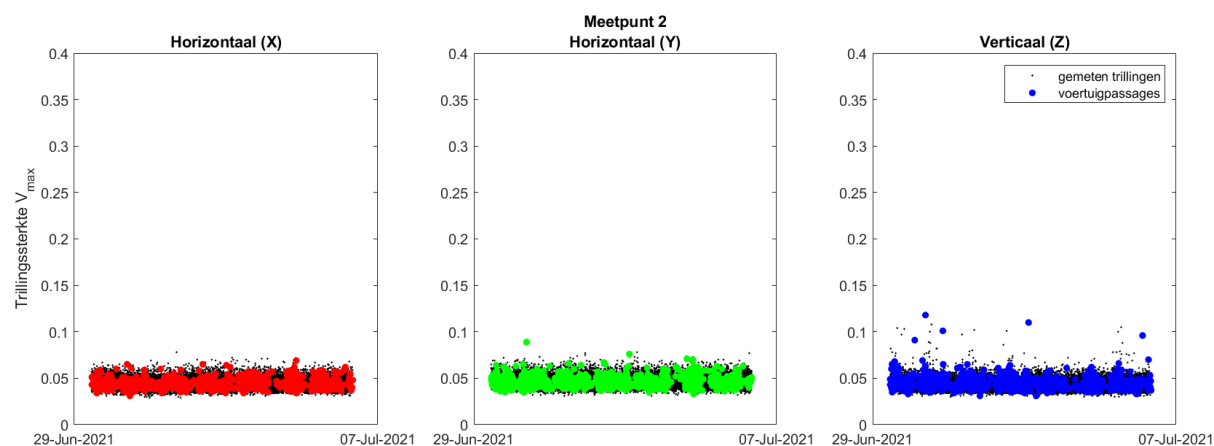


Resultaten metingen

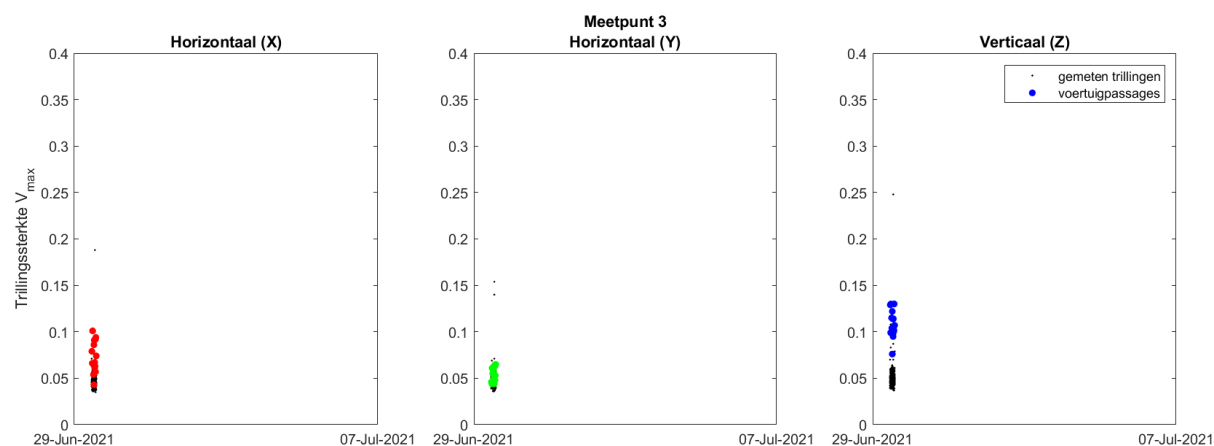
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



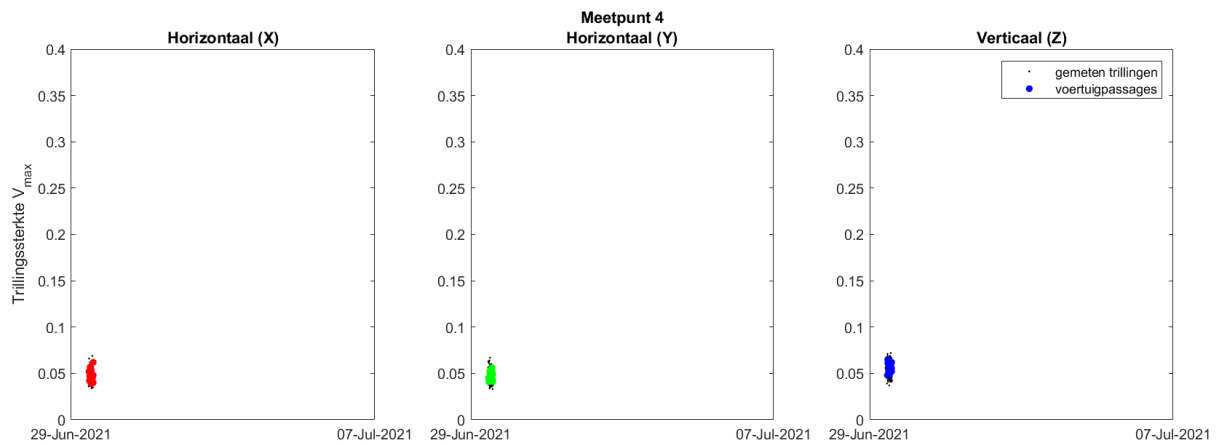
Figuur 17 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (fundering sporthal)



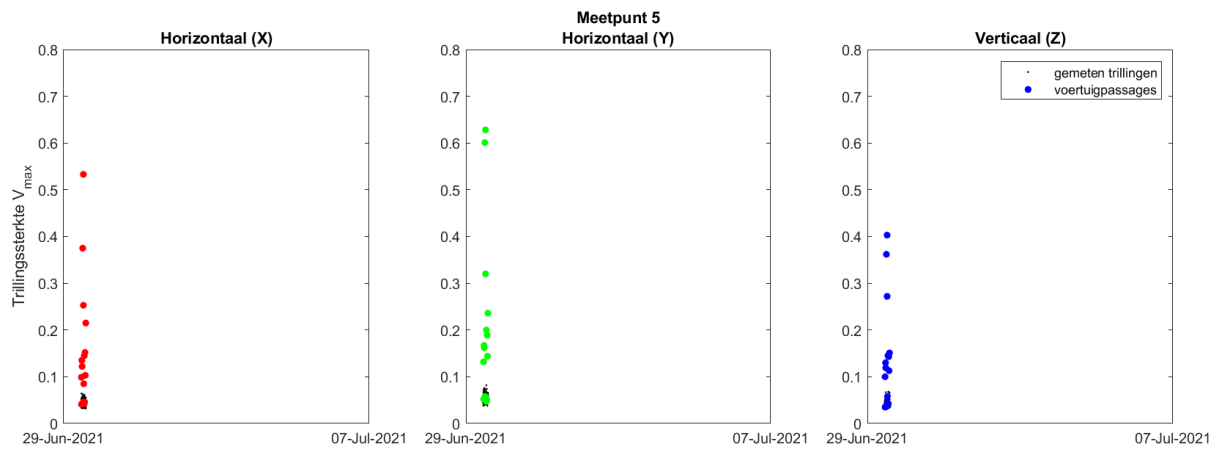
Figuur 18 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (fundering school)



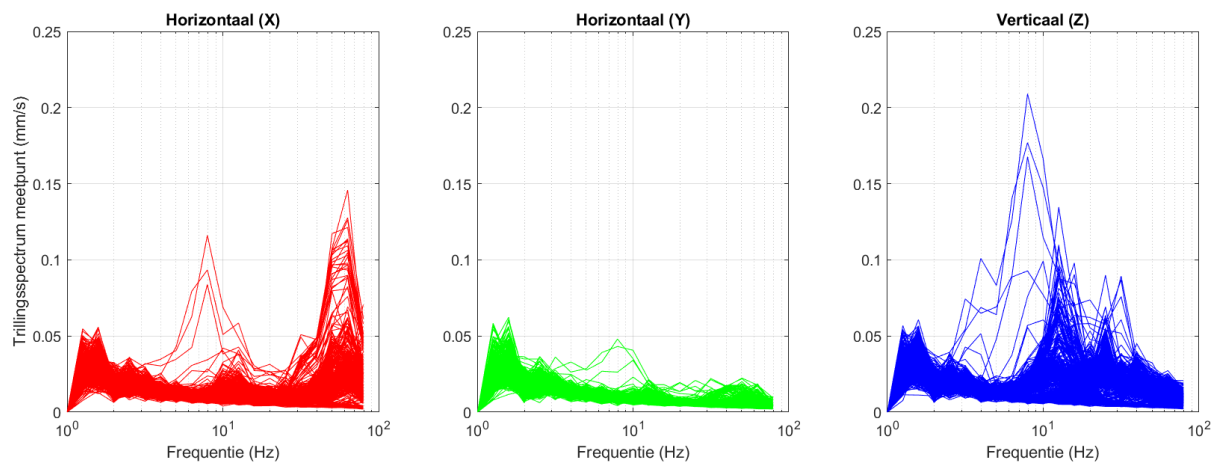
Figuur 19 Gemeten trillingen bij meetpunt 3 (maaiveld)



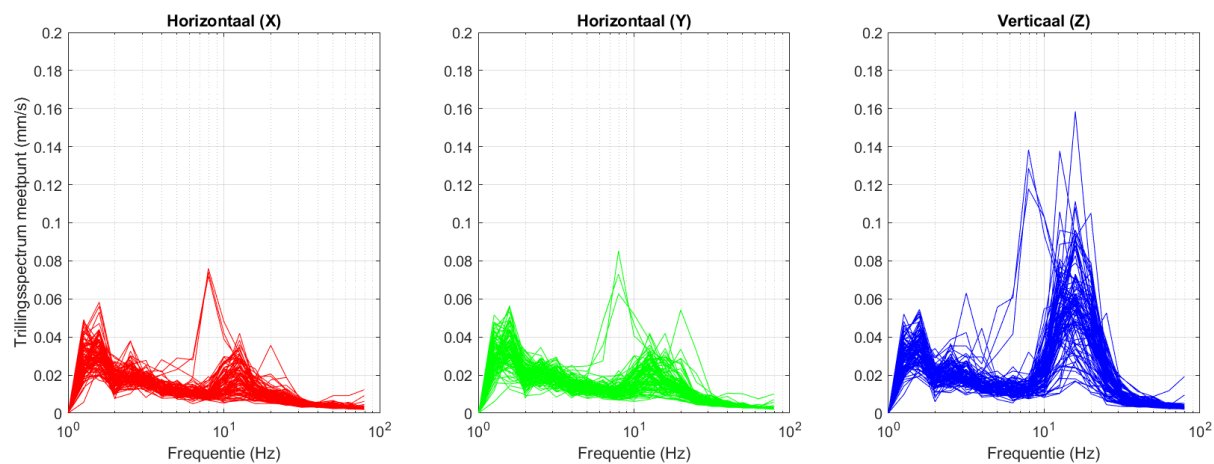
Figuur 20 Gemeten trillingen bij meetpunt 4 (maaiveld)



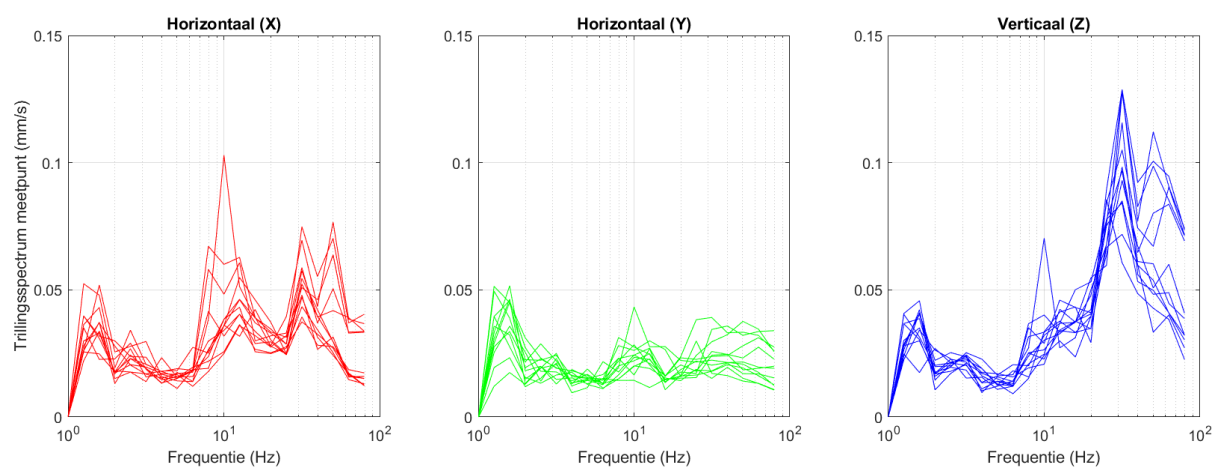
Figuur 21 Gemeten trillingen bij meetpunt 4 (maaiveld)



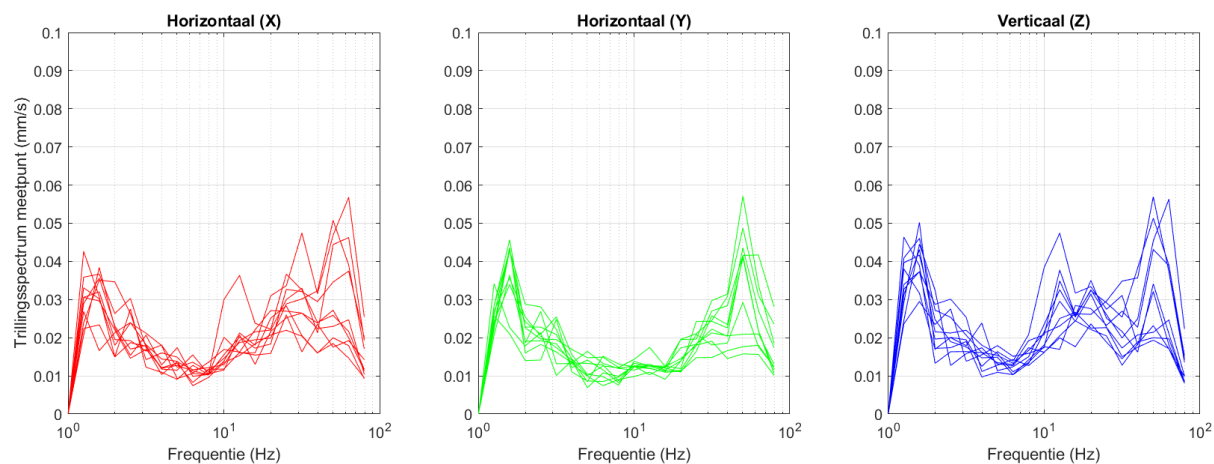
Figuur 22 Tertsbandspectra bij meetpunt 1



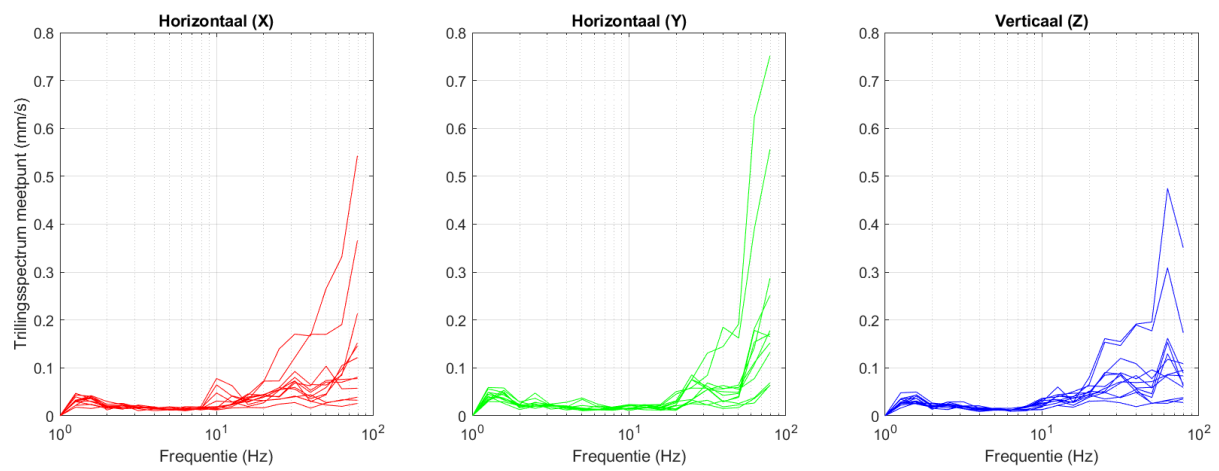
Figuur 23 Tertsbandspectra bij meetpunt 2



Figuur 24 Tertsbandspectra bij meetpunt 3



Figuur 25 Tertsbandspectra bij meetpunt 4

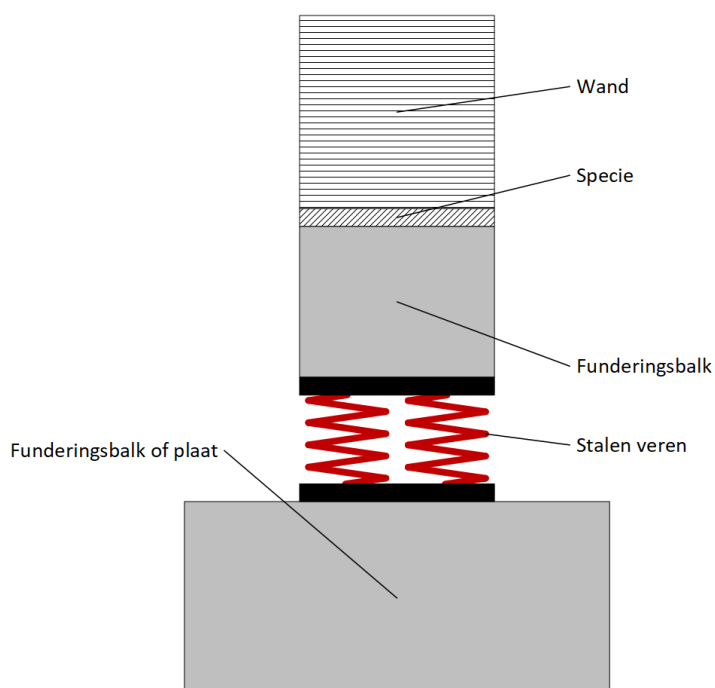


Figuur 26 Tertsbandspectra bij meetpunt 5

IV Principedetails maatregelen

Deze bijlage bevat achtergrondinformatie en principedetails van de voorgestelde maatregelen.

Een principeschets van een afgeveerde fundering met stalen veerdozen is weergegeven in Figuur 27. Een foto van een concrete toepassing bij eengezinswoningen in Prinsenbeek is weergegeven in Figuur 28.

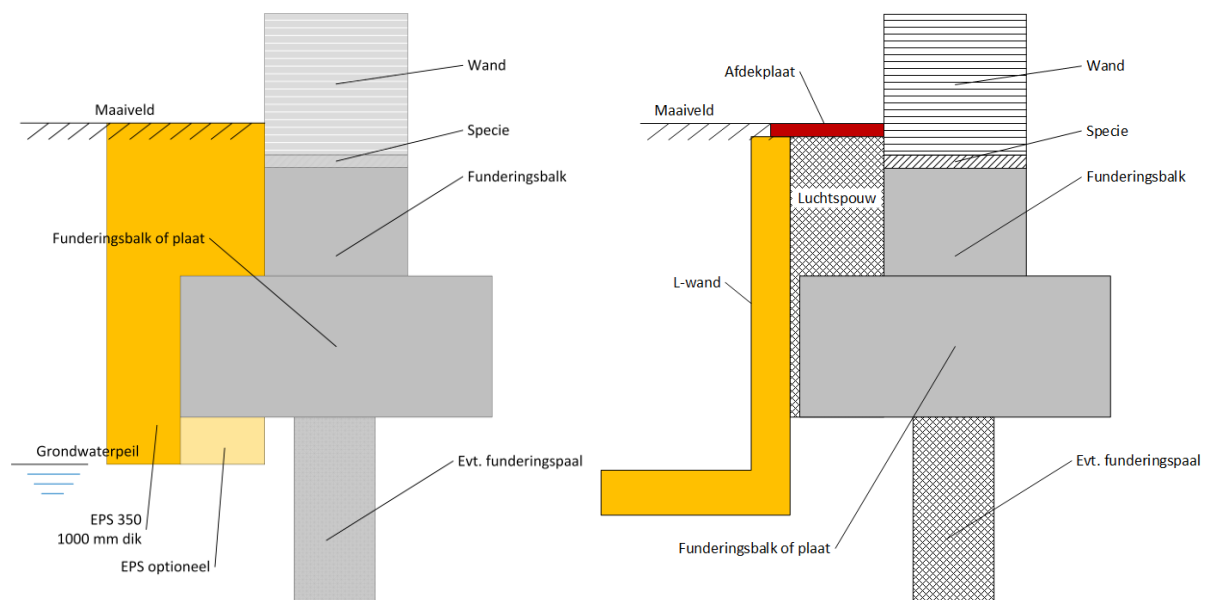


Figuur 27 Principeschets afgeveerde fundering (hier met stalen veerdozen)



Figuur 28 Dubbele fundering met stalen veerdozen (project in Prinsenbeek)

Een principeschets van het bekleden van de fundering met EPS (piepschuim) is weergegeven in Figuur 29. De EPS-kwaliteit dient wat zwaarder te zijn dan standaard i.v.m. de gronddruk. De minimaal benodigde dikte voor voldoende reductie is zo'n 1000 mm, om opdrijven te voorkomen moet dit tot de GHG-waarde van het grondwaterpeil worden aangebracht en verankerd worden aan de fundering. Een principeschets is weergegeven in Figuur 29. Belangrijk is dat bij maaiveld eventueel iets verjongd kan worden, maar de minimale breedte moet meer dan 500 mm zijn. Afdekken met een dunne zandlaag (max. 100 mm) en tegels is mogelijk.



Figuur 29 Fundering met EPS-schermbekleding ervoor (links) en fundering met L-wand ervoor (rechts)

Een principeschets van het plaatsen van een L-wand direct voor de fundering is rechts weergegeven in Figuur 29. Belangrijk hierbij is dat een luchtspouw nodig is (geen contact tussen L-wand en fundering), en dat deze dient te worden afgedekt met een afdekplaat. De L-wand moet in ieder geval ruim lager liggen dan de onderzijde van de funderingsbalk of plaat om effectief te zijn, bij een paalfundering is de effectiviteit wat lager omdat een deel van de trillingen via de palen het gebouw ingaat.