Trillingsonderzoek Houten

Trillingen Hofstad 4B, Houten

Status	**definitief**
Versie	002
Rapport	B.2019.0517.00.R001
Datum	19 september 2019

Colofon

Opdrachtgever	Ontwikkelingsverband Houten C.V. De Brand 30 3823 LK AMERSFOORT
Contactpersoon opdrachtgever	[redacted]
Project	BPD / Hofstad 4B, Houten
Betreft	Trillingen
Uw kenmerk	-
Rapport	B.2019.0517.00.R001
Datum	19 september 2019
Versie	002
Status	definitief
Uitgevoerd door	DGMR Bouw B.V. Van Pallandtstraat 9-11 6814 GM Arnhem Postbus 153 6800 AD Arnhem
Contactpersoon **Auteur** **Projectadviseur**	[redacted]
2e lezer/secr.	LN|APT

k:\doc\b\2019\051700\b20190517001v2.docx 19-09-2019

Inhoud

1. Inleiding 4

2. Situatie 5

3. Beschouwing onderzoeken Peutz 6

4. Overdrachtsmetingen wijk Leebrug 8

5. Bijgestelde prognose 11
5.1 Prognose op basis van maaiveldmetingen 11
5.2 Prognose op basis van vergelijk meetwaarden Edelsteen/Maansteen 12

6. Maatregelen 14
6.1 Maatregelen gebouwen 14
6.2 Maatregelen in de bodem (overdrachtspad) 15

7. Conclusies en aanbevelingen 17

Bijlagen
Bijlage 1 Invloed diepwand op trillingen

1. Inleiding

In opdracht van ontwikkelingsverband Houten (OVH) heeft DGMR Bouw B.V. nader onderzoek gedaan naar te verwachten trillingen in de te bouwen woningen voor het project Hofstad 4B aan het Raaigras in Houten. Aanleiding voor dit onderzoek zijn de door bureau Peutz gemeten forse trillingssterkten in de bodem op het maaiveld van de kavel en de daarop gebaseerde trillingsprognoses voor de toekomstige bebouwing[1]. De trillingen waar het om gaat zijn afkomstig van de spoorlijn Utrecht – Geldermalsen. Op deze lijn rijden niet alleen reizigerstreinen maar ook goederentreinen.

In de gedane onderzoeken en prognoses door Peutz wordt een verwachting uitgesproken dat effectieve trillingssterkten V_{eff} op vloeren in de te bouwen woningen (worst case) zo hoog zouden kunnen zijn als een V_{max} van 2,3 (mm/s). Dit is na nader onderzoek door Peutz neerwaarts bijgesteld tot 1,4 voor de eerstelijns bebouwing op circa 40 meter van het spoor. Ook deze bijgestelde waarde is nog aanzienlijk meer dan de streefwaarde (A2) uit de SBR-B ten aanzien van trillingen in de nachtperiode. Deze forse overschrijding leidt mogelijk tot ingrijpende trillingreducerende maatregelen aan de te bouwen woningen.

In gebieden met een relatief slappe bodem is evenwel vaak zichtbaar dat trillingssterkten op maaiveld relatief hoog zijn, maar dat dit niet altijd leidt tot eveneens hoge trillingssterkten in woningen, te meer als deze woningen een paalfundering op een onderliggende stijve zandlaag bezitten. Vaak wordt in deze situaties dan ook een aanmerkelijke overdrachtsverzwakking gemeten tussen de bodem op maaiveld en de gebouw- of woningfundatie. Het is daarom van belang om inzicht te krijgen of dat in dit project ook aan de orde zal zijn.
Recht tegenover het Raaigras, aan de westzijde van het spoor, zijn al nieuwbouwwoningen gerealiseerd en deze woningen zijn voorzien van een paalfundering. Een bepaling van de overdrachtsverzwakking tussen het maaiveld en de fundatie van deze woningen geeft ook een meer realistische verwachtingswaarde van de te verwachten overdrachtsverzwakking in het project Hofstad 4B en mogelijk leidt dit nog tot een matiging van de prognoses.
Om inzicht te krijgen in deze overdrachtsverzwakking heeft DGMR tussen 17 en 19 juli 2019, overdrachtsmetingen uitgevoerd aan het appartementencomplex aan de Maansteen en het meest zuidelijke blok rijwoningen aan de Edelsteen.

In dit rapport wordt nader ingegaan op de trillingsproblematiek langs het spoor in Houten, de te verwachten trillingssterkten in het project Hofstad 4B en mogelijke maatregelen om trillingen verder te reduceren.

[1] *Peutz-rapport H-6250-1-RA van 2 maart 2018 en notitie H-6250-2-NO van 26 november 2018.*

k:\doc\bl\2019\051700\b20190517001v2.docx 19-09-2019

2. Situatie

Figuur 1 toont het project Hofstad 4B in Houten en de ligging ten opzichte van de spoorlijn Utrecht (Houten) – Geldermalsen (Culemborg). De eerstelijs bebouwing van dit project wordt gerealiseerd op een afstand variërend tussen 40 en 50 meter tot het hart van het dichtstbijzijnde spoor. Aan de westzijde van het spoor bevindt zich de wijk Leebrug, waar al nieuwbouwwoningen zijn gerealiseerd. In de figuur zijn de twee bouwclusters aangegeven waaraan DGMR overdrachtsmetingen heeft verricht, het blok rijwoningen aan de Edelsteen (aangeduid met E52) op 47 meter afstand tot het spoor en het appartementencomplex aan de Maansteen (M12) dat op ongeveer 53 meter afstand staat. De afstand tussen het westelijke/zuidgaande en het oostelijke/noordgaande spoor bedraagt 22 meter.



figuur 1: situatie project Hofstad 4B, Houten

3. Beschouwing onderzoeken Peutz

In de in voetnoot 1 vermelde Peutz-rapporten worden een aantal belangrijke constateringen gedaan over de in de kavel van Hofstad 4b optredende trillingssterkten:

- In de bodem op 25 tot 40 meter van het spoor worden trillingssterkten V_{max} tot circa 0,8 gemeten in verticale richting. Maatgevend daarbij zijn de goederentreinen.
- Trillingsniveaus door reizigerstreinen liggen globaal een factor 3 tot 5 lager.
- Nabij de spooronderdoorgang Schonauwensepad (meetpunt 1) zijn goederentreinen op het oostelijke/noordgaande spoor dominant.
- Meer naar het noorden, ter hoogte van meetpunt 2, zijn westelijke/zuidgaande treinen dominant. Dit geldt zowel voor goederentreinen alsook voor reizigerstreinen.

De spectrale analyse door Peutz laat zien dat de trillingsproblematiek zich concentreert op twee frequentiegebieden: rond 4 Hz en rond 8 tot 16 Hz. De onderdoorgang heeft een wisselende invloed op de trillingsopwekking in deze frequentiegebieden. Voor (reizigers)treinen richting Utrecht (Houten) lijkt de invloed vooral te liggen in een trillingsverhoging rond 8 Hz. Voor treinen in de richting Geldermalsen (Culemborg) nemen over het hele frequentiegebied tot 16 Hz de trillingssterkten schijnbaar toe als gevolg van de onderdoorgang. Niet vermeld wordt of snelheidsverschillen hierin nog een rol spelen. Op gelijke maar geringe afstand tot een station rijden de vertrekkende treinen doorgaans harder dan de aankomende treinen. Ook dit heeft invloed op de trillingsopwekking door treinen.

Trillingsopwekking goederentreinen op aarden baan
Dat de zuidgaande goederentreinen richting Geldermalsen/Culemborg meer trillingen opwekken ter hoogte van meetpunt 2 dan de noordgaande treinen, hoewel deze op een verder afgelegen spoor rijden, is niet verbazingwekkend. De foto's in bijlage 1 van Peutz-notitie H 6250-2-N0-001 tonen dat de treinen met de grootste trillingsopwekking allen ertstreinen betreffen. In zuidgaande richting zijn deze treinen beladen, maar in noordgaande richting meestal leeg. DGMR heeft aan dezelfde spoorlijn, maar 2 km zuidelijker, metingen verricht waaruit hetzelfde beeld naar voren komt. De Peutz-notitie brengt deze zuidgaande ertstreinen niet spectraal in beeld, maar de dominante frequentie ligt bij deze zwaarbeladen ertstreinen rond 4 Hz, wanneer deze treinen zo'n 80 à 90 km/u rijden. Het veroorzakende mechanisme betreft de dynamische belasting die voorbijtrekkende wielstellen uitoefenen op de bodem. Vanwege de homogene samenstelling van deze treinen geeft dit een zeer regelmatige aanstoting van de bodem over de volle lengte van de treincombinatie waardoor de trillingsopwekking het karakter heeft van een lijnbron. Hiervoor geldt dat de trillingsafname met toenemende afstand tot het spoor maar zeer beperkt is en het risico voor bebouwing tot op ruime afstand van het spoor dus groter.

Trillingsopwekking spooronderdoorgang
Nabij de spooronderdoorgang zijn de noordgaande goedertreinen op het dichtstbijzijnde oostelijke spoor dominant gebleken. De invloed van de spooronderdoorgang op trillingen is complex, vooral in combinatie met snelheidsverschillen van treinen. Dat het afrijden van een kunstwerk een verhoging van trillingen geeft, is echter wel verklaarbaar en ook uit ander onderzoek gebleken. Hoewel er in de overgang van aarden baan naar kunstwerk (onderdoorgang) egalisatieplanken worden opgenomen die de stijfheidsovergang minder groot maken, de spoorconditie beter moeten houden en eventuele verzakkingen meer geleidelijk moeten laten verlopen, zal er toch sprake zijn van een stijfheidsverschil (impedantieverschil) en zullen met de tijd ook enige hoogteverschillen ontstaan.
Bij een trein die het kunstwerk oprijdt, in dit geval de zuidgaande treinen, vindt de stootbelasting plaats op het kunstwerk, maar bij treinen die het kunstwerk afrijden (noordgaand) op de aarden

k:\doc\bl2019\051700\b20190517001v2.docx 19-09-2019

baan zelf. Dat laatste is dus rechtstreeks van invloed op de trillingsopwekking in de bodem. Mogelijk dat het vervolgens ook nog enige baanlengte kost voor het effect van dit 'neervallen' van de trein op de aarden baan weer is uitgedempt. Dat stuk baanlengte bevindt zich in dit geval dus langs de bouwkavel. Bij de zuidgaande treinen treedt mogelijk hetzelfde op, maar dan aan de zuidzijde van de onderdoorgang, waar er geen bebouwing is.

Praktische betekenis voor het project Hofstad 4b is dat nabij de spooronderdoorgang ook reizigerstreinen een hinderrisico opleveren in bebouwing. In de Peutz-notitie wordt aangegeven dat trillingssterkten V_{max} in woningen als gevolg van reizigerstreinen nog tot circa 0,5 kunnen reiken. Dit hangt echter af van de trillingsversterking van de gebouwconstructie en de woningvloeren waarmee is gerekend. Gegeven de lage dominante frequenties van 4 Hz en 8 Hz bij de onderdoorgang is het zeker mogelijk om woningvloeren zodanig te ontwerpen dat de vloerveldversterking minder zal zijn dan de in het Peutz-rapport genoemde versterkingsfactor 3 tot 5. Toch moet bij deze lage frequenties weer rekening worden gehouden met mogelijke trillingsversterking van de draagconstructie op het funderingssysteem.
Op hoger gelegen verdiepingen kan dit voor de horizontale richtingen een aandachtspunt zijn en dan met name in de richting met de kleinste gebouwafmeting. Voor de eerstelijns bebouwing zal dit zijn in de X-richting haaks op het spoor.

In de verticale richting leidt een paalfundering doorgaans tot een significante verlaging van de trillingssterkte, maar de mate waarin hangt af van de bodemsamenstelling en de lengte van de palen. Peutz noemt hiervoor een reductie van 5 dB ofwel een factor 1,8. In de praktijk worden vaak ook grotere reducties waargenomen. In een relatief slappe bodem, vaak gelijk opgaand met een toenemende diepte waarop de draagkrachtige laag wordt aangetroffen, worden vaak aanzienlijk hogere overdrachtsverzwakkingen gemeten tussen het maaiveld en de fundering in verticale richting. Vanwege deze onzekerheid heeft DGMR aanvullend overdrachtsmetingen uitgevoerd aan al gerealiseerde bebouwing in naar verwachting globaal dezelfde bodemsamenstelling. Deze bebouwing bevindt zich slechts op 100 tot 200 meter afstand van het voorliggende bouwplan.

4. Overdrachtsmetingen wijk Leebrug

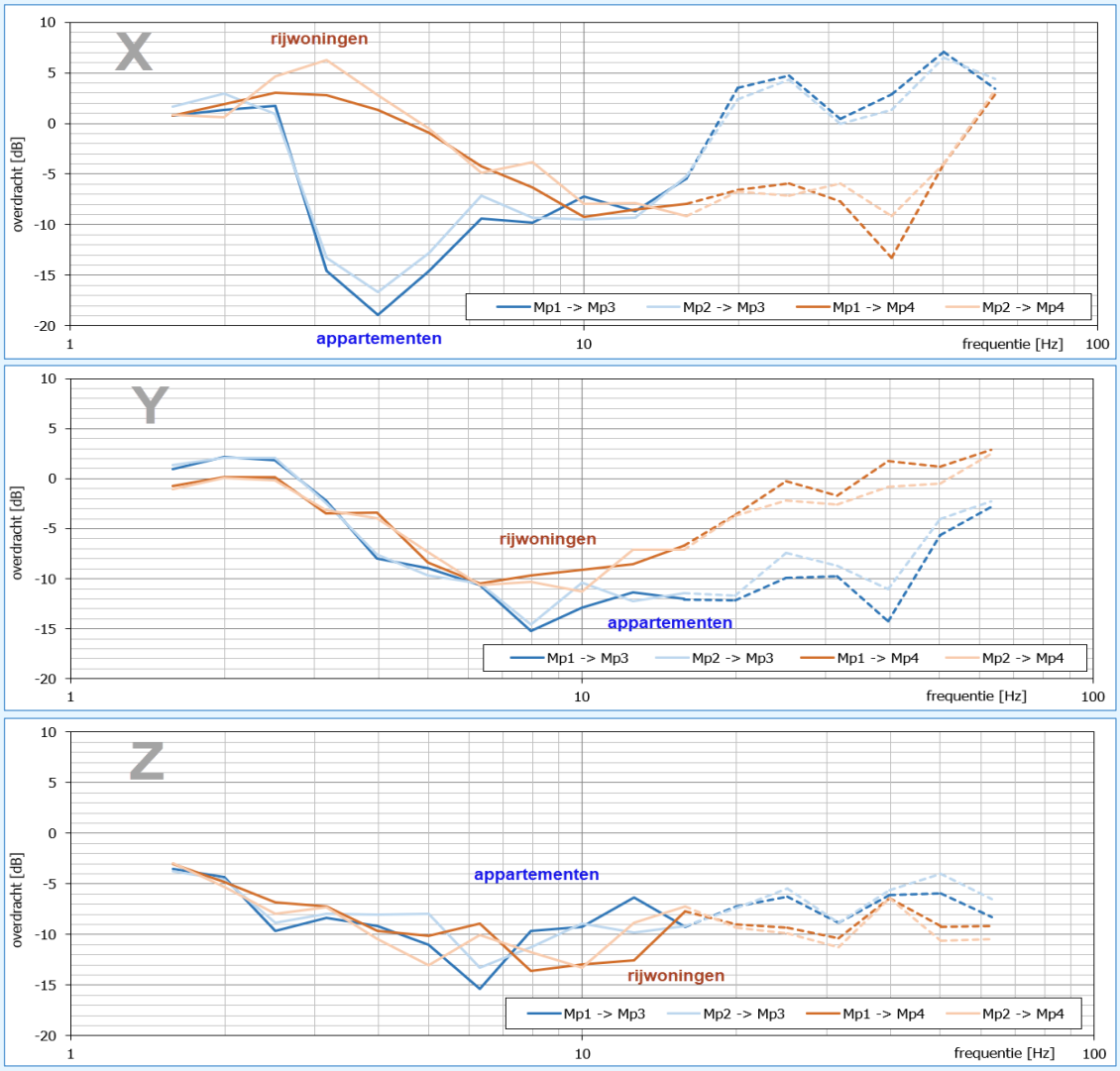
Om meer inzicht te krijgen of dit ook in Houten het geval zou kunnen zijn, heeft DGMR tussen 17 en 19 juli 2019 overdrachtsmetingen uitgevoerd aan de recent gerealiseerde bebouwing in de wijk Leebrug, aan de westzijde van het spoor. Hier is gemeten aan het appartementencomplex Maansteen 1-12 (4 bouwlagen) en het blok rijwoningen Edelsteen 52-84 (3 bouwlagen).
Beide objecten zijn op palen gefundeerd en liggen op gelijke hoogte als de kavel aan het Raaigras, ongeveer halverwege de meetraaien 1 en 2 als door Peutz bemeten.

De overdracht is bepaald tussen de bodem op maaiveld en de fundatie van het object.
De bodemmeetpunten zijn aangebracht in twee bloemperkjes tussen beide objecten (Mp1 en Mp2) en bestonden uit een 3D-meetsensor (geofoon) aangebracht op een 75 cm lange meetpen, op enkele centimeters na geheel ingeslagen in de bodem. De fundatiemeetpunten (Mp3 en Mp4) bestonden eveneens uit 3D-geofoons gemonteerd aan de gevel door middel van een beugel. In figuur 2 zijn de meetpunten aangegeven.



figuur 2: situatie Houten

Gedurende de 48 uur zijn in totaal 11 zware goederentreinen gepasseerd, op basis waarvan een overdracht is bepaald. Daarbij is telkens de overdracht bepaald tussen het gevelmeetpunt en beide bodemmeetpunten. In figuur 3 worden de gemeten overdracht weergegeven in respectievelijk de X-richting haaks op het spoor, de Y-richting evenwijdig aan het spoor en de verticale Z-richting.
De goederentreinpassages wekken met name trillingsenergie op bij frequenties tot globaal 16 Hz. Daarboven is de trillingsopwekking te gering om een betrouwbare overdracht te bepalen. Omdat bij deze frequenties weinig trillingen worden opgewekt is het ook minder relevant om de trillingsoverdracht bij deze frequenties goed te kennen.



figuur 3: gemeten overdrachtsverzwakking bodem naar gebouwfundatie

Figuur 3 toont dat in de verticale richting (Z) er al bij lage frequentie een aanmerkelijke overdrachtsverzwakking optreedt van ongeveer 4 dB bij 1,6 Hz oplopend tot ongeveer 10 dB bij 6 tot 10 Hz. Daarboven lijkt de overdrachtsverzakking terug te lopen, maar neemt ook de trillingsenergie af en wordt de overdracht minder betrouwbaar. Tussen het 4-laags appartementencomplex en de 3-laags rijwoningen zijn de verschillen in overdracht in deze richting verwaarloosbaar.

In de horizontale richting haaks op het spoor (X) wordt er een aanzienlijk verschil gevonden in overdracht. Bij zeer lage frequenties tot circa 2,5 Hz treedt voor beide objecten geen verzwakking op en zelfs een beetje versterking. Boven 2,5 Hz ontstaan er grote verschillen. Bij de rijwoningen loopt de versterking op tot circa 3 tot 6 dB bij ongeveer 3 Hz, maar voor het appartementencomplex treedt juist een zeer grote verzwakking op. De reden hiervan kan liggen in de afmetingen (diepte) van de gebouwen in de X-richting. Deze is voor het appartementencomplex aanzienlijk groter dan voor de rijwoningen en het lijkt erop dat voor de rijwoningen sprake is van een eigenfrequentie rond 3 Hz, waarbij het gebouw een kantelbeweging maakt ten opzichte van

het funderingssysteem. In de horizontale Y-richting is het blok rijwoningen meer uitgestrekt en treedt dit niet op. In de Y-richting ontlopen de overdrachtsverzwakkingen van het appartementencomplex en de rijwoningen elkaar ook niet veel. Tot 3 Hz treedt er weinig verzwakking op en in het geval van het appartementencomplex zelfs een lichte versterking. Van 3 tot 8 Hz loopt de verzwakking vervolgens op tot meer dan 10 dB.

De conclusie uit deze metingen is dat de overdrachtsverzwakking van een paalfundering in deze bodemsamenstelling groter is dan vooraf meestal aangenomen op basis van door TNO ooit opgestelde vuistregels, maar dat specifieke resonantiefrequenties in de horizontaalrichting een grote invloed kunnen hebben. Het is daarmee van belang om dergelijke resonantieverschijnselen in het relevante frequentiegebied te mijden, door eigenfrequenties van het bouwvolume op het funderingssysteem niet te laten samenvallen met de dominante frequenties uit het trillingsspectrum.

Zonder modelmatige berekeningen is het dynamische gedrag van een gebouw op haar funderingssysteem echter niet te doorgronden. Algemeen kan wel gesteld worden dat als trillingen in de bodem in één van beide horizontale richtingen veel sterker zijn dan in de ander het voordeel kan bieden een bouwcluster zo te draaien dat de grootste afmeting in deze richting komt te liggen. Het is dan wel van belang om fundaties aaneengesloten te houden (geen dilataties) zodat het gebouw ook effectief samenwerkt in het tegengaan van trillingen.

De metingen in de bodem, als onderdeel van gedane overdrachtsmetingen, laten evenwel nauwelijks een verschil zien tussen beide horizontaalrichtingen. Peutz maakt in haar rapportages melding van dat nabij de onderdoorgang Schonauwensepad (meetraai 1) de trillingssterkten evenwijdig aan het spoor groter zijn terwijl meer noordelijker (meetraai 2) de trillingen loodrecht op het spoor groter zijn. De DGMR-metingen liggen hier precies tussenin met nagenoeg gelijke waarden in beide horizontaalrichtingen. Dit lijkt dan mooi in elkaar over te lopen, maar maakt het evenwel lastig om dit instrument effectief in te zetten bij de kavelinvulling (oriëntatie bouwclusters).

5. Bijgestelde prognose

5.1 Prognose op basis van maaiveldmetingen

Met de gemeten trillingsoverdrachten en de door Peutz gemeten trillingssterkten in de bodem op maaiveld is een actualisatie gemaakt van de te verwachten trillingssterkten in te bouwen woningen aan het Raaigras. Deze prognose blijft indicatief karakter houden omdat er geen inzicht is in de wijze waarop de meetopnemers destijds door Peutz zijn aangebracht.

Op de kavel aan het Raaigras zijn effectieve trillingssterkten V_{max} gemeten tijdens zware goederentreinpassages van 0,7 (mm/s) op meetpunt 2. Deze waarde geldt voor de eerstelijns bebouwing (eengezinswoningen) op ongeveer 40 à 50 meter van het spoor. De dominante frequentie lag daarbij rond 4 Hz. Iets zuidelijker op meetpunt 1 zijn iets hogere trillingssterkten gemeten tot 0,8 in verticale richting. Dit meetpunt lag ook wat dichter bij het spoor om dat het te bouwen appartementencomplex daar op ongeveer 25 meter afstand gebouwd zal worden. De dominante frequenties op dit meetpunt nabij de spooronderdoorgang lagen bij 4 Hz en bij 8 tot circa 10 Hz.

Voor de noordelijk gelegen eengezinswoningen (nabij meetpunt 2) verwachten wij dat met de gemeten overdrachtsverzwakkingen en onder toepassing van woningvloeren met een laagste eigenfrequentie van 15 Hz of hoger (zie hoofdstuk maatregelen), de trillingssterkten V_{max} tijdens goederentreinpassages in de verticale meetrichting beperkt kunnen blijven tot ongeveer 0,4.
In de horizontale richting loodrecht op het spoor is het echter sterk afhankelijk van het gedrag van het woningcasco op het funderingssysteem. De gemeten trillingssterkten in de kavel zijn volgens de metingen uit oktober 2017 bij sommige passages van gelijke orde als in de verticale meetrichting, maar tijdens de hernieuwde metingen in juli 2018 werden bij geïdentificeerde passages van zware ertstreinen dergelijke hoge waarden niet meer gemeten en lagen de trillingssterkten in horizontale richtingen globaal een factor 2 tot 3 lager dan de verticale richting. Als de hogere waarden horizontaal, tijdens de metingen van oktober 2017, zich niet op andere wijze laten verklaren en aan treinpassages zijn toe te schrijven dan zal met een trillingsversterking van het woningcasco van ongeveer 4 dB in plaats van circa 10 dB verzwakking, de trillingssterkte V_{max} in deze richting de door Peutz gegeven verwachtingswaarde van 1,4 zeker kunnen benaderen, zo niet overstijgen. Op basis van de metingen uit juli 2018 zijn eerder trillingssterkten tot 0,8 à 1 te verwachten.
Als in het woningcasco geen noemenswaardige trillingsversterking optreedt (ontwerpuitdaging) dan zullen trillingssterkten aanmerkelijk lager uitvallen en worden trillingssterkten van gelijke orde verwacht als in de verticale richting, dus rond 0,4. Om te voldoen aan de streefwaarden uit de SBR-B richtlijn geldend voor de nachtperiode mag de trillingssterkte V_{max} evenwel niet hoger zijn dan tot 0,2. Tabel 1 geeft een overzicht van de door DGMR verwachte trillingen in dit project, zonder verdere maatregelen.

tabel 1: globale trillingsprognose, laagste vloereigenfrequentie > 15 Hz

Gebouwtype	Bouwlagen	Richting	Trilllingssterkte V_{max}		
			25 m*	40-50 m *eerste lijn*	80-90m *tweede lijn*
Eengezinswoningen *Noordelijk deel kavel (nabij Mp2)*	2-3	Verticaal Horizontaal	n.v.t.	0,4 0,4 - 1,4**	0,2 0,1 - 0,4**
Appartementen *Zuidelijk deel kavel (nabij Mp1)*	3-5	Verticaal Horizontaal	0,4 0,3	0,2 0,2 - 0,4	0,2 n.v.t.

* *afstand tot oostelijke spoor, afstand tot het westelijke spoor is 22m meer*
** bandbreedte bij geen tot maximale resonantie woningcasco op funderingssysteem

Evenwijdig aan het spoor zijn de door Peutz gemeten trillingssterkten op de kavel op meetpunt 2 ondergeschikt en als de bebouwing zich ook in deze richting uitstrekt dan zal in deze richting geen

k:\doc\b\2019\051700\b20190517 00r001v2.docx 19-09-2019

rekening te houden zijn met trillingsversterking van het woningcasco. Trillingssterkten in deze richting zijn dan ook ondergeschikt aan die in de beide andere richtingen.

Peutz heeft aan de hand van meetraai metingen vastgesteld wat de trillingsverzwakking is met toenemende afstand tot het spoor. Deze bepaling is gedaan aan de hand van reizigerstreinen en niet voor goederentreinen. Bij de zware goederentreinen (ertstreinen) heeft de sterke 4 Hz trilling het karakter van een lijnbron met maar beperkte trillingsafname met toenemende afstand tot het spoor. Bij reizigerstreinen is de afstand tussen de wielstellen groter dan bij de ertstreinen en heeft de trillingsopwekking bij deze frequentie mogelijk meer het karakter van een puntbron. Hiervoor is de trillingsafname met toenemende afstand tot het spoor aanzienlijk groter.

Metingen door DGMR op een 2 km zuidelijker gelegen kavel (zelfde treinen) onderstrepen het lijnbronkarakter van de sterke 4 Hz trilling bij ertstreinen en laten zien dat de trillingsafname met toenemende afstand tot het spoor daardoor beperkt is. Om trillingen met ongeveer een factor 2 te doen afnemen zou een afstandstoename met ongeveer een factor 1,7 nodig zijn, dus van 40 meter naar 65 à 70 meter van het spoor. Aangezien de maatgevende beladen ertstreinen op het westelijke spoor rijden gaat het feitelijk om een afstandstoename van circa 60 meter naar 90 meter ten opzichte van dat spoor.

Nabij de spooronderdoorgang Schonauwensepad zijn op 25 meter afstand tot het spoor metingen gedaan (meetpunt 1). Op dit meetpunt zijn de gemeten trillingssterkten in verticale richting dus iets hoger dan op meetpunt 2, maar de gemeten trillingssterkten in de horizontale richting lager. Er worden in elk geval geen excessief hoge trillingssterkten gemeten zoals tijdens sommige passages op meetpunt 2 (oktober 2017) het geval. Op dit meetpunt zijn zowel de goederentreinen alsook de reizigerstreinen van belang in tegenstelling tot meetpunt 2. De hoge trillingssterkten lijken hier meer toe te schrijven aan elementen in het spoor, waaronder de impedantiesprong die het kunstwerk vormt ten opzichte van de aarden baan. In dat geval zal de trillingsafname met toenemende afstand tot het spoor ook groter zijn vanwege het puntbronkarakter.

Nabij de spooronderdoorgang wordt een appartementencomplex gebouwd. Een appartementencomplex heeft doorgaans aanzienlijk meer massa dan een eengezinswoning en daarmee is het mogelijk om meer weerstand tegen verticale trillingen te genereren en zodoende lagere trillingssterkten te bereiken. Als ook gezorgd wordt voor een zich uitstrekkende constructie, zowel loodrecht als evenwijdig aan het spoor dan biedt dit ook mogelijkheden om horizontale trillingen tegen te gaan. Een trillingsbewust ontwerp op deze locatielocatie is dus een vereiste.

5.2 Prognose op basis van vergelijk meetwaarden Edelsteen/Maansteen

Behalve inzicht in de overdrachtsverzwakkingen van bodem naar gebouwfundatie geven de metingen aan de westzijde van het spoor aan de Edelsteen/Maansteen ook een direct beeld van de optredende trillingssterkten in de bodem en aan beide objecten, het appartementencomplex en het blok rijwoningen. Wat betreft de gebouwen is er geen direct inzicht in trillingssterkten op vloeren of op hogere verdiepingen maar wel op het niveau van de fundatie, waarin de overdracht van bodem naar gebouw dus verwerkt is. Aan de westzijde van het spoor is het maaiveld nabij de meetpunten bestraat en aan deze zijde bevindt zich ook een sloot op circa 18 meter afstand van het meest nabije spoor.

De maximaal gemeten trillingssterkten V_{max} op maaiveld bedragen hier 0,2 in horizontale richting en 0,35 in verticale richting. Op het appartementencomplex en het blok eengezinswoningen zijn maximale trillingssterkten gemeten van 0,10 tot 0,14 in verticale richting en in de horizontale richting maximaal 0,10 op het appartementencomplex en max 0,17 aan de rijwoningen.
Op vloerposities zou enige versterking kunnen optreden, temeer naar hogere verdiepingen, maar voor het appartementencomplex lijken forse trillingssterkten in elk geval niet aan de orde, ook al kan zonder nader onderzoek niet zomaar gesteld worden dat aan de strenge streefwaarde A2 voor de nachtperiode van 0,2 wordt voldaan.
In de rijwoningen treedt enige resonantie in horizontale richting dwars op het spoor op en het is niet uit te sluiten dat op de eerste en tweede verdieping de streefwaarde wordt overschreden. Het lijkt er evenwel niet op dat hier goed voelbare trillingen met een trillingssterkten van meer dan 0,4 optreden.

Het contrast tussen de bestaande gebouwen aan de Edelsteen/Maansteen en de prognose voor de toekomstige bebouwing aan het Raaigras (oostzijde spoor) is dus groot. Afgaande op de maaiveldmetingen aan beide spoorzijden is het verschil ongeveer een factor 2. Verklaringen zouden kunnen liggen in de terreintoestand (verhard/onverhard) en de aanwezigheid van de (ondiepe) sloot. Er zijn echter nauwelijks redenen te bedenken waarom de trillingssterkten aan de westzijde van het spoor niet reproduceerbaar zouden zijn aan de oostzijde van het spoor in het project Hofstad 4b. Temeer als bedacht wordt dat de zwaarbeladen ertstreinen op het meest westelijke spoor rijden.

6. Maatregelen

Ook na bijstelling van de prognoses, op basis van nadere beschouwing van de Peutz-rapporten en de gedane overdrachtsmetingen, blijft de verwachting dat trillingssterkten in de te bouwen woningen (eerstelijns) en het appartementencomplex niet zomaar zullen voldoen aan de streefwaarde A2 van 0,2 geldende ten aanzien van de V_{max} in de nachtperiode. Om hieraan te voldoen zou ongeveer een factor 2 trillingreductie nodig zijn, maar moet bovenal worden voorkomen dat het woningcasco op haar funderingssysteem gevoelig is voor (een eigenfrequentie heeft bij) de dominante frequenties in het treinspectrum en met name rond 4 Hz. Aanvullend hierop is het van belang dat woningvloeren niet gevoelig zijn voor deze frequenties. Dit betekent dat sowieso een trillingsbewust ontwerp van gebouw en vloer gewenst is op deze locatie.

6.1 Maatregelen gebouwen

6.1.1 Vloeren

Uit de onderzoeken is gebleken dat de dominante frequenties van treintrillingen lager liggen dan 12,5 Hz en veelal zelfs lager dan 10 Hz. Om trillingsversterking van vloeren te voorkomen is het belangrijk dat de laagste eigenfrequentie ruim boven deze dominante frequenties ligt. Vloeren moeten daartoe een laagste buig-eigenfrequentie hebben van bij voorkeur 15 Hz, maar minimaal 12 Hz. Dit kan bijvoorbeeld gerealiseerd worden met kanaalplaatvloeren van 200 mm dik met een overspanning van maximaal 5.2 meter of 260 mm dik met een overspanning van 6 meter. In beide gevallen is gerekend met een 50 à 70 mm zandcement afwerkvloer. Ook met breedplaatvloeren en massieve vloeren zijn er mogelijkheden, maar in geen geval zijn kanaalplaatvloeren met grote overspanningen toe te passen.

6.1.2 Draagconstructie en funderingssysteem

Resonantie van de draagconstructie op het funderingssysteem is een aanmerkelijk trillingsrisico. Door voldoende schijfwerking in het casco te brengen kan de draagconstructie verstijfd worden, en dat zal in de naar verwachting maatgevende richting, voorwaarts/achterwaarts voor de eerstelijns eengezinswoningen geen probleem zijn, want dat valt samen met de woning scheidende wanden. Evenwel kan het casco daarmee nog steeds in resonantie geraken door een horizontale verplaatsing gecombineerd met een voor-/achterwaartse kantelbeweging ten opzichte van het funderingssysteem. Dit is in woningen met hogere trillingssterkten op de verdieping(en) in horizontaalrichting meestal ook de bepalende trilvorm. Behalve de woningmassa wordt de bij deze trilvorm behorende eigenfrequentie bepaald door de stijfheid van de fundering en omringende bodem en de interactie tussen beide. Dit is een complex probleem dat vaak moeilijk met voldoende nauwkeurigheid valt te berekenen. Het opzetten van een dynamisch model in een eindige elementen rekenpakket (EEM) is echter de aangewezen methode om met dit soort problemen om te gaan. Daarin kan het effect paallengtes, paalposities en stand en de afmetingen van het gebouw in elk geval trendmatig bepaald worden en zo goed mogelijk afgestemd worden op het te mijden frequentiegebied.

Op voorhand kan echter al wel gesteld worden dat als de gebouwdiepte (voor naar achter) vergroot wordt, het risico op trillingsproblemen door deze kantelbeweging snel kan afnemen. Een appartementencomplex met wooneenheden aan voor en achterzijde en tussenliggende gang/galerij (alles constructief gekoppeld) zal hier doorgaans minder risico mee lopen dan relatief hoge en minder diepe eengezinswoningen. Om met voldoende betrouwbaarheid inzicht te krijgen in de gevoeligheid van de gekozen gebouwconstructies voor de sterk aanwezige 4 Hz trillingen van de ertstreinen worden EEM-berekeningen voorgesteld.

k:\doc\bl\2019\051700\b20190517001v2.docx 19-09-2019

6.1.3 Vorm en oriëntatie

Aansluitend op voorgaande beschouwing van de draagconstructie op het funderingssysteem heeft de hoogte, breedte en diepteverhouding van een gebouw veel invloed op de ligging van eigenfrequenties en dus het trillingsgedrag. Een laag gebouw met groot grondplan is minder gevoelig voor horizontale trillingen mits op fundatieniveau de bouwdelen gekoppeld zijn. Toch is hoogte weer nodig om in verticale richting voldoende massa en dus impedantie tegen trillingen te waarborgen. Als gezorgd wordt voor een in beide hoofdrichtingen, zowel loodrecht als evenwijdig aan het spoor, uitstrekkende constructie bijvoorbeeld een gebouw in een hoek-, hoefijzer- of carrévorm, dan biedt dit mogelijkheden om horizontale trillingen tegen te gaan.

6.1.4 Trillingsisolatie

Een met enige regelmaat voorgestelde maatregel om trillingen te verlagen betreft het opnemen van trillingsisolatie in de gebouwconstructie, meestal tussen fundering en bovenbouw. Omdat het in deze situatie gaat om zeer laagfrequente dominante trillingen zien wij dit niet als een oplossing. Om bij globaal 4 Hz (tertsbandfrequentie, maar exacte frequentie ligt soms nog enkele tienden lager) al trillingsisolatie te realiseren zouden zodanig slappe veren gekozen moeten worden dat de bepalende eigentrilvorm optreedt bij hooguit 2,5 Hz. Dit vergt dermate slappe veren dat daarmee praktische problemen ontstaan met zakkingen van het afgeveerde woningcasco met de tijd en bij wijzigende belastingssituaties. Ook wordt de woning dan gevoeliger voor bijvoorbeeld windbelasting. In andere situaties met trillingsproblematiek kan trillingsisolatie een uitkomst bieden, maar naar onze mening niet in situaties met zware erts-/goederentreinen in combinatie met een relatief slappe bodemopbouw.

6.2 Maatregelen in de bodem (overdrachtspad)

In het kader van het Tracébesluit Sporen in Utrecht is in 2014 door Movares onderzoek[2] gedaan naar de effectiviteit van maatregelen om trillingen van treinen tegen te gaan. Dit speelde zich af even ten noorden van Houten, langs het spoor oostelijk van Lunetten. Het spoor ligt daar weliswaar niet meer op een verhoogd talud, maar verder gaat het om een vergelijkbare spoorconstructie en treinmaterieel. Ook de bodemopbouw komt in grote lijnen overeen, waarmee dit onderzoek een goede indicatie geeft van de effectiviteit van maatregelen in het overdrachtspad (de bodem) tussen spoor en gebouwen.

Movares heeft ondergrondse trillingskerende contructies (OTC) onderzocht in de vorm van open sleuven (onder andere een sloot), diepwanden van beton of jetgrout en met elastisch materiaal beklede diepwanden. Dit is gedaan voor diverse dieptes van deze maatregelen.
Uit het onderzoek blijkt dat veel van deze maatregelen maar een beperkt effect hebben op de trillingsopwekking V_{max}, veroorzaakt door de goederentreinen. Dit komt doordat de treinen die het meeste trillingen veroorzaken, de zware goederentreinen (ertstreinen) dit meestal doen bij de zeer de lage frequentie van rond 4 Hz. Alle onderzochte maatregelen hadden bij deze frequentie maar een gering effect en soms zelfs negatief effect. Het positieve effect van veel van de maatregelen lag bij frequenties vanaf globaal 5 Hz en deze maatregelen hadden dan ook vooral effect op trillingen veroorzaakt door een mindere wielkwaliteit van treinen.
In sommige doorgerekende varianten resulteerde dat in een substantiële trillingsverlaging voor een groot deel van de treinpopulatie (veelal reizigerstreinen) wat ten goede komt aan de langtijdgemiddelde V_{per} die daardoor ook daalt, echter zonder de excessen van de zware goederentreinen doelmatig te bestrijden.
De maatregel kan dan zeker een merkbaar verschil opleveren voor bewoners, maar helpt dan

[2] *Movares-rapport D79-PBO-KA-1400062 van 31 maart 2014 (maatregelonderzoek voor tracébesluit Sporen in Utrecht (SiU))*

k:\doc\b\2019\051700\b20190517 00r001v2.docx 19-09-2019

mogelijk niet als maatregel om te voldoen aan de streefwaarden uit de SBR-B ten aanzien van de V_{max}.

Uit het Movares-onderzoek bleek dat betonnen diepwanden pas effectief trillingen verlagen vanaf een diepte van tien meter of meer. De V_{per} daalt daarbij procentueel het meest. De trillingssterkte V_{max}, waarin de zeer laagfrequente trillingen van de ertstreinen bepalend zijn, neemt pas effectief af als de diepwand nog dieper steekt tot circa 15 meter en tenminste 1,5 meter dik wordt. In dat onderzoek daalde V_{max} dan met 30% (van 0,49 naar 0,38) en de V_{per} halveerde (van 0,06 naar 0,03).

Met een vijf meter diepe en één meter brede sleuf als maatregel, aan beide zijden begrenst door 12,5 meter diepe stalen damwanden, werd een reductie van de V_{max} van 15 à 20% berekend en eveneens een halvering van de V_{per}.

De kosten van deze twee maatregelen werden destijds geraamd op circa [redacted]-- (diepwand) en [redacted]-- (sleuf met damwanden) per strekkende meter. In het project Hofstad 4B zou het gaan om ongeveer 350 meter lengte langs het spoor. Totale projectkosten zouden in dat geval rond [redacted] bedragen. Bij een verlaging van de maximale trillingssterkte V_{max} met 20 tot 30% is dit een weinig doelmatige investering.

In het onderzoek is ook een twee meter diepe sloot beschouwd. Aan de oostzijde van het spoor (Hofstad) is momenteel geen sloot aanwezig, maar aan de westzijde (Leebrug) wel. Movares heeft het effect van een twee meter diepe sloot onderzocht. Deze sloot had een verwaarloosbaar effect op de door de zware goederentreinen gedomineerde V_{max}, maar had wel enig effect op de V_{per}, doordat trillingen van goederen- en reizigerstreinen met qua frequenties wat hogere signatuur, er iets door afnamen. De kosten van de sloot werden (vanwege diepte en ruimtebeslag) geraamd op [redacted] per strekkende meter. De aanleg van een zo diep mogelijke sloot heeft zeker zin, maar zal naar verwachting niet de voor de SBR-B maatgevende treinpassages afdoende bestrijden.

k:\doc\b\2019\051700\b201905170r001v2.docx 19-09-2019

7. Conclusies en aanbevelingen

Het trillingsprobleem op deze locatie is voor een belangrijk deel toe te schrijven aan de zware ertstreinen in zuidgaande richting, die bij zeer lage frequentie (rond 4 Hz) zeer sterke trillingen opwekken. Deze trillingen planten zich sterk (weinig gedempt) voort in de bodem.

Na beschouwing van de Peutz-rapporten en vervolgonderzoek aan twee gebouwen in de wijk Leebrug in Houten komt DGMR tot de conclusie dat te verwachten trillingen in de nieuwbouw van Hofstad 4b lager zouden kunnen uitvallen dan door Peutz aangegeven. Onder aangenomen worst-case condities door Peutz zijn de geschetste trillingssterkten ook weer niet ondenkbaar, althans de maximale trillingssterkte van 1,4 volgens de Peutz-notitie uit november 2018.

De metingen aan het appartementencomplex aan de Maansteen en het blok rijwoningen aan de Edelsteen, waarbij de laatste horizontaal enige trillingsversterking (haaks op het spoor) lijkt te ondergaan, wijst echter niet op de zeer hoge trillingssterkten als door Peutz geprognosticeerd. Of deze objecten voldoen aan de strenge streefwaarde A2 uit de SBR-B (nachtperiode) is niet bekend, maar er lijkt geen forse overschrijding aan de orde. De trillingssterkten liggen er minstens een factor 2 lager dan de prognoses voor Hofstad 4b. Zonder extreme resonantie van het woningcasco op de dominante frequentie van 4 Hz (goederentreinen) wordt horizontaal op verdiepingsvloeren een maximale trillingssterkte van 0,8 à 1 verwacht en verticaal maximaal 0,4. Dit betekent dat nog niet wordt voldaan aan de SBR-B (streefwaarde nachtperiode).

Met een trillingsbewust ontwerp moet het mogelijk zijn om trillingen verder te reduceren en gelijke condities te scheppen als aan de westzijde van het spoor in de wijk Leebrug. Afgaand op de twee gemeten objecten zou met een trillingsbewust ontwerp de trillingssterkte V_{per} kunnen voldoen aan de SBR-B en de V_{max} de streefwaarde A2 voor de dagperiode kunnen halen, maar die voor de nachtperiode in de eerstelijns eengezinswoningen mogelijk nog overschrijden.

Bepalend voor de trillingsproblematiek op deze locatie zijn de zware ertstreinen die met hun korte ertsbakken een zeer sterke, regelmatige en laagfrequente (4 Hz) dynamische belasting uitoefenen op de bodem. De bodem in Houten is mogelijk extra gevoelig voor deze frequentie en ook het funderingssysteem is vaak gevoelig voor dergelijke lage frequenties. Op meerdere locaties in Nederland met relatief slappe bodem, in combinatie met zware ertstreinen, speelt deze problematiek en deze laat zich niet eenvoudig verhelpen. Het devies is zwaar bouwen of meer afstand houden en resonant gedrag van vloeren en woningcasco zoveel mogelijk voorkomen. Verder is het advies om stijve woningvloeren aan te houden (eigenfrequentie > 12 Hz) en het ontwerp van tenminste de eerstelijns eengezinswoningen te begeleiden door eindige elementen berekeningen, om resonantie van het woningcaso op het funderingssysteem te voorkomen.

Maatregelen in de bodem tussen spoor en woningen zijn volgens het Movares-onderzoek maar beperkt effectief en niet afdoende en bovendien ingrijpend en kostbaar. Maatregelen aan de spoorbaan zijn niet nader onderzocht omdat dit niet binnen de invloedssfeer van dit project ligt.

[redacted]

DGMR Bouw B.V.

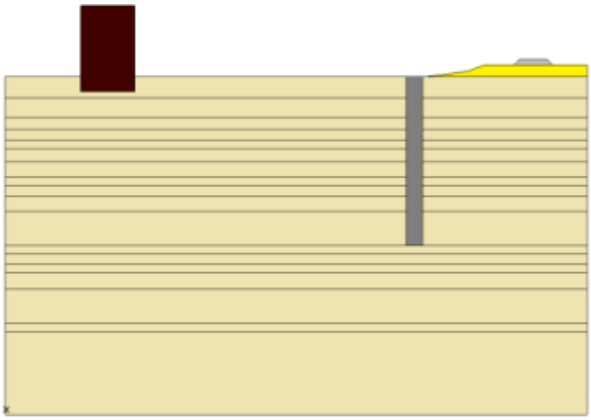
k:\doc\b\2019\051700\b20190517 00r001v2.docx 19-09-2019

Bijlage 1

Titel	Invloed diepwand op trillingen
Omvang	1
Toelichting	Overgenomen uit Movares-rapport D79-PBO-KA-1400062 (31 maart 2014)

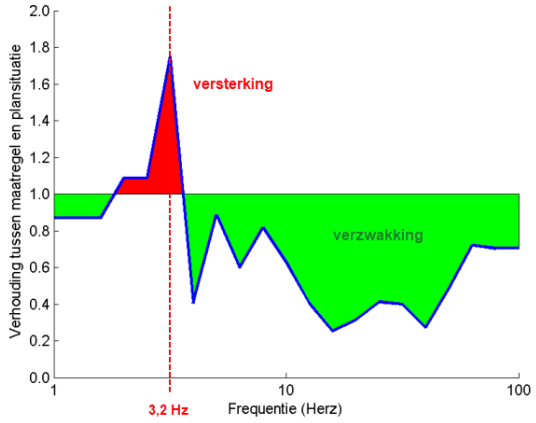
T.2.l Diepwand beton

- 15.7m diep, 1.5 m breed



I.14 Maatregel T.2.l – Diepwand van beton, 15.7 m diep, 1.5 m breed

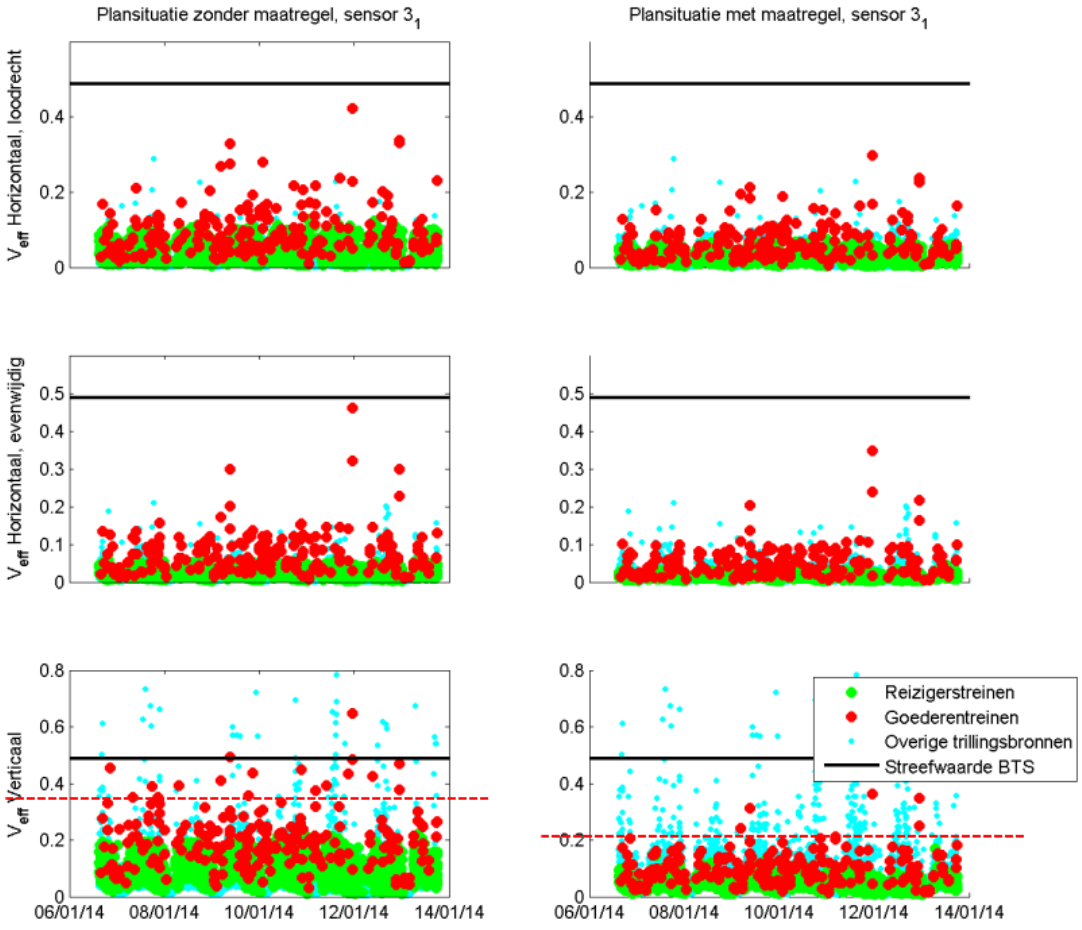
Het frequentie-afhankelijke effect van deze maatregel is weergegeven in Figuur III-40 . De resultaten van de plansituatie met maatregel zijn weergegeven in Tabel III-14. De plansituatie met en zonder maatregel is weergegeven in Figuur III-41 en Figuur III-42.



Figuur III - 40 *Frequentie-afhankelijk effect van maatregel T.2.l*

Tabel III - 14 *Resultaten plansituatie met maatregel*

	3_2, fundering		3_1, boven		
	V	H1	H1	H2	V
$V_{per,\ dag}$	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.02
$V_{per,\ avond}$	0.02	<0.01	0.01	0.01	0.03
$V_{per,\ nacht}$	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.02
$V_{max,\ stat}$	0.34	0.11	0.24	0.26	0.38
X (%)	0.78	0.78	1.57	0.78	0.78
#top$X$%	16	16	32	16	16
μ	-1.63	-2.53	-1.93	-2.02	-1.45
σ	0.33	0.22	0.27	0.41	0.30
β	1.62	1.62	1.92	1.62	1.62
R	22	15	15	27	20
$V_{per,\ streefwaarde}$	**0.10**	**0.10**	**0.10**	**0.10**	**0.10**
$V_{max,\ streefwaarde}$	**0.48**	**0.48**	**0.48**	**0.48**	**0.48**



Figuur III - 41 *Trillingssituatie met maatregel T.2.l, sensor 3-1*