

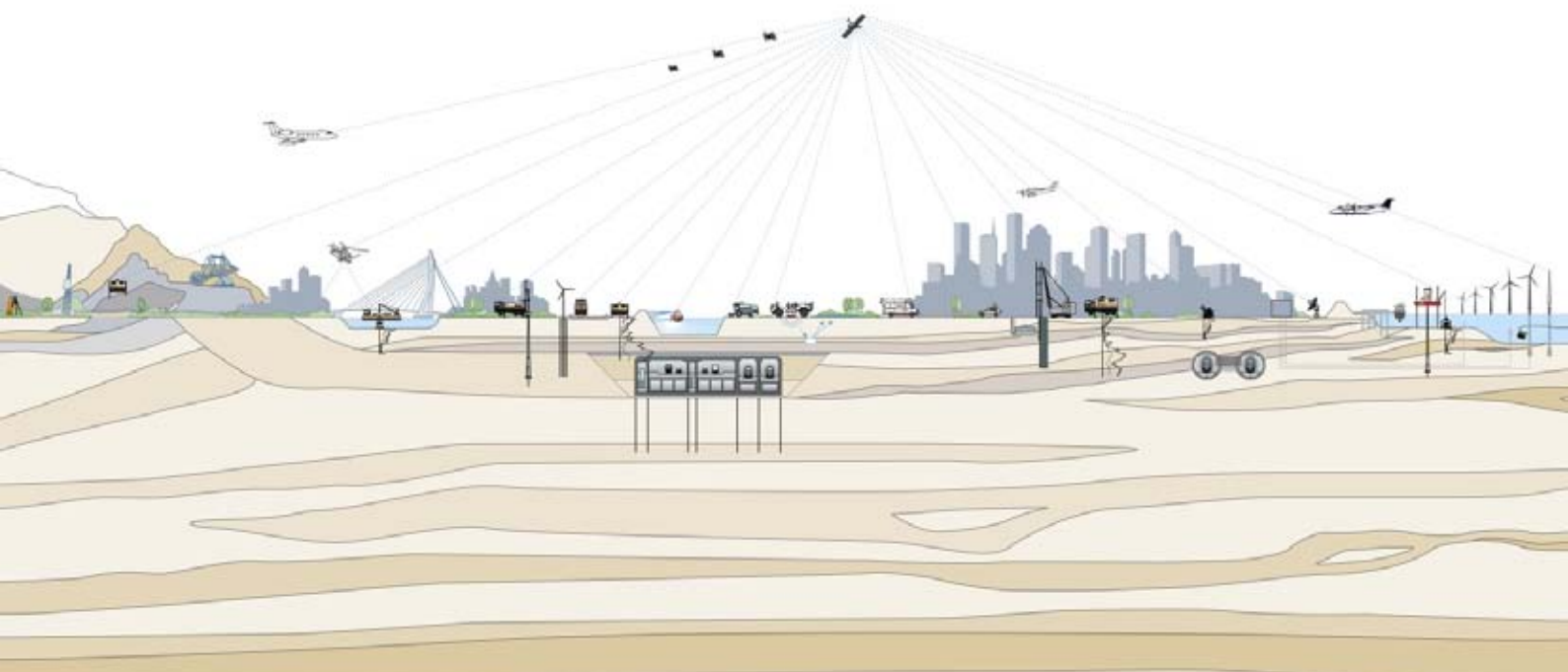
**Rapportage Trillingsonderzoek
Hart van Bodegraven
te Bodegraven**

Document Nr.: 1017-0492-020

Versie: 1.0

Datum: 23 augustus 2018

heijmans



Opdrachtgever Heijmans Vastgoed
Postbus 4422
3006 AK Rotterdam

Monitoringsduur 7 juni 2018 t/m 14 juni 2018

Opdrachtnemer Fugro NL Land B.V.
Veurse Achterweg 10
Postbus 63
2260 AB Leidschendam
T 070 31 11414

Projectleider ir. A.J. Snethlage
Senior Geotechnical Consultant
070 31 11169

Versiebeheer

1.0	Initiële versie	LM/DWE	ASN	ASN	23-08-2018
Rev	Omschrijving	Opgesteld	Gecontroleerd	Goedgekeurd	Datum

INHOUDSOPGAVE

INHOUDSOPGAVE	I
1. INLEIDING	1
2. UITVOERING	2
2.1 Meetapparatuur	2
2.2 Meetlocatie	2
3. MEETRESULTATEN	5
3.1 Treinpassages	5
3.2 Overige werkzaamheden	5
3.3 Trilmeetdata	5
4. ANALYSE MEETRESULTATEN	15
4.1 Toetsing op schade SBR A 2017 en hinderbeleving SBR B	15
4.2 Toetsingsprocedure	16
4.3 Soorten trillingschades en hinderkwalificatie	17
4.4 Meetresultaten	18
4.5 Modelling	22
4.6 Postdictie trillingsmeetdata	22
4.7 Invloedsgebied	24
4.8 Trillingsreducerende maatregelen	25
5. CONCLUSIES	27
A. TEKENING MEETLOCATIES	30
B. BEOORDELING VAN TRILLINGEN	31
C. MODELLERING CONFORM CUR 166	34

1. INLEIDING

Ten behoeve van toekomstige nieuwbouw project Hart van Bodegraven te Bodegraven heeft Heijmans Vastgoed, Fugro NL Land B.V. opdracht gegeven om de trillingen te meten die door passerende treinen over een naastgelegen spoorlijn worden veroorzaakt.

De trillingsmetingen zijn uitgevoerd in de periode van 6 juni tot 14 juni uitgevoerd.

Doelstelling

Het doel van de trillingsmetingen is inzicht verkrijgen in de trillingsniveaus ter plaatse van de nieuw te realiseren woningen, op basis waarvan een toetsing op trillingshinder (SBR B) kan worden afgeleid. Daarnaast is het doel een mogelijk invloedsgebied te bepalen waarbinnen hinderbeleving aan de orde kan zijn.

Dit rapport bevat een korte projectbeschrijving, meetgegevens, achtergronden voor beoordeling van trillingen, toets op trillingshinder en conclusie.



Figuur 1.1: Bouwterrein met spoorlijn op de achtergrond

Het project Hart van Bodegraven omvat de nieuwbouw van 84 woningen, ten zuidwesten van het centrum. De woningen liggen op een afstand van tenminste ca. 25 m van het spoor. Geadviseerd wordt om de afstand tussen spoor en woningen te verifiëren.

In de nieuwe situatie zullen de meest zuidwestelijk gelegen woningen van het spoor gescheiden zijn middels een voetpad, groenvoorziening en een (berm)sloot.

2. UITVOERING

2.1 Meetapparatuur

Een meetopstelling bestaat uit een verwerkingsunit (Vibra) en een trilmeetconus. De trilmeetconus wordt in de grond geplaatst en meet snelheden in drie richtingen (x,y,z). In de verwerkingsunit wordt de frequentie in dezelfde drie richtingen berekend. Deze frequenties en snelheden worden direct op het scherm van de verwerkingsunit getoond.

De verwerkingsunit slaat de van de sensor afkomstige meetsignalen automatisch op. Per gekozen tijdsinterval worden de hoogst gemeten trillingssnelheid met bijbehorende frequentie opgeslagen. Een tijdsinterval van 3 seconden is gehanteerd.

2.2 Meetlocatie

In tabel 2.1 en figuur 2.2 is weergegeven op welke locaties is gemeten met welke meetapparatuur (nr). De meetpunten zijn verdeeld over twee meetraaien met vaste tussenafstanden (ca. 5 m). Weergegeven coördinaten in tabel en plattegrond zijn de coördinaten zoals ingemeten na plaatsing.

Tabel 2.1: Apparatuur en locaties meetpunten

Meetpunt	Vibra	Conus	X-coördinaat	Y-coördinaat	Z conus [m NAP]
TM1	480	240	110674,2	455229,2	-2,001
TM2	87	242	110679,5	455235,1	-0,511
TM3	477	244	110684,9	455241,1	-0,653
TM4	85	124	110690,2	455247	-0,452
TM5	80	243	110737,9	455175,5	-2,242
TM6	83	237	110742,1	455182,4	-0,707
TM7	86	238	110746,3	455189,2	-0,687
TM8	84	200	110750,5	455196,1	-0,545
TM9 ¹	72	136*	110669	455223,1	-1,588

¹ TM9 is geen conus, maar een op het maaiveld geplaatste gefoon. Dit betreft een extra meetpunt direct aan het water.

Onderstaande afbeelding (zie ook bijlage 1), geeft een weergave van de geplaatste meetinstrumenten in de 2 meetraaien. Tevens is de x- en y- richting hierin aangegeven.



Figuur 2.1: Plattegrond meetlocaties (as-build)

In onderstaande twee afbeeldingen zijn de meetraaiën weergegeven.



Figuur 2.2: Meetraai 1, TM 1 t/m 4 en TM9



Figuur 2.3: Meetraai 2: TM5 t/m TM8 (opmerking: nummering TM7 en TM8 zijn omgedraaid).

3. MEETRESULTATEN

De grafieken in de hierna volgende pagina's geven het verloop van de gemeten trillings-versnellingen aan gedurende de meetperiode van bijna 8 dagen. De metingen zijn gestart op 6 juni, na installatie en beëindigd op 14 juni. Uitzonderingen hierop zijn TM4 en 8 welke i.v.m. planning op 7 juni geplaatst zijn. Alle meetpunten hebben tenminste 7 dagen gemeten.

3.1 Treinpassages

De meetresultaten kunnen naast de tijdstabel met treinpassages worden gelegd door deze onderling te vergelijken ((vertrek)tijden) bij het naastgelegen NS-station Bodegraven. Station Bodegraven fungeert tevens als passeervak voor de treinen. De spoorlijn tussen Bodegraven en Alphen aan de Rijn, en verder naar Leiden, is enkelsporig.

Ieder heel uur, tussen 06:15 en 00:46 uur, rijden de treinen conform de dienstregeling. Per uur zijn de volgende tijden van toepassing:

Richting Utrecht:

__:15

__:45

Richting Leiden:

__:16

__:46

3.2 Overige werkzaamheden

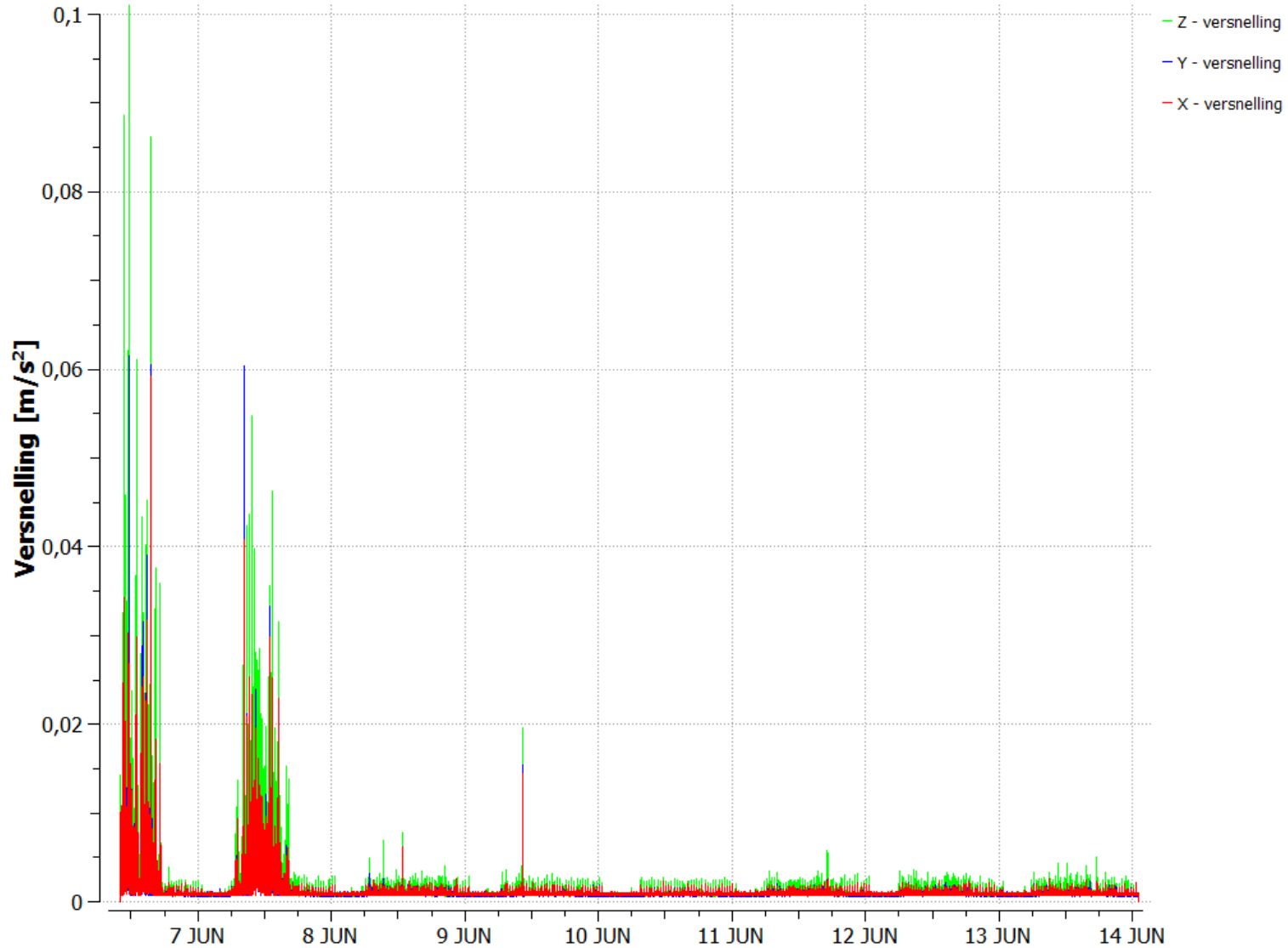
Gedurende de eerste twee meetdagen is grondverzet uitgevoerd op de projectlocatie. Dit is terug te zien in de grafieken. Deze data is buiten beschouwing gelaten. Er kunnen in de periodes van grondverzet geen individuele treinpassages onderscheiden worden, derhalve is de data van deze periodes niet in de beschouwing meegenomen. Buiten de reguliere werkdag vond geen grondverzet plaats, derhalve zijn in de meetresultaten van de avonduren wel beschouwd.

3.3 Trilmeetdata

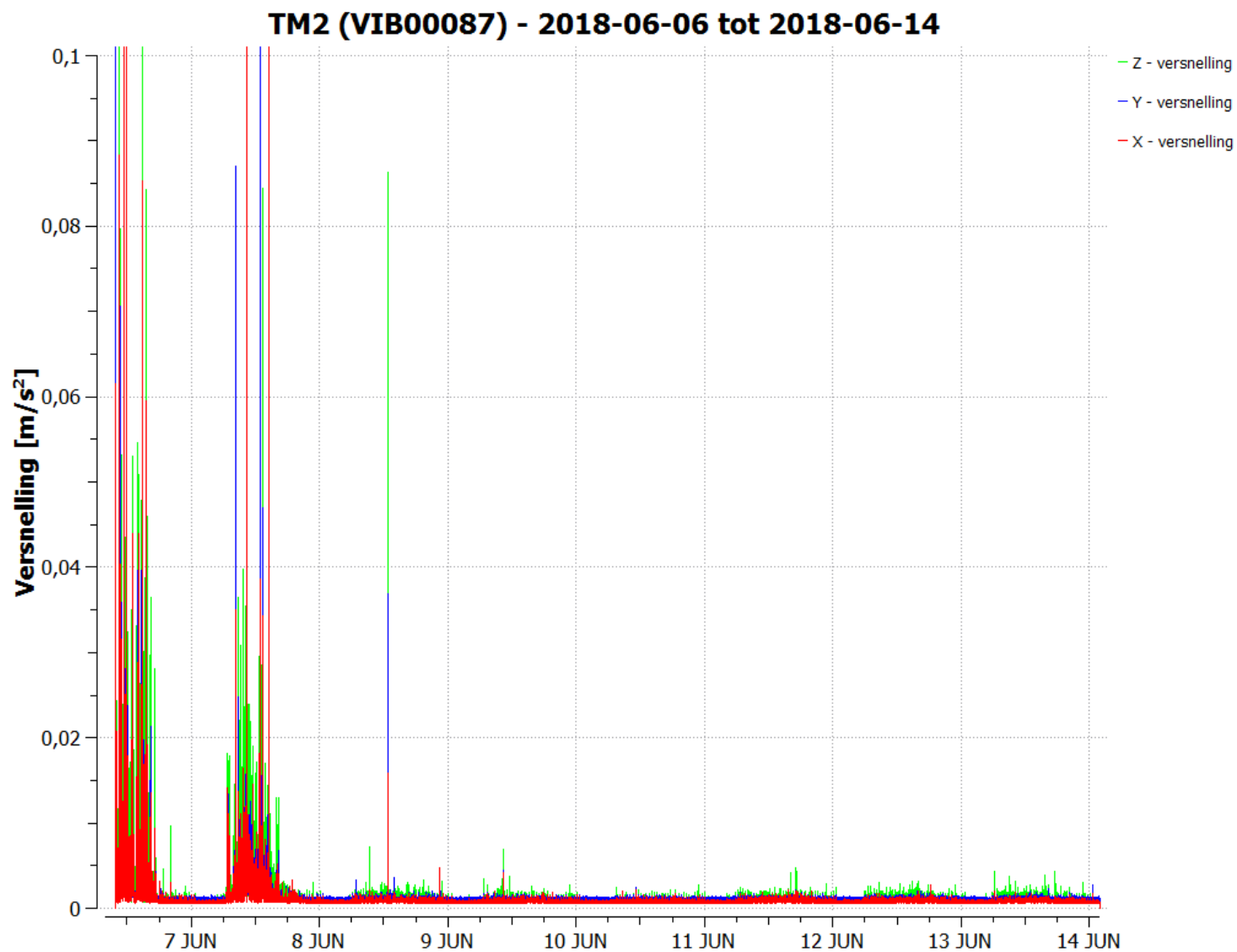
De ruwe meetdata van de genoemde trilmeetsystemen is weergegeven in onderstaande figuren.

3.3.1 TM1

TM1 (VIB00480) - 2018-06-06 tot 2018-06-14

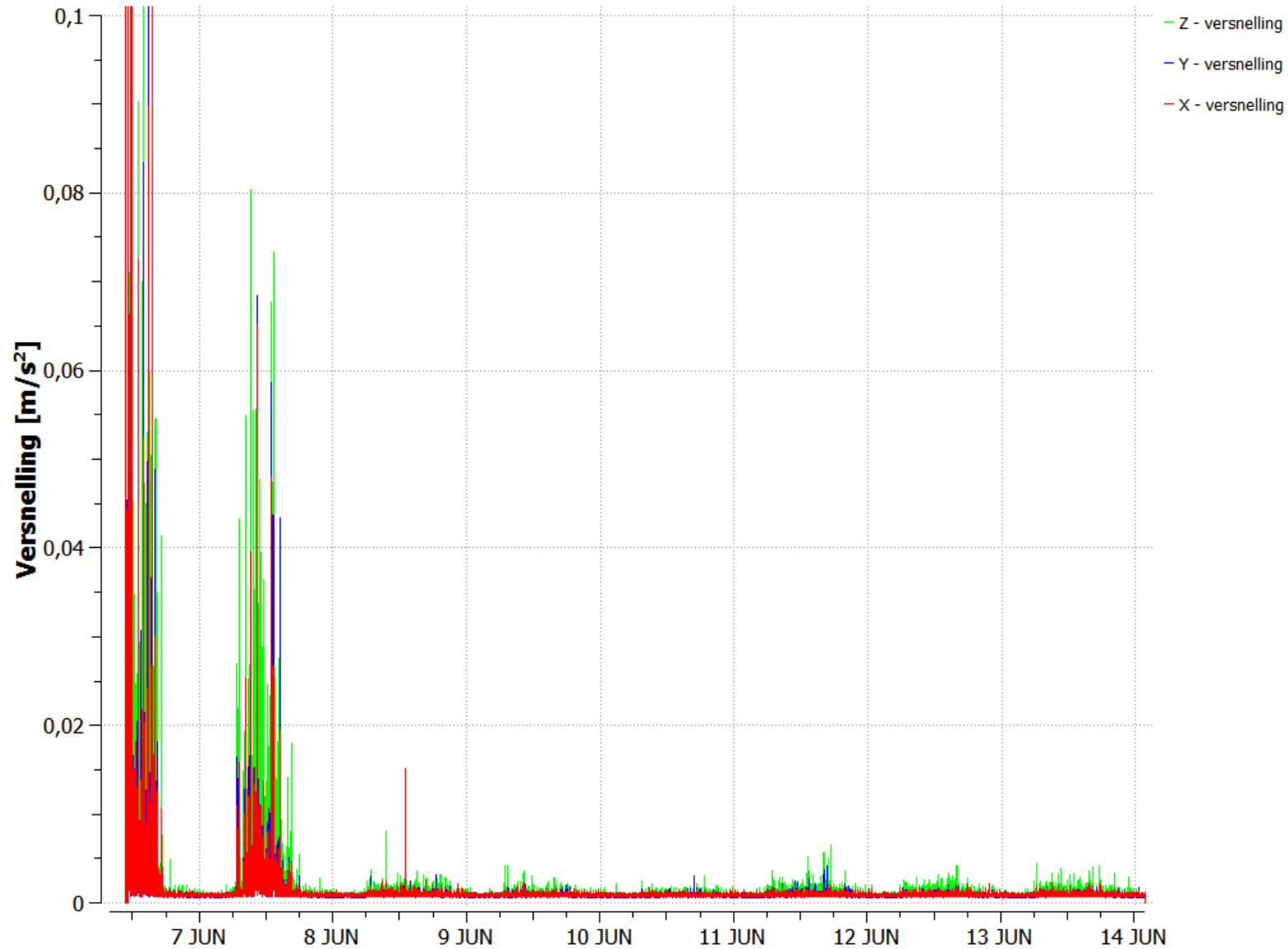


3.3.2 TM2

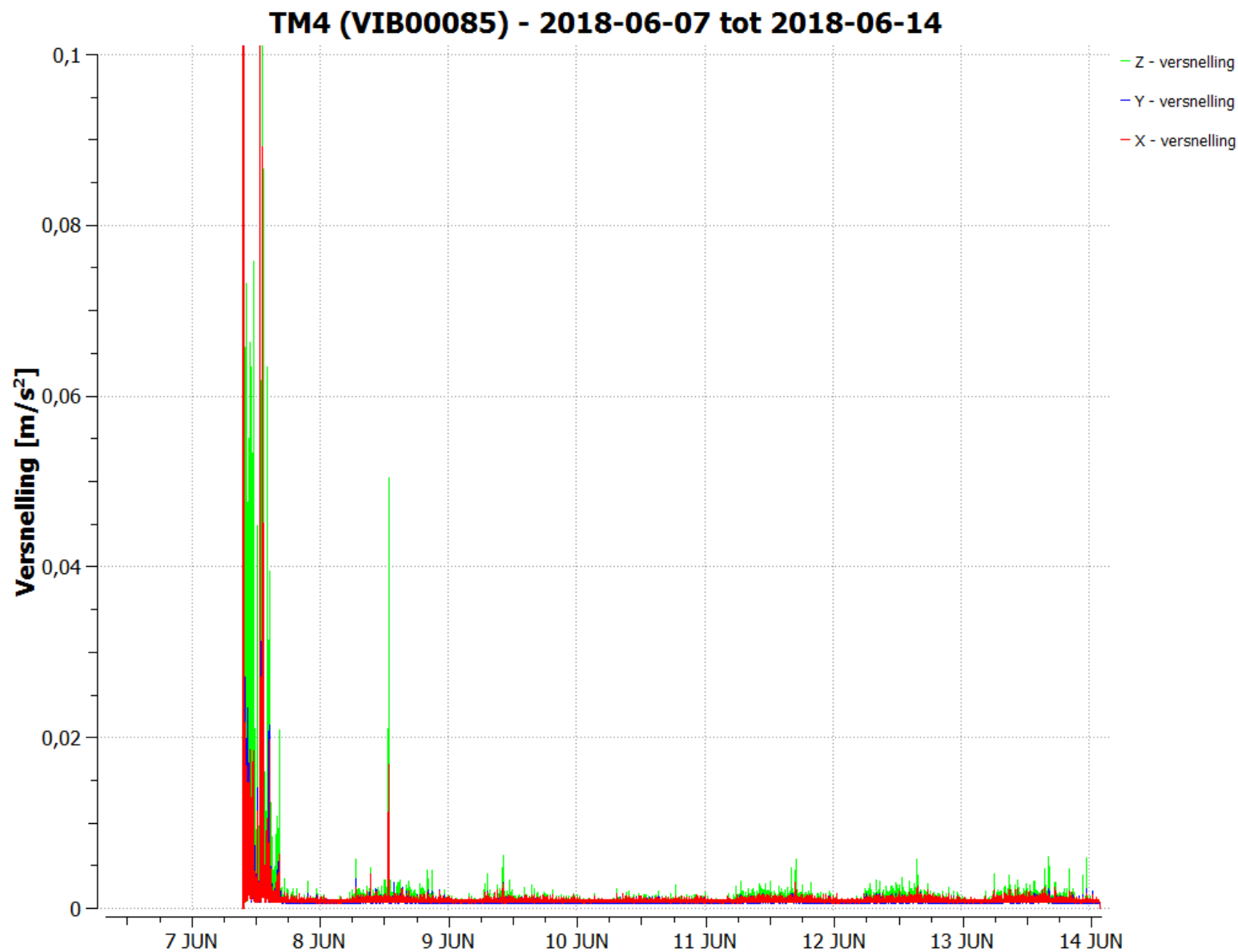


3.3.3 TM3

TM3 (VIB00477) - 2018-05-31 tot 2018-06-14

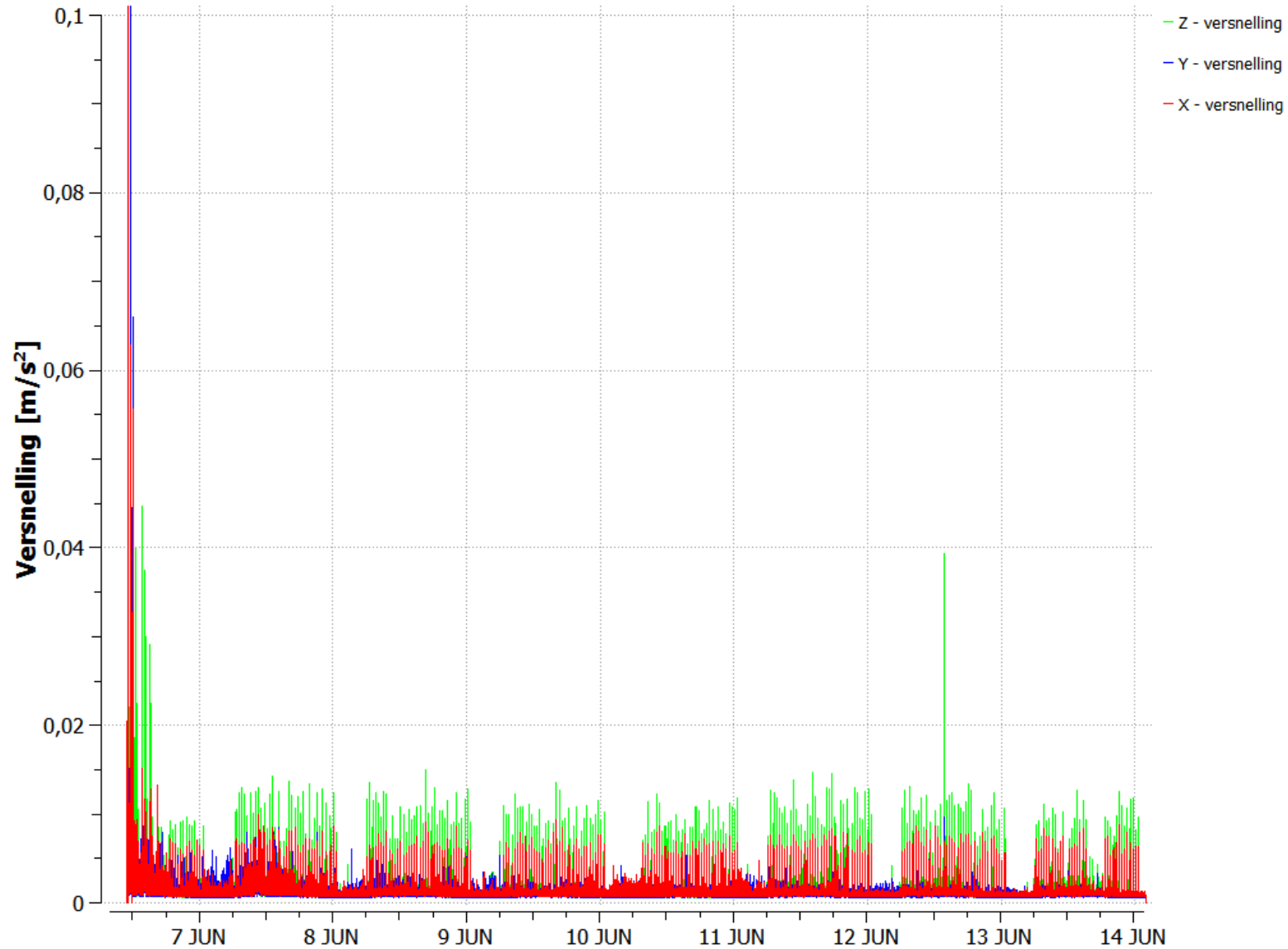


3.3.4 TM4



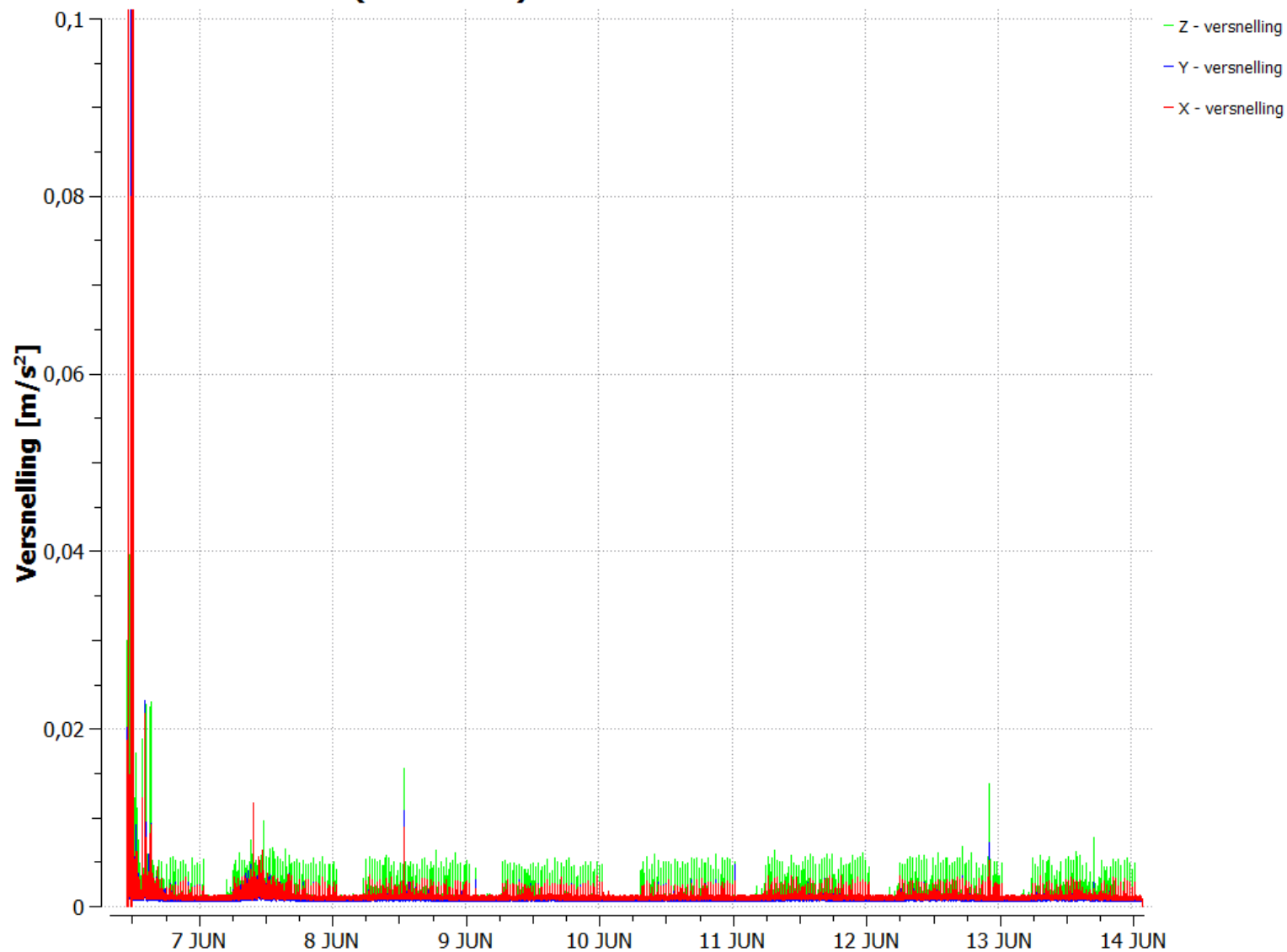
3.3.5 TM5

TM5 (VIB00080) - 2018-06-06 tot 2018-06-14



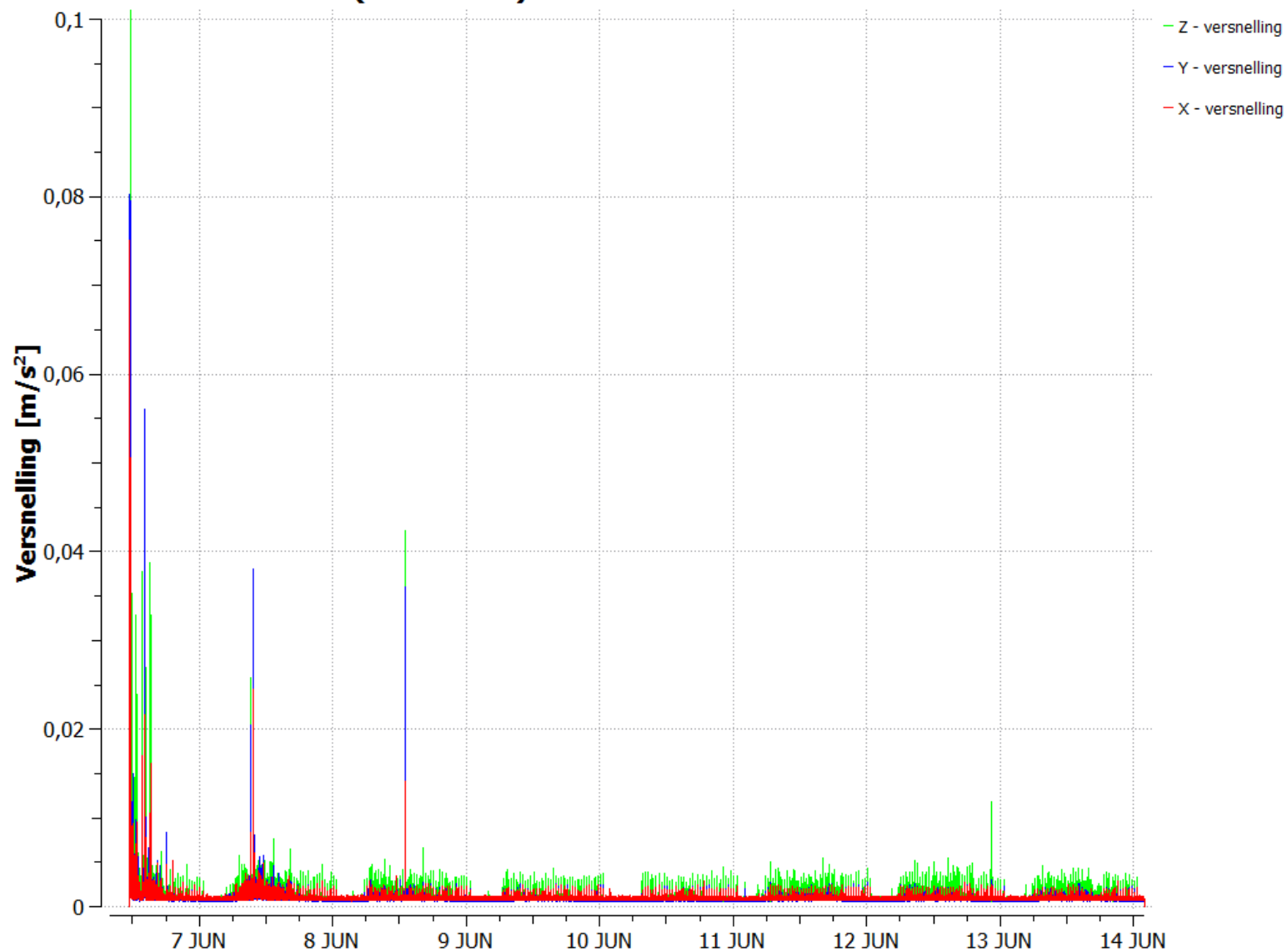
3.3.6 TM6

TM6 (VIB00083) - 2018-06-06 tot 2018-06-14

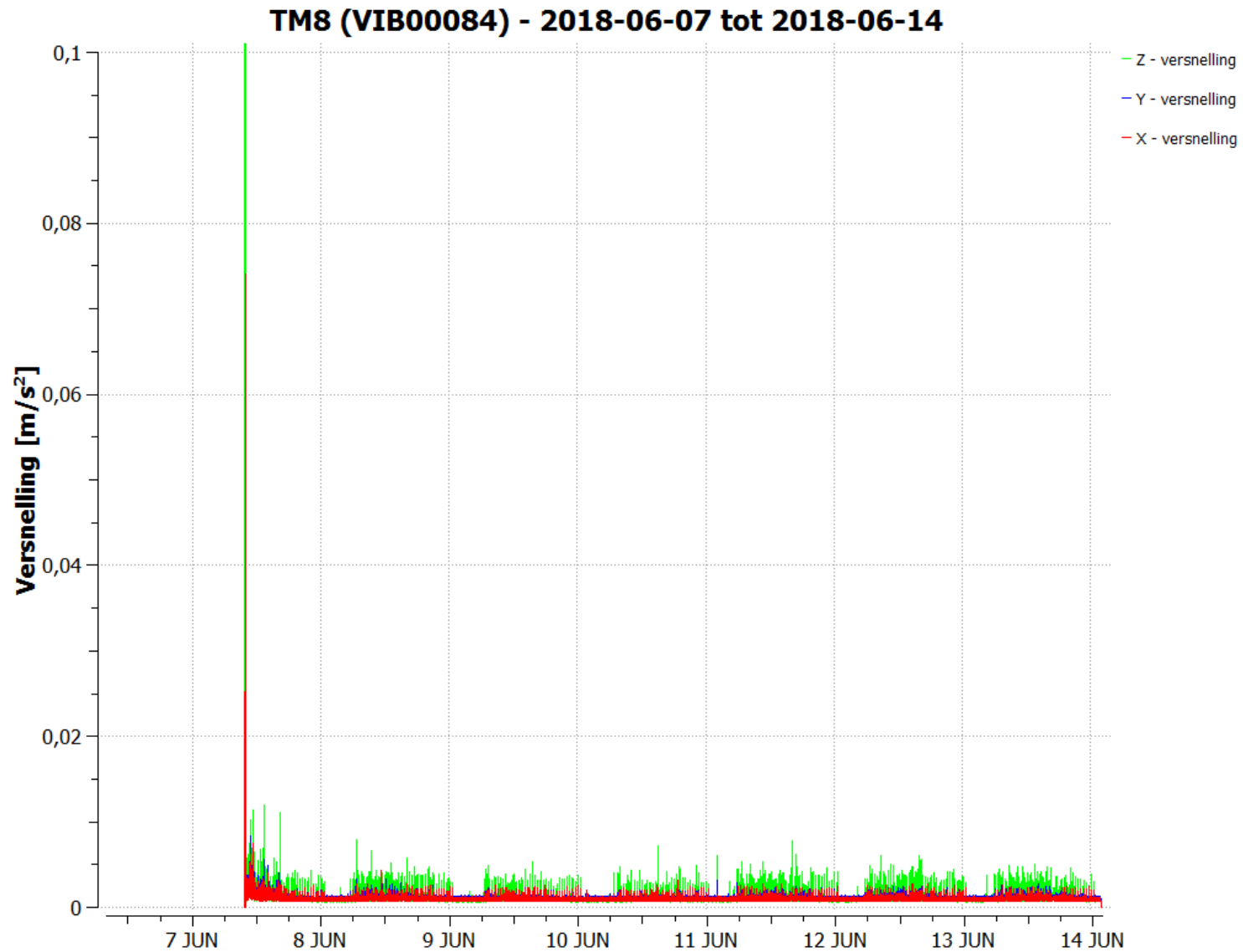


3.3.7 TM7

TM7 (VIB00086) - 2018-06-06 tot 2018-06-14

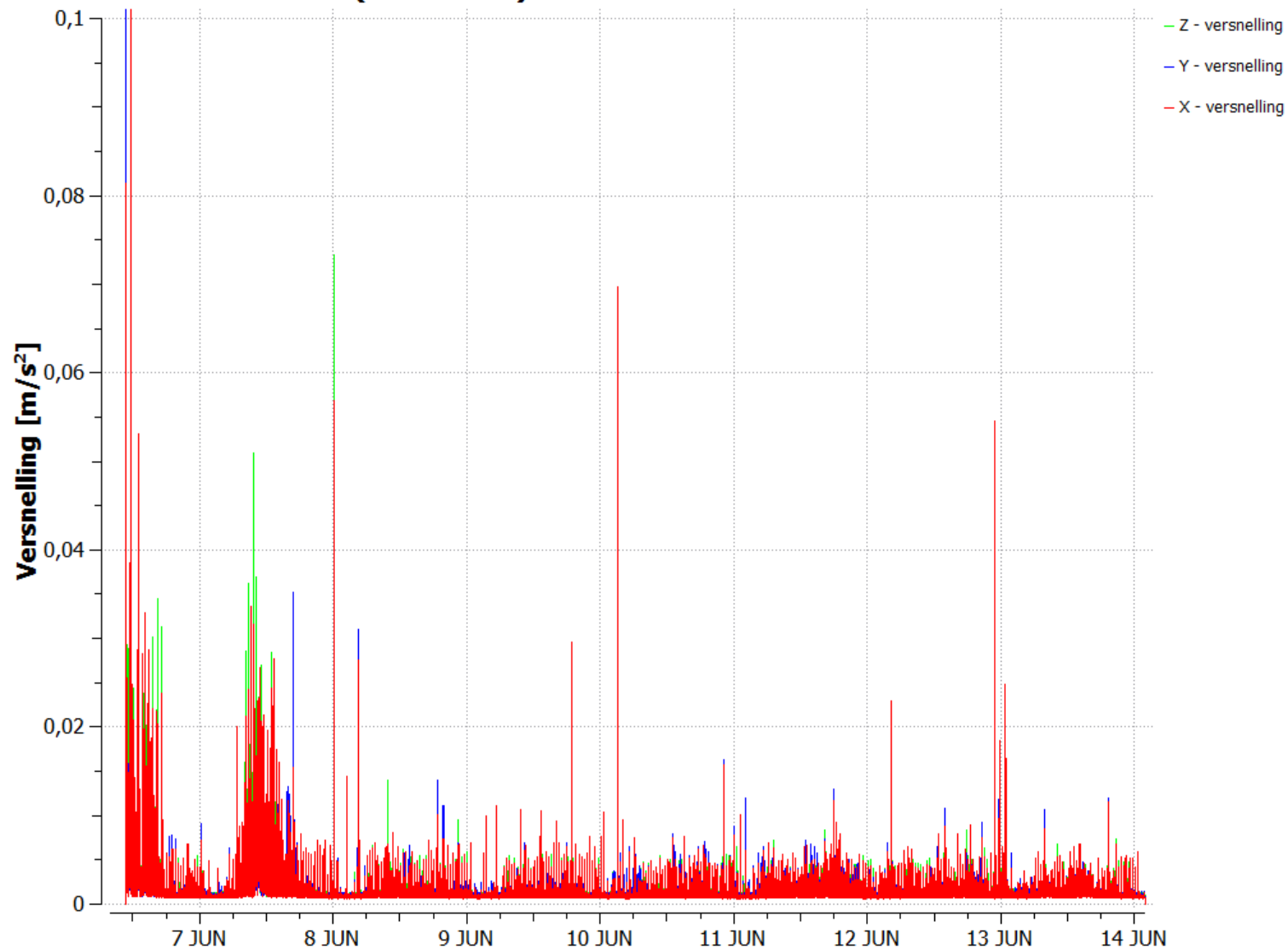


3.3.8 TM8



3.3.9 TM9

TM9 (VIB00072) - 2018-06-06 tot 2018-06-14



4. ANALYSE MEETRESULTATEN

4.1 Toetsing op schade SBR A 2017 en hinderbeleving SBR B

Gebouwcategorie

De toekomstige woningbouw gaat bestaan uit 2 tot 3 bouwlagen, waarbij metselwerk wordt toegepast. De nieuwbouw wordt gefundeerd op prefab betonpalen. Derhalve is de nieuwbouw ingedeeld in SBR categorie 2.

Aard van de trillingsbron

Het karakteristieke trillingsbeeld van een treinpassage wordt beschouwd als een trillingsbron met herhaald kortdurende trillingen veroorzaakt bij een stootvormige excitatie, waarbij vermoeiingseffecten in onderdelen van een bouwwerk kunnen optreden. In dit geval is een partiële veiligheidsfactor van $\gamma_t = 1,5$ van toepassing. De dominante frequentie is afgeleid uit de meetdata en bedraagt circa 2 – 4 Hz.

Trillingsgevoelige fundering

Het algemeen bodemprofiel op de projectlocatie (op basis van historisch grondonderzoek) bevat een kleilaag van ca. 7 m, direct onder de toplaag van ca. 1,5 m. Omdat de nieuwbouw gefundeerd wordt op palen is geen grenswaarde voor trillingsgevoelige fundering van toepassing.

Toetswaarden

Conform SBR A dienen de meetresultaten aan de draagconstructie getoetst te worden op schade. Aangezien de metingen niet aan de draagconstructie gedaan zijn (nieuwbouw staat er immers nog niet), is aangenomen als zijnde een meting aan de draagconstructie. Omdat bij overdracht van grond naar draagconstructie enige demping van de trillingen optreedt en deze demping niet in rekening is gebracht, is de uitgevoerde toetsing conservatief. .

Conform SBR B dienen de meetresultaten van vloermeetpunten getoetst te worden op hinderbeleving. Ook hier zijn de meetresultaten beschouwd als zijnde gemeten op de vloer, ondanks dat op maaiveld gemeten is. In de beschouwing zijn overdrachtsfactoren (conform CUR 166) aangehouden. De streefwaarde A1 (dimensieloos) is omgerekend naar een $V_{\text{eff,max}}$ -waarde (mm/s), zie §4.2.

Partiële factor “soort meting”

Uitgegaan wordt van een indicatieve meting, waarbij één meetpunt op de gevel van de nieuwbouw geplaatst wordt. Beschouwing is fictief omdat de bebouwing er nog niet staat. Bij een indicatieve meting wordt een partiële factor van 1,6 over de grenswaarde toegepast. Bij een uitgebreide meting worden 4 meetpunten op de kritische punten van het object geplaatst en geldt een partiële factor van 1,0.

Grenswaarde (SBR A)

Voor bepaling van de rekenwaarde van de grenswaarde zijn de dominante frequentie van de trilling en de meetmethode van belang. Uitgegaan is van een dominante frequentie van 10 Hz (alle frequenties lager dan 10 Hz hebben dezelfde grenswaarden) en een ‘indicatieve meting’.

Tabel 4.1: Grenswaarden SBR A

Dominante frequentie	Karakteristieke waarden	Partiële veiligheidsfactor	Rekenwaarde grenswaarde trillingssnelheid ¹⁾
[Hz]	Cat. 2 [mm/s]	PF herhaald kortdurende trilling [-]	Cat. 2 [mm/s]
10	5,0	1,5	2,1
15	6,3	1,5	2,6
20	7,5	1,5	3,1

¹⁾ Over de rekenwaarde is een partiële factor van 1,6 toegepast (indicatieve meting)

Streefwaarde (SBR B)

Op basis van SBR - richtlijn B: "Hinder voor personen door trillingen" is de streefwaarde van de maximale trillingssnelheid bepaald. Indien de trillingssnelheid beneden de streefwaarde blijft, mag verwacht worden dat er in de meeste situaties geen hinder voor personen zal optreden.

Voor heien of trillen zijn de streefwaarden niet frequentieafhankelijk en zijn voor een lange duurperiode opgenomen in Tabel 4.2 voor een kortdurende periode.

Tabel 4.2: Streefwaarde trillingssnelheid [-]

Beoordelingsperiode	Streefwaarde A1 [-]	Streefwaarde A2 [-]	Streefwaarde A3 [-]
Trillen			
Dag en avond	0,10	0,40	0,05
Nacht	0,10	0,20	0,05

4.2 Toetsingsprocedure

Voor het maken van een beoordeling en toetsing van trillingsintensiteiten ten aanzien van schade en hinder conform de SBR - richtlijnen is het noodzakelijk het volgende inzicht te krijgen:

1. Voor de toetsing voor schade aan bouwwerken dient de grootste piekwaarde in de trillingsintensiteit bepaald / gemeten te worden. Bij de beoordeling van mogelijke schade door (rail)verkeer zijn derhalve de zware voertuigen (treinen) en / of de voertuigen met de grootste rijsnelheid maatgevend. In de beoordeling van schade wordt door middel van een reductiefactor op de grenswaarde rekening gehouden met het feit, dat (rail)verkeer een vrijwel continu trillingsveroorzakend proces is. De (rail)verkeersintensiteit is derhalve geen invloedsfactor voor de toetsing voor schade. Voor de beoordeling van schade dient in principe uit te worden gegaan van de meetpunten aan de draagconstructie / gevel.
2. Voor de toetsing voor hinder voor personen in gebouwen dient enerzijds de grootste optredende effectieve waarde van de trillingssnelheid bepaald / gemeten te worden en anderzijds dient de gemiddelde effectieve waarde van de trillingssnelheid bepaald / gemeten te worden. Voor de toetsing voor hinder zijn derhalve zowel de zware voertuigen (treinen) en / of de voertuigen met de grootste rijsnelheid maatgevend, als de (rail)verkeersintensiteit van de zware voertuigen (treinen) en / of de voertuigen met de grootste rijsnelheid. Voor de beoordeling van hinder dient in principe uit te worden gegaan van de meetpunten op de vloeren.

Toetsingprocedure schade

Volgens de bestaande praktijkervaring is de kans op schade aan gebouwen (of onderdelen ervan) aanvaardbaar klein indien de rekenwaarde van de grenswaarde (v_{reken}) groter is dan de topsnelheid van de meting (v_{top}) gemeten aan de gevel.

Toetsingsprocedure hinderbeleving

De procedure voor de toetsing voor overschrijding van de streefwaarden voor hinder luidt, dat:

$$v_{\text{eff,max}} < A1 \text{ (toets 1)}$$

of, indien $v_{\text{eff,max}} > A1$, dan:

$$v_{\text{eff,max}} < A2 \text{ en } v_{\text{per}} < A3 \text{ (toets 2)}$$

Kort toegelicht:

- **Toets 1:** De maximale effectieve waarde van de trillingssnelheid dient getoetst te worden aan streefwaarde A1. Indien deze onder de streefwaarde blijft, mag er geen hinder verwacht worden. Indien niet, dient de intensiteit van de werkzaamheden mede beschouwd te worden, volgens:
- **Toets 2:** De maximale effectieve waarde van de trillingssnelheid dient getoetst te worden aan streefwaarde A2 en de gemiddelde effectieve waarde van de trillingssnelheid dient getoetst te worden aan streefwaarde A3. Bij overschrijding van streefwaarde A2 is hinder voor personen niet uitgesloten. Indien streefwaarde A2 niet overschreden wordt, bepaalt de intensiteit van het werk (toetsing streefwaarde A3) of sprake is van overschrijding van streefwaarde A3 en daarmee mogelijke hinder voor personen. Als aan zowel streefwaarde A2 als aan streefwaarde A3 wordt voldaan, mag er geen hinder verwacht worden.

Benadrukt wordt dat indien voldoen wordt aan de toets op A1 de toets op A2 en A3 komt te vervallen.

Voor het project Hart van Bodegraven, worden de waarden getoetst op streefwaarde A1.

4.3 Soorten trillingschades en hinderkwalificatie

In de SBR richtlijn A "*Schade aan gebouwen*" bestaat de toetsing uit de vergelijking van de rekenwaarde van de gemeten topsnelheid met de rekenwaarde van de grenssnelheid. In de richtlijn wordt gesteld dat de kans op schade minder dan 1% is wanneer de rekenwaarde van de gemeten topsnelheid kleiner is dan de rekenwaarde van de grenssnelheid.

Wanneer er overschrijdingen van de grenswaarden zijn geconstateerd hoeft dit nog niet direct tot constructieve schade te leiden. Van belang zijn de tijdsduur waarover de overschrijdingen optreden en de grootte van de overschrijding.

Cosmetische schade

Bij kortdurende of relatief lage overschrijdingen spreekt men eerder van cosmetische dan van constructieve schade. Onder cosmetische schade wordt verstaan:

- Haarscheurtjes in pleisterwerk, tegelwerk, metselwerk e.d.
- Naadvorming langs kozijnen, plafonds e.d.

Constructieve schade

Bij langdurige of relatief grote overschrijdingen zal eerder constructieve schade aan de draagconstructie ontstaan. Onder constructieve schade wordt verstaan:

- Grote scheuren in pleisterwerk, tegelwerk, metselwerk e.d.
- Scheuren in beton-/metselwerk
- Slecht sluitende deuren
- Verzakking van de constructie
- Scheuren in draagconstructie

Uiteindelijk kunnen de trillingen het falen van de constructie veroorzaken.

Voelbaarheid en acceptatie trillingen

Voor de afweging van de toelaatbaarheid van de trillingssterkte gedurende langere periode, stelt SBR B dat aanvullend gebruik gemaakt kan worden van de navolgende kwalificatie van de hinder zoals aangegeven in onderstaande tabel.

Tabel 4.3: Hinderkwalificatie

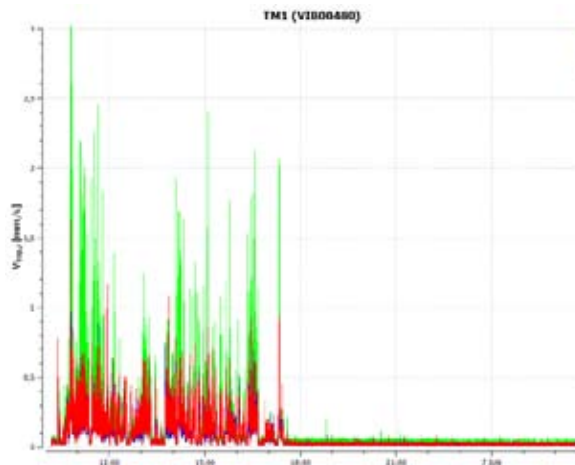
$V_{\text{eff,max}}$	Hinderkwalificatie
< 0,1	Geen hinder
0,1-0,2	Weinig hinder
0,2-0,8	Matige hinder
0,8-3,2	Hinder
>3,2	Ernstige hinder

4.4 Meetresultaten

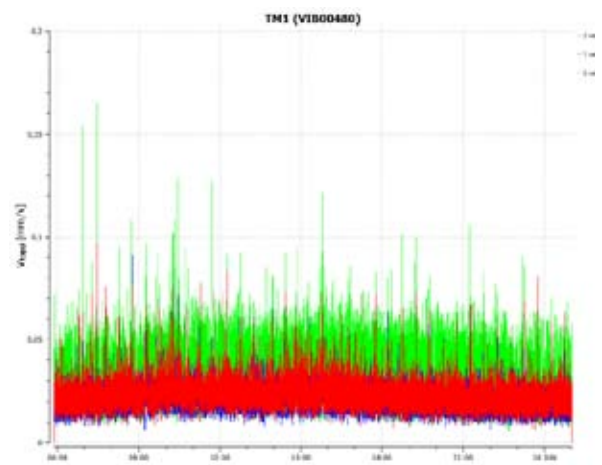
De trillingsmetingen hebben bruikbare meetresultaten opgeleverd. Tijdens de metingen hebben zich, afgezien van het grondverzet op 6 en 7 juni (gedurende de dagperiode), geen bijzonderheden voorgedaan die op de metingen een verstorend effect zouden kunnen hebben.

De meetresultaten per week zijn weergegeven in paragraaf 3.3. Omdat het detailniveau te klein is om individuele passages te herkennen, zijn in onderstaande figuren de resultaten van verschillende meetpunten en dagen weergegeven. Het betreft slechts een klein deel van de totale meetdata.

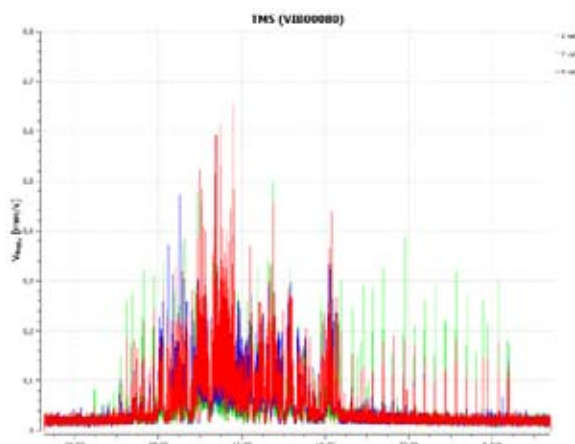
De uitgewerkte data (50% en 99% waarde, per meetpunt, per dag) is weergegeven in tabel 4.4 en 4.5.



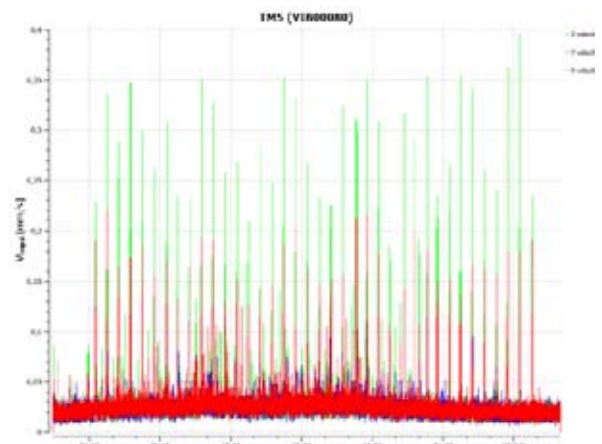
**Figuur 4.1: TM1, VIB00480, op maaiveld
snelheid versus tijd
Meetperiode: 7 juni 2018
Tot 18:00 betreft grondverzet**



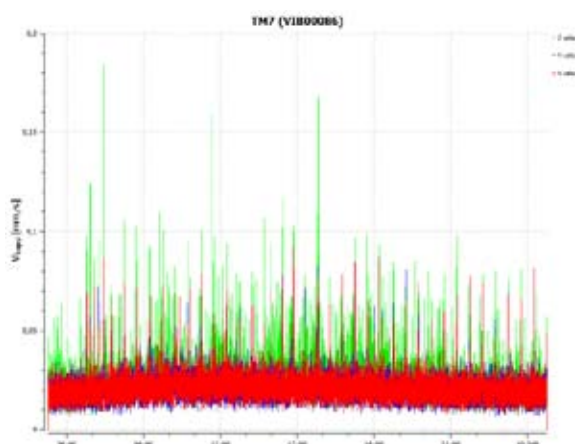
**Figuur 4.2: TM1, VIB00480, op maaiveld
snelheid versus tijd
Meetperiode: 8 juni 2018**



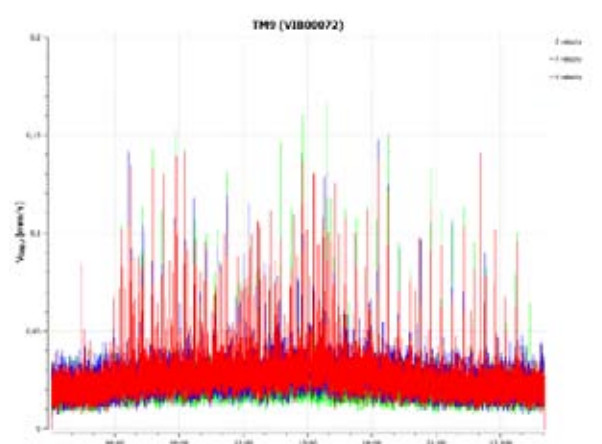
**Figuur 4.3: TM5, VIB00080, op maaiveld
snelheid versus tijd
Meetperiode: 7 juni 2018
Tot 18:00 betreft grondverzet**



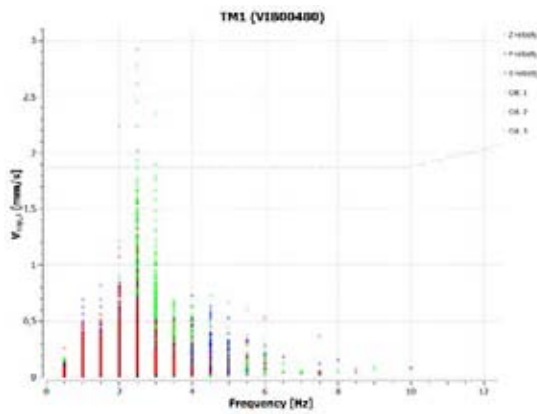
**Figuur 4.4: TM5, VIB00080, op maaiveld
snelheid versus tijd
Meetperiode: 11 juni 2018**



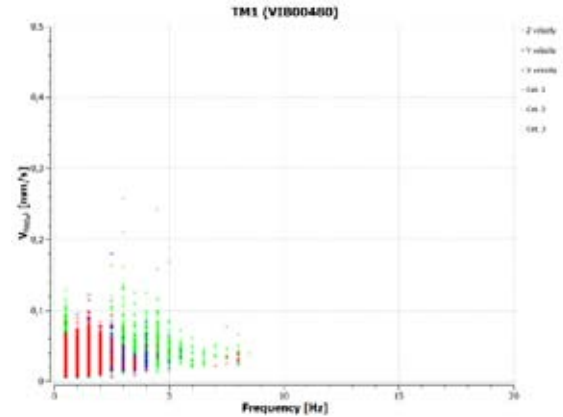
**Figuur 4.5: TM7, 00086, op maaiveld
snelheid versus tijd
Meetperiode: 9 juni 2018**



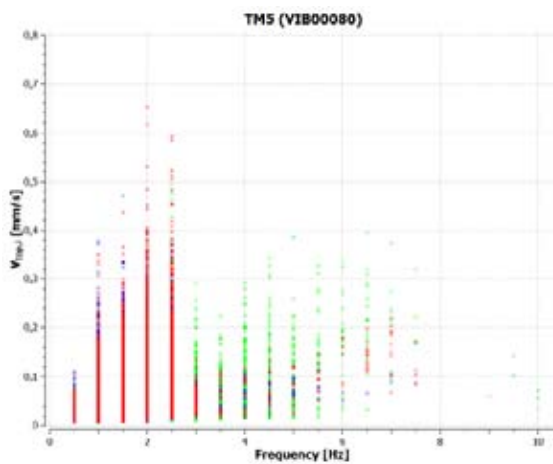
**Figuur 4.6: TM9, 00072, op maaiveld
snelheid versus tijd
Meetperiode: 12 juni 2018**



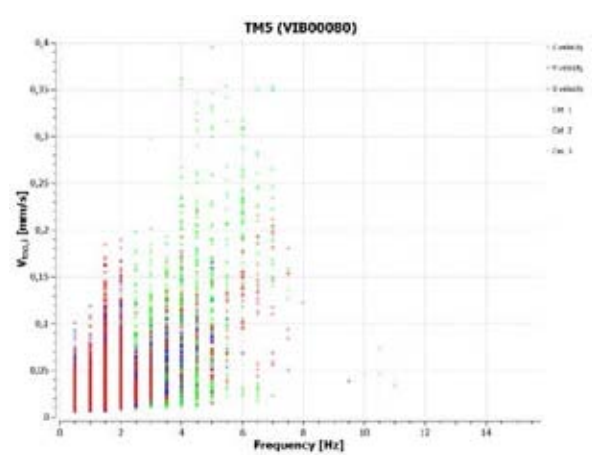
Figuur 4.7: TM1, VIB00480, op maaiveld
snelheid versus frequentie
Meetperiode: 7 juni 2018
Tot 18:00 betreft grondverzet



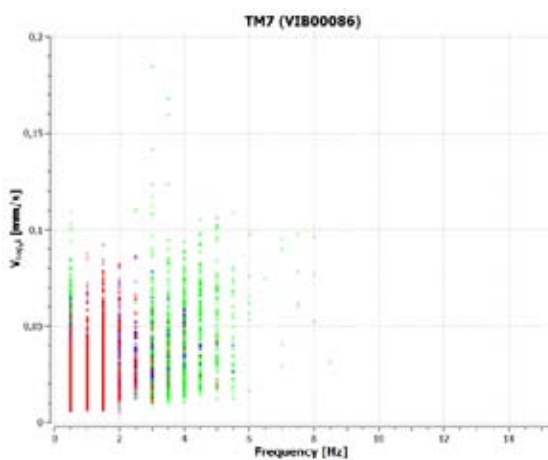
Figuur 4.8: TM1, VIB00480, op maaiveld
snelheid versus frequentie
Meetperiode: 7 juni 2018



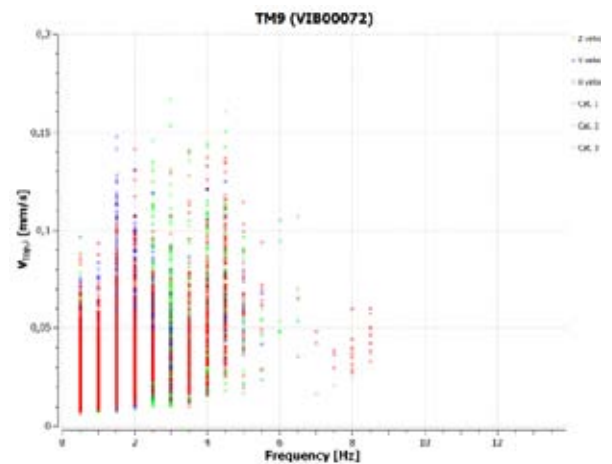
Figuur 4.9: TM5, VIB00080, op maaiveld
snelheid versus frequentie
Meetperiode: 7 juni 2018
Tot 18:00 betreft grondverzet



Figuur 4.10: TM5, VIB00080, op maaiveld
snelheid versus frequentie
Meetperiode: 11 juni 2018

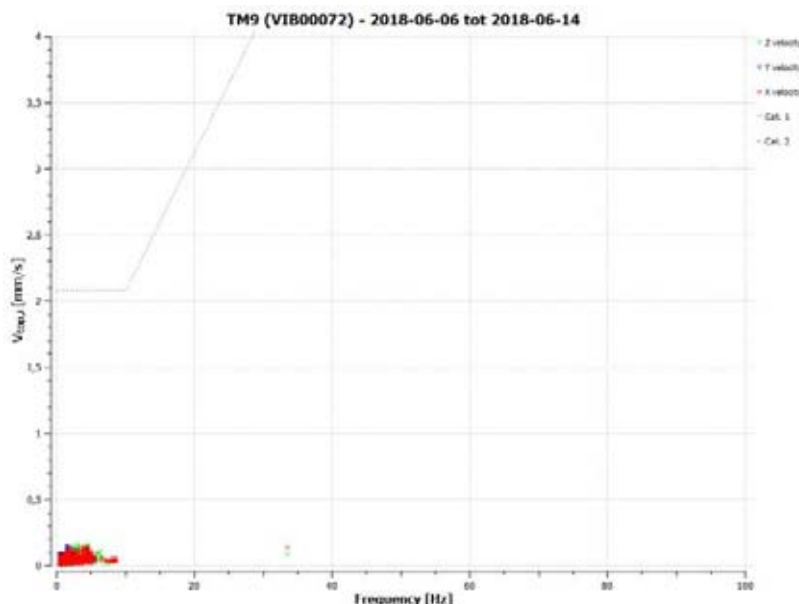


Figuur 4.11: TM7, 00086, op maaiveld
snelheid versus frequentie
Meetperiode: 9 juni 2018



Figuur 4.12: TM9, 00072, op maaiveld
snelheid versus frequentie
Meetperiode: 12 juni 2018

Ten aanzien van SBR A (schade), wordt bij trillingsfrequenties van minder dan 10 Hz getoetst op een waarde van 2,1 mm/s. In de onderstaande figuur zijn de resultaten weergegeven van TM9 (meetpunt dichtst bij het spoor) op een representatieve dag (12 juni 2018). Zichtbaar is dat de intensiteiten ruimschoots onder de grenswaarde blijven. Derhalve wordt geconcludeerd dat het risico op schade nihil/verwaarloosbaar is.



Figuur 4.13: Resultaten trillingsmeetresultaten t.o.v. grenswaarde SBR A (schade)

Aan de hand van de ruwe meetdata is een 99%-(bovengrens) waarde en een 50%-waarde vastgesteld. Deze zijn weergegeven in Tabel 4.4 en 4.5. Tevens is een weekgemiddelde weergegeven, welke aangehouden wordt voor de analyse.

Tabel 4.4: Resultaten meetraai TM 1 t/m 4 + 9

Datum	TM 1		TM 2		TM 3		TM 4		TM 9	
	99%	50%	99%	50%	99%	50%	99%	50%	99%	50%
6-6	0,066	0,045	0,048	0,042	0,047	0,037	-	-	0,112	0,075
7-6	0,062	0,043	0,062	0,044	0,045	0,035	0,042	0,035	0,102	0,078
8-6	0,082	0,06	0,073	0,042	0,081	0,049	0,065	0,043	0,128	0,085
9-6	0,08	0,058	0,06	0,045	0,046	0,03	0,048	0,034	0,123	0,083
10-6	0,078	0,048	0,053	0,035	0,053	0,039	0,055	0,027	0,121	0,081
11-6	0,081	0,05	0,07	0,048	0,075	0,042	0,08	0,041	0,127	0,081
12-6	0,077	0,051	0,074	0,048	0,078	0,05	0,07	0,046	0,125	0,077
13-6	0,081	0,049	0,073	0,049	0,081	0,049	0,074	0,045	0,112	0,08
14-6	-	-	-	-	-	-	0,073	0,045	-	-
Week-gemiddelde	0,076	0,051	0,064	0,044	0,063	0,041	0,063	0,040	0,119	0,080

Tabel 4.5: Resultaten meetraai TM 6 t/m 8

Datum	TM 5		TM 6		TM 7		TM 8	
	99%	50%	99%	50%	99%	50%	99%	50%
6-6	0,205	0,13	0,15	0,056	0,081	0,053	-	-
7-6	0,26	0,171	0,133	0,078	0,079	0,043	0,1	0,055
8-6	0,28	0,165	0,145	0,083	0,115	0,069	0,165	0,095
9-6	0,252	0,16	0,135	0,074	0,098	0,065	0,124	0,081
10-6	0,239	0,145	0,15	0,087	0,095	0,064	0,095	0,062
11-6	0,3	0,155	0,148	0,081	0,115	0,073	0,099	0,055
12-6	0,275	0,167	0,152	0,085	0,105	0,072	0,16	0,08
13-6	0,23	0,149	0,146	0,078	0,105	0,076	0,159	0,095
14-6	-	-	-	-	-	-	0,12	0,085
Week-gemiddelde	0,255	0,155	0,145	0,078	0,099	0,064	0,128	0,076

4.5 Modelling

In de bijlage “*Toelichting Modelling Trillingen*” wordt nader ingegaan op de theoretische achtergrond omtrent een modelling van trillingen.

De modelling en het “fitten” van de meetdata vindt plaats op basis van het in CUR - publicatie 166 ‘*Damwandconstructies*’ opgenomen berekeningsmodel. In CUR 166 wordt voor de bronintensiteit van de trillingsintensiteit een “standaard” bodemprofiel gehanteerd. Door de bronwaarde van het “standaard” profiel te correleren / fitten naar de grondcondities / meetresultaten van de projectlocatie, is met lokale omstandigheden rekening gehouden. Het model is met name opgezet voor analyses van trillingssnelheden.

Omdat het karakteristieke beeld van een trilling veroorzaakt door een passage sterk vergelijkbaar is met dat van een heitruiling, is de module heien gehanteerd.

De belangrijkste parameters die tot de fit leiden zijn:

- Gemiddelde bronsnelheid op referentie afstand 5 m (a_{5m}), heien
- Variatie coëfficiënt, heien
- Dempingsconstante grond
- “Energie” niveau heien

In tegenstelling tot de in CUR 166 (6^e druk) gehanteerde “vereenvoudigde” lognormale verdeling voor de bronwaarde wordt in de analyse uitgegaan van een lognormale verdeling met aangepaste veiligheidsbenadering [art geotechniek oktober 2014].

4.6 Postdictie trillingsmeetdata

Gezien de meetresultaten wordt geconcludeerd dat er geen risico op schade is (zie Figuur 4.13). Voor hinderbeleving zijn de waarden op vloeren van belang ($v_{eff,max}$). Omdat niet op vloeren gemeten is, kan conform SBR B een beoordeling niet gevoerd worden. Echter als aangehouden wordt er “als zijnde gemeten op vloeren” dan is een analyse op hinderbeleving te maken.

Toetswaarde

Omdat gemeten is op maaiveld (=grond) dient de streefwaarde geldig voor vloeren omgerekend te worden naar een waarde geldig voor grond. In het handboek CUR 166 "Damwandconstructies" zijn overdrachtsfactoren voor grond naar draagconstructie naar vloeren opgenomen. Tevens is een factor opgenomen om de vloerwaarde om te zetten naar de beoordelingsgrootte voor vloeren ($v_{\text{eff.max}}$). Voor het omrekenen van de streefwaarde A1 (functie wonen) gelden de volgende overdrachtsfactoren:

- van grond naar draagconstructie 0,7
- van draagconstructie naar vloeren 1,4
- van meetwaarde [mm/s] naar effectieve maximale waarde [-] 0,42

Conform SBR B geldt voor een nieuwe situatie (nieuwbouw staat er nog niet) voor de functie wonen streefwaarde A1 = 0,1. Omgerekend naar een "toetswaarde" voor meetwaarden op grond levert dit $v_{\text{grond}} = 0,24$ mm/s.

Fitwaarden

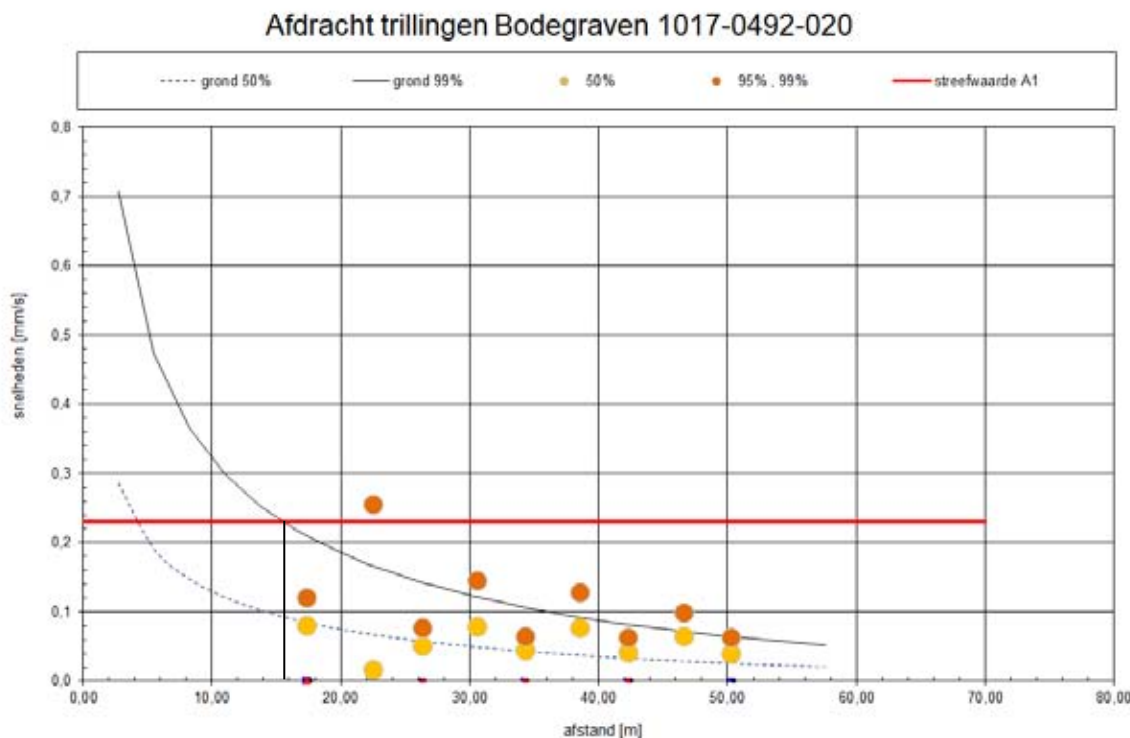
In tabel 4.5 zijn de afgeleide meetwaarden (v_{max}) opgenomen, waarbij geen onderscheid is gemaakt in rijrichting en type voertuig. Het gemiddelde van de maxima per gepasseerde trein is opgenomen.

Tabel 4.5: Meetresultaten en gehanteerde "fit" waarden, snelheden, nieuwbouw

Meetpunt	Afstand tot spoor	50%-waarden	99%-waarden
	[m]	mm/s	mm/s
TM9	17,40	0,080	0,119
TM5	22,50	0,155	0,255
TM1	26,35	0,051	0,076
TM6	30,56	0,078	0,145
TM2	34,31	0,044	0,064
TM8	38,56	0,076	0,128
TM3	42,35	0,041	0,063
TM7	46,61	0,064	0,099
TM4	50,33	0,040	0,063

Bronwaarden model en fit

De waarden uit tabel 4.5 zijn in het prognose model opgenomen, waarna de prognoselijnen gefit zijn op deze data. Voor het gefitte model zijn in tabel 4.6 de gehanteerde brongegevens opgenomen. In onderstaande figuur zijn de "gefite" prognose lijnen en de afgeleide toetswaarde versus de afstand uitgezet.



Figuur 4.14: Fit van trillingsintensiteit treinpassages - afstand (m) versus trillingssnelheid (mms/)

Tabel 4.6: Resultaten fit afdracht trillingen

Grootheid	Resultaten fit
Bronwaarde v_{5m} , "heien"	0,014 mm/s
Variatiecoëfficiënt	0,6
"Energieniveau heiblok"	0,3 kNm
Efficiëntie heiblok	70%
Dempingsconstante	0,02 m ⁻¹
Grond → draag. ¹⁾	0,7
Draag. → vloer ¹⁾	1,4

1) Overdrachtsfactoren, draag.= draagconstructie

Uitleg bij de figuur:

Per meetpunt zijn de uit de maxima de $V_{eff,max}$ afgeleid (bolletjes in de figuur). De doorgetrokken lijnen (zwart 99%-lijn, oranje 50%-lijn) is de fit. Het invloedsgebied volgt uit het snijpunt van de zwarte lijn met de toetswaarde lijn.

4.7 Invloedsgebied

Invloedsgebied schade

De grenswaarde voor schade bedraagt 2,1 mm/s (zie §4.1). In figuur 4.14 is te zien dat op een afstand van 5 m een trillingsintensiteit van ca. 0,5 mm/s verwacht wordt. De grenswaarde is significant hoger. Derhalve wordt vastgesteld dat het invloedsgebied voor schade kleiner is dan 5 m.

Invloedsgebied hinderbeleving

Het invloedsgebied is gelijk aan de afstand (beschouwd vanaf de bron) waarbinnen de geprognosticeerde waarde voor $V_{eff,max}$, geldig op vloeren, groter is dan de streefwaarde A1. Of de

geprognosticeerde waarden geldig voor grond groter is dan de omgerekende toetswaarde. Deze afstand is gelijk aan ca. 15 tot 20 m.

Op het moment dat de geprognosticeerde waarde op de vloer beneden streefwaarde $A1 = 0,1$ [-] (of $V_{\text{eff,max}} = 0,24$ mm/s) blijft (beneden de omgerekende toetswaarde op de grond, mag geconcludeerd wordt dat geen hinderbeleving te verwachten is.

Perceptie hinderbeleving

Opgemerkt wordt dat trillingen, ondanks dat conform SBR B geen hinderbeleving aan de orde is, de trillingen tochvoelbaar kunnen zijn (perceptie). Met name in combinatie met veroorzaakte geluid bij passages kunnen de trillingen als "hinderlijk" worden ervaren. In onderstaande tabel is een kwalificatie gemaakt van trillingsintensiteiten ($V_{\text{eff,max}}$) tegenover hinderbeleving. Deze waarden verschillen van persoon tot persoon, en dienen derhalve ter indicatie.

Tabel 4.7: Spectrum hinder

$V_{\text{eff,max}}$	Hinderkwalificatie
< 0,1	Geen hinder
0,1-0,2	Weinig hinder (bestaande situaties)
0,2-0,8	Matige hinder
0,8-3,2	Hinder
>3,2	Ernstige hinder

4.8 Trillingsreducerende maatregelen

Omdat de afstand van de toekomstige woningbouw op ca. 25 uit het spoor is gelegen en verwacht wordt dat het invloedsgebied van trillingen (hinderbeleving) circa 15-20 m bedraagt, wordt geconcludeerd dat geen hinderbeleving door passages van treinen te verwachten is. Maatregelen ter reductie van de trillingen zijn derhalve niet direct nodig.

Mochten trillingen alsnog een issue zijn, dan kunnen door het toepassen van trillingsreducerende maatregelen de trillingsintensiteiten worden gereduceerd. Voor trillingen veroorzaakt door passages van (spoor)verkeer gelden in het algemeen de in tabel 4.8 opgenomen maatregelen. In de tabel is eveneens aangegeven welke (en hoe) de maatregel eventueel toepasbaar zou kunnen zijn.

Tabel 4.8: Overzicht trillingsreducerende maatregelen

	Maatregel	Toepasbaar?	Wijze
	Bij de Bron		
B1	Snelheidsreductie	Nee	
B2	Verlaging verkeersintensiteit	Nee	
B3	Beperken tonnage (wegverkeer)	Nee	
	Bij het Medium		
M1	Afstand vergroten	Ja	Bouwplek verplaatsen
M2	Aanpassen weg/baanconstructie	Nee	
M3	Aanbrengen trillingsscherm	Ja	Naast spoor of naast woning
	Bij de Ontvanger		
O1	Aanpassen fundering	Nee	
O2	Aanpassen woningskelet	Ja	Stijver maken van vloer en wanden

Indien trillingsreducerende maatregelen in de praktijk toch wenselijk blijken, kan Fugro een prognose uitvoeren alle mogelijke maatregelen en de te behalen reducties.

5. CONCLUSIES

In opdracht van Heijmans Vastgoed heeft Fugro NL Land B.V. te Leidschendam een trillingsonderzoek uitgevoerd voor het project "Hart van Bodegraven" te Bodegraven. Het onderzoek heeft bestaan uit trillingsmetingen en een advies ten aanzien van mogelijk te verwachten trillingshinder (invloedsgebied).

Situatie

Door passages van treinen ontstaan trillingen in de ondergrond. Deze worden via de ondergrond overgedragen op de draagconstructie en op de vloeren van de nieuwbouw (woningbouw). De trillingen kunnen een risico op schade (SBR A-richtlijn) geven dan wel tot hinderbeleving voor bewoners (SBR B-richtlijn) leiden. De nieuwbouw woningen (2 tot 3 bouwlagen, gefundeerd op palen, metselwerk) zijn gepland op een afstand van circa 25-30 m tot het spoor.

Trillingsmetingen

Met de trillingsmetingen, uitgevoerd in de periode van 6 juni tot 14 juni, zijn de huidig optredende trillingsintensiteiten veroorzaakt door het passerende treinverkeer gemeten. Hierbij is gebruikt gemaakt van 2 meettraaien (één met 5 meetpunten, en één met 4 meetpunten). De onderlinge afstanden bedraagt circa 5 m. De totale meetduur bedraagt 8 dagen.

Toetsingskader

De meetresultaten en analyses zijn zowel beoordeeld (en getoetst) aan de grenswaarde conform SBR richtlijn A 2017 "Schade aan bouwwerken" als aan de streefwaarden conform SBR richtlijn B "Hinder voor personen in gebouwen".

Beoordelingskader

Met betrekking tot het risico op schade (SBR A 2017) wordt de nieuwbouw ingedeeld in categorie 2 (metselwerk, in goede staat. Met betrekking tot hinderbeleving (SBR B) is de functie van de nieuwbouw "wonen" in de toekomstige situatie van toepassing.

Opgemerkt wordt dat niet gemeten is aan de draagconstructie dan wel op vloeren. De nieuwbouw is er immers nog niet. Derhalve is de streefwaarde zodanig omgerekend, dat het een intensiteit op een fictieve vloer betreft.

Analyses

Voor de postdictie is de prognose methodiek zoals deze is opgenomen in het handboek CUR 166 "Damwandconstructies" gehanteerd. Met de methodiek zijn prognoses van trillingsintensiteiten aan de draagconstructie dan wel op vloeren te maken. Omdat de karakteristieken van de treintrilling vergelijkbaar is met een herhaald kortdurende trilling, is de module heien gehanteerd.

Omdat nog geen nieuwbouw aanwezig is en conform SBR B de meetwaarden op vloeren getoetst dienen te worden, is de streefwaarde geldig voor vloeren omgerekend naar een toetswaarde geldig voor grond (er is immers gemeten op maaiveld). Hierbij zijn de overdachtsfactoren uit CUR 166 gehanteerd.

De meetdata is geanalyseerd, waarbij per meetpunt (XYZ) een gemiddelde en een bovengrenswaarde zijn afgeleid, die vervolgens versus de afstand zijn uitgezet en "gefit" op prognoselijnen (postdictie). Door in de prognoses de grenswaarde aan de draagconstructie (SBR A 2017) en de (omgerekend)

streefwaarde A1 voor hinderbeleving (SBR B) op te nemen, zijn zones af te leiden waarbinnen overschrijdingen te verwachten zijn.

Invloedsgebied schade en beoordeling

Ten aanzien van schade aan bebouwing (cat. 2, SBR A 2017), wordt vastgesteld dat het invloedsgebied kleiner dan 5 m is. Omdat de grenswaarden aan de draagconstructie niet wordt overschreden, wordt verwacht dat het risico op schade door trillingen veroorzaakt door trein passages aanvaardbaar klein is.

Invloedsgebied hinderbeleving

Ten aanzien van hinderbeleving zijn op een afstand van 15-20 m van het spoor geen overschrijdingen van streefwaarde A1 (SBR B) te verwachten. Omdat de nieuwbouw zich een op een minimale afstand van circa 25-30 m tot het spoor bevindt wordt geconcludeerd dat geen hinderbeleving te verwachten is. Neemt niet weg dat, vaak in combinatie met perceptie van geluid, de trillingen alsnog gevoeld kunnen worden.

Trillingsreducerende maatregelen

Ondanks dat hinderbeleving niet aannemelijk is, kunnen de trillingen alsnog “ gevoeld” worden. In dat geval kan alsnog overwogen worden toch de trillingsintensiteiten te reduceren. Verscheidene reducerende maatregelen zijn toepasbaar. Deze variëren van maatregelen bij de bron tot bij de nieuwbouw tot in de grond. Omdat bij de bron (spoorbaanlichaam) geen maatregelen mogelijk zijn, is dit hier geen optie. Maatregelen in het medium (trillingscherm) dan wel in de nieuwbouw kunnen een optie zijn, waarbij verwacht wordt dat eerder de maatregel trillingscherm in het medium aan de orde kan zijn dan bij de woning. Zeker als de nieuwbouw reeds gebouwd is en de bewoners alsnog “trillingen ervaren”.

Advies

Op moment dat de nieuwbouw op kortere afstand dan 15 m tot het spoor gepland / gebouwd wordt, wordt geadviseerd trillingsreducerende maatregelen te overwegen. Dan zou naast het verstijven van de woning (wanden en vloeren) een trillingscherm (Polystyreenscherm) in de grond direct naast de fundering een optie kunnen zijn.

Gedacht kan worden aan een polystyreen scherm (piepschuim PS) van enige afmetingen (dikte en diepte) dat of direct naast de fundering aangebracht wordt (of naast het baanlichaam). Verwacht wordt dat plaatsing direct naast de gevel het grootste effect teweeg gaat brengen.

Voor dimensionering van isolatieblokken aan en in de fundering zelf, wordt geadviseerd een dynamisch constructeur te benaderen. Ter vergelijking: In Heemstede direct naast het spoor zijn als maatregel isolatieblokken in de fundering van de constructie opgenomen (dure oplossing). Omdat een strenge uitvoering / directie op het werk aanwezig was, is de beoogde reductie uiteindelijk benaderd. Fugro heeft nauwe contacten met dynamische constructeurs. Desgewenst kunnen zij een nadere invulling adviseren.

Bij de overweging van maatregelen dient ten aanzien van de dimensionering van een trillingscherm in de grond (en/of maatregelen in de woning) aanvullende trillingsmetingen en analyses uit gevoerd te worden. Als input voor de analyses is een versnellingen versus tijd signaal van een gehele passage

benodigd. Met bijvoorbeeld het eindige elementen programma PLAXIS is een trillingsscherm te dimensioneren. De locatie en de afmetingen van het PS scherm zijn dan nader te bepalen. Het versnellingen signaal dient alle wielpassages van de trein te bevatten. Met de huidig uitgevoerd trillingsmetingen is geen volledige passage "gepakt", waarbij iedere afzonderlijke as passage niet zichtbaar is. Geadviseerd wordt trillingsmetingen met versnellingsopnemers uit te laten voeren, waarbij de passage hoog frequent gesampled wordt. Fugro kan de metingen en de analyses met PLAXIS verzorgen.



A. TEKENING MEETLOCATIES

P:\1101017-0492-02024_Uitvoering_geomonitoring\20_Instructions\Tekening_locaties trilmeetconussen.dwg
 Get.: LMR ad: 04-07-2018 Versie: 02 Revisie Datum: 04-07-2018



Locatie trilmeetconussen - as build
 Trillingsetingen Bodengraven
 Hart van Bodengraven

Opdr.: 1017-0492-020
 Bijl.: 01

B. BEOORDELING VAN TRILLINGEN

Trillingsintensiteiten worden beoordeeld en getoetst aan de vigerende SBR meet- en beoordeeld en getoetst aan de vigerende SBR meet- en beoordelingsrichtlijnen. De Raad van State erkent de richtlijnen als uitgangspunt voor jurisprudentie. Door de Stichting Bouw Research zijn drie richtlijnen uitgegeven:

- Richtlijn A “Schade aan gebouwen”
- Richtlijn B “Hinder voor personen in gebouwen”
- Richtlijn C “Storing aan apparatuur”

Trillingen van objecten en gebouwen worden getoetst aan de SBR richtlijn A. De beoordeling van de invloed van de trillingssterkte valt in het frequentie bereik van 1 tot 100 Hz.

Gesteld is dat de kans op constructieve schade aan gebouwen (of onderdelen ervan) aanvaardbaar klein is indien de gecorrigeerde snelheid van de meting (v_d) kleiner is dan de rekenwaarde van de grenswaarde (v_{reken}).

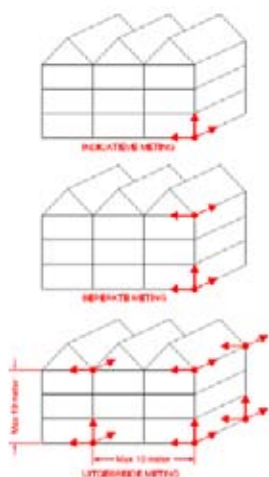
De kans op constructieve schade is aanvaardbaar klein als geldt:

$$V_d \text{ gemeten} < V_{reken} \text{ SBR}$$

Soort meting

SBR Richtlijn A maakt onderscheid tussen een indicatieve, een beperkte en een uitgebreide meting. Deze is afhankelijk van de uitgebreidheid van de meting (het aantal meetpuntlocaties en meetrichtingen).

- Een indicatieve meting bestaat uit 1 meetpunt aan de draagconstructie, per object
- Een beperkte meting bevat 1 meetpunt aan de draagconstructie en 1 meetpunt op de hoogste verdieping, per object
- een uitgebreide meting bestaat uit meerdere meetpunten verspreid over de draagconstructie en de verdiepingen (op “stijve” locaties), per object.



Afhankelijk van het type meting wordt een veiligheidsfactor toegepast.

Veiligheidsfactor voor type meting

Soort	f_{meting}
Indicatief	1,6
Beperkt	1,4
Uitgebreid	1,0

$$V_d \text{ gemeten} = V_{\text{top gemeten}} * f_{\text{meting}}$$

Grenswaarde en V_{reken}

De grenswaarde voor een trilling wordt uitgedrukt in mm/s en zijn afhankelijk van de soort trillingsbron tezamen met de categorie indeling van het object.

De objecten en gebouwen zijn ingedeeld in drie verschillende categorieën. Voor objecten, gebouwen en funderingen is de $V_{\text{grenswaarde}}$ afhankelijk van de trillingsfrequentie. De onderverdeling in de categorieën is als volgt:

1. In goede staat verkerende onderdelen (van de draagconstructie) van een gebouw, indien deze bestaan uit gewapend beton of hout
2. In goede staat verkerende onderdelen (van de draagconstructie) van een gebouw, indien deze bestaan uit metselwerk of uit brosse steenachtige materialen
3. Onderdelen van oude en/ of monumentale panden met grote cultuurhistorische waarde en/ of in slechte staat verkerende gebouwen bestaande uit metselwerk

SBR richtlijn A maakt onderscheid in verschillende type trillingsbronnen variërend tussen incidenteel voorkomende kortdurende trillingen, herhaald voorkomende kortdurende trillingen of continue voorkomende trillingen. Afhankelijk van het soort trillingsbron wordt de volgende bronfactor gehanteerd.

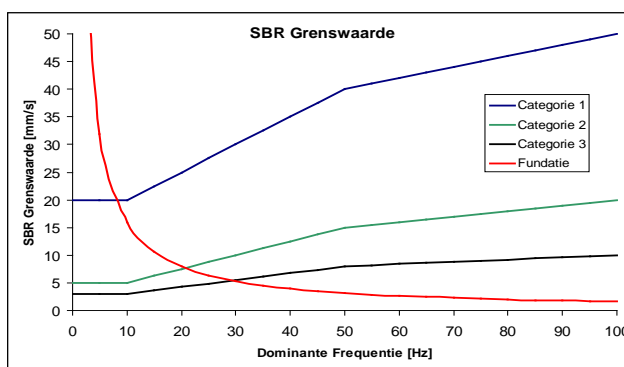
Partiële veiligheidsfactor voor type trillingsbron

Soort	f_{Bron}	bron
Kortdurend	1,0	Eenmalig explosies
Herhaald kortdurend	1,5	Heiwerk Verkeer Grondwerk
Continu	2,5	Trillen Machines

In de onderstaande tabel zijn de grenswaarden geldig van 0 Hz t/m 10 Hz aangegeven. De grenswaarden zijn aangegeven per categorie en type trilling.

		Kortdurend trillingen 1.0			Herhaald kortdurende trillingen 1.5			Continu trillingen 2.5		
		Cat 1	Cat 2	Cat 3	Cat 1	Cat 2	Cat 3	Cat 1	Cat 2	Cat 3
Indicatief	1.6	12.5	3.1	1.9	8.3	2.1	1.3	5.0	1.3	0.8
Beperkt	1.4	14.3	3.6	2.1	9.5	2.4	1.4	5.7	1.4	0.9
Uitgebreid	1.0	20.0	5.0	3.0	13.3	3.3	2.0	8.0	2.0	1.2
hoge verdieping		40.0	15.0	8.0	26.7	10.0	5.3	16.0	6.0	3.2

In onderstaande voorbeeldgrafiek wordt de relatie tussen de karakteristieke waarden van de grenswaarde en frequentie op de draagconstructie en fundering grafisch weergegeven. Indien de meetwaarden boven de getrokken lijn liggen is er sprake van overschrijding van de grenswaarde.



De rekenwaarde van de grenswaarde (v_{reken}) is de karakteristieke grenswaarde gedeeld door de bron factor (f_{Bron}).

$$v_{reken\ SBR} = \frac{v_{grenswaarde}}{f_{Bron}}$$

C. MODELLERING CONFORM CUR 166

De modellering en het opstellen van de trillingsrisicoanalyse vindt plaats op basis van CUR publicatie 166 'Damwandconstructies'. In genoemde CUR - publicatie wordt onderscheid gemaakt in verschillende bodemkarakteristieken en verschillende palen en planken alsmede de verschillende wijzen van inbrengen.

Wanneer een paal of plank in een grondmassief doordringt, veroorzaakt deze langs en aan de onderzijde van de paal plastische en elastische vervormingen. Door de snelle introductie van deze vervormingen ontstaan golfverschijnselen in de grond. De plastische golfverschijnselen blijven beperkt tot een gebied rondom de paal/plankpunt met een doorsnede van ongeveer 1,5 tot 2,5 maal de equivalente paal/plankdiameter.

Voor de trillingen in de omgeving zijn alleen de elastische golven van belang. Wanneer de paal/plank enige meters diep in de grond is doorgedrongen, ontstaan trillingsgolven die zich in alle richtingen (kunnen) voortplanten. Komen deze golven aan de oppervlakte, bij een laagovergang of bij een bouwwerk, dan vindt hier reflectie en omzetting van de trillingsgolven plaats, zodat een interferentiepatroon van bodembewegingen ontstaat. Gezien de complexiteit van dit interferentiepatroon kan de bodembeweging slechts in benaderende zin beschreven worden.

De factoren die invloed hebben op de intensiteit van de trillingen die door installatie van de palen / planken aan de bodem worden afgegeven zijn:

- eigenschappen van de ondergrond;
- afmetingen van de paal/plank;
- energie / slagkracht die nodig is om de paal / plank op diepte te krijgen.

Bronsterkte

CUR 166 hanteert voor Nederland enkele karakteristieke bodemprofielen. Voor deze karakteristieke bodemprofielen is voor de verschillende wijzen van inbrengen van palen en planken, een bronintensiteit gegeven op een referentie afstand van 5 m tot de bron. De bronsterkten zijn gerelateerd aan een lognormaal verdeling. In de analyse wordt gebruik gemaakt van een normale verdeling. Op basis van praktijkervaringen, waarbij prognoses met metingen vergeleken zijn, is gebleken dat prognose waarden, waarbij een normale verdeling is gehanteerd, beter aansluit op de meetwaarden.

Voor de karakteristieke bodemprofielen zijn indicatiewaarden gegeven voor de demping, de referentiesnelheid (u_0) op 5 m en de variatiecoëfficiënt van de trillingsbron voor het in- en uittrillen van damwandplanken of het heien van stalen buispalen. Voor de meeste situaties zijn geen indicatiewaarden gegeven en dient de referentiesnelheid geschat te worden. Voor het trillingsniveau zijn het noodzakelijke inheiniveau en de grondopbouw van grotere invloed dan het paal/planktype of – lengte. Deze factoren worden in rekening gebracht.

Bepaling bronsterkte heien

De referentie trillingsintensiteit wordt bepaald met een empirische formule, welke afhankelijk is van het vermogen van het heiblok:

Waarin:

$v_{0(x=5m)}$	trillingsnelheid op referentieafstand van 5 meter	[mm/s];
u_0	referentie trillingsnelheid	[mm/s];
E	inhei-energieniveau	[Nm];
ψ	stootrendement	[-].

Op basis van deze relatie is de bronsterkte van de trillingssnelheid bepaald.

Bepaling bronsterkte trillen

De bronsterkte van het intrillen van stalen damwandelementen wordt bepaald met de volgende empirische relatie:

$$v_0(x = 5m) = u_0 + 0,002(F - 350)$$

Waarin:

v_0	bronsterkte van de trillingsintensiteit op 5 m afstand van de bron	[mm/s];
u_0	referentie trillingsnelheid op 5 m afstand	[mm/s];
F	slagkracht trilblok	[kN].

Bij uittrillen wordt voor de referentiesnelheid op 5 m afstand 1,5 maal de waarde voor intrillen gehanteerd.

Trillingsoverdracht in de ondergrond

Tijdens de installatie van de palen / planken wordt de omringende grond in beweging gebracht. Hierdoor ontstaan trillingen. Deze trillingen planten zich als golven door de ondergrond voort. Te onderscheiden zijn compressie-, afschuif- en Rayleigh-golven.

Bij compressiegolven (drukgolven) bewegen de gronddeeltjes zich in dezelfde richting als de voortplantingsrichting van de drukgolf. Ten gevolge van de afschuifgolf worden de gronddeeltjes zijdelings bewogen, loodrecht op de voortplantingsrichting van de golf. Aangezien zowel de compressie- als afschuifgolven zich bolvormig voortplanten wordt de trillingsenergie over een steeds groter volume verdeeld en zal dus vrij snel afnemen.

Ten gevolge van de afschuifgolven en compressiegolven aan het maaiveld ontstaan zogenaamde oppervlaktegolven (Rayleigh-golven). Deze golven nemen het grootste deel van de totale trillingsenergie op en kenmerken zich door een geringe dieptewerking, waardoor deze golven op grotere afstand van de bron nog steeds een behoorlijke trillingssterkte kunnen bezitten.

De afname van de amplitude van de golven wordt veroorzaakt door geometrische demping. Tevens vertoont de grond door inwendige wrijving een dissipatief gedrag (energieverlies) bij vervormingen, wat materiaaldemping wordt genoemd. Dit energieverlies wordt gemodelleerd door hysteretische demping.

Indien de geometrische verzwakking en de materiaaldemping worden samengenomen kan met onderstaande relatie de amplitude van een trilling op een afstand x van de bron bepaald worden:

Waarin:

- v(x) trillingssnelheid op afstand x van de bron [mm/s];
v0 bronsterkte van de trillingsintensiteit op 5 m afstand van de bron [mm/s];
x0 referentieafstand van 5 m tot de bron [m];
x afstand tot de bron [m];
 α karakteristieke dempingsconstante ten gevolge van materiaaldemping [m⁻¹].

Verwijzend naar CUR-166 wordt in de tabellen een indicatieve waarde voor de dempingsconstante α gepresenteerd van 0,00 à 0,03 m⁻¹. Afhankelijk van de grootte van de golfsnelheden (oppervlakte golf) is een nadere indicatie voor de karakteristieke bodemdemping α te bepalen met:

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \zeta}{c}$$

Waarin:

- f dominante frequentie [Hz];
 ζ dempingsmaat als functie van de vervormingshoek [-];
c voortplantingssnelheid van de trilling in de bodem [m/s].

Ter indicatie zijn in CUR 166 voor zand snelheden van 100 tot 200 m/s, voor klei snelheden van 50 tot 100 m/s en voor veen snelheden van 75 tot 125 m/s aangegeven.

Trillingsoverdracht naar bebouwing

De optredende trillingen in de ondergrond worden overgedragen naar de fundering van de nabij gelegen gebouwen. De overdracht vindt plaats op verschillende manieren, zoals:

- overdracht van de trillingen in het zandpakket via de fundering;
- overdracht van de oppervlaktegolven direct onder het maaiveld op de funderingsconstructie.

Bij de overdracht van trillingen van de bodem naar de funderingselementen en de draagconstructie treedt een zekere mate van demping op. Voor de overdrachtsfunctie van de trillingsintensiteit van de ondergrond naar de fundering en draagconstructie is een schatting gemaakt, gebaseerd op CUR 166.

Trillingsoverdracht naar vloeren

Voor het bepalen van de hinderbeleving en bij beoordeling van trillingsgevoelige apparatuur zijn de trillingsintensiteiten op de vloeren van belang. Bij de overdracht van de trillingsintensiteit aan de draagconstructie naar die op vloeren en ondersteunende onderdelen treedt enig opslinger effect op. Het opslinger effect wordt met factoren in rekening gebracht. De maximale trillingsintensiteit in het midden van de vloer volgt door de trillingsintensiteit aan de draagconstructie te vermenigvuldigen met dynamische vergrotingsfactoren C_{fc}. De vergrotingsfactoren berusten grotendeels op praktijkervaringen.

Bij trillingshinder zijn de maximale voortschrijdende effectieve waarde (v_{eff,max}) en de, per 30 sec, periodieke waarde (v_{per}) op vloeren van belang.

Bepaling $v_{eff,max}$

De maximale effectieve waarde van de trillingssnelheden op de vloeren wordt bepaald voor de toetsingsprocedure voor hinder voor personen in gebouwen. De effectieve waarde van de trillingssnelheid is dimensieloos. De waarde wordt bepaald door een omrekening van de maximale trillingssnelheid naar een gewogen momentane waarde voor de trillingssnelheid. Uit de gewogen momentane waarde kan de voortschrijdende effectieve waarde worden bepaald.

Binnen de gegeven beoordelingsperiode, dag, avond of nacht, is de maximale waarde $v_{eff,max}$ te bepalen als het maximum van de grootste effectieve waarden in de betreffende beoordelingsperiode. CUR-166 geeft als richtlijn voor het uit te voeren procedé, dat:

$$v_{eff,max} [-] = 0,42 \text{ à } 0,64 \times v_{piek} [\text{mm/s}]$$

In geval van trillen van damwanden (continue trillingen) geldt een factor van 0,64. In geval van heien van palen (of passages van verkeer) geldt een factor van 0,42. Bij hinderbeleving is eerder het meest waarschijnlijke trillingsniveau (50% waarde) van toepassing dan de incidentele extreme waarde. Derhalve wordt de factor bij de verwachtingswaarden gebruikt.

Bepaling v_{per}

De effectieve waarde, v_{per} , van de maxima $v_{eff,max}$, wordt bepaald over het aantal tijds-intervallen van 30 seconden binnen een beoordelingsperiode, dag, avond of nacht [-]. Uit de gegeven aantallen per tijdsinterval en de maxima $v_{eff,max}$, voor ieder tijdsinterval van 30 sec wordt v_{per} bepaald volgens:

$$v_{per} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^n v_{eff,max,30,i}^2}$$

Waarin:

N aantal tijdsintervallen van 30 seconden, waarin gemeten is binnen een beoordelingsperiode.