

HAARWEG 5 BERGENTHEIM

Trillingsonderzoek t.b.v. nieuwbouw



Colofon

Auteur	T.J. van Swinderen MSc tom@we-boost.nl
Controle en vrijgave	ir. P.M. Boon pieter@we-boost.nl +31 6 10 03 94 54
Projectcode	WBD2021
Versienr	1.0
Datum	31 augustus 2020
Status	Vrijgegeven
Opdrachtgever	BJZ.nu



© We-Boost Data 2020

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.

Managementsamenvatting

Aan de Haarweg in Bergentheim wordt een nieuwe, vrijstaande woning met bijbehorende opstallen gerealiseerd. De nieuw te bouwen woning ligt in de nabijheid van de spoorlijn Zwolle/Almelo – Emmen. 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.

De belangrijkste bevinding van het onderzoek is dat er incidentele (maximaal 1 per dag) overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder (de SBR B-richtlijn) worden verwacht, vooral door afwijkende trillingsniveaus van een aantal goederentreinen dat 's nachts passeert.

Omdat niet wordt voldaan aan het beoordelingskader, is op basis van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn een maatregelafweging uitgevoerd. Hieruit volgt dat:

1. Maatregelen aan het spoor gezien de hoge kosten niet doelmatig zijn.
2. Maatregelen in de bodem gezien de incidentele overschrijdingen, de hoge kosten van deze maatregelen en de impact op de bruikbaarheid van de buitenruimte niet doelmatig zijn.
3. Voor maatregelen aan de woning alleen het volledig afveren van de woning (dubbele fundering met daartussen stalen veerdozen, afgeveerd op 3 Hz) met zekerheid zal leiden tot trillingen die lager zijn dan de streefwaarden. Deze maatregel brengt echter hoge kosten met zich mee (ca. € 20.000 tot € 30.000 excl. BTW), en wordt daarom niet doelmatig geacht in het licht van de incidentele overschrijdingen.

Wel adviseren wij om bij de constructieve uitwerking van het ontwerp van de woning te onderzoeken of het mogelijk is om de woning minder gevoelig voor trillingen te construeren, door een of meer van de volgende aanpassingen door te voeren:

- Vermijd houtskeletbouw, realiseer een zo stijf en zwaar mogelijke woning (beton heeft de voorkeur boven metselwerk, metselwerk boven een staalconstructie, een staalconstructie boven houtskeletbouw).
- Overweeg het toepassen van een (overgedimensioneerde) betonnen plaatfundering in plaats van een balkenfundering, of onderkelder de woning. Door een zwaardere fundering is het gebouw minder gevoelig voor de trillingen van de treinen.
- Pas indien mogelijk breedplaatvloeren toe in plaats van kanaalplaatvloeren of houten vloeren. Houdt bij de eigenfrequentie van de vloeren rekening met de trillingen van de treinen (eigenfrequentie bij voorkeur tussen de 4 en 7 Hz).

Met bovenstaande aanpassingen is het mogelijk om te voldoen aan de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn. Overigens geldt dat zelfs in een situatie met houtskeletbouw, en dus zonder bovenstaande geadviseerde aanpassingen, valt te motiveren dat er geen onacceptabele situatie ontstaat in het licht van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn, gezien de relatief beperkte trillingen, het feit dat er geen doelmatige maatregelen zijn te treffen en dat het gaat om incidentele overschrijdingen (minder dan 1 per dag).

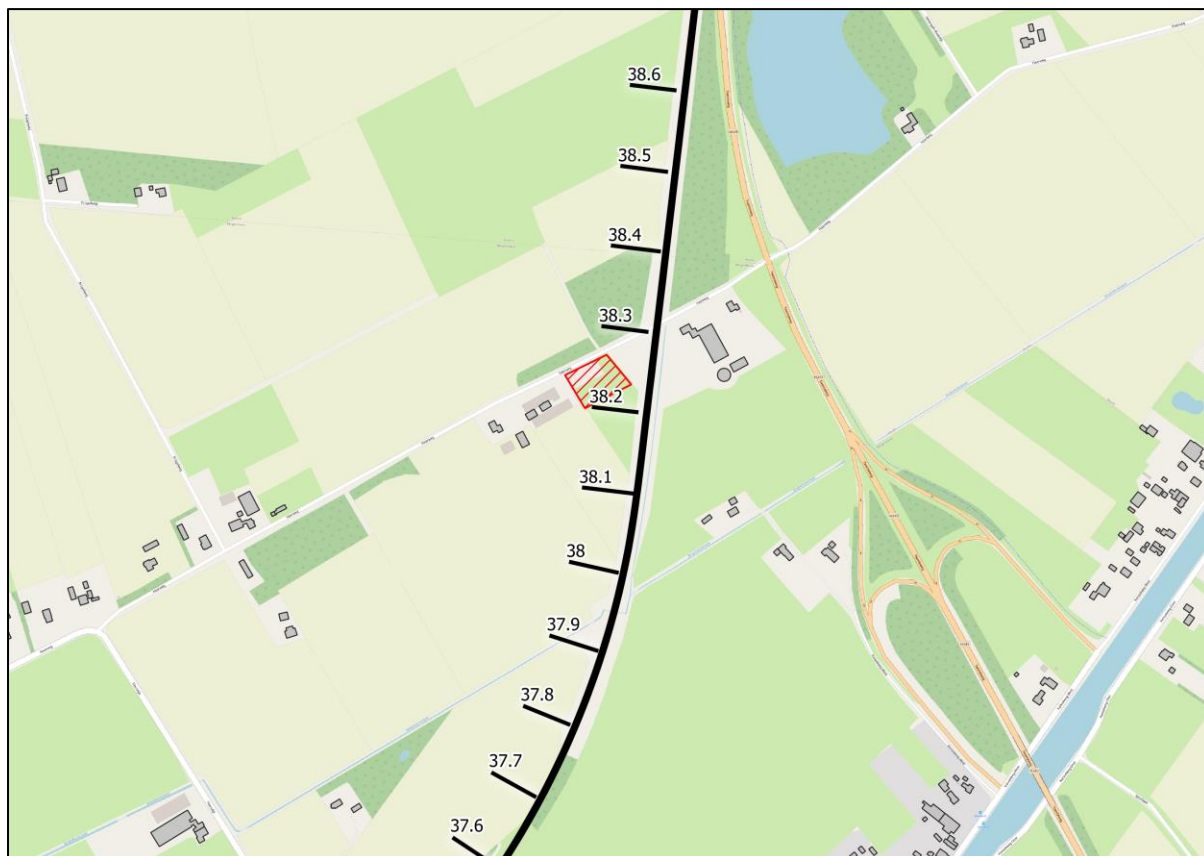
Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
1.1	Aanleiding	5
1.2	Doel	5
1.3	Leeswijzer	5
2	Situatie en uitgangspunten	7
2.1	Situatie	7
2.2	Uitgangspunten	8
3	Beoordelingskader	10
3.1	Beoordelingskader	10
3.2	Rekenmethode	11
4	Verwachte trillingen in de woning	14
4.1	Meetresultaten	14
4.2	Trillingen in geplande nieuwbouw	15
4.3	Maatregelen	15
4.4	Onzekerheden in het onderzoek	20
5	Conclusies en aanbevelingen	21
I	Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek	22
II	Bijlage Rekenmodel Buildyn	24
	Fundering	25
	Draagconstructie	25
	Vloeren	26
	Resultaten	26
III	Principedetails maatregelen	28

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Aan de Haarweg in Bergentheim wordt een nieuwe, vrijstaande woning met bijbehorende opstallen gerealiseerd. De nieuw te bouwen woning ligt in de nabijheid van de spoorlijn Zwolle/Almelo – Emmen, zie Figuur 1. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet *op voorhand* worden uitgesloten.



Figuur 1 Plangebied Haarweg 5 in Bergentheim

1.2 Doel

Doel van dit onderzoek is om vast te stellen of er sprake zal zijn van trillingshinder in de geplande bebouwing, en zo ja, met welke maatregelen deze hinder is te voorkomen. Hiervoor maken wij een nauwkeurige predictie van de trillingen in de geplande bebouwing, conform de in de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* omschreven aanpak. Deze trillingen toetsen we aan het van toepassing zijnde beoordelingskader (de SBR B-richtlijn). Als er overschrijdingen van het beoordelingskader worden verwacht, dan geven we aan met welke 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 geplande bebouwing op basis van de gemeten trillingen en een aantal varianten voor mogelijke bebouwing. Het resultaat van deze stap wordt in hoofdstuk 4 beschreven. In hoofdstuk 5 geven we de conclusies en aanbevelingen.

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 uit een onbebouwd perceel, waarop nieuwbouw in de vorm van een vrijstaande woning wordt gerealiseerd, zie Figuur 2.



Figuur 2 Bestaande bebouwing en te bebouwen perceel

De nieuwe woning wordt op zo'n 65 meter afstand van het spoor gerealiseerd. De rijsnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. Deze gegevens zijn gebaseerd op gegevens uit het Geluidsregister Spoor. Volgens de NMCA spoor 2030-2040 (vooruitblik voor goederenvervoer) zal het goederenvervoer op deze lijn licht toenemen van de huidige 2 tot 3 goederentreinen naar 3 tot 5 goederentreinen 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	130 km/h	3.00	2.00	0.88
Sneltrain	130 km/h	1.00	1.00	0.13
Goederentrein	90 km/h	0.03	0.18	0.15

Andere trillingsbronnen, zoals vracht- en landbouwverkeer, zullen niet voor waarneembare trillingen in de woning zorgen, gezien de afstand tot de weg en de lage rijsnelheid.

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 wordt een grondgebonden woning in de vorm van een vrijstaande woning gebouwd. Er is op dit moment nog geen ontwerp van de bebouwing uitgewerkt, daarom wordt in de berekeningen uitgegaan van de gegevens in Tabel 2, waarmee een aantal varianten wordt doorgerekend. Het rekenmodel voor de bebouwing is gebaseerd op Tabel 2.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Meerdere varianten • Kanaalplaatvloer 200 mm met cementdekvloer 70 mm • Breedplaatvloer 200 mm met cementdekvloer 70 mm • Houten vloer (balken 70 x 220 mm)
Hoogte	10 meter
Lengte vloerveld	6 tot 8.5 meter
Breedte vloerveld	12.5 meter
Constructietype	Wanden-vloeren
Fundering	Op staal
Stijfheid gebouw	Meerdere varianten: • Kalkzandsteen en metselwerk • Prefab beton • Staalconstructie • Houtskelet

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 en nabij het onderzoeksgebied op twee punten, zie Figuur 3. De metingen zijn uitgevoerd van 20 augustus tot en met 27 augustus 2020, en zijn verricht op maaiveld. De meetresultaten uit dit meetonderzoek geven we weer in hoofdstuk 4.



Figuur 3 Meetpunten in en bij het onderzoeksgebied

3 Beoordelingskader

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

3.1 Beoordelingskader

Er bestaat in Nederland geen wettelijk kader voor de beoordeling van trillingshinder in gebouwen. Wel geldt dat in het kader van een goede ruimtelijke ordening kan worden verzocht om trillingen mee te nemen bij de wijziging van bestemmingsplannen waar trillingen een rol kunnen spelen. Op basis van jurisprudentie wordt al enkele decennia gebruik gemaakt van de SBR-richtlijn om trillingen in gebouwen te beoordelen.¹

Deze SBR-richtlijn bestaat uit drie delen (deel A – schade in gebouwen, deel B – hinder voor personen in gebouwen en deel C – verstoring van gevoelige apparatuur) waarvan alleen deel B voor dit onderzoek relevant is. De afstand tussen het spoor en de geplande bebouwing is dermate groot dat er geen schade aan de gebouwen zal ontstaan, en verstoring van gevoelige apparatuur als gevolg van de realisatie van dit plan is ook niet aan de orde.

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

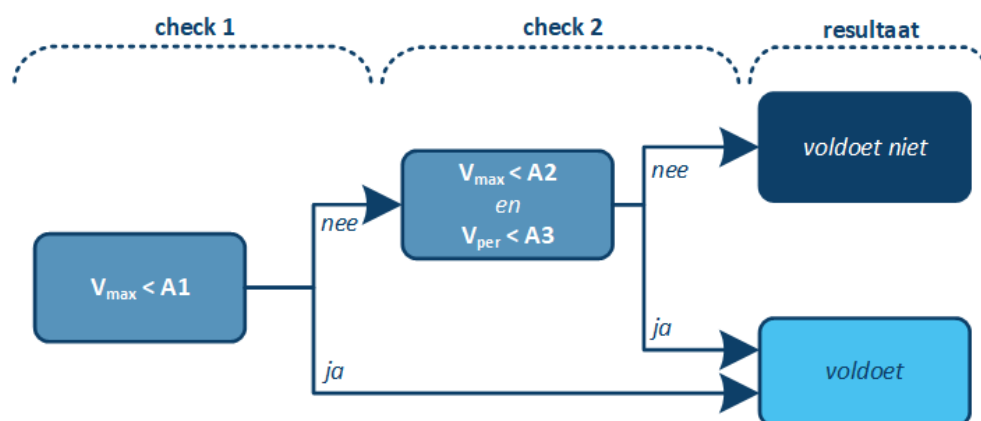
1. De richtlijn toetst zowel een maximaal optredende trillingssterkte (V_{max} , treedt op bij de trein die gedurende de meetperiode de hoogste trillingen veroorzaakt) als het tijdsgemiddelde van de trillingen (V_{per} , deze grootheid is in tegenstelling tot V_{max} dus ook afhankelijk van het aantal treinen).
2. De richtlijn maakt in de beoordeling onderscheid tussen verschillende situaties, en toetst daarbij strenger in:
 - a. Nieuwbouwsituaties (nieuwe gebouwen, nieuw spoor, aanleg van wissels). Bij bestaande situaties zijn de streefwaarden minder streng, er wordt dan uitgegaan van een zekere mate van gewinning 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.

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 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

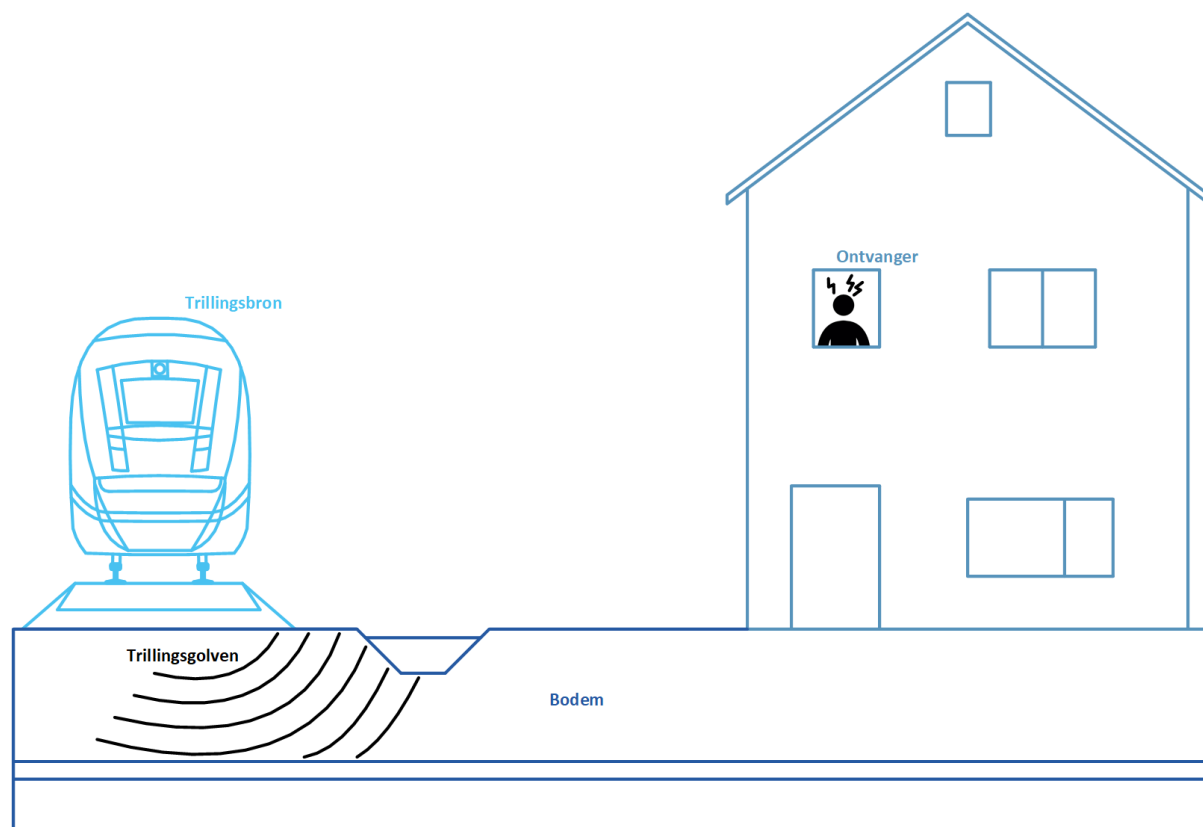
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om een nog niet gerealiseerde gebouw, wordt op basis van metingen in de omgeving van het plangebied een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande nieuwe woning. Deze verwachte trillingen zijn afhankelijk van de constructieve eigenschappen van de geplande woning, 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 in en bij het plangebied. De beoordeling van de trillingen in de geplande woning heeft plaatsgevonden op basis van deze metingen.

3.2.3 De bodem

De bodem op deze locatie bestaat hoofdzakelijk uit zandlagen met verschillende stijfheden, maar lokaal komen ook slappere kleilagen voor, 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 geplande woning. 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.

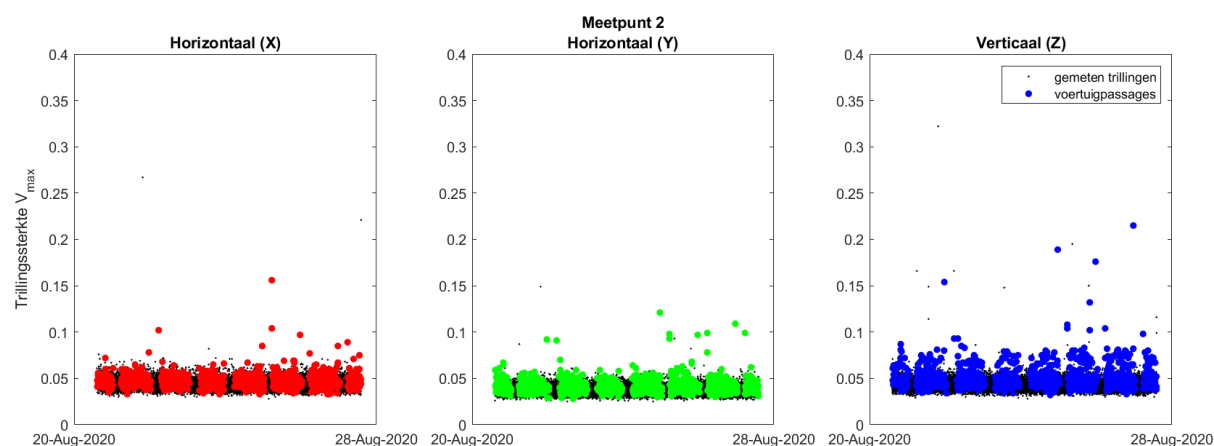
4 Verwachte trillingen in de woning

In dit hoofdstuk wordt een 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 beschreven in het vorige hoofdstuk.

4.1 Meetresultaten

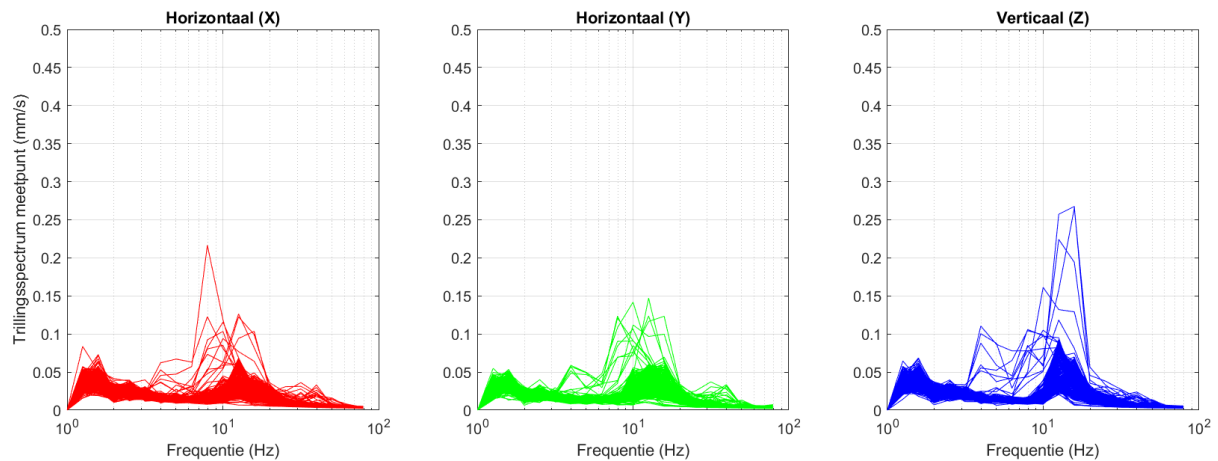
Alcedo heeft metingen uitgevoerd op twee punten op maaiveld. De trillingen ter hoogte van het bouwvlak zijn weergegeven in Figuur 6. In Figuur 6 valt het volgende op:

1. De trillingen zijn maatgevend in verticale richting.
2. De trillingen van de meeste reizigerstreinen (meeste stipjes in de figuur) vallen weg in de achtergrondtrillingen, maar voor de verticale richting geldt dat een deel van de reizigerstreinen wel hogere trillingen geeft dan het achtergrondniveau. De hoogste trillingen (uitschieters) zijn steeds afkomstig van goederentreinen.



Figuur 6 Gemeten trillingen op maaiveld (meetpunt 2, bij bouwvlak)

De frequentie-inhoud (spectrogram, weergegeven als 1/3-octaaftbandspectrum of tertsbandspectrum) van de trillingen op meetpunt 2 is weergegeven in Figuur 7. In deze figuur is zichtbaar dat de dominante frequentie van de trillingen tussen de 12 en 15 Hz ligt, maar dat er ook pieken zijn in het spectrum bij 8 Hz (in de horizontale X-richting). De piek in het spectrum bij 12 tot 15 Hz is vrij karakteristiek voor zandige bodems en treinen op hoge snelheid. De relatief hoge trillingen bij lage frequenties (onder de 5 Hz) worden veroorzaakt door de passage van zware goederentreinen.



Figuur 7 Tertsbandspectra bij meetpunt 2

4.2 Trillingen in geplande nieuwbouw

De geplande woning is gemodelleerd op basis van de input uit hoofdstuk 2. Het (frequentie-afhankelijke) gedrag van de woning is weergegeven in bijlage II. Met deze resultaten is bepaald in welke mate de trillingen worden versterkt tussen het meetpunt op maaiveld en de vloeren in de toekomstige woning. Met deze resultaten is bepaald in welke mate de trillingen worden versterkt tussen de meetpunten op maaiveld en de vloeren in de toekomstige woning voor verschillende varianten. Hierbij wordt beoordeeld op de hoogste verdieping, waar de hoogste trillingen worden verwacht. De verwachte trillingen in de woning voor drie representatieve varianten, alsmede een beoordeling aan de SBR B-richtlijn (zie hoofdstuk 3), is weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4 Verwachte trillingen en beoordeling aan SBR B-richtlijn

Type constructie	Trillingssterkte $V_{\max}$	Trillingsintensiteit V_{per}	Beoordeling
Metselwerk en kanaalplaatvloer	0.3	0.01	Voldoet niet, minder dan 1 overschrijding per dag
Prefab beton en breedplaatvloer	0.3	0.01	Voldoet niet, minder dan 1 overschrijding per week
Houtskeletbouw	0.4	0.01 – 0.02	Voldoet niet, minder dan 1 overschrijding per dag

Uit de berekeningen volgt dat, ongeacht de constructiewijze, incidentele overschrijdingen niet zijn uit te sluiten in de nieuwe woning. Dit komt vooral door de passage van goederentreinen met een afwijkend trillingsniveau, waardoor de trillingen op maaiveld al relatief hoog zijn. Het gaat echter wel om een beperkt aantal overschrijdingen, de trillingen van reizigerstreinen zijn lager dan de achtergrondtrillingen in de woning. Verder geldt dat naarmate een slappere constructie wordt gekozen, het aantal overschrijdingen per week toeneemt, maar dit aantal blijft beperkt tot minder dan 1 per dag.

Uit de beoordeling van de trillingen volgt dat er overschrijdingen van de streefwaarden mogelijk zijn. Daarom wordt in de hierna volgende paragraaf ingegaan op mogelijke maatregelen om de trillingssituatie te verbeteren.

4.3 Maatregelen

In het plangebied zijn overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder voor nieuwe situaties niet uit te sluiten. 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 de geplande woning als *matige hinder*. Vervolgens geeft deze bijlage aan dat matige hinder kan worden geaccepteerd onder een aantal voorwaarden:

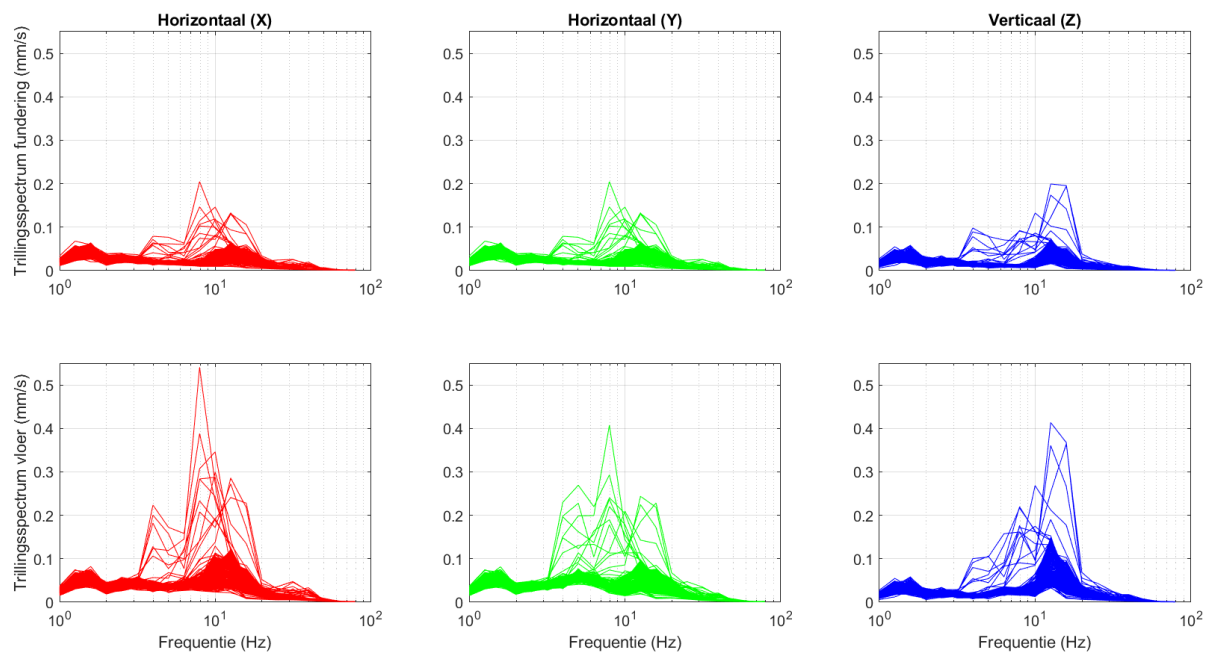
1. De mate waarin de trillingssterkte voorkomt. Hiervoor geldt dat de trillingsintensiteit V_{per} een goede indicatie is. Die is zeer laag (0.01, ruim lager dan de streefwaarde voor V_{per} van 0.05). De overschrijdingen zijn uitsluitend het gevolg van de passage van goederentreinen, het aantal overschrijdingen is beperkt tot minder dan 1 per dag, ook in de toekomst na de in de NMCA voorziene intensivering van het goederenverkeer richting Emmen. Er is dus maximaal sprake van incidentele overschrijdingen, die het achterwege laten van een maatregel zouden kunnen 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 woning.

4.3.1 Analyse resultaten

Om te bepalen welke trillingsrichting en trillingsfrequenties in de geplande woning maatgevend zijn, is een nadere analyse uitgevoerd van de verwachte trillingen. Het trillingsspectrum in de X-, Y- en Z-richting op zowel de fundering als bovenin de woning voor een van de onderzochte varianten is weergegeven in Figuur 8. Hier is te zien dat de trillingen maatgevend zijn in de horizontale X-richting, door een combinatie van rotatie en buiging van de woning. De trillingen zijn het hoogst rond 8 Hz, maar ook in verticale richting (tussen de 12 en 15 Hz) worden hoge trillingen verwacht.

Maatregelen zullen daarom effectief moeten zijn in het frequentiegebied tussen ca. 6 en 20 Hz. In de volgende subparagrafen wordt ingegaan op mogelijke maatregelen aan de trillingsbron, in de bodem of aan de woning.



Figuur 8 Trillingsspectra in de woning bij een constructie van metselwerk en een kanaalplaatvloer. Boven de trillingen op de fundering, onder op de hoogste verdieping

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 ballastmatten onder het spoor, frequenter spooronderhoud of het verstevigen van de onderbouw van het spoor. Deze maatregelen vallen echter buiten de scope van dit onderzoek omdat deze maatregelen allemaal buiten het plangebied moeten worden getroffen. Bovendien zijn de kosten van deze maatregelen zeer hoog (meer dan € 250.000) en gezien de incidentele overschrijdingen 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 woning wordt afgeschermd. Voorbeelden zijn het toevoegen van een spoorstoot, een trillingsscherm van piepschuim (EPS), beton, jet-grout (soil-mix methode voor beton) of een damwand. Deze maatregelen hebben een aantal nadelen:

1. Ze zijn vooral effectief dicht op de trillingsbron (het spoor, maar valt buiten het plangebied) en (in mindere mate ook) dicht op de woning. Bij toepassing dicht op het spoor is een lengte van ca. 150 meter nodig, direct langs het spoor (valt buiten plangebied) en aan de oostelijke plangrens. Bij toepassing bij de woning is een lengte van ca. 110 meter nodig, en zijn de zuidelijke en oostelijke plangrens de meest logische locatie (al is de afstand tot de woning daar nog vrij groot, zodat de effectiviteit van een maatregel lager is. Dichter op de woning plaatsen raden wij af, omdat dit de bruikbaarheid van de buitenruimte sterk negatief beïnvloedt).
2. De toekomstvastheid van de maatregelen is laag, ze zijn niet of zeer slecht aanpasbaar aan toekomstige wijzigingen aan het spoor (bijv. snelheidsverhogingen of intensiveringen), of aan wijzigingen in het ruimtegebruik.

3. De kosten van deze maatregelen zijn hoog.

Mogelijke maatregelen in de bodem met een inschatting van het effect en de kosten voor een maatregel op de perceelgrens zijn weergegeven in Tabel 5. De kosten bij toepassing langs het spoor zijn hoger door de grotere benodigde lengte, plus extra afstemmings- en inpassingskosten.

Tabel 5 Mogelijke maatregelen in de bodem

Maatregel	Effect	Kosten
Betonnen wand	20 – 40%	€ 1.2 – 1.9 mln
Jet-grout wand	15 – 30%	€ 0.9 – 1.6 mln
Damwand	5 – 15%	€ 0.8 – 1.1 mln
Sloot 2 m diep	10 – 30%	€ 0.1 – 0.3 mln
Beton met rubber	30 – 60%	€ 1.8 – 2.4 mln
Damwand met EPS	15 – 35%	€ 1.3 – 1.9 mln
Damwand met sleuf	20 – 40%	€ 1.4 – 2.1 mln
L-wand met sloot 2 m diep	15 – 35%	€ 0.2 – 0.4 mln

Uit het overzicht met maatregelen volgt dat de kosten van de maatregelen vrijwel zonder uitzondering hoog zijn. De goedkoopste maatregel, een spoorloot van 2 meter diep, evt. gecombineerd met een L-wand om het ruimtegebruik te beperken (zie bijlage III voor mogelijke uitwerkingen), leidt nog steeds tot kosten die boven de € 100.000 liggen. Bovendien wordt met deze maatregelen nog niet met zekerheid voldaan aan het beoordelingskader, omdat een reductie van de trillingen van 25 procent nodig is. Naast de blijvende impact op het gebruik van de buitenruimte geldt dat de kosten van deze maatregelen niet in relatie staan tot de incidentele overschrijdingen. Maatregelen in de bodem zijn daarmee niet doelmatig².

4.3.4 Maatregelen aan de woning

Bij maatregelen aan de woning is een breed scala aan maatregelen mogelijk. Die variëren van het verder van het spoor plaatsen van de woning, het toepassen van een zwaardere fundering (dikke betonplaat of woning onderkelderen), het stijver construeren van de woning tot het ontkoppelen van de fundering door middel van stalen veren tussen een dubbele fundering. Een deel van deze maatregelen is wellicht inpasbaar bij de detaillering van het ontwerp zonder hoge kosten met zich mee te brengen. Het globale effect en de kosten van de mogelijke maatregelen aan de woning zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Mogelijke maatregelen aan de woning

Maatregel	Effect	Kosten ³
Toepassen van dempende materialen	0 – 10%	< 2% SK
Breedplaatvloeren i.p.v. kanaalplaatvloeren	10 – 20%	< 3% SK

² 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.

³ SK = Stichtingskosten

Maatregel	Effect	Kosten ³
Ontkoppelen van de vloeren	0 %	2 – 4% SK
Ontkoppelen van de fundering (afveren)	40 – 60%	6 – 10% SK
Inpakken van de fundering	5 – 15%	1 – 3% SK
Zwaardere fundering	15 – 30%	3 – 5% SK
Stijvere constructie van de woning	5 – 15%	2 – 5% SK

De enige met zekerheid voldoende effectieve (maar ook de meest kostbare) maatregel is het ontkoppelen van de fundering. Hierbij wordt een dubbele fundering aangebracht, met een betonnen plaatfundering, daarop stalen veerdozen (met eigenfrequentie onder 3 Hz en toegevoegde demping) en daarop een normale balkenfundering (zie bijlage III voor een schetsuitwerking). Deze maatregel wordt vooral toegepast wanneer op korte afstand van het spoor wordt gebouwd, maar is kostbaar (bij deze woning ca. € 20.000 tot € 30.000 excl. BTW) en wordt daarom niet doelmatig geacht in het licht van de incidentele overschrijdingen, zeker wanneer in de constructieve uitwerking voor een constructief zwaarder gebouw wordt gekozen. Andere maatregelen, zoals het toepassen van een zwaardere fundering of het onderkelderen van de woning, zijn mogelijk onvoldoende effectief.

4.3.5 Afweging van maatregelen

In de geplande woning wordt niet voldaan aan het beoordelingskader door de passage van goederentreinen met afwijkende trillingsniveaus tijdens de nachtperiode. De trillingen van deze treinen voldoen overigens wel aan de streefwaarden voor de dag, die ruimer zijn.

Gezien de overschrijdingen is op basis van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn een maatregelafweging uitgevoerd. Hieruit volgt dat maatregelen aan het spoor gezien de hoge kosten niet doelmatig zijn en dat maatregelen in de bodem gezien de incidentele overschrijdingen, de hoge kosten van deze maatregelen en de impact op de bruikbaarheid van de buitenruimte evenmin doelmatig zijn. Voor maatregelen aan de woning geldt dat alleen het volledig afveren van de woning (dubbele fundering met daartussen stalen veerdozen, afgeveerd op maximaal 3 Hz) met zekerheid zal leiden tot trillingen die lager zijn dan de streefwaarden. Deze maatregel brengt echter hoge kosten met zich mee (ca. € 20.000 tot € 30.000 excl. BTW), en wordt daarom niet doelmatig geacht in het licht van de incidentele overschrijdingen⁴.

Wel adviseren wij om bij de constructieve uitwerking van het ontwerp van de woning te onderzoeken of het mogelijk is om de woning minder gevoelig voor trillingen te construeren, door een of meer van de volgende aanpassingen door te voeren (in afnemende prioritering:

- Vermijd houtskeletbouw, realiseer een zo stijf en zwaar mogelijke woning (beton heeft de voorkeur boven metselwerk, metselwerk boven staal, staal boven houtskeletbouw).

⁴ ProRail hanteert voor het treffen van trillingsmaatregelen vaak een bedrag van € 47.000 in bestaande situaties. Een dergelijke kostenverhoging per woning zal echter leiden tot onverkoopbare woningen, daarom wordt bij nieuwbouw vaak een (veel) lager (projectafhankelijk te motiveren) bedrag gehanteerd.

- Overweeg het toepassen van een (overgedimensioneerde) betonnen plaatfundering in plaats van een balkenfundering, of onderkelder de woning. Door een zwaardere fundering is het gebouw minder gevoelig voor de trillingen van de treinen.
- Pas indien mogelijk breedplaatvloeren toe in plaats van kanaalplaatvloeren of houten vloeren. Houdt bij de eigenfrequentie van de vloeren rekening met de trillingen van de treinen (eigenfrequentie bij voorkeur tussen de 4 en 7 Hz).

Overigens geldt dat zelfs in een situatie met houtskeletbouw, en dus zonder bovenstaande geadviseerde aanpassingen, valt te motiveren dat er geen onacceptabele situatie ontstaat in het licht van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn, gezien de relatief beperkte trillingen, het feit dat er geen doelmatige maatregelen zijn te treffen en dat het gaat om incidentele overschrijdingen (minder dan 1 per dag).

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 droog te typeren periode, waardoor de trillingen in met name zandige bodems hoger kunnen zijn. Er is geen informatie bekend over de huidige status van de spoorligging. Op basis van bovenstaande afwegingen geldt dat de resultaten in dit onderzoek mogelijk aan de conservatieve kant zijn (lees: een bovengrens weergeven van de werkelijk te verwachten trillingen in klimatologisch als normaal te typeren periodes).
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 de wat grotere afstand tot het spoor is deze onzekerheid bij dit onderzoek beperkt.
3. Ten aanzien van de woning 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 scala aan mogelijke gebouwtypes om de invloed van deze variatie in kaart te brengen. Hiermee wordt een resultaat verkregen dat representatief is voor de toekomstige situatie.

De invloed van bovenstaande onzekerheden is niet dermate groot dat dit tot andere conclusies van het onderzoek zal leiden. Gezien de gemeten trillingen is de verwachting dat ook in klimatologisch als normaal te typeren periodes trillingen boven de streefwaarden optreden.

5 Conclusies en aanbevelingen

In het voorliggende onderzoek zijn de verwachte trillingen in een nieuw te bouwen woning aan de Haarweg in Bergentheim. Uit het onderzoek volgt dat er overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder (de SBR B-richtlijn) worden verwacht, vooral door afwijkende trillingsniveaus van een aantal goederentreinen dat 's nachts passeert. Het gaat om maximaal 1 overschrijding per dag, zelfs in de toekomst, na de in de NMCA Spoor verwachte toename van het aantal goederentreinen.

Omdat niet wordt voldaan aan het beoordelingskader, is op basis van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn een maatregelafweging uitgevoerd. Hieruit volgt dat:

1. Maatregelen aan het spoor gezien de hoge kosten niet doelmatig zijn.
2. Maatregelen in de bodem gezien de incidentele overschrijdingen, de hoge kosten van deze maatregelen en de impact op de bruikbaarheid van de buitenruimte niet doelmatig zijn.
3. Voor maatregelen aan de woning alleen het volledig afveren van de woning (dubbele fundering met daartussen stalen veerdozen, afgeveerd op 3 Hz) met zekerheid zal leiden tot trillingen die lager zijn dan de streefwaarden. Deze maatregel brengt echter hoge kosten met zich mee (ca. € 20.000 tot € 30.000 excl. BTW), en wordt daarom niet doelmatig geacht in het licht van de incidentele overschrijdingen.

Wel adviseren wij om bij de constructieve uitwerking van het ontwerp van de woning te onderzoeken of het mogelijk is om de woning minder gevoelig voor trillingen te construeren, door een of meer van de volgende aanpassingen door te voeren:

- Vermijd houtskeletbouw, realiseer een zo stijf en zwaar mogelijke woning (beton heeft de voorkeur boven metselwerk, metselwerk boven een staalconstructie, een staalconstructie boven houtskeletbouw).
- Overweeg het toepassen van een (overgedimensioneerde) betonnen plaatfundering in plaats van een balkenfundering, of onderkelder de woning. Door een zwaardere fundering is het gebouw minder gevoelig voor de trillingen van de treinen.
- Pas indien mogelijk breedplaatvloeren toe in plaats van kanaalplaatvloeren of houten vloeren. Houdt bij de eigenfrequentie van de vloeren rekening met de trillingen van de treinen (eigenfrequentie bij voorkeur tussen de 4 en 7 Hz).

Met bovenstaande aanpassingen is het mogelijk om te voldoen aan de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn.

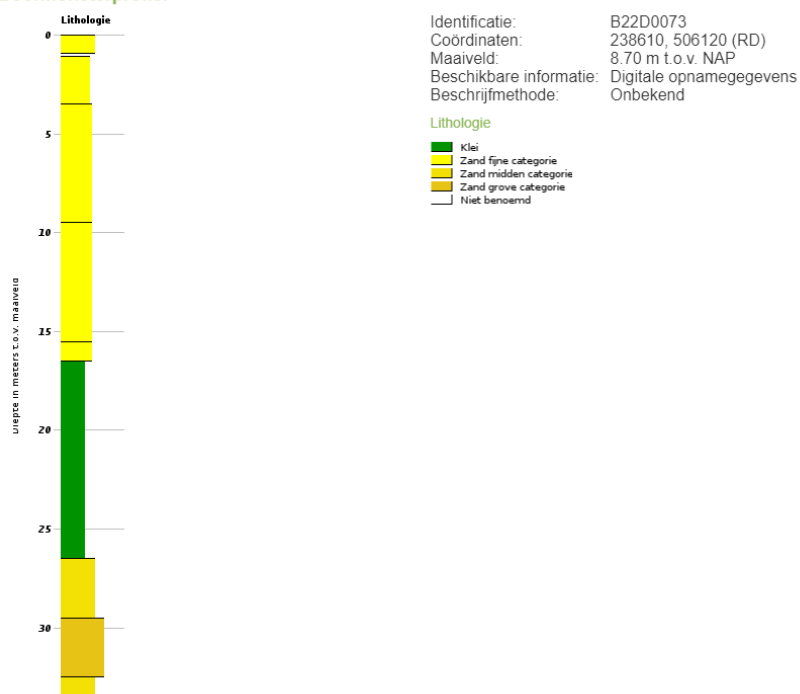
Overigens geldt dat zelfs in een situatie met houtskeletbouw, en dus zonder bovenstaande geadviseerde aanpassingen, valt te motiveren dat er geen onacceptabele situatie ontstaat in het licht van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn, gezien de relatief beperkte trillingen, het feit dat er geen doelmatige maatregelen zijn te treffen en dat het gaat om incidentele overschrijdingen (minder dan 1 per dag).

Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek

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

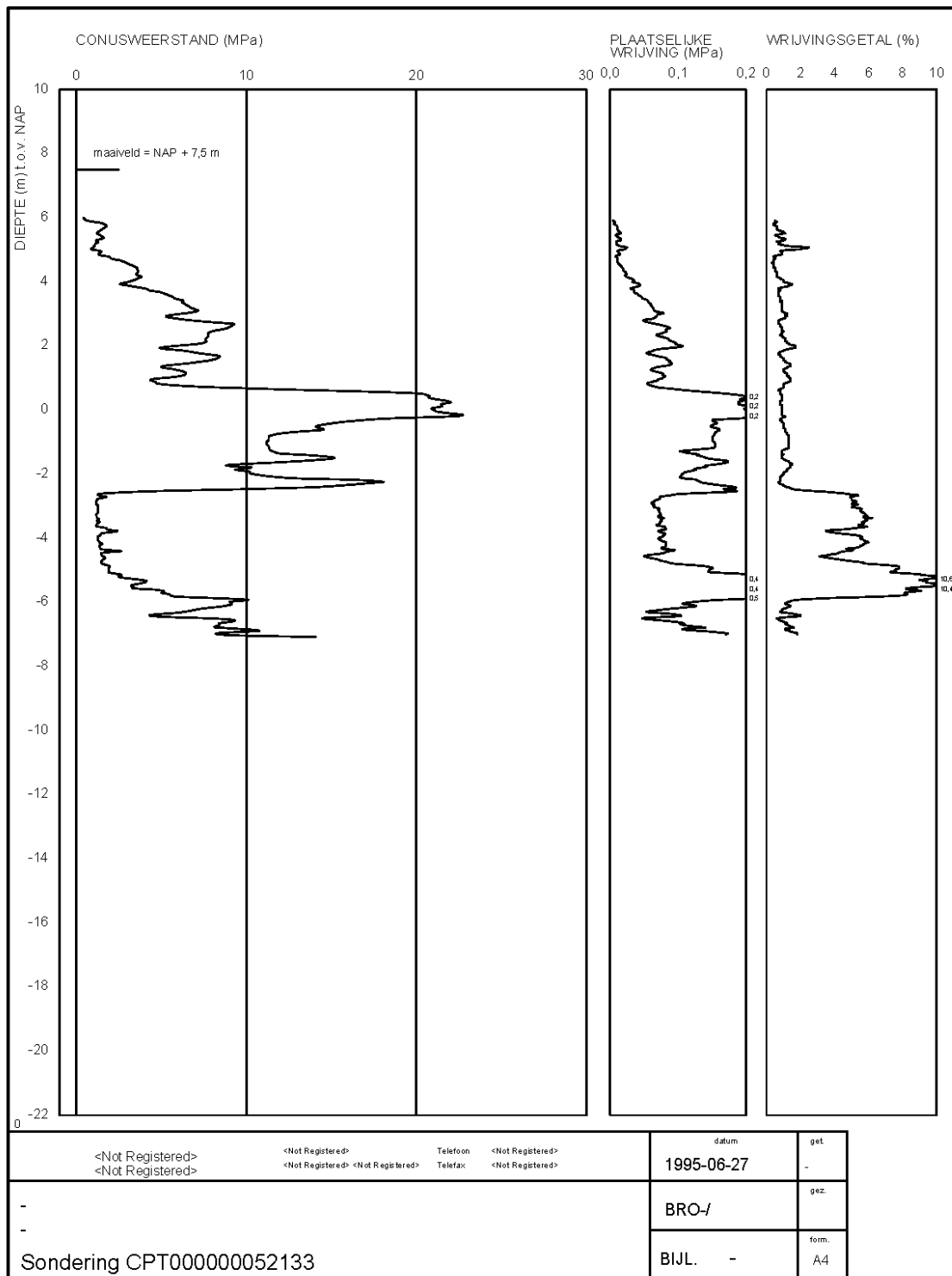
Een grondboring nabij het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur 9. Hier is te zien dat de bodem is opgebouwd uit zandlagen met verschillende structuren, op grotere diepte kunnen leem- of zandige kleilagen voorkomen. Een dergelijke zandige bodem kent een slechte uitdemping van de trillingen met de afstand, hierdoor kunnen trillingen tot op grotere afstand waarneembaar zijn.

Boormonsterprofiel



Figuur 9 Boring nabij het plangebied

Een sondering uit de omgeving van het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur 10. Hier is waarin eenzelfde bodemopbouw zichtbaar: voornamelijk zand, met op grotere diepte ook klei-achtige lagen. Met name de hoger gelegen bodemlagen zijn van invloed op de trillingen.

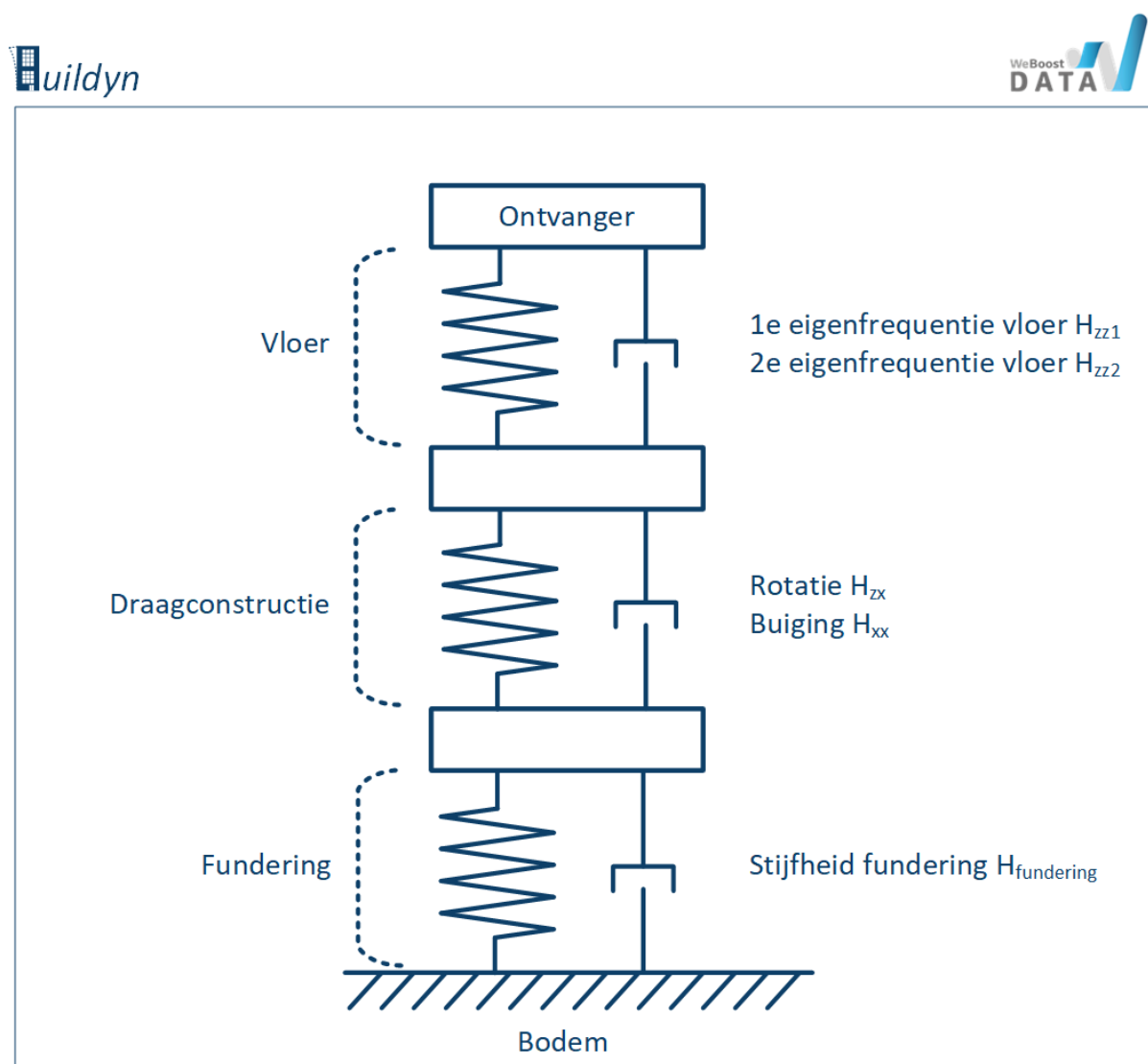


Figuur 10 Sondering uit omgeving plangebied

Bijlage Rekenmodel Buildyn

In dit rapport is gebruik gemaakt van het door We-Boost Data ontwikkelde 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 geijkt met praktijkresultaten uit ruim 200 metingen in gebouwen. Dit model bestaat uit een aantal modules, deze worden in deze bijlage kort toegelicht.

In Buildyn wordt een gebouw gemodelleerd door middel van gekoppelde massa-veersystemen, zie Figuur 11. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 11, worden in deze bijlage nader toegelicht.



Figuur 11 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 kunnen trillingen worden 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 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) en doorbuiging 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.

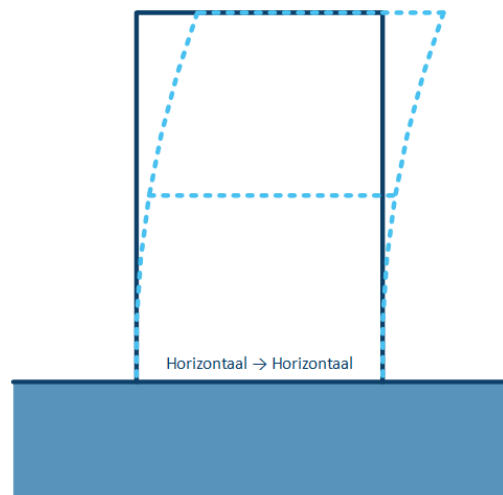
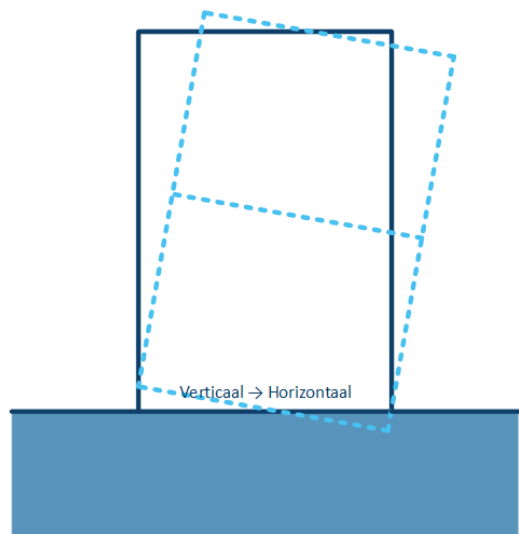
Dit effect wordt in Buildyn weergegeven als H_{zx} , en is afhankelijk van:

- 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 wordt in Buildyn weergegeven als H_{xx} , en is afhankelijk van:

- Afmetingen van het gebouw (breedte, lengte, hoogte)



- Constructietype (stijfheid, starheid van verbindingen, open ruimtes)
- Gebruikte materialen

Vloeren

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

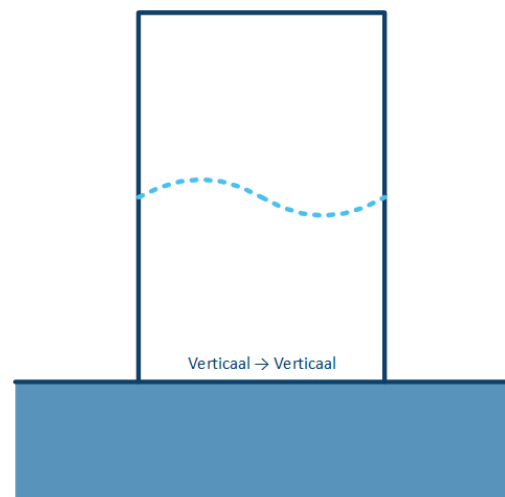
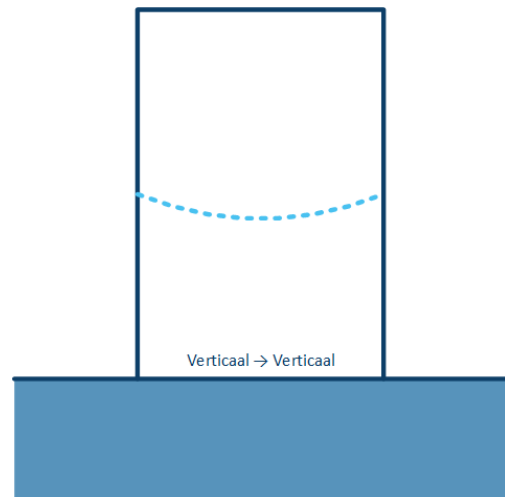
De eerste buigmodus van de vloer (bij de eerste eigenfrequentie) is simpele doorbuiging, zoals weergegeven in de principeschets rechts. Met name de eigenfrequentie (de frequentie waarvoor de vloer gevoelig is) en de demping bepalen in hoeverre de trillingen worden opgeslingerd. De trillingen zijn het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

Dit effect wordt in Buildyn weergegeven als H_{zz1} , en is afhankelijk van:

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

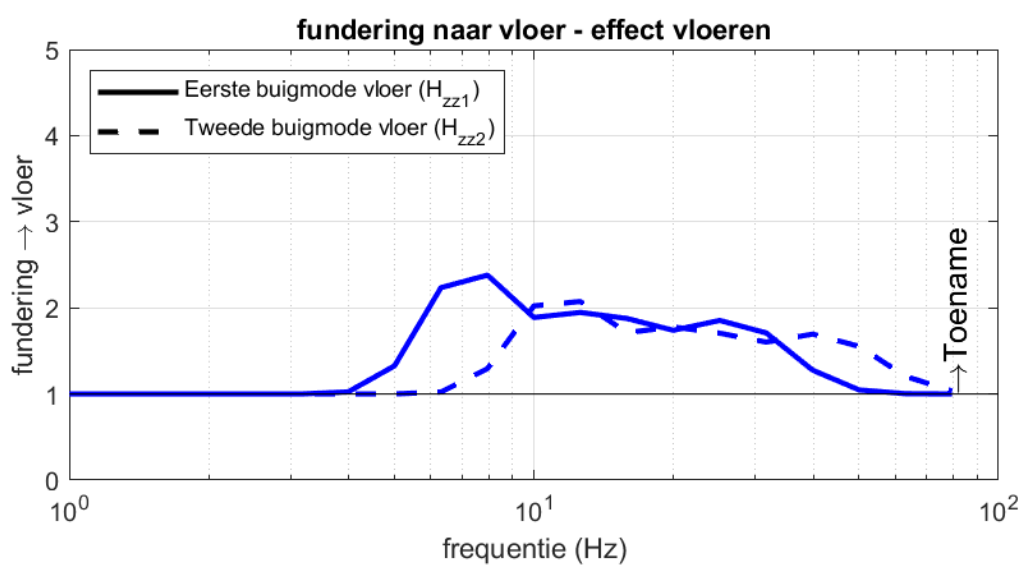
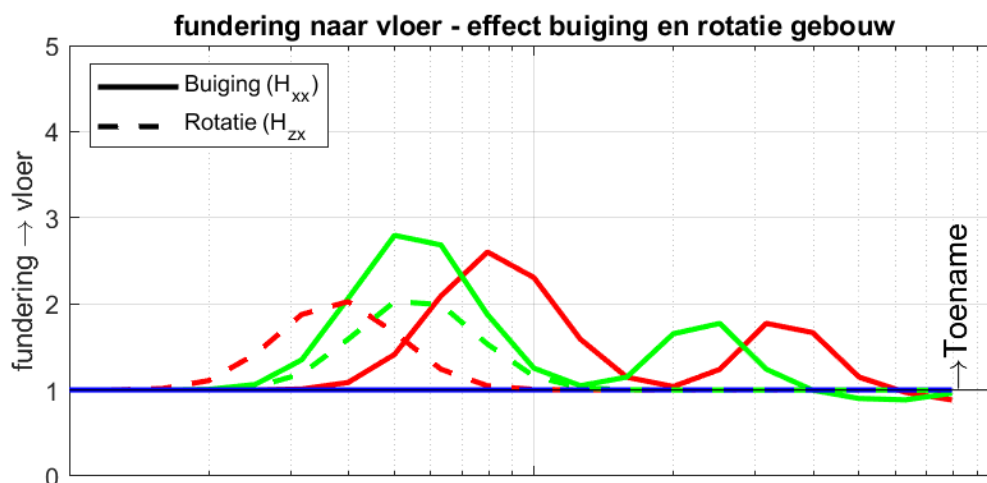
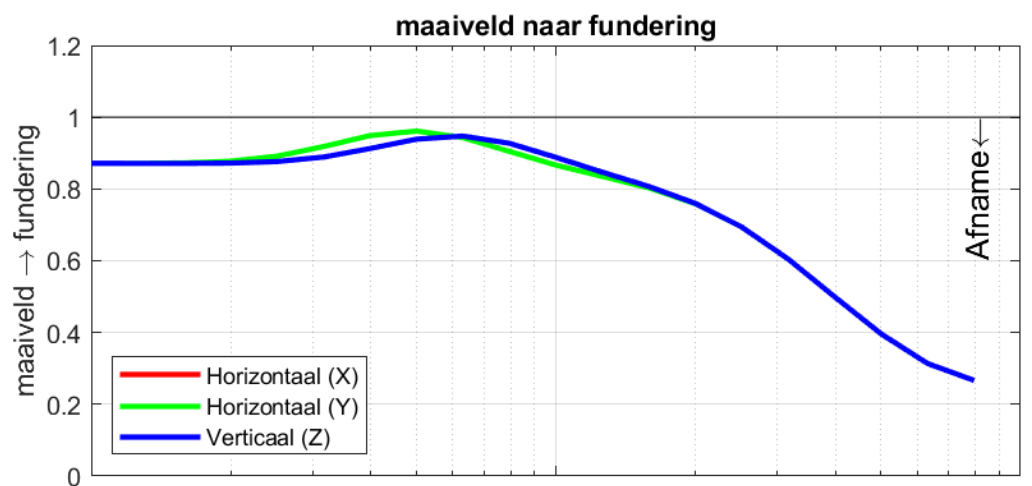
Bij de tweede buigmodus van de vloer (bij de tweede eigenfrequentie) zijn de trillingen maximaal op ongeveer $\frac{1}{4}$ van het vloerveld, zie de principeschets rechts.

Dit effect wordt in Buildyn weergegeven als H_{zz2} , en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1} .



Resultaten

De resultaten uit de Buildyn-berekeningen voor een van de onderzochte varianten zijn weergegeven in Figuur 12.



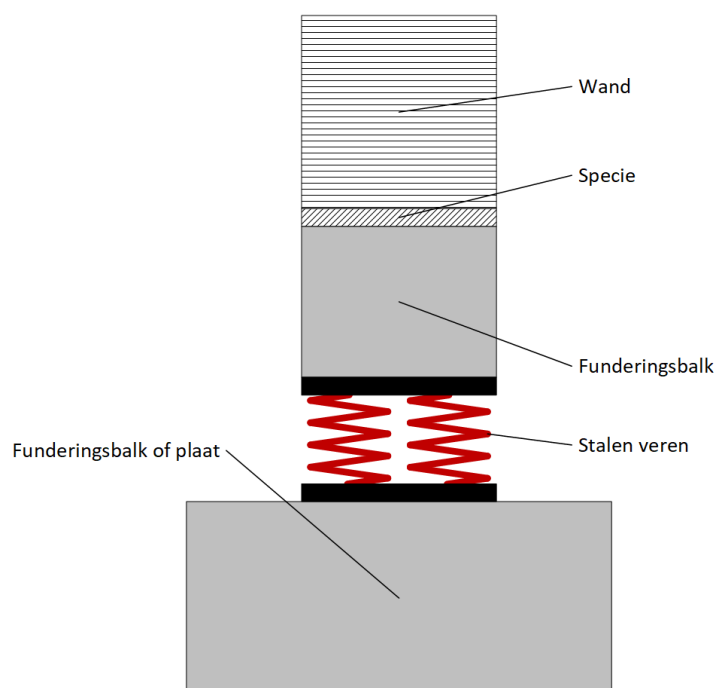
Figuur 12 Buildyn-resultaten voor een woning van 10 meter bouwhoogte met kalkzandsteen wanden, metselwerk en kanaalplaatvloeren met 6.5 m vloeroverspanning.



Principedetails maatregelen

Deze bijlage bevat achtergrondinformatie en principedetails van de voorgestelde maatregelen.

Een prinsescheets van een afgeveerde fundering met stalen veerdozen is weergegeven in Figuur 13. Een foto van een concrete toepassing bij eengezinswoningen in Prinsenbeek is weergegeven in Figuur 14.

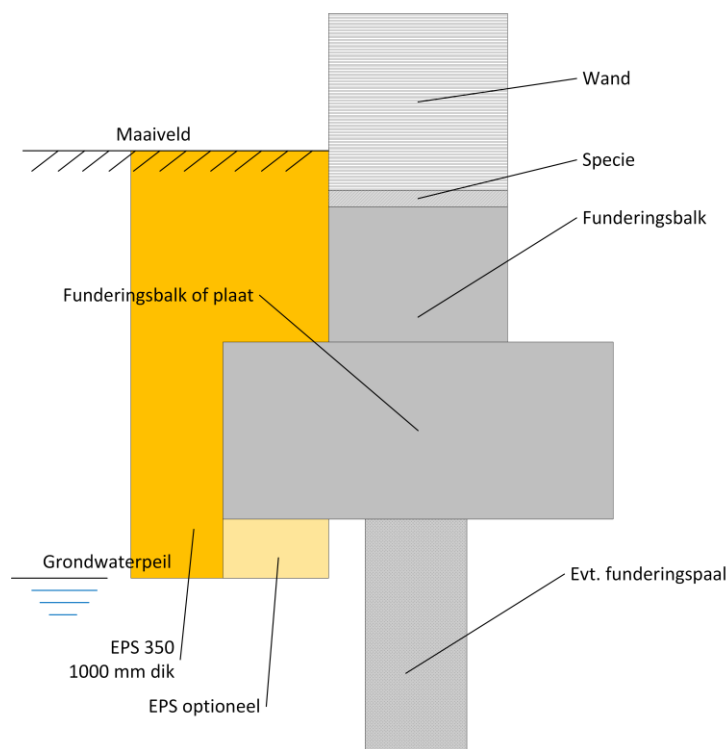


Figuur 13 Principescheets afgeveerde fundering (hier met stalen veerdozen)



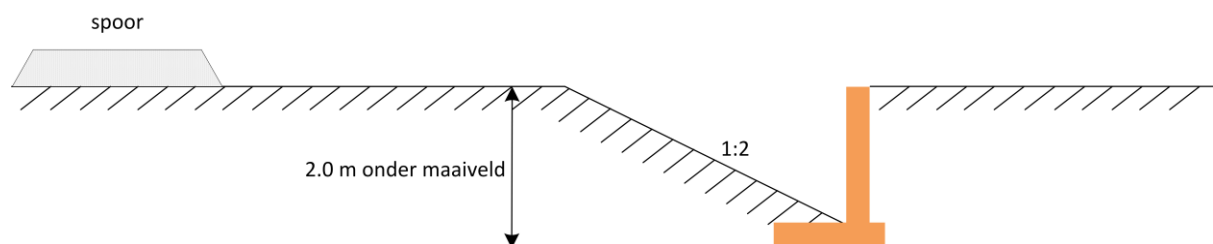
Figuur 14 Dubbele fundering met stalen veerdozen (project in Prinsenbeek)

Een principeschets van het bekleden van de fundering met EPS (piepschuim) is weergegeven in Figuur 15. 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 15. 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.

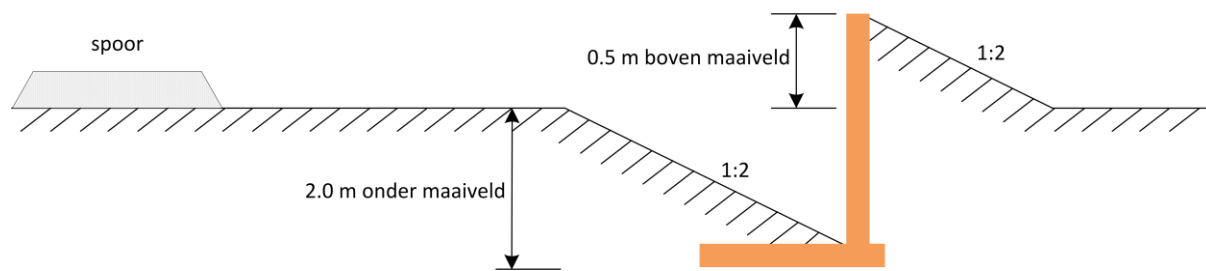


Figuur 15 Fundering met EPS-scherm ervoor

Principe-oplossingen voor het combineren van een sloot met een prefab L-wand zijn weergegeven in Figuur 16, en in Figuur 17 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.



Figuur 16 Sloot gecombineerd met prefab L-wand



Figuur 17 Geluidscherm gecombineerd met sloot en prefab L-wand