

HET SPAANSE LEGER

Trillingsonderzoek



WBD1915

ir. P.M. Boon
5 februari 2020
versie 1.0

Managementsamenvatting

De Bunte Vastgoed Oost B.V. en Lithos Projectontwikkeling VOF realiseren grondgebonden woningen en appartementen in het Spaanse Leger in Nijkerk, een gebied dat omgrensd wordt door de Amersfoortseweg, de Barneveldseweg en de spoorlijn Amersfoort – Zwolle. Gezien de korte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet *op voorhand* worden uitgesloten. Doel van het voorliggende onderzoek is daarom om vast te stellen of er sprake zal zijn van trillingshinder in de geplande bebouwing, en zo ja, met welke maatregelen deze hinder is te voorkomen.

De belangrijkste bevinding van dit onderzoek is dat in maximaal 50 woningen overschrijdingen mogelijk zijn van de streefwaarden voor trillingshinder voor *nieuwe* situaties. In maximaal 5 van deze woningen zijn overschrijdingen mogelijk van de streefwaarden voor *bestaande* situaties (soepeler streefwaarden, waarin een zeker gewenningseffect is meegenomen). In deze maximaal 5 woningen is sprake van maximaal 10 overschrijdingen per dag, in de overige maximaal 45 woningen is sprake van incidentele overschrijdingen (minder dan 1 per dag). Deze overschrijdingen zullen in de toekomst afnemen door een afname van het aantal goederentreinen (van 10 tot 12 nu naar 2 tot 4 per dag in 2030).

Op afstanden groter dan 48 meter voldoen de trillingen aan de streefwaarden voor nieuwbouw voor alle onderzochte constructietypes. Op afstanden groter dan 22 meter voldoen de trillingen aan de streefwaarden voor bestaande bouw. Deze afstanden zijn enkele meters kleiner voor grote beukmaten (6.0 en 6.6 m).

Omdat de trillingen niet voldoen aan het beoordelingskader, adviseren wij om voor de woningen binnen de 48 metergrens van het spoor maatregelen of ontwerpoptimalisaties af te wegen. Hierbij geldt het volgende:

1. Maatregelen aan het spoor of de treinen zijn in het kader van dit onderzoek niet nader beschouwd. Deze vallen buiten de planologische grenzen van het onderzoeksgebied en zijn doorgaans zeer kostbaar.
2. Maatregelen in de bodem (zoals trillingsschermen) hebben hoge kosten (enkele miljoenen euro's voor het hele plangebied), zijn ruimtetechnisch lastig inpasbaar en niet of nauwelijks aanpasbaar in de toekomst bij wijzigingen aan het spoor. Wel adviseren wij om te onderzoeken of de te realiseren geluidsmaatregel (geluidswal) is te combineren met een trillingsscherm, bijvoorbeeld in de vorm van ingegraven hoge prefab L-wanden met een greppel aan een zijde. Met deze maatregel zijn de trillingen met maximaal 35% te reduceren.
3. Voor maatregelen aan de gebouwen adviseren wij het volgende:
 - a. Onderzoek of het mogelijk is om een deel van de woningen iets verder van het spoor vandaan te situeren. Voor de meest dichtbij gelegen woningen zorgt een toename van de afstand tot het spoor van 2 meter al voor een afname van de trillingen met 10 procent.
 - b. Weeg de mogelijkheid af om meer dempende materialen toe te passen in de woningen binnen de 48 metergrens. Denk hierbij aan het vervangen van

kanaalplaat- door breedplaatvloeren of het gebruiken van meer hout in de constructie. Met deze maatregelen is maximaal 25% reductie te behalen.

- c. Als geen van de eerder genoemde maatregelen mogelijk is, is ook het inpakken van de fundering van een deel van de bouwblokken (bij voorkeur met aan de funderingsbalken vastgemaakte EPS-blokken om opdrijven te voorkomen) te overwegen. Deze maatregel heeft een maximaal effect van 25%.

De contourafstanden voor de situaties met deze maatregelen zijn weergegeven in onderstaand overzicht. Bij de verdere uitwerking van het plan kunnen maatregelen met behulp van deze tabel worden afgewogen.

Beukmaat	Geen		Geluidsscherm maaiveld		Geluidsscherm 0.5 m diep		Geluidsscherm 1.0 m diep		Geluidsscherm 0.5 m diep en greppel		Geluidsscherm 1.0 m diep en greppel		Dempende materialen		EPS tegen fundering	
	48	22	48	22	43	19	38	16	39	16	30	12	38	16	36	15
Beukmaat 4.8 m	48	22	48	22	43	19	38	16	39	16	30	12	38	16	36	15
Beukmaat 5.4 m	45	20	45	20	40	17	35	14	36	14	27	10	35	14	33	13
Beukmaat 6.0 m	44	19	44	19	39	16	33	13	34	13	25	9	33	13	31	12
Beukmaat 6.6 m	45	19	45	19	40	16	34	13	35	13	26	9	34	13	32	12

Met bovenstaande maatregelen is het mogelijk om in ieder geval te voldoen aan de streefwaarden voor een bestaande situatie uit de SBR B-richtlijn, en blijven er slechts enkele woningen met alleen incidentele overschrijdingen over.

Naar aanleiding van bovenstaande aanbevelingen is het stedenbouwkundig plan van het Spaanse Leger aangepast. Zo is een deel van de bebouwing opgeschoven naar een afstand verder van het spoor vandaan (ook verder van het spoor dan de bestaande bebouwing), er is deels gekozen voor andere bebouwing (grotere beukmaat waardoor minder gevoelig voor trillingen) en er is een geluidsscherm dichtbij het spoor voorzien dat deels ingegraven wordt aangebracht, waardoor dit de trillingen reduceert. Deze aanpassingen zorgen voor een afname van de trillingen. Met de aanpassingen van het stedenbouwkundig plan wordt voldaan aan de streefwaarden voor een bestaande situatie uit de SBR B-richtlijn, en blijven er alleen woningen met alleen incidentele overschrijdingen over. Bij de verdere detaillering van het plan adviseren wij wel om de mogelijkheden te onderzoeken om meer dempende materialen toe te passen in de constructies van woningen binnen 40 meter van het spoor.

Gezien het incidentele aantal overschrijdingen (vrijwel overal minder dan 1 per dag, neemt in de toekomst af door afname van het aantal goederentreinen) en het feit dat wel voldaan wordt aan de streefwaarden voor een bestaande situatie, ontstaat in het licht van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn geen onacceptabele situatie.

Volledig voldoen aan het beoordelingskader is alleen mogelijk tegen zeer hoge investeringen, door de woonblokken met overschrijdingen uit te voeren met een dubbele, op stalen veren afgeveerde fundering.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
1.1	Aanleiding	5
1.2	Doel	5
1.3	Leeswijzer	5
2	Situatie en uitgangspunten	7
2.1	Situatie.....	7
2.2	Uitgangspunten	8
3	Beoordelingskader	10
3.1	Beoordelingskader.....	10
3.2	Rekenmethode	11
4	Verwachte trillingen in de woningen	14
4.1	Meetresultaten.....	14
4.2	Trillingen in geplande nieuwbouw	15
4.3	Maatregelen	17
4.4	Aanpassingen in stedenbouwkundig plan.....	21
4.5	Onzekerheden in het onderzoek	23
5	Conclusies en aanbevelingen	25
5.1	Conclusies	25
5.2	Aanbevelingen	25
5.3	Aanpassingen in stedenbouwkundig plan.....	26
I	Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek	28
II	Bijlage Rekenmodel Buildyn	29
	Fundering	30
	Draagconstructie	30
	Vloeren	31
	Resultaten	31
III	Resultaten metingen	34
IV	Principedetails maatregelen	38

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De Bunte Vastgoed Oost B.V. en Lithos Projectontwikkeling VOF realiseren grondgebonden woningen en appartementen in het Spaanse Leger in Nijkerk, een gebied dat omgrensd wordt door de Amersfoortseweg, de Barneveldseweg en de spoorlijn Amersfoort – Zwolle, zie Figuur 1. Gezien de korte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet *op voorhand* worden uitgesloten.



Figuur 1 Plangebied Het Spaanse Leger met bestaande bebouwing

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 woningen op basis van de gemeten trillingen en de eigenschappen van de gebouwen. Het resultaat van deze stap wordt in hoofdstuk 4 beschreven. In hoofdstuk 5 geven we de conclusies en aanbevelingen.

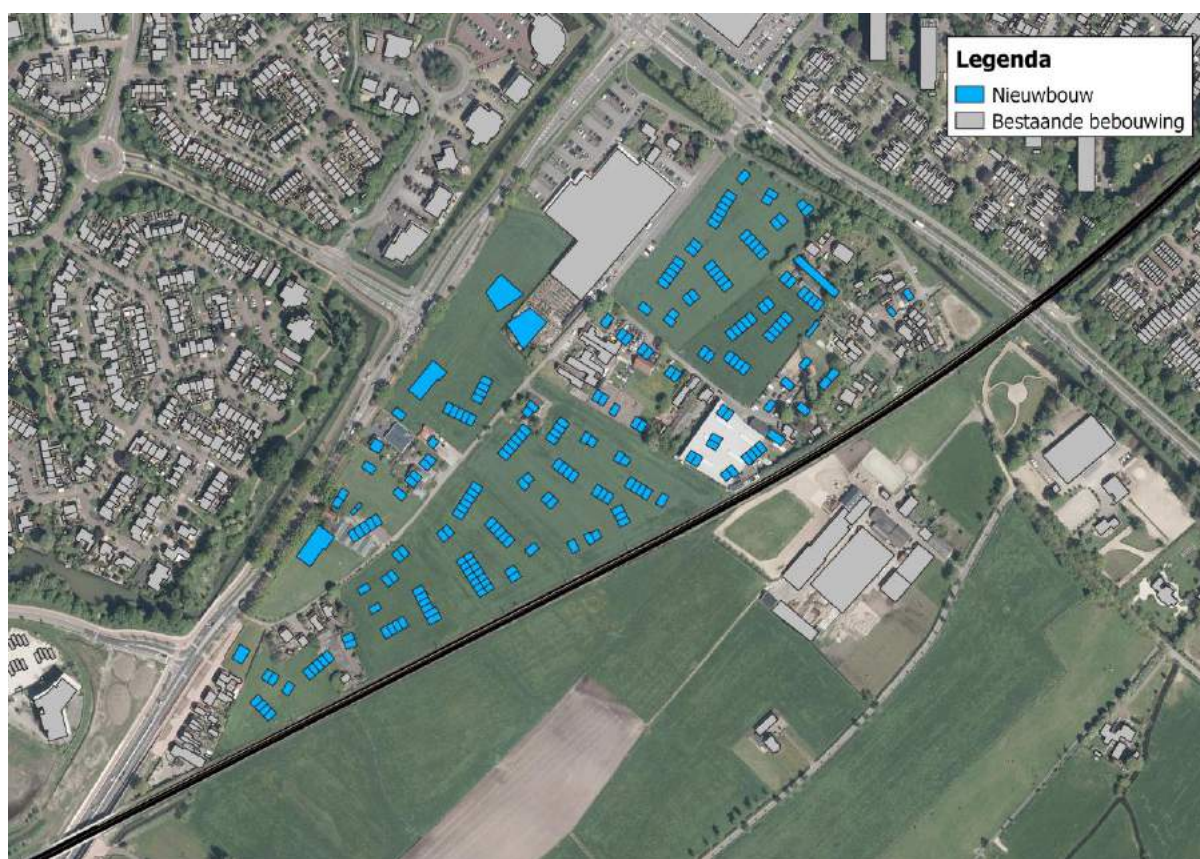
De bijlages bevatten technische informatie van het onderzoek, zoals een toelichting op de rekenmethodiek en grondonderzoek van nabijgelegen locaties.

2 Situatie en uitgangspunten

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

2.1 Situatie

De planlocatie bestaat op dit moment uit een gebied met bebouwing met verschillende functies, zoals wonen en industrie. In de plansituatie wordt een deel van de bestaande bebouwing gesloopt, in het plangebied wordt vervolgens een woonwijk gerealiseerd, zie Figuur 2.



Figuur 2 Bestaande en toekomstige bebouwing

Het plangebied bevindt zich op een afstand van ca. 10 tot 300 meter van het spoor. De rijsnelheid van het treinverkeer en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. Deze gegevens zijn gebaseerd op gegevens uit het Geluidsregister Spoor. Volgens de NMCA spoor 2030-2040 (voortuitblik voor goederenvervoer) zal het goederenvervoer op deze lijn wel afnemen naar van de huidige 10 tot 12 goederentreinen per dag naar 2 tot 4 goederentreinen per dag. Er wordt geen verandering in het aantal reizigerstreinen voorzien.

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

Type trein	Rijksnelheid	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Sprinter	100-130 km/h	2.00	2.00	0.50
Intercity	140 km/h	2.00	2.00	0.50
Goederentrein	90 km/h	0.16	0.27	0.32

Andere trillingsbronnen, zoals lokaal verkeer, kunnen ook voor trillingen zorgen. Bij een relatief vlakke wegoopbouw zijn deze trillingen echter beperkt. In het plangebied zal voornamelijk sprake zijn van bestemmingsverkeer (doorgaans licht wegverkeer), wat lage trillingen veroorzaakt.

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 deel van de bestaande bebouwing gesloopt, een deel blijft gehandhaafd en daarnaast worden zowel grondgebonden woningen als appartementen gebouwd.

Er is op dit moment nog geen ontwerp van de bebouwing uitgewerkt, daarom is een aantal varianten doorgerekend voor grondgebonden woningen en appartementen. Er zijn meerdere beukmaten doorgerekend, zie Tabel 2. Het rekenmodel voor de bebouwing is gebaseerd op Tabel 2.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Appartementengebouwen: breedplaatvloer 200 mm met cementdekvloer 70 mm Grondgebonden woningen: kanaalplaatvloer 200 mm met cementdekvloer 70 mm
Hoogte	9 – 15 m
Lengte vloerveld	4.8, 5.4, 6.0 en 6.6 m
Breedte vloerveld	7 – 10 m
Constructietype	Wanden-vloeren
Fundering	Op palen
Stijfheid gebouw	Kalkzandsteen en metselwerk

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

Door Alcedo zijn metingen uitgevoerd in het onderzoeksgebied op vijf punten, zie Figuur 3. De metingen zijn uitgevoerd van 18 tot en met 25 november 2019. 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 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:

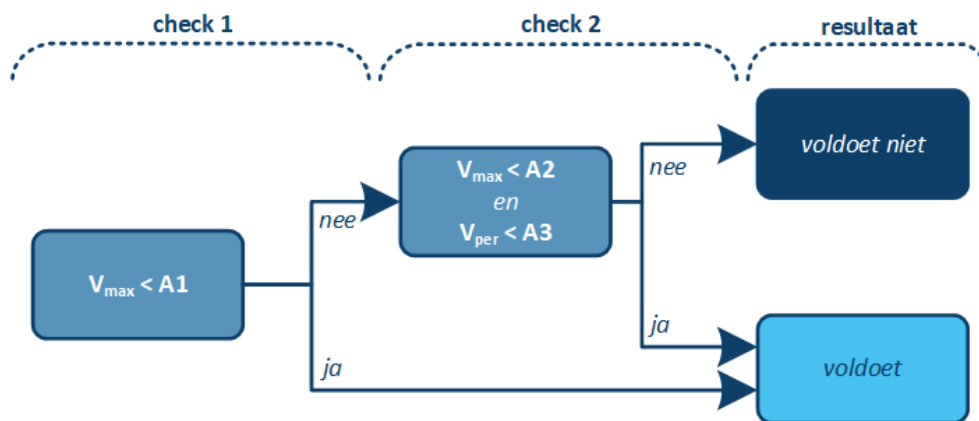
1. De richtlijn toetst zowel een maximaal optredende trillingssterkte (V_{max} , treedt op bij de trein die gedurende de meetperiode de hoogste trillingen veroorzaakt) als het tijdsgemiddelde van de trillingen (V_{per} , deze grootheid is in tegenstelling tot V_{max} dus ook afhankelijk van het aantal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

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.

3. Een woning kan op twee manieren voldoen aan de richtlijn: de trillingssterkte V_{max} moet lager zijn dan de onderste streefwaarde A1 (zie Tabel 3), óf V_{max} moet lager zijn dan de bovenste streefwaarde A2, waarbij tegelijkertijd de trillingsintensiteit V_{per} lager is dan de streefwaarde A3. Zie ook het schema in Figuur 4.

Tabel 3 Streefwaarden in de SBR-richtlijn deel B voor gebouwen met bestemming wonen

Situatie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Nieuwe situatie	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
Bestaande situatie	0.2	0.8	0.10	0.2	0.4	0.10



Figuur 4 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

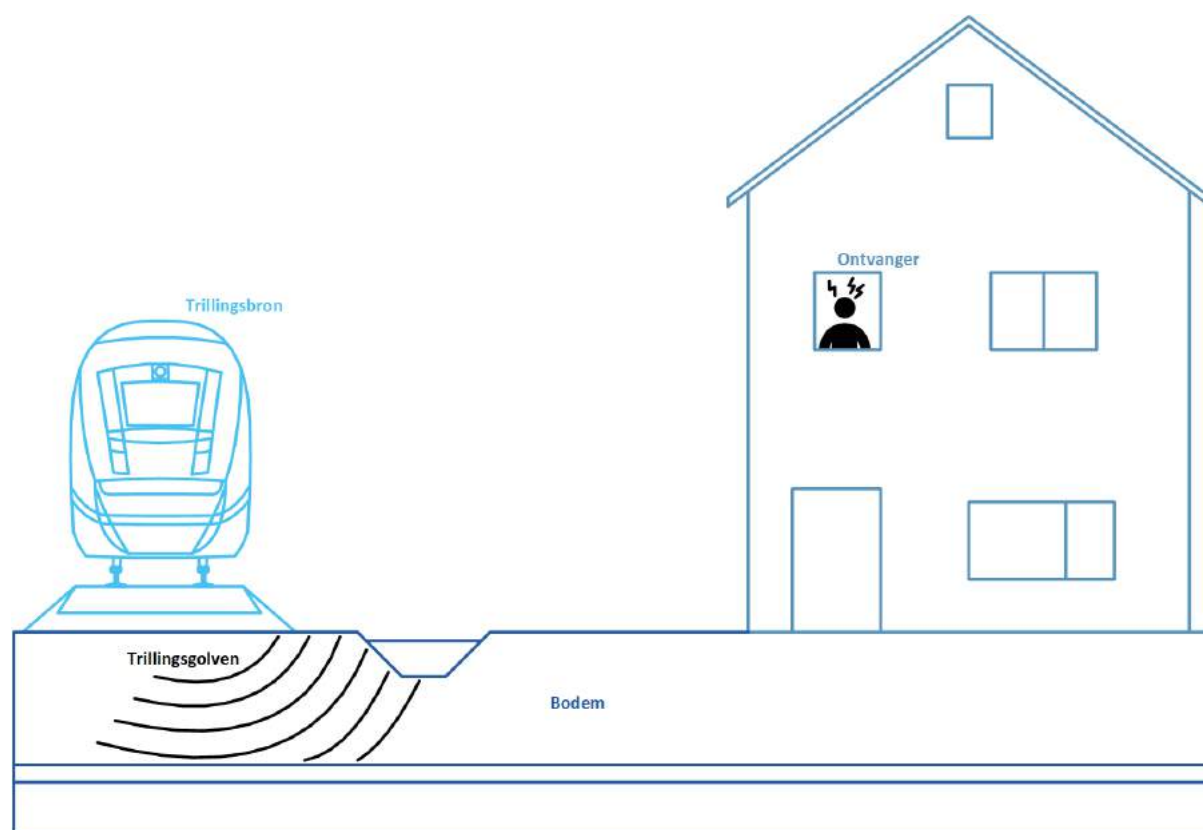
3.2 Rekenmethode

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

3.2.1 Trillingen – van trillingsbron naar gebouw

Trillingen ontstaan doordat een bewegend object (een trein, tram of vrachtwagen bijvoorbeeld) over een niet-efen ondergrond rijdt. Door de massa en beweging van het voertuig, variaties in de ondergrond (die per definitie niet perfect vlak is) en variaties in de rondheid van de wielen van het voertuig ontstaan spanningen in de bodem die zich door de bodem verplaatsen. Afhankelijk van de opbouw van de bodem en de aanwezigheid van obstakels (zoals sloten en damwanden) verplaatsen de trillingen zich diep of juist ondiep door de bodem. Gebouwen worden daardoor in trilling gebracht. Afhankelijk van hoe het gebouw is geconstrueerd, worden bepaalde trillingen meer of minder versterkt in het gebouw. Deze trillingen kunnen als hinderlijk worden ervaren door personen in gebouwen. Dit hele systeem van trillingsbron (hier de trein), overdrachtsmedium (de bodem, waardoor de trillingen zich verplaatsen) en ontvanger (het gebouw met daarin de personen die de hinder ervaren) is schematisch weergegeven in Figuur 5.

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



Figuur 5 Trillingen – het 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 aan bestaande gebouwen en op maaiveld. 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.

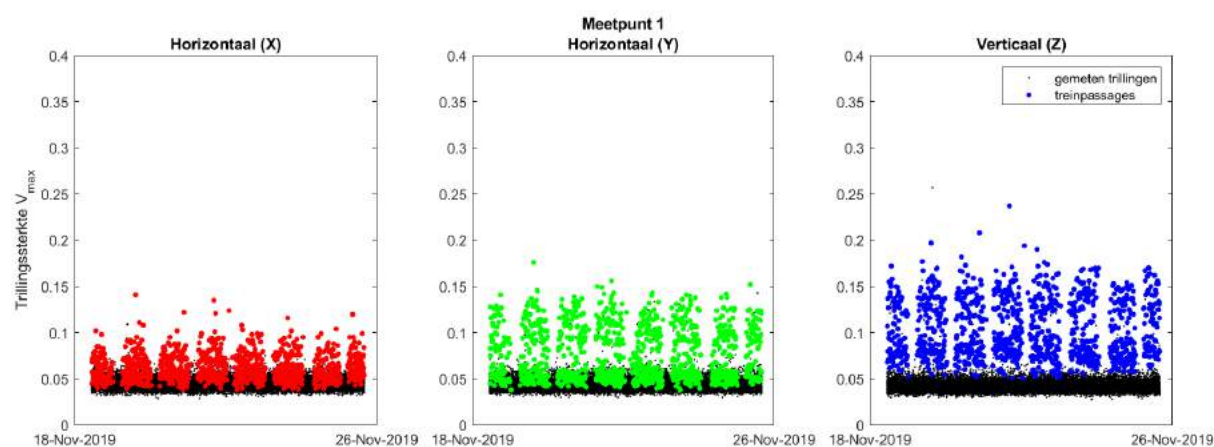
4 Verwachte trillingen in de woningen

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

4.1 Meetresultaten

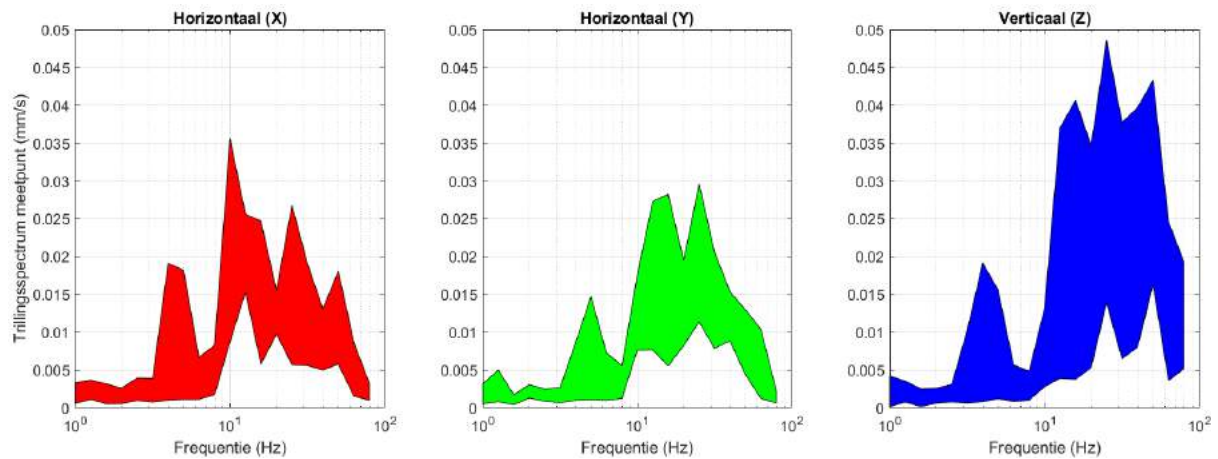
Alcedo heeft metingen uitgevoerd aan de fundering van het bestaande pand Jan Plassensteeg 14, op 3 punten op maaiveld (op 20, 50 en 100 meter van het spoor) en aan een opstal bij Jan Tijmensteeg 18. De trillingen van het meetpunt aan de fundering van Jan Plassensteeg 14 zijn weergegeven in Figuur 6, de overige resultaten zijn opgenomen in Bijlage III.

1. De trillingen zijn maatgevend in verticale richting, de hoogst gemeten waarde aan de fundering van Jan Plassensteeg 14 (op ca. 15 m afstand van het spoor) bedraagt 0.25, en is afkomstig van een goederentreinpassage.
2. Sprinters geven lagere trillingen dan intercity's (V_{max} van sprinters is ca. 0.12, van intercity's ca. 0.17). Goederentreinen geven sterk wisselende trillingen, de hoogste trillingen zijn echter wel van goederentreinen afkomstig.



Figuur 6 Gemeten trillingen aan de fundering van huidige pand Jan Plassensteeg 14

Vervolgens is een meting aan de meetpunten op maaiveld uitgevoerd. Hierbij is specifiek gekeken naar welke trillingsfrequenties maatgevend zijn, deze input is gebruikt om de trillingen in de gebouwen te bepalen en de uitdemping van de trillingen met de afstand vast te stellen. Spectrogrammen van de trillingen (weergegeven als 1/3-octaaftbandspectrum of tertsbandspectrum) zijn weergegeven in Figuur 7 voor een afstand van 20 meter, voor de overige afstanden zijn de resultaten weergegeven in Bijlage III. In deze figuur is goed zichtbaar dat de dominante frequentie van de trillingen tussen de 8 en 50 Hz ligt, maar dat er ook af en toe hoge trillingen zijn bij lagere frequenties (rond de 4 Hz). Deze laagfrequente trillingen zijn afkomstig van zware goederentreinen, en dempen slecht uit met de afstand. De hogere frequenties worden sterk uitgedempt door de fundering van gebouwen.

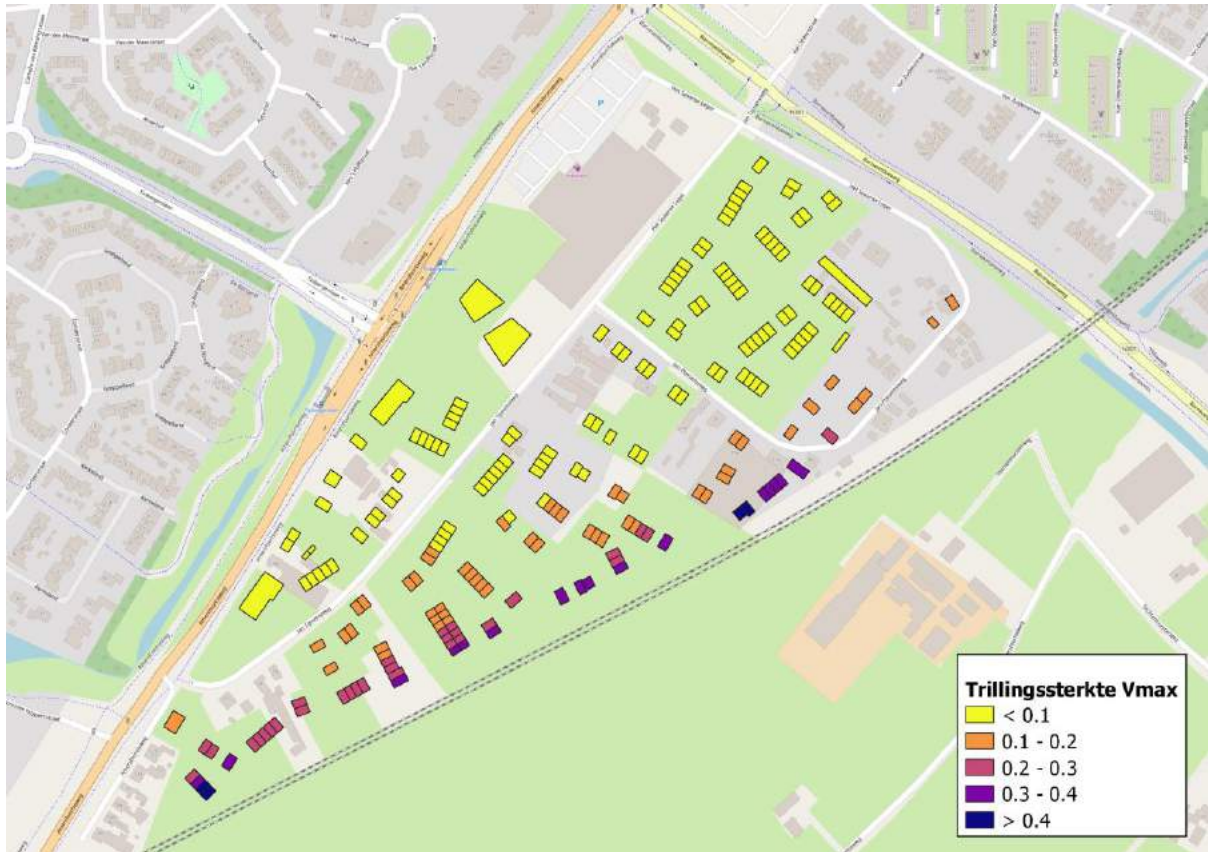


Figuur 7 Tertsbandspectra op maaiveld op 20 meter afstand

4.2 Trillingen in geplande nieuwbouw

De geplande bebouwing is gemodelleerd op basis van de input uit hoofdstuk 2. Het (frequentie-afhankelijke) gedrag van een representatieve grondgebonden woning is weergegeven in Bijlage II. Met deze resultaten is bepaald in welke mate de trillingen worden versterkt tussen de meetpunten op de fundering van het huidige gebouw en de vloeren in het toekomstige gebouw. De versterking van de trillingen tussen de fundering en een maatgevend punt op de hoogste verdieping van de toekomstige gebouwen varieert tussen de 1.9 en 2.5, en is afhankelijk van bijv. de afstand tot het spoor en de constructie. Met deze overdrachten is op basis van de metingen bepaald wat de trillingen in de toekomst zullen zijn in de woningen. De resultaten voor de bovengrens² van de trillingssterkte V_{max} zijn weergegeven in Figuur 8 voor woningen met een beukmaat van 6.0 m.

² Berekend met de bovengrenswaarde voor de overdracht



Figuur 8 Bovengrens van de trillingssterkte V_{max} in de woningen met 6.0 m beukmaat

De beoordeling van de trillingen aan de SBR B-richtlijn (zie hoofdstuk 3) is weergegeven in Figuur 9 voor een beukmaat van 6.0 m. Globaal geldt het volgende:

1. De trillingen zijn hoger in de westzijde (Amersfoortse zijde) van het plangebied).
2. De trillingen worden iets lager naarmate de beukmaat toeneemt. Dit komt doordat de eigenfrequentie van de vloer lager is bij een grotere beukmaat, waardoor de hogerefrequente trillingen minder worden versterkt in de woning. Verder zijn de trillingen relatief wat lager in de appartementengebouwen, dat komt door de grotere massa van het gebouw (o.a. zwaardere fundering) en doordat daar breedplaatvloeren worden toegepast, deze hebben bij dezelfde dikte een lagere eigenfrequentie dan kanaalplaatvloeren en een hogere demping.
3. Op afstanden groter dan 48 meter voldoen de trillingen aan de streefwaarden voor nieuwbouw ($V_{max} = 0.2$, $V_{per} = 0.05$) voor alle onderzochte beukmaten. Op afstanden groter dan 22 meter voldoen de trillingen aan de streefwaarden voor bestaande bouw (soepeler, hierin is ook een gewinningseffect meegenomen, $V_{max} = 0.4$, $V_{per} = 0.1$).

Uit Figuur 9 volgt dat er overschrijdingen van de streefwaarden kunnen optreden op korte afstand tot het spoor (binnen 48 meter). Het gaat om maximaal 5 woningen met regelmatige overschrijdingen (maximaal 10 overschrijdingen van de streefwaarden per dag), en daarnaast om maximaal 50 woningen met incidentele overschrijdingen (minder dan 1 overschrijding van de streefwaarden per dag).

Tabel 4 Overschrijdingen per beukmaat en contourafstand

Beukmaat	Afstand $V_{max}=0.2$	Afstand $V_{max}=0.4$	Overschrijdingen	
			Geel	Rood
Beukmaat 4.8 m	48	22	50	5
Beukmaat 5.4 m	45	20	49	4
Beukmaat 6.0 m	44	19	46	4
Beukmaat 6.6 m	45	19	48	4



Figuur 9 Beoordeling van de bovengrens van de trillingen aan de SBR B-richtlijn, 6.0 m beukmaat

4.3 Maatregelen

Door de hoge trillingen op maaiveld resulteren relatief hoge trillingen op korte afstanden van het spoor, en verwachten we overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder. Daarom hebben we voor de locaties met overschrijdingen 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 trillingsintensiteit V_{per} een goede indicatie is. Alleen in de gele bouwblokken in Figuur 9 geldt dat het aantal overschrijdingen beperkt is, in de rode bouwblokken voldoet zowel de trillingssterkte V_{max} als de trillingsintensiteit V_{per} niet aan de streefwaarden. Daar is dus

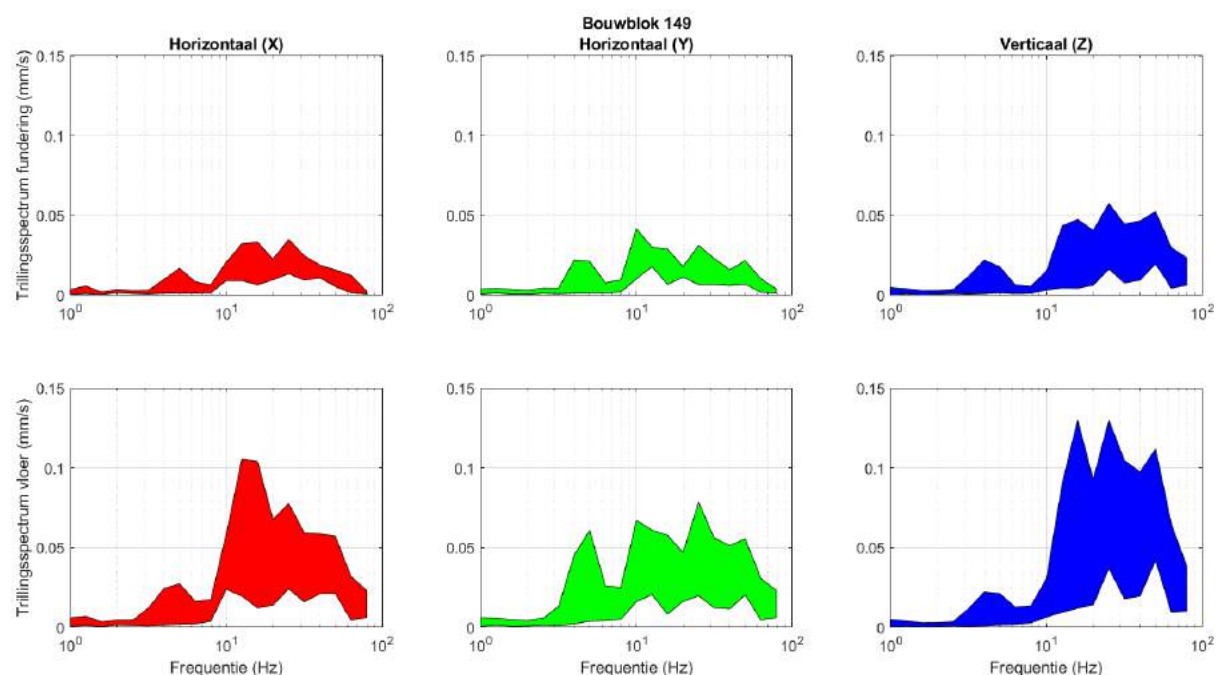
geen sprake van incidentele overschrijdingen die het achterwege laten van een maatregel zou kunnen rechtvaardigen.

2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. Daar is hier geen sprake van.
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 de voorwaarden 1 en 2 niet van toepassing zijn voor een deel van de bouwblokken, gaan we hierna in op maatregelen om de trillingen te reduceren. Om effectieve maatregelen te treffen, doen we eerst een nadere analyse van de verwachte trillingen. Zo stellen we vast bij welke trillingsfrequenties vooral hoge trillingen optreden. Daarna gaan we in op maatregelen die mogelijk zijn aan de trillingsbron (de trein of het spoor), maatregelen in de bodem en maatregelen aan de gebouwen.

4.3.1 Analyse resultaten

Om te bepalen welke trillingsrichting en trillingsfrequenties in de gebouwen maatgevend zijn, is een nadere analyse uitgevoerd van de verwachte trillingen. Voor het meest maatgevende bouwblok (op 13 meter van het spoor) is het trillingspectrum in de X-, Y- en Z-richting op zowel de fundering als bovenin het gebouw weergegeven in Figuur 10.



Figuur 10 Trillingspectra in een woning op 13 m van het spoor (kortste afstand). Boven de trillingen op de fundering, onder op de hoogste vloer bij een beukmaat van 6.0 m

In Figuur 10 is zichtbaar dat de trillingen in horizontale en verticale richting vergelijkbaar zijn op de vloer, en dat de trillingen hoog zijn bij een breed frequentiespectrum. Dit is vrij karakteristiek voor dit type bodems. Maatregelen zullen daarom in ieder geval voor meerdere frequenties effectief moeten zijn (vanaf 10 Hz), en versterking van de trillingen

(zowel bij lage frequenties rond 4 Hz als bij hogere frequenties vanaf 10 Hz) moet worden voorkomen.

In de volgende subparagrafen wordt ingegaan op mogelijke maatregelen aan de trillingsbron, in de bodem of aan de gebouwen.

4.3.2 Maatregelen aan de trillingsbron

De meest effectieve manier om de trillingen te reduceren, is het nemen van maatregelen aan de trillingsbron (het spoor of de treinen), bijvoorbeeld door het toepassen van ballastmatten, het aanpassen van de rijsnelheid van de treinen of het hanteren van strengere vlakheidseisen voor het spoor. Deze maatregelen vallen echter buiten de scope van dit onderzoek, omdat deze maatregelen allemaal buiten het plangebied moeten worden getroffen. Bovendien zijn de kosten van deze maatregelen hoger dan maatregelen aan de gebouwen.

4.3.3 Maatregelen in de bodem

Bij maatregelen in de bodem kan gedacht worden aan het toevoegen van obstakels in de bodem, die ervoor zorgen dat de gebouwen worden afgeschermd. Voorbeelden zijn het toevoegen van een spoorvloot, een trillingsscherp van piepschuim (EPS), beton, jet-grout (soil-mix methode voor beton) of een damwand. Nadeel van deze maatregelen is dat deze vooral effectief zijn dicht op de trillingsbron (het spoor) of dicht op de bebouwing. Omdat de afstand tussen spoor en bebouwing hier beperkt is, kan dit soort maatregelen vooral voor de meest nabijgelegen woningen (waar de trillingen ook het hoogst zijn) wel effectief zijn.

Wel geldt dat de ruimte voor dit soort maatregelen beperkt is (er komt ook een geluidsscherp en de afstand tussen de woningen en het eerste spoor is minder dan 15 m). Daarom zijn dit soort maatregelen vrijwel niet inpasbaar, tenzij deze worden gecombineerd met het geluidsscherp. Het effect en de kosten van maatregelen in de bodem zijn weergegeven in Tabel 5. Hierbij is uitgegaan van een trillingsscherp direct naast het spoor over een lengte van ca. 600 meter. Bij elke maatregel is aangegeven in hoeveel woningen nog overschrijdingen resteren, conform de kleurcodering uit Figuur 9 (rood = overschrijding, geel = incidentele overschrijding).

Alleen met een betonnen trillingsscherp (diepte ca. 10 m, dikte ca. 1 m), bekleed met rubber, wordt voor alle woningen voldaan aan het beoordelingskader. De investeringskosten van deze maatregel staan echter niet in relatie tot de stichtingskosten van de woningen (maatregel kost ca. €160.000 per woning met een overschrijding). Goedkopere maatregelen, zoals een vloot, zijn ruimtetechnisch niet inpasbaar. Wel is een trillingsscherp in combinatie met het geplande geluidsscherp een optie die kan worden overwogen. Tegen beperkte meerkosten is het wellicht mogelijk om het geluidsscherp ook deels ondergronds uit te voeren (evt. in combinatie met een vloot), waardoor een trillingsreducerend effect kan worden verkregen. Overigens geldt voor al deze maatregelen, behalve het beklede betonnen trillingsscherp, dat niet in alle woningen wordt voldaan aan het beoordelingskader.

Tabel 5 Mogelijke maatregelen in de bodem, en effect op aantal overschrijdingen, beukmaat 6.0 m

Maatregel	Effect	Kosten	Overschrijdingen		
					Afname
Geen			46	4	
Betonnen wand	15 – 40%	€ 8 – 11 mln	10	0	-40
Jet-grout wand	10 – 30%	€ 6 – 9 mln	22	0	-28
Damwand	5 – 15%	€ 7 – 10 mln	39	1	-10
Diepe sloot	10 – 40%	€ 1 – 3 mln	12	0	-38
Beton met rubber	30 – 70%	€ 12 – 15 mln	0	0	-50
Damwand met EPS	15 – 35%	€ 7 – 12 mln	20	0	-30
Damwand met sleuf	20 – 40%	€ 12 – 15 mln	8	0	-42
L-wand met sloot	15 – 35%	€ 1 – 2 mln	20	0	-30

4.3.4 Maatregelen aan de gebouwen

Bij maatregelen aan de gebouwen is een breed scala aan maatregelen mogelijk. Die variëren van het minder stijf uitvoeren van de gebouwen (bijvoorbeeld door te kiezen voor slappere vloeren), het toepassen van meer dempende materialen (zoals hout of breedplaatvloeren in plaats van kanaalplaatvloeren) tot het ontkoppelen van de fundering of de vloeren door middel van rubber of stalen veren. Het effect en de kosten van maatregelen aan gebouwen zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Mogelijke maatregelen aan de gebouwen, en effect op aantal overschrijdingen

Maatregel	Effect	Kosten ³	Overschrijdingen		
					Afname
Geen			46	4	
Gebouwen 2,0 m verder van het spoor	5 – 10%		43	2	-5
Gebouwen 4,0 m verder van het spoor	10 – 15%		37	1	-12
Stijvere constructie	0 %	< 3% SK	46	4	0
Slappere vloer	15 – 25%	< 2% SK	26	2	-22
Toepassen van dempende materialen	10 – 20%	< 3% SK	34	1	-15
Ontkoppelen van de vloeren	0 %	2 – 4% SK	46	4	0
Ontkoppelen van de fundering	40 – 80%	4 – 8% SK	0	0	-50
Inpakken van de fundering	10 – 25%	1 – 3% SK	30	1	-19
Zwaardere fundering	5 – 15%	3 – 5% SK	39	1	-10

Samengevat geldt dat alleen met het volledig ontkoppelen van de fundering (dubbele fundering met daartussen rubberen oplegblokken of stalen veerdozen (hiermee is meer effect te behalen dan met rubberen oplegblokken, maar kosten zijn ook hoger en is technisch complexer)) in alle bouwblokken overschrijdingen van het beoordelingskader worden voorkomen. Deze maatregel heeft echter hoge kosten, en is technisch alleen uit te voeren voor gehele bouwblokken, zodat de kosten van deze maatregel uiteindelijk relatief hoog worden per woning met overschrijdingen.

³ SK = Stichtingskosten

Wel kan met een combinatie van een aantal relatief beperkte ontwerpwijzigingen (zoals het iets verder van het spoor situeren van met name de woningen binnen 22 meter van het spoor en het toepassen van slappere vloeren en meer dempende materialen (breedplaat- i.p.v. kanaalplaatvloeren voor de grondgebonden woningen, meer hout in de constructie)) het aantal overschrijdingen worden beperkt.

4.3.5 Afweging van maatregelen

Gezien de relatief hoge trillingen in maximaal 5 woningen (de woningen binnen de 22 metercontour) adviseren wij om in ieder geval voor deze woningen te kijken naar maatregelen. Bij het zoeken naar maatregelen zijn er meerdere mogelijkheden, van meer planologische tot bouwkundige en technische maatregelen. Wij adviseren om de volgende mogelijkheden te onderzoeken in de verdere detaillering van het bouwplan:

1. Zijn er mogelijkheden om de te realiseren geluidsmaatregel (geluidswal) te combineren met een trillingsscherm? Te denken valt bijv. aan 3 m hoge prefab L-wanden waarmee zowel een geluidswerend als trillingswerend effect kan worden bereikt als deze op bijv. 1.5 m diepte worden ingegraven, in combinatie met een greppel. Met deze maatregel zijn de trillingen met zo'n 30% te reduceren. Principedetails van mogelijke uitwerkingen zijn weergegeven in Bijlage IV.
2. Zijn er mogelijkheden om, m.n. de woningen dichterbij het spoor, iets verder van het spoor vandaan te situeren? Een afstandstoename van 2 meter zorgt al voor ca. 10% lagere trillingen.
3. Zijn er mogelijkheden om meer dempende materialen toe te passen in de woningen binnen 48 meter van het spoor? Hierbij valt te denken aan een ander bouwconcept (breedplaat- i.p.v. kanaalplaatvloeren) of het gebruiken van meer hout in de constructie. Met deze maatregelen is maximaal 25% reductie te behalen.
4. Eventueel is ook het inpakken van de fundering (bij voorkeur met aan de funderingsbalken vastgemaakte EPS-blokken om opdrijven te voorkomen) nog te overwegen. Deze maatregel heeft een maximaal effect van 25%, zie Bijlage IV voor principedetails.

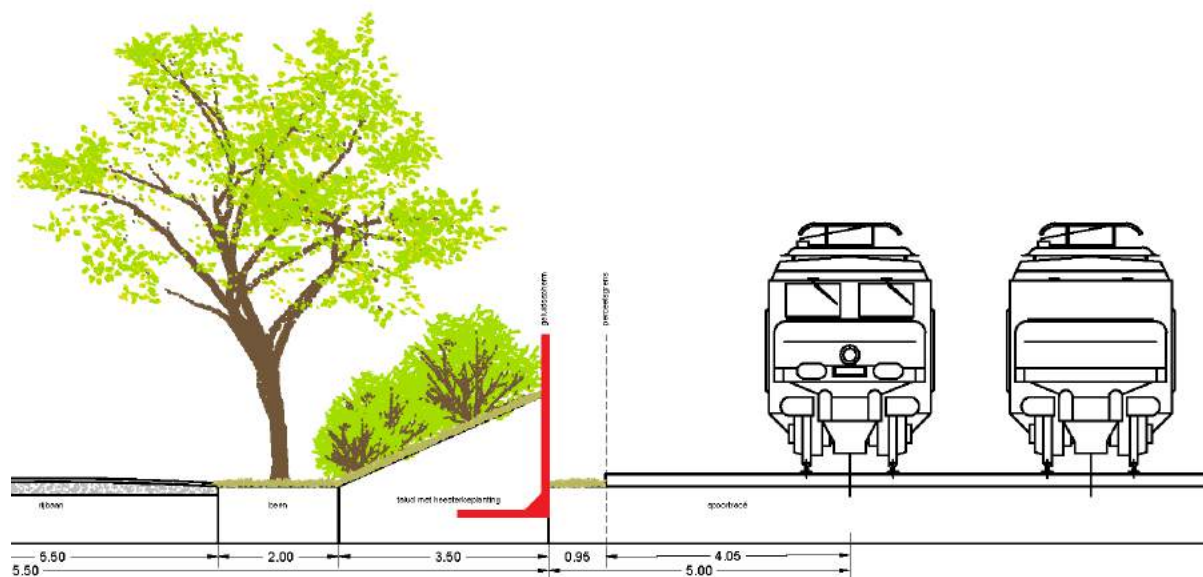
Met bovenstaande maatregelen is het mogelijk om in ieder geval te voldoen aan de streefwaarden voor een bestaande situatie uit de SBR B-richtlijn, en blijven er slechts enkele woningen met alleen incidentele overschrijdingen over.

Volledig voldoen aan het beoordelingskader is alleen mogelijk met hoge investeringen, door de woonblokken met overschrijdingen uit te voeren met een dubbele, op stalen veren afgeveerde fundering.

4.4 Aanpassingen in stedenbouwkundig plan

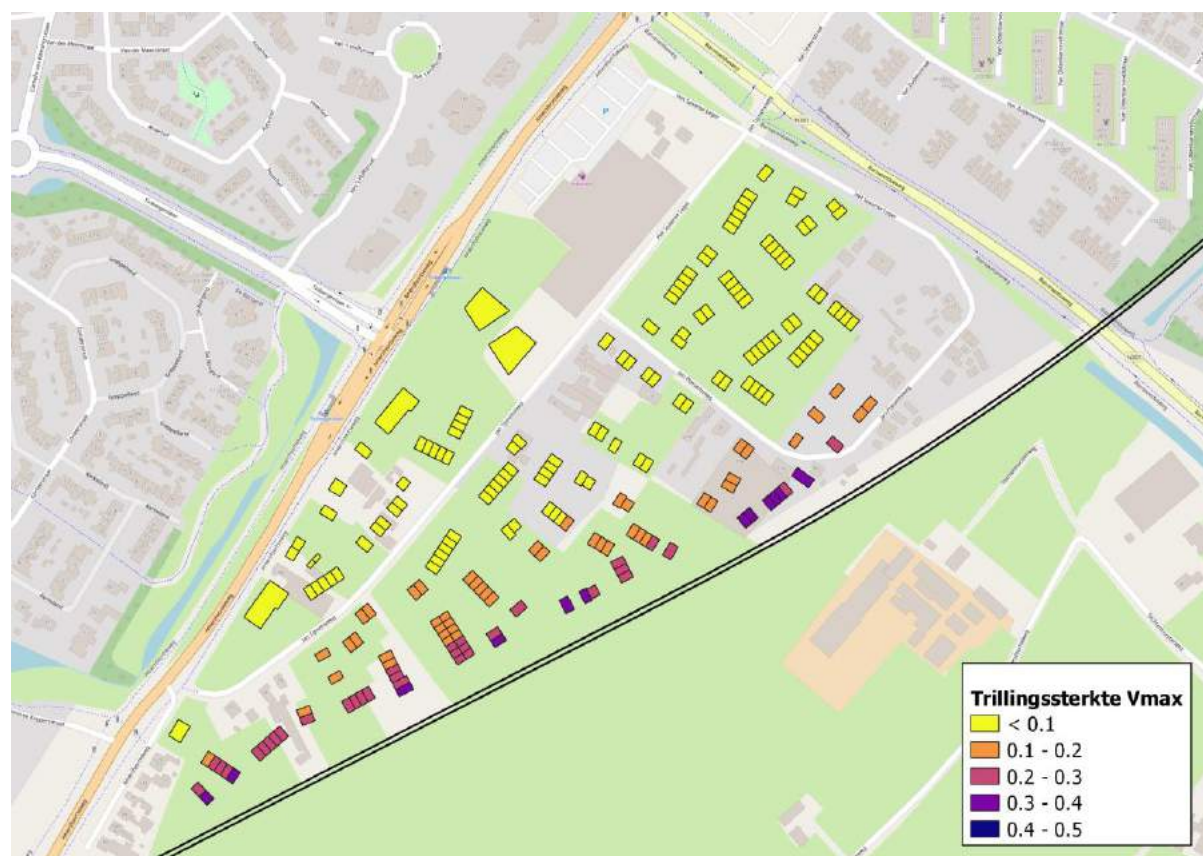
Naar aanleiding van bovenstaande bevindingen is het stedenbouwkundig plan van het Spaanse Leger aangepast. Rond de woningen waar overschrijdingen mogelijk zijn (rood gearceerde woningen in Figuur 9), is de bebouwing opgeschoven naar een afstand verder van het spoor vandaan (bebouwing ligt nu ook verder van het spoor vandaan dan de bestaande bebouwing in het Spaanse Leger), deels is ook gekozen voor andere bebouwing (met een grotere beukmaat, waardoor de trillingen lager zijn). Verder is een geluidsscherm

dichtbij het spoor voorzien dat deels ingegraven wordt aangebracht, waardoor dit de trillingen reduceert (afschermende werking), zie Figuur 11.



Figuur 11 Geluidsscherm (rood) met deels afschermende werking voor trillingen

Op basis van bovenstaande aanpassingen is het onderzoek geactualiseerd. De resultaten voor de trillingssterkte V_{max} in de geactualiseerde situatie zijn weergegeven in Figuur 12.



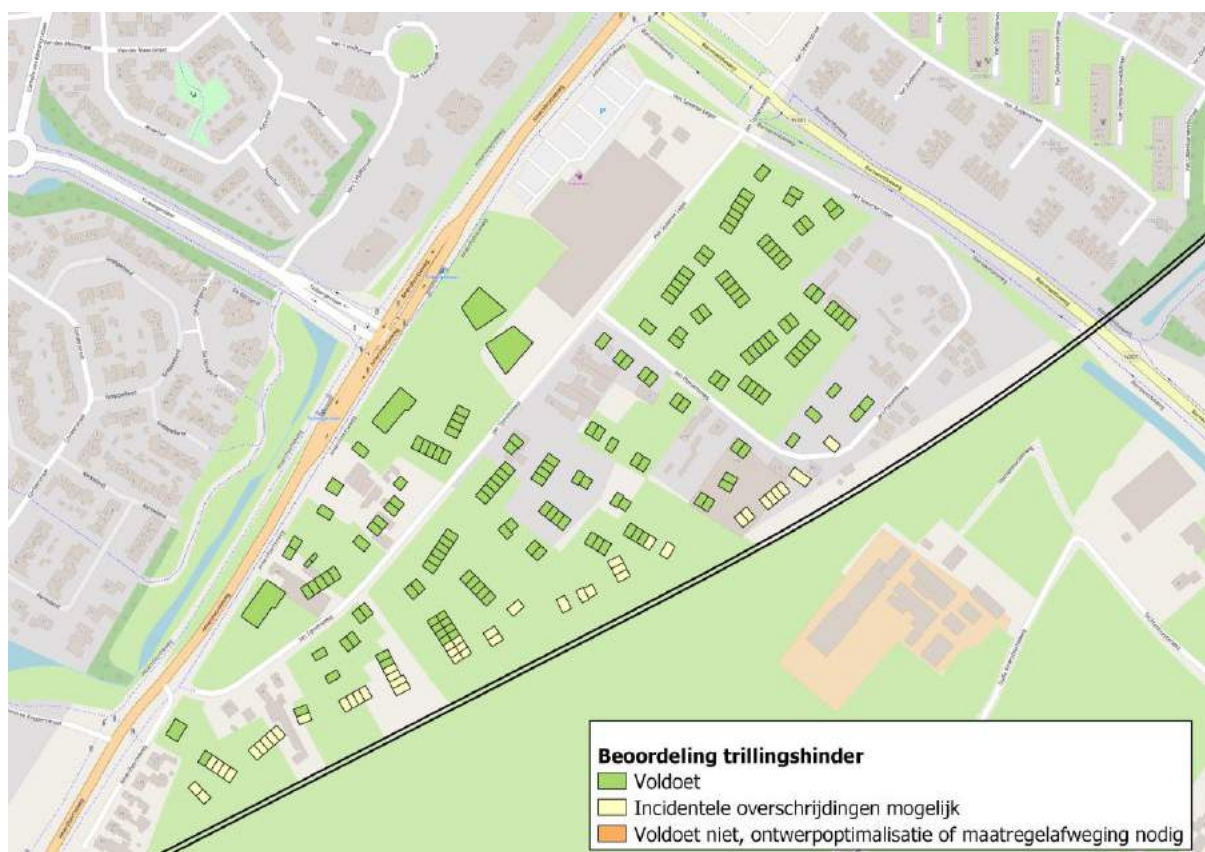
Figuur 12 Bovengrens van de trillingssterkte V_{max}

De beoordeling van de trillingen aan de SBR B-richtlijn (zie hoofdstuk 3) is weergegeven in Figuur 13. Uit Figuur 13 volgt dat er ook in het definitieve stedenbouwkundig plan overschrijdingen van de streefwaarden kunnen optreden op korte afstand tot het spoor (binnen ca. 40 meter van het spoor). Het gaat om maximaal 40 woningen met incidentele overschrijdingen (in vrijwel alle woningen minder dan 1 overschrijding van de streefwaarden per dag, in 3 woningen op korte afstand tot het spoor zijn 2 tot 3 overschrijdingen van de streefwaarden per dag mogelijk).

Met de aanpassingen van het stedenbouwkundig plan wordt voldaan aan de streefwaarden voor een bestaande situatie uit de SBR B-richtlijn, en blijven er slechts woningen met alleen incidentele overschrijdingen over. Bij de verdere detaillering van het plan adviseren wij wel om de mogelijkheden te onderzoeken om meer dempende materialen toe te passen in de constructies van woningen binnen 40 meter van het spoor.

Volledig voldoen aan het beoordelingskader is alleen mogelijk met hoge investeringen, door de woonblokken met overschrijdingen uit te voeren met een dubbele, op stalen veren afgeveerde fundering.

Gezien het incidentele aantal overschrijdingen, de zeer hoge kosten van maatregelen en het feit dat wel voldaan wordt aan de streefwaarden voor een bestaande situatie, ontstaat in het licht van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn echter geen onacceptabele situatie.



Figuur 13 Beoordeling van de bovengrens van de trillingen aan de SBR B-richtlijn

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 kunnen zorgen voor zo'n 30% variatie in de trillingen. Er is gemeten in een klimatologisch als normaal te typeren periode. De status van het spoor is onbekend. Op basis van bovenstaande verwachten we dat de huidige berekeningen representatief zijn voor de toekomstige trillingen.
2. Ten aanzien van de bodem geldt dat met name op korte afstand tot het spoor variaties in de trillingen mogelijk zijn door lokale variaties in de bodem. Uit de metingen blijkt dat de lokale variatie beperkt is tot zo'n 20%, en dat de trillingen hoger zijn aan de Amersfoortse zijde van het onderzoeksgebied. De invloed van lokale variaties in de bodem is beperkt door het aantal meetpunten.
3. Ten aanzien van de gebouwen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en definitief ontwerp). Bovendien is het dynamische gedrag van bijvoorbeeld beton afhankelijk van de mate van gescheurdheid van het beton en zijn er natuurlijke variaties in materiaalgedrag (van bijvoorbeeld hout, metselwerk en beton). In de berekeningen is gerekend met een verwachtingswaarde van de trillingen op basis van een aan de hand van praktijkmetingen geïkt rekenmodel. Hiermee wordt een resultaat verkregen dat representatief is voor de toekomstige situatie.

Bovenstaande onzekerheden geven geen aanleiding tot een andere maatregelafweging. Wel geldt dat er een afname van het aantal goederentreinen wordt voorzien. Goederentreinen zorgen op dit moment voor de meeste overschrijdingen, het aantal overschrijdingen zal dus afnemen in de toekomst.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

In het voorliggende onderzoek zijn de verwachte trillingen in de nieuwbouw van het Spaanse Leger in Nijkerk bepaald. Uit het onderzoek volgt dat:

1. In maximaal 50 woningen zijn overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder voor *nieuwe* situaties. In maximaal 5 van deze woningen zijn overschrijdingen mogelijk van de streefwaarden voor *bestaande* situaties (soepeler streefwaarden, waarin een zeker gewenningseffect is meegenomen). In deze maximaal 5 woningen is sprake van maximaal 10 overschrijdingen per dag, in de overige maximaal 45 woningen is sprake van incidentele overschrijdingen (minder dan 1 per dag). Dit aantal overschrijdingen zal in de toekomst afnemen door een afname van het aantal goederentreinen (van 10 tot 12 naar 2 tot 4 per dag).
2. Op afstanden groter dan 48 meter voldoen de trillingen aan de streefwaarden voor nieuwbouw voor alle onderzochte constructietypes. Op afstanden groter dan 22 meter voldoen de trillingen aan de streefwaarden voor bestaande bouw. Deze afstanden zijn enkele meters kleiner voor grote beukmaten (6.0 en 6.6 m).

5.2 Aanbevelingen

Omdat de trillingen niet voldoen aan het beoordelingskader, adviseren wij om voor de woningen binnen de 48 metergrens maatregelen of ontwerptimalisaties af te wegen. Hierbij geldt het volgende:

1. Maatregelen aan het spoor of de treinen zijn in het kader van dit onderzoek niet nader beschouwd. Deze vallen buiten de planologische grenzen van het onderzoeksgebied en zijn doorgaans zeer kostbaar.
2. Maatregelen in de bodem (zoals trillingsschermen) hebben hoge kosten (enkele miljoenen euro's voor het hele plangebied), zijn ruimtetechnisch lastig inpasbaar en niet of nauwelijks aanpasbaar in de toekomst bij wijzigingen aan het spoor. Wel adviseren wij om te onderzoeken of de te realiseren geluidsmaatregel (geluidswal) is te combineren met een trillingsscherm, bijvoorbeeld in de vorm van ingegraven hoge prefab L-wanden met een greppel aan een zijde. Met deze maatregel zijn de trillingen met maximaal 35% te reduceren.
3. Voor maatregelen aan de gebouwen adviseren wij het volgende:
 - a. Onderzoek of het mogelijk is om een deel van de woningen iets verder van het spoor vandaan te situeren. Voor de meest dichtbij gelegen woningen zorgt een toename van de afstand tot het spoor van 2 meter al voor een afname van de trillingen met 10 procent.
 - b. Weeg de mogelijkheid af om meer dempende materialen toe te passen in de woningen binnen de 48 metergrens. Denk hierbij aan het vervangen van

kanaalplaat- door breedplaatvloeren of het gebruiken van meer hout in de constructie. Met deze maatregelen is maximaal 25% reductie te behalen.

- c. Als geen van de eerder genoemde maatregelen mogelijk is, is ook het inpakken van de fundering van een deel van de bouwblokken (bij voorkeur met aan de funderingsbalken vastgemaakte EPS-blokken om opdrijven te voorkomen) te overwegen. Deze maatregel heeft een maximaal effect van 25%.

De contourafstanden voor de situaties met deze maatregelen zijn weergegeven in Tabel 7. Bij de verdere uitwerking van het plan kunnen maatregelen met behulp van deze tabel worden afgewogen.

Tabel 7 Contourafstanden in meters voor overschrijdingen (oranje) en incidentele overschrijdingen (geel) per beukmaat en per maatregel

Beukmaat	Geen		Geluidsscherm maaiveld		Geluidsscherm 0.5 m diep		Geluidsscherm 1.0 m diep		Geluidsscherm 0.5 m diep en greppel		Geluidsscherm 1.0 m diep en greppel		Dempende materialen		EPS tegen fundering	
	Geen	Oranje	Geen	Oranje	Geen	Oranje	Geen	Oranje	Geen	Oranje	Geen	Oranje	Geen	Oranje	Geen	Oranje
Beukmaat 4.8 m	48	22	48	22	43	19	38	16	39	16	30	12	38	16	36	15
Beukmaat 5.4 m	45	20	45	20	40	17	35	14	36	14	27	10	35	14	33	13
Beukmaat 6.0 m	44	19	44	19	39	16	33	13	34	13	25	9	33	13	31	12
Beukmaat 6.6 m	45	19	45	19	40	16	34	13	35	13	26	9	34	13	32	12

Met bovenstaande maatregelen is het mogelijk om in ieder geval te voldoen aan de streefwaarden voor een bestaande situatie uit de SBR B-richtlijn, en blijven er slechts enkele woningen met alleen incidentele overschrijdingen over.

5.3 Aanpassingen in stedenbouwkundig plan

Naar aanleiding van bovenstaande aanbevelingen is het stedenbouwkundig plan van het Spaanse Leger aangepast. Zo is een deel van de bebouwing opgeschoven naar een afstand verder van het spoor vandaan (ook verder van het spoor dan de bestaande bebouwing), er is deels gekozen voor andere bebouwing (grotere beukmaat waardoor minder gevoelig voor trillingen) en is een geluidsscherm dichtbij het spoor voorzien dat deels ingegraven wordt aangebracht, waardoor dit de trillingen reduceert.

Op basis van bovenstaande aanpassingen is het onderzoek geactualiseerd. De aanpassingen zorgen voor een afname van de trillingen. Met de aanpassingen van het stedenbouwkundig plan wordt voldaan aan de streefwaarden voor een bestaande situatie uit de SBR B-richtlijn, en blijven er slechts woningen met alleen incidentele overschrijdingen over. Bij de verdere detaillering van het plan adviseren wij wel om de mogelijkheden te onderzoeken om meer dempende materialen toe te passen in de constructies van woningen binnen 40 meter van het spoor.

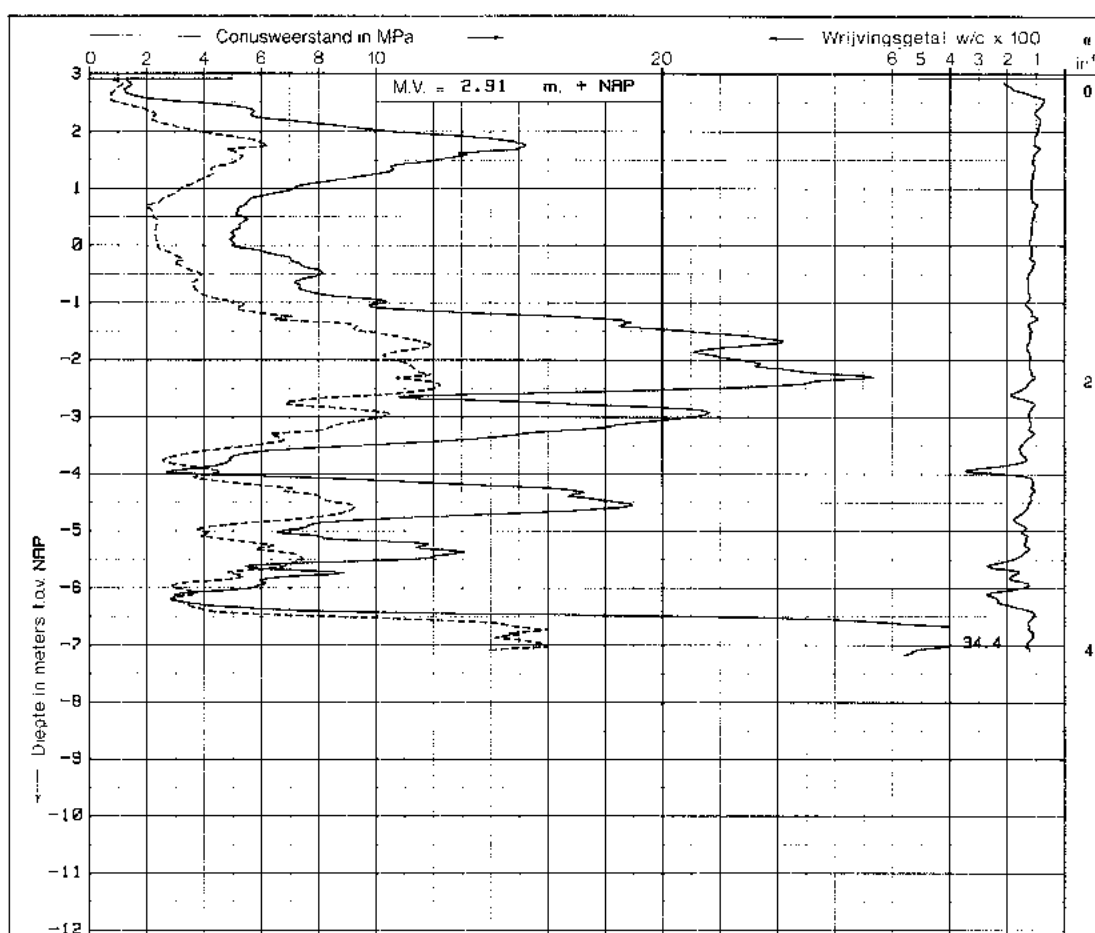
Gezien het incidentele aantal overschrijdingen (vrijwel overal minder dan 1 per dag, neemt in de toekomst verder af door een afname van het aantal goederentreinen) en het feit dat wel voldaan wordt aan de streefwaarden voor een bestaande situatie, ontstaat in het licht van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn geen onacceptabele situatie.

Volledig voldoen aan het beoordelingskader is alleen mogelijk tegen zeer hoge investeringen, door de woonblokken met overschrijdingen uit te voeren met een dubbele, op stalen veren afgeveerde fundering.

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 sondering in het onderzoeksgebied (nr. S32E00023) is weergegeven in Figuur 14. Hier is te zien dat de bodem is opgebouwd uit zandlagen met verschillende structuren, lokaal komen ook slappere lagen (klei) voor. Door de gelaagde bodem dempen met name laagfrequente trillingen van goederentreinen minder snel uit met de afstand, waardoor deze op relatief grote afstand nog meetbaar zijn.

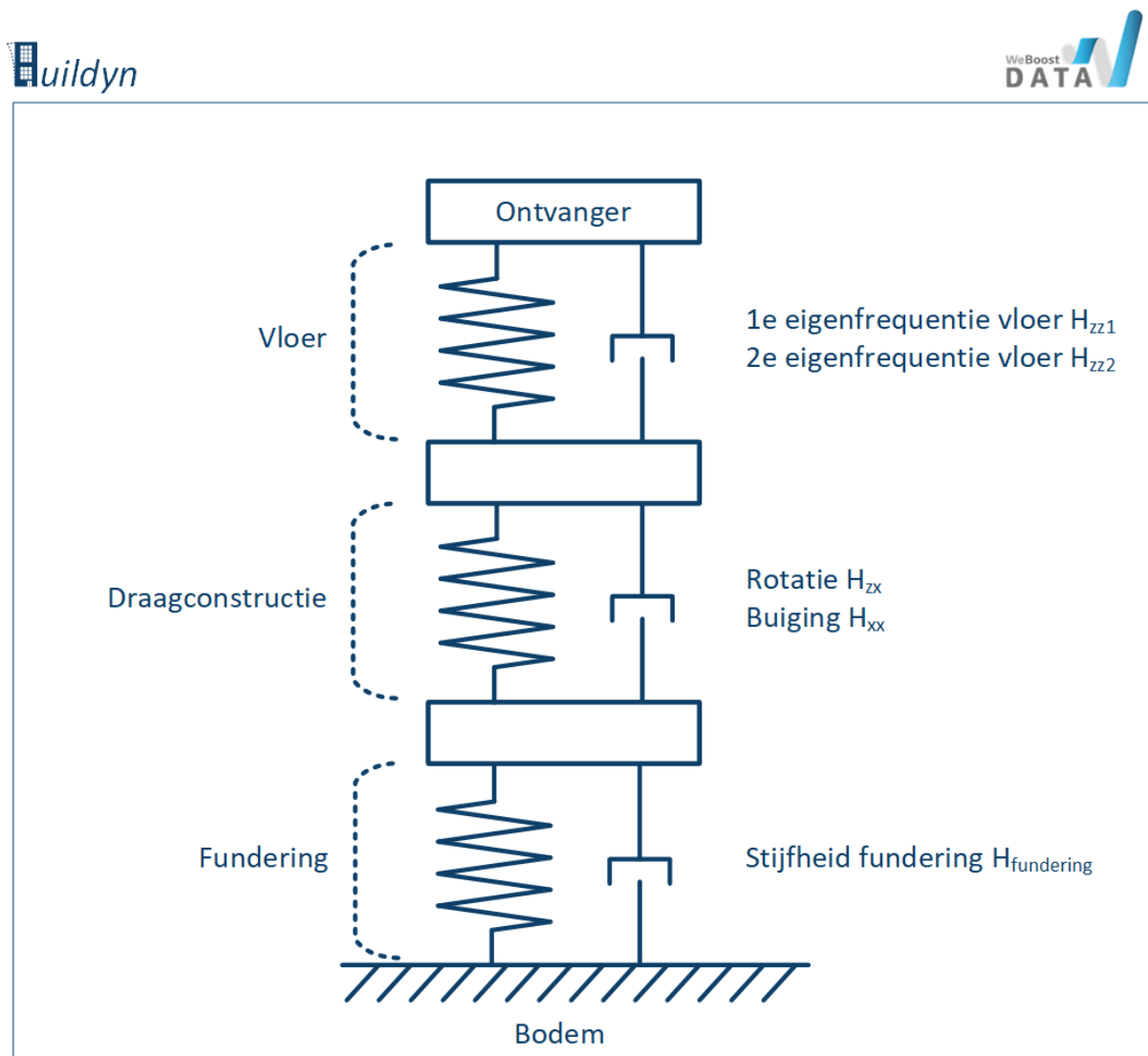


Figuur 14 Sondering in het onderzoeksgebied, S32E00023

Bijlage Rekenmodel Buildyn

In dit rapport is gebruik gemaakt van het door We-Boost Data ontwikkelde rekenmodel Buildyn om de trillingen in de geplande bebouwing te berekenen. Buildyn is een zogenaamd beam-element model (BEM) waarin het gebouw gemodelleerd en doorgerekend wordt. De resultaten van het model zijn geïkt met praktijkresultaten uit ruim 200 metingen in gebouwen. Dit model bestaat uit een aantal modules, deze worden in deze bijlage kort toegelicht.

In Buildyn wordt een gebouw gemodelleerd door middel van gekoppelde massaveersystemen, zie Figuur 15. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 15, worden in deze bijlage nader toegelicht.



Figuur 15 Principe van Buildyn met een gebouw als gekoppeld massaveersysteem. Rechts de verschillende componenten van het rekenmodel

Fundering

De fundering van een gebouw kan de trillingen uitdempen. De invloed van de fundering op de trillingen is afhankelijk van een aantal parameters:

- Type fundering (op staal, op palen, oude strokenfundering)
- Afmetingen en gewicht van het gebouw
- Bodem waarop het gebouw staat

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

In Buildyn wordt de invloed van de stijfheid van het gebouw als geheel (de zogenaamde rigid-body-mode) verdisconteerd in de stijfheid van de fundering. Overige stijfheidseffecten worden meegenomen in de draagconstructie

Draagconstructie

De trillingen worden door de draagconstructie vaak versterkt. Hierbij zijn meerdere effecten te onderscheiden, waarbij met name rotatie van het gebouw als geheel (op de ondergrond) en doorbuiging een rol spelen.

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

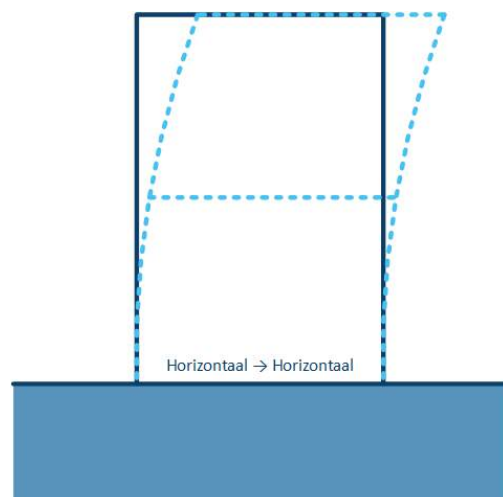
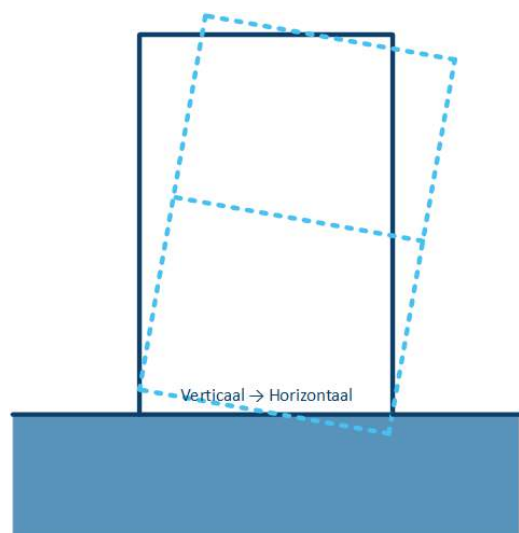
Dit effect wordt in Buildyn weergegeven als H_{zx} , en is afhankelijk van:

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

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

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

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



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

Vloeren

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

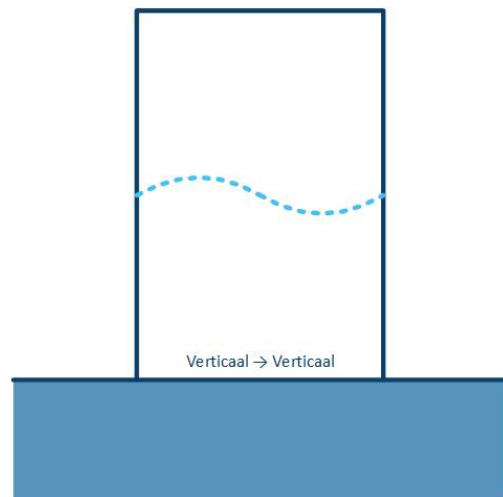
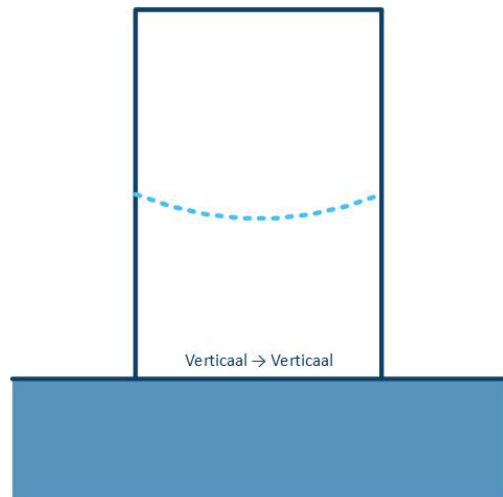
De eerste buigmodus van de vloer (bij de eerste eigenfrequentie) is simpele doorbuiging, zoals weergegeven in de principeschets rechts. Met name de eigenfrequentie (de frequentie waarvoor de vloer gevoelig is) en de demping bepalen in hoeverre de trillingen worden opgeslingerd. De trillingen zijn het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

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

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

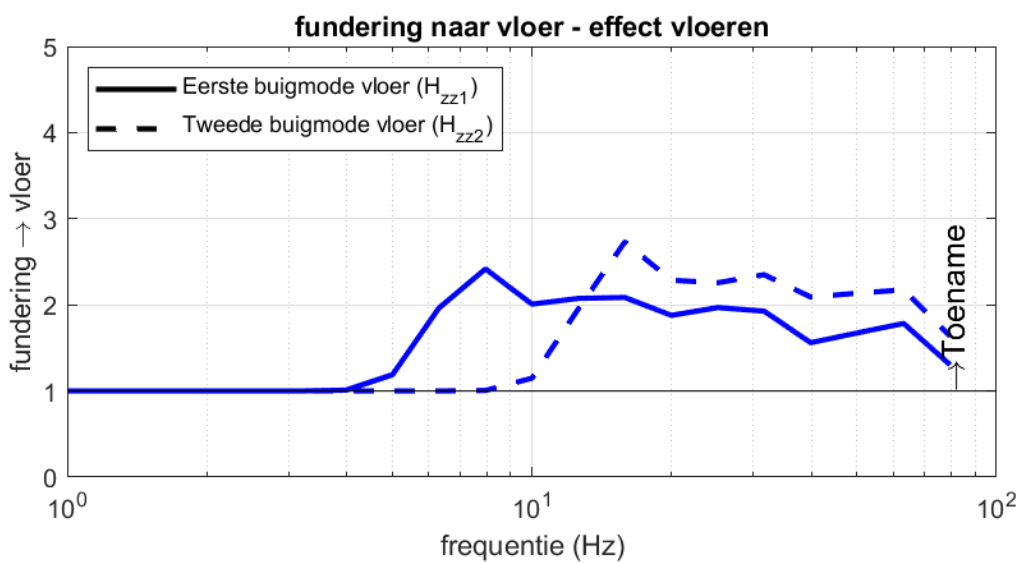
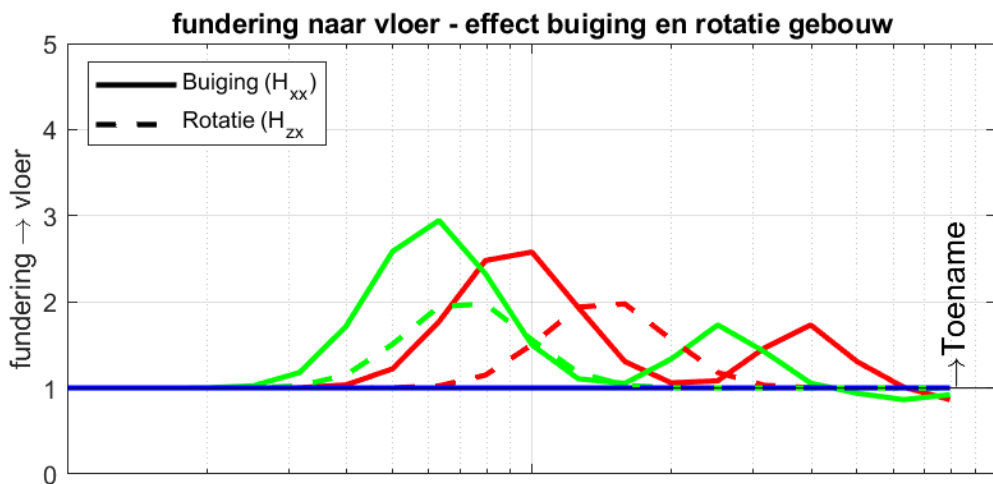
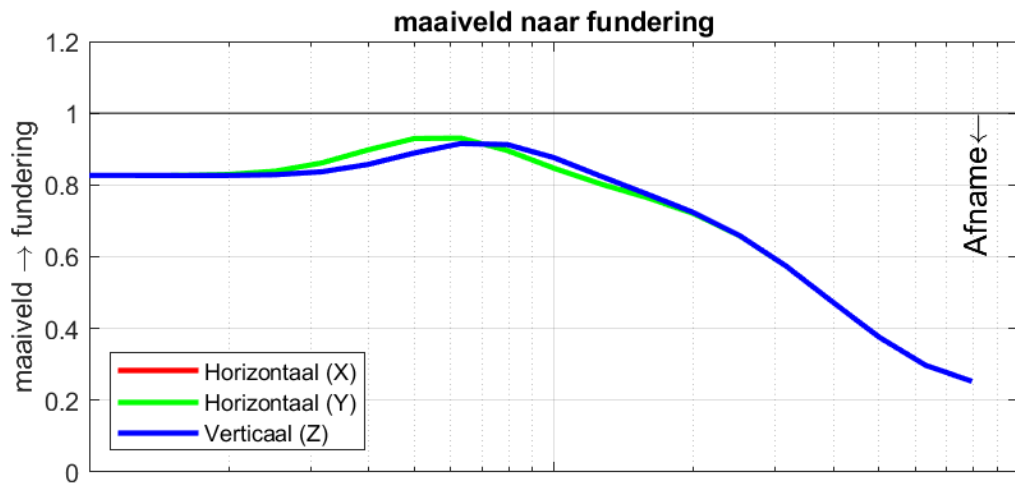
Bij de tweede buigmodus van de vloer (bij de tweede eigenfrequentie) zijn de trillingen maximaal op ongeveer $\frac{1}{4}$ van het vloerveld, zie de principeschets rechts.

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

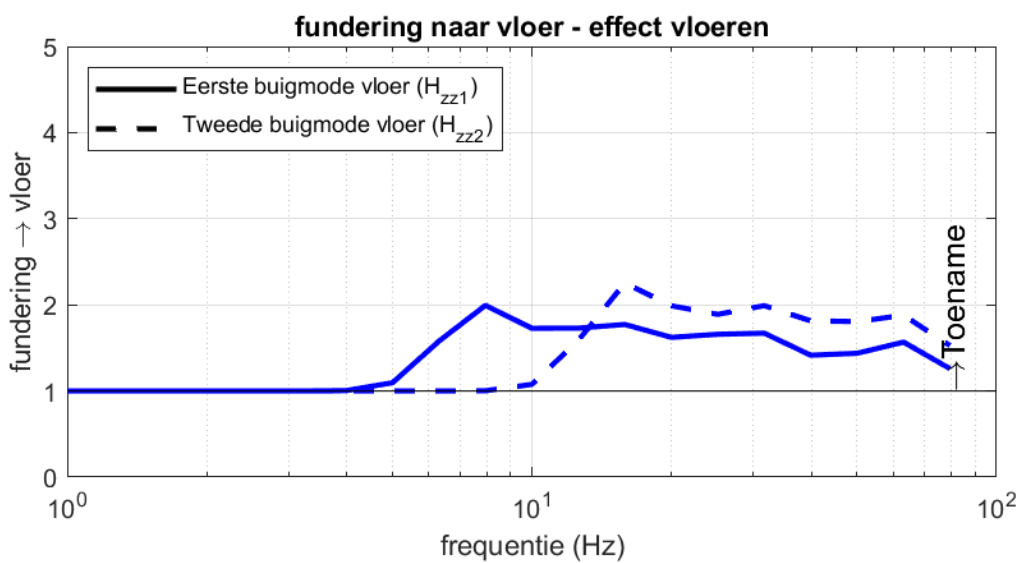
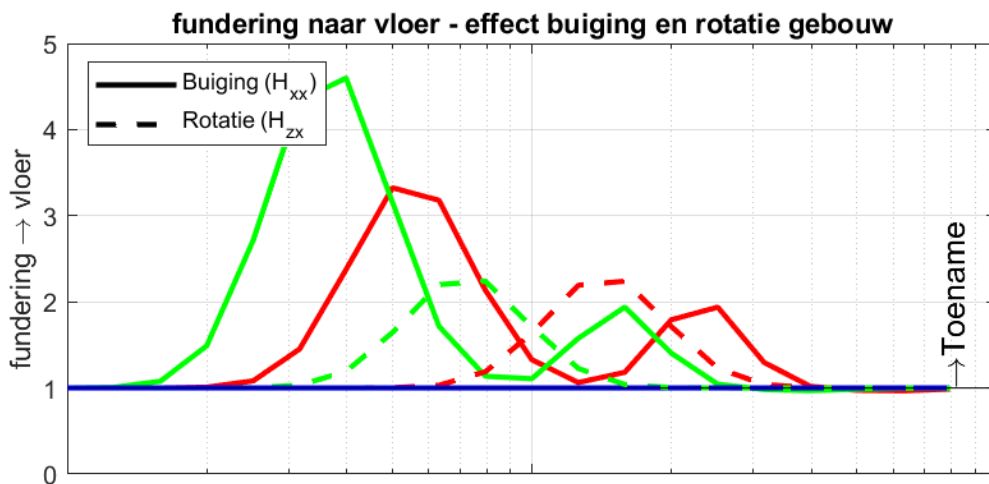
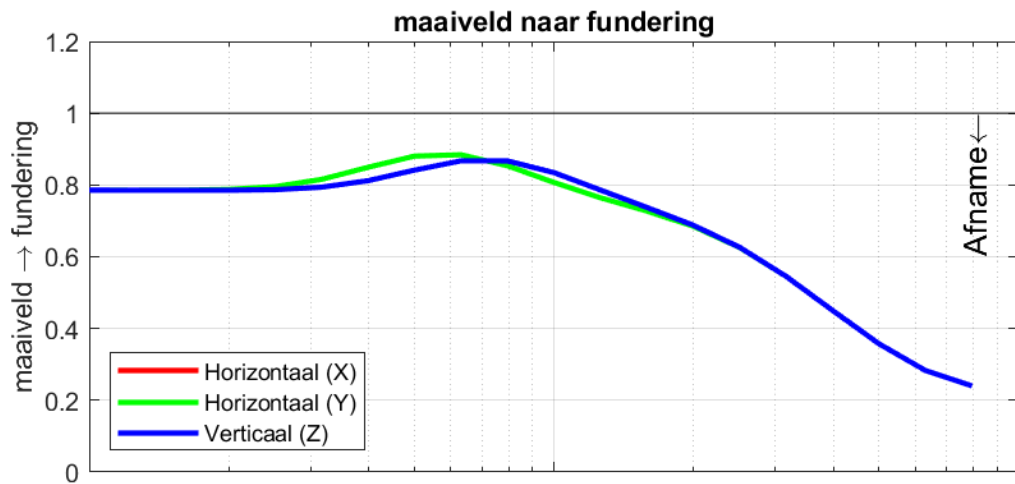


Resultaten

De resultaten uit de Buildyn-berekeningen voor een representatieve, grondgebonden woning zijn weergegeven in Figuur 16 en voor de appartementen in Figuur 17. Voor grotere gebouwen worden de trillingen wat sterker uitgedempt van maaiveld naar fundering en reageert het gebouw horizontaal anders. Het effect van de vloeren is afhankelijk van de beukmaat en het vloertype, en verschilt ook per onderzochte variant.



Figuur 16 Buildyn-resultaten voor de grondgebonden woningen met een beukmaat van 6.0 m

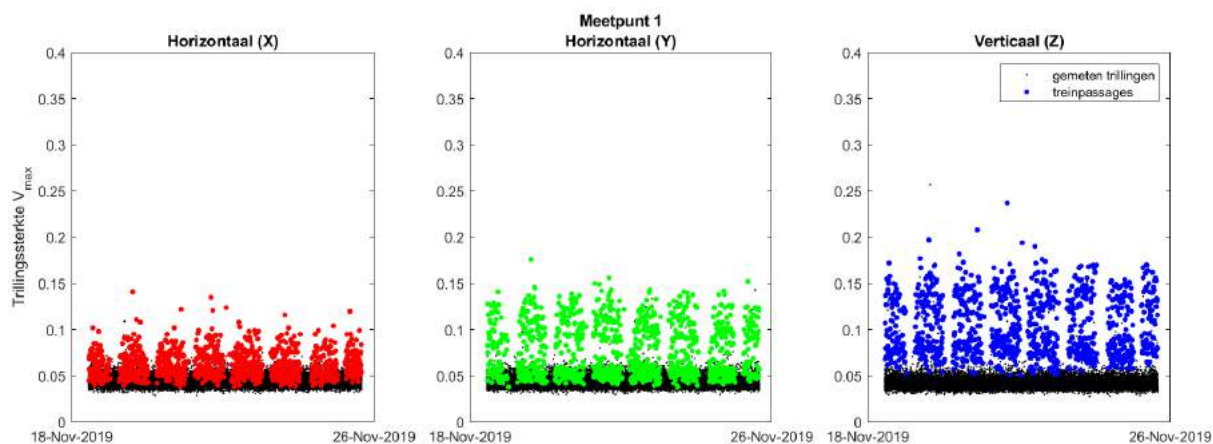


Figuur 17 Buildyn-resultaten voor de appartementen met een beukmaat van 6.0 m

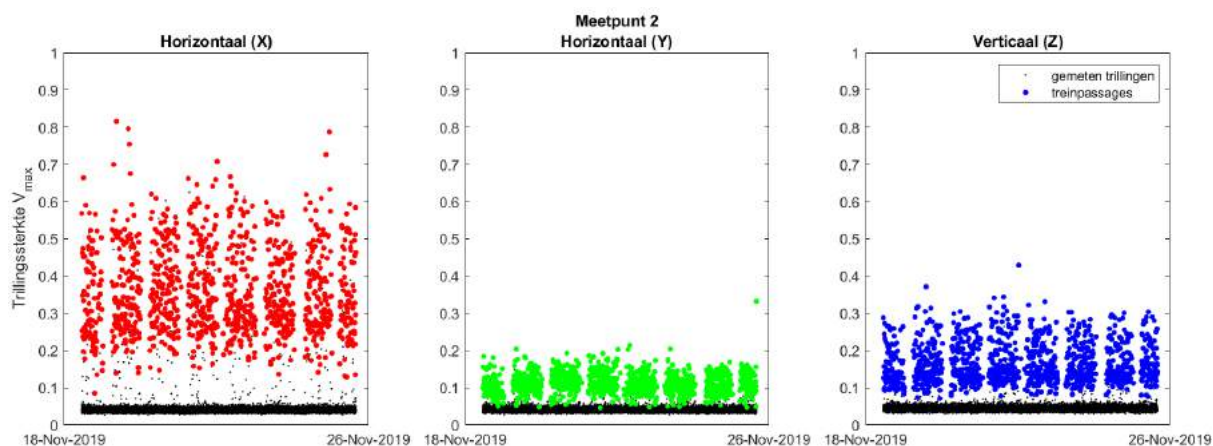


Resultaten metingen

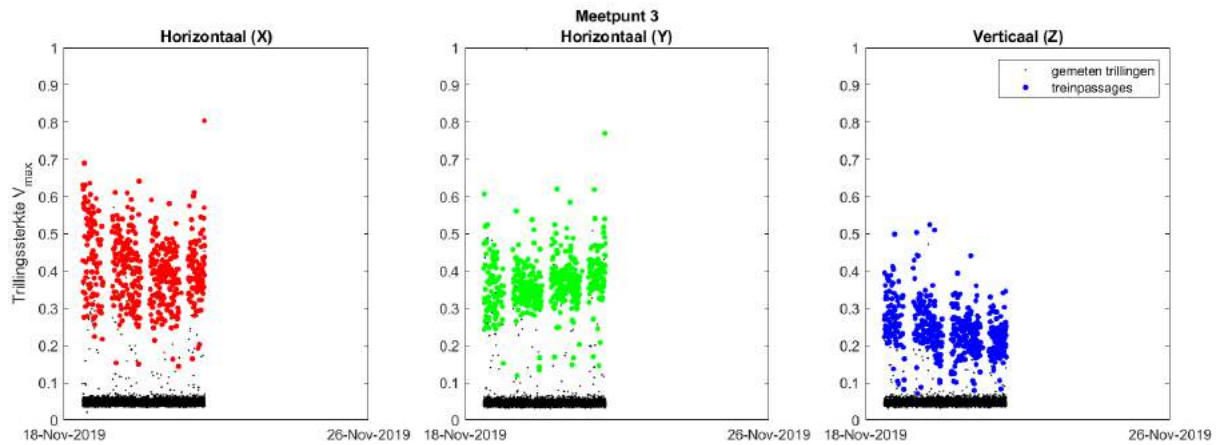
De trillingen op de verschillende meetpunten zijn weergegeven in Figuur 18 tot en met Figuur 22.



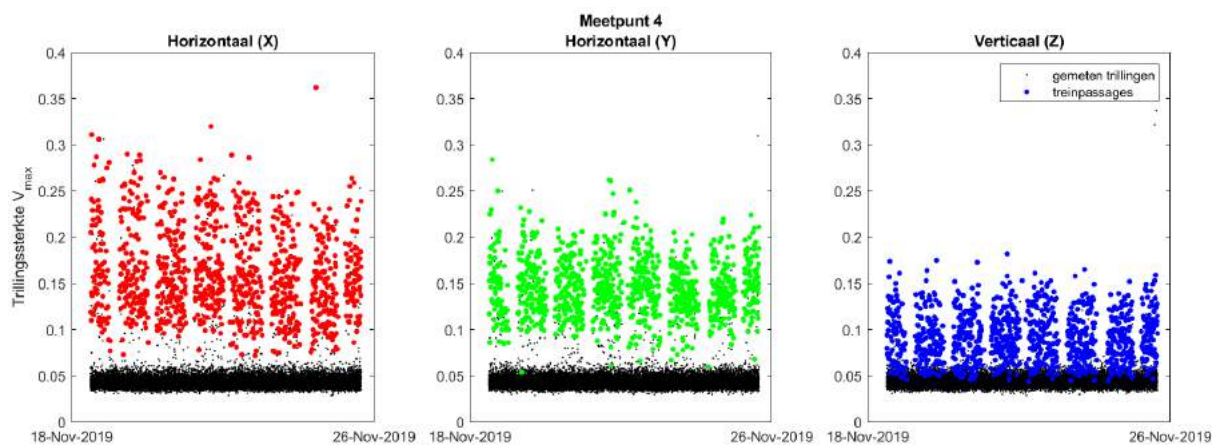
Figuur 18 Trillingen aan fundering Jan Plassensteeg 14



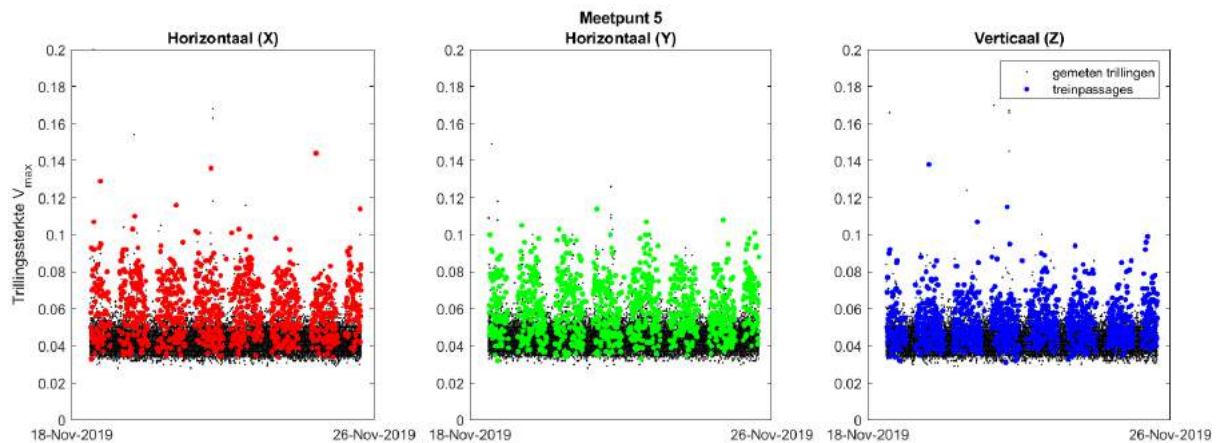
Figuur 19 Trillingen aan fundering postal Jan Tijensteeg 18. Meetpunt in horizontale X-richting is niet representatief, de gevel van de opstal is in die richting niet stijf genoeg



Figuur 20 Trillingen op maaiveld op 20 meter van het spoor. Meetpunt heeft ca. 4 dagen gemeten, daarna is de meter door externe invloed (trekker over meetpunt heen gereden) uitgevallen

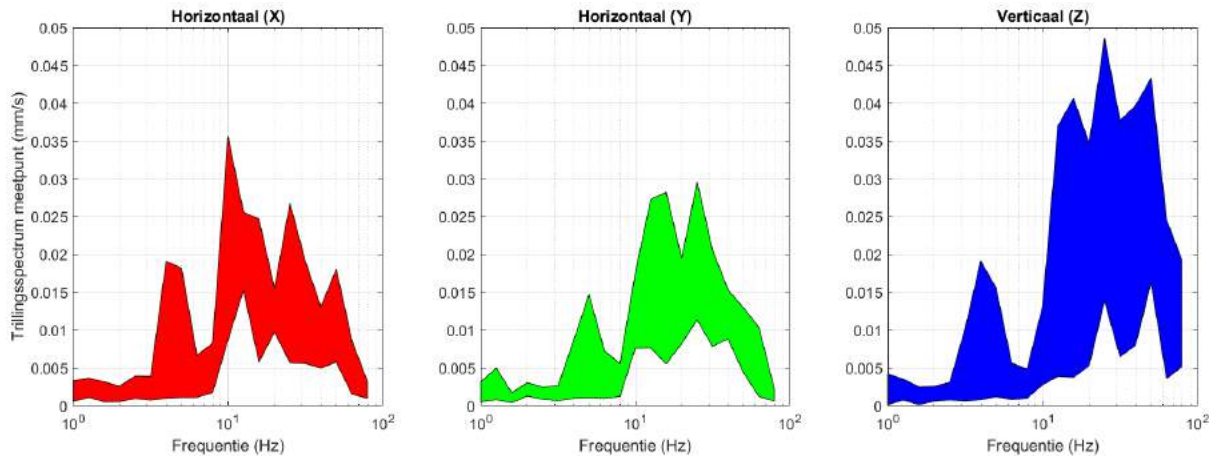


Figuur 21 Trillingen op maaiveld op 50 meter van het spoor

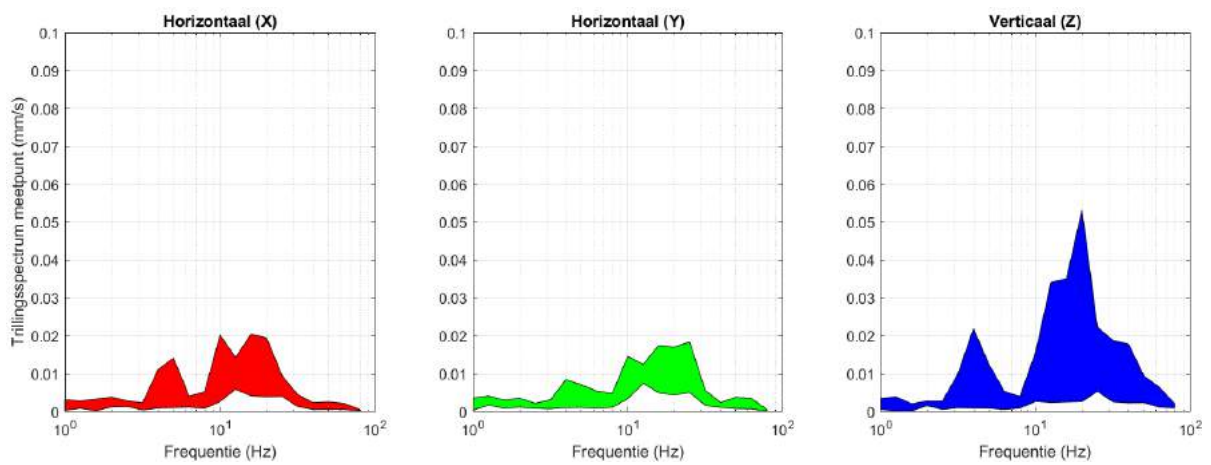


Figuur 22 Trillingen op maaiveld op 100 meter van het spoor

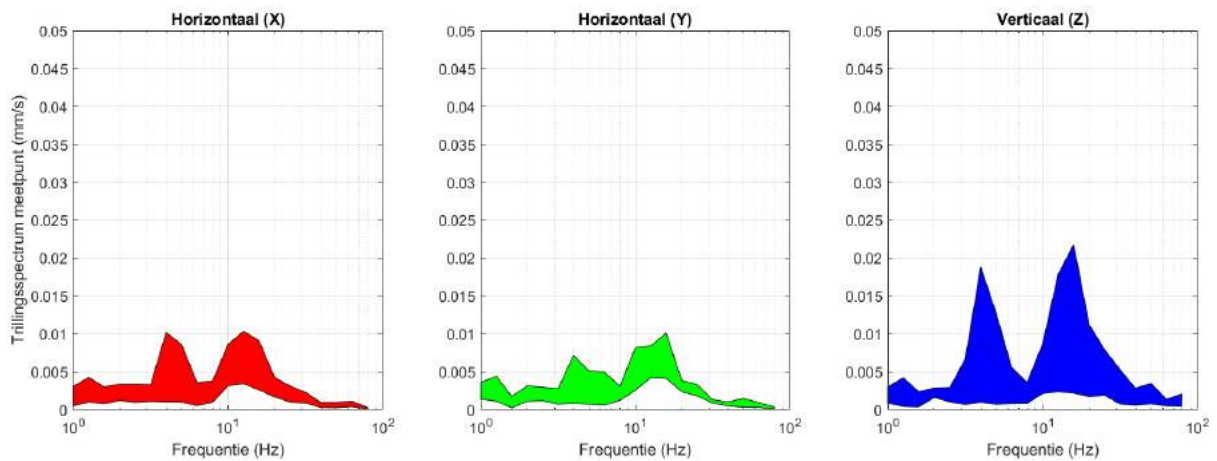
De trillingspectra op maaiveld zijn weergegeven in .



Figuur 23 Trilingspectra op 20 meter van het spoor



Figuur 24 Trilingspectra op 50 meter van het spoor

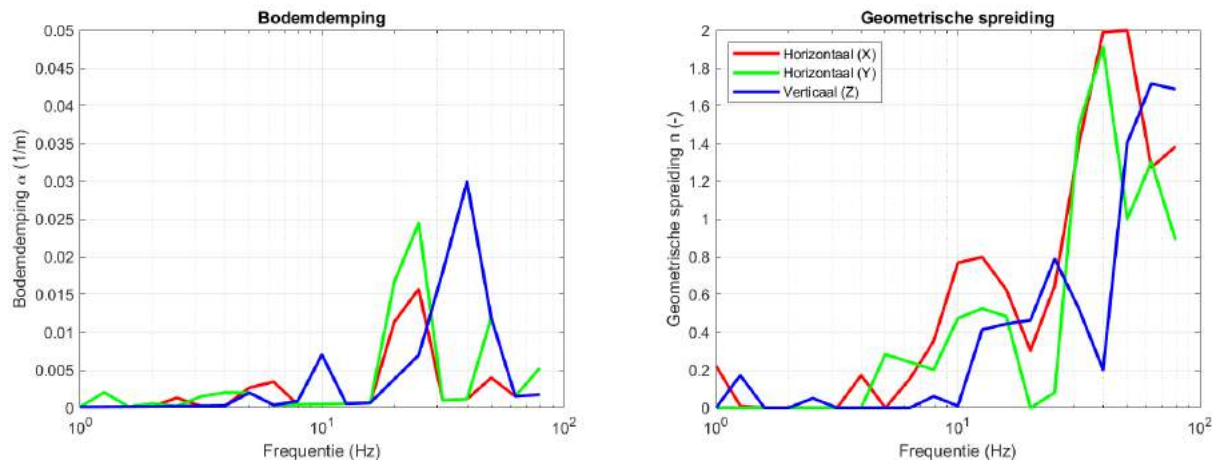


Figuur 25 Trilingspectra op 100 meter van het spoor

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

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

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 a voor de bodemdemping. De geometrische spreiding en bodemdemping zijn weergegeven in Figuur 26.

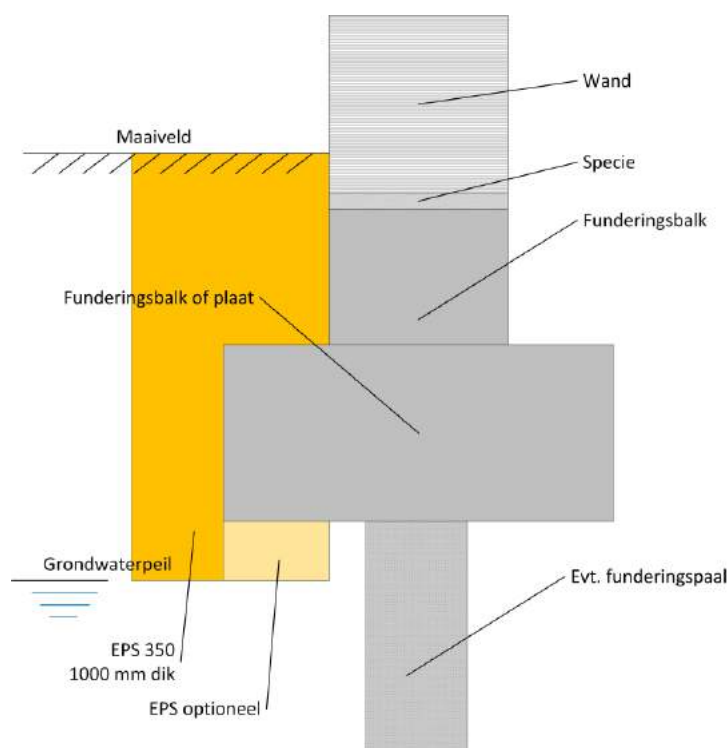


Figuur 26 Bodemdemping a (links) en geometrische spreiding n (rechts) als functie van de frequentie

IV Principedetails maatregelen

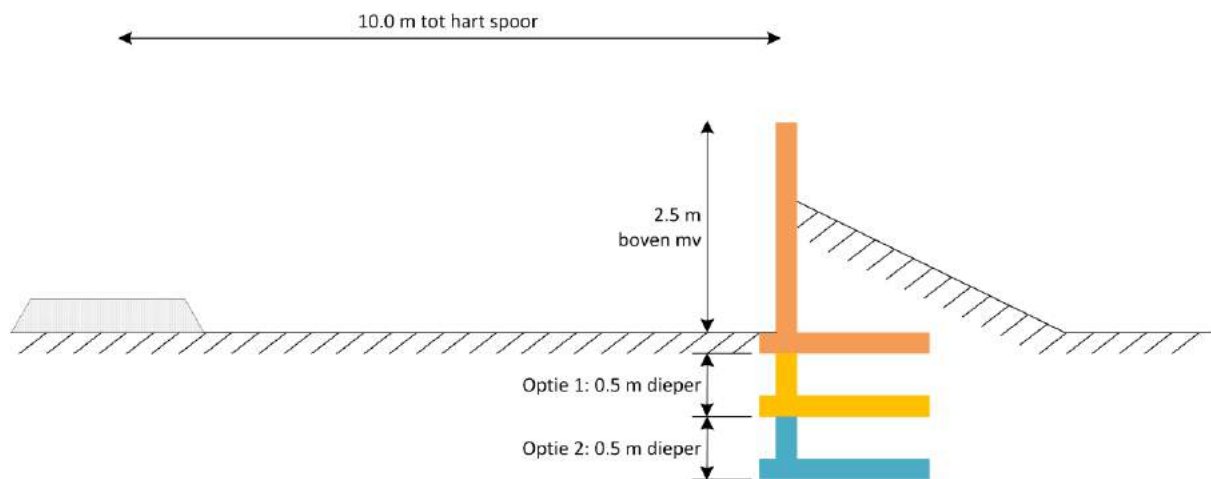
Deze bijlage bevat achtergrondinformatie en principedetails van de voorgestelde maatregelen.

Een principeschets van het bekleden van de fundering met EPS (piepschuim) is weergegeven in Figuur 27. De EPS-kwaliteit dient wat zwaarder te zijn dan standaard i.v.m. de gronddruk. De minimaal benodigde dikte voor voldoende reductie is zo'n 1000 mm, om opdrijven te voorkomen moet dit tot de GHG-waarde van het grondwaterpeil worden aangebracht en verankerd te worden aan de fundering. Een principeschets is weergegeven in Figuur 27. Belangrijk is dat bij maaiveld eventueel iets verjongd kan worden, maar de minimale breedte moet meer dan 500 mm zijn. Afdekken met een dunne zandlaag (max. 100 mm) en tegels is mogelijk.



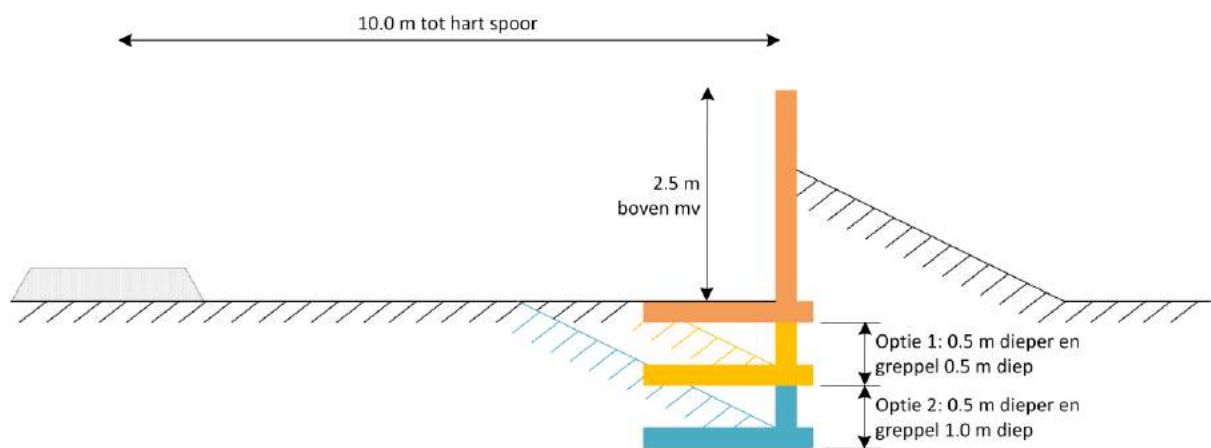
Figuur 27 Fundering met EPS-scherm ervoor

Principe-oplossingen voor het combineren van het geluidsscherm met een trillingsscherm zijn weergegeven in Figuur 28 voor een situatie waarbij het geluidsscherm wordt uitgevoerd als een prefab betonnen L-wand 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.



Figuur 28 Geluidsscherm gecombineerd met trillingsscherm

Indien de L-wand met de voet richting het spoor wordt geplaatst (maar dan komt deze wel in de vergunningszone van ProRail terecht bij de huidige afstand), dan is combinatie met een greppel mogelijk en is het effect van de maatregel groter, zie Figuur 29.



Figuur 29 Geluidsscherm gecombineerd met trillingsscherm, met voet richting het spoor en een greppel