SLAGBOOM 1 MARIËNHEEM

Trillingsonderzoek t.b.v. nieuwbouw



WeBoost DATA

WBD2021-007

6 augustus 2021
versie 1.0

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	*WBD2021-007*
Versienr	*1.0*
Datum	*6 augustus 2021*
Status	*Vrijgegeven*

WeBoost DATA
Nijverheidsweg 16B
3534 AM Utrecht
www.we-boost-data.nl

© We-Boost Data 2021

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

De kern van dit rapport

Op een perceel in Mariënheem, ten oosten van Raalte wordt een vrijstaande woning gerealiseerd in het kader van een Rood-voor-Rood regeling in plaats van een nog te slopen varkensstal. De geplande nieuwbouw ligt in de nabijheid van de spoorlijn Zwolle – Almelo. 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 of optimalisaties van het plan 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, 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 mogelijk zijn op afstanden van minder dan 60 meter van het spoor (huidige geprojecteerde afstand van de woning is 43 meter van het spoor). In de zone tussen de 40 en 60 meter van het spoor zijn overschrijdingen afhankelijk van de constructieve detaillering van de woning.

Omdat de trillingen niet voldoen aan het beoordelingskader, is in dit onderzoek ook gekeken naar maatregelen en optimalisaties van het plan. De belangrijkste conclusies van het maatregelenonderzoek zijn:

1. Maatregelen aan het spoor of de treinen vallen buiten de planologische grenzen van het onderzoeksgebied en brengen zeer hoge kosten (ruim meer dan € 100.000 voor deze woning) met zich mee. Deze maatregelen zijn daarom niet doelmatig.

2. Maatregelen in de bodem zijn beperkt effectief en zeer kostbaar (ruim meer dan € 100.000 voor deze woning). Deze maatregelen zijn daarom niet doelmatig.

3. Met constructieve optimalisaties van het ontwerp zijn de trillingen wel te reduceren. Denk hierbij vooral aan het vermijden van opslingering (versterking) van de trillingen in het gebouw door te voorkomen dat de eigenfrequentie van de vloeren samenvalt met de trillingen van de treinen.

Aanbevelingen

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

1. Positioneer de woning zo ver mogelijk bij het spoor vandaan, daar zijn de trillingen lager. Op een afstand van meer dan 60 meter van het spoor wordt sowieso voldaan (zeer lichte bouw uitgezonderd), terwijl in de zone van 40 tot 60 meter van het spoor overschrijdingen mogelijk zijn bij een constructief ongunstige uitwerking van de woning. Vermijd een afstand kleiner dan 40 meter tot het spoor.

2. Vermijd in de zone tussen de 40 en 60 meter een eigenfrequentie van de vloer tussen de 9 en 16 Hz (bij houten vloeren en kanaalplaatvloeren) of tussen de 10.5 en 14.5

Hz (bij breedplaatvloeren). Concreet betekent dit dat de overspanning van de vloeren dusdanig moet worden gekozen dat er geen hinderlijke versterking van de trillingen optreedt. Voor een aantal veelgebruikte vloertypes zijn de toegestane overspanningslengtes in onderstaand overzicht weergegeven.

Type vloer	Toegestane bandbreedte overspanning
Kanaalplaatvloer	
200 mm dik	Kleiner dan 4.5 m of groter dan 7.0 m
260 mm dik	Kleiner dan 5.5 m of groter dan 8.5 m
320 mm dik	Kleiner dan 6.2 m of groter dan 10.0 m
Breedplaatvloer	
200 mm dik	Kleiner dan 5.0 of groter dan 6.0 m
250 mm dik	Kleiner dan 5.5 of groter dan 6.8 m
Houten vloer	
275 x 75 mm balken, h.o.h. 400 mm	Minimaal 5.5 m
300 x 100 mm balken, h.o.h. 400 mm	Minimaal 6.5 m

Als bovenstaande om wat voor reden dan ook niet mogelijk of wenselijk is, dan zijn ook alternatieve maatregelen zoals een zware fundering (bijv. een dikke plaatfundering) of een met stalen veerdozen afgeveerde fundering mogelijk.

Samenvatting

Samengevat geldt dat de trillingen, afhankelijk van de locatie van de woning en de constructieve uitwerking, mogelijk niet voldoen aan het beoordelingskader, de SBR B-richtlijn. Met relatief eenvoudige constructieve optimalisaties (optimalisatie van de vloeren, zo ver mogelijk van het spoor vandaan plaatsen van het gebouw) is te voldoen aan het beoordelingskader. Of deze optimalisaties of maatregelen noodzakelijk en 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 tot een ontwerp dat past binnen de streefwaarden van de SBR B-richtlijn.

Met deze aanpak is een acceptabel woon- en leefklimaat ten aanzien van trillingen te garanderen in de geplande woning.

Inhoudsopgave

1 Inleiding 6
1.1 Aanleiding 6
1.2 Doel 6
1.3 Leeswijzer 6

2 Situatie en uitgangspunten 8
2.1 Situatie 8
2.2 Uitgangspunten 9

3 Beoordelingskader 11
3.1 Beoordelingskader 11
3.2 Rekenmethode 12

4 Verwachte trillingen in de woningen 15
4.1 Meetresultaten 15
4.2 Trillingen in geplande nieuwbouw 15
4.3 Maatregelen 16
4.4 Advies voor verdere uitwerking 20
4.5 Onzekerheden in het onderzoek 20

I Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek 22

II Bijlage rekenmodel Buildyn 24
Fundering 25
Draagconstructie 25
Vloeren 26
Resultaten 27

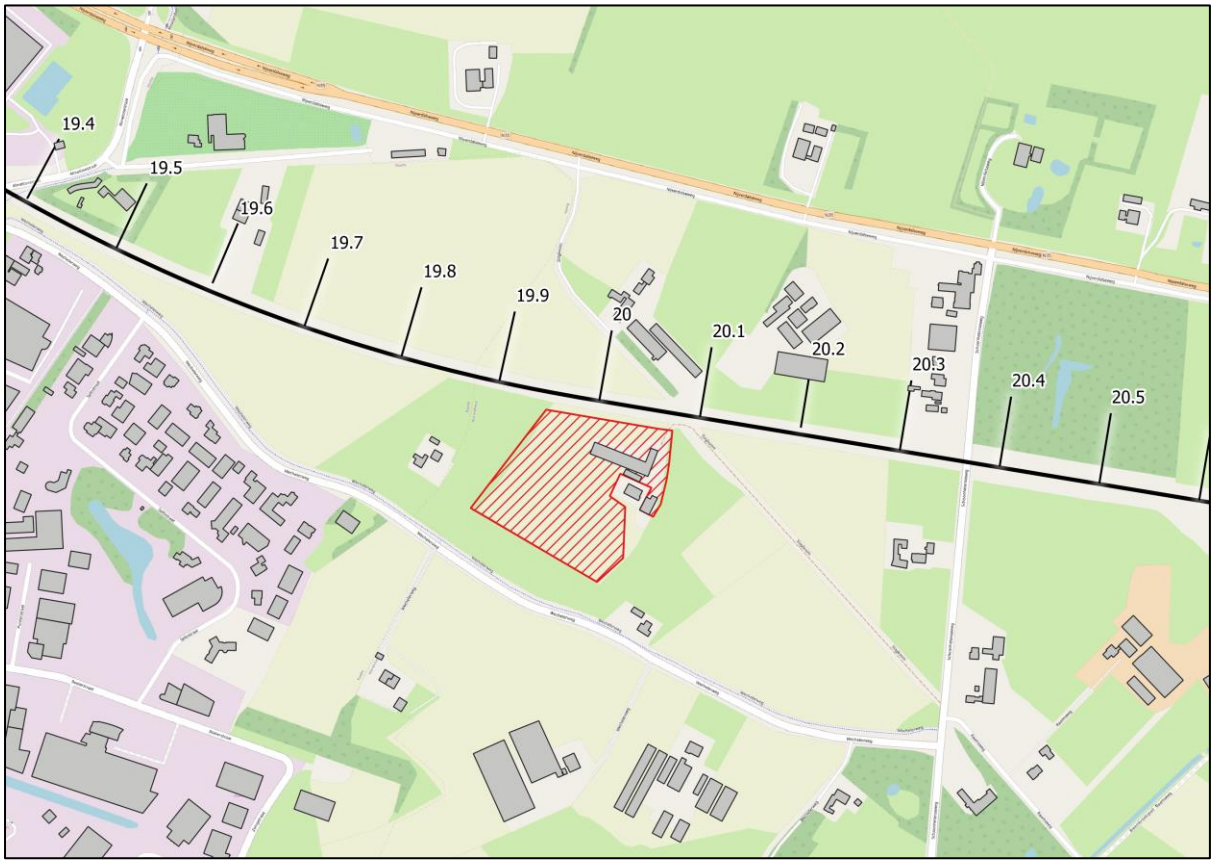
III Resultaten metingen 28

IV Principedetails maatregelen 31

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Op een perceel in Mariënheem, ten oosten van Raalte wordt een vrijstaande woning gerealiseerd in het kader van een Rood-voor-Rood regeling in plaats van een nog te slopen varkensstal. De geplande nieuwbouw ligt in de nabijheid van de spoorlijn Zwolle – Almelo, zie Figuur 1. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet *op voorhand* worden uitgesloten.



Figuur 1 Plangebied nieuwbouwwoning

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.

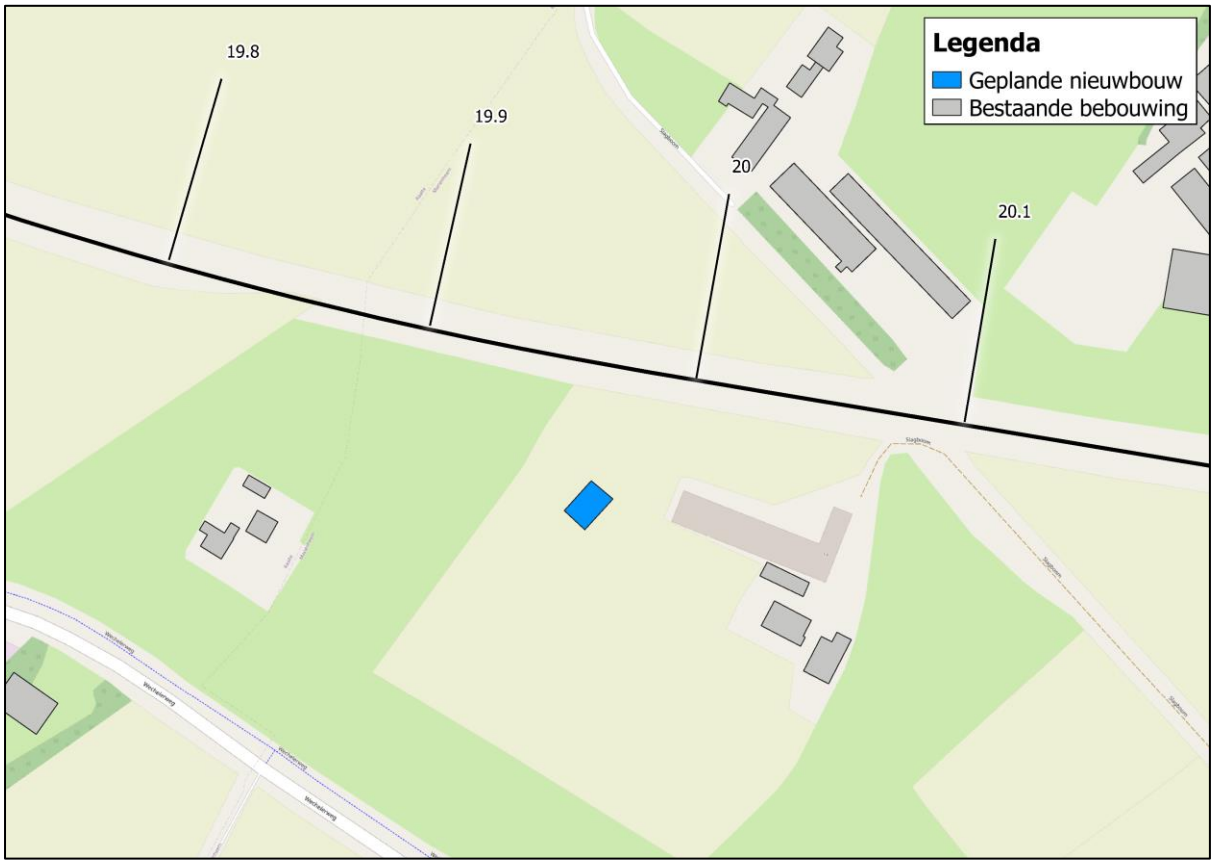
De bijlages bevatten technische informatie van het onderzoek, zoals een toelichting op de rekenmethodiek en grondonderzoek van nabijgelegen locaties.

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

In het plangebied staat op dit moment een varkensschuur. Deze wordt gesloopt, waarna nieuwbouw wordt gerealiseerd in de vorm van een vrijstaande grondgebonden woning. Er is nog geen definitieve plek voor de geplande nieuwbouw, een mogelijke optie is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Bestaande en mogelijke toekomstige bebouwing

De geplande nieuwbouw bevindt zich in een zone van 40 tot 60 meter van het spoor. De rijsnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. Er rijdt geen structureel goederenverkeer op deze spoorlijn. 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	60 – 80 km/h	2.00	2.00	0.88
Intercity	60 – 80 km/h	1.00	0.00	0.00

Andere trillingsbronnen, zoals zwaar vracht- en landbouwverkeer, passeren niet dicht langs de woning en zijn daarom 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 wordt een vrijstaande woning gerealiseerd. Er is op dit moment nog geen 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

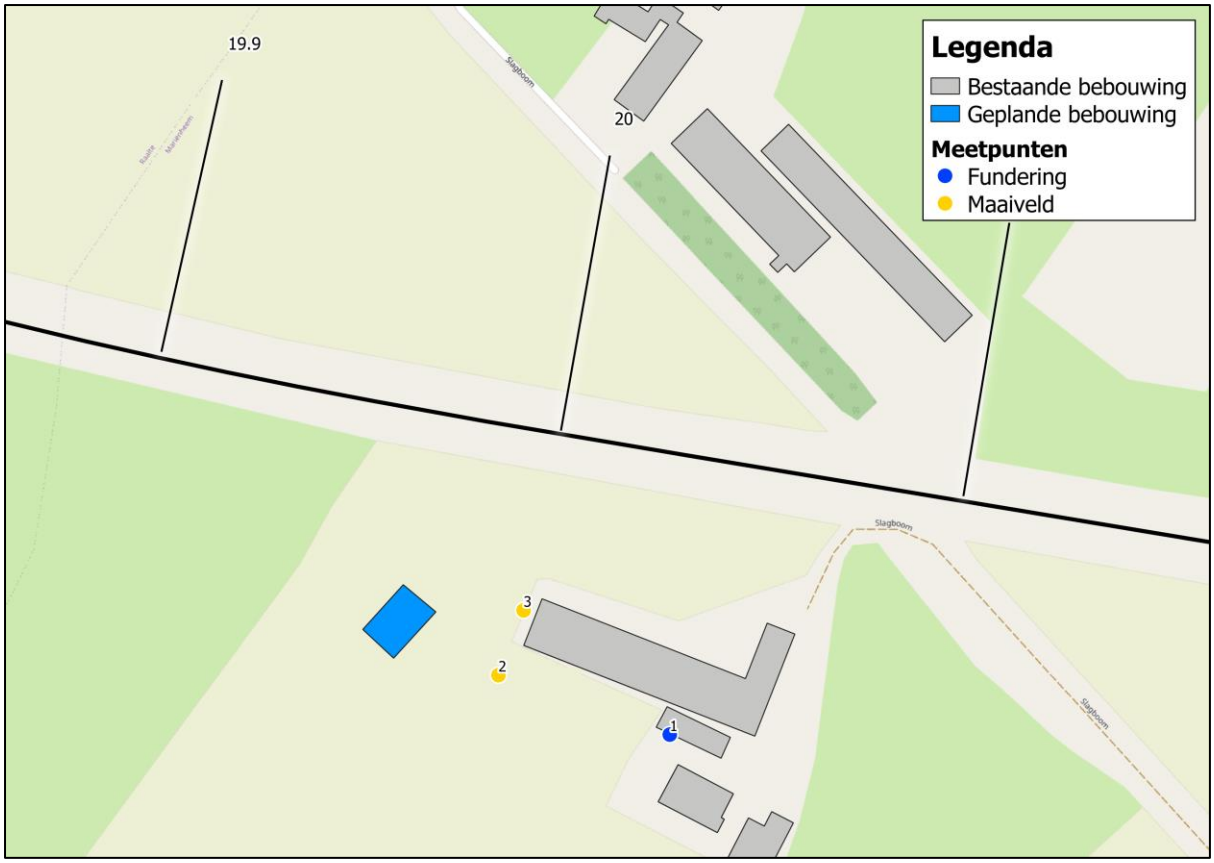
Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Meerdere varianten: • Breedplaatvloeren 250 mm, met 70 mm zandcement dekvloer • Kanaalplaatvloeren 200, 260 en 320 mm, met 60 en 70 mm zandcement dekvloer • Houten vloeren, diverse varianten
Hoogte	Meerdere varianten, 6.0 tot 9.0 meter
Lengte vloerveld	Meerdere varianten, 5.4 tot 7.0 meter
Breedte vloerveld	Meerdere varianten, 10.0 tot 12.0 meter
Constructietype	Meerdere varianten: • Prefab beton • Kalkzandsteen/metselwerk • Houtskeletbouw
Fundering	Meerdere varianten: • Op staal • Op palen
Stijfheid gebouwen	Afhankelijk van de variant, betonnen skelet, kalkzandsteen/metselwerk of HSB stabiliteitswanden.

2.2.2 Gegevens ondergrond

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

2.2.3 Meetresultaten

Door Alcedo zijn metingen uitgevoerd in het onderzoeksgebied op drie punten, zie Figuur 3. De metingen zijn uitgevoerd van 19 juli tot en met 26 juli 2021, en zijn verricht op maaiveld en aan de fundering van 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.

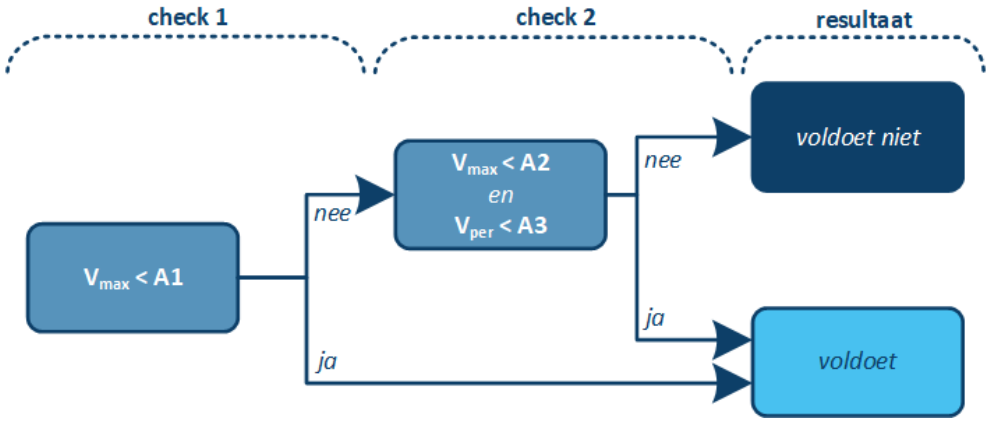
[1] Voor spoorprojecten wordt door ProRail sinds 2012 ook wel gebruik gemaakt van de Bts, deze is afgeleid van de SBR-richtlijn en op aspecten aangescherpt (waaronder een doelmatigheidsafweging en een andere manier om de trillingen vast te stellen). Deze richtlijn wordt echter doorgaans niet gebruikt 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

	Dag en avond			Nacht		
Situatie	**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

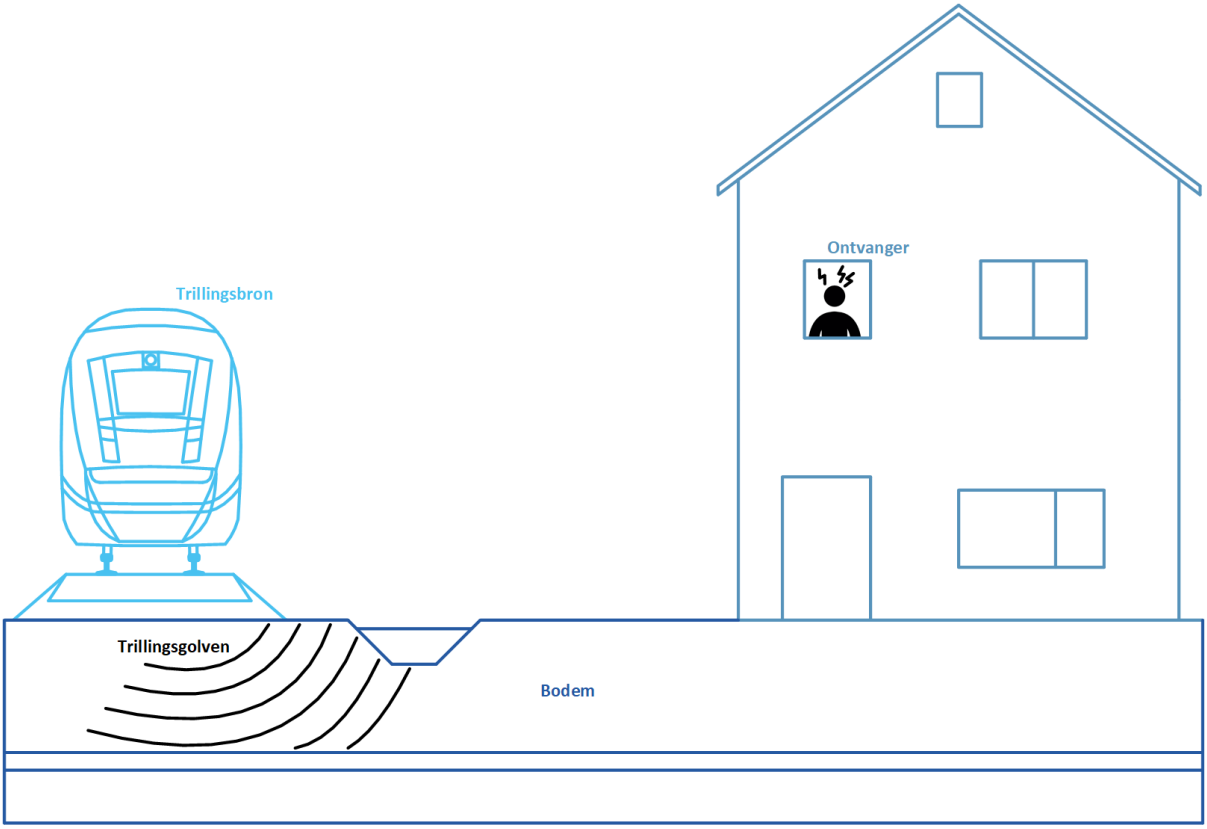
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde gebouwen, wordt op basis van metingen in de omgeving van de bebouwing een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande nieuwe bebouwing. Deze verwachte trillingen 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-effen ondergrond rijdt. Door de massa en beweging van het voertuig, variaties in de ondergrond (die per definitie niet perfect vlak is) en variaties in de rondheid van de wielen van het voertuig ontstaan spanningen in de bodem die zich door de bodem verplaatsen. Afhankelijk van de opbouw van de bodem en de aanwezigheid van obstakels (zoals sloten en damwanden) verplaatsen de trillingen zich diep of juist ondiep door de bodem. Gebouwen worden daardoor in trilling gebracht. Afhankelijk van hoe het gebouw is geconstrueerd, worden bepaalde trillingen meer of minder versterkt in het gebouw. Deze trillingen kunnen als hinderlijk worden ervaren door personen in gebouwen. Dit hele systeem van trillingsbron (hier de trein), overdrachtsmedium (de

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

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



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

3.2.2 De trillingsbron

In dit onderzoek zijn treinen de bron van de trillingen. De trillingen van het treinverkeer zijn gemeten door Alcedo op meerdere punten op maaiveld in de nabijheid van het plangebied, dichtbij het spoor en aan de fundering van bestaande bebouwing. 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

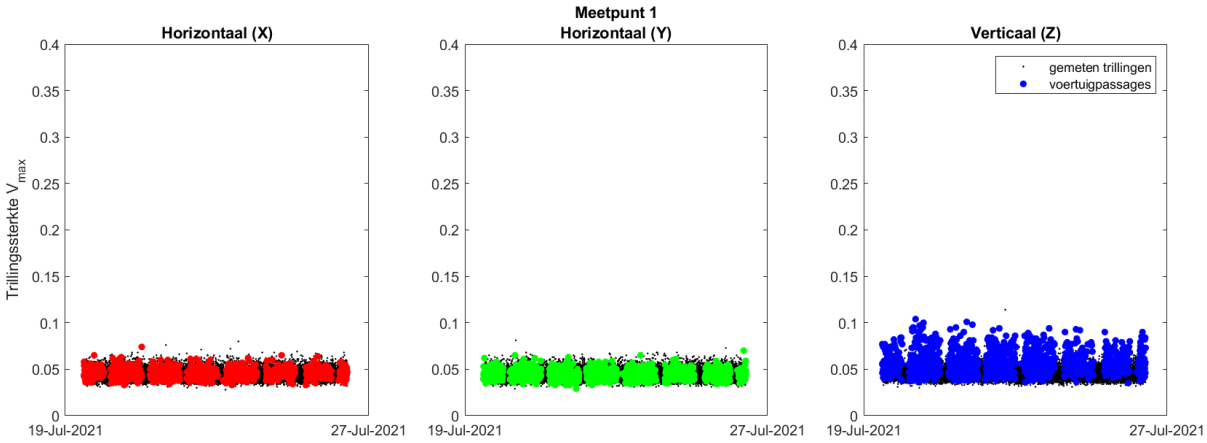
op basis van de bodemopbouw, een aantal mogelijkheden voor de constructieve eigenschappen en voor de gebruikte materialen van de gebouwen. Hiervoor maken we gebruik van het rekenmodel Buildyn, een zogenaamd beam-element model (BEM) waarin het gebouw gemodelleerd en doorgerekend wordt. De resultaten van 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 aan de fundering van een bestaand pand in het plangebied (meetpunt 1) zijn weergegeven in Figuur 6. Overige gegevens uit de metingen hebben we opgenomen in bijlage III. In Figuur 6 is te zien dat de trillingen in verticale Z-richting maatgevend zijn. In horizontale richting zijn de trillingen gelijk aan de achtergrondtrillingen.



Figuur 6 Gemeten trillingen aan fundering bestaand pand

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. Met een arcering is aangegeven of er overschrijdingen zijn, oranje betekent dat er overschrijdingen zijn, geel dat er, afhankelijk van de constructieve uitwerking, overschrijdingen zijn.

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

Bouwconcept	V_{max}	V_{per}	Beoordeling
Kalkzandsteen, metselwerk en kanaalplaatvloeren			
33 meter van spoor	0.3 – 0.4	0.04 – 0.05	Voldoet niet
43 meter van spoor (conform Figuur 2)	0.2 – 0.3	0.02 – 0.04	Voldoet, afhankelijk van uitwerking
53 meter van spoor	0.2 – 0.3	0.02 – 0.03	Voldoet, afhankelijk van uitwerking
(Prefab) beton met breedplaatvloeren			
33 meter van spoor	0.3	0.03 – 0.04	Voldoet niet, incidentele overschrijdingen
43 meter van spoor (conform Figuur 2)	0.2 – 0.3	0.02 – 0.03	Voldoet, afhankelijk van uitwerking
53 meter van spoor	0.2 – 0.3	0.02	Voldoet, afhankelijk van uitwerking
Houtskeletbouw			
33 meter van spoor	0.3 – 0.5	0.02 – 0.05	Voldoet niet
43 meter van spoor (conform Figuur 2)	0.2 – 0.3	0.02 – 0.04	Voldoet, afhankelijk van uitwerking
53 meter van spoor	0.2 – 0.3	0.02 – 0.03	Voldoet, afhankelijk van uitwerking

Uit Tabel 4 kunnen een aantal conclusies worden getrokken:

1. Het is niet verstandig om de bebouwing dichter bij het spoor te plaatsen dan 40 meter (huidige projectie is 43 meter): bij afnemende afstand nemen de trillingen snel toe. Binnen 40 meter van het spoor is alleen met maatregelen te voldoen aan het beoordelingskader voor trillingshinder.

2. In de zone tussen de 40 en 60 meter is te voldoen aan het beoordelingskader door het vermijden van een eigenfrequentie van de vloer die ligt tussen de 9 en 16 Hz (bij houten vloeren en kanaalplaatvloeren) of tussen de 10.5 en 14.5 Hz (bij breedplaatvloeren). Dit is bijvoorbeeld mogelijk op de volgende manieren:

Tabel 5 Eisen aan vloeren om opslingering te voorkomen

Type vloer	Toegestane bandbreedte overspanning
Kanaalplaatvloer	
200 mm dik	Kleiner dan 4.5 m of groter dan 7.0 m
260 mm dik	Kleiner dan 5.5 m of groter dan 8.5 m
320 mm dik	Kleiner dan 6.2 m of groter dan 10.0 m
Breedplaatvloer	
200 mm dik	Kleiner dan 5.0 of groter dan 6.0 m
250 mm dik	Kleiner dan 5.5 of groter dan 6.8 m
Houten vloer	
275 x 75 mm balken, h.o.h. 400 mm	Minimaal 5.5 m
300 x 100 mm balken, h.o.h. 400 mm	Minimaal 6.5 m

3. Op een afstand van meer dan 60 meter wordt in alle gevallen (zeer slappe constructies zoals open staalconstructies of lichte houtconstructies daargelaten) voldaan aan het beoordelingskader.

4.3 Maatregelen

Afhankelijk van de locatie van de woning en de constructieve uitwerking wordt niet 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. In alle gevallen is V_{per} lager dan of gelijk aan de streefwaarde van 0.05. In de zone tussen de 40 en 60 meter van het spoor is het aantal overschrijdingen per dag maximaal 2 (bij een ongunstige constructieve uitwerking). Het gaat dus om een relatief beperkt aantal overschrijdingen, dat eventueel het achterwege laten van een maatregel zou kunnen rechtvaardigen.

2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. Daar is hier geen sprake van, de trillingen van lokaal verkeer op het omliggende wegennet zijn lager dan die van het treinverkeer.

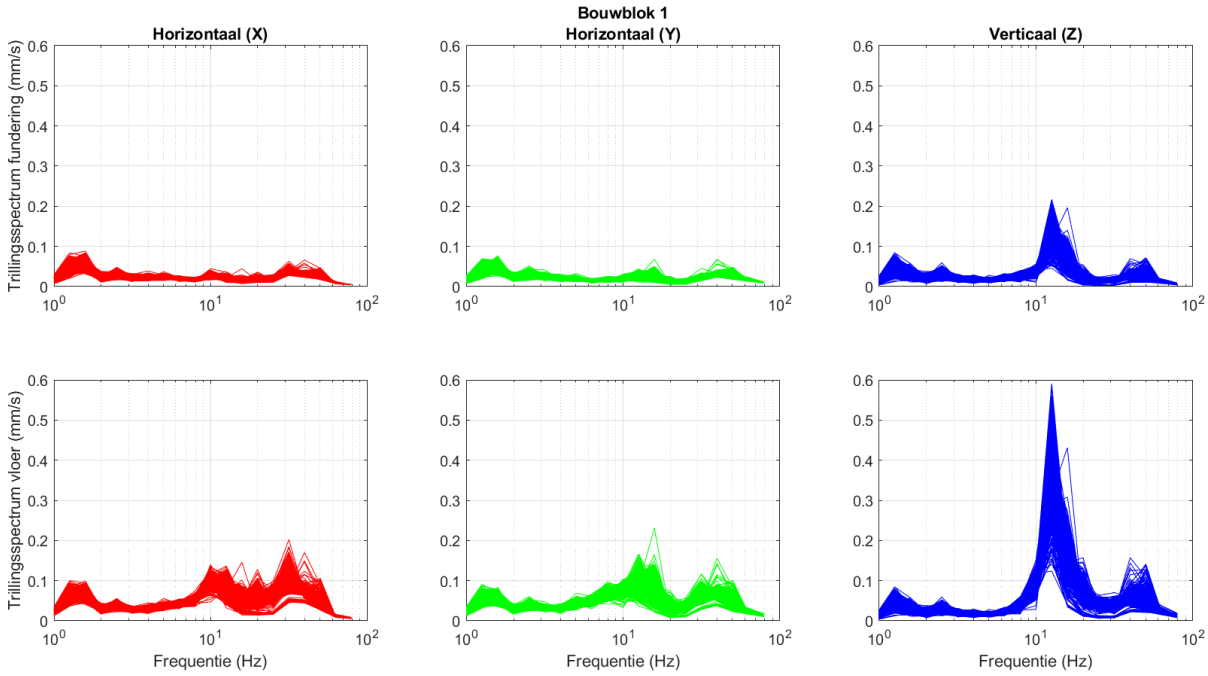
3. De mogelijkheid tot het treffen van reducerende maatregelen. Het is conform bestaande jurisprudentie gebruikelijk om hierbij een afweging te maken tussen de kosten en het effect van de maatregelen, maar ook aspecten als duurzaamheid en impact op de omgeving kunnen worden meegenomen in deze afweging.

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. Vervolgens sluiten we af met een aantal adviezen m.b.t. de verdere ontwikkeling van het plan.

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 7. In deze figuur is de trillingssnelheid per treinpassage weergegeven als tertsbandspectrum op de fundering en de hoogste verdieping van woning op de geprojecteerde afstand van 43 meter van het spoor. Hieruit kan worden afgeleid bij welke frequentie en in welke trillingsrichting de trillingen het hoogst zijn.

In deze figuur is goed zichtbaar dat de hoogste trillingen optreden in de verticale Z-richting, vooral als gevolg van een combinatie van de versterking van de trillingen door de vloer (de eigenfrequentie van de vloer valt samen met de trillingen van de treinen) en de vering van het pand op zichzelf. Maatregelen die genomen worden moeten daarom vooral effectief zijn tegen trillingen tussen de 10 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.



Figuur 7 Verwachte trillingen op 43 meter van het spoor, met kanaalplaatvloer van 200 mm met 11.5 Hz eigenfrequentie

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, in combinatie met een ballastmat. Dit is een zeer kostbare maatregel met een lange realisatietijd, terwijl ook met deze maatregel overschrijdingen van het beoordelingskader nog niet zijn uit te sluiten. Goedkopere maatregelen, zoals under sleeper pads of ballastmatten, zijn onvoldoende effectief tegen trillingen tussen de 10 en 15 Hz.

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. Ter indicatie, een betonplaat met ballastmat kost € 700.000 tot € 1.100.000 incl. BTW[2].

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 een diepe 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.

[2] Deze kosten zijn nog exclusief kosten voor bijv. inzet van vervangend vervoer bij buitendienststellingen, en genomen voor een lengte van ca. 100 meter (benodigde lengte bij 43 meter van het spoor).

Een trillingsscherm is alleen effectief dicht bij de bron of dicht bij de ontvanger. De meest voor de hand liggende locatie is daarmee direct langs het spoor. Een scherm heeft een diepte van ca. 15 meter nodig om voldoende effectief te zijn. Bovendien zijn er allerlei uitvoeringsrisico's i.r.t. werken nabij het spoor (vergunningsprocedure van ProRail, risico's m.b.t. taludstabiliteit, werken in de nabijheid van het spoor, etc.). Om het plangebied af te schermen, is een trillingsscherm van ca. 90 meter lengte nodig. Ter indicatie is een aantal mogelijke maatregelen met het effect en de kosten weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Mogelijke maatregelen in de bodem

Maatregel	Effect	Kosten[3]
Betonnen wand (diepwandmethode)	20 – 35%	€ 1.5 – 2.4 mln
Jet-grout wand	15 – 25%	€ 1.5 – 2.4 mln
Damwand	5 – 10%	€ 0.9 – 1.5 mln
CSM-wand (Cutter Soil Mix of Mix-In-Place)	0 – 10%	€ 0.4 – 0.7 mln
Sloot, 2 m diep	10 – 25%	€ 0.1 – 0.2 mln
Sloot, 2 m diep met L-wand 4 m diep	20 – 35%	€ 0.2 – 0.4 mln
Trillingsscherm EPS	5 – 10%	€ 0.2 – 0.4 mln

Ook hier is te zien dat de effectiviteit van veel maatregelen beperkt is, terwijl de kosten erg hoog zijn. Ter indicatie, ProRail hanteert voor het treffen van trillingsmaatregelen vaak een bedrag van € 47.000 in bestaande situaties. Bij nieuwbouw leiden dergelijke kostenopslagen vaak tot onverkoopbare woningen, daarom wordt bij nieuwbouw vaak een (veel) lager (projectafhankelijk te motiveren) bedrag gehanteerd.

4.3.4 Maatregelen aan de gebouwen

Bij maatregelen aan de woningen is een breed scala aan maatregelen mogelijk. Uit het variantenonderzoek blijkt dat met optimalisatie van de constructie al veel winst kan worden geboekt. Zo is het verder van het spoor vandaan plaatsen van de woning effectief, maar ook het toepassen van zware bouw (betonnen skelet met breedplaatvloeren) of het toepassen van een vloer met een eigenfrequentie buiten het gebied van 9 tot 16 Hz.

Aanvullend kunnen ook nog extra maatregelen worden getroffen. Denk aan het toepassen van een zwaardere fundering (bijv. een 500 mm dikke plaatfundering), het ontkoppelen van de fundering door middel van stalen veren of een rubberen oplegging. Het globale effect en de kosten van een aantal mogelijke maatregelen aan de woning zijn weergegeven in Tabel 7.

Tabel 7 Mogelijke maatregelen aan de woning

Maatregel	Effect	Kosten[4]
Toepassen van dempende materialen (metselwerk i.p.v. beton)	0 – 5%	< 3% SK
Toepassen dikkere vloeren met minimale eigenfrequentie van 16 Hz	15 – 35%	< 2% SK

[3] Totale investeringskosten, incl. BTW. Kosten zijn exclusief kosten voor grondverwerving, verleggen van kabels en leidingen en slopen of amoveren van eventuele bestaande opstallen. Deze zijn wel aanwezig in de spoorzone, dus de werkelijke kosten van maatregelen zullen hoger uitvallen.
[4] SK = Stichtingskosten

Maatregel	Effect	Kosten[4]
Breedplaatvloeren i.p.v. kanaalplaatvloeren (bij gelijke eigenfrequentie)	5 – 15%	< 3% SK
Groter bouwvolume	0 – 10%	nvt
Paalfundering i.p.v. balkenfundering	5 – 10%	1 – 3% SK
500 mm dikke plaatfundering i.p.v. balkenfundering	10 – 20%	1 – 3% SK
Ontkoppelen van de vloeren	0 %	2 – 4% SK
Ontkoppelen van de fundering (afveren, stalen veren met f_0 = 5.0 Hz)	60 – 80%	4 – 8% SK
Inpakken van de fundering met rubber	5 – 15%	2 – 5% SK
Afschermen van de fundering met EPS	0 – 5%	< 2% SK

Meest effectieve maatregel is het afveren van de fundering, door het realiseren van een dubbele fundering (betonnen plaat, stalen veerdozen en daarop een balkenfundering, of een palenfundering met stalen veerdozen op de paalkoppen, en daarop een balkenlaag met inkassingen voor de stalen veerdozen, zie Bijlage IV voor enkele principedetails), maar de kosten hiervan bedragen tussen de € 20.000 en € 30.000 voor deze woning. Effectiever is om de vloeren te optimaliseren, zodat de trillingen zo min mogelijk worden versterkt, zie Tabel 5.

4.4 Advies voor verdere uitwerking

Afhankelijk van de locatie van de woning en de constructieve uitwerking zijn overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder voor nieuwe situaties niet uit te sluiten. Dat komt vooral doordat de trillingen door de zandbodem slecht uitdempen met de afstand. Op basis van het onderzoek adviseren we het volgende (in aflopende prioritering):

1. Positioneer de woning zo ver mogelijk bij het spoor vandaan, daar zijn de trillingen lager. Op een afstand van meer dan 60 meter van het spoor wordt sowieso voldaan (zeer lichte bouw uitgezonderd), terwijl in de zone van 40 tot 60 meter van het spoor overschrijdingen mogelijk zijn bij een constructief ongunstige uitwerking van de woning.

2. Vermijd in de zone tussen de 40 en 60 meter een eigenfrequentie van de vloer tussen de 9 en 16 Hz (bij houten vloeren en kanaalplaatvloeren) of tussen de 10.5 en 14.5 Hz (bij breedplaatvloeren).

Als bovenstaande niet mogelijk of wenselijk is, dan zijn ook alternatieve maatregelen zoals een zware fundering (bijv. een dikke plaatfundering) of een met stalen veerdozen afgeveerde fundering mogelijk. Met bovenstaande aanpak is een acceptabel woon- en leefklimaat ten aanzien van trillingen te garanderen in het gehele plangebied.

4.5 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 op basis van bovenstaande informatie geen reden om te twijfelen aan de representativiteit van de berekeningen voor de toekomstige trillingen, wel kunnen de trillingen in werkelijkheid hierdoor soms hoger of lager zijn.

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. Deze variaties zijn meegenomen in het onderzoek.

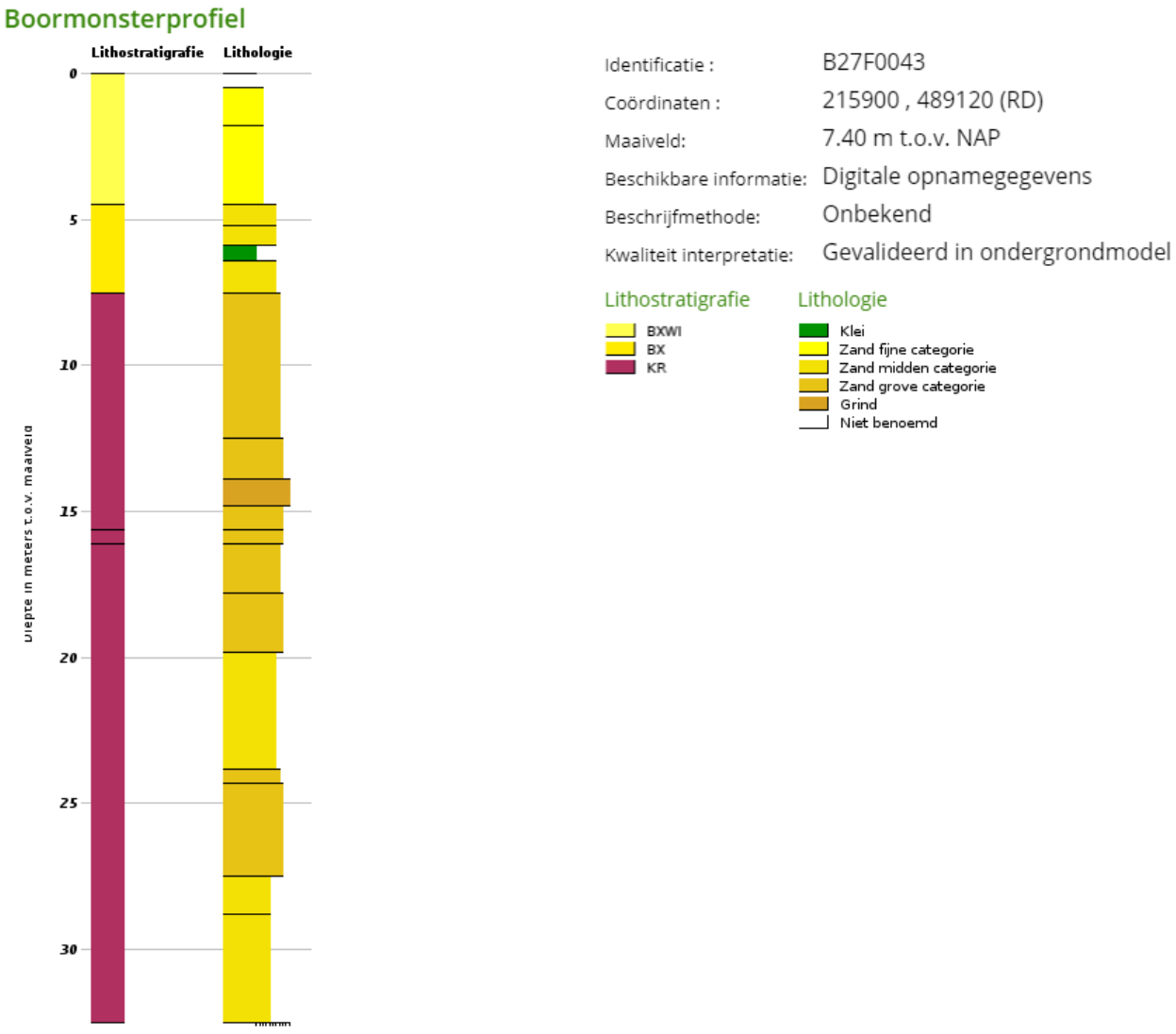
3. Ten aanzien van de gebouwen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en definitief ontwerp). Bovendien zijn er natuurlijke variaties in materiaalgedrag (van bijvoorbeeld hout). In de berekeningen is gerekend met een verwachtingswaarde van de trillingen op basis van een aan de hand van praktijkmetingen geijkt rekenmodel, en zijn meerdere varianten doorgerekend. Hiermee wordt een resultaat verkregen dat representatief is voor de toekomstige situatie.

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

Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek

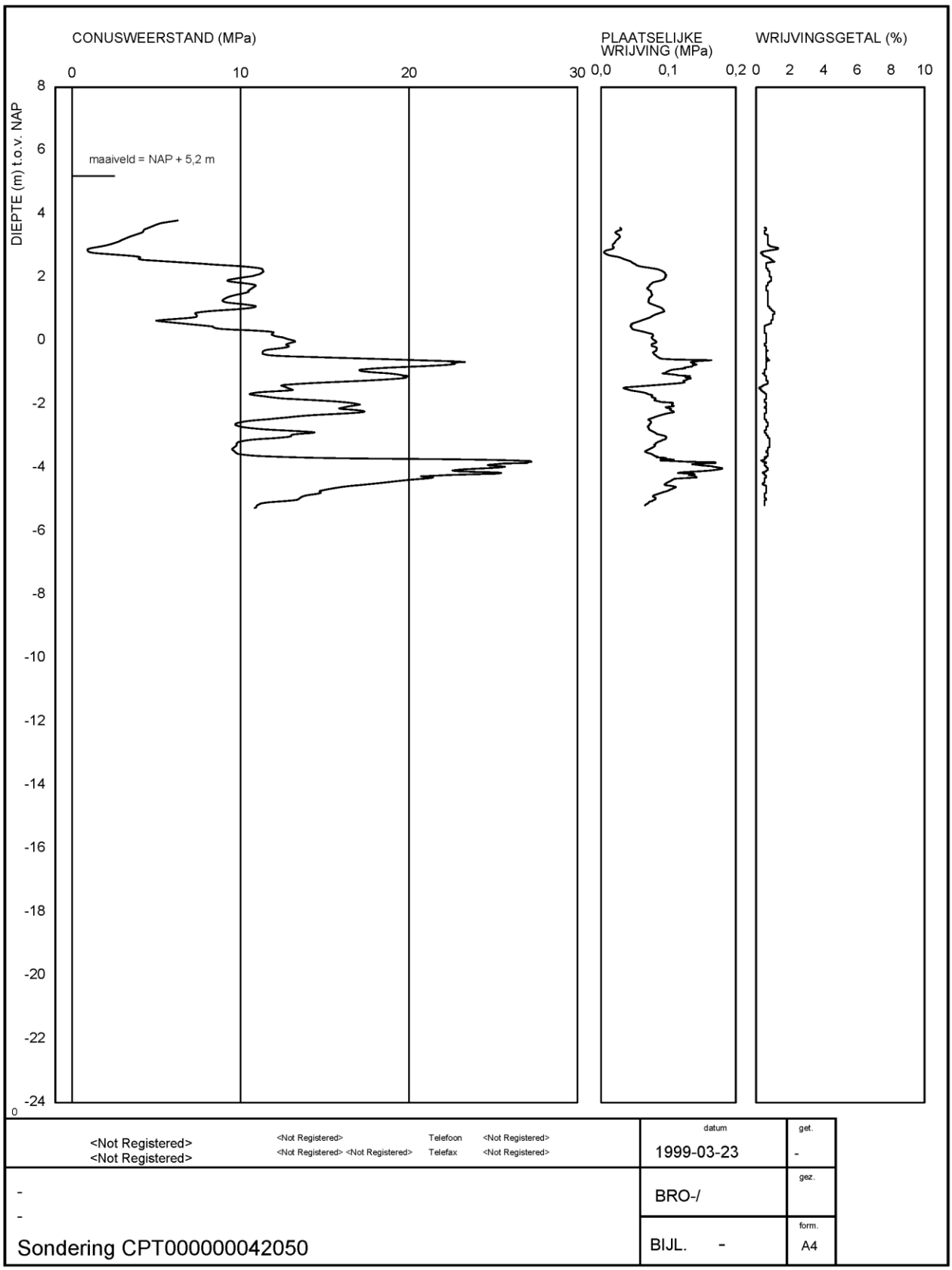
Deze bijlage bevat geotechnische achtergrondinformatie. Deze informatie is gebruikt om bijvoorbeeld de uitdemping van de trillingen met de afstand te bepalen. Daarnaast is deze informatie gebruikt in het rekenmodel waarmee de dynamische eigenschappen van de bebouwing worden bepaald.

Een grondboring in de nabijheid van het onderzoeksgebied (nr. B27F0043) is weergegeven in Figuur 8. Hier is te zien dat de bodem is opgebouwd uit zandlagen met verschillende structuren. Een dergelijke zandige bodem kent vaak een slechte uitdemping van de trillingen met de afstand, hierdoor kunnen trillingen ook op grotere afstand waarneembaar zijn.



Figuur 8 Boring nabij het onderzoeksgebied, B27F0043

Een representatieve sondering uit het onderzoeksgebied, waarin onder meer de conusweerstand te zien is, is weergegeven in Figuur 9.

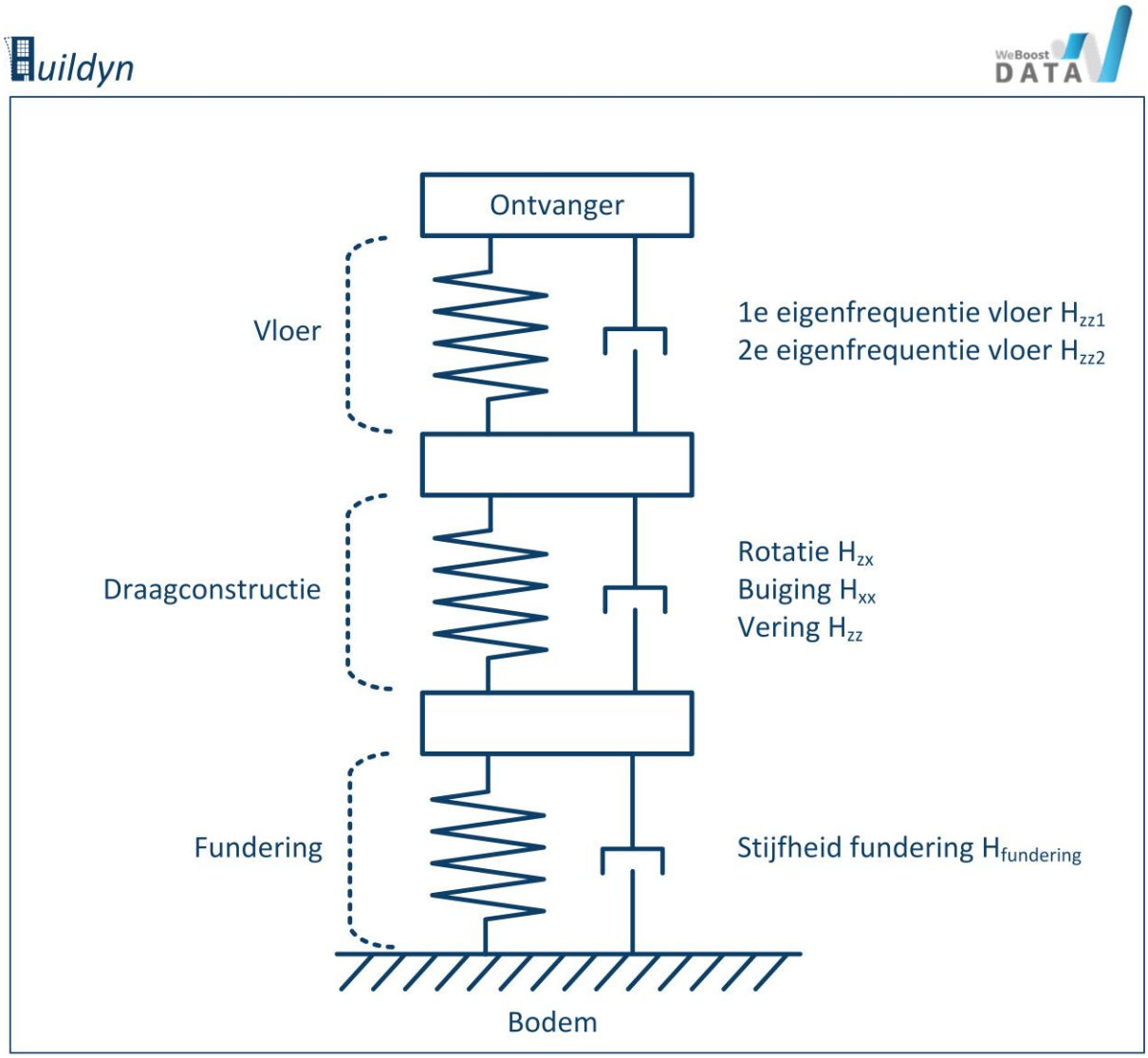


Figuur 9 Sondering nabij het onderzoeksgebied, CPT000000042050

II 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. demping en stijfheden).

In Buildyn wordt een gebouw gemodelleerd door middel van gekoppelde massa-veersystemen, zie Figuur 10. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 10, worden in deze bijlage nader toegelicht.



Figuur 10 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

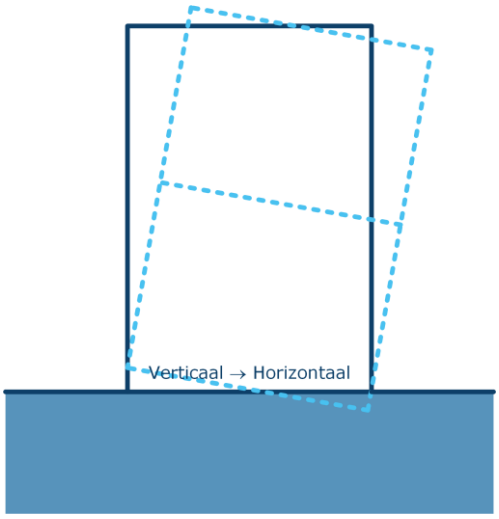
Met name boven de 10 Hz worden trillingen uitgedempt door de fundering.

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.

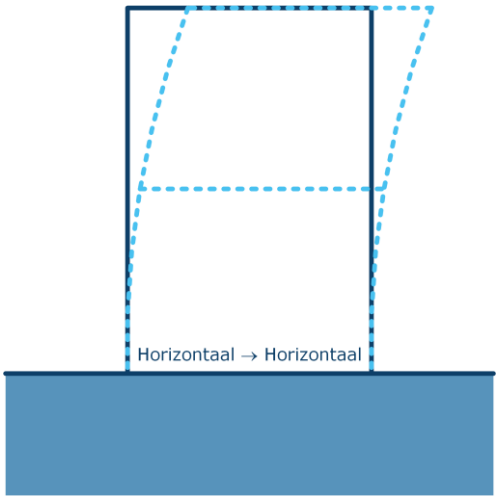
Het principe van rotatie is rechts weergegeven. Verticale trillingsgolven zorgen voor rotatie van het gebouw, waardoor met name in hogere gebouwen horizontale trillingen ontstaan.



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



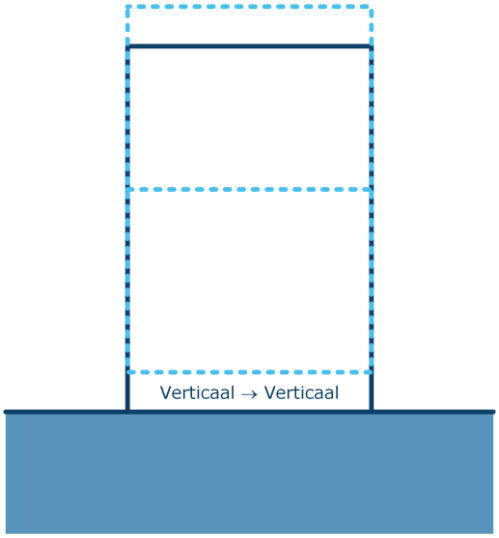
Dit effect noemen we H_{xx}, en is afhankelijk van:

- 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)



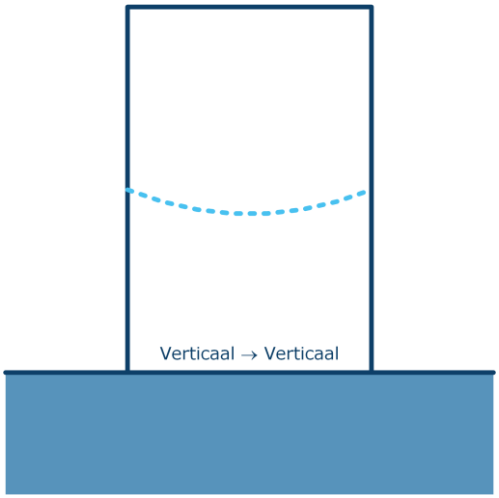
Vloeren

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.

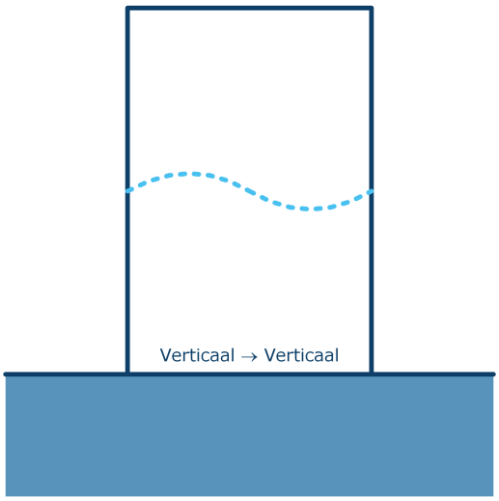
De eerste buigmodus van de vloer (bij de eerste eigenfrequentie) is simpele doorbuiging, zoals weergegeven in de principeschets rechts. Met name de eigenfrequentie (de frequentie waarvoor de vloer gevoelig is) en de demping bepalen in hoeverre de trillingen worden opgeslingerd. De trillingen zijn het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

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

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



Bij de tweede buigmodus van de vloer (bij de tweede eigenfrequentie) zijn de trillingen maximaal op ongeveer ¼ van het vloerveld, zie de principeschets rechts.

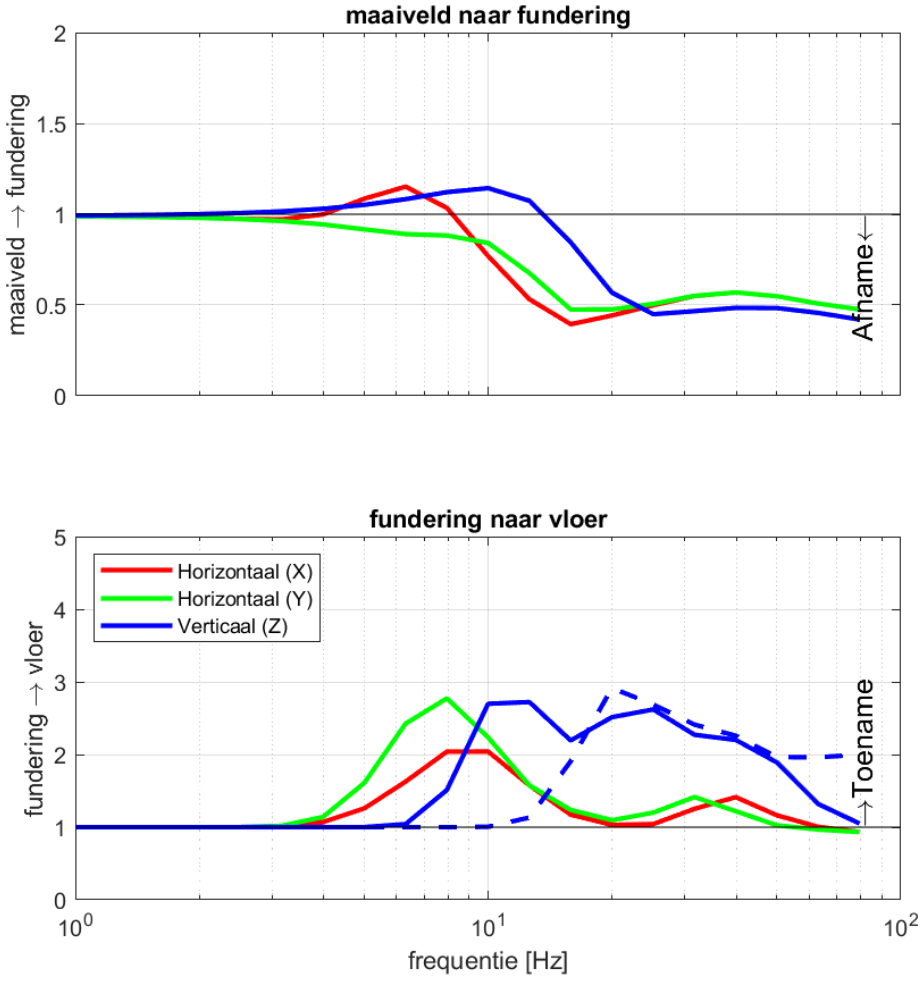


Dit effect noemen we H_{zz2}, en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1}.

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

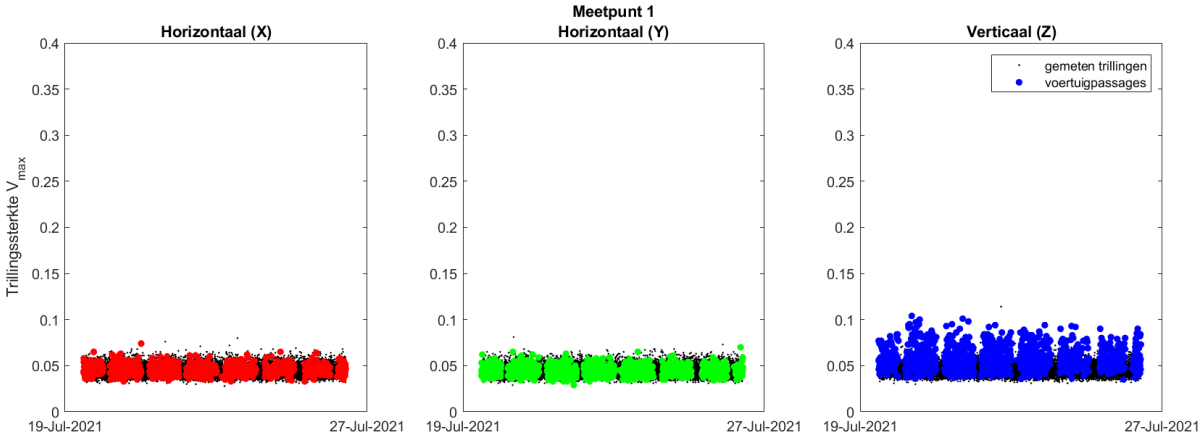
Ter illustratie zijn de resultaten uit de Buildyn-berekeningen voor een van de doorgerekende varianten weergegeven in Figuur 11.



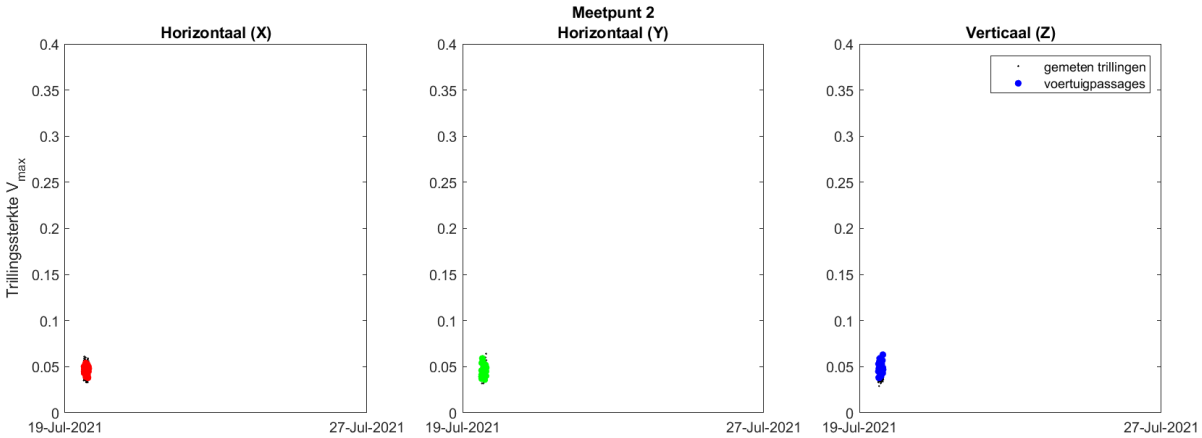
Figuur 11 Buildyn-resultaten voor woning met fundering op staal, 200 mm kanaalplaatvloer en eigenfrequentie van 11.5 Hz

III Resultaten metingen

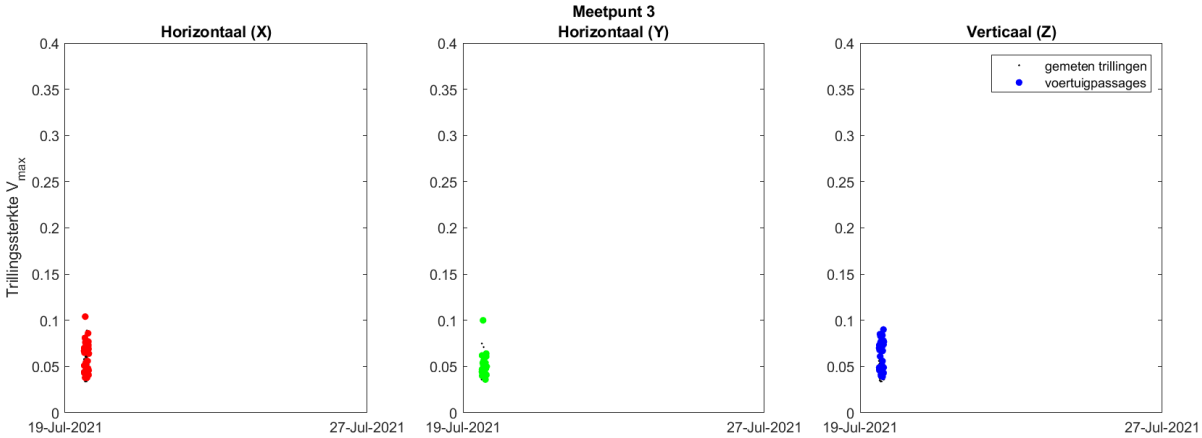
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



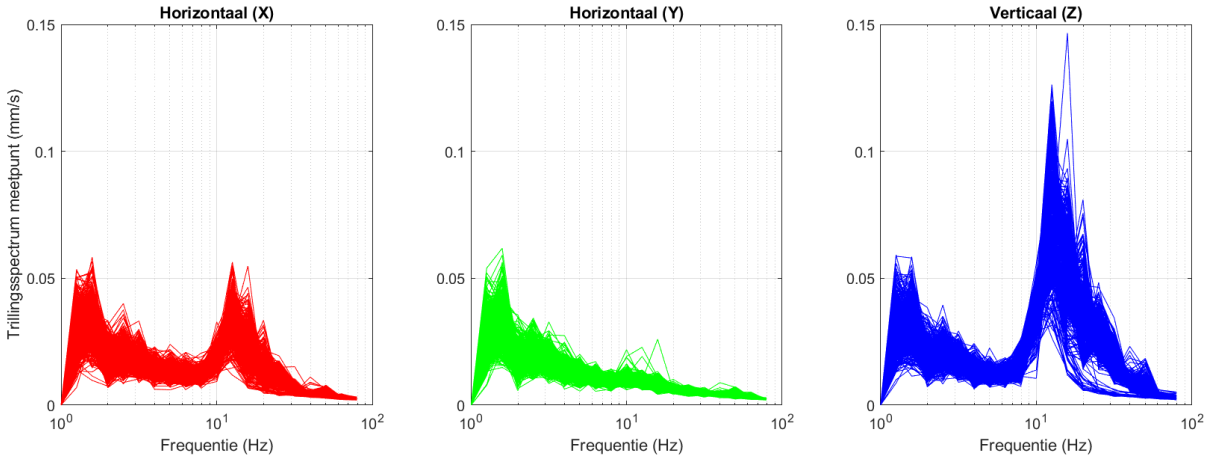
Figuur 12 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (fundering bestaande schuur)



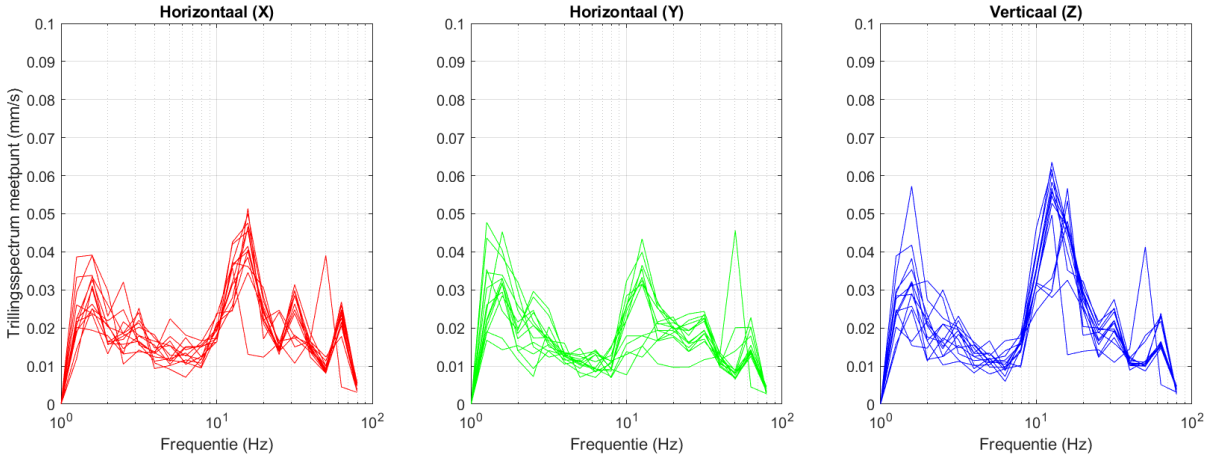
Figuur 13 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (maaiveld)



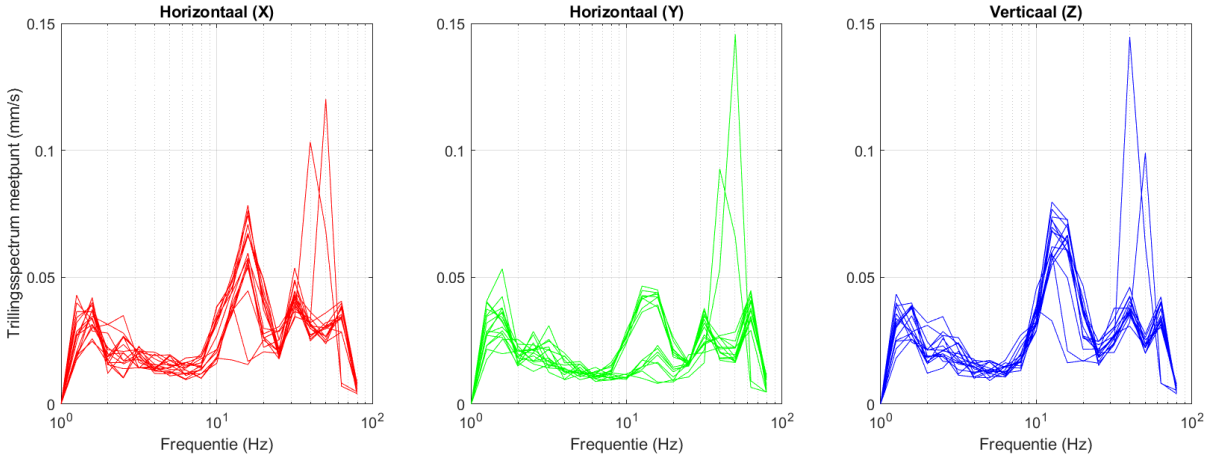
Figuur 14 Gemeten trillingen bij meetpunt 3 (maaiveld)



Figuur 15 Tertsbandspectra bij meetpunt 1



Figuur 16 Tertsbandspectra bij meetpunt 2

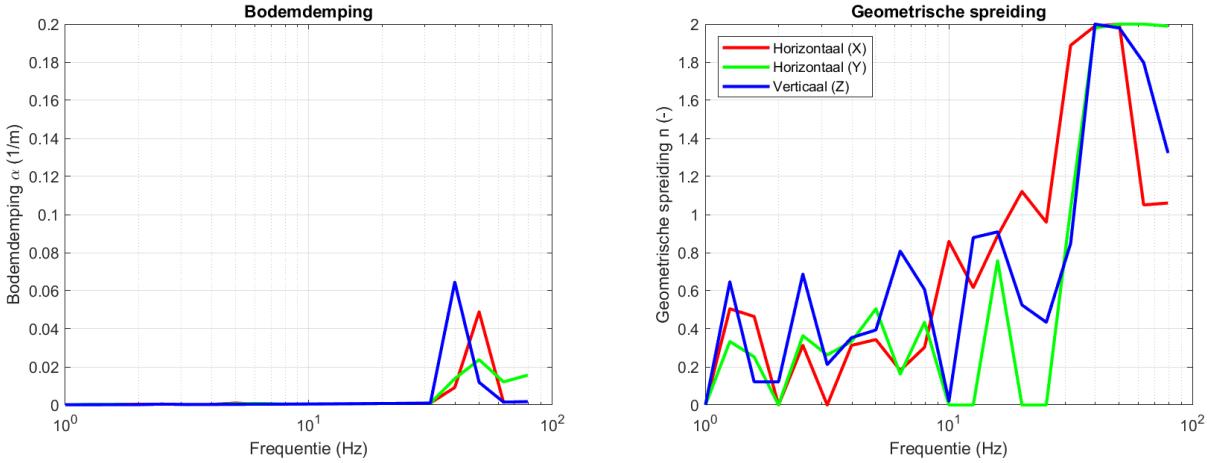


Figuur 17 Tertsbandspectra bij meetpunt 3

De uitdemping van de trillingen als functie van de afstand is bepaald met de empirische Barkan-vergelijking, zoals weergegeven in vergelijking 1.

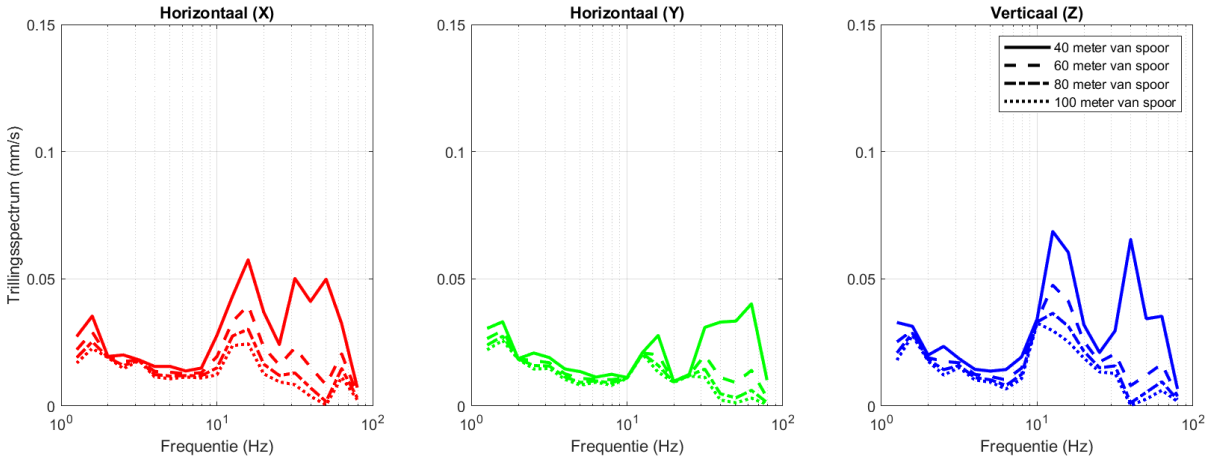
$$V(f,r) = V_0(f,r_0) \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^{n(f)} \cdot e^{-\alpha \cdot (r-r_0)} \qquad (1)$$

In deze vergelijking staat *V* voor de trillingssnelheid, *f* voor de frequentie, *r* voor de afstand tot de trillingsbron, r_0 voor de referentieafstand (hier 20 m), *n* voor de geometrische spreidingsfactor en α voor de bodemdemping. De geometrische spreiding en bodemdemping zijn weergegeven in Figuur 18.



Figuur 18 Bodemdemping α (links) en geometrische spreiding n (rechts) als functie van de frequentie

De gemiddelde trillingsspectra op 40, 60, 80 en 100 meter van het spoor zijn weergegeven in Figuur 19. Hier is te zien dat vooral boven de 10 Hz de trillingen sterk uitdempen met de afstand.

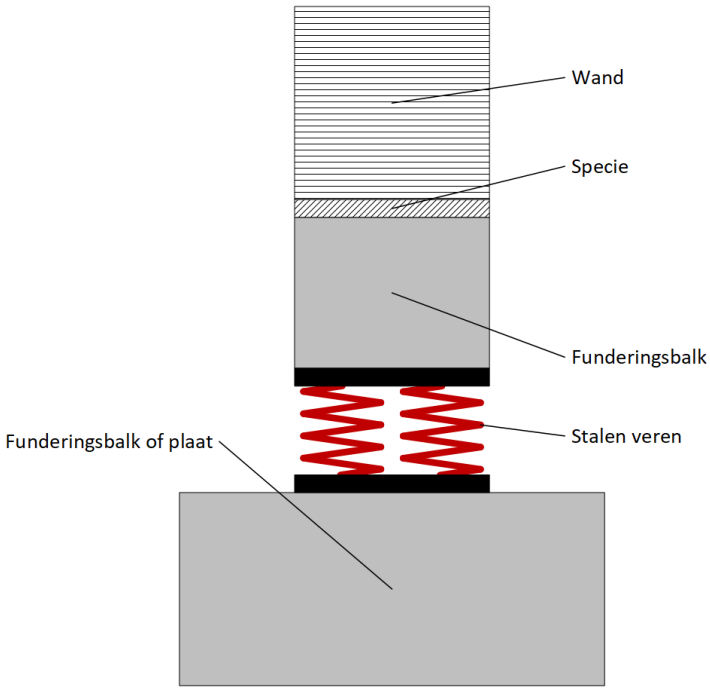


Figuur 19 Gemiddelde trillingsspectra op 40, 60, 80 en 100 meter van het spoor

IV Principedetails maatregelen

Deze bijlage bevat achtergrondinformatie en principedetails van enkele besproken maatregelen.

Een principeschets van een afgeveerde fundering met stalen veerdozen is weergegeven in Figuur 20. Een foto van een concrete toepassing bij eengezinswoningen in Prinsenbeek is weergegeven in Figuur 21.

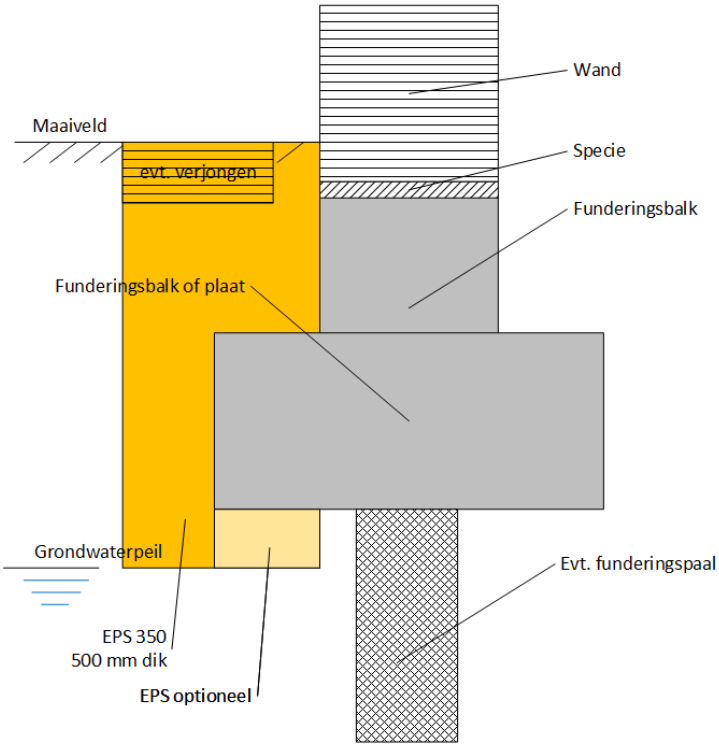


Figuur 20 Principeschets afgeveerde fundering (hier met stalen veerdozen)



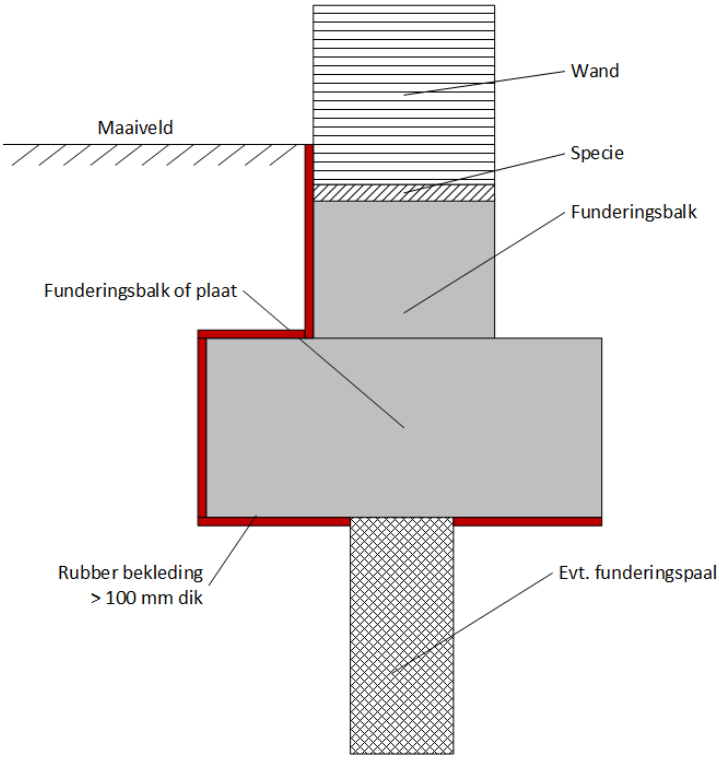
Figuur 21 Dubbele fundering met stalen veerdozen (project in Prinsenbeek)

Een principeschets van het bekleden van de fundering met EPS (piepschuim) is weergegeven in Figuur 22. De EPS-kwaliteit dient wat zwaarder te zijn dan standaard i.v.m. de gronddruk. De benodigde dikte voor voldoende reductie is zo'n 500 mm (1000 mm in de afbeelding), om opdrijven te voorkomen moet dit tot de GHG-waarde van het grondwaterpeil worden aangebracht en verankerd worden aan de fundering. Een principeschets is weergegeven in Figuur 22. Bij maaiveld kan eventueel iets verjongd worden. Afdekken met een dunne zandlaag (max. 100 mm) en tegels is mogelijk. Bij toepassing bij een parkeergarage is verankering aan de parkeergarage noodzakelijk om opdrijven te voorkomen.



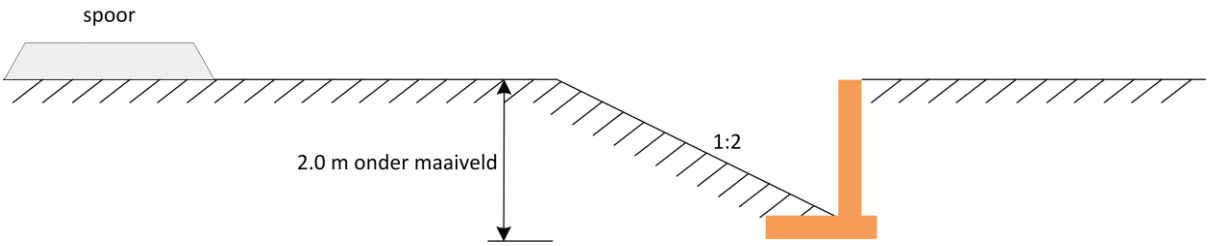
Figuur 22 Fundering met EPS-scherm ervoor

Op analoge wijze kan een fundering worden bekleed met rubber materiaal, zie .

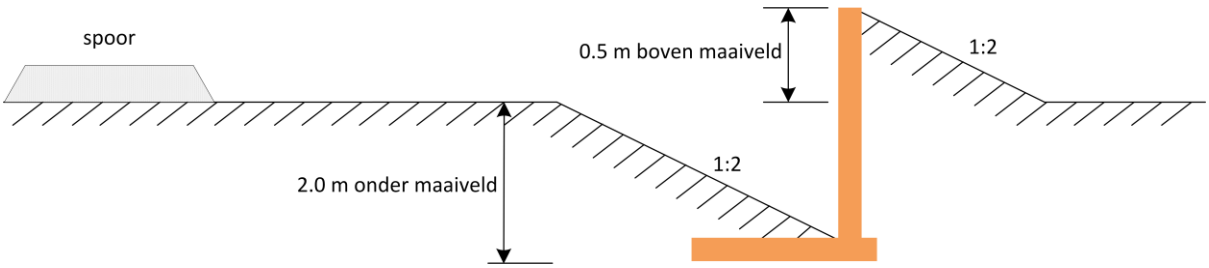


Figuur 23 Fundering bekleed met rubber

Principe-oplossingen voor het combineren van een sloot met een prefab L-wand zijn weergegeven in Figuur 24, en in Figuur 25 voor een situatie waarbij een combinatie van een sloot en geluidscherm wordt gerealiseerd met aan de zijde van de woningen 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 vergunningsplichting zijn bij ProRail.



Figuur 24 Sloot gecombineerd met prefab L-wand



Figuur 25 Geluidscherm gecombineerd met sloot en prefab L-wand