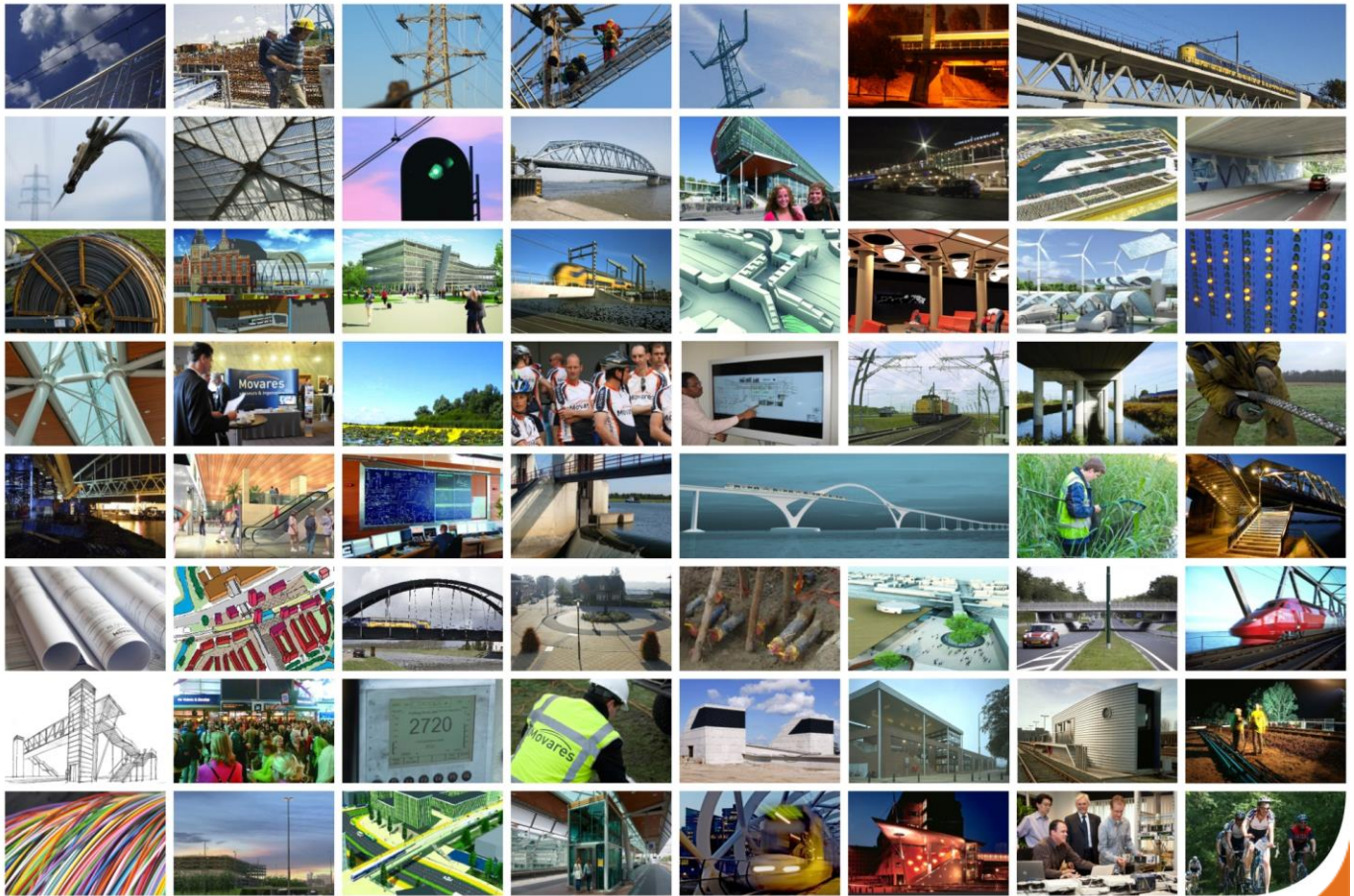




27 maart 2019 - Versie 4.0

Autorisatieblad

Tiny Houses Delft

Trillingsonderzoek

	Naam	Akkoord	Datum
Opgesteld door	Geerlof RW (Wessel)	✓	27-03-2019
Gecontroleerd door	Boon, PM	✓	27-03-2019
Vrijgegeven door	Wijnands, MNJH	✓	27-03-2019

Op dit autorisatieblad ontbreken de handtekeningen wegens de digitale verwerking van ons vrijgaveproces. Dit rapport is aantoonbaar vrijgegeven.

Samenvatting

Aan de Vulcanusweg 295-305 in Delft worden bij het spoor tiny houses ontwikkeld. Deze locatie grenst aan de spoorlijn Delft-Rotterdam. De woningen komen binnen een zone van 100 meter vanaf het spoor te liggen. Gezien de afstand tot het spoor is onderzoek naar trillingen ten gevolge van (goederen-) treinen nodig om het verwachte trillingsniveau in de geplande woningen vast te stellen en indien nodig aanpassingen aan de bebouwing of maatregelen voor te stellen om een acceptabel woon- en leefklimaat te garanderen.

Doel van dit onderzoek is om vast te stellen of er sprake is van trillingshinder in de geplande bebouwing, en zo ja, onder welke constructieve randvoorwaarden dit wel en niet het geval is. Met behulp van deze informatie kunnen bewoners actief worden geïnformeerd zodat zij eventueel maatregelen aan hun woning kunnen treffen.

Bij ontbreken van wettelijke normen voor trillingshinder is hier, zoals gebruikelijk, getoetst aan de SBR B-richtlijn van de Stichting BouwResearch.

Op basis van de resultaten van dit onderzoek kan een overschrijding van de streefwaarden voor de maximale waarde (V_{max}) voor een nieuwe situatie niet worden uitgesloten. Dit komt vooral door de passages van incidentele, afwijkende goederentreinen, die hoge trillingen veroorzaken bij lage frequenties. Het betreft hier enkele goederentreinen per week. Er zijn ook incidentele overschrijdingen van de maximale waarde door reizigerstreinen, maar deze overschrijdingen zijn veel kleiner dan die door de goederentreinen. Ook hier gaat het om enkele malen per week. Voor de overschrijdingen van de maximale waarde zijn de goederentreinen derhalve maatgevend. De streefwaarden voor de tijdsgemiddelde waarde (V_{per}) worden niet overschreden. Alles bij elkaar zal dit trillingsbeeld volgens ons niet tot een onacceptabel woon- en leefklimaat leiden.

De trillingen hebben lage frequenties. Daardoor kan uitsluitend het toevoegen van massa een effectieve maatregel zijn. Voor tiny houses kan dit in de vorm van zwaardere vloerbalken, bijvoorbeeld 15 cm hoog in plaats van 10 cm hoog. (Een alternatief zoals een massieve fundering is voor dit type bebouwing niet haalbaar. Toepassing van damping door middel van slappe veren onder de gebouwen is door de lage trillingsfrequenties geen optie.)

Verder kan worden overwogen om de te bouwen tiny houses vooral in de zone verder van het spoor te plaatsen, omdat de trillingen snel afnemen met de afstand: in de eerste 10 meter van het bouwvlak vindt ca. 30 procent afname plaats. (Een afname van 30 procent wordt als een voelbare afname beschouwd.) Vanaf 60 m van het spoor wordt de streefwaarde voor het maximale trillingsniveau (V_{max}) voor de nacht voor nieuwbouw niet overschreden; vanaf 30 m geldt dit reeds voor bestaande bouw.

Wij adviseren u de toekomstige bewoners te informeren over de te verwachten trillingen. Over de constructie adviseren wij u om richting de bouwers in overweging te geven een zwaarder vloertype te gebruiken zoals hierboven genoemd. Hierbij is het

aan de ontwikkelaars en de bewoners om de keus te maken tussen de kosten van de extra investeringen versus het effect ervan.

Inhoudsopgave

Samenvatting	1
1 Inleiding	5
1.1 Aanleiding	5
1.2 Doel	5
1.3 Aanpak	5
1.4 Leeswijzer	5
2 Situatiebeschrijving en uitgangspunten	7
2.1 Inleiding	7
2.2 Omgeving	7
2.3 Bouwlocatie	8
2.4 Geplande bebouwing	9
3 Beoordelingskader	11
3.1 Algemeen	11
3.2 Grootheden	11
3.3 Streefwaarden	11
3.3.1. <i>Nieuwe of bestaande situatie</i>	12
3.3.2. <i>Periode gedurende de dag</i>	12
3.3.3. <i>Gebouwfunctie</i>	12
3.4 Beoordeling in huidige onderzoek	12
4 Meetresultaten	14
4.1 Inleiding	14
4.2 Meetresultaten	14
4.3 Vergelijking onderzoek Peutz	15
5 Analyse en berekeningen	16
5.1 Prognosemethode	16
5.1.1. <i>Overdracht tussen meetpunten</i>	17
5.1.2. <i>Overdracht in gebouwen</i>	17
5.2 Resultaten	18
5.2.1. <i>Verwachte trillingen in gebouwen</i>	18
5.2.2. <i>Bovengrens van trillingen in gebouwen</i>	20
5.3 Betrouwbaarheid	21
5.4 Voorkomen van trillingshinder	21
6 Conclusies en aanbevelingen	23
6.1 Conclusies	23
6.2 Aanbevelingen	23

Colofon	24
Bijlage I - Gegevens van de metingen	i
Bijlage II - Meetresultaten	ii
Bijlage III – Bodemgegevens	iv

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In Delft worden bij het spoor tiny houses ontwikkeld aan de Vulcanusweg 295-305. De spoorlijn Delft-Rotterdam grenst aan de locatie. De woningen komen binnen een zone van 100 meter vanaf het spoor te liggen. Uit onderzoek dat op een nabijgelegen locatie (Nieuw Delft) is uitgevoerd, en naar aanleiding van een indicatief onderzoek van Peutz, is onderzoek naar trillingen ten gevolge van (goederen-) treinen nodig om (1) het verwachte trillingsniveau in de geplande woningen vast te stellen en (2) indien nodig aanpassingen aan de bebouwing of maatregelen voor te stellen om een acceptabel woon- en leefklimaat te garanderen.

1.2 Doel

U heeft ons gevraagd om een onderzoek uit te voeren om vast te stellen:

1. Of er sprake is van trillingshinder in de geplande bebouwing, en zo ja, onder welke constructieve randvoorwaarden dit wel en niet het geval is.
2. Indien trillingshinder met eenvoudige constructieve aanpassingen niet is te voorkomen, welke maatregelen dan zullen zorgen voor een acceptabel woon- en leefklimaat.

Hiermee kunt u bewoners hierover actief informeren, zodat zij eventueel maatregelen kunnen nemen. Ten behoeve hiervan zullen wij ook aandacht schenken aan het effect van opslingeren van de trillingen in de woningen.

Tenslotte heeft u ons gevraagd rekening te houden met het tracébesluit *Programma Hoogfrequent Spoorvervoer viersporigheid Rijswijk - Delft Zuid* van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu. U wilt weten in hoeverre de uitkomsten van het onderzoek door PHS worden beïnvloed.

1.3 Aanpak

Trillingen van spoorverkeer zijn locatiespecifiek. Wij hebben daarom de volgende aanpak gevolgd:

1. Uitvoeren van een trillingsmeting ter plaatse van het plangebied. Deze meting bestaat uit twee onderdelen:
 - a. Meting waarmee wij de uitdamping van de trillingen met de afstand vaststellen (hoe verder van het spoor, hoe lager de trillingen). Deze meting heeft een beperkte meetduur van enkele uren, voldoende om de eigenschappen van de bodem en de uitdamping met de afstand vast te stellen.
 - b. Meting waarmee wij over langere tijd (1 week) de trillingen vaststellen. Het grillige karakter van goederentreinen (grote variatie in passeertijd, zwaarte, etc.) maakt een meetduur van een week wenselijk.
2. Het maken van een prognose van de trillingsniveaus in de geplande woningen. Omdat de constructieve eigenschappen nog niet bekend zijn, is een aantal verschillende constructietypes beschouwd.

Op basis van deze resultaten geven wij een advies over of, en zo ja, hoe trillingshinder in de woningen kan worden voorkomen.

1.4 Leeswijzer

De situatiebeschrijving is weergegeven in hoofdstuk 2. Het beoordelingskader voor trillingshinder staat beschreven in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 zijn de meetresultaten

weergegeven. Hoofdstuk 5 bevat een analyse van de meetresultaten en advies t.a.v. (bouwkundige) optimalisaties om trillingshinder te voorkomen. Het laatste hoofdstuk beschrijft de conclusies en aanbevelingen.

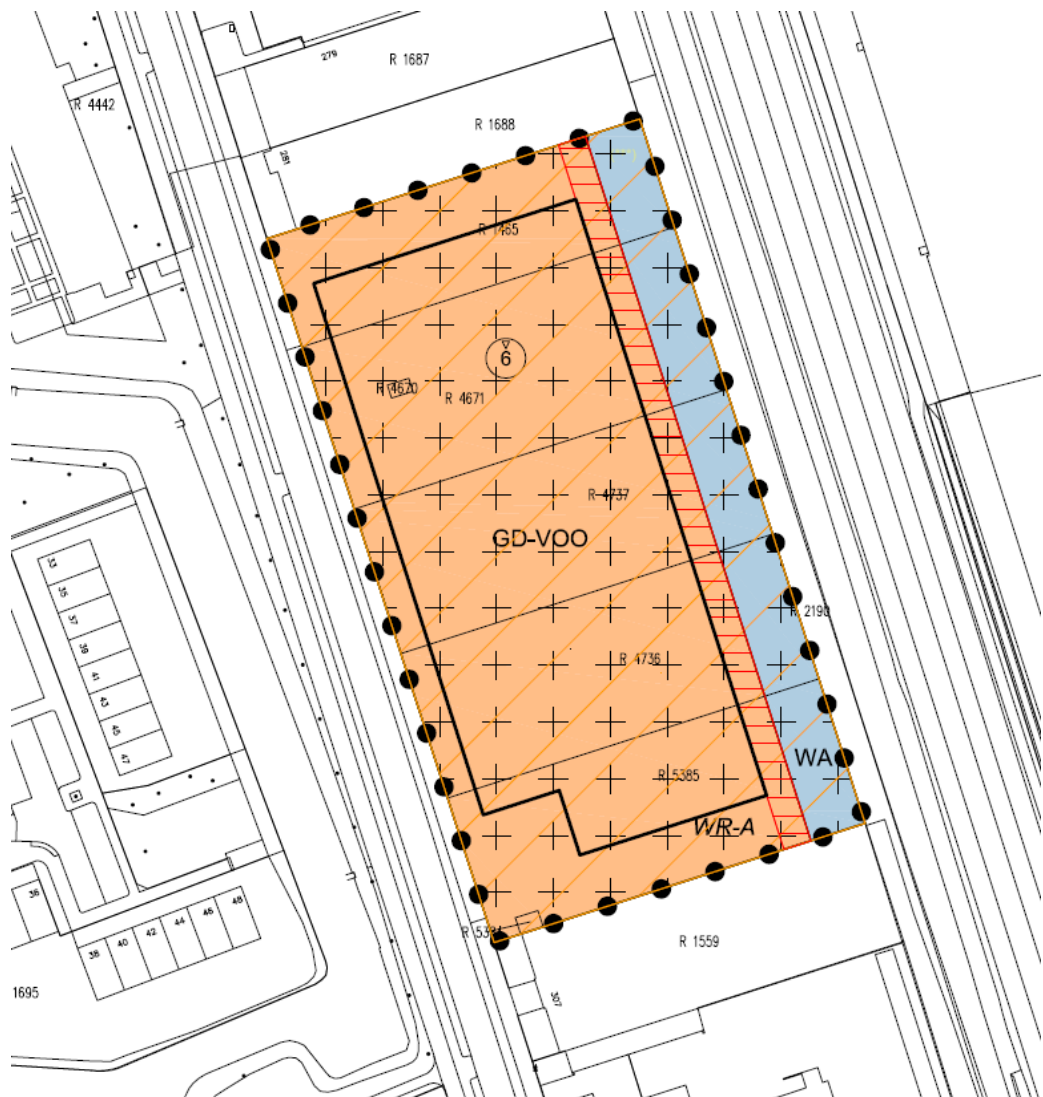
2 Situatiebeschrijving en uitgangspunten

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk bevat een beschrijving van de meetlocatie en de uitgangspunten voor het onderzoek.

2.2 Omgeving

De onderzoekslocatie bevindt zich ten westen van de spoorlijn Rijswijk – Rotterdam, zie Figuur 2-1. De spoorlijn wordt zowel door reizigers- als door goederenverkeer gebruikt. De exacte bouwlocaties zijn nog niet bekend ten tijde van dit onderzoek, maar het bouwvlak bevindt zich tussen de 32 en de 80 meter van de huidige spoorlijn.



Figuur 2-1 Plangebied Tiny Houses Delft

In de nabije toekomst zal, mede als gevolg van PHS-Rijswijk, het huidige tweesporige traject uitgebreid worden naar vierbaans spoor. Hierdoor zal de afstand tussen de te realiseren woningen en het spoorverkeer, en dus de trillingsbron, afnemen. Het bouwvlak zal zich dan zo'n 24 tot 72 meter van het spoor bevinden.

De rijksnelheden van het treinverkeer zijn weergegeven in Tabel 2-1, en gebaseerd op het *Geluidsregister Spoor*.

Tabel 2-1 *Rijksnelheden treinverkeer conform het geluidsregister spoor ter hoogte van de Abtwoudseweg*

Corridor	Type trein	Snelheid ((km/h)
Delft – Rotterdam	Reizigerstreinen	70 – 80
Delft – Rotterdam	Goederentreinen	90
Rotterdam - Delft	Reizigerstreinen	100 – 130
Rotterdam - Delft	Goederentreinen	90

Het aantal treinen gedurende de dag, avond en nacht is weergegeven in Tabel 2-2.

Tabel 2-2 *Treinintensiteiten per uur*

	Reizigers	Goederen
Dag	24,00	0,10
Avond	24,00	0,10
Nacht	3,00	0,10

Als gevolg van PHS-Rijswijk zullen er in de nabije toekomst vooral meer sprinters gaan rijden op dit traject. Tabel 2-3 geeft de verwachte toename van het treinverkeer in 2020 weer. Het effect van de verwachte toename van het treinverkeer is verwerkt in de berekeningen zoals gepresenteerd in hoofdstuk 5.

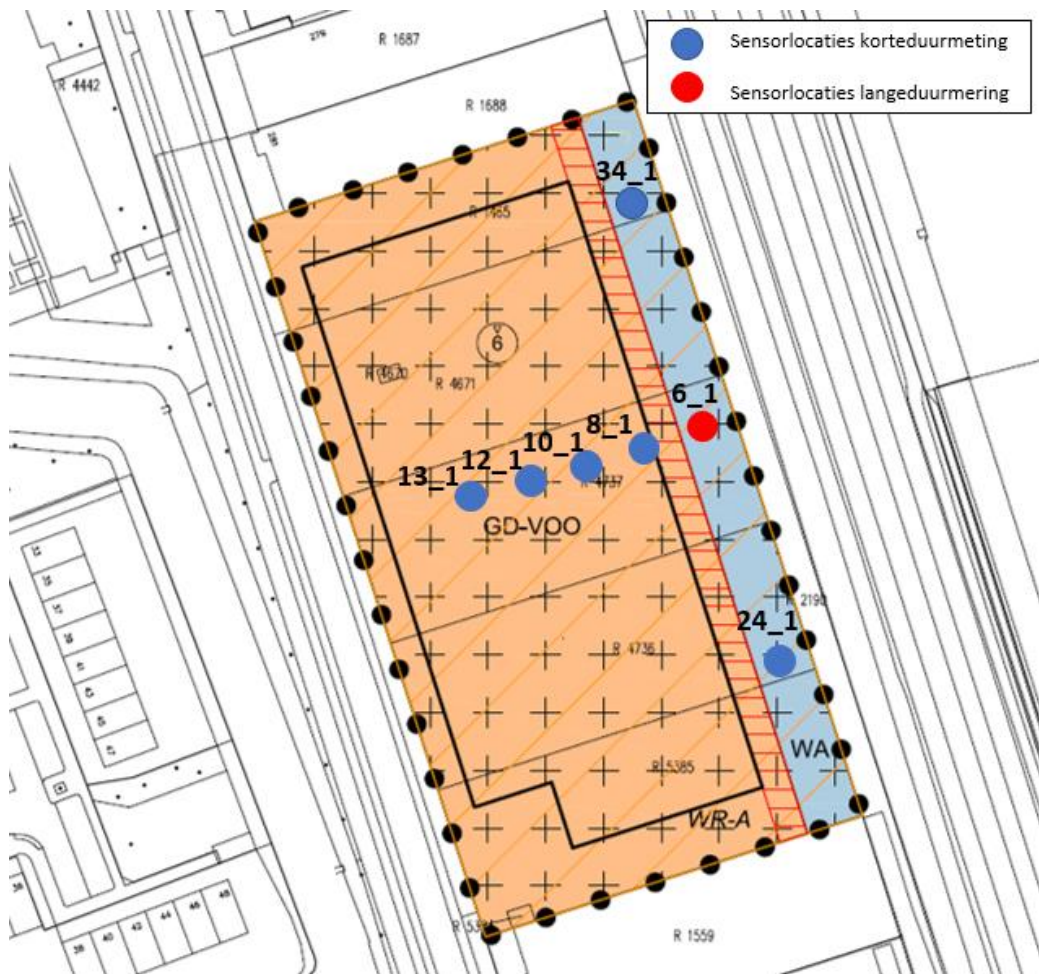
Tabel 2-3 *Toekomstige treinintensiteiten per uur*

	Reizigers	Goederen
Dag	28,00	0,25
Avond	28,00	0,25
Nacht	3,00	0,25

2.3 Bouwlocatie

De metingen zijn uitgevoerd op maaiveldniveau op de locatie van de geplande nieuwbouw. Een plattegrond van de locatie met daarop de meetlocaties is weergegeven in Figuur 2-2.

Op deze locatie zijn twee metingen uitgevoerd op maaiveld: een onbemande lange meting (twee weken) met één meetpunt en een bemande korte meting met zes extra meetpunten op meerdere locaties. Het meetpunt voor de lange meting is ook tijdens de korte meting gebruikt. Met de gegevens van de langeduurmeting is het trillingsbeeld van een breed scala aan passerende treinen bepaald voor een punt op de project locatie. Met de extra meetpunten van de korteduurmeting zijn de effecten zoals het uitdempen van trillingen met de afstand, en de invloed van de variabiliteit in de ondergrond van de projectlocatie verrekend.



Figuur 2-2 Meetlocatie en meetpunten

2.4 Geplande bebouwing

Doordat de toekomstige bewoners grote vrijheid krijgen in het vormgeven van hun tiny houses, is op dit moment niet exact bekend wat de constructieve eigenschappen van de woningen zullen worden. Wel is bekend dat het netto woonoppervlak maximaal 40 vierkante meter mag bedragen, en dat de woningen maximaal 6 meter hoog zullen worden.

Voor dit onderzoek is gekeken naar een aantal tiny houses die ten tijde van dit onderzoek op de markt verkrijgbaar zijn en aan de gestelde voorwaarden voldoen. Voorbeelden zijn de Heijmans One en het Tiny House van Nezzt. Aan de hand van deze en andere voorbeelden zijn varianten voor de berekeningen bepaald. Deze zijn weergegeven in Tabel 2-4.

Omdat een predictie altijd bepaalde onzekerheden met zich mee brengt (door onzekerheden in het predictiemodel, het gedrag van de te gebruiken materialen en verschillen tussen de uiteindelijke as-built situatie en de ontwerpsituatie), is zowel een verwachte trillingssituatie als een maximale trillingssituatie berekend per constructietype, op basis van de gegeven eigenschappen.

Tabel 2-4 *Eigenschappen van de onderzochte varianten*

Nr	Verdieping	Beukmaat	Vloertype	Funderingstype
1	BG	3,5	Hout	Staal
2	1 ^e	3,5	Hout	Staal
3	BG	4,0	Hout	Staal
4	BG	2,5	Hout	Staal
5	1 ^e	2,5	Hout	Staal

3 Beoordelingskader

3.1 Algemeen

Treinverkeer kan aanleiding geven tot trillingen in gebouwen. Deze trillingen kunnen leiden tot hinder voor omwonenden. De Duitse DIN 4150-2 (1999) norm beschrijft criteria voor het meten en beoordelen van trillingen. De Nederlandse SBR-richtlijn (2002) is hierop gebaseerd. Deze SBR-richtlijn is in Nederland de meest gebruikte richtlijn voor het beoordelen van trillingen en bestaat uit 3 delen:

- Deel A: schade aan gebouwen;
- Deel B: hinder voor personen in gebouwen;
- Deel C: verstoring van apparatuur.

Op basis van langdurige ervaring met trillingen langs het spoor is schade als gevolg van passerende treinen op een afstand van meer dan 30 meter tot het spoor onwaarschijnlijk. Er is daarom niet beoordeeld op de SBR A-richtlijn. Ook verstoring van apparatuur (SBR C-richtlijn) is niet aan de orde. In dit onderzoek is daarom alleen beoordeeld op de SBR B-richtlijn.

De SBR B-richtlijn heeft geen wettelijke status.¹ Daarom bevat de richtlijnen 'streefwaarden'. Wettelijk kader ontbreekt.

3.2 Grootheden

Conform de SBR B-richtlijn worden twee grootheden bepaald:

1. De trillingssterkte V_{max} . Dit is een dimensieloze indicatie van de maximaal ervaren trillingen gedurende de meetperiode, de zogenaamde pieksterkte van de trillingen. Deze grootheid wordt bepaald per 30 seconden; zie par. 9.2 en 9.3 van de SBR B-richtlijn. Van al deze maximale waarden per 30 seconden wordt de maximale waarde bepaald, de $v_{eff, max}$. Vervolgens wordt, op basis van de vijftien hoogst gemeten waarden een statistische berekening uitgevoerd met als resultaat de trillingssterkte die niet wordt overschreden door 95 procent van de passerende treinen, de V_{max} . Deze trillingssterkte is beoordeeld op de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn;
2. De trillingsintensiteit V_{per} , een dimensieloze indicatie van het tijdsgemiddelde van de trillingen. Deze grootheid wordt bepaald door het kwadratisch gemiddelde te nemen van de maximale trillingssterkte per 30 seconden indien deze boven de drempelwaarde van 0.1 uitkomt. Trillingssnelheden onder de 0.1 zijn niet of nauwelijks voelbaar en worden niet meegenomen in de bepaling van V_{per} . Het kwadratisch gemiddelde wordt vervolgens gecorrigeerd voor de tijd waarin de trillingssnelheden boven de 0.1 uitkomen, zie ook par. 9.8 van de SBR B-richtlijn.

3.3 Streefwaarden

De SBR B-richtlijn kent drie typen streefwaarden:

1. A1, de onderste streefwaarde voor de trillingssterkte V_{max} ;
2. A2, de bovenste streefwaarde voor de trillingssterkte V_{max} ;
3. A3, de streefwaarde voor de trillingsintensiteit V_{per} .

¹ De richtlijnen voor bijvoorbeeld geluid hebben wel een wettelijke status.

De hoogte van de streefwaarden is afhankelijk van een aantal criteria:

1. Of er sprake is van een nieuwe of bestaande situatie;
2. Periode gedurende de dag;
3. Gebouwfunctie.

De verschillende criteria worden hieronder toegelicht.

3.3.1. Nieuwe of bestaande situatie

In de SBR B-richtlijn wordt onderscheid gemaakt tussen nieuwe en bestaande situaties, waarbij de streefwaarden voor nieuwe situaties strenger zijn dan voor bestaande situaties. Omdat het om nieuwe gebouwen gaat langs een bestaande spoorlijn, wordt het onderzoeksgebied beoordeeld als nieuwe situatie, zie par. 10.3 van de SBR B-richtlijn.

3.3.2. Periode gedurende de dag

De SBR B-richtlijn maakt daarnaast onderscheid tussen dag, avond en nacht. Hierbij geldt dat de streefwaarden van de trillingssterkten gedurende de nacht strenger zijn dan die gedurende de dag en avond. De SBR B-richtlijn kent de volgende perioden: dag (7.00 – 19.00 uur), avond (19.00 – 23.00 uur) en nacht (23.00 – 7.00 uur). De streefwaarden voor dag en avond zijn aan elkaar gelijk. Bij metingen aan treinverkeer worden gewoonlijk de streefwaarden voor de nacht gehanteerd, omdat deze strenger zijn dan die van de dag. Deze keuze is gerechtvaardigd omdat het treinverkeer 's nachts doorgaans vergelijkbare trillingen geeft als het treinverkeer overdag.

3.3.3. Gebouwfunctie

Als derde criterium wordt onderscheid gemaakt naar de functie van een gebouw. De SBR B-richtlijn kent de gebouwfuncties *Gezondheidszorg*, *Wonen*, *Kantoor*, *Bijeenkomsten* en *Kritische werkruimte*. Bij elke gebouwfunctie horen andere toegestane trillingssterktes. Op basis van deze drie criteria zijn de streefwaarden voor A1, A2 en A3 weergegeven in Tabel 3-1 voor nieuwe situaties. In de beoordeling is gekeken naar gebouwen met bestemming *wonen*, zie de omkaderde waarden in Tabel 3-1.

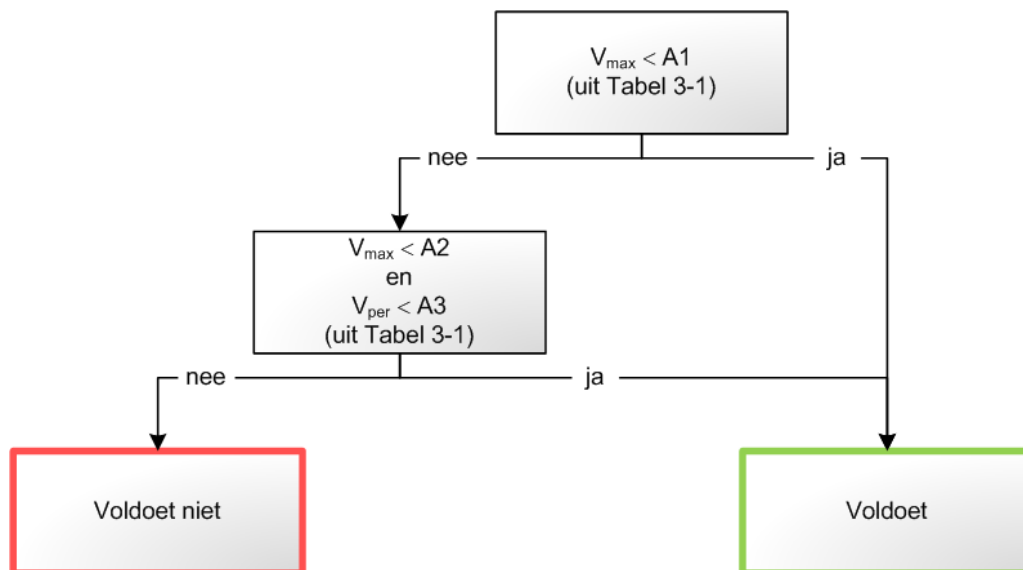
Tabel 3-1 Streefwaarden nieuwe situatie volgens SBR B-richtlijn

Gebouwfunctie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
<i>Gezondheidszorg</i>	0.1 ¹⁾	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
<i>Wonen</i>	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
<i>Kantoor</i>	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
<i>Bijeenkomsten</i>	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
<i>Kritische werkruimte</i>	0.1	0.1	–,–	0.1	0.1	–,–

¹⁾ Een streefwaarde van 0.1 betekent een waarde kleiner dan 0.15

3.4 Beoordeling in huidige onderzoek

Om te beoordelen of een situatie voldoet, dient het schema in Figuur 3-1 te worden doorlopen. Een locatie voldoet aan het beoordelingskader wanneer de trillingssterkte lager is dan A1. Een tweede mogelijkheid om te voldoen is als de trillingssterkte lager is dan A2 en de trillingsintensiteit lager is dan A3.



Figuur 3-1 Stroomschema beoordeling nieuwe situatie in SBR B-richtlijn

4 Meetresultaten

4.1 Inleiding

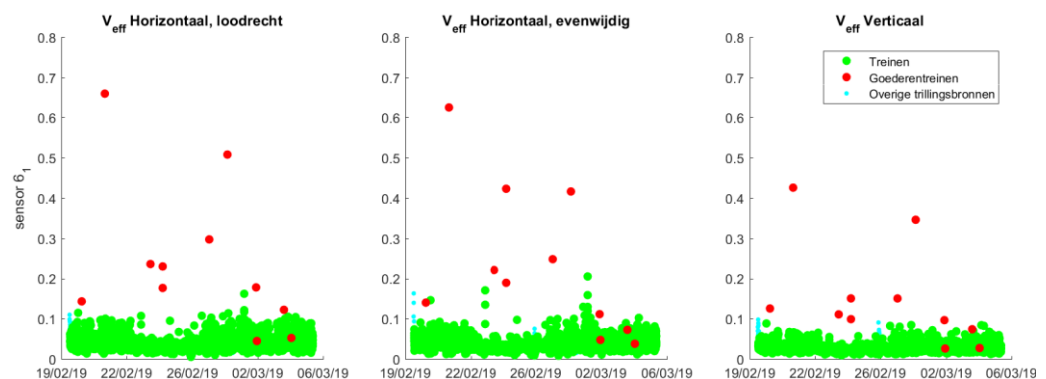
In dit hoofdstuk worden de resultaten van de metingen beschreven. Er zijn twee metingen uitgevoerd:

1. Een korte meting met meerdere meetpunten, bedoeld om de variatie in bodemopbouw en spreiding van de trillingsniveaus binnen het onderzoeksgebied vast te stellen;
2. Een lange meting met één meetpunt, om de variatie van de trillingen over de tijd vast te stellen. Op deze manier ontstaat een representatief beeld van de trillingen over een looptijd van een week.

4.2 Meetresultaten

De gemeten trillingssnelheden van de treinen tijdens de lange meting zijn per richting weergegeven in Figuur 4-1. Dit betreft de trillingen op maaiveld op ca. 22 meter afstand van het spoor. Op maaiveld veroorzaken de goederentreinen grote uitschieters, maar zijn er ook kleinere uitschieters door reizigerstreinen. De trillingen zijn weergegeven in drie richtingen:

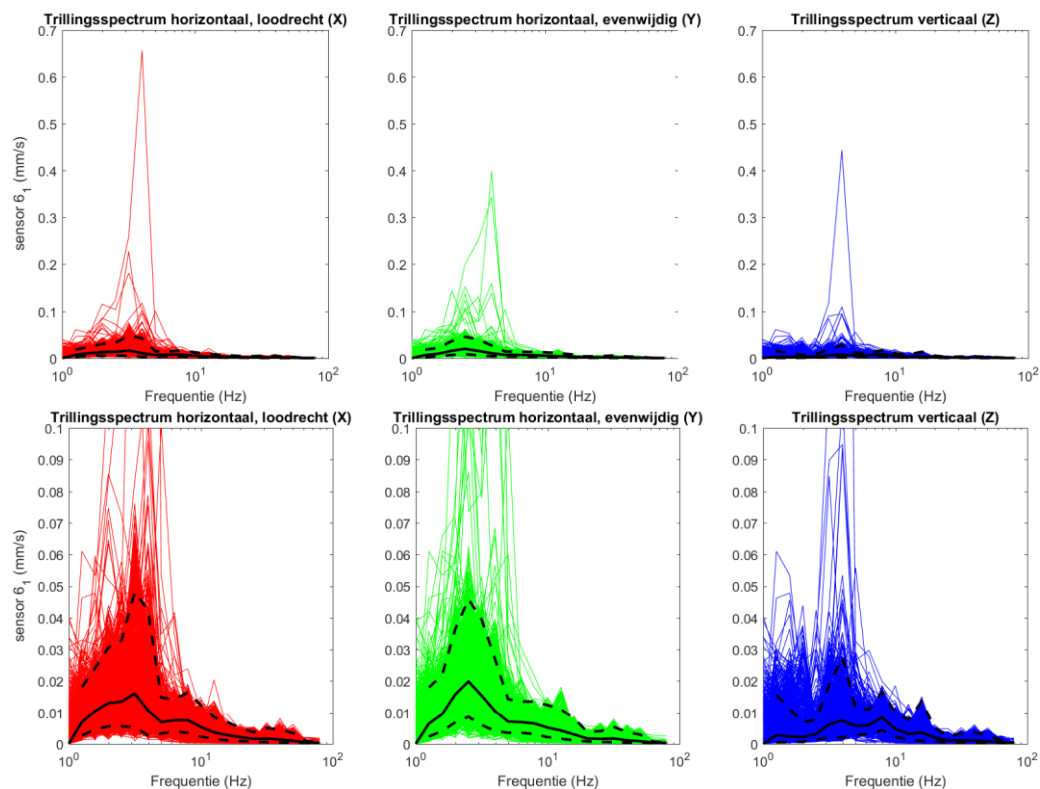
1. Horizontaal, loodrecht op het spoor (ook wel X genoemd);
2. Horizontaal, parallel aan het spoor (ook wel Y genoemd);
3. Verticaal (ook wel Z genoemd).



Figuur 4-1 Trillingssterktes op maaiveldniveau als functie van de tijd

Gedurende de eerste meetweek reden gedurende vier dagen er minder treinen, en reden deze langzamer dan normaal, door werkzaamheden aan het spoor. Hierdoor zijn in deze periode lagere trillingen gemeten. Om deze reden is de langeduurmeting nog een extra week voortgezet. Uit een gevoeligheidsanalyse is gebleken dat de periode van werkzaamheden geen invloed heeft op de resultaten van de berekeningen en de conclusies van dit rapport.

Het trillingsspectrum van de gemeten treinen op maaiveld is weergegeven in Figuur 4-2. De trillingen zijn in de horizontale richtingen wat sterker dan in de verticale richting. De trillingen zijn vooral hoog tussen de 2 en de 5 Hz. De uitschieters in deze figuur worden veroorzaakt door goederentreinen. De trillingen van de goederentreinen op maaiveld voldoen niet aan de streefwaarden, dat betekent dat in de trillingen in de woningen zullen moeten worden uitgedempt om te voldoen aan de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn.



Figuur 4-2 Trillingsspectra van treinpassages tijdens de lange meting in X- Y- en Z-richting (bovenste rij is totaalbeeld, onderste rij is een zoom-in van de bovenste rij)

4.3 Vergelijking onderzoek Peutz

In een eerder onderzoek van Peutz² is over een periode van een uur een maaiveldmeting verricht. Dit is gedaan met drie sensoren in een lijn haaks op het spoor, met sensorafstanden van 20, 50 en 80 meter tot het spoor.

De maatgevende passage uit deze meting betrof een intercity. Het gemeten trillingsniveau voor deze passage op 20 m afstand tot het spoor had een maximale dominante frequentie van ca. 3 Hz, het gemeten trillingsniveau was ongeveer 95 dB. Omgerekend komt dit neer op ongeveer 0,06 mm/s. Dat is in lijn met de trillingen van de intercity's zoals gemeten in het huidige onderzoek, zie Figuur 4-2. Beide onderzoeken komen dus overeen qua meetwaarden. Uit de langeduurmeting blijkt dat de goederentreinen die op dit traject rijden het maximale trillingsniveau bepalen. Het feit dat er in het rapport van Peutz geen rekening is gehouden met goederenvervoer zal er toe leiden dat de conclusies van dit rapport afwijken van die van het rapport van Peutz.

² Peutz 27 augustus 2018, Tiny Houses Vulcanusweg 295-305 Delft, kenmerk: H 6494-1-RA-001

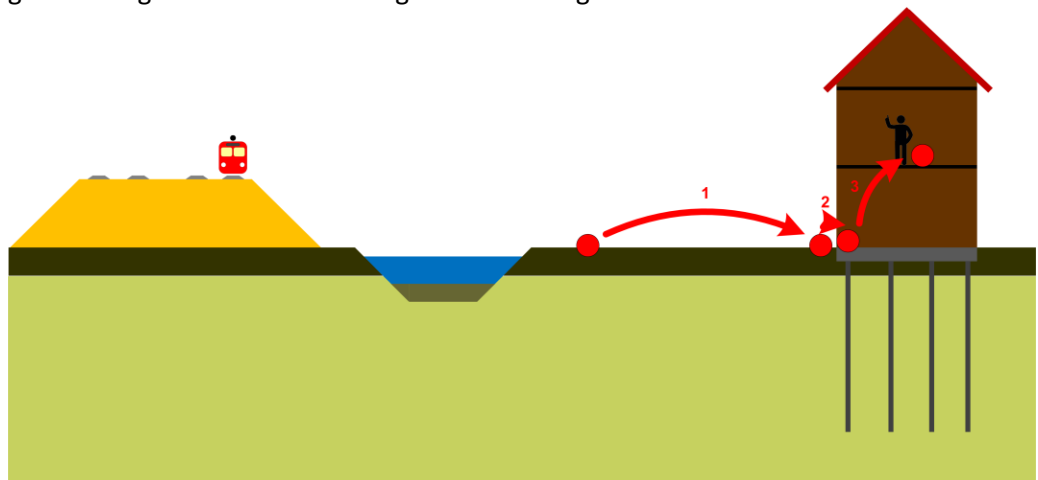
5 Analyse en berekeningen

5.1 Prognosemethode

De resultaten van de metingen zijn gecombineerd met informatie over de geplande bebouwing. Hiermee is een prognose gemaakt van de trillingssterktes aan de fundering en op de vloeren van de gebouwen, op de locatie van elk bouwvlak. Daarnaast brengen we de onzekerheid van de predicties (onder meer veroorzaakt door onzekerheid in exacte dimensionering, materiaalkeuze en constructiewijze) in rekening door een 50%-waarde en een 95%-waarde te onderscheiden:

- 50%-waarde: De kans dat de trillingen lager zijn dan deze waarde is 50%. Deze waarde representeert daarmee de verwachtingswaarde voor trillingen in de woningen en geldt voor gebouwen met gemiddelde constructieve eigenschappen.
- 95%-waarde: De kans dat de trillingen lager zijn dan deze waarde is 95%. De kans op voorkomen is klein, maar niet verwaarloosbaar. De 95%-waarde wordt gebruikt als redelijkerwijs maximaal te verwachten trillingssterkte en geldt voor gebouwen met ongunstige constructieve eigenschappen. Een voorbeeld hiervan is bijvoorbeeld dat de vloeren erg slap worden geconstrueerd (grote vloeroverspanningen, kleine balkmaten).

De prognoses van trillingen op funderingsniveau en op midden vloerveld wordt gedaan volgens de methode die getoond is in Figuur 5-1.



Figuur 5-1 Methode voor het vaststellen van de trillingen in een gebouw

Deze methode werkt als volgt:

1. De trillingen van de langeduurmeting worden vertaald naar een meetpunt op maaiveld ter plaatse van het bouwblok, door de trillingen bij het bouwvlak uit de korteduurmeting te delen op de trillingen bij het meetpunt van de langeduurmeting uit de korteduurmeting. Deze overdracht corrigeert voor bijvoorbeeld verschillen in afstand tot het spoor (uitdemping van de trillingen met de afstand) en voor variatie in de bodem of de spoorligging.
2. De trillingen op maaiveld worden vertaald naar een meetpunt op de fundering van het gebouw, op basis van de eigenschappen van het gebouw (afmetingen, type fundering).

3. De trillingen op de fundering worden vertaald naar een meetpunt op de hoogste vloer van het gebouw (indien van toepassing), op basis van de eigenschappen van het gebouw (afmetingen, type constructie).

Resultaat van deze berekening is een predictie van de trillingssituatie in het gebouw, waarbij elke afzonderlijke trein zoals gemeten is bij de langeduurmeting is vertaald naar een trillingssignaal in de woning. Over deze trillingen worden de parameters V_{max} en V_{per} bepaald, waarna deze worden beoordeeld op de SBR B-richtlijn.

5.1.1. Overdracht tussen meetpunten

De overdracht van het meetpunt uit de langeduurmeting naar de overige meetpunten is bepaald tijdens de korte meting. Op basis daarvan is de uitdemping van de trillingen met de afstand bepaald, zie Bijlage II. Hierbij is gebruik gemaakt van de Barkanvergelijking, een empirische formule die de uitdemping van de trillingen met de afstand beschrijft. Door deze uitdemping te vermenigvuldigen met de trillingen uit de langeduurmeting, zijn de trillingen uit die meting op elk willekeurig punt te bepalen.

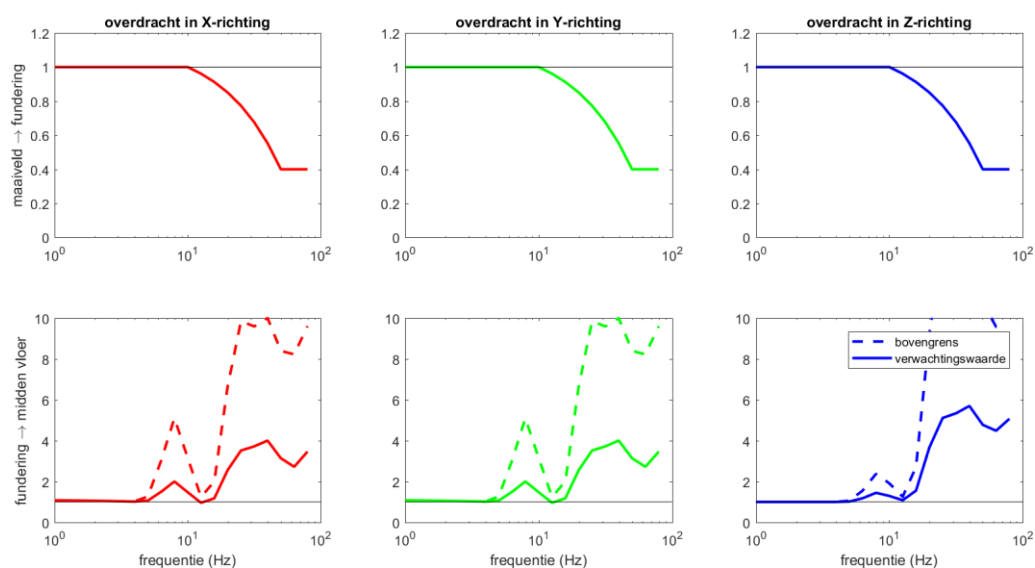
5.1.2. Overdracht in gebouwen

Een document van VROM geeft indicatieve richtlijnen voor het bepalen van de overdracht van trillingen van maaiveld naar fundering³. Deze theoretische waarden komen goed overeen met praktijkwaarden uit metingen en zijn daarom in dit onderzoek aangehouden.

De overdracht van fundering naar midden vloerveld is afhankelijk van de gebouwconstructie, gebouwafmetingen, type vloer en de eigenfrequentie van de vloer. Het document van VROM geeft voor deze overdrachten een beeld dat niet geheel met praktijkmetingen overeenkomt. De gebruikte overdrachten van fundering naar midden vloerveld in dit onderzoek zijn daarom gebaseerd op een combinatie van meetresultaten in vergelijkbare gebouwen en analytische formules die het gedrag van gebouwen en vloeren beschrijven. Voor woningtype 1 zijn deze resultaten weergegeven in Figuur 5-2. Hierbij is X loodrecht op het spoor en Y parallel aan het spoor.

Wat opvalt is dat de meeste opslinging optreedt bij frequenties boven de 10 Hz. In het vorige hoofdstuk werd geconstateerd dat de dominante trillingsfrequenties tussen de 2 en 5 Hz zijn gemeten. Trillingen bij deze lage frequenties zullen niet, of slechts in zeer geringe mate, opgeslingerd worden. In het vorige hoofdstuk werd echter ook geconstateerd dat er eigenlijk damping nodig is om overschrijdingen van de richtlijn te voorkomen. Uit Figuur 5-2 blijkt dat er geen significante damping op zal treden.

³ Rekenmodel voor de bepaling van trillingssterkte, Ministerie VROM, mei 1995, distributienummer 12462/164.



Figuur 5-2 Overdracht van de trillingssterkte van maaiveld naar de fundering (boven) en van de fundering naar midden vloerveld (onder) voor woningtype 1

5.2 Resultaten

De resultaten van de langeduurmeting (meetpunt op 22 meter afstand) zijn weergegeven in Tabel 5-1. Hier valt op dat op maaiveld al incidenteel hoge trillingen worden gemeten (trillingssterkte van ca. 0,66 in horizontale richting, wat betekent dat er op die afstand eigenlijk demping van de trillingen in de woningen moet optreden om overschrijdingen van de streefwaarde te voorkomen).

Tabel 5-1 Meetresultaten en beoordeling op maaiveld

	X	Y	Z
V_{per}, dag	0,02	0,02	0,01
V_{per}, avond	0,01	0,01	0,00
V_{per}, nacht	0,01	0,01	0,00
V_{max}, gemeten	0,66	0,62	0,43

Ook op maaiveld worden zowel de streefwaarde voor de dag als de nacht overschreden. Onderstaand worden de gevolgen voor trillinghinder in de tiny houses besproken.

5.2.1. Verwachte trillingen in gebouwen

Vervolgens is voor alle typen woningen een prognose gemaakt van de trillingen in de woningen op de vloeren op de hoogst bewoonde verdieping. Overschrijdingen van het beoordelingskader zijn in Tabel 5-2 oranje gearceerd wanneer er alleen een overschrijding optreedt van de (strengere) streefwaarden voor de nacht, en rood als ook de (minder strenge) streefwaarden voor de dag worden overschreden.

Bij alle beschouwde woningtypen wordt tenminste de streefwaarde voor de nacht overschreden. Het gaat om incidentele overschrijdingen veroorzaakt door goederentreinen, gezien het feit dat de waarden van V_{per} laag zijn.

Tabel 5-2 *Verwachte trillingen in woningen op 24m afstand van het spoor (op basis van de gedane metingen)*

Woningtype	V _{max}	V _{per}
1	0.60	0.03
2	0.60	0.03
3	0.59	0.03
4	0.59	0.03
5	0.59	0.03

Kleur	Toelichting
	Mogelijke overschrijding, alleen 's nachts
	Mogelijke overschrijding, zowel overdag als 's nachts

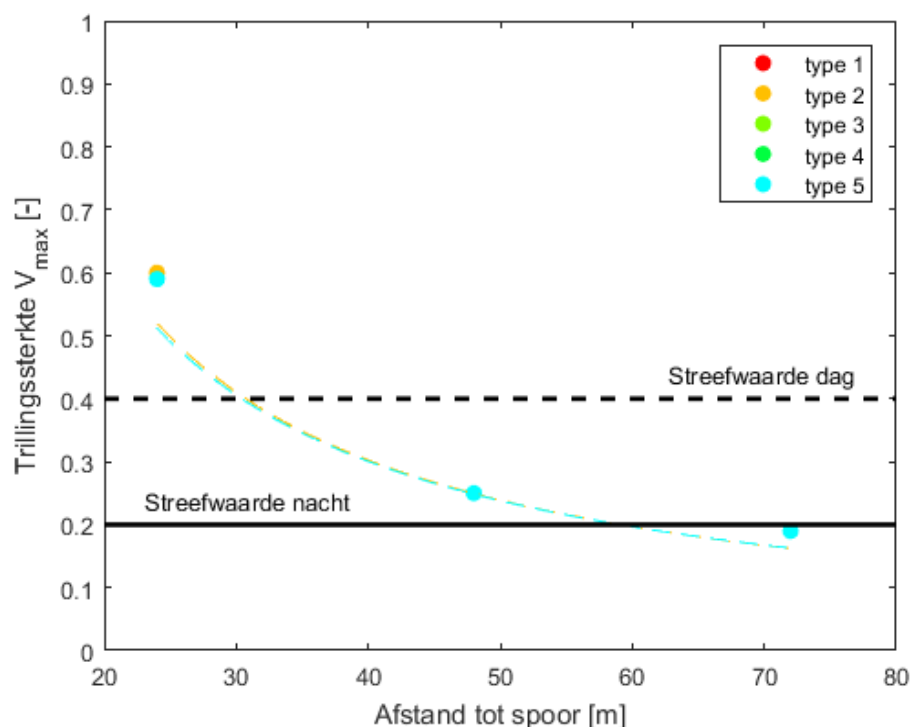
Een aantal opmerkingen bij de resultaten:

- De overschrijdingen worden veroorzaakt door incidentele passages van goederentreinen met sterk afwijkende trillingen. Het gaat in de huidige situatie om ongeveer 1 tot 2 treinen per week. In de toekomst zullen dit er meer worden, namelijk ca. 3 tot 5 per week (bron: tracébesluit *Programma Hoogfrequent Spoorvervoer viersporigheid Rijswijk - Delft Zuid*). Hiermee is rekening gehouden in de prognose.
- De trillingen zijn dichtbij het spoor hoger dan zowel de streefwaarden voor nieuwbouw als die voor bestaande bouw, waarin een zogenaamd 'gewenningseffect' is meegenomen. Dit treedt na verloop van tijd op; mensen wennen dan aan het wonen langs het spoor met de bijbehorende geluids- en trillingseffecten. De streefwaarde voor de nachtperiode wordt ook voor bestaande bebouwing overschreden.

De berekende V_{max} waarden hebben de zelfde grootte-orde als de gemeten trillingen op het maaiveld. Dit betekent dat er geen significante opslinging of demping van trillingen is voor de geplande constructies. Dat komt overeen met de verwachtingen bij dit type woningen. Om significante demping te hebben bij laagfrequente trillingen zijn grote, massieve gebouwen nodig.

Met de meetdata van de meetraai haaks op het spoor uit de korteduurmeting (zie Bijlage II), is het effect van de bodemdemping en de geometrische spreiding bepaald. Deze effecten zijn meegenomen in de berekening van de trillingsniveaus in de woningtypen uit Tabel 2-4, op verschillende afstanden van het spoor. In Figuur 5-3 is te zien dat op een afstand van zo'n 60 m van het spoor (10 m van de westelijke rand van het plangebied) de trillingen onder de streefwaarde van de nacht komen. Op een afstand van 30 m wordt voldaan aan de streefwaarden voor een bestaande situatie, waarin het eerder besproken gewenningseffect is meegenomen.

De door Movares gemeten afname van de trillingen komt overeen met die uit de metingen van Peutz⁴. In het rapport van Peutz waren de trillingsniveau's op 80 m ongeveer drie keer zo laag als de trillingsniveau's op 20 m afstand van het spoor. De metingen van Movares laten een vergelijkbaar beeld zien, zoals getoond in Figuur 5-3.



Figuur 5-3 Afname van de trillingen in de woningen met de afstand tot het spoor

5.2.2. Bovengrens van trillingen in gebouwen

De hierboven genoemde waarden zijn de verwachtingswaarde van de trillingen (50%-waarde). Met de 95%-waarde wordt een bovengrens voor de verwachte trillingen gegeven, deze 95%-waarde correspondeert met de bovengrens aan de opslinging van trillingen in woningen zoals wij die tegenkomen in praktijkmetingen. Concreet correspondeert deze 95%-bovengrenswaarde met een situatie waarin gebouwen relatief kaal zijn ingericht (weinig demping, relatief slappe constructie). De 50%-waarde correspondeert meer met de meest voorkomende situaties en is naar verwachting meer representatief voor de te bouwen tiny houses.

In Tabel 5-3 is per woningtype de bovengrens van de trillingen in de woningen weergegeven. Overschrijdingen van het beoordelingskader zijn oranje gearceerd wanneer er alleen een overschrijding optreedt van de (strengere) streefwaarden voor de nacht, en rood als ook de (minder strenge) streefwaarden voor de dag worden overschreden.

⁴ Peutz 27 augustus 2018, Tiny Houses Vulcanusweg 295-305 Delft, kenmerk: H 6494-1-RA-001

Tabel 5-3 *Bovengrens voor trillingen in woningen op 24 meter afstand (op basis van de gedane metingen)*

Type	V_{max}	V_{per}
1	0.63	0.04
2	0.63	0.04
3	0.60	0.03
4	0.60	0.03
5	0.60	0.03

Een aantal opmerkingen bij de resultaten:

- De bovengrensberekening wijkt slechts zeer beperkt af van de gemiddelde berekening. Ook bij deze bovengrensberekening is er zowel overdag als 's nachts een overschrijding van de streefwaarden voor de trillingssterkte V_{max} .
- Zoals eerder vermeld zijn, bij een goede bouwwijze, de rekenresultaten voor de verwachtingswaarde het meest representatief. De bovengrenswaarde is alleen representatief bij slappere varianten van tiny houses dan hier beschouwd, met minder damping in de constructie. De verwachtingswaarde van de trillingen is meer representatief voor de geplande bebouwing; daarom is deze bovengrensberekening vooral facultatief.

5.3 Betrouwbaarheid

De prognoses zijn gebaseerd op de meest recente inzichten en de uitgangspunten zoals opgenomen in hoofdstuk 2. Desondanks zijn er een aantal parameters die kunnen leiden tot andere uitkomsten dan zoals hierboven beschreven:

1. Wijzigingen in de sporenlay-out, het spoorgebruik of de rijnsnelheid van de treinen ten opzichte van de situatie waarvan in dit onderzoek is uitgegaan. In het geval van wijzigingen buiten de spoorzone zal ProRail doorgaans trillingsonderzoek uitvoeren. Het projecteffect van PHS Rijswijk – Rotterdam (dichterbij komen van de sporen) is al wel opgenomen in deze berekeningen.
2. Toename van het aantal treinen, waardoor de waarde van V_{per} hoger wordt. De waarde van V_{max} neemt hierdoor niet toe. Het projecteffect van PHS Rijswijk – Rotterdam (meer treinen) is al wel opgenomen in deze berekeningen.
3. De ligging van het spoor heeft invloed op de trillingen van het treinverkeer; deze spoorligging hangt samen met (onder meer) de onderhoudscyclus van het spoor. Naar verwachting zorgt deze variatie in spoorligging voor een variatie van +/- 25 procent in de trillingen;
4. Omdat de exacte detaillering van de bebouwing nog niet bekend is, is de spreiding in te verwachten waarden op midden vloerveld nog vrij hoog. Deze spreiding is in rekening gebracht in de prognoses van de 50%-waarde en de 95%-waarde.
5. Verplaatsbare tiny houses, gebouwd op (meerassige) aanhangwagens, zijn niet meegenomen in de berekeningen. In het algemeen mag verwacht worden dat voor deze constructies de trillingen iets erger kunnen zijn dan hier berekend.

5.4 Voorkomen van trillingshinder

Op basis van de resultaten van dit onderzoek kan een overschrijding van de streefwaarden voor de maximale waarde (V_{max}) voor een nieuwe situatie niet worden uitgesloten. Dit komt vooral door de passages van incidentele, afwijkende goederentreinen, die hoge trillingen veroorzaken bij lage frequenties. Het betreft hier

enkele goederentreinen per week. Er zijn ook incidentele overschrijdingen van de maximale waarde door reizigerstreinen, maar deze overschrijdingen zijn veel kleiner dan die door de goederentreinen. Ook hier gaat het om enkele malen per week. Voor de overschrijdingen van de maximale waarde zijn de goederentreinen derhalve maatgevend. De streefwaarden voor de tijdsgemiddelde waarde (V_{per}) worden niet overschreden. Alles bij elkaar zal dit trillingsbeeld volgens ons niet tot een onacceptabel woon- en leefklimaat leiden.

De trillingen hebben lage frequenties. Daardoor kan uitsluitend het toevoegen van massa een effectieve maatregel zijn. Voor tiny houses kan dit in de vorm van zwaardere vloerbalken, bijvoorbeeld 15 cm hoog in plaats van 10 cm hoog. (Een alternatief zoals een massieve fundering is voor dit type bebouwing niet haalbaar. Toepassing van demping door middel van slappe veren onder de gebouwen is door de lage trillingsfrequenties geen optie.)

Verder kan worden overwogen om de te bouwen tiny houses vooral in de zone verder van het spoor te plaatsen, omdat de trillingen snel afnemen met de afstand: in de eerste 10 meter van het bouwvlak vindt ca. 30 procent afname plaats. (Een afname van 30 procent wordt als een voelbare afname beschouwd.) Vanaf 60 m van het spoor wordt de streefwaarde voor het maximale trillingsniveau (V_{max}) voor de nacht voor nieuwbouw niet overschreden; vanaf 30 m geldt dit reeds voor bestaande bouw.

Tussen het spoor en het beoogd bouwvlak bevindt zich een sloot. Water is op zichzelf een demper van trillingen. Volgens de gemeente Delft zal de sloot verbreed worden. Een gunstig effect op de trillingen kan dit uitsluitend hebben als de sloot verdiept wordt, want bepalend voor de trillingsdemping is niet de breedte maar de diepte van een sloot. Verbreding van de sloot zal derhalve geen demping van trillingen opleveren.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Op basis van de resultaten van dit onderzoek kan een overschrijding van de streefwaarden voor de maximale waarde (V_{max}) voor een nieuwe situatie niet worden uitgesloten. Dit komt vooral door de passages van incidentele, afwijkende goederentreinen, die hoge trillingen veroorzaken bij lage frequenties. Het betreft hier enkele goederentreinen per week. Er zijn ook incidentele overschrijdingen van de maximale waarde door reizigerstreinen, maar deze overschrijdingen zijn veel kleiner dan die door de goederentreinen. Ook hier gaat het om enkele malen per week. Voor de overschrijdingen van de maximale waarde zijn de goederentreinen derhalve maatgevend. De streefwaarden voor de tijdsgemiddelde waarde (V_{per}) worden niet overschreden. Alles bij elkaar zal dit trillingsbeeld volgens ons niet tot een onacceptabel woon- en leefklimaat leiden.

De trillingen hebben lage frequenties. Daardoor kan uitsluitend het toevoegen van massa een effectieve maatregel zijn. Voor tiny houses kan dit in de vorm van zwaardere vloerbalken, bijvoorbeeld 15 cm hoog in plaats van 10 cm hoog. (Een alternatief zoals een massieve fundering is voor dit type bebouwing niet haalbaar. Toepassing van damping door middel van slappe veren onder de gebouwen is door de lage trillingsfrequenties geen optie.)

6.2 Aanbevelingen

Wij adviseren u de toekomstige bewoners te informeren over de te verwachten trillingen.

Over de constructie adviseren wij u om richting de bouwers in overweging te geven een zwaarder vloertype te gebruiken om de trillingen te reduceren, bijvoorbeeld één of twee maten zwaardere vloerbalken dan constructief nodig is. Hierbij is het aan de ontwikkelaars en de bewoners om de keus te maken tussen de kosten van de extra investeringen versus het effect ervan.

Verder kan worden overwogen om de te bouwen tiny houses vooral in de zone verder van het spoor te plaatsen, omdat de trillingen snel afnemen met de afstand: in de eerste 10 meter van het bouwvlak vindt ca. 30 procent afname plaats. (Een afname van 30 procent wordt als een voelbare afname beschouwd.) Vanaf 60 m van het spoor wordt de streefwaarde voor met maximale trillingsniveau (V_{max}) voor de nacht voor nieuwbouw niet overschreden; vanaf 30 m geldt dit reeds voor bestaande bouw.

Colofon

Opdrachtgever Gemeente Delft

Uitgave Movares Nederland B.V.

Divisie Ruimte, Mobiliteit en Infra
Afdeling Infrastructuur: Waterbouw, Geotechniek en Dynamica

Daalse Kwint
Postbus 2855
3500 GW Utrecht

Telefoon 030 - 265 4693

Ondertekenaar ir. R.W. Geerlof
adviseur

Projectnummer RM006716

Kenmerk D79-RGE-KA-1900018 Trillingsonderzoek Tiny Houses Delft

Bijlage I - Gegevens van de metingen

Conform de eisen in de SBR B-richtlijn, hoofdstuk 11, bevat deze bijlage de gegevens van de metingen.

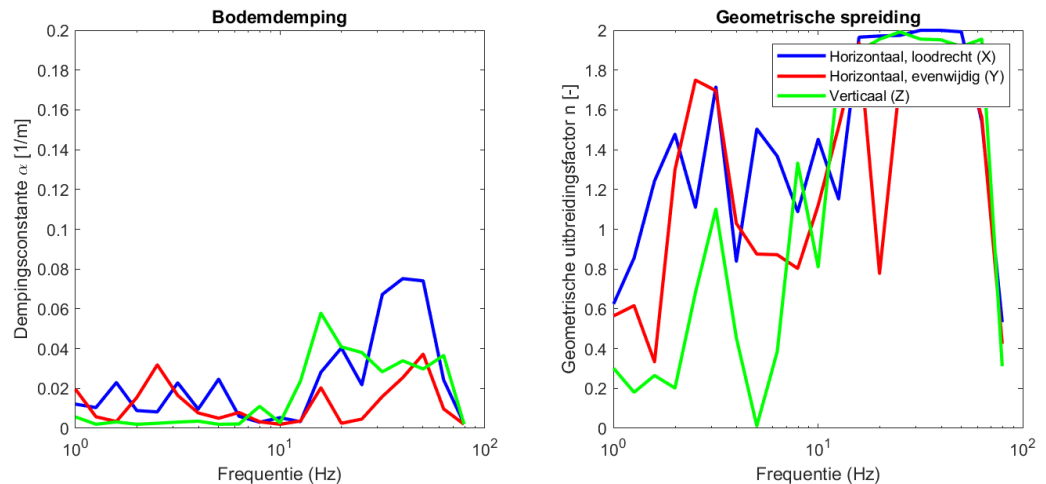
1	Uitvoerende organisatie	<i>Movares Nederland B.V. Daalseplein 101 3511 SX Utrecht</i>
	Verantwoordelijke persoon	<i>Ir. P.M. Boon e-mail: pieter.boon@movares.nl tel.: 06-10039454</i>
2	Meting uitgevoerd door	<i>Mohamed Kabbouch</i>
3	Tijdsperiode meting	<i>26-02-2018 10:00 tot 27-02-2019 12:00 (korteduurmeting) 19-02-2019 10:00 tot 27-02-2019 12:00 (langeduurmeting)</i>
4	Type trillingsbron	<i>Treinen.</i>
5	Gebouwomschrijving	<i>Niet van toepassing</i>
6	Locatie metingen	<i>Zie plattegrond in hoofdstuk 2</i>
7	Geotechnische gegevens	<i>Zie Bijlage III</i>
8	Meetposities	<i>Zie plattegrond in hoofdstuk 2</i>
9	Gebruikte meetopnemers	<i>Zeven 3D-geofoons</i>
	Gebruikte registratieapparatuur	<i>Webcam gekoppeld aan meetcomputer</i>
	Gebruikte verwerkingsapparatuur	<i>Raspberry Pi met USB-DUX. Meetcomputers leggen zowel de trillingssterkte per 30 seconden als het tijdssignaal vast.</i>
10	Overzicht meetwaarden	<i>Zie figuren in hoofdstuk 4</i>
11	Motivatie classificatie gebouw	<i>Zie hoofdstuk 2</i>
12	Overige relevante omstandigheden	<i>Zie hoofdstuk 2</i>

© 2019, Movares Nederland B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vervaelvoudigd, 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 Movares Nederland B.V.

Bijlage II - Meetresultaten

In Figuur II - 1 zijn de dynamische bodemeigenschappen weergegeven. Links is de bodemdemping weergegeven, rechts de geometrische spreiding van de trillingen. De bodemdemping is hoog, waardoor de trillingen snel uitdempen met de afstand.



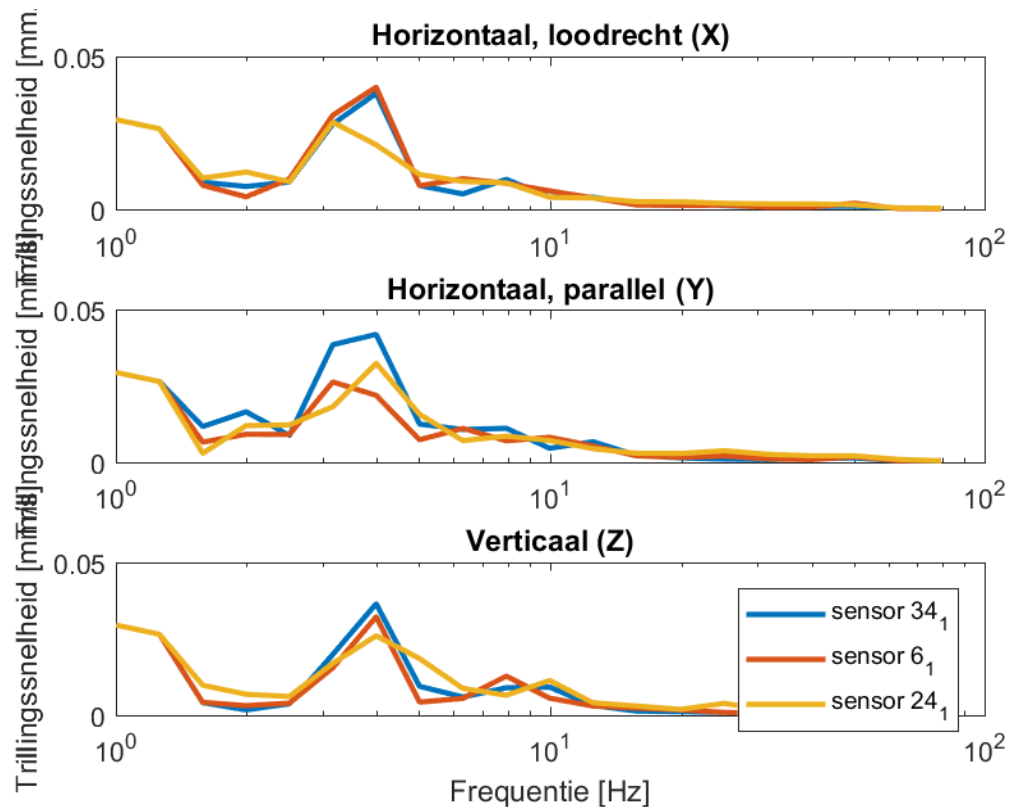
Figuur II - 1 Bodemdemping en geometrische spreiding

De geometrische spreiding van de trillingen is ook hoog. Hierdoor zullen de trillingen snel uitdempen met de afstand, ook voor laagfrequente trillingen.

Hier moet nog aan toe worden gevoegd dat voor de bouw de planlocatie nog bouwrijp gemaakt moet worden. Gezien de zeer drassige toplaag die nu aanwezig is, zal bij het bouwrijp maken waarschijnlijk een grondverbetering uitgevoerd worden, waarbij de toplaag vervangen wordt met een laag (drainage)zand. Hierdoor zullen de lage frequenties (10Hz en lager) minder hoog worden, maar de uitdemping met de afstand zal naar verwachting afnemen. Het effect op de rekenresultaten uit dit onderzoek is naar verwachting beperkt.

In de plansituatie wordt de watergang verplaatst. Uit onderzoek is bekend dat sloten een positief effect hebben op de trillingen. Daar de nieuwe watergang waarschijnlijk een zelfde effect heeft als de bestaande watergang, zal dit naar verwachting geen grote gevolgen hebben voor de conclusies van dit rapport.

In Figuur II - 2 is het gemiddelde trillingsspectrum van een representatieve trein weergegeven op de meetpunten parallel aan het spoor. Met name tussen de 2 en de 10 Hz is beperkte variatie te zien tussen de meetpunten, en met name in horizontale richting. De berekeningen uit dit onderzoek zijn gebaseerd op het rode meetpunt (sensor 6_1). Dit is de langeduurmeting.



Figuur II - 2 Trillingssnelheden van de per richting.

Bij meetpunt 34_1 is kennelijk sprake van een lokaal bodemeffect. Met name in de Y-richting is het gemeten trillingsniveau van bij dit meetpunt wat hoger dan bij meetpunt 6_1. Deze variatie is echter 'normaal' en valt binnen de onzekerheidsmarge van dit onderzoek.

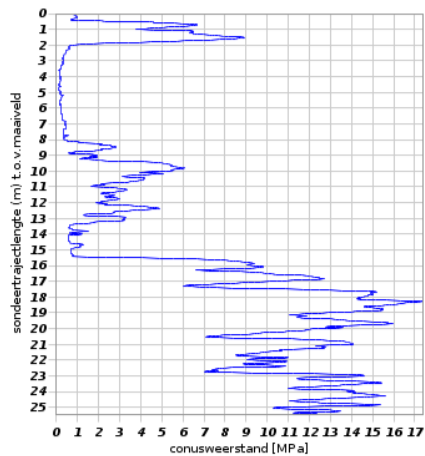
Gezien de bodemgesteldheid van de projectlocatie is het aannemelijk dat er tijdens het bouwrijpmaken een grondverbetering wordt uitgevoerd. Hierdoor zullen dit soort lokale bodemeffecten afnemen. Ook blijkt uit de metingen dat de X-richting over het algemeen de maatgevende trillingsrichting is. Voor dit onderzoek lijkt het afdoende om te rekenen met de metingen van meetpunt 6_1.

Bijlage III – Bodemgegevens

In deze bijlage zijn sonderingen opgenomen die een beeld geven van de bodemopbouw ter plekke. Binnen het onderzoeksgebied zijn geen sonderingen beschikbaar in Dino Loket. Sondering CPT000000033428 (Figuur III - 1) valt buiten het onderzoeksgebied, maar mag gezien worden als representatief. Duidelijk is dat er vrij slappe toplagen aanwezig zijn. Met name de hoogfrequente trillingen dempen door de slappe bodem snel uit.

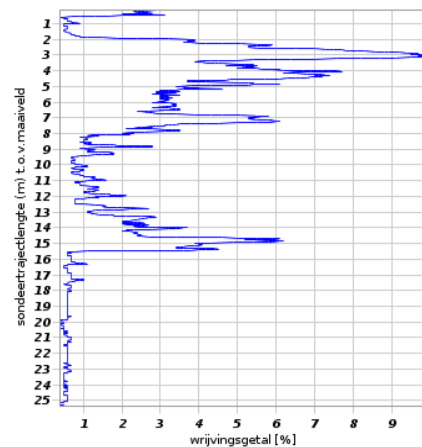
Geotechnisch sondeeronderzoek BRO

BRO-ID: CPT000000033428
Aangeleverde coördinaten: 84372.000, 445346.000 (RD)



Geotechnisch sondeeronderzoek BRO

BRO-ID: CPT000000033428
Aangeleverde coördinaten: 84372.000, 445346.000 (RD)



Figuur III - 1 Conusweerstand (links) en wrijvingsgetal (rechts) voor sondering CPT000000033428