

KOKSTRAAT EEFDE

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	WBD2021-004
Versienr	1.0
Datum	10 juni 2021
Status	Vrijgegeven
Opdrachtgever	De Bunte Vastgoed B.V.



© We-Boost Data 2021

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

De kern van dit rapport

Aan de Kokstraat in Eefde worden achttien grondgebonden woningen gerealiseerd. 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 (4 woningen) niet zijn uit te sluiten. Het gaat om een beperkt aantal overschrijdingen (maximaal 3 per week, dus minder dan 1 per dag).

De overschrijdingen zijn vooral het gevolg van goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte, die over het wissel bij het plangebied rijden. Door de zandige bodemopbouw dempen de trillingen slecht uit met de afstand, en zijn deze tot op grote afstand waarneembaar.



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 soms onvoldoende effect en brengen zeer hoge kosten met zich mee. Deze maatregelen, zoals het verplaatsen van het wissel, 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 lastig inpasbaar (met name afschermen van de rijwoning is lastig door ligging dichtbij perceelgrens). Deze maatregelen zijn daarnaast zeer kostbaar (meer dan € 40.000 per woning). Deze maatregelen zijn, gezien de hoge kosten en het incidentele aantal overschrijdingen, 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 geen houtskeletbouw of open staalbouw toe, maar pas bij voorkeur zware bouw toe (in ieder geval bij de eerstelijnsbebouwing). Als dat laatste niet mogelijk is, kies dan voor conventionele bouw van kalkzandsteen en metselwerk, hoewel de trillingen dan wel iets hoger zullen zijn.
 - b. Pas bij voorkeur breedplaatvloeren toe, deze kennen een hogere demping dan kanaalplaatvloeren en zorgen voor meer stijfheid van het gebouw, waardoor de trillingen lager zullen zijn.
 - c. Pas dikkere vloeren (of kortere vloeroverspanningen toe). Kies voor vloeren met een minimale eigenfrequentie van 15 Hz.
 - d. Overweeg om bij de eerstelijnsbebouwing een zwaardere fundering toe te passen, bijvoorbeeld een dikke (minimaal 500 mm) betonnen plaatfundering, of een paalfundering met minimaal 400 mm dikke palen.

Voorbeelden van constructies die voldoen aan het beoordelingskader zijn hieronder weergegeven.

Woningtype	Vloertype	Fundering
Rijwoningen	200 mm kanaalplaatvloer of 200 mm breedplaatvloer	500 mm plaat- of ø400 mm paalfundering
	260 mm kanaalplaatvloer of 250 mm breedplaatvloer	Balkenfundering of 500 mm plaatfundering of ø400 mm paalfundering
Levensloopbestendige woningen	260 mm kanaalplaatvloer	500 mm plaatfundering of ø400 mm paalfundering
	320 mm kanaalplaatvloer of 280 mm breedplaatvloer	Balkenfundering of 500 mm plaatfundering of ø400 mm paalfundering

2. Als bovenstaande optimalisaties niet mogelijk zijn, weeg dan af of het toepassen van trillingsisolatie doelmatig is voor in ieder geval de drie meest nabij het spoor gelegen levensloopbestendige woningen en de kopwoning van de rijwoningen. Dit is een zeer effectieve maatregel, waarmee de trillingen in alle woningen lager zijn dan de streefwaarden, maar de kosten van deze maatregel zijn met € 10.000 tot € 25.000 per woning hoog. Bij de rijwoningen moet bovendien aandacht worden besteed aan de dilatatie tussen de woningen in het geval dat alleen de kopwoning wordt afgeveerd.

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 3 per week, dus minder dan 1 per dag in de woningen het meest dichtbij het spoor), 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 ontstaat in de geplande bebouwing daarom geen onacceptabele situatie: de trillingen zijn daar immers (veel) 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 constructieve optimalisaties is wel te voldoen aan het beoordelingskader. Dat kan door het toepassen van een zwaardere fundering in combinatie met zwaardere vloeren in de eerstelijnsbebouwing (bezien vanaf het spoor). Een andere mogelijkheid is het afveren van deze woningen door het toepassen van trillingsisolatie (stalen veerdozen tussen de fundering). Met deze maatregelen zijn de trillingen 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 dichtbij 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.

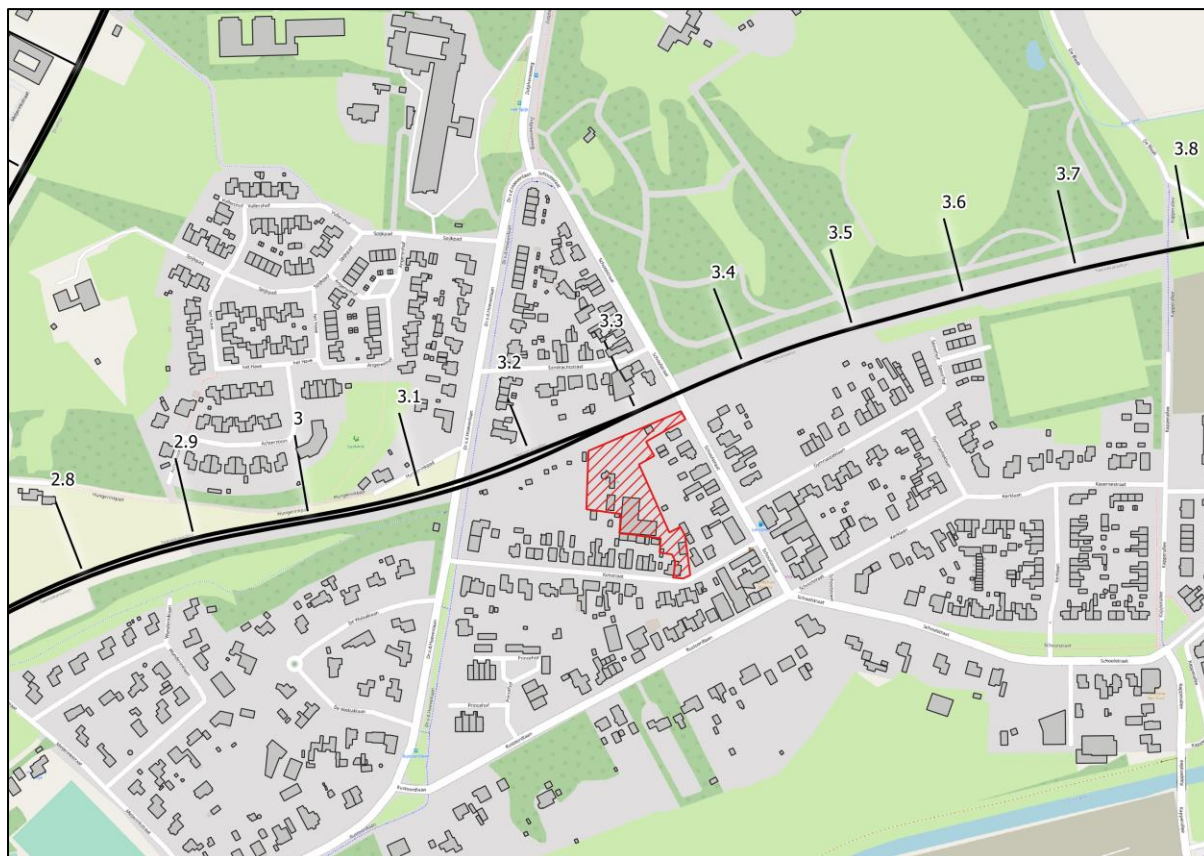
Inhoudsopgave

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	27
II	Bijlage rekenmodel Buildyn	29
	Fundering	30
	Draagconstructie	30
	Vloeren	31
	Resultaten	32
III	Resultaten metingen	33
IV	Principedetails maatregelen	36

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Aan de Kokstraat in Eefde worden achttien grondgebonden woningen gerealiseerd. 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 Kokstraat Eefde

1.2 Doel

Doel van dit onderzoek is om vast te stellen of er sprake zal zijn van trillingshinder in de geplande bebouwing, en zo ja, met welke maatregelen deze hinder is te voorkomen. Hiervoor maken wij een nauwkeurige predictie van de trillingen in de geplande bebouwing. Deze trillingen toetsen we aan het van toepassing zijnde beoordelingskader (de SBR B-richtlijn). Als er overschrijdingen van het beoordelingskader worden verwacht, dan geven we aan met welke constructieve aanpassingen of maatregelen wel wordt voldaan aan het beoordelingskader.

1.3 Leeswijzer

Wij beschrijven de situatie in het onderzoeksgebied en de uitgangspunten in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 lichten we het beoordelingskader en de gevolgde rekenmethodiek toe. Met behulp van de uitgangspunten berekenen we de trillingen in de woning op basis van de

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

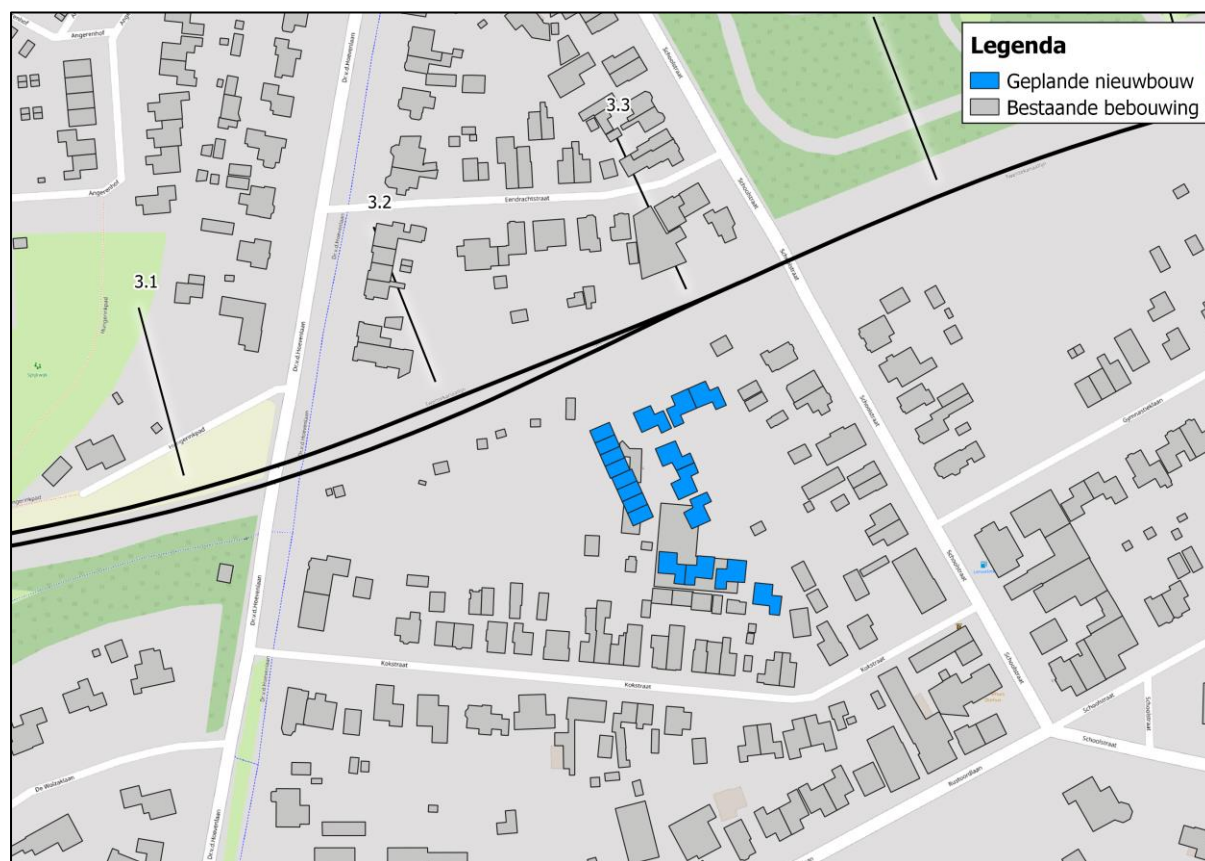
De bijlages bevatten technische informatie van het onderzoek, zoals een toelichting op de rekenmethodiek en grondonderzoek van nabijgelegen locaties.

2 Situatie en uitgangspunten

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

2.1 Situatie

De planlocatie bestaat op dit moment uit een gebied met verschillende soorten bebouwing, met verschillende functies (wonen en industrie). De bestaande bebouwing in het plangebied wordt gesloopt, waarna nieuwbouw wordt gerealiseerd in de vorm van grondgebonden woningen (max. 3 bouwlagen), weergegeven in Figuur 2. Om de woningen te bereiken wordt een weg aangelegd die aansluit op de Kokstraat ten zuiden van het plangebied en de Schoolstraat ten oosten van het plangebied.



Figuur 2 Bestaande en toekomstige bebouwing

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.

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

Type trein	Rijsnelheid	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Stoptrein	80 – 90 km/h	2.00	1.75	0.50
Goederentrein	60 – 80 km/h	0.04	0.02	0.00

Andere trillingsbronnen, zoals zwaar vracht- en landbouwverkeer, kan op korte afstand tot de overweg aan de Schoolstraat ook voor voelbare trillingen zorgen, maar is niet nader kwantitatief beschouwd in dit onderzoek.

2.2 Uitgangspunten

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

2.2.1 Gegevens bebouwing

In het plangebied worden achttien grondgebonden woningen (max. 3 bouwlagen) gerealiseerd, waarvan 8 rijwoningen en 10 levensloopbestendig woningen. Er is op dit moment nog geen definitief ontwerp van de bebouwing uitgewerkt, daarom wordt in de berekeningen gerekend met een aantal constructievarianten, zie Tabel 2. Het rekenmodel voor de bebouwing is gebaseerd op Tabel 2.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

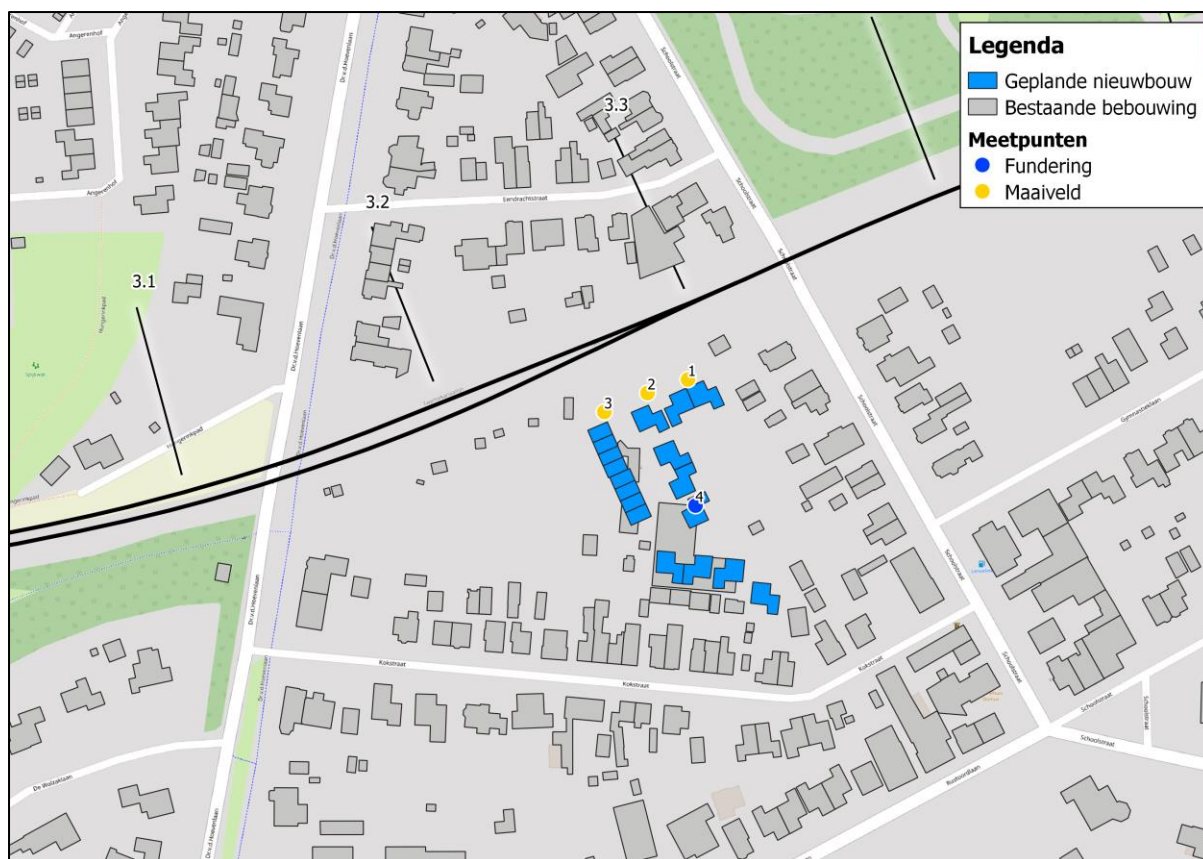
Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Meerdere varianten: - Kanaalplaatvloeren 200 en 260 mm, met 60 en 70 mm zandcement dekvloer - Breedplaatvloeren 200 en 250 mm, met 60 en 70 mm zandcement dekvloer - Houten vloeren, diverse varianten
Hoogte	6.0 en 9.0 meter
Lengte vloerveld	4.5 tot 7.0 meter
Breedte vloerveld	7.5 tot 8.5 meter
Constructietype	Meerdere varianten: - Prefab beton - Kalkzandsteen/metselwerk - Houtskeletbouw
Fundering	Op staal
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 vier punten, zie Figuur 3. De metingen zijn uitgevoerd van 14 mei tot en met 21 mei 2021, en zijn verricht op maaiveld en aan de fundering van de bestaande bebouwing. De meetresultaten uit dit meetonderzoek geven we weer in hoofdstuk 4.



Figuur 3 Meetpunten in het onderzoeksgebied

3 Beoordelingskader

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

3.1 Beoordelingskader

Er bestaat in Nederland geen wettelijk kader voor de beoordeling van trillingshinder in gebouwen. Wel geldt dat in het kader van een goede ruimtelijke ordening kan worden verzocht om trillingen mee te nemen bij de wijziging van bestemmingsplannen waar trillingen een rol kunnen spelen. Op basis van jurisprudentie wordt al enkele decennia gebruik gemaakt van de SBR-richtlijn om trillingen in gebouwen te beoordelen.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:

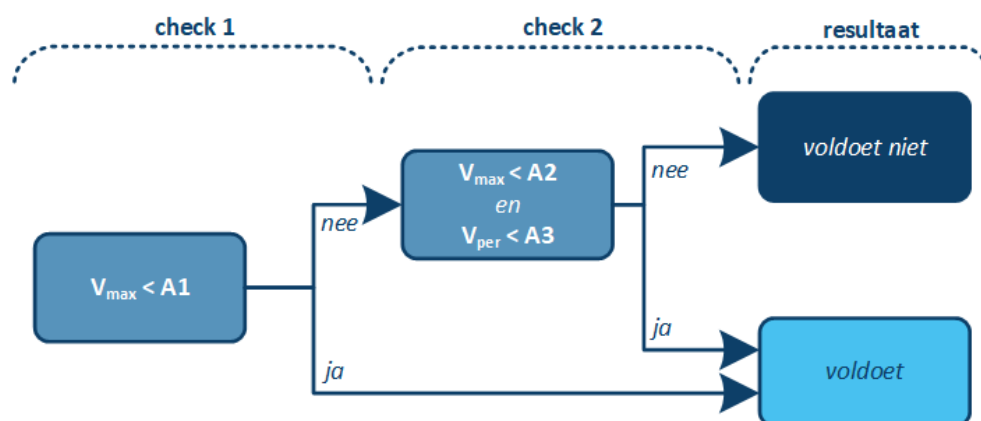
1. De richtlijn toetst zowel een maximaal optredende trillingssterkte (V_{max} , treedt op bij de trein die gedurende de meetperiode de hoogste trillingen veroorzaakt) als het tijdsgemiddelde van de trillingen (V_{per} , deze grootheid is in tegenstelling tot V_{max} dus ook afhankelijk van het aantal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

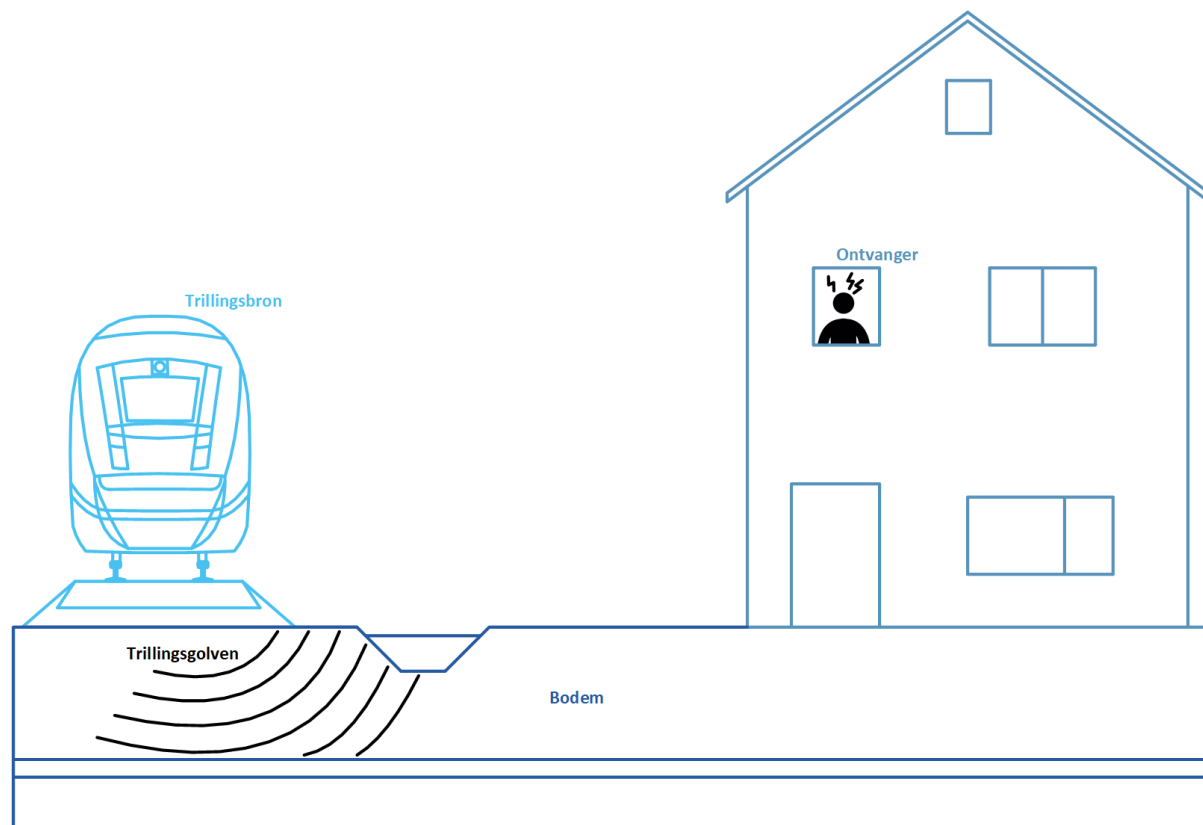
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde gebouwen, wordt op basis van metingen in de omgeving van de bebouwing een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande nieuwe bebouwing. Deze verwachte trillingen zijn afhankelijk van de constructieve eigenschappen van de geplande bebouwing, maar ook van de bodem, de afstand tot het spoor en natuurlijk de gemeten trillingen. Hieronder wordt een korte uitleg gegeven over hoe trillingen zich voortplanten van de trillingsbron tot in het gebouw, en hoe dat is vertaald naar een rekenmodel.

3.2.1 Trillingen – van trillingsbron naar gebouw

Trillingen ontstaan doordat een bewegend object (een trein, tram of vrachtwagen bijvoorbeeld) over een niet-efen ondergrond rijdt. Door de massa en beweging van het voertuig, variaties in de ondergrond (die per definitie niet perfect vlak is) en variaties in de rondheid van de wielen van het voertuig ontstaan spanningen in de bodem die zich door de bodem verplaatsen. Afhankelijk van de opbouw van de bodem en de aanwezigheid van obstakels (zoals sloten en damwanden) verplaatsen de trillingen zich diep of juist ondiep door de bodem. Gebouwen worden daardoor in trilling gebracht. Afhankelijk van hoe het gebouw is geconstrueerd, worden bepaalde trillingen meer of minder versterkt in het gebouw. Deze trillingen kunnen als hinderlijk worden ervaren door personen in gebouwen. Dit hele systeem van trillingsbron (hier de trein), overdrachtsmedium (de

bodem, waardoor de trillingen zich verplaatsen) en ontvanger (het gebouw met daarin de personen die de hinder ervaren) is schematisch weergegeven in Figuur 5.

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



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

3.2.2 De trillingsbron

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

3.2.3 De bodem

De bodem op deze locatie bestaat hoofdzakelijk uit zandlagen met verschillende stijfheden, zie bijlage I. De uitdemping van de trillingen met de afstand is bepaald met een rekenmodel op basis van deze bodemopbouw voor een zo betrouwbaar mogelijke predictie van de trillingen.

3.2.4 Het gebouw

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

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

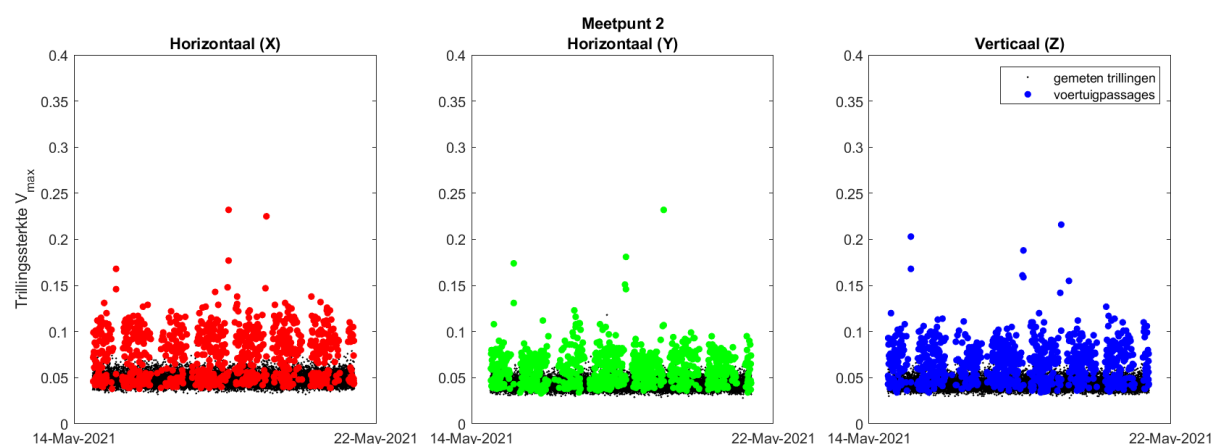
4 Verwachte trillingen in de woningen

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

4.1 Meetresultaten

Alcedo heeft metingen uitgevoerd aan de fundering van een bestaand pand en op maaiveld in de nabijheid van de onderzoekslocatie. De trillingen op maaiveld (meetpunt 2, dichtst bij wissel) zijn weergegeven in Figuur 6. Overige gegevens uit de metingen hebben we opgenomen in bijlage III. In Figuur 6 valt het volgende op:

1. De trillingen zijn vergelijkbaar in alle richtingen.
2. Er zijn enkele passages met fors (tot een factor 2) hogere trillingen. Dit betreft goederentreinen, die maar in beperkte mate (minder dan 2 per dag) passeren op dit traject.
3. De trillingen van wegverkeer over de spoorwegovergang aan de Schoolstraat (zwarte puntjes) zijn fors lager dan van de treinen, en zullen daarom ook niet voor hinderlijke trillingen in de geplande bebouwing zorgen.



Figuur 6 Gemeten trillingen op maaiveld, dichtbij wissel (meetpunt 2)

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.

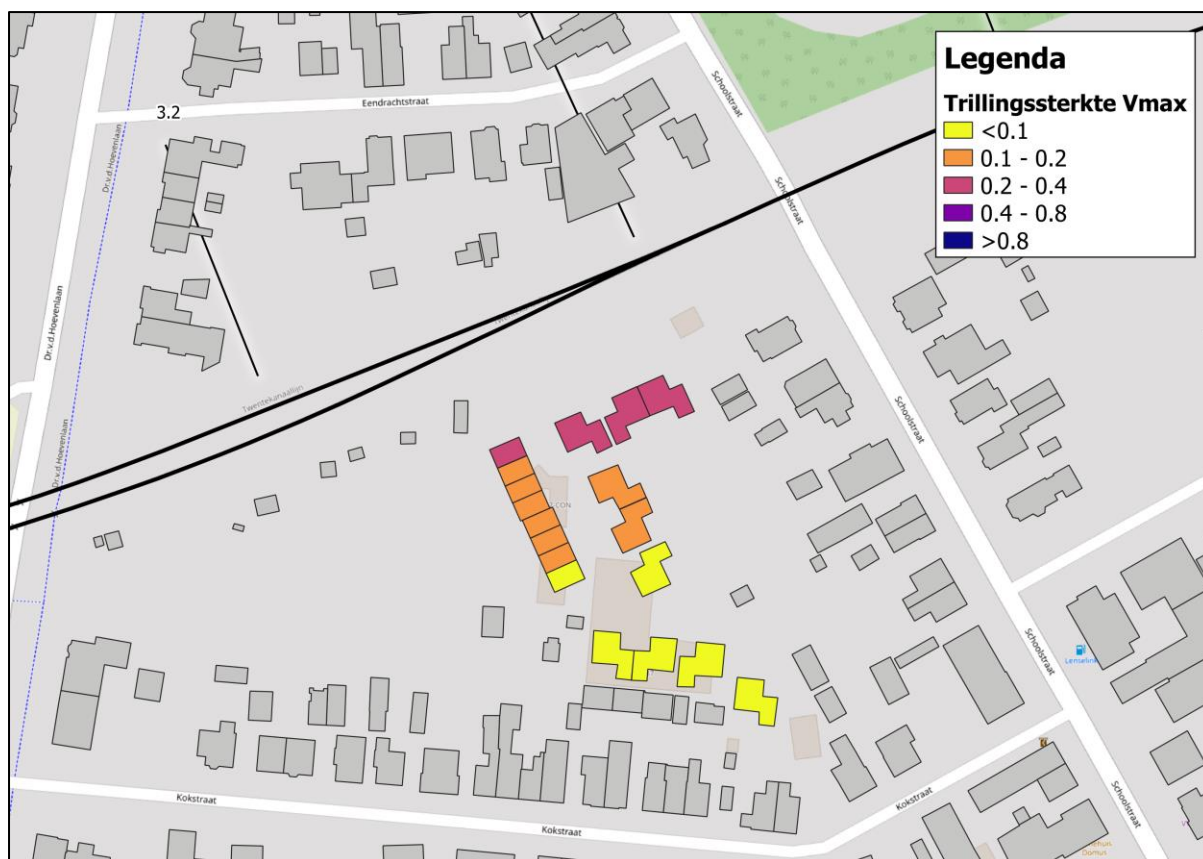
Tabel 4 Trillingen per type bouwconcept en beoordeling op SBR B-richtlijn

Bouwconcept	V_{max}	V_{per}	Beoordeling
Rijwoningen			
Kalkzandsteen + kanaalplaatvloeren	0.1 – 0.3	0.00 – 0.01	Voldoet niet, maximaal 1 overschrijding per week
Beton + breedplaatvloeren	0.1 – 0.3	0.00 – 0.01	Voldoet niet, maximaal 1 overschrijding per week
Houtskeletbouw	0.2 – 0.3	0.00 – 0.01	Voldoet niet, maximaal 1 overschrijding per week
Levensloopbestendige woningen			
Kalkzandsteen + kanaalplaatvloeren	0.1 – 0.3	0.00 – 0.01	Voldoet niet, maximaal 2 overschrijdingen per week
Beton + breedplaatvloeren	0.1 – 0.3	0.00 – 0.01	Voldoet niet, maximaal 2 overschrijdingen per week
Houtskeletbouw	0.1 – 0.3	0.00 – 0.01	Voldoet niet, maximaal 3 overschrijdingen per week

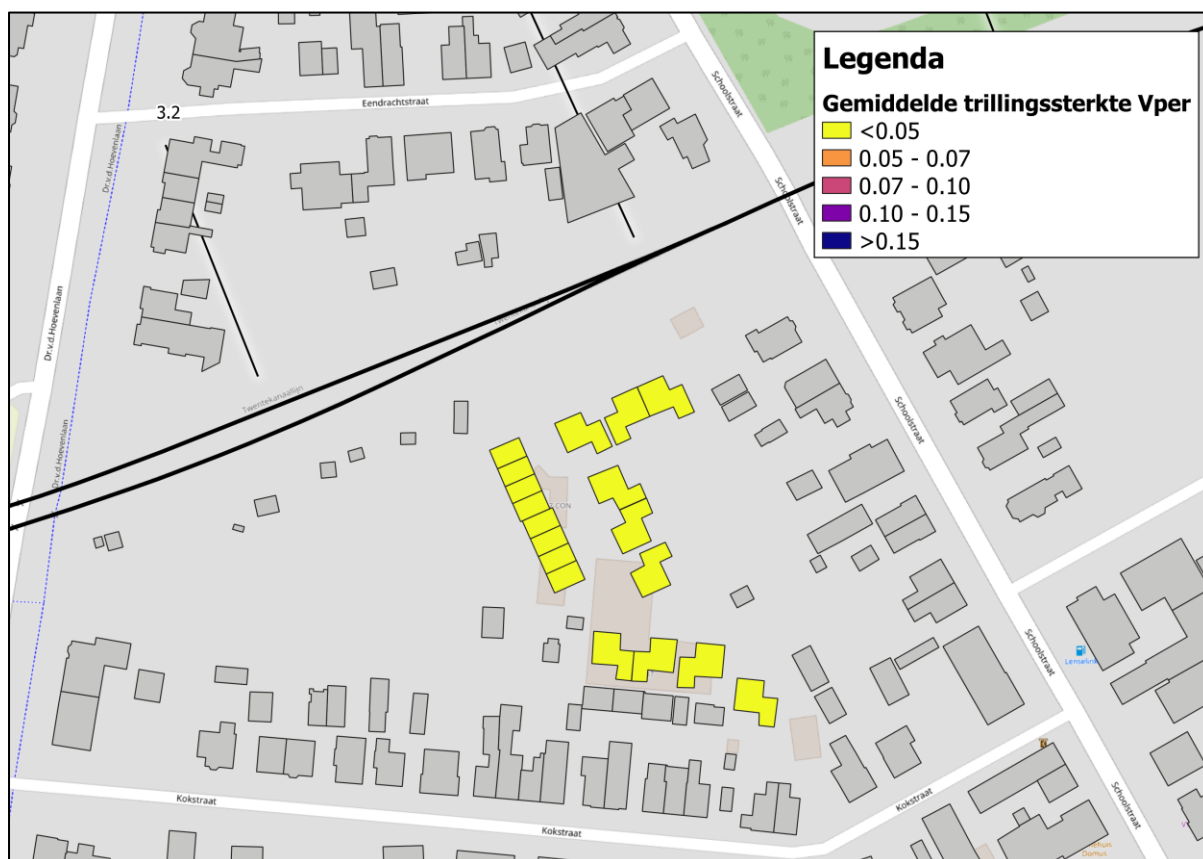
De bovengrens van de verwachte trillingssterkte V_{max} voor conventionele bouw (woningen met kanaalplaatvloeren) is weergegeven in Figuur 7, de verwachte trillingsintensiteit V_{per} in Figuur 8 en de beoordeling van de trillingen aan de SBR B-richtlijn (zie hoofdstuk 3) is weergegeven in Figuur 9.

Samengevat geldt het volgende:

1. De trillingssterkte V_{max} is in de eerstelijnsbebouwing hoger dan de streefwaarde A2 voor de nacht (0.2). Hier wordt dus *niet voldaan* aan het beoordelingskader. Dit komt door de passage van enkele goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte. Rond het wissel, dat een extra bron van trillingen is, zijn de trillingen daarbij iets hoger.
2. Alleen incidentele, qua trillingen afwijkende passages van goederentreinen zorgen 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 beperkt invloed op de trillingen, omdat de woningen vooral in hun geheel heen en weer bewegen op de ondergrond. Dit komt door een ongunstige combinatie van de (horizontale) afmetingen van de woningen ten opzichte van de trillingsgolven in de bodem. Wel geldt dat bij zware bouw (breedplaatvloeren, betonnen casco) de trillingen lager zijn (max. 5 tot 10 procent), terwijl bij lichte bouw (houtskeletbouw) de trillingen hoger zijn (10 tot 20 procent) ten opzichte van een standaard constructie (kalkzandsteen, metselwerk en kanaalplaatvloeren). Ook korte vloeroverspanningen of dikkere vloeren zorgen voor iets lagere trillingen (5 tot 10 procent lager).



Figuur 7 Bovengrens van de trillingssterkte V_{max}



Figuur 8 Bovengrens van de gemiddelde trillingssterkte V_{per}



Figuur 9 Beoordeling van de trillingen

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.

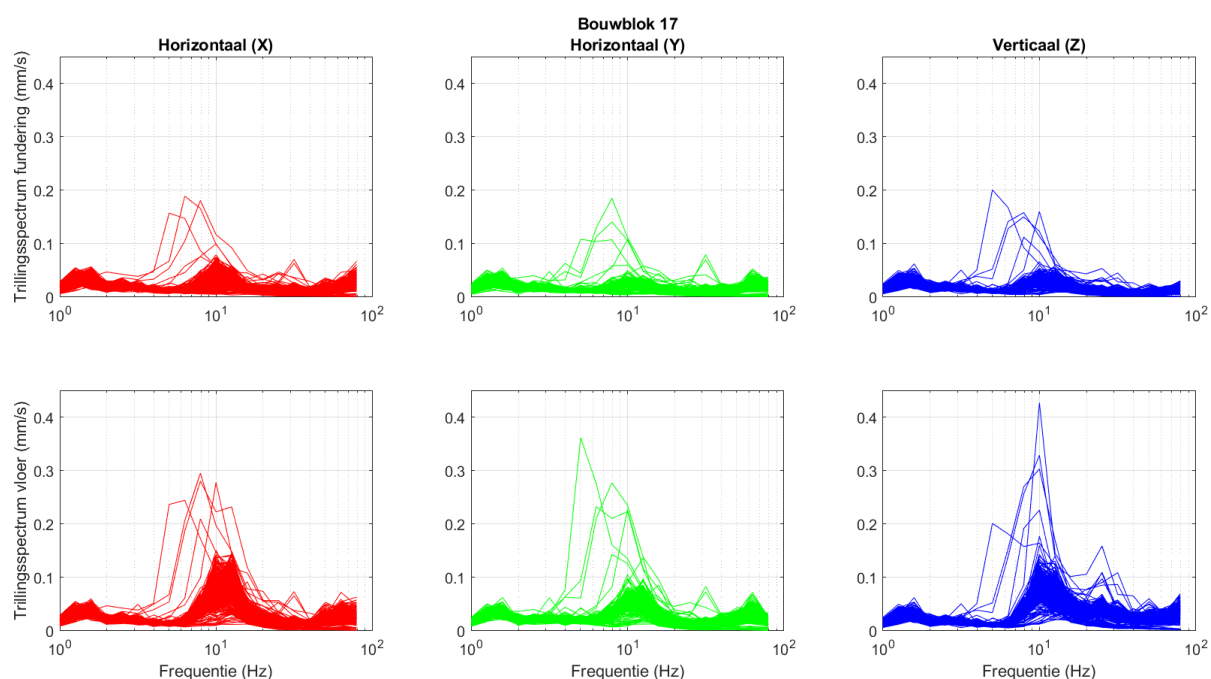
Voor de afweging van maatregelen geeft bijlage 5 van de SBR B-richtlijn handvatten. Deze bijlage classificeert de trillingen in het plangebied als *matige hinder*. Vervolgens geeft deze bijlage aan dat matige hinder kan worden geaccepteerd onder een aantal voorwaarden:

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 0.01, dus veel lager dan de streefwaarde van 0.05). Verder gaat het om een beperkt aantal overschrijdingen: 1 of 2 treinen per week. Het incidentele karakter van de overschrijdingen (ruim minder dan 1 per dag) 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. Daar is hier geen sprake van.
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 10. In deze figuur is de trillingssnelheid per treinpassage weergegeven als tertsbandspectrum op de fundering en de hoogste verdieping van de levensloopbestendige woningen dichtbij het spoor. Hieruit kan worden afgeleid bij welke frequentie en in welke trillingsrichting de trillingen het hoogst zijn.



Figuur 10 Verwachte trillingen in woning dichtst bij wissel (levensloopbestendige woning)

Uit deze analyse volgt dat de hoogste trillingen optreden in zowel de horizontale als de verticale richting, op de hoogste verdieping. Dit komt met name door de rotatie van het pand (breedte en diepte van de bebouwing vallen ongunstig samen met de trillingsgolven in de bodem). De trillingen zijn op de fundering al relatief hoog tussen de 5 en 15 Hz, en worden verder versterkt in het gebouw. Maatregelen die genomen worden moeten daarom vooral effectief zijn tegen trillingen tussen de 5 en 15 Hz, 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 het wissel. Dit zijn zeer kostbare maatregelen met een lange realisatietijd, en forse inpassingsuitdagingen. Goedkopere

maatregelen, zoals under sleeper pads of ballastmatten, zijn onvoldoende effectief tegen de laagfrequente trillingen van goederentreinen.

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. Door de hoge kosten van deze maatregelen en het beperkte aantal woningen met een overschrijding, zijn de kosten per woning voor deze maatregelen zeer hoog (naar schatting meer dan € 300.000 per woning met een mogelijke overschrijding), en gezien de beperkte en incidentele overschrijdingen 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 spoorsloot, 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 spoorsloot).

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 ontsluitingsweg richting de Schoolstraat. Om de woningen af te schermen, is een trillingsscherm van ca. 75 meter lengte nodig op de plek van het geluidsscherm, zie Figuur 11. Mogelijke maatregelen in de bodem met een inschatting van het effect en de kosten voor deze situatie zijn weergegeven in Tabel 5.

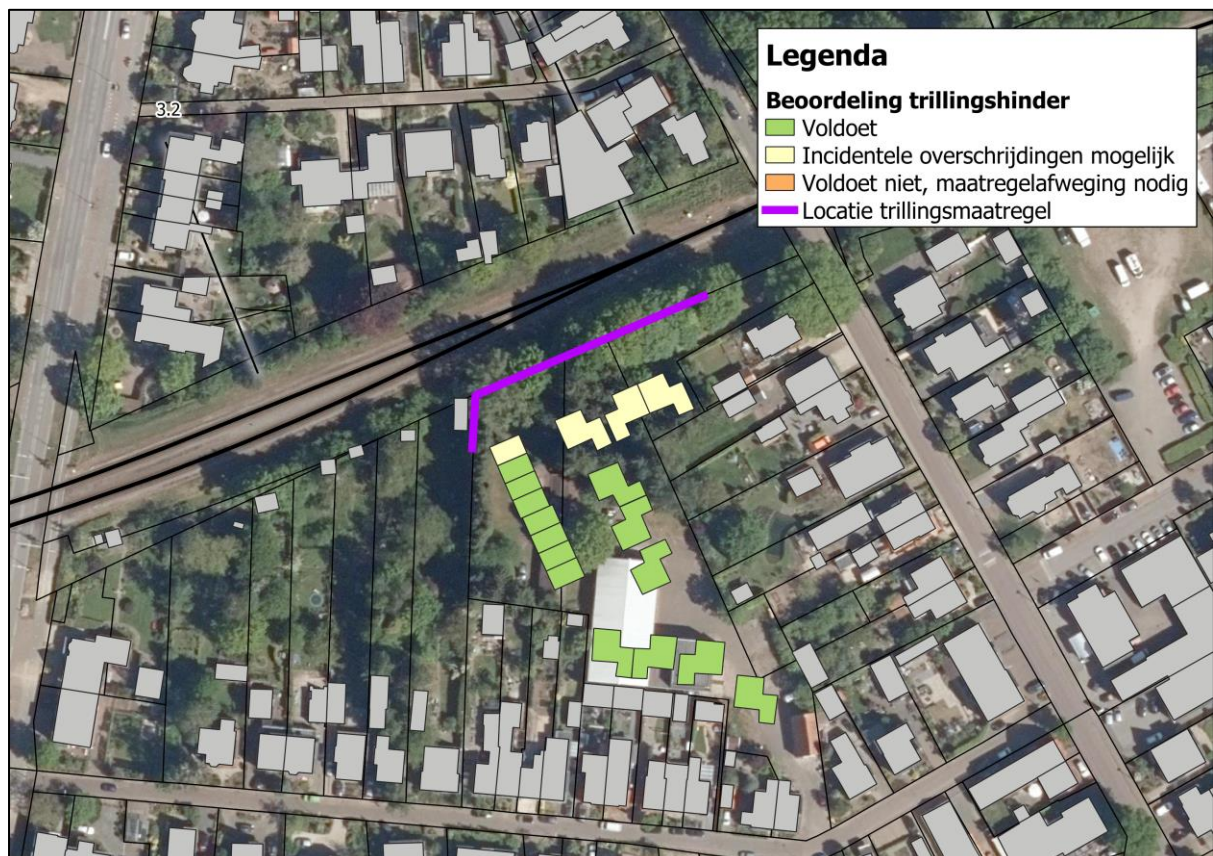
Tabel 5 Mogelijke maatregelen in de bodem, en effect op contourafstand

Maatregel	Effect	Kosten ²
Betonnen wand	10 – 25%	€ 0.9 – 1.5 mln
Jet-grout wand	5 – 15%	€ 1.0 – 1.7 mln
Damwand	5 – 10%	€ 0.5 – 0.9 mln
Spoorsloot 2.0 m diep	10 – 20%	€ 0.1 – 0.2 mln
Beton met rubber	20 – 40%	€ 1.3 – 2.1 mln
Damwand met EPS	5 – 15%	€ 0.9 – 1.5 mln
Damwand met sleuf	10 – 20%	€ 1.2 – 2.0 mln
L-wand met sloot 2.0 m diep	15 – 25%	€ 0.2 – 0.4 mln
L-wand 1.5 m diep	5 – 10%	€ 0.1 – 0.3 mln
L-wand 1.5 m diep, bekleed met rubber	10 – 15%	€ 0.3 – 0.6 mln
CSM-wand	0 – 10%	€ 0.3 – 0.5 mln

Om in alle gevallen met een conventionele bouwwijze (dus geen houtskeletbouw) te voldoen aan het beoordelingskader, is ongeveer 15 procent reductie van de trillingen nodig. De goedkoopste maatregel waarmee dat kan worden gehaald, is een L-wand i.c.m.

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.

een sloot van 2.0 m diep (zie bijlage IV voor een schets). Nadeel is dat deze maatregel niet overal inpasbaar is, t.p.v. de kop van de rijwoningen is deze maatregel i.v.m. ruimtegebrek niet inpasbaar. Bovendien bedragen de kosten van deze maatregel nog steeds € 40.000 tot € 60.000 per woning met een overschrijding (exclusief kosten voor het verleggen van kabels en leidingen en afstemming en vergunningverlening door ProRail). Andere maatregelen zijn duurder en/of minder effectief, en daarmee nog minder doelmatig. Gezien de zeer hoge kosten, ook i.r.t. het beperkte aantal overschrijdingen, zijn maatregelen in de bodem daarmee niet doelmatig³.



Figuur 11 Locatie van mogelijk trillingsscherm

4.3.4 Maatregelen aan de gebouwen

Bij maatregelen aan de woningen is een breed scala aan maatregelen mogelijk. Die variëren van het verder van het toepassen van een zwaardere fundering (woning onderheien, dikke betonnen plaatfundering of woning onderkelderen), 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

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 naar verwachting 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.

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	0 – 5%	< 2% SK
260 i.p.v. 200 mm kanaalplaatvloer	5 – 10%	< 1% SK
Constructie van prefab betonskelet	0 – 5%	< 2% SK
Ontkoppelen van de vloeren	0 %	2 – 4% SK
Ontkoppelen van de fundering (afveren)	60 – 70%	6 – 10% SK
Inpakken van de fundering met rubber	5 – 10%	2 – 5% SK
Afschermen van de fundering met EPS	0 – 5%	< 2% SK
Zwaardere fundering (palen, betonplaat)	10 – 20%	3 – 5% SK

De belangrijkste reden voor de relatief hoge trillingen is het ongunstig samenvallen van de breedte en diepte van de bebouwing met de trillingsgolven in de bodem. Er zijn wel maatregelen die de trillingen reduceren, zoals het toepassen van zwaardere bouw (prefab betonskelet, breedplaatvloeren, zwaardere fundering, dikkere vloeren), maar er is een combinatie van maatregelen nodig om in alle gevallen te voldoen aan het beoordelingskader.

De enige echt effectieve maatregel is het afveren van de woningen (toepassen van bijvoorbeeld een betonnen plaatfundering, daarop stalen veerdozen, afgeveerd op een lage frequentie van 2.5 tot 3.5 procent, 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 € 25.000 per woning. Voor de rijwoningen geldt dat aandacht moet worden besteed aan de dilatatie tussen de woningen in het geval dat alleen de kopwoning wordt afgeveerd. 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:
 - a. Pas geen houtskeletbouw of open staalbouw toe, maar pas bij voorkeur zware bouw toe (in ieder geval bij de eerstelijnsbebouwing). Als dat laatste niet mogelijk is, kies dan voor conventionele bouw van kalkzandsteen en metselwerk, hoewel de trillingen dan wel iets hoger zullen zijn.
 - b. Pas bij voorkeur breedplaatvloeren toe, deze kennen een hogere demping dan kanaalplaatvloeren en zorgen voor meer stijfheid van het gebouw, waardoor de trillingen lager zullen zijn.
 - c. Pas dikkere vloeren (of kortere vloeroverspanningen toe). Kies voor vloeren met een minimale eigenfrequentie van 15 Hz (bijv. 260 i.p.v. 200 mm kanaalplaatvloer⁵, of liever nog een 280 mm breedplaatvloer).
 - d. Overweeg om bij de eerstelijnsbebouwing een zwaardere fundering toe te passen, bijvoorbeeld een dikke (minimaal 500 mm, liefst 700 mm) betonnen plaatfundering, of een paalfundering met minimaal 400 mm dikke palen.

Voorbeelden van constructies die voldoen aan het beoordelingskader zijn in Tabel 7 weergegeven.

Tabel 7 Voorbeelden van constructieve uitwerkingen die voldoen aan het beoordelingskader

Woningtype	Vloertype	Fundering
Rijwoningen	200 mm kanaalplaatvloer of 200 mm breedplaatvloer	500 mm plaat- of ø400 mm paalfundering
	260 mm kanaalplaatvloer of 250 mm breedplaatvloer	Balkenfundering of 500 mm plaatfundering of ø400 mm paalfundering
Levensloopbestendige woningen	260 mm kanaalplaatvloer	500 mm plaatfundering of ø400 mm paalfundering
	320 mm kanaalplaatvloer of 280 mm breedplaatvloer	Balkenfundering of 500 mm plaatfundering of ø400 mm paalfundering

Met een constructie uit Tabel 7 wordt in alle woningen voldaan aan het beoordelingskader.

2. Als bovenstaande optimalisaties niet mogelijk zijn, weeg dan af of het toepassen van trillingsisolatie doelmatig is voor in ieder geval de drie meest nabij het spoor gelegen

⁵ Met een 260 mm kanaalplaatvloer is de eigenfrequentie van de vloer in de levensloopbestendige woningen nog wel lager dan 15 Hz, en daarmee minder effectief. De trillingen zijn echter wel lager dan bij een 200 mm kanaalplaatvloer.

levensloopbestendige woningen en de kopwoning van de rijwoningen. Dit is een zeer effectieve maatregel, waarmee de trillingen in alle woningen lager zijn dan de streefwaarden, maar de kosten van deze maatregel zijn met € 10.000 tot € 25.000 per woning erg hoog. Bij de rijwoningen moet wel aandacht worden besteed aan de dilatatie tussen de woningen in het geval dat alleen de kopwoning wordt afgeveerd.

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 3 per week, dus minder dan 1 per dag in de woningen het meest dichtbij het spoor), 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 ontstaat in de geplande bebouwing daarom geen onacceptabele situatie: de trillingen zijn daar immers (veel) 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 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. Er is op basis van bovenstaande informatie echter 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, 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. Verder is een groot aantal varianten doorgerekend

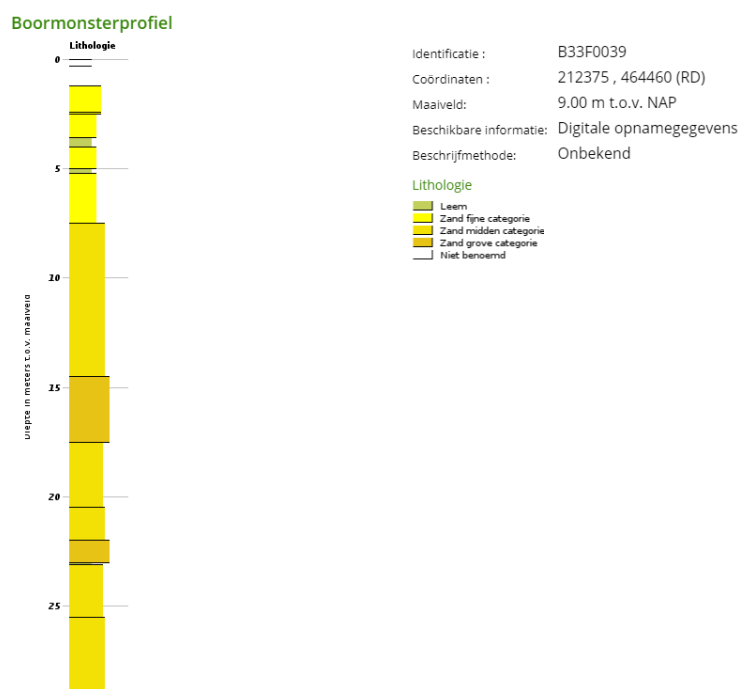
om inzicht te krijgen in de bandbreedte van de verwachte trillingen. Hiermee wordt een resultaat verkregen dat representatief is voor de toekomstige situatie.

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

Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek

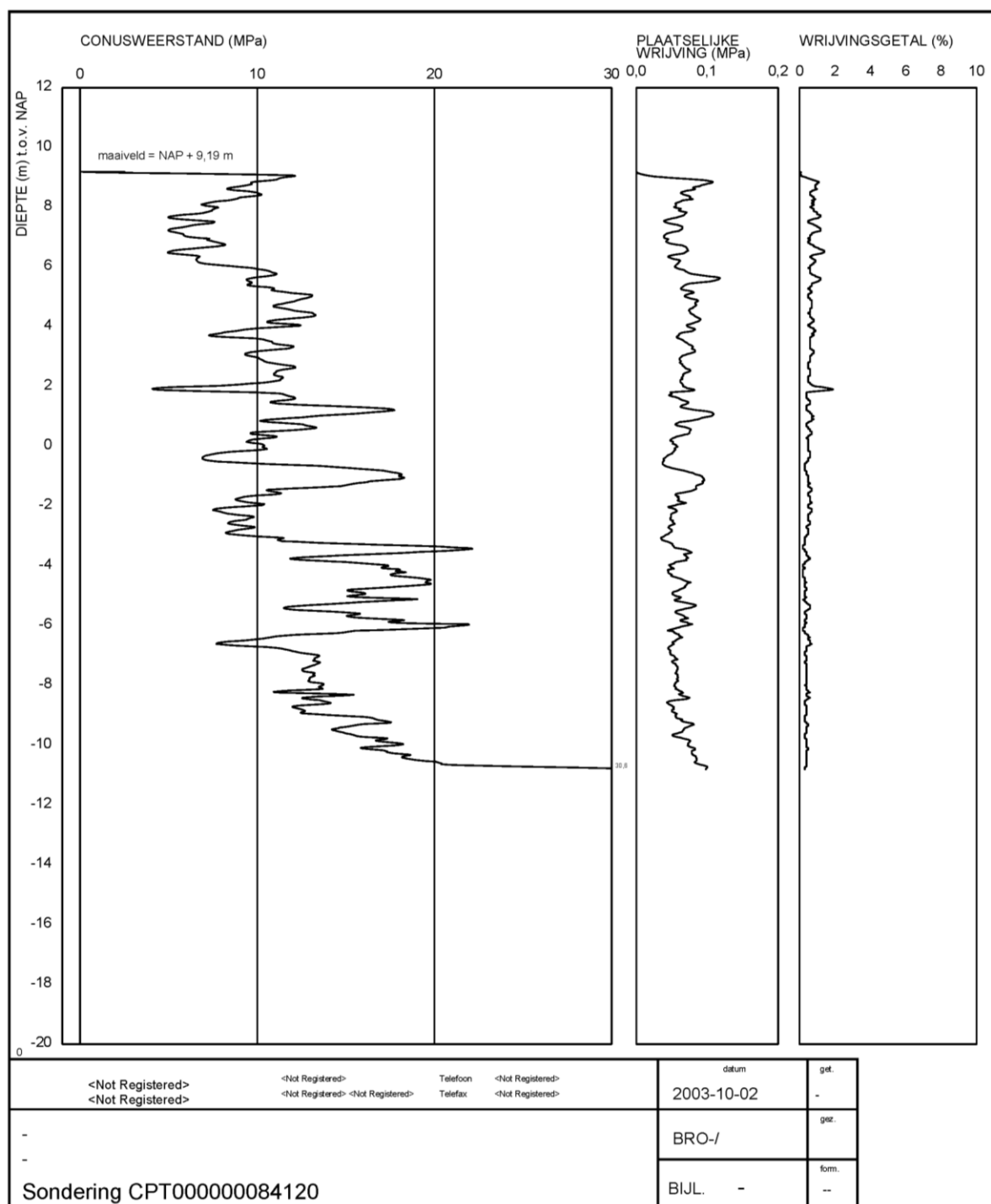
Deze bijlage bevat geotechnische achtergrondinformatie. Deze informatie is gebruikt om bijvoorbeeld de uitdamping van de trillingen met de afstand te bepalen. Daarnaast is deze informatie gebruikt in het rekenmodel waarmee de dynamische eigenschappen van de bebouwing worden bepaald.

Een grondboring in de nabijheid van het onderzoeksgebied (nr. B33F0039) is weergegeven in Figuur 12. Hier is te zien dat de bodem is opgebouwd uit zandlagen met verschillende structuren. Een dergelijke zandige bodem kent vaak een slechte uitdamping van de trillingen met de afstand, hierdoor kunnen trillingen ook op grotere afstand waarneembaar zijn.



Figuur 12 Boring nabij het onderzoeksgebied, B33F0039

Een representatieve sondering uit het onderzoeksgebied, waarin onder meer de conusweerstand te zien is, is weergegeven in Figuur 13.

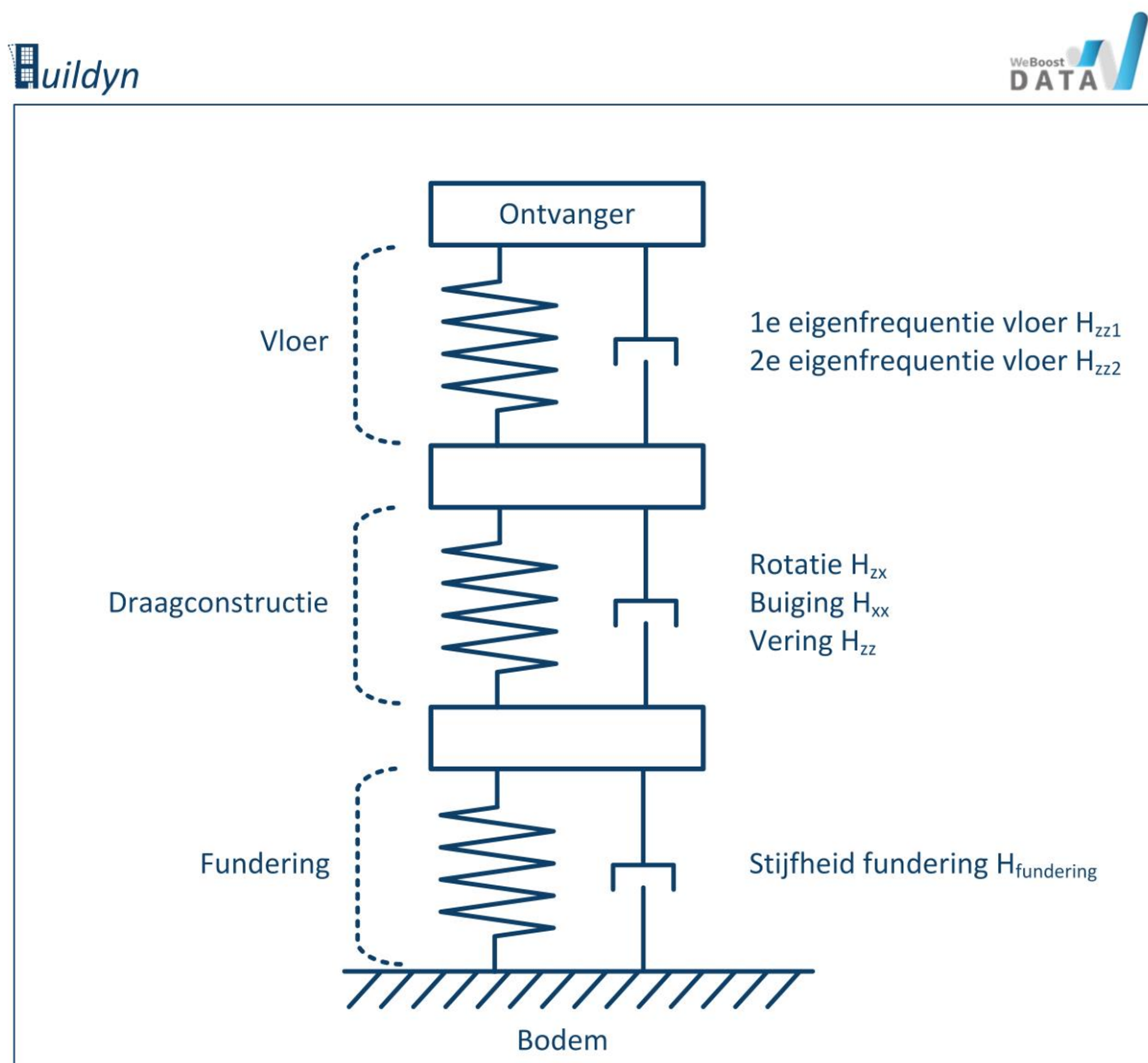


Figuur 13 Sondering nabij het onderzoeksgebied, CPT000000084120

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 14. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 14, worden in deze bijlage nader toegelicht.



Figuur 14 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.

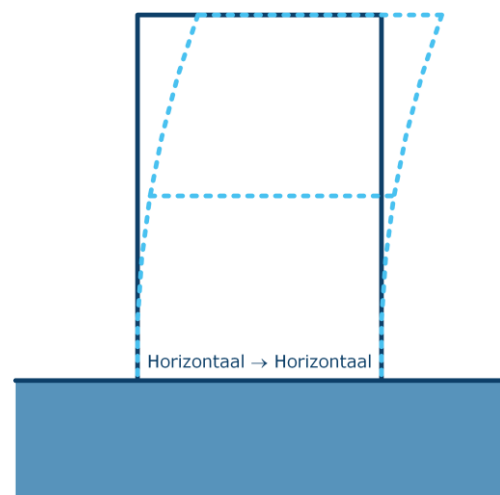
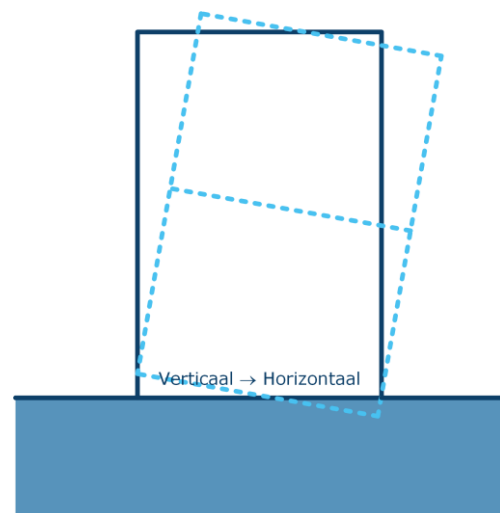
Dit effect noemen we H_{zx} , en is afhankelijk van:

- 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.

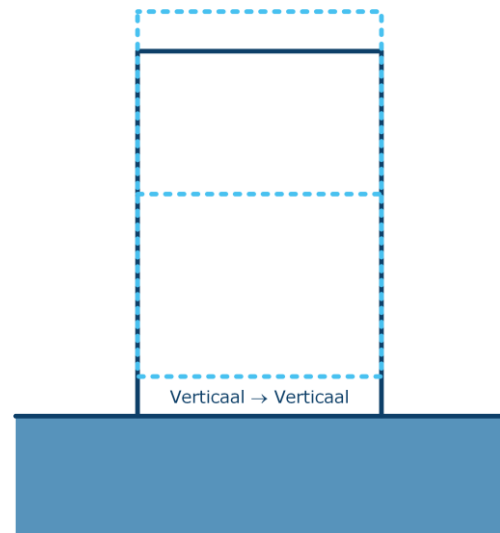
Dit effect noemen we H_{xx} , en is afhankelijk van:

- 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)



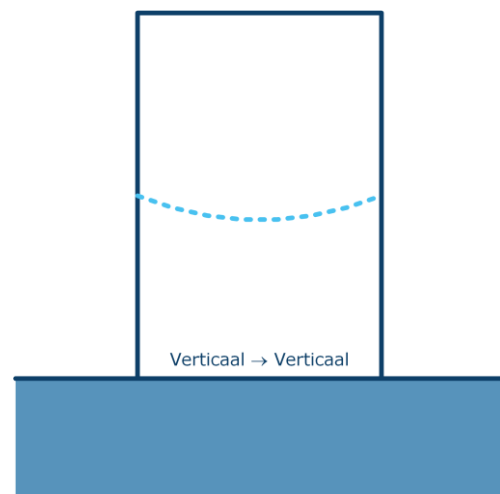
Vloeren

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:

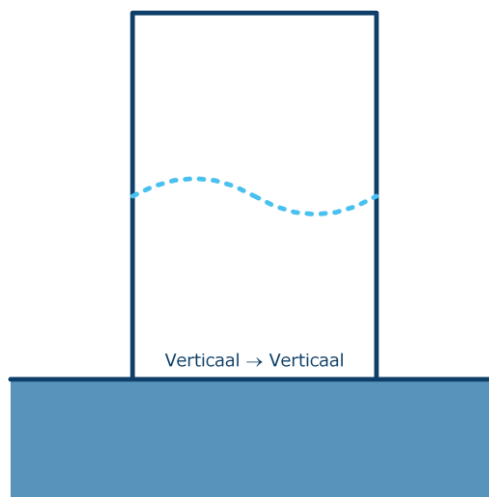
- Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- Afmetingen van de vloer
- Type oplegging



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 principeschets rechts.

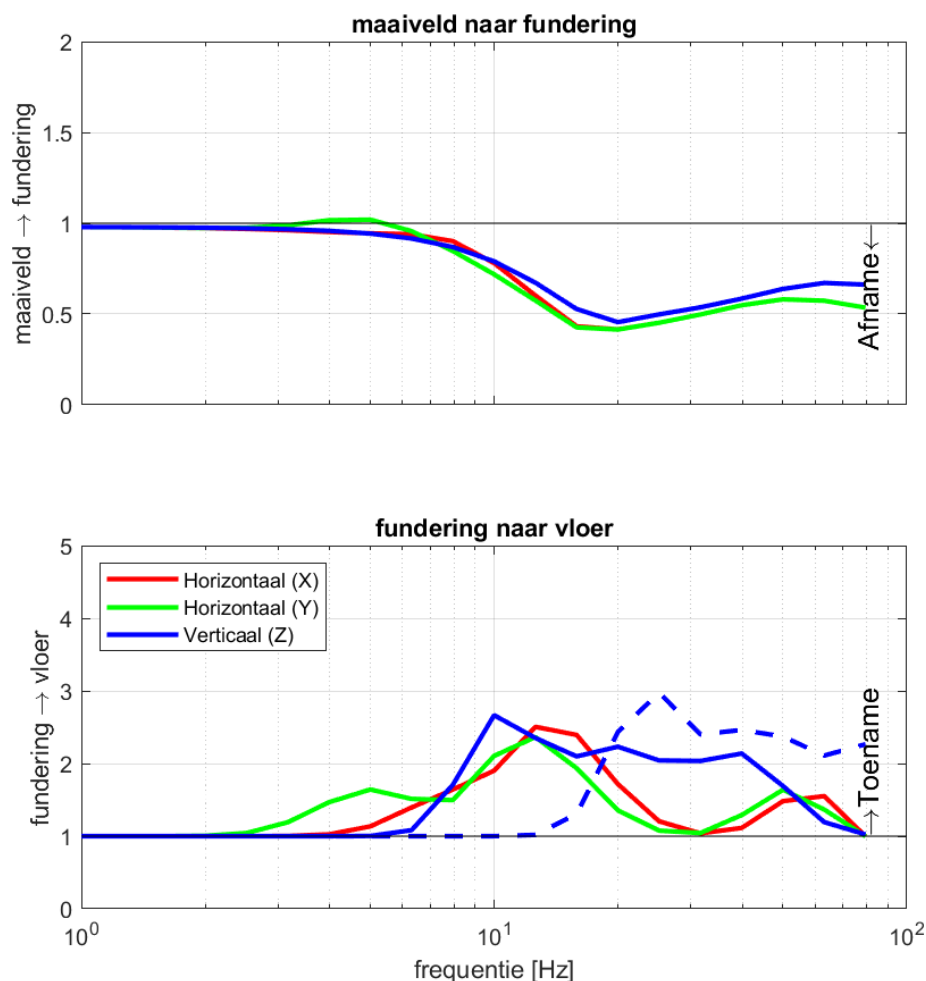
Dit effect noemen we H_{zz2} , en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1} .

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 een van de doorgerekende varianten weergegeven in Figuur 15.

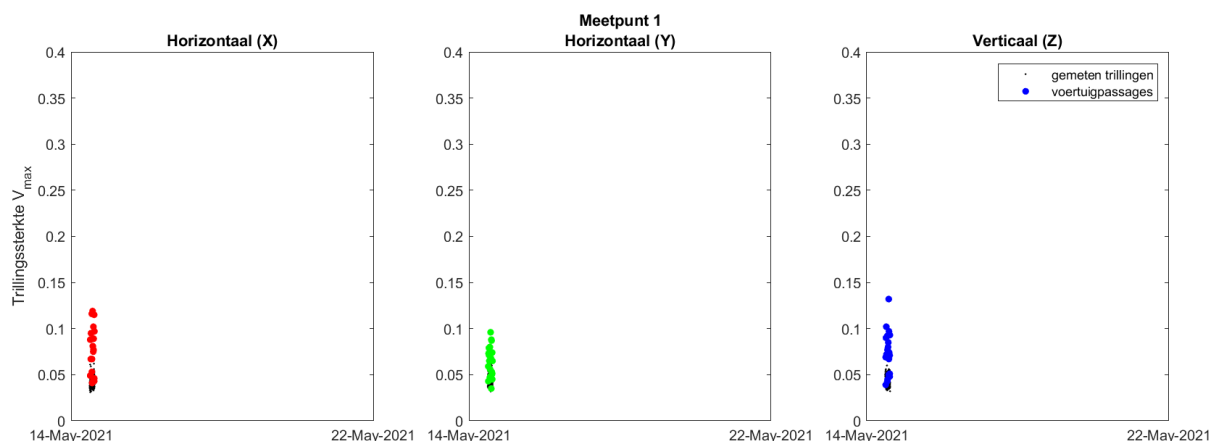


Figuur 15 Buildyn-resultaten voor levensloopbestendige twee-onder-een kapwoning (2 bouwlagen) met een 200 mm kanaalplaatvloer, gerealiseerd met van kalkzandsteen en metselwerk

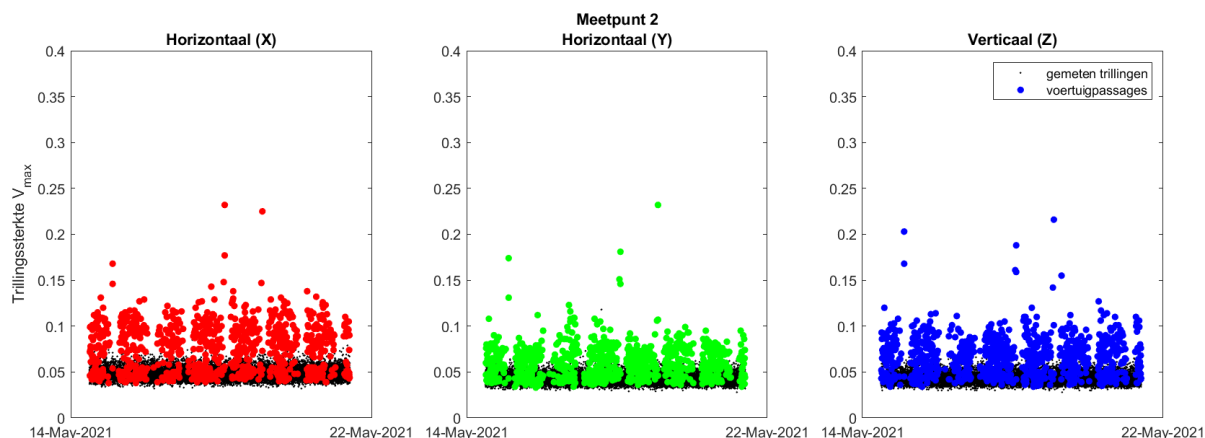


Resultaten metingen

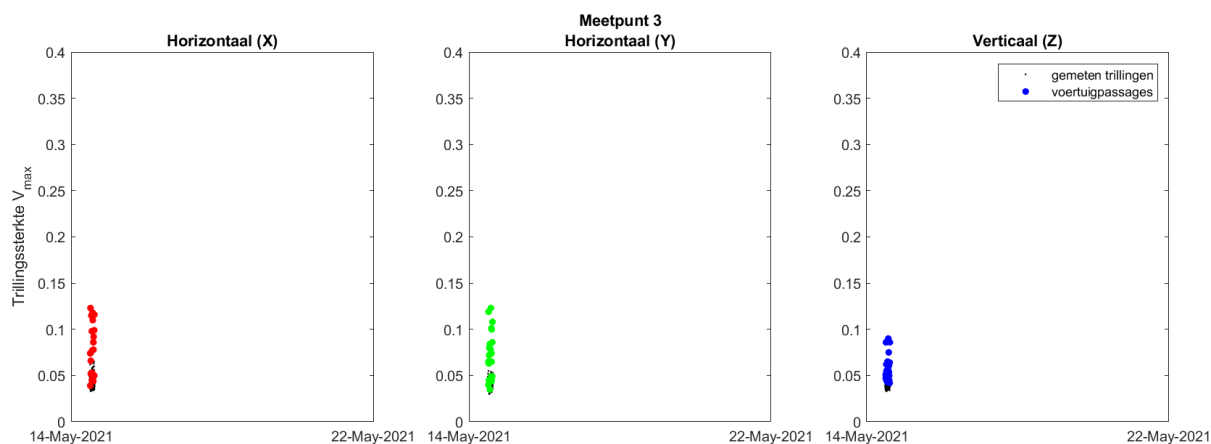
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



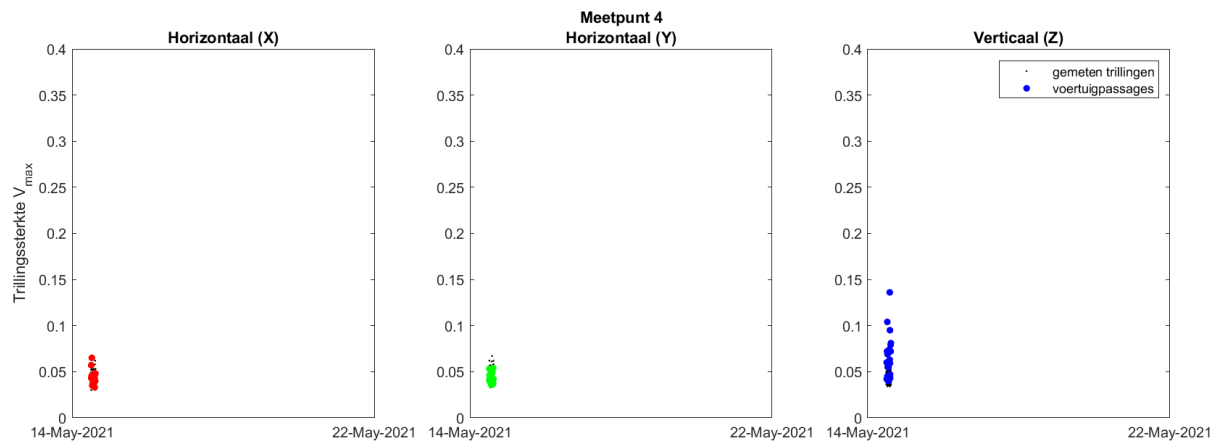
Figuur 16 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (maaiveld, westzijde plangebied)



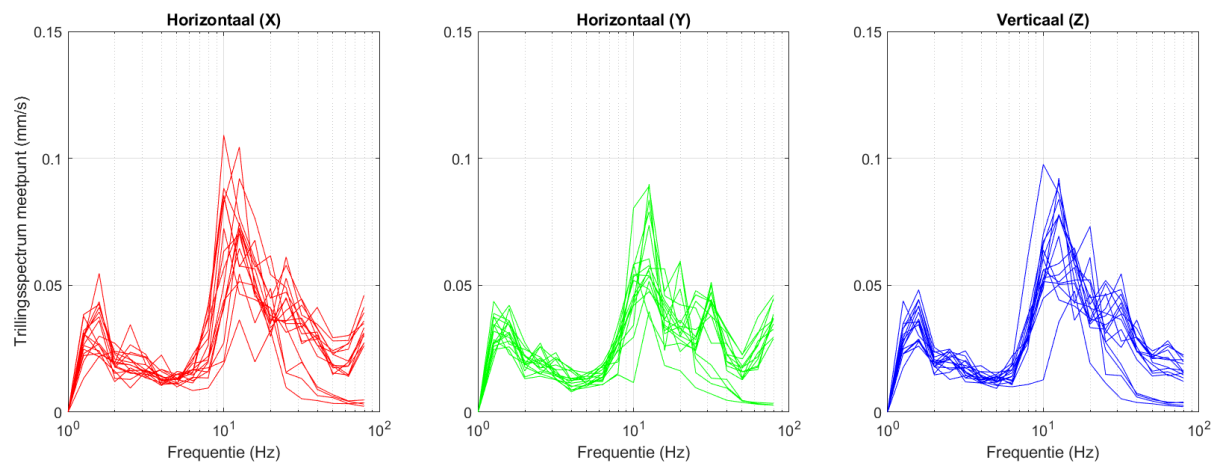
Figuur 17 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (maaiveld, midden plangebied)



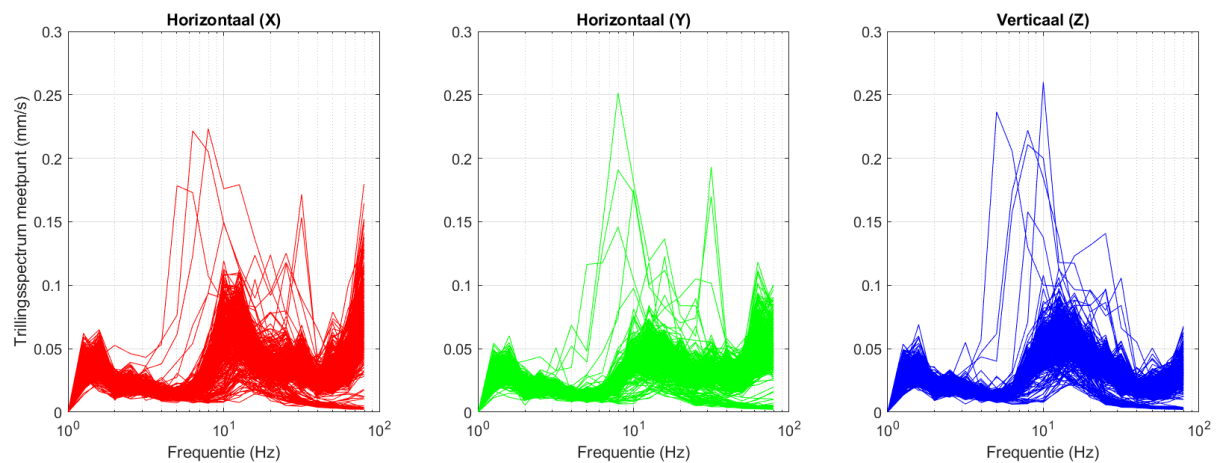
Figuur 18 Gemeten trillingen bij meetpunt 3 (maaiveld, oostzijde plangebied)



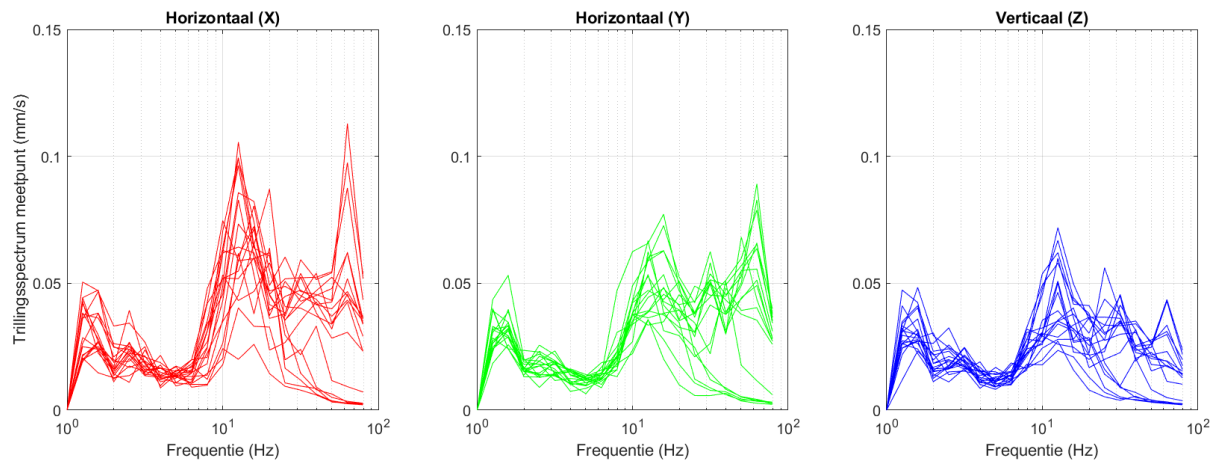
Figuur 19 Gemeten trillingen bij meetpunt 4 (fundering bestaand pand)



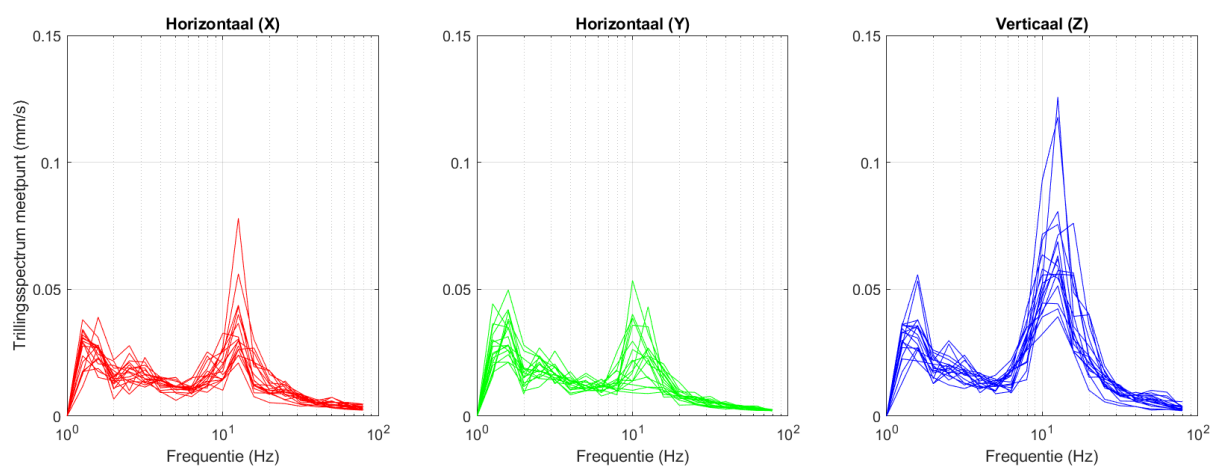
Figuur 20 Tertsbandspectra bij meetpunt 1



Figuur 21 Tertsbandspectra bij meetpunt 2



Figuur 22 Tertsbandspectra bij meetpunt 3

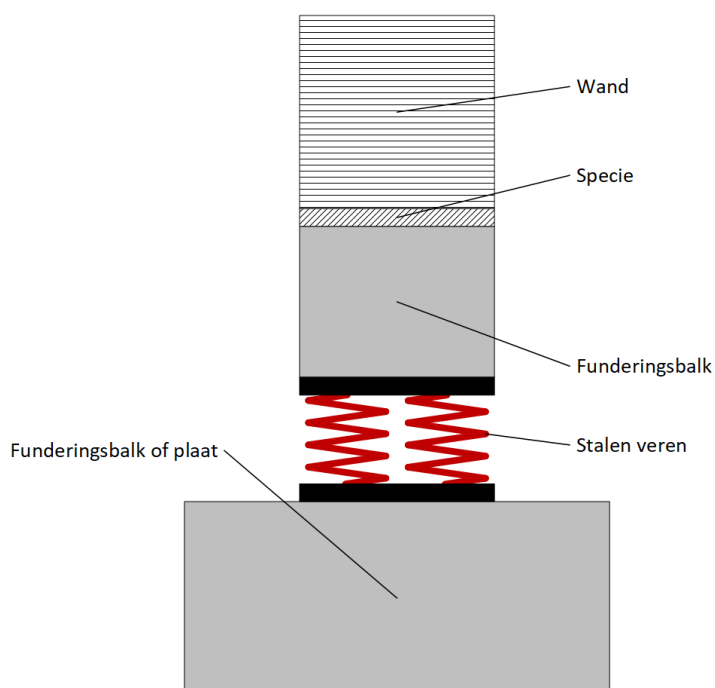


Figuur 23 Tertsbandspectra bij meetpunt 4

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 24. Een foto van een concrete toepassing bij eengezinswoningen in Prinsenbeek is weergegeven in Figuur 25.

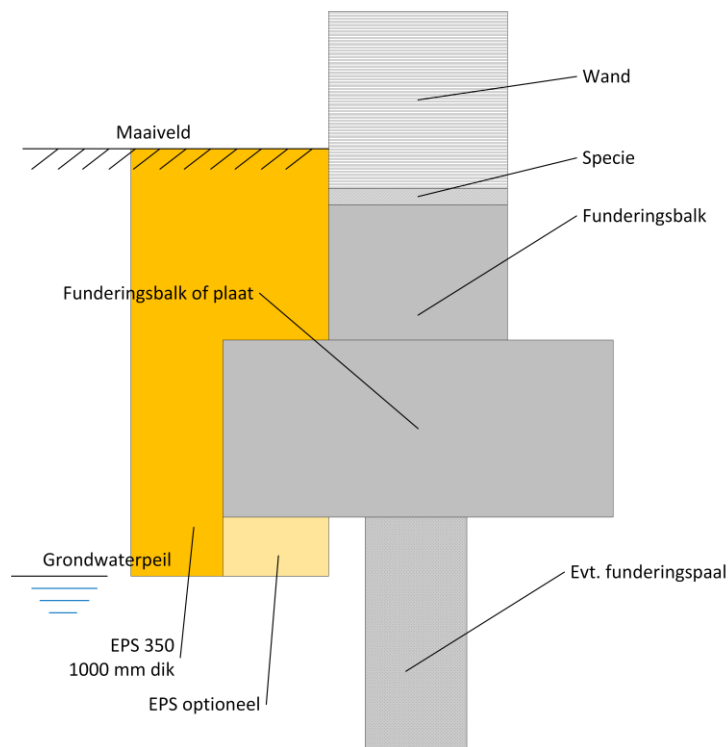


Figuur 24 Principeschets afgeveerde fundering (hier met stalen veerdozen)



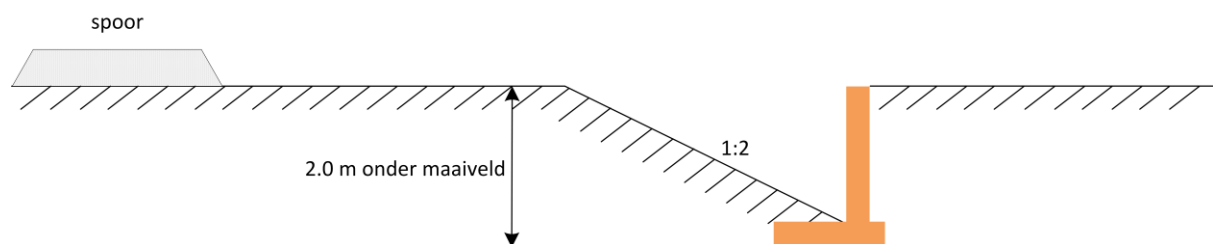
Figuur 25 Dubbele fundering met stalen veerdozen (project in Prinsenbeek)

Een principeschets van het bekleden van de fundering met EPS (piepschuim) is weergegeven in Figuur 26. 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 te worden aan de fundering. Een principeschets is weergegeven in Figuur 26. 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.

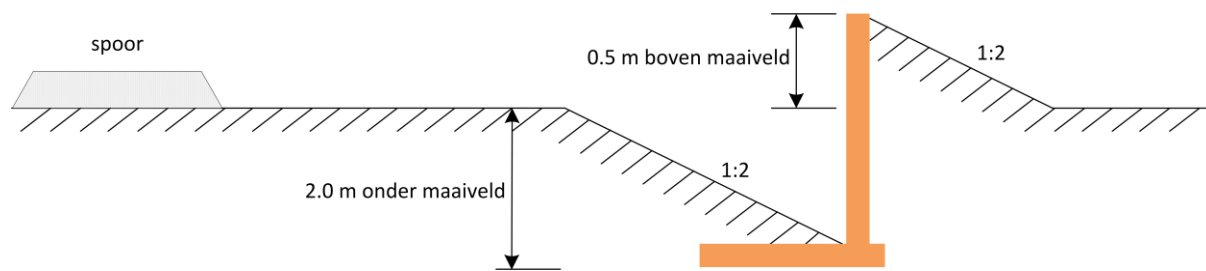


Figuur 26 Fundering met EPS-scherm ervoor

Principe-oplossingen voor het combineren van een sloot met een prefab L-wand zijn weergegeven in Figuur 27, en in Figuur 28 voor een situatie waarbij een combinatie van een sloot en geluidscherm wordt gerealiseerd met aan de zijde van de woning een 1:2-talud. Door de L-wand dieper te plaatsen ontstaat ook een trillingsreducerend effect, waarbij geldt dat hoe dieper deze wordt geplaatst, hoe groter het effect is. Merk op dat alle werkzaamheden binnen de 10 meter zone van het spoor vergunningsplichtig zijn bij ProRail. ProRail kan (i.v.m. taludstabiliteit) bezwaar hebben tegen het realiseren van een spoorloot of ontgraving in deze zone.



Figuur 27 Sloot gecombineerd met prefab L-wand



Figuur 28 Geluidscherm gecombineerd met sloot en prefab L-wand