

**WV
EBOOST**



TRILLINGSONDERZOEK T.B.V. NIEUWBOUW

ZWARTEWEG

ENSCHEDÉ

COLOFON

Auteur [REDACTED]
[REDACTED]

Controle en vrijgave [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

Projectcode *WBD2021-018*

Versienr *1.0*

Datum *6 januari 2022*

Status *Definitief*

Opdrachtgever [REDACTED]



Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van metingen van



© We-Boost 2022

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

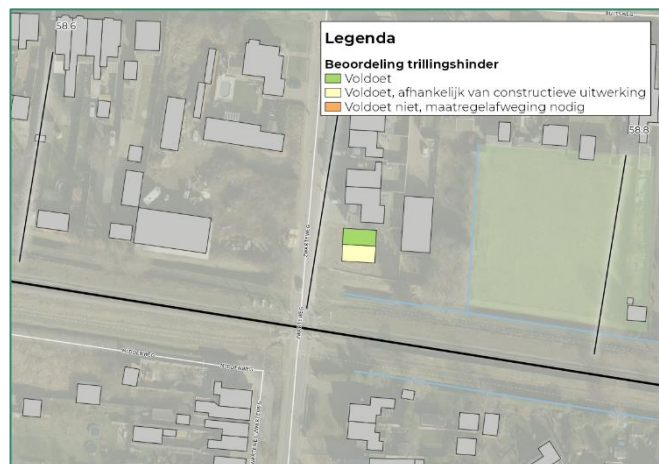
DE KERN VAN DIT RAPPORT

Aan de Zwarteweg in Enschede, tussen nummer 130 en het spoor, wordt nieuwbouw ontwikkeld in de vorm van een twee-onder-een-kapwoning. De geplande nieuwbouw bevindt zich binnen een zone van 100 meter van de spoorlijn Enschede-Gronau. 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, om maatregelen af te wegen op doelmatigheid.

In dit onderzoek is met behulp van metingen en modelberekeningen onderzocht wat de trillingen zullen zijn in de toekomstige bebouwing. Hierbij volgen we de aanpak zoals voorgeschreven in de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. We hebben daarbij meerdere uitwerkingsvarianten voor de bebouwing beschouwd.

CONCLUSIES

De conclusie van het onderzoek is dat in de meest van het spoor vandaan gelegen woning wordt voldaan aan de streefwaarden voor trillingshinder uit de SBR B-richtlijn (het beoordelingskader voor trillingshinder). In de dichtst bij het spoor gelegen woning kunnen, afhankelijk van de constructieve uitwerking, incidentele overschrijdingen van de streefwaarden optreden. Het gaat om een beperkt aantal overschrijdingen (minder dan 1 per dag) bij bepaalde trillingsgevoelige bouwconcepten. Deze trillingen kunnen door bewoners als hinderlijk worden ervaren.



Omdat overschrijdingen van het beoordelingskader in bepaalde gevallen niet kunnen worden uitgesloten, is onderzoek gedaan naar mitigerende maatregelen. Hierbij is zowel gekeken naar maatregelen aan het spoor, in de bodem als naar maatregelen aan de geplande woningen. Uit het maatregelenonderzoek volgt dat maatregelen aan het spoor of in de bodem niet doelmatig zijn, gezien de zeer hoge kosten. Met optimalisaties aan de constructie van de woningen zijn de trillingen wel te verminderen.

AFWEGING VAN MAATREGELEN

Op basis van dit onderzoek adviseren we het volgende:

1. Vermijd de volgende bouwconcepten:
 - a. Houtskeletbouw.
 - b. Vloeren met een eigenfrequentie boven 15 Hz. Bij de huidige beukmaten betekent dit een vloerdikte boven de 220 mm.

- c. Fundering op staal.
- d. Fundering op palen met een paallengte kleiner dan 7 meter.

Als die bouwconcepten worden vermeden, dan worden er geen overschrijdingen van het beoordelingskader verwacht, en zijn verdere optimalisaties en maatregelen niet nodig.

2. Als toch gebruik wordt gemaakt van een van bovengenoemde bouwconcepten, dan zijn dit de meest kosteneffectieve maatregelen waarmee kan worden voldaan aan het beoordelingskader voor trillingshinder:
 - a. Bij houtskeletbouw: verzwaren van de fundering (zie hieronder, bij (c) en (d)).
 - b. Bij vloeren met een eigenfrequentie boven de 15 Hz: dunnere vloeren toepassen.
 - c. Bij fundering op staal: inpakken van de fundering met minimaal 500 mm dik EPS (tot ca. 500 mm onder onderzijde funderingsbalken). Effect is 20 tot 40 procent.
 - d. Bij korte paalfundering: verzwaren van de fundering door toepassen van langere palen (minimaal 7 meter paallengte, minimaal 250 x 250 mm) of toepassen van een dikke plaatfundering (minimaal 500 mm dik). Effect is 5 tot 25 procent.
3. Meest robuust en toekomstvast is het toepassen van trillingsisolatie (stalen veerdozen of rubberen oplegblocken tussen een paalkoppen en funderingsbalken, afgeveerd op maximaal 9 Hz). Dit is een zeer effectieve maatregel, waarmee de trillingen lager zijn dan de streefwaarden, maar de kosten van deze maatregel zijn met € 24.000 tot € 50.000 voor het hele plan erg hoog.

Tenslotte, er is van een situatie met *matige hinder* in de woning die het dichtst bij het spoor ligt. In die situatie dienen maatregelen volgens de SBR B-richtlijn te worden onderzocht en afgewogen op doelmatigheid om een zo optimaal mogelijk woon- en leefklimaat te laten ontstaan. Hierbij dient te worden afgewogen of het effect van maatregelen opweegt tegen de meerkosten en risico's. Uiteindelijk kan een dergelijke afweging opleveren dat er geen maatregelen worden getroffen, bijvoorbeeld omdat die te kostbaar of onvoldoende effectief zijn. In deze afweging kunnen ook de volgende trillingsaspecten worden meegewogen:

- ▶ Het gaat om een beperkt aantal overschrijdingen (minder dan 1 per dag, en alleen in de woning die het dichtst bij het spoor ligt). In de andere woning is geen sprake van overschrijdingen.
- ▶ De trillingen voldoen weliswaar niet aan de strenge streefwaarden voor nieuwbouw uit de SBR B-richtlijn, maar wel aan de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties uit de SBR B-richtlijn. In die soepeler streefwaarden voor bestaande situaties is een zekere mate van gewenning meegenomen.
- ▶ De woningen worden gerealiseerd in een zone dichtbij het spoor, waar nu ook al bebouwing is gerealiseerd (bijvoorbeeld de bebouwing aan zuidzijde van het spoor, deze ligt op dezelfde afstand tot het spoor). Het gaat bovendien om oude, meer trillingsgevoelige bebouwing, waar de trillingen hoger zullen zijn dan in de nieuwe woningen. Ook zonder maatregelen tegen trillingen kan worden beargumenteerd dat er in de geplande bebouwing daarom geen onacceptabele situatie ontstaat: de trillingen zijn immers lager dan in andere, al bestaande bebouwing rond deze locatie.



INHOUDSOPGAVE

I.	INLEIDING	8
1.1.	Aanleiding	8
1.2.	Doel	8
1.3.	Leeswijzer	8
2.	SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN	11
2.1.	Situatie	11
2.2.	Uitgangspunten	11
3.	BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE	15
3.1.	Beoordelingskader	15
3.2.	Rekenmethode	16
4.	VERWACHTE TRILLINGEN	19
4.1.	Meetresultaten	19
4.2.	Trillingen in geplande gebouw	19
5.	MITIGERENDE MAATREGELEN	22
5.1.	Nut en noodzaak van maatregelen	22
5.2.	Analyse resultaten	23
5.3.	Maatregelen aan de trillingsbron	23
5.4.	Maatregelen in de bodem	24
5.5.	Maatregelen aan de gebouwen	25
5.6.	Afweging van maatregelen	26
5.7.	Onzekerheden in het onderzoek	27
II.	GRONDONDERZOEK	29
III.	REKENMODEL	31
IV.	RESULTATEN METINGEN	35



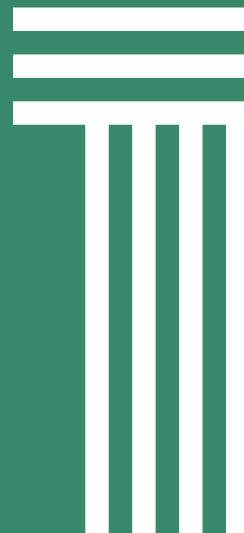




INLEIDING



In dit hoofdstuk geven we een korte omschrijving van de inhoud van dit onderzoek: de aanleiding, het doel van het onderzoek en een beknopte leeswijzer om informatie snel te kunnen vinden.



INLEIDING

1.1. AANLEIDING

Aan de Zwarteweg in Enschede, tussen nummer 130 en het spoor, wordt nieuwbouw ontwikkeld in de vorm van een twee-onder-een-kapwoning. De geplande nieuwbouw bevindt zich binnen een zone van 100 meter van de spoorlijn Enschede-Gronau, zie Figuur 1. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet op voorhand worden uitgesloten.



Figuur 1 Plangebied

1.2. DOEL

Doel van dit onderzoek is om vast te stellen of er sprake zal zijn van trillingshinder in de geplande bebouwing, en zo ja, met welke maatregelen deze hinder is te voorkomen. Hiervoor maken wij een nauwkeurige predictie van de trillingen in de geplande bebouwing, conform de in de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* omschreven aanpak. Deze trillingen toetsen we aan het van toepassing zijnde beoordelingskader. Als we overschrijdingen van het beoordelingskader verwachten, dan geven we aan met welke constructieve aanpassingen of maatregelen kan worden voldaan aan de streefwaarden uit 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. In hoofdstuk 5 beschrijven we met welke constructieve aanpassingen of mitigerende maatregelen kan worden voldaan aan het beoordelingskader.

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





SITUATIEBESCHRIJVING



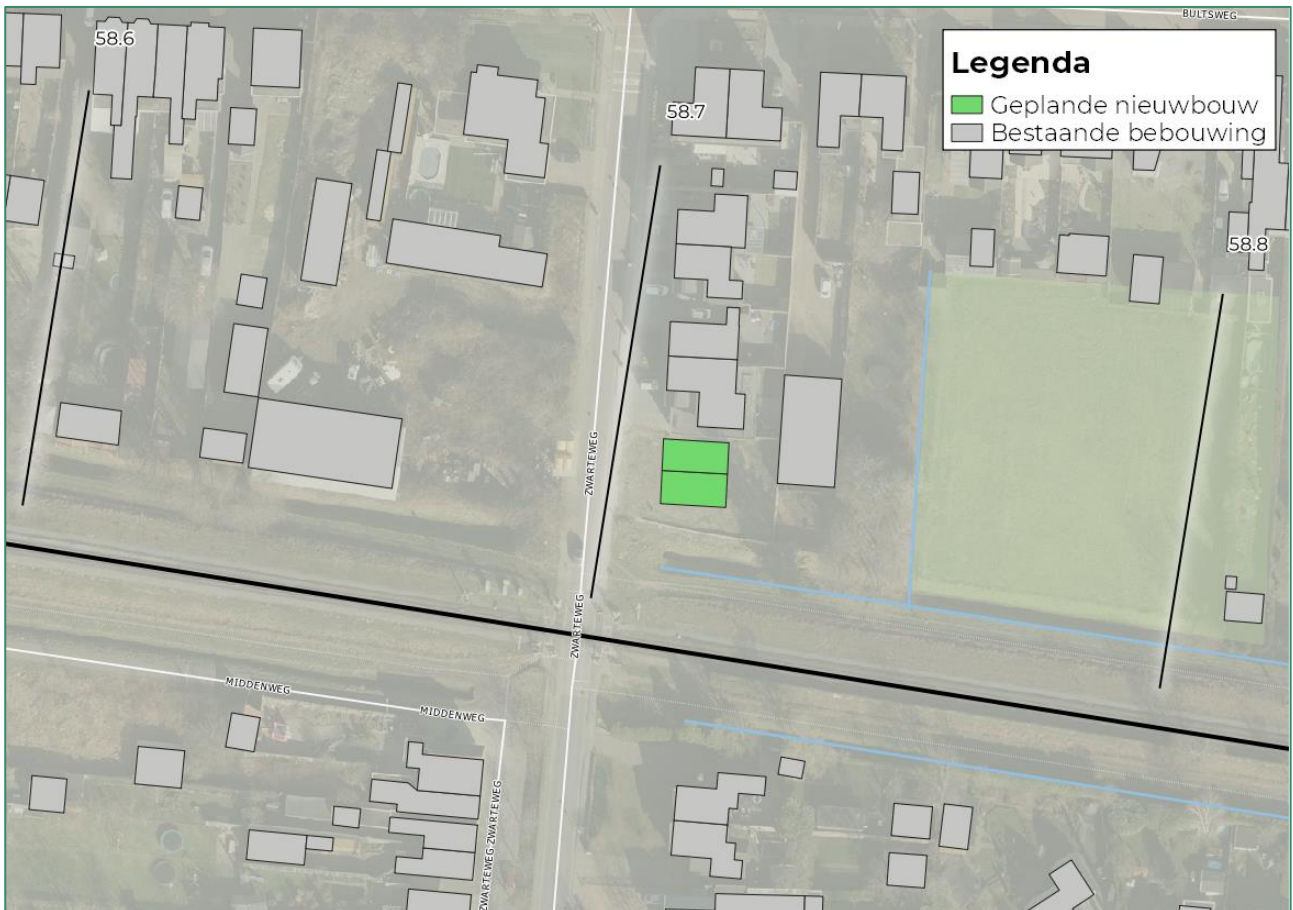
In dit hoofdstuk wordt een toelichting gegeven op de beoogde toekomstige situatie en worden de uitgangspunten van het onderzoek weergegeven.



SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN

2.1. SITUATIE

De geplande bebouwing betreft een grondgebonden twee-onder-een-kapwoning van bijna 10 meter hoog, tussen Zwarteweg 130 en het spoor, zie Figuur 2.



Figuur 2 Toekomstige bebouwing op de planlocatie

De geplande nieuwbouw bevindt zich in een zone van 25 tot 35 meter van het spoor. De rijsnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. De gegevens in Tabel 1 zijn gebaseerd op het Geluidsregister Spoor en gegevens van de vervoerders. Op dit traject is uitsluitend sprake van structureel reizigersverkeer, er rijdt geen structureel goederenvervoer. Er wordt bovendien geen toename van het aantal treinen voorzien.

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

Type trein	Rijsnelheid	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Stoptrein	80 – 100 km/h	2.00	2.00	0.75

Ook zwaar wegverkeer over de spoorwegovergang Zwarteweg kan voor voelbare trillingen in de bebouwing zorgen. In dit onderzoek zijn deze trillingen niet nader kwantitatief beschouwd.

2.2. UITGANGSPUNTEN

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



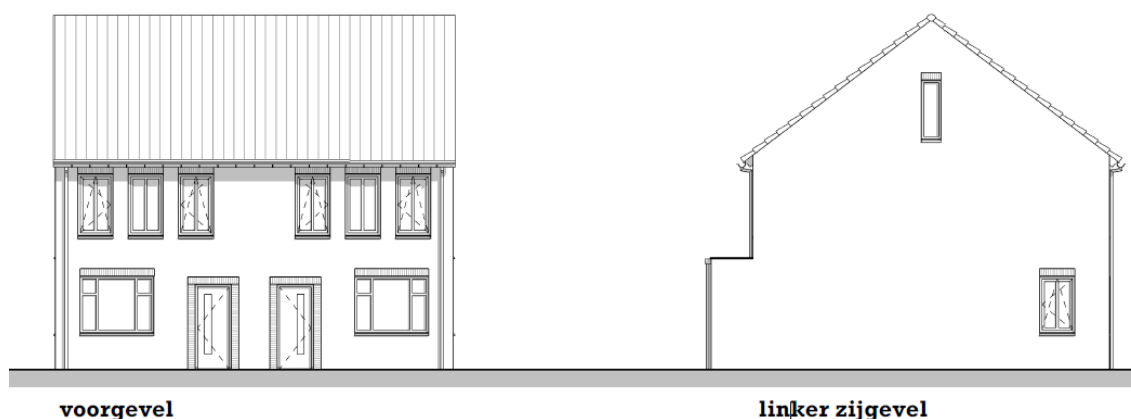
2.2.1. GEGEVENS BEBOUWING

Voor het uitvoeren van de berekeningen is uitgegaan van tekeningen van 15 december 2020. Omdat er nog variaties kunnen optreden tijdens de verdere detaillering, en omdat er altijd verschillen zijn tussen DO en As-Built, hebben we in de berekeningen enkele varianten doorgerekend qua materiaaleigenschappen en dimensies van bijvoorbeeld vloeren, zodat we robuuste uitspraken kunnen doen over de verwachte trillingen in de woningen.

In Tabel 2 zijn de belangrijkste eigenschappen van de woningen weergegeven, een weergave van de voor- en zijgevel hebben we opgenomen in Figuur 3. Het rekenmodel voor de bebouwing is hierop gebaseerd.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Meerdere varianten: <ul style="list-style-type: none">• Kanaalplaatvloeren 200 en 260 mm, 70 mm zandcement deklaag• Breedplaatvloeren 200 mm, C30/37, 70 mm zandcement deklaag
Hoogte	9.9 meter
Lengte vloerveld	5.4 meter
Breedte vloerveld	11.3 meter
Constructietype	Meerdere varianten: <ul style="list-style-type: none">• Kalkzandsteen en metselwerk (conform tekening)• Prefab beton en breedplaatvloeren, afgewerkt met metselwerk
Fundering	Op palen, aanname 7 meter lang, 0.25 x 0.25 meter



Figuur 3 Aanzichten geplande woningen

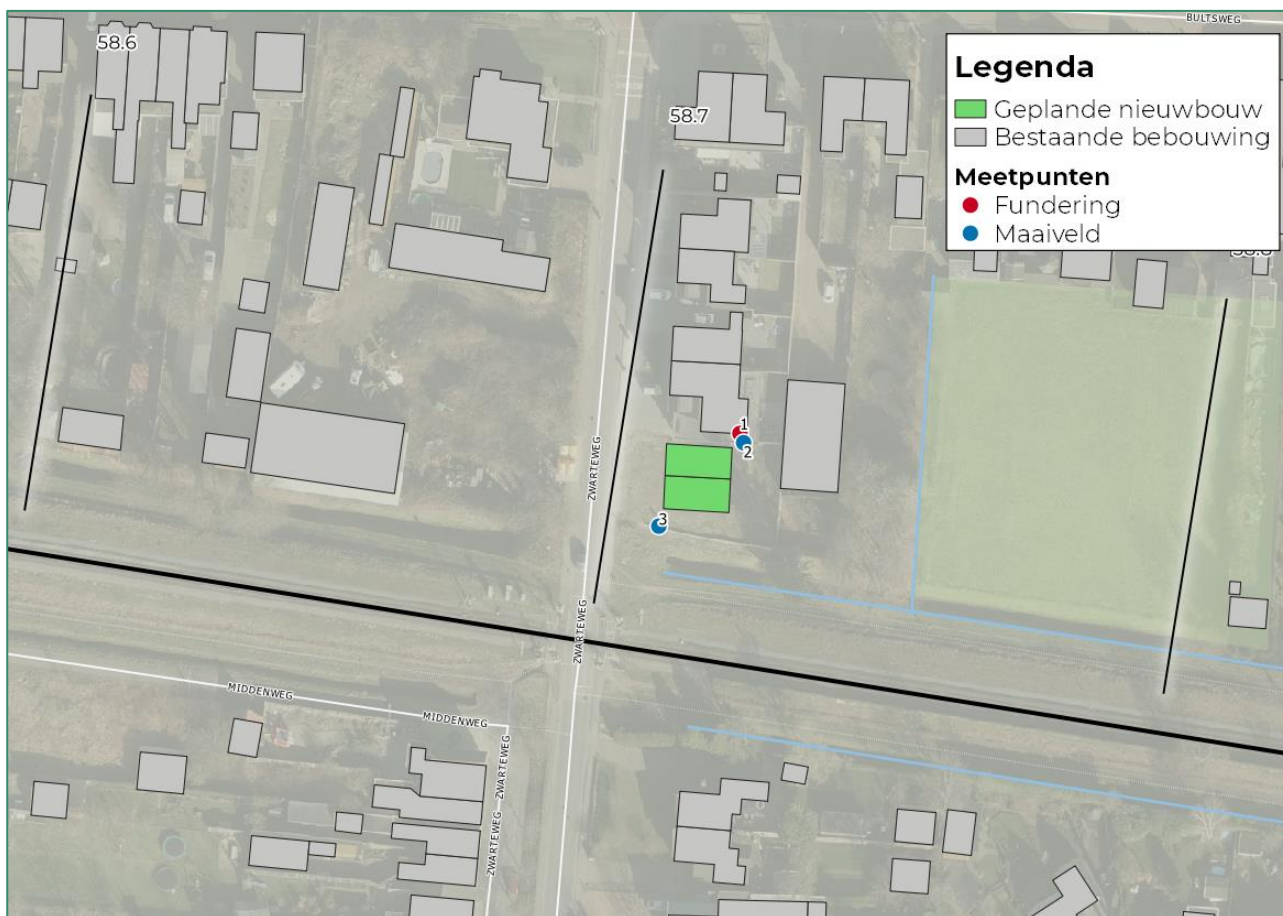
2.2.2. GEGEVENS ONDERGROND

Voor gegevens van de ondergrond is gebruik gemaakt van beschikbare boringen en sonderingen uit Dinoloket en bodemonderzoeken die in 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

Zoals te zien in Figuur 4 zijn door Alcedo op drie locaties metingen uitgevoerd. Het gaat hierbij om twee meetpunten op het maaiveld en een meetpunt aan de fundering van de naastgelegen woning op Zwarteweg 130. De metingen zijn uitgevoerd van 7 tot 14 december 2021.



Figuur 4 Meetpunten





BEOORDELINGSKADER



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



BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE

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 het gebouw 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 grootte 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 om gebouwen met een woonfunctie.
 - 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.

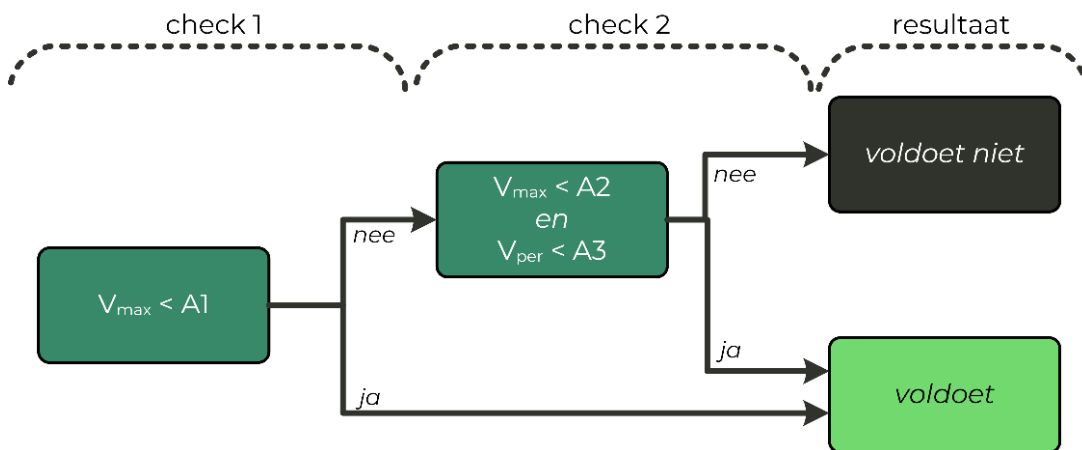
Een gebouw kan op twee manieren voldoen aan de richtlijn: de trillingssterkte V_{max} moet lager zijn dan de onderste streefwaarde A1 (zie Tabel 3), óf V_{max} moet lager zijn dan de bovenste streefwaarde A2, waarbij tegelijkertijd de trillingsintensiteit V_{per} lager is dan de streefwaarde A3. Zie ook het schema in Figuur 5.

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.



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 5 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

3.2. REKENMETHODE

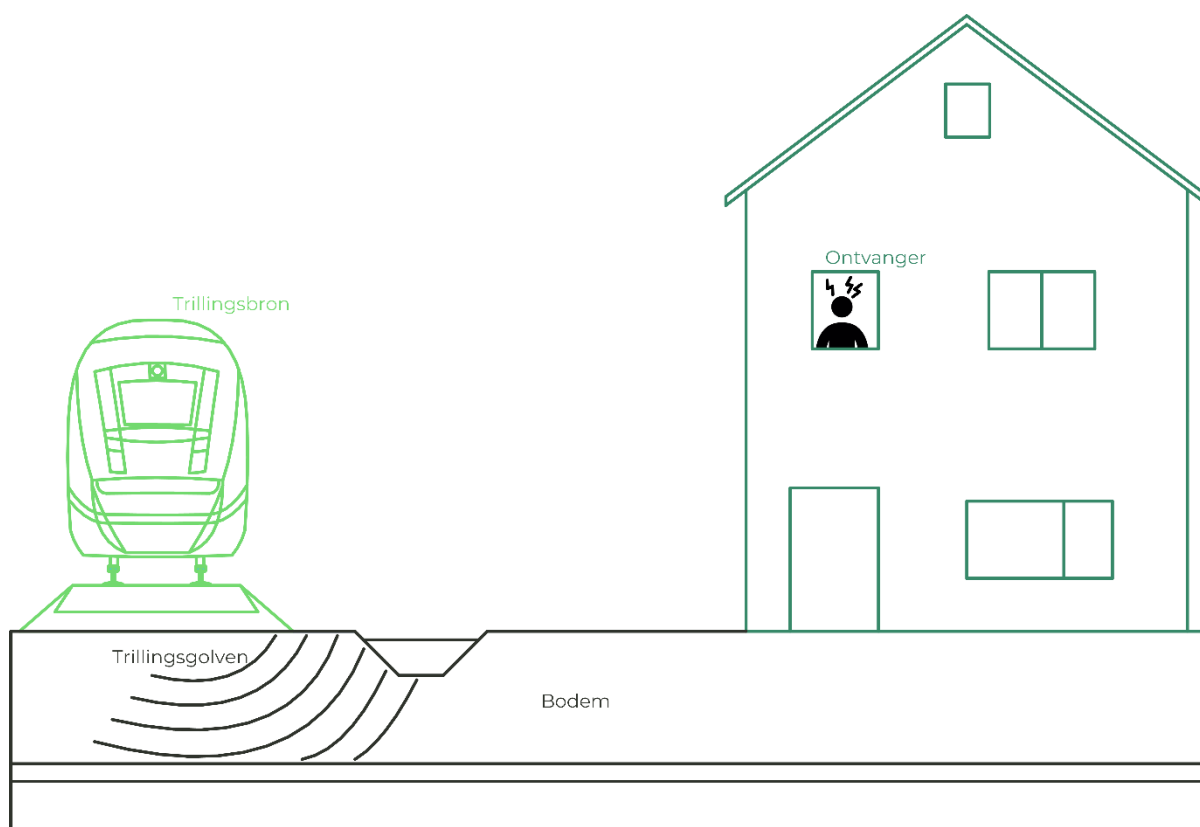
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde gebouwen, wordt op basis van metingen in de omgeving van de bebouwing (op maaiveld en aan bestaande bebouwing) een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande 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. In de volgende subparagrafen wordt een korte uitleg gegeven over hoe trillingen zich voortplanten van de trillingsbron tot in het gebouw.

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 6.

Hierna wordt toegelicht hoe in dit onderzoek hiermee wordt omgegaan.





Figuur 6 Trillingen – het systeem van trillingsbron, de bodem als doorgeefmedium en het gebouw als ontvanger

3.2.2. DE TRILLINGSBRON

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

3.2.3. DE BODEM

De bodem op deze locatie bestaat voornamelijk uit zand- en leemlagen, zie bijlage I. De uitdemping van de trillingen met de afstand is bepaald met een rekenmodel op basis van deze bodemopbouw voor een zo betrouwbaar mogelijke predictie van de trillingen.

3.2.4. HET GEBOUW

De trillingen gaan via de fundering een gebouw binnen. Afhankelijk van het type fundering, de bodem, de massa en afmetingen van het gebouw zal de fundering de trillingen meer of minder uitdempen. Vervolgens worden de trillingen in het gebouw weer versterkt door bewegingen van het gebouw en de vloeren. Het gebouwgedrag is in dit onderzoek bepaald op basis van de bodemopbouw, de constructieve eigenschappen en de gebruikte materialen van de gebouwen. Hiervoor maken we gebruik van het rekenmodel Buildyn, een zogenaamd beam-element model (BEM) waarin het gebouw gemodelleerd en doorgerekend wordt. De resultaten van het model zijn geïkt met praktijkresultaten uit metingen. Een toelichting op het rekenmodel Buildyn is gegeven in bijlage II.





VERWACHTE TRILLINGEN



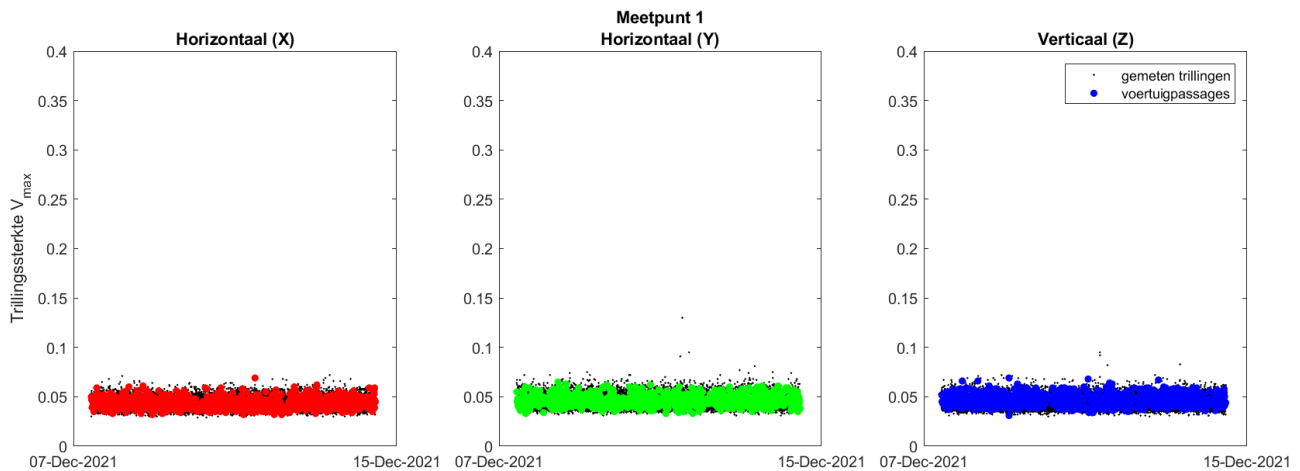
In dit hoofdstuk wordt eerst een korte toelichting gegeven op de meetresultaten, daarna worden de verwachte trillingen in de geplande bebouwing gegeven. Hierbij is gebruik gemaakt van de beoordelingsmethode en de rekenmethodiek zoals toegelicht in het voorgaande hoofdstuk.



VERWACHTE TRILLINGEN

4.1. MEETRESULTATEN

Alcedo heeft metingen uitgevoerd op maaiveld en aan de fundering van de naastgelegen bestaande woning (Zwarteweg 130). De trillingen op het meetpunt aan de fundering zijn weergegeven in Figuur 7. Overige gegevens uit de metingen hebben we opgenomen in bijlage III. In Figuur 7 valt op dat de trillingen van de treinen maar nauwelijks hoger zijn dan de achtergrondtrillingen. De trillingen van zwaar verkeer over de spoorwegovergang zijn soms hoger dan de trillingen van het treinverkeer.



Figuur 7 Gemeten trillingen aan fundering Zwarteweg 130.

4.2. TRILLINGEN IN GEPLANDE GEBOUW

De geplande bebouwing is gemodelleerd op basis van de informatie uit Tabel 2. Een voorbeeld van 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 bebouwing.

De resultaten hebben we weergegeven in Tabel 4, samen met een beoordeling van de trillingen. De trillingen zijn weergegeven als een bandbreedte, omdat we per constructietype meerdere varianten hebben doorgerekend, en omdat er verschillen zijn tussen de beide woningen omdat de afstand tot het spoor verschilt. Oranje arcering geeft aan dat er sprake is van een overschrijding van de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn.

Tabel 4 Trillingen per bouwdeel en beoordeling op SBR B-richtlijn

Constructietype	V_{\max}	V_{per}	Beoordeling
Kalkzandsteen, metselwerk, kanaalplaatvloer	0.2 – 0.3	0.01 – 0.03	Voldoet, afhankelijk van uitwerking
Prefab beton, metselwerk, breedplaatvloer	0.1 – 0.2	0.01 – 0.03	Voldoet

Samengevat geldt het volgende:

- ▶ In de verst van het spoor vandaan gelegen woning wordt voldaan aan het beoordelingskader met het voorgestelde ontwerp (kalkzandsteen en metselwerk), maar ook met een bouwconcept van prefab beton en breedplaatvloeren.



- ▶ In de dichtst bij het spoor gelegen woning kunnen overschrijdingen van het beoordelingskader optreden, afhankelijk van de constructieve uitwerking. Hierbij geldt:
 - De trillingen zijn lager wanneer het gebouw met een (prefab) betonnen skelet en breedplaatvloeren wordt gerealiseerd. De bouw is dan zwaarder, en er is sprake van wat meer demping van de trillingen in de vloeren.
 - De trillingen zijn lager wanneer de eigenfrequentie van de vloer niet samenvalt met dominante trillingsfrequenties van de treinen. In de praktijk betekent dat hier dat een eigenfrequentie van de vloer van meer dan 15 Hz dient te worden vermeden. Een vloerdikte van 200 mm voldoet hieraan.
 - De trillingen zijn lager bij een zwaardere funderingsconstructie. In de berekeningen is uitgegaan van een fundering op palen (7 meter lang, 0.25 x 0.25 meter), bij langere palen (bijv. 10 meter lang) of dikkere palen (bijv. 0.35 x 0.35 meter) nemen de trillingen iets verder af (ca. 10 procent). Bij een fundering op staal zijn de trillingen juist zo'n 20 tot 30 procent hoger.
 - Het aantal overschrijdingen is beperkt. Bij de meest ongunstige constructie (een fundering op staal, kalkzandsteen en metselwerk wanden en vloer met eigenfrequentie boven 15 Hz) gaat het nog steeds om minder dan 1 overschrijding per dag, vaak in de late avonduren of de vroege morgenuren. In de nacht rijdt hier geen treinverkeer.

Overschrijdingen in de meest dichtbij het spoor gelegen woning treden uitsluitend op bij de volgende bouwconcepten:

- ▶ Houtskeletbouw (hier niet voorzien), door de lichte constructiewijze is dit type gebouw gevoeliger voor trillingen.
- ▶ Alle bouwconcepten waarin vloeren worden toegepast met een eigenfrequentie boven de 15 Hz. Bij de huidige beukmaten betekent dit een vloerdikte boven de 220 mm, dit is dikker dan standaard.
- ▶ Alle bouwconcepten waarbij de woningen op staal worden gefundeerd.
- ▶ Alle bouwconcepten met een paallengte van minder dan 7 meter.

Als een van bovenstaande bouwconcepten wordt toegepast, dan is sprake van overschrijdingen van het beoordelingskader. Voor die gevallen wordt in het volgende hoofdstuk ingegaan op mitigerende maatregelen.





MITIGERENDE MAATREGELEN



In dit hoofdstuk wordt meer in detail gekeken naar de in het vorige hoofdstuk geconstateerde overschrijdingen van het beoordelingskader. Vervolgens wordt gekeken naar mogelijke maatregelen, en naar het effect en de kosten van die maatregelen.





MITIGERENDE MAATREGELEN

5.1. NUT EN NOODZAAK VAN MAATREGELEN

Afhankelijk van de constructieve detaillering van de woningen, zijn er in de meest dichtbij het spoor gelegen woning incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader mogelijk. Deze overschrijdingen treden uitsluitend op bij de volgende bouwconcepten:

- ▶ Houtskeletbouw (hier niet voorzien), door de lichte constructiewijze is dit type gebouw gevoeliger voor trillingen.
- ▶ Alle bouwconcepten waarin vloeren worden toegepast met een eigenfrequentie boven de 15 Hz. Bij de huidige beukmaten betekent dit een vloerdikte boven de 220 mm, dit is dikker dan standaard.
- ▶ Alle bouwconcepten waarbij de woningen op staal worden gefundeerd
- ▶ Alle bouwconcepten met een paallengte van minder dan 7 meter

Alleen als een van de bovenstaande bouwconcepten wordt toegepast, is een maatregelafweging noodzakelijk. Er worden dan namelijk overschrijdingen van het beoordelingskader verwacht. Het gaat dan om treinen die in de vroege dagperiode (voor 7:00) of in de late avondperiode (na 23:00) rijden. In de richtlijn voor trillingshinder wordt aangegeven dat, in geval van overschrijdingen, maatregelen dienen te worden afgewogen. 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 meest dichtbij het spoor gelegen 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 gemiddelde trillingssterkte V_{per} een goede indicatie is. Die is laag (V_{per} bedraagt maximaal 0.03, en voldoet daarmee ruimschoots aan de streefwaarde van 0.05). Er is sprake van een beperkt aantal overschrijdingen, minder dan 1 per dag. Het beperkte aantal overschrijdingen in combinatie met de lage gemiddelde trillingssterkte V_{per} , kan het achterwege laten van een maatregel rechtvaardigen.
2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. Daar is hier maar beperkt sprake van, de trillingen van zwaar wegverkeer over de spoorwegovergang kunnen ook voelbaar zijn, maar zijn wel lager dan de trillingen 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.

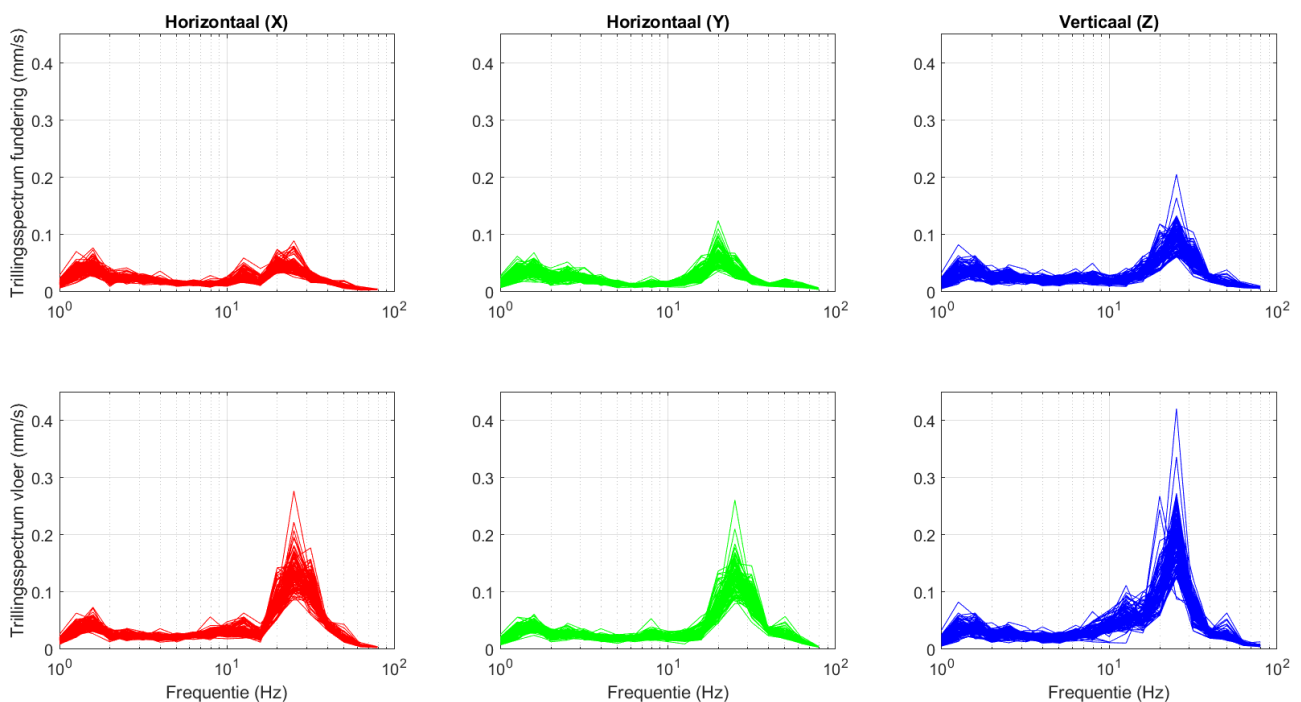
Om vast te stellen of er doelmatige maatregelen zijn, gaan we hierna in op maatregelen om de trillingen te reduceren. Om effectieve maatregelen te treffen, doen we eerst een nadere analyse van de verwachte trillingen. Zo stellen we vast bij welke trillingsfrequenties vooral hoge trillingen optreden.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



5.2. ANALYSE RESULTATEN

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

Uit Figuur 8 volgt dat de hoogste trillingen maatgevend zijn in verticale richting bij 25 Hz, vooral als gevolg van de hoge trillingen op de fundering bij die frequentie, en opslingingering in het gebouw door wanden en vloeren. Maatregelen die genomen worden, moeten vooral effectief zijn tegen trillingen bij frequenties boven de 15 Hz. In de volgende subparagrafen wordt ingegaan op mogelijke maatregelen aan de trillingsbron, in de bodem of aan de gebouwen.



Figuur 8 Verwachte trillingen op fundering (boven) en op hoogste verdieping (onder)

5.3. 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 voertuigen). De trillingen worden vooral veroorzaakt door de passage van de treinen over de overweg, waarbij de treinen richting Enschede iets hogere trillingen veroorzaken. Rond overwegen zijn de trillingen vaak hoger door ES-lassen² in het spoor en door verschillen in stijfheid van de ondergrond. De overweg bij de Zwarteweg betreft een overweg van het type Strail, dit is qua trillingen al een gunstiger type dan veel andere overwegen.

Effectieve maatregelen aan de bron zijn vooral het verwijderen van de overweg (bijvoorbeeld door deze te vervangen door een tunnel), het reduceren van de rijnsnelheid van de treinen of het toepassen van bijvoorbeeld een ballastmat onder het spoor. De goedkoopste maatregel, het toepassen van een ballastmat onder het spoor, kost nog steeds zo'n € 200.000 tot € 350.000 (incl.

² Systeem voor treinsignalering, ES-last is een onderbreking in de spoorstaaf die voor hogere trillingen kan zorgen.

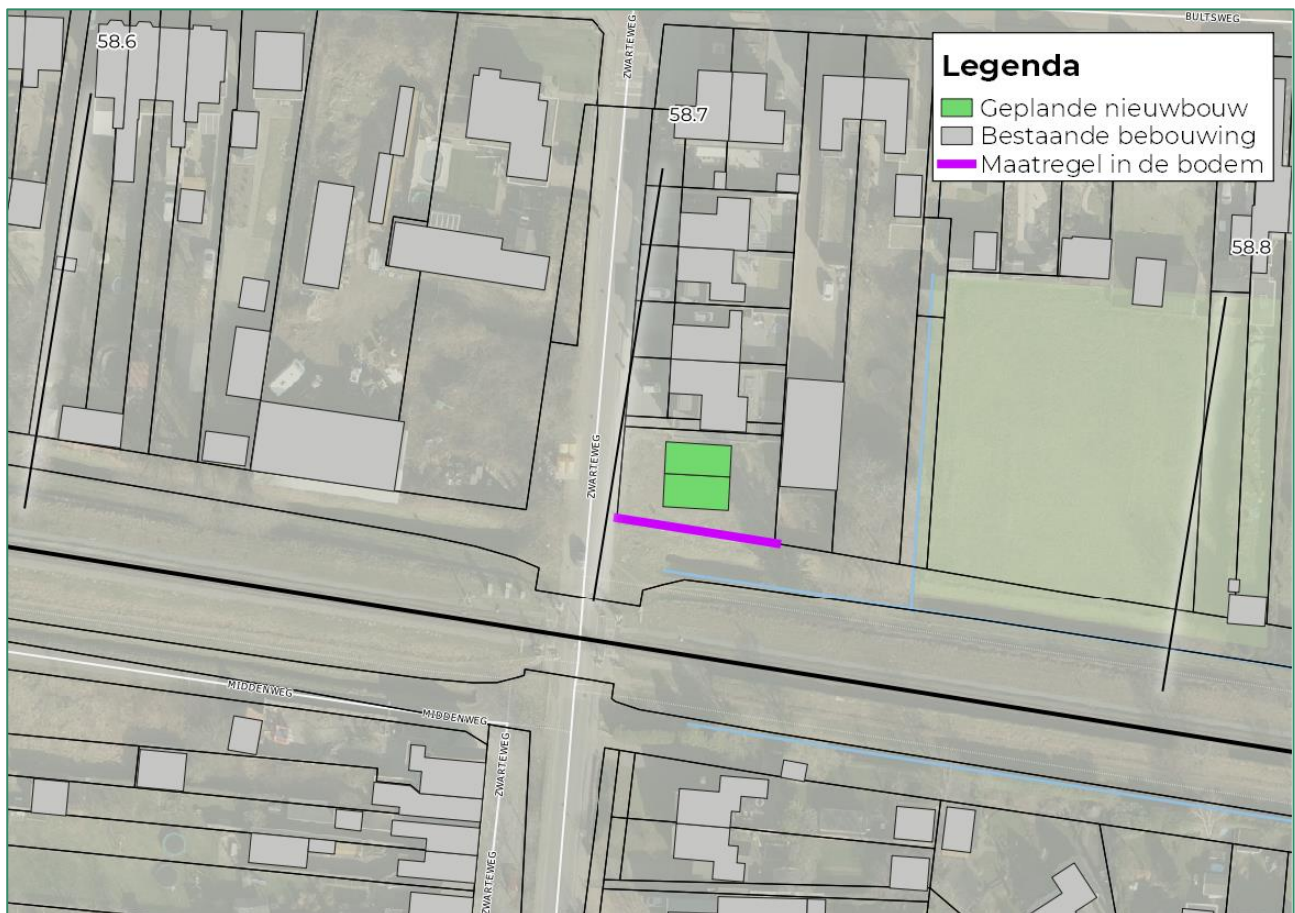
BTW, prijspeil 2022). Goedkopere maatregelen, zoals onder sleeper pads, zijn onvoldoende effectief om de trillingen rond 25 Hz te reduceren.

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

5.4. MAATREGELLEN 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 verdiepen van de spoorvloot, een trillingsscherm van EPS (piepschuim), beton, jet-grout (soil-mix methode), Mix-in-Place wand of een damwand. Nadeel van deze maatregelen is dat deze (met uitzondering van het verdiepen van de spoorvloot) kostbaar zijn en niet goed aanpasbaar zijn aan toekomstige situaties. Om een kostbare kruising met de Zwarteweg te voorkomen, is een locatie op de zuidelijke perceelgrens de meest voor de hand liggende locatie voor een maatregel in de bodem, zie Figuur 9. De lengte van een maatregel op deze locatie is ongeveer 30 meter.

Mogelijke maatregelen in de bodem met een inschatting van het effect en de kosten zijn weergegeven in Tabel 5. Verder is relevant dat mogelijk kabels en leidingen dienen te worden verlegd nabij de Zwarteweg, dit brengt extra kosten met zich mee.



Figuur 9 Locatie van mogelijk trillingsscherm



Tabel 5 Mogelijke maatregelen in de bodem en kosten

Maatregel	Effect	Kosten ³
Betonnen diepwand	35 – 60%	€ 0.3 – 0.5 mln.
Jet-grout wand	20 – 45%	€ 0.4 – 0.8 mln.
Damwand	5 – 20%	€ 0.1 – 0.3 mln.
Betonnen diepwand met rubber	50 – 80%	€ 0.4 – 0.8 mln.
Damwand met EPS (piepschuim)	15 – 40%	€ 0.2 – 0.4 mln.
Damwand met sleuf (luchtspouw)	20 – 50%	€ 0.3 – 0.5 mln.
Sloot 2.0 m diep	15 – 25%	< € 0.15 mln.
Sloot met prefab L-wand, 3.0 m diep	25 – 45%	€ 0.1 – 0.2 mln.
L-wand 3.0 m diep	15 – 30%	€ 0.1 – 0.2 mln.
L-wand 4.0 m diep	20 – 35%	€ 0.1 – 0.2 mln.
CSM-wand	5 – 15%	€ 0.1 – 0.3 mln.
Trillingsscherm EPS (piepschuim)	10 – 25%	< € 0.15 mln.

Maatregelen met een significant, merkbaar effect (meer dan 30 procent reductie van de trillingen) kosten allemaal meer dan € 100.000. De meest kosteneffectieve maatregel is het optimaliseren van de huidige spoorsloot (verlengen tot aan Zwarteweg) en deze combineren met een prefab L-wand, zie Bijlage IV voor een voorbeeld uitwerking. Merk op dat de maatregelen op de perceelgrens worden getroffen, dus afstemming met de eigenaar van het naastgelegen perceel (vermoedelijk de gemeente) is hiervoor noodzakelijk.

Ook bij maatregelen in de bodem zijn de kosten zeer hoog (meer dan € 100.000 voor de ene woning met een mogelijke overschrijding), en zijn maatregelen niet doelmatig gezien de beperkte en incidentele overschrijdingen.

5.5. MAATREGELLEN AAN DE GEBOUWEN

Tenslotte zijn ook maatregelen aan de bebouwing mogelijk. Die maatregelen variëren van het toepassen van een zwaardere fundering (zwaardere paalfundering met langere en dikkere palen, of een dikke plaatfundering), zwaarder construeren (dikkere wanden, prefab beton in plaats van kalkzandsteen en metselwerk) tot het ontkoppelen van de fundering door middel van rubber oplegblokken. Het effect en de kosten van de mogelijke maatregelen aan het gebouw zijn weergegeven in Tabel 6. Maatregelen die niet passen binnen de grenzen van het Bestemmingsplan, zoals het vergroten van de bouwvolumes, zijn hierbij niet beschouwd.

³ Totale investeringskosten, incl. BTW. Kosten zijn exclusief kosten voor grondverwerving, verleggen van kabels en leidingen en kosten voor een vergunningsprocedure. De werkelijke kosten van maatregelen zullen hoger uitvallen.



Tabel 6 Mogelijke maatregelen aan de gebouwen, effect op trillingen en kosten

Maatregel	Effect	Kosten ⁴
Dikkere wanden	5 – 15%	< 4% SK
Breedplaatvloeren i.p.v. kanaalplaatvloeren	10 – 20%	< 2% SK
Dempende materialen (bijv. meer hout, metselwerk)	0 – 5%	< 2% SK
Ontkoppelen vloeren (rubberen oplegging)	10 – 30%	1 – 4% SK
Ontkoppelen fundering (afveren met rubber of stalen veren)	60 – 90%	4 – 8% SK
Inpakken fundering met rubber	15 – 30%	3 – 5% SK
Afschermen fundering met EPS (minimaal 500 mm dik)	20 – 40%	< 2% SK
Zwaardere fundering (dikkere, langere palen of betonnen plaat)	5 – 25%	3 – 6% SK

Er zijn meerdere maatregelen die effect hebben, maar voor een waarneembaar effect (minimaal 30 procent reductie van de trillingen) is alleen het afveren van de fundering afdoende (toepassen van stalen veerdozen of rubberen oplegblokken (met maximale eigenfrequentie van 9 Hz) op de paalkoppen, ingekast in de funderingsbalken, zie bijlage IV voor een voorbeeld). Deze maatregel kost tussen de € 12.000 en € 25.000 per woning, maar dient bij beide woningen te worden toegepast. Afgezet tegen de enige woning met mogelijke overschrijdingen, komt dit neer op € 24.000 tot € 50.000 meerkosten voor deze woning. Andere maatregelen hebben wel enig effect, maar er is een combinatie van meerdere maatregelen nodig om een merkbaar effect te realiseren.

5.6. AFWEGING VAN MAATREGELEN

In de woning die het dichtst bij het spoor is gelegen, zijn, afhankelijk van de constructieve uitwerking, incidentele overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder voor nieuwe situaties niet uit te sluiten. Het gaat om minder dan 1 overschrijding per dag, in de late avonduren (tussen 23:00 uur en 1:00 uur) of in de vroege ochtenduren (tussen 6:00 en 7:00 uur).

Gezien de overschrijdingen is op basis van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn een maatregelafweging uitgevoerd. Hieruit volgt dat maatregelen aan het spoor of in de bodem niet doelmatig zijn, gezien de zeer hoge kosten. Met optimalisaties aan de constructie van de woningen zijn de trillingen wel te verminderen, en is te voldoen aan de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn.

Om te voldoen aan de streefwaarden, gelden de volgende adviezen:

1. Vermijd de volgende bouwconcepten:
 - a. Houtskeletbouw.
 - b. Vloeren met een eigenfrequentie boven 15 Hz. Bij de huidige beukmaten betekent dit een vloerdikte boven de 220 mm.
 - c. Fundering op staal.

⁴ SK = Stichtingskosten



d. Fundering op palen met een paallengte kleiner dan 7 meter.

Als die bouwconcepten worden vermeden, dan worden er geen overschrijdingen van het beoordelingskader verwacht, en zijn maatregelen niet nodig.

2. Als toch gebruik wordt gemaakt van een van de genoemde bouwconcepten, dan zijn dit de meest kosteneffectieve maatregelen waarmee kan worden voldaan aan het beoordelingskader:
 - a. Bij houtskeletbouw: verzwaren van de fundering (zie hieronder, bij (c) en (d)).
 - b. Bij vloeren met een eigenfrequentie boven de 15 Hz: dunnere vloeren toepassen.
 - c. Bij fundering op staal: inpakken van de fundering met minimaal 500 mm dik EPS (moet ca. 500 mm dieper dan onderzijde funderingsbalken). Deze maatregel is echter veel minder effectief bij een paalfundering, dan komen de trillingen via de paalfundering alsnog naar binnen, anders is het effect 20 tot 40 procent.
 - d. Bij korte paalfundering: verzwaren van de fundering, door toepassen van langere palen (minimaal 7 meter paallengte, minimaal 250 x 250 mm) of toepassen van een dikke plaatfundering (minimaal 500 mm dik). Effect is 5 tot 25 procent.
3. Meest robuust en toekomstvast is het toepassen van trillingsisolatie (stalen veerdozen of rubberen oplegblokken tussen een paalkoppen en funderingsbalken, afgeveerd op maximaal 9 Hz). Dit is een zeer effectieve maatregel, waarmee de trillingen lager zijn dan de streefwaarden, maar de kosten van deze maatregel zijn met € 24.000 tot € 50.000 voor het hele plan erg hoog.

Tenslotte, omdat het gaat om een situatie met *matige hinder*, zijn maatregelen niet noodzakelijk, maar dienen deze te worden afgewogen op hoe doelmatig deze zijn. In deze afweging kunnen, naast de kosten en impact op het realisatieproces, de volgende trillingsaspecten worden meegewogen:

- » Het gaat om een beperkt aantal overschrijdingen (minder dan 1 per dag, en alleen in de woning die het dichtst bij het spoor ligt). In de andere woning is geen sprake van overschrijdingen.
- » De trillingen voldoen weliswaar niet aan de strenge streefwaarden voor nieuwbouw uit de SBR B-richtlijn, maar wel aan de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties uit de SBR B-richtlijn. In die soepeler streefwaarden voor bestaande situaties is een zekere mate van gewenning meegenomen.
- » De woningen worden gerealiseerd in een zone dichtbij het spoor, waar nu ook al bebouwing is gerealiseerd (zie bebouwing aan zuidzijde van het spoor, deze ligt op dezelfde afstand tot het spoor). Het gaat bovendien om oude, meer trillingsgevoelige bebouwing, waar de trillingen hoger zullen zijn dan in de nieuwe woningen. Ook zonder maatregelen tegen trillingen kan worden beargumenteerd dat er in de geplande bebouwing daarom geen onacceptabele situatie ontstaat: de trillingen zijn immers lager dan in andere, al bestaande bebouwing rond deze locatie.

5.7. ONZEKERHEDEN IN HET ONDERZOEK

De berekeningen kennen een aantal onzekerheden, hiervoor geldt het volgende:

- » Ten aanzien van de trillingsbron: de natuurlijke variatie als gevolg van spooronderhoud en de temperatuur kunnen zorgen voor zo'n 30% variatie in de trillingen, afhankelijk van de spoorconstructie en de bodemopbouw. Er is gemeten in een klimatologisch als normaal te typeren periode. Er is geen informatie bekend over de huidige status van de spoorligging. Met name rond een spoorwegovergang kan de spoorligging flink variëren, hoewel deze variatie bij



uitsluitend door reizigerstreinen gebruikte spoorwegen vaak lager is. Deze variatie in spoorligging rond de overweg kan betekenen dat de trillingen zowel hoger als lager kunnen zijn dan weergegeven in dit onderzoek. Op basis van de meetresultaten is er echter geen directe aanleiding om te verwachten dat de trillingen in de toekomst veel hoger zullen zijn dan berekend. Door te meten op meerdere punten hebben we variaties waar mogelijk meegenomen in de analyse en berekeningen.

- ▶ Ten aanzien van de bodem geldt dat met name op korte afstand tot het spoor variaties in de trillingen mogelijk zijn door lokale variaties in de bodem. Door op meerdere punten te meten is de invloed van deze variaties meegenomen in de berekeningen. Bovendien is op diverse afstanden van het spoor gemeten. De invloed van de onzekerheid in de bodem is daarmee meegenomen in de analyse, de impact op de resultaten is daardoor beperkt.
- ▶ Ten aanzien van de gebouwen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en definitief ontwerp). Bovendien is het dynamische gedrag van bijvoorbeeld beton afhankelijk van de mate van gescheurdheid van het beton en zijn er natuurlijke variaties in materiaalgedrag (van bijvoorbeeld hout, metselwerk en beton). In de berekeningen is gerekend met een verwachtingswaarde van de trillingen op basis van een aan de hand van praktijkmetingen geïkt rekenmodel. Hiermee wordt een resultaat verkregen dat representatief is voor de toekomstige situatie.

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

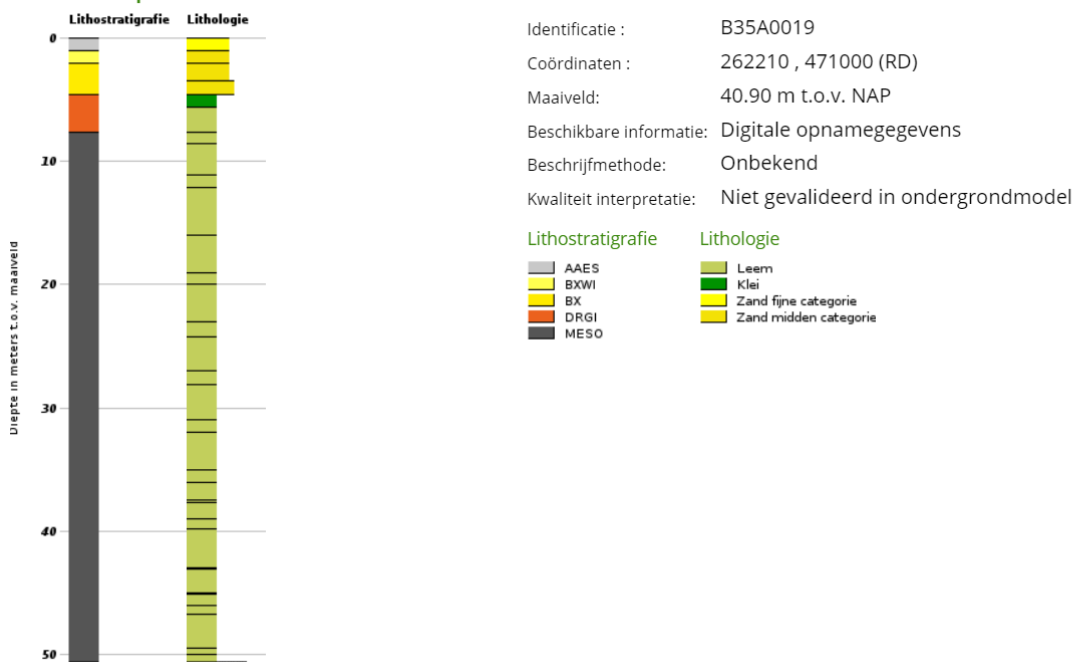


GRONDONDERZOEK

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 is weergegeven in Figuur 13. In deze boring is de bodem bovenin opgebouwd uit zand, en daaronder komen vooral leemlagen voor. De dikte en diepte van de zandlaag varieert.

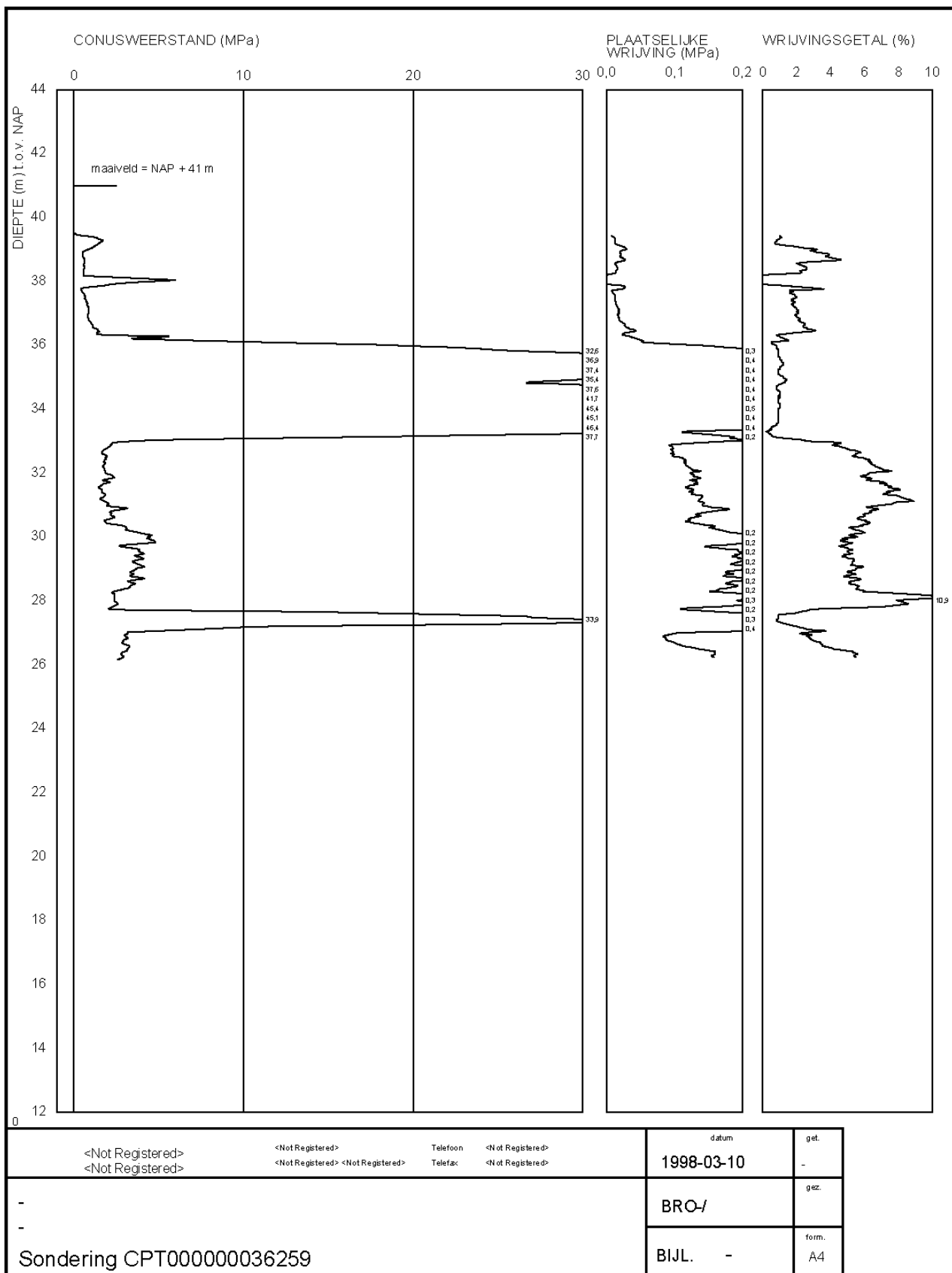
Boormonsterprofiel



Figuur 10 Boring in het onderzoeksgebied

Een representatieve sondering uit de nabijheid van het onderzoeksgebied, waarin onder meer de conusweerstand te zien is, is weergegeven in Figuur 13. Hier is te zien dat de zandlaag juist wat dieper ligt (ca. 5 meter onder maaiveld), en dat daarboven en daaronder leemlagen voorkomen.





Figuur 11 Sondering nabij het onderzoeksgebied

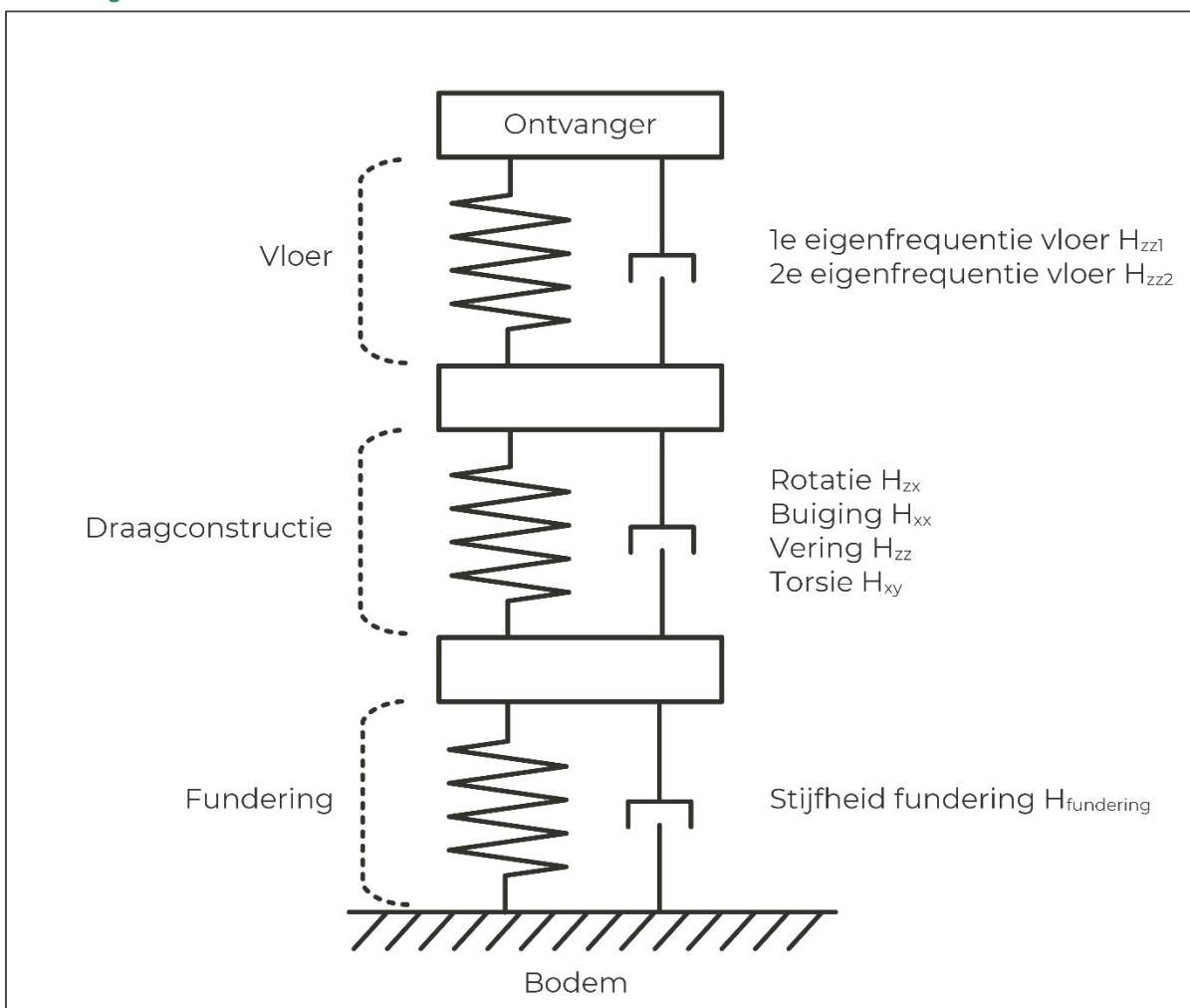


REKENMODEL

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. Dit model is gekalibreerd met meer dan 600 praktijkmetingen, met behulp van een slim algoritme. Door die combinatie van een slim algoritme en een grote hoeveelheid praktijkdata, verkrijgen we een nauwkeurigheid die doorgaans significant beter is dan een Eindige Elementenmodel, omdat de resultaten 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 14. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 14, worden in deze bijlage nader toegelicht. Afhankelijk van de constructie van het gebouw wordt de draagconstructie als één (lage bebouwing, starre bebouwing), of als meerdere elementen (hoge bebouwing, slappere bebouwing) gemodelleerd.

Buildyn



Figuur 12 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) en afmetingen daarvan
- Afmetingen en gewicht van het gebouw
- Bodem waarop het gebouw staat

Vooraf boven de 10 Hz worden trillingen uitgedempt door de fundering, bij slappe bodems en grote gebouwen kan ook al bij lagere frequenties demping optreden.

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. Bij hogere of slappere gebouwen speelt ook doorbuiging en torsie (rotatie om een verticale as in het gebouw) een rol.

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

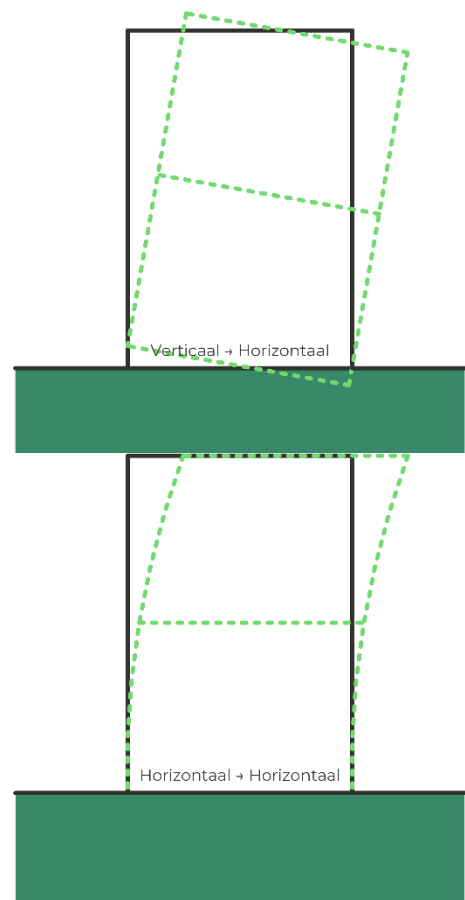
Dit effect noemen we H_{zx} , en is afhankelijk van:

- Afmetingen van het gebouw (breedte, lengte, hoogte)
- Gewicht van het gebouw
- Type en gewicht van de fundering
- Stijfheid van de ondergrond

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

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

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

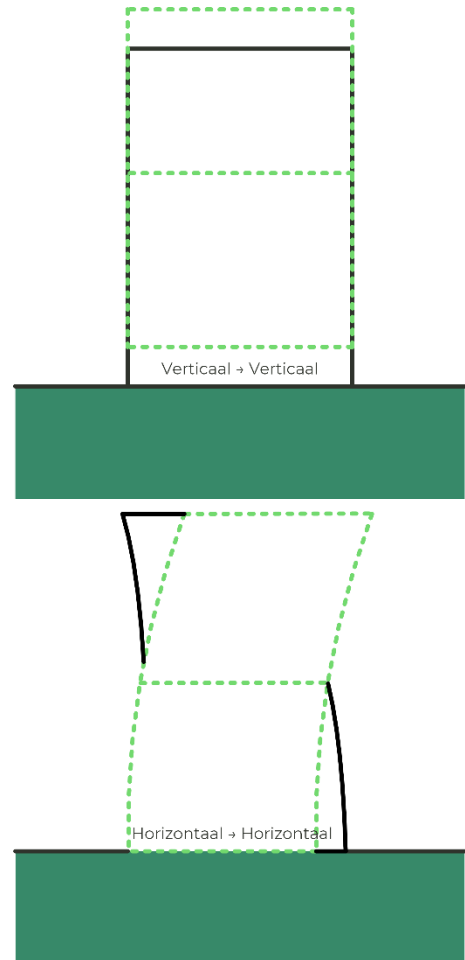


Het derde principe, dat van vering van het gebouw op zijn fundatie, is rechts weergegeven. Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappe onderlaag of lokaal slappere elementen (denk aan kolommen en balkenstructuren). Dit effect noemen we H_{zz} , en is afhankelijk van:

- Hoogte van het gebouw
- Constructietype (stijfheid, starheid van verbindingen, open ruimtes)

Het vierde principe, dat van torsie van het gebouw, is rechts weergegeven. Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappere constructie. Dit effect noemen we H_{xy} , en is afhankelijk van:

- Hoogte van het gebouw
- Constructietype (stijfheid, starheid van verbindingen, open ruimtes)
- Afmetingen van het gebouw (symmetrie)



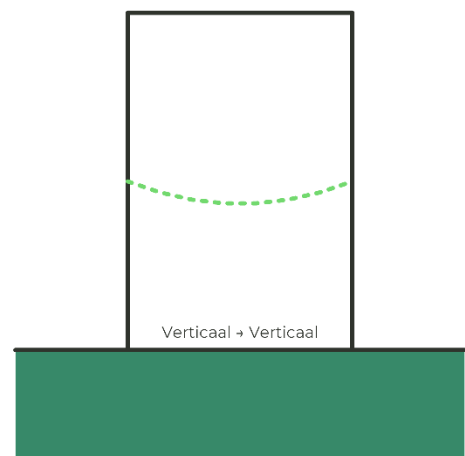
VLOEREN

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:

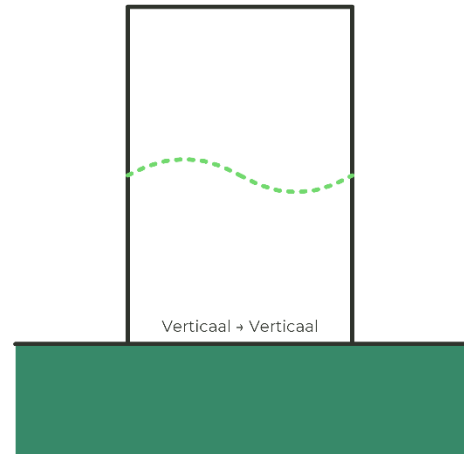
- Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- Afmetingen van de vloer
- Type oplegging



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

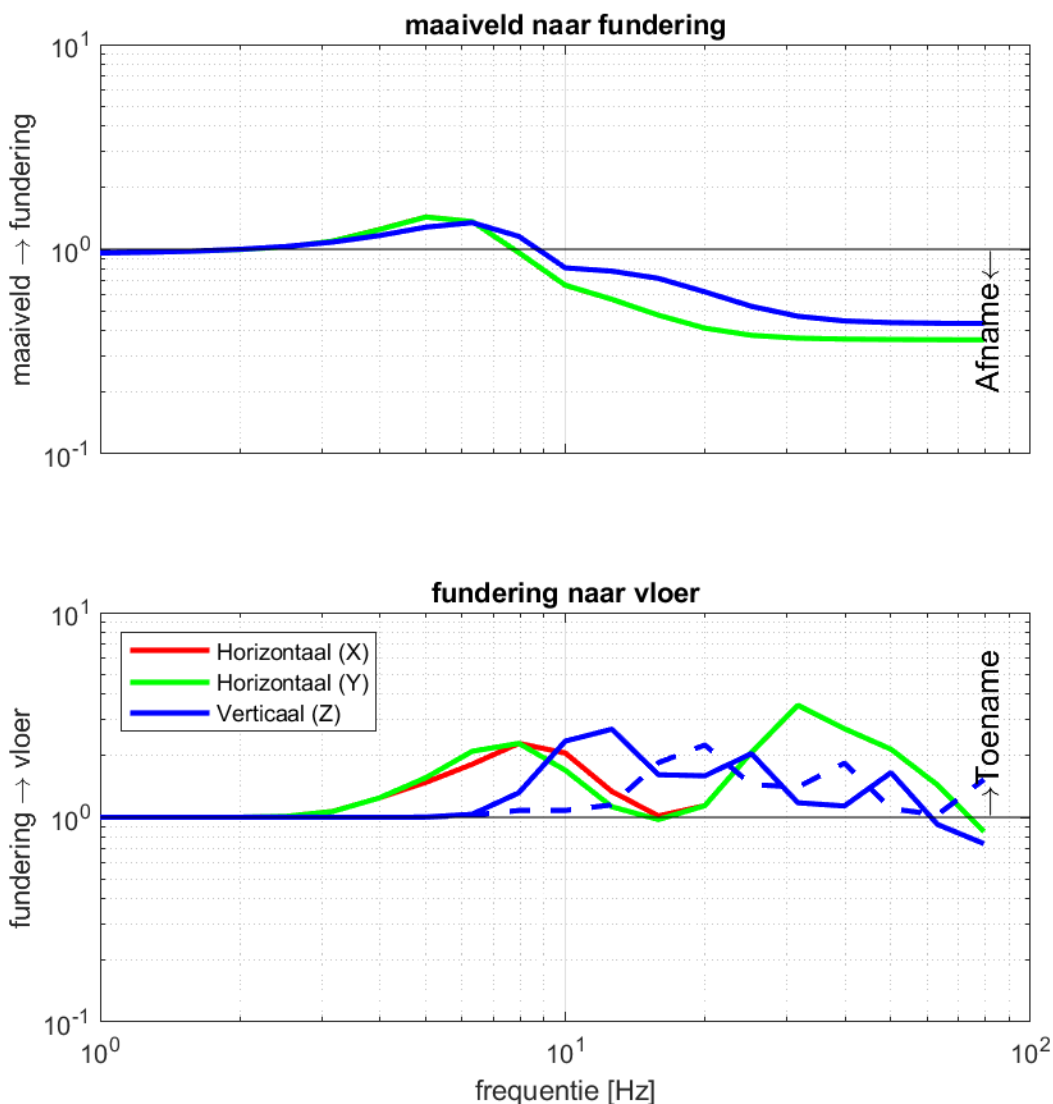
Dit effect noemen we H_{zz2} , en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1} .

Uiteindelijk zorgen alle gebouwbevingen 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

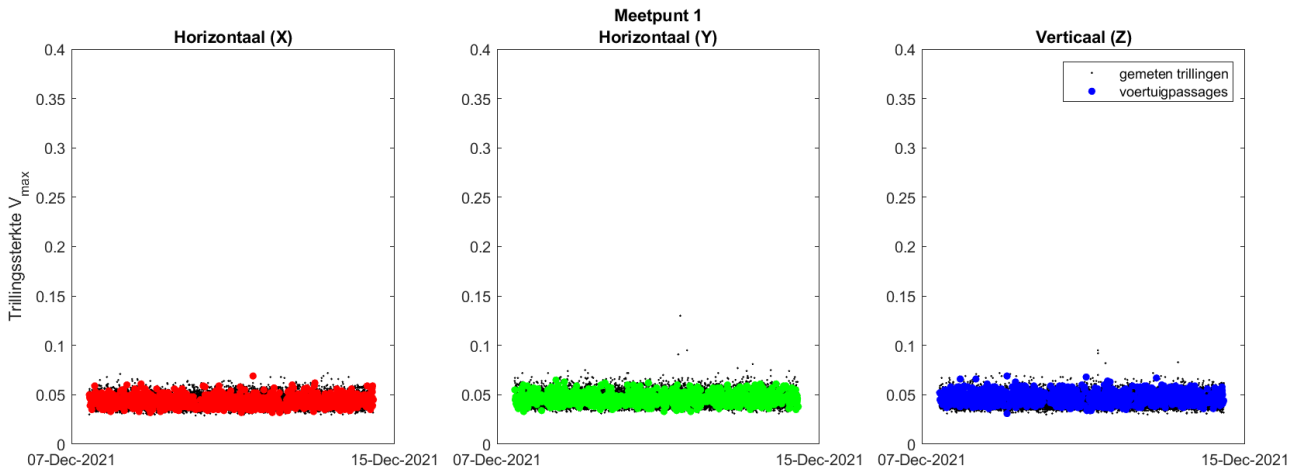
Ter illustratie zijn de resultaten uit de Buildyn-berekeningen voor het referentie-ontwerp is weergegeven in Figuur 16.



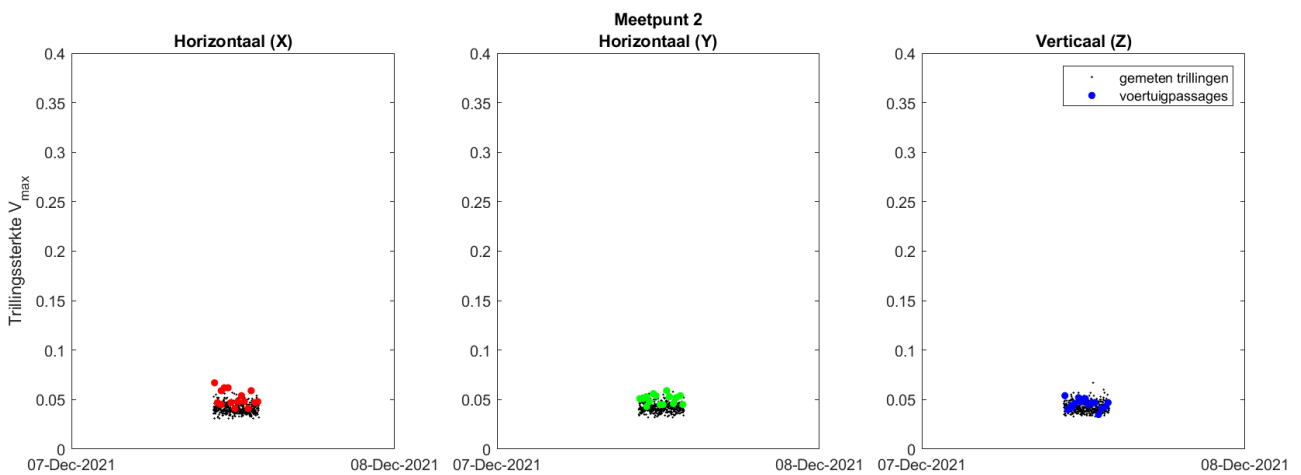
Figuur 13 Buildyn-resultaten voor woning conform referentie-ontwerp. Doorgaande lijn verticaal is midden vloer, onderbroken lijn is op $\frac{1}{4}$ en $\frac{3}{4}$ van overspanning

RESULTATEN METINGEN

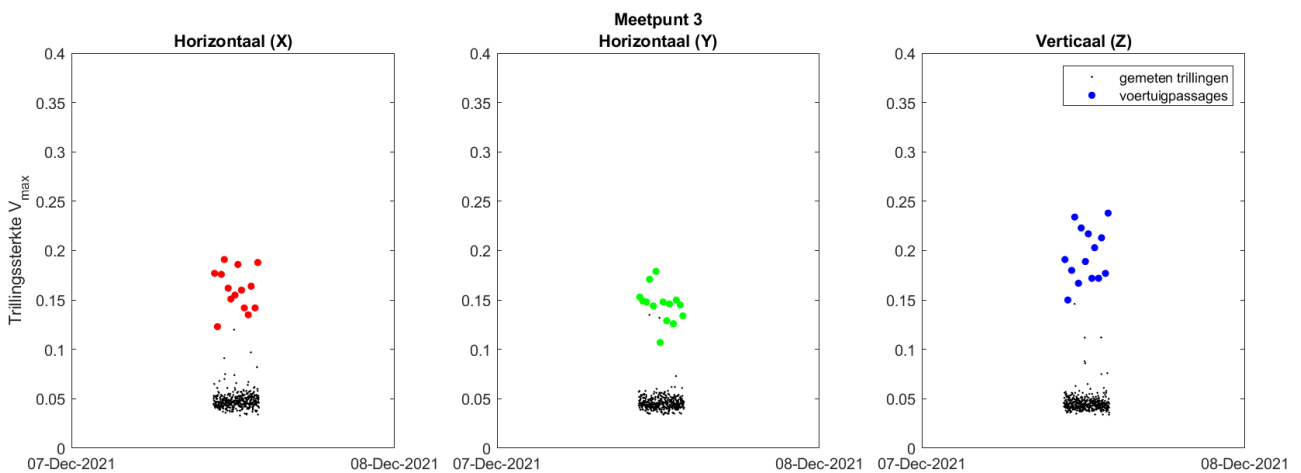
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



Figuur 14 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (fundering Zwarteweg 130)

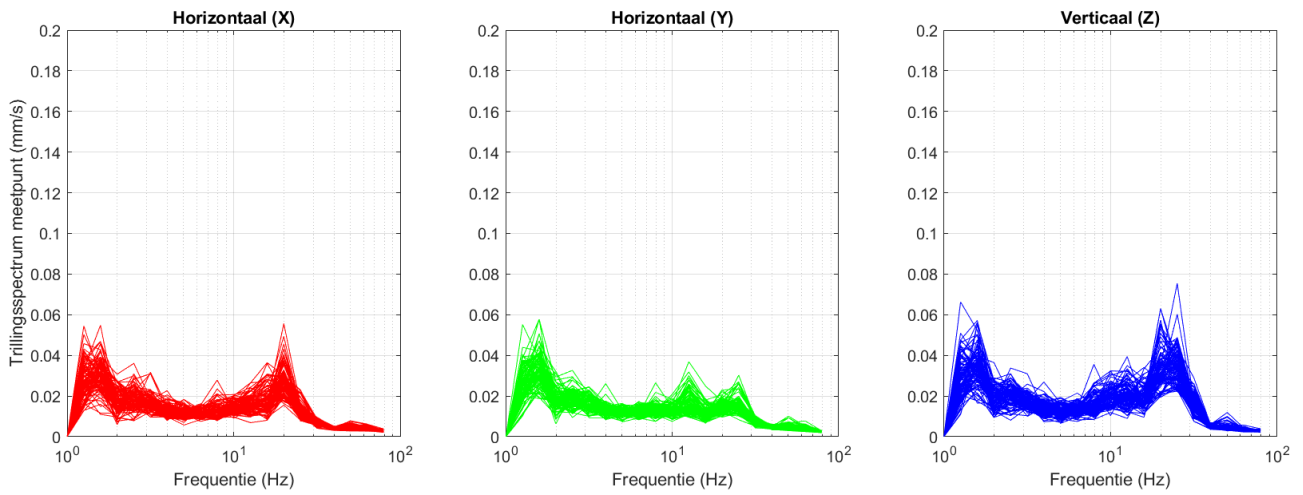


Figuur 15 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (maaiveld, nabij fundering Zwarteweg 130)

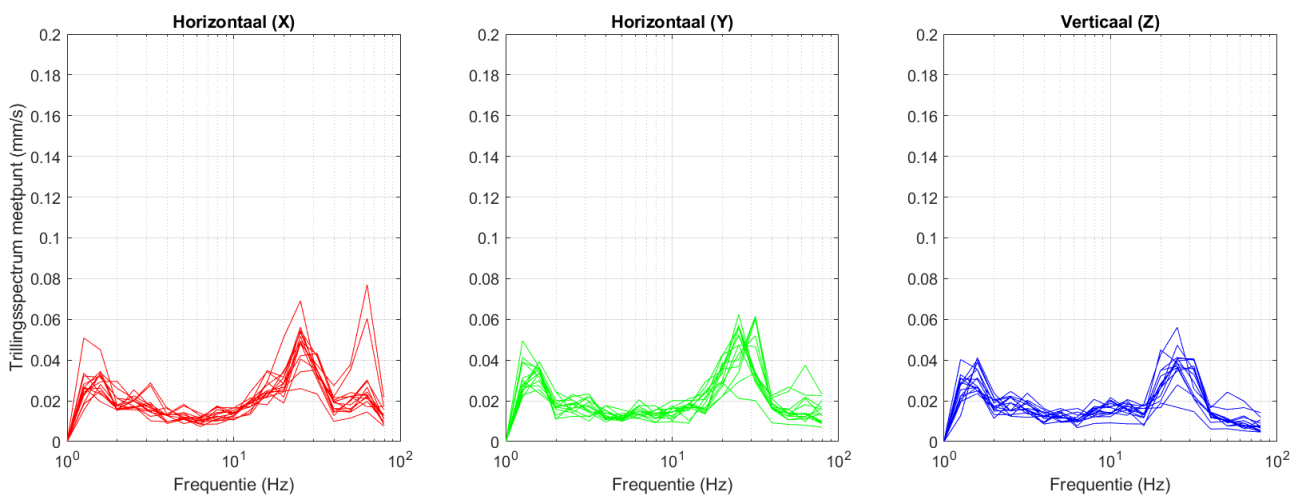


Figuur 16 Gemeten trillingen bij meetpunt 3 (maaiveld, dichtbij spoorwegovergang)

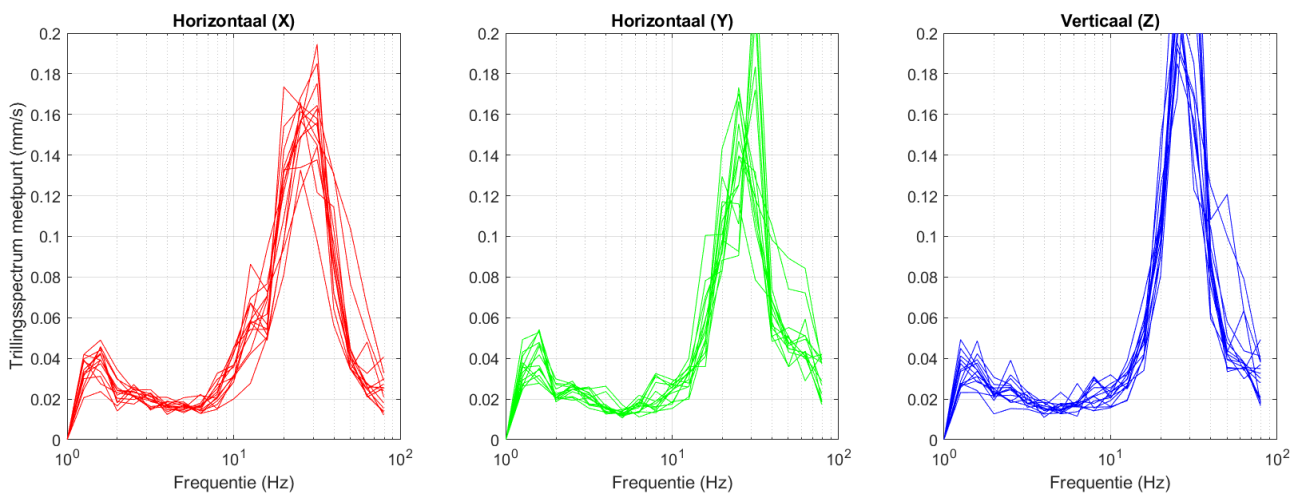




Figuur 17 Tertsbandspectra bij meetpunt 1



Figuur 18 Tertsbandspectra bij meetpunt 2



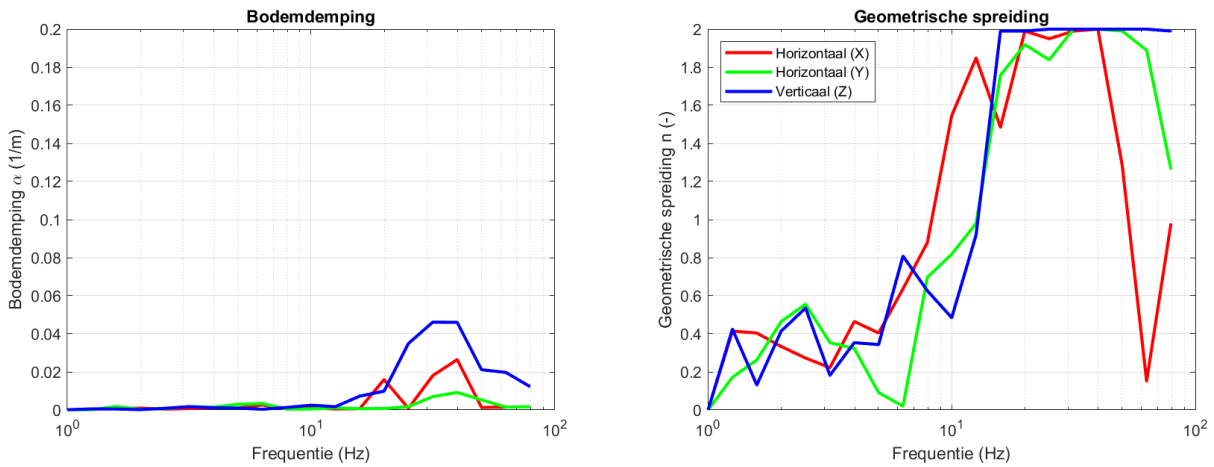
Figuur 19 Tertsbandspectra bij meetpunt 3

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

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

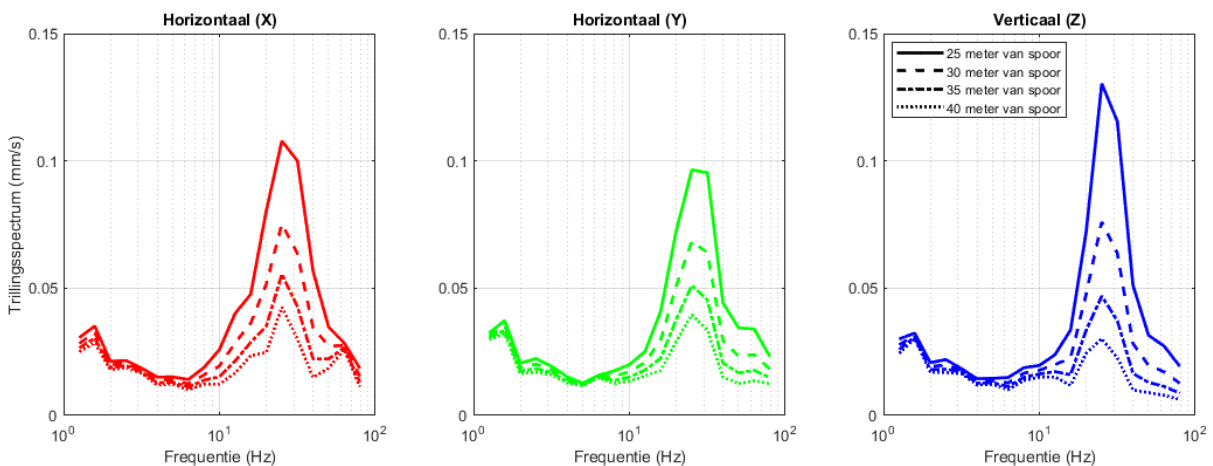


In deze vergelijking staat V voor de trillingsnelheid, f voor de frequentie, r voor de afstand tot de trillingsbron, r_0 voor de referentieafstand (hier 20 m), n voor de geometrische spreidingsfactor en α voor de bodemdemping. De geometrische spreiding en bodemdemping zijn weergegeven in Figuur 20.



Figuur 20 Bodemdemping α (links) en geometrische spreiding n (rechts) als functie van de frequentie

De gemiddelde trillingspectra op 25, 30, 35 en 40 meter van het spoor zijn weergegeven in Figuur 21. Hier is te zien dat de trillingen snel uitdempen met de afstand.



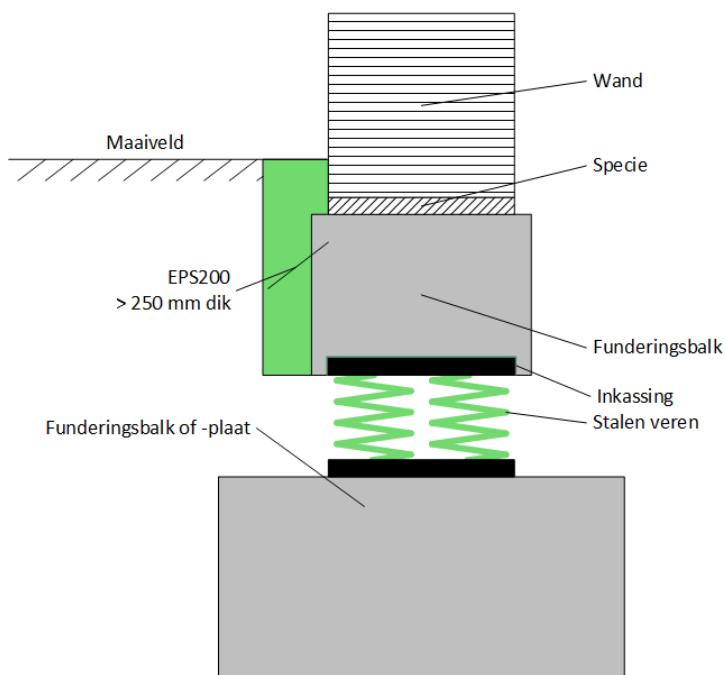
Figuur 21 Gemiddelde trillingspectra op 25, 30, 35 en 40 meter van het spoor



DETAILS MAATREGELLEN

Deze bijlage bevat achtergrondinformatie en principedetails van de voorgestelde maatregelen.

Een principeschets van een afgeveerde fundering met stalen veerdozen is weergegeven in Figuur 26. Een foto van een concrete toepassing bij eengezinswoningen in Prinsenbeek is weergegeven in Figuur 27 (fundering op staal, bij fundering op palen worden de stalen veerdozen vaak aangebracht op de paalkoppen en in een inkassing in de funderingsbalken). Belangrijk is ook om contact tussen het boven de veren gelegen gedeelte van de fundering en de omliggende grond te voorkomen, vaak wordt dit opgelost met EPS (piepschuim) of een luchtsponw (bijv. door een prefab L-wand op afstand van de fundering te plaatsen).



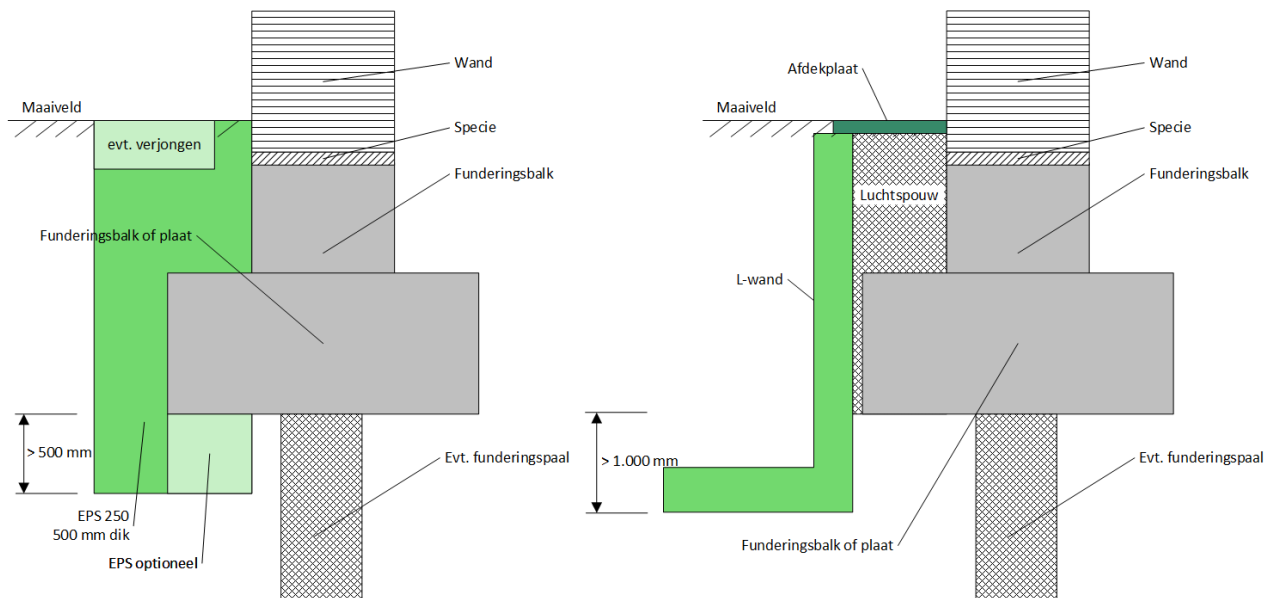
Figuur 22 Principeschets afgeveerde fundering (hier met stalen veerdozen)



Figuur 23 Dubbele fundering met stalen veerdozen (project in Prinsenbeek)



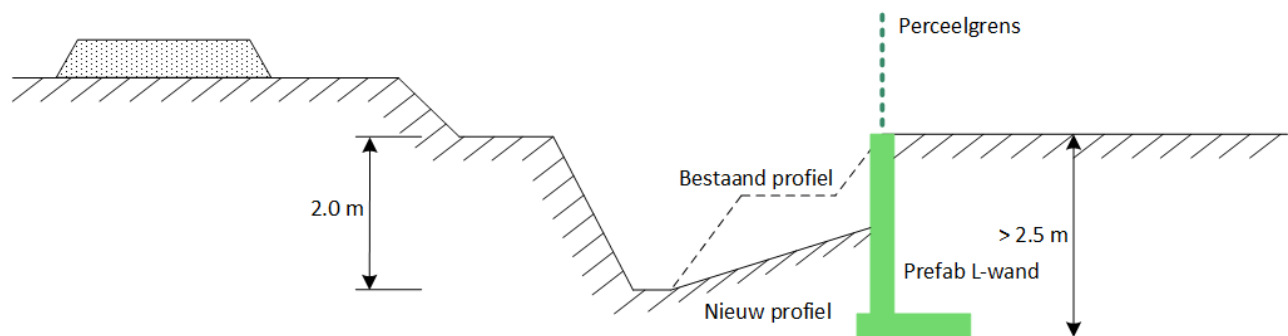
Een principeschets van het bekleden van de fundering met EPS (piepschuim) is weergegeven in Figuur 28. De EPS-kwaliteit dient wat zwaarder te zijn dan standaard i.v.m. de gronddruk. De minimaal benodigde dikte voor voldoende reductie is zo'n 500 mm, om opdrijven te voorkomen moet dit verankerd worden aan de fundering. Een principeschets is weergegeven in Figuur 28. Bij maaiveld kan eventueel iets verjongd worden. Afdekken met een dunne zandlaag (max. 100 mm) en tegels is mogelijk. De onderzijde van het EPS moet in ieder geval 500 mm lager liggen dan de onderzijde van de funderingsbalk of plaat om effectief te zijn, bij een paalfundering is de effectiviteit lager omdat een deel van de trillingen via de palen het gebouw ingaat.



Figuur 24 Fundering met EPS-scherm ervoor (links) en fundering met L-wand ervoor (rechts)

Een principeschets van het plaatsen van een L-wand direct voor de fundering is rechts weergegeven in Figuur 28. Belangrijk hierbij is dat een luchtspouw nodig is (geen contact tussen L-wand en fundering), en dat deze dient te worden afgedekt met een afdekplaat. De L-wand moet in ieder geval minimaal 1.000 mm lager liggen dan de onderzijde van de funderingsbalk of plaat om effectief te zijn, bij een paalfundering is de effectiviteit lager omdat een deel van de trillingen via de palen het gebouw ingaat.

Principe-oplossingen voor het combineren van de sloot met een prefab L-wand zijn weergegeven in Figuur 25. Door de L-wand dieper te plaatsen ontstaat 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 25 Sloot gecombineerd met prefab L-wand

