

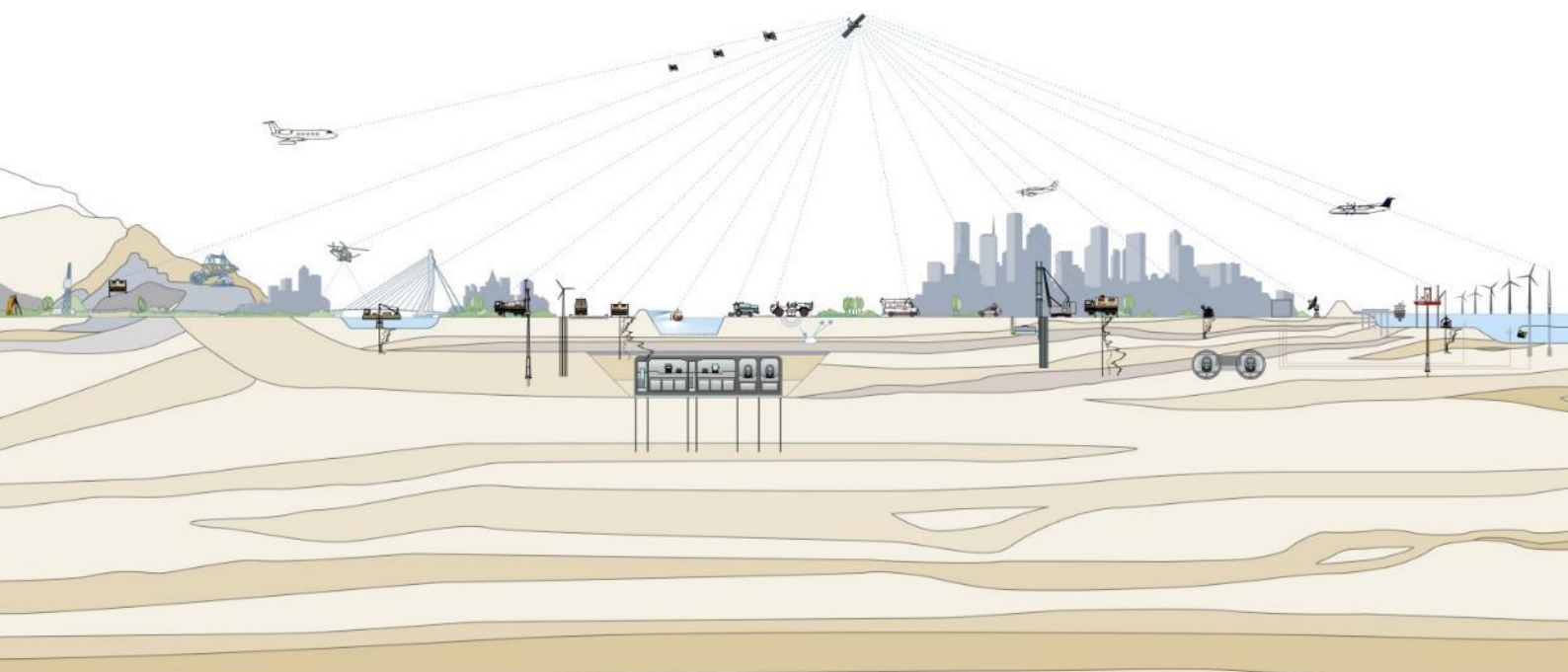
Rail Terminal Gelderland
Trillingsmetingen risicoanalyses transporten te Reeth (Elst)

Document Nr.: 9018-0733-001

Versie: 1.0

Datum: 15 november 2019

 provincie
Gelderland



Opdrachtgever Provincie Gelderland
Afdeling Uitvoering Werken
Postbus 9090
6800 GX Arnhem

Periode 22 t/m 29 oktober 2019
trillingsmetingen

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	RKE / ASN	DWE	JCK	15-11-2019
Rev	Omschrijving	Opgesteld	Gecontroleerd	Goedgekeurd	Datum

INHOUDSOPGAVE

1.	INLEIDING	1
2.	PROJECTBESCHRIJVING	2
2.1	Situatiebeschrijving	2
2.2	Mechanisme trillingen	3
2.3	Meetuitvoering en meetlocatie	5
3.	BEOORDELING TRILLINGEN	8
3.1	Toetsingskader en toetsingsprocedure	8
3.2	Soorten schade door trillingen	9
3.3	Grenswaarde SBR A	9
4.	MEETRESULTATEN	13
4.1	Meetraai 1 (zanderige ondergrond)	13
4.2	Meetraai 2 (kleilaag) raai 2	19
4.3	Conclusie meetresultaten	25
5.	ANALYSE MEETRESULTATEN	27
5.1	Meetresultaten	27
5.2	Modellering	28
5.3	Postdictie	29
5.4	Invloedsgebied spoor	31
5.5	Invloed vrachtverkeer toekomstige weg	32
5.6	Trillingsreducerende maatregelen	33
6.	CONCLUSIES	34
A.	TOELICHTING MODELLERING TRILLINGEN	
B.	TOELICHTING SBR – TOETSINGSKADER	
C.	TRILLINGSTECHNISCHE VAKTERMEN	
D.	GRAFISCHE WEERGAVE MEETRESULTATEN	
D.1	MEETRAAI 1, ZANDERIGE ONDERGROND, SNELHEDEN	
D.2	MEETRAAI 1, ZANDERIGE ONDERGROND, VERSNELLINGEN	
D.3	MEETRAAI 1, ZANDERIGE ONDERGROND, SNELHEID VERSUS FREQUENTIE	
D.4	MEETRAAI 1, ZANDERIGE ONDERGROND, EFFECTIEVE SNELHEID	
D.5	MEETRAAI 2, KLEIIGE ONDERGROND, SNELHEDEN	
D.6	MEETRAAI 2, KLEIIGE ONDERGROND, VERSNELLINGEN	
D.7	MEETRAAI 2, KLEIIGE ONDERGROND, SNELHEID VERSUS FREQUENTIE	
D.8	MEETRAAI 2, KLEIIGE ONDERGROND, EFFECTIEVE SNELHEID	

1. INLEIDING

Opdrachtverstrekking

Op 29 augustus 2019 ontving Fugro Leidschendam van Provincie Gelderland de opdracht voor de uitvoering van trillingsmetingen (en analyses naar vrachtwagentransporten) ten behoeve van de toekomstige Rail Terminal Gelderland te Elst.

Situatie

Te Reeth (Elst) is naast het spoor (de Betuweroute) een overslag terminal RTG gepland, waarbij goederen overgeslagen gaan worden van railvervoer naar wegvervoer. Ter aansluiting van de RTG terminal is een weg direct naast het spoor gepland die uiteindelijk aan gaat sluiten op de lokale weg Rijksweg Zuid.

Probleemstelling

Ten gevolge van de transportbewegingen van de vrachtauto's ontstaan trillingen in de ondergrond. De trillingen worden via de ondergrond overgedragen op de draagconstructie van de omliggende bebouwing (woningen). Afhankelijk van de constructieve staat, funderingswijze, ouderdom en de afstand tot de trillingsbron, is er kans op schade aan de bebouwing dan wel hinderbeleving voor personen door trillingen.

Doelstelling

Het doel van het trillingenonderzoek is inzicht krijgen in de te verwachten trillingsintensiteiten als gevolg van de transportbewegingen. Hiertoe is met trillingsmetingen inzicht verkrijgen in de trillingsniveaus als gevolg van passerend railverkeer en is met een vertaalslag de situatie voor vrachtverkeer geanalyseerd.

Trillingsmetingen

De trillingsmetingen zijn op een tweetal locatie naast het spoor in de periode van 22 t/m 29 okt 2019 uitgevoerd. De metingen zijn uitgevoerd conform SBR richtlijn A 2017 "Schade aan bouwwerken" en SBR richtlijn B "Hinder voor personen".

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

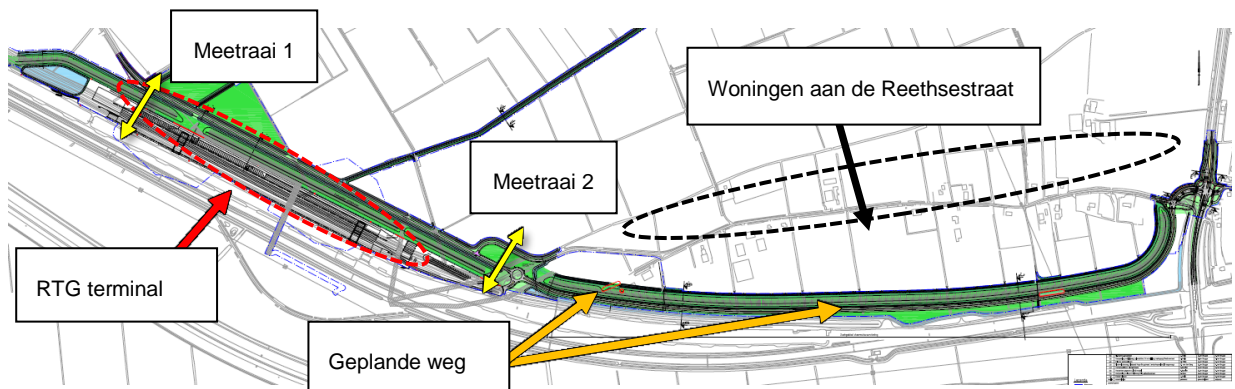
Vaktermen en definities

Ter verduidelijking is in bijlage "Trillingstechnische vaktermen" een verklarende woordenlijst voor de belangrijkste trillingstechnische vaktermen opgenomen.

2. PROJECTBESCHRIJVING

2.1 Situatiebeschrijving

Ter hoogte van Reeth / Eimeren (Elst) is de Rail Terminal Gelderland (RTG) aan de Noordzijde langs de bestaande Betuweroute gepland. Hiervoor is een separaat aan te leggen aan- en afvoer route voor vrachtauto's evenwijdig aan het spoor gepland. Deze weg komt tussen het spoor en de woningen te liggen op enige afstand (circa 200 tot 275 m) tot de woningen aan de Reethstraat. Door het passerende treinverkeer langs de projectlocatie worden trillingen in de grond opgewekt. Daarnaast gaan de (vele) vrachtauto's eveneens trillingen in de grond opwekken. In deze zijn de trillingen veroorzaakt door railverkeer hoger dan de trillingen veroorzaakt door vrachtverkeer (massa's ed.). De trillingen kunnen mogelijkwijs tot schade en / of hinderbeleving bij de woningen leiden. In onderstaande figuur is het plan weergegeven.



Figuur 2-1: projectlocatie met geplande RTG terminal (en ontsluitingsweg)

De geplande weg wordt circa 75 m uit het dichtstbij gelegen spoor aangebracht, waarbij deze op een afstand van circa 125 m tot 175 m uit de bestaande bebouwing komt te liggen. In de bocht nabij de aansluiting op het bestaande wegennet is de afstand circa 100 m.

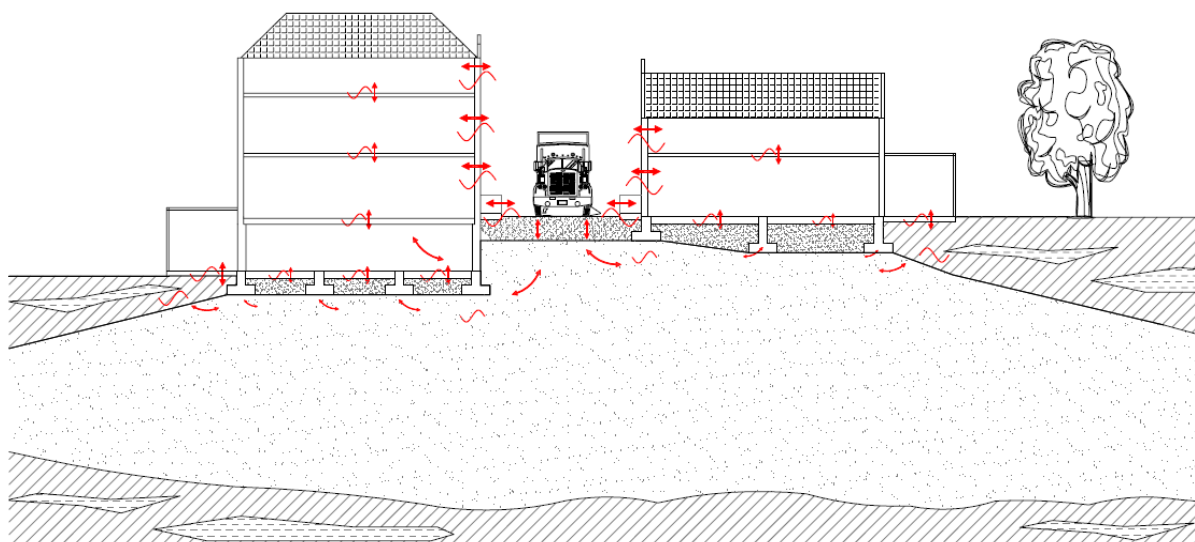
Om de invloed van trillingen veroorzaakt door passerend railverkeer te onderzoeken, zijn haaks op het spoor trillingsmeters in twee meetraaien op maaiveld geplaatst (gele pijl lijnen in voorstaande figuur). Meetraai 1 is in gebied aan het einde van de terminal, geplaatst, meetraai 2 in gebied met de aansluiting met de ontsluitingsweg.

De trillingsmetingen zijn gedurende 1 week met automatisch registrerende systemen onbemand uitgevoerd in de periode 22 t/m 29 oktober 2019 uitgevoerd (24 uursmetingen).

Door in een tweetal meetraaien haaks op het spoor (5 meetlocaties per raai) te meten wordt de afdracht van trillingen in de grond inzichtelijk gemaakt. Deze meetresultaten worden dan gebruikt ter ijking van het prognosemodel (CUR166 prognosemodel) waarmee voor spoortrillingen de analyses ter hoogte van de bebouwing gedaan kan worden. Met de aanname dat trillingen veroorzaakt door vrachtverkeer ondergeschikt zijn aan die van railverkeer, is de vertaalslag te maken voor vrachtverkeer. Mocht blijken dat bij de bebouwing de trillingen alsnog een issue is, dan dienen maatregelen gedimensioneerd te worden (geen onderdeel van dit project).

2.2 Mechanisme trillingen

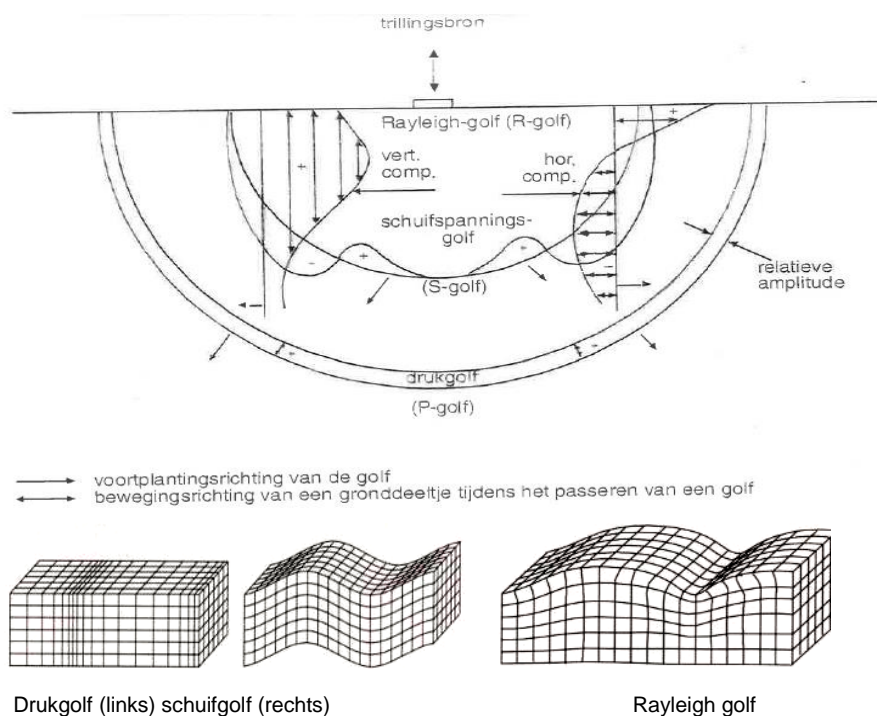
Bij trillingen is er sprake van een trillingsbron (verkeer of trein), een medium dat de trillingen doorgeeft (grond) en een ontvanger (woning). Bij de bron worden de trillingen in de grond opgewekt. De ontvangst van de trilling (aanstoot) van de woning ligt op funderingsniveau. Afhankelijk van de wijze van funderen is dit op de funderingspalen of op de funderingselementen bij een fundering op staal. In onderstaande figuur is (schematisch) de interactie tussen trillingsbron en ontvanger weergegeven.



Figuur 2-2: Interacties tussen trillingsbron en ontvanger, situatie fundering op staal

Wanneer (rail)verkeer passeert over een ruw oppervlak/wegdek/drempel veroorzaakt deze plastische en elastische vervormingen in de wegconstructie en ondergrond. Door de snelle introductie van vervormingen ontstaan golfverschijnselen in de grond. De plastische golfverschijnselen blijven beperkt tot in de wegconstructie.

Voor de trillingen voortplantende naar de omgeving zijn alleen de elastische golven van belang. Er ontstaan trillingsgolven die zich in alle richtingen (kunnen) voortplanten (onderstaande figuur). Komen deze golven aan de oppervlakte, bij een laagovergang of bij een bouwwerk (woning), dan vindt hier reflectie en omzetting van de trillingsgolven plaats, zodat een interferentiepatroon van bodembewegingen ontstaat.



Figuur 2-3: Verschillende trillinggolven

Ten gevolge van de afschuifgolven en compressiegolven aan het maaiveld ontstaan zogenaamde oppervlaktegolven (Rayleigh-golven). Deze golven nemen het grootste deel van de totale trillingsenergiebron 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 o.a. 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.

De grootte van de (grond)beweging op het maaiveld wordt bepaald door de kracht van de bron, door de bodemopbouw en de afstand tot de bron. Doorgaans nemen de bewegingen, c.q. de maximale amplitude van de beweging (golf), af door materiaaldemping en bij toenemende afstand tot de bron (geometrische demping). De factoren die invloed hebben op de intensiteit van de trillingen bij de woning zijn:

- Eigenschappen van de ondergrond;
- (Bij een weg) Afmetingen / dimensies van de wegconstructie;
- Energie die het passerend verkeer in de ondergrond aanbrengt.

De optredende trillingen (bewegingen) in de ondergrond worden overgedragen naar de fundering van de nabij gelegen gebouwen / woningen. 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 overdracht van trillingen van de bodem naar de funderingselementen en de draagconstructie treedt een zekere mate van demping op. Voor het bepalen van de hinderbeleving zijn de trillingsintensiteiten

op de vloeren van belang. Bij de overdracht van de trillingintensiteit aan de draagconstructie naar die op vloeren en ondersteunende onderdelen treedt enig opslingerend effect op.

2.3 Meetuitvoering en meetlocatie

Meetuitvoering

De metingen zijn uitgevoerd met systemen welke voldoen aan de eisen en specificaties zoals gesteld in de SBR richtlijn A 2017 "Schade aan bouwwerken" en SBR richtlijn B "Hinder voor personen in gebouwen".

De metingen zijn met Profound apparatuur uitgevoerd (onderstaande figuur), type Vibra Plus v2.5. Een meetopstelling bestaat uit een verwerkingseenheid en een gefoon. De gefoon wordt ter plaatse van het meetpunt aan de constructie bevestigd (of op de vloer geplaatst) en deze meet de trilling snelheden in de drie orthogonaal op elkaar staande richtingen (x,y,z). In de verwerkingseenheid wordt de bijbehorende frequentie in dezelfde drie richtingen berekend. Deze frequenties en snelheden zijn direct op het scherm van de verwerkingseenheid zichtbaar.



Figuur 2-4: Meetsysteem met opnemer (Vibra+)

Na afloop van de uitvoering van de meting zijn de meetresultaten ingelezen in een personal computer en tot grafieken verwerkt.

Instellingen

De verwerkingseenheid slaat de van de sensor afkomstige meetsignalen automatisch op. Per gekozen tijdsinterval worden de hoogst gemeten trillingssnelheid met bijbehorende frequentie opgeslagen. De volgende instellingen van het meetsysteem zijn gehanteerd:

- Tijdsinterval 3 seconden (per 3 sec wordt een maximale waarde opgeladen)
- Data save level 0,0 mm/s (waarden boven dit level worden opgeslagen)
- Tijdsduur 24 uursmeting (gedurende de dag-, avond-, en nachtperiode)

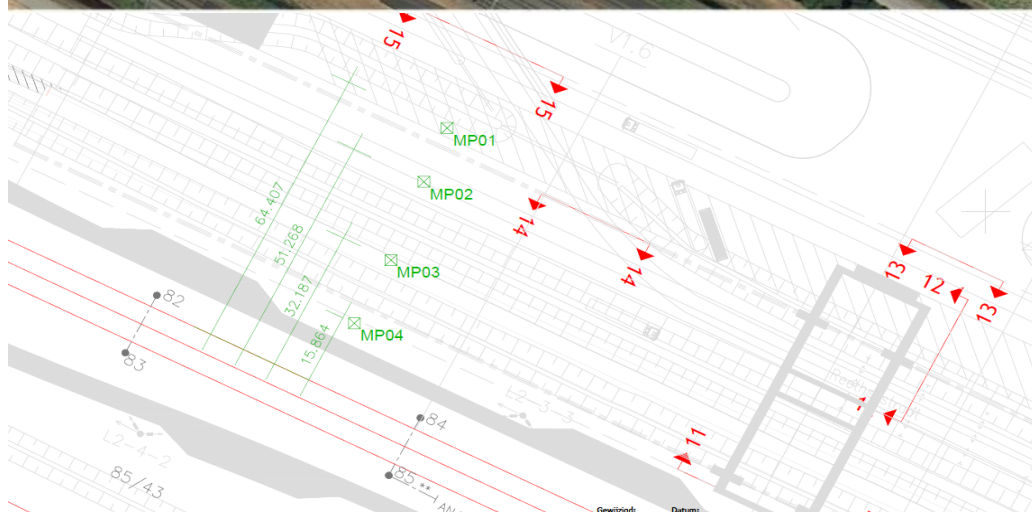
Meetpuntlocaties

Op basis van verschillen in de grondslag zijn de twee meettraaien bepaald. Bij meetraai 1 bestaat de ondergrond met name uit zanderige lagen, bij meetraai 2 is een samendrukbare kleilaag aanwezig. In onderstaande tabel is een overzicht van de gehanteerde meetsystemen en meetlocaties opgenomen. In onderstaande figuren is de ligging van de meetraai met de meetpuntnummering grafisch weergegeven.

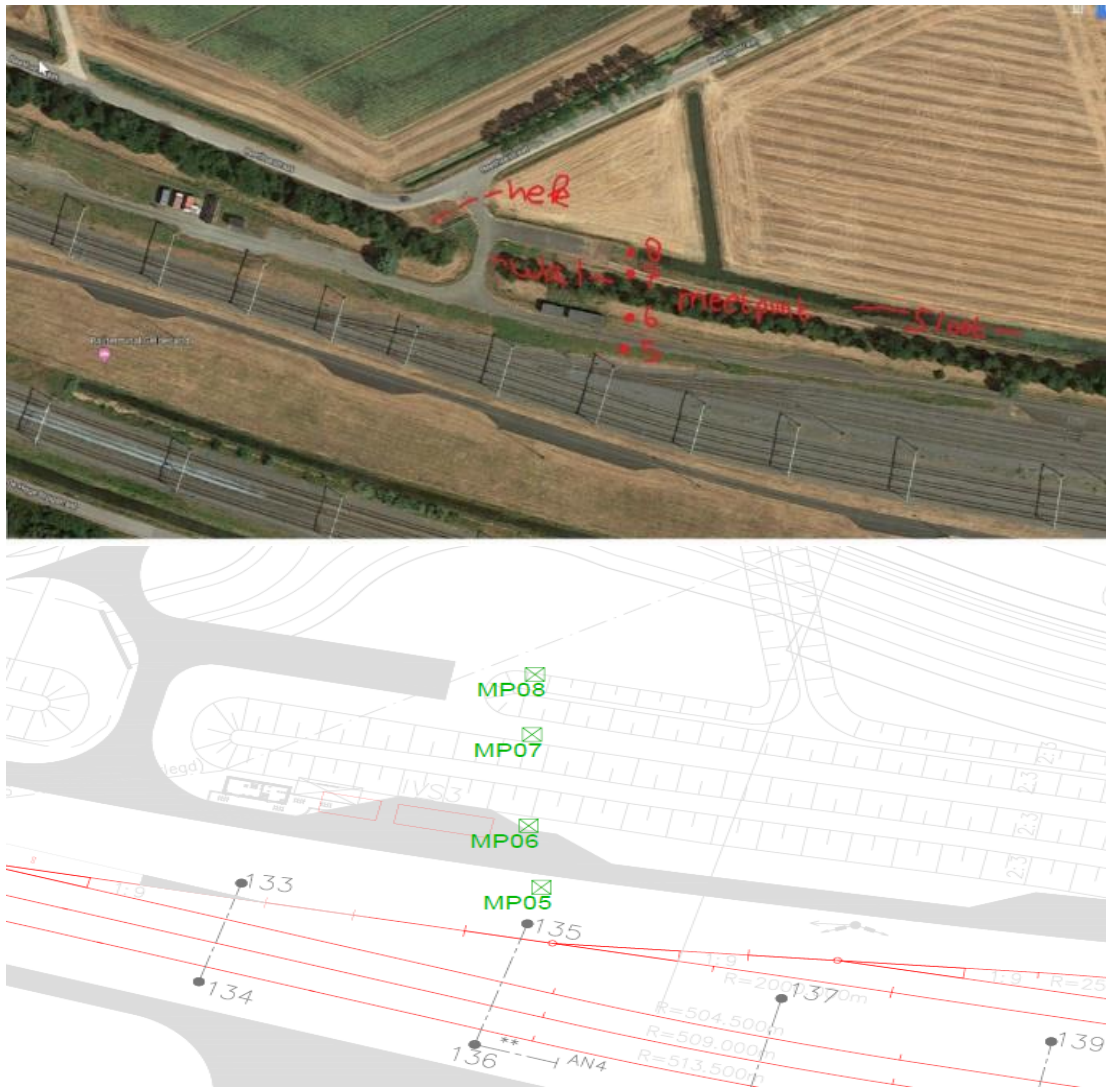
Tabel 2-1: Overzicht ingezette meetapparatuur.

Raai	Meetpunt		Meetsysteem nr	Afst. tot hart dichtstbijzijnde spoor ¹⁾ [m]
2	MP 4	Spoorzijde, naast spoor	VIB 0145	18,0
2	MP 3	Spoorzijde, tussen sloot en wal	VIB 0062	33,5 m
2	MP 2	Wegzijde, tussen wal en sloot	VIB 0051	52,0 m
2	MP 1	Wegzijde, naast sloot	VIB 0063	65,0 m
1	MP 5	Spoorzijde, naast spoor	VIB 3702	13,0 m
1	MP 6	Spoorzijde, tussen spoor en wal	VIB 3719	22,0 m
1	MP 7	Wegzijde, tussen wal en weg	VIB 3701	38,5 m
1	MP 8	Wegzijde, naast weg	VIB 0492	48,0 m

1) De afstand van 1^e spoor tot 2^e spoor bedraagt circa 60 m



Figuur 2-5: Meetraailocatie 1 (zanderige ondergrond)



Figuur 2-6: Meetraailocatie 2 (kleilaag in ondergrond)

3. BEOORDELING TRILLINGEN

3.1 Toetsingskader en toetsingsprocedure

SBR richtlijnen

Trillingsintensiteiten worden getoetst aan de grens- en / of streef- en / of toetswaarden uit de SBR richtlijnen uit september 2006 / december 2017, uitgegeven door Stichting Bouw Research, Rotterdam. De Raad van State erkent de richtlijnen als uitgangspunt voor jurisprudentie.

In totaal zijn er 3 SBR - richtlijnen, namelijk

- Richtlijn A 2017: 'Schade aan bouwwerken';
- Richtlijn B 2006: 'Hinder voor personen in gebouwen';
- Richtlijn C 2006: 'Storing aan apparatuur'.

In algemene zin geldt dat afhankelijk van de constructieve staat, funderingswijze en ouderdom van de bebouwing, functies van ruimten, karakteristieken van de trillingsgevoelige apparatuur en de afstand tot de werkzaamheden, de mogelijkheid bestaat dat de trillingen kunnen leiden tot:

- schade aan de draagconstructie van omliggende gebouwen;
- hinder voor personen in gebouwen;
- storing aan trillingsgevoelige apparatuur;
- zettingschade door verdichting van los gepakt zand.

In dit geval zijn de richtlijnen A en B van toepassing.

Toetsingsprocedure voor constructieve schade, SBR A 2017

Voor de toetsing van schade aan bouwwerken dient de trillingsintensiteit aan de draagconstructie bepaald / gemeten te zijn. Volgens de bestaande praktijkervaring is de kans op schade aan gebouwen (of onderdelen ervan) aanvaardbaar klein, indien de rekenwaarde van de grenswaarde (v_r) groter is dan de topsnelheid aan de draagconstructie. De waarde aan de draagconstructie volgt uit metingen of uit prognoses. De toetsprocedure op schade luidt:

$V_r \leq V_{top}$ ja? --> risico op schade
 Nee? --> risico op schade aanvaardbaar klein

Toetsingsprocedure voor hinderbeleving, SBR B

Voor de toetsing op hinderbeleving dient de trillingsintensiteit op vloeren bepaald / gemeten te zijn. Volgens de bestaande praktijkervaring is de kans op hinderbeleving voor personen minimaal, indien de streefwaarde groter is dan waarde op de vloer, waarbij onderstaande toetsen van toepassing zijn. De waarde op de vloer volgt uit metingen of uit prognoses.

De toetsprocedure op hinderbeleving luidt:

Toets 1	$V_{eff,max} < A1$	ja?	Geen hinderbeleving (verwachting)
		Nee?	Toets 2 (a en b)
Toets 2a	$V_{eff,max} > A2$	Ja?	Mogelijke hinderbeleving (verwachting)
		Nee?	Toets 2b
Toets 2b	$v_{per} < A3$	Ja?	Geen hinderbeleving (verwachting)
		Nee?	Hinderbeleving aannemelijk (verwachting)

Kort toegelicht:

- Toets 1: De maximale effectieve waarde van de trillingssnelheid dient getoetst te worden aan streefwaarde A1. Indien deze onder de streefwaarde A1 blijft, mag verwacht worden dat geen hinder aanwezig is. Indien dit niet het geval is, dient toets 2 uitgevoerd te worden:
- Toets 2: De maximale effectieve waarde van de trillingssnelheid dient getoetst te worden aan streefwaarde A2. Bij overschrijding van streefwaarde A2 is hinder voor personen aannemelijk / kan niet uitgesloten worden. Indien streefwaarde A2 niet overschreden wordt, bepaald het aantal maal dat de trilling zich voordoet of sprake is van hinderbeleving. De gemiddelde periodieke waarde van de trillingssnelheid dient dan getoetst te worden aan streefwaarde A3. Bij overschrijding van streefwaarde A3 is hinderbeleving aannemelijk.

3.2 Soorten schade door trillingen

Wanneer er overschrijdingen van de grenswaarden zijn geconstateerd behoeft 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:

- (Haar)scheurtjes in pleisterwerk, tegelwerk, metselwerk e.d.
- Naadvorming langs kozijnen, plafonds e.d.
- Slecht sluitende deuren

Constructieve schade

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

- Scheuren in beton-/metselwerk
- Verzakking van de constructie
- Scheuren in draagconstructie

3.3 Grenswaarde SBR A

In de bijlage "Toelichting SBR - toetsingskader" wordt nader ingegaan op de bepaling van de grenswaarde.

Kans op schade SBR A

Op basis van SBR - richtlijn A 2017 "Schade aan bouwwerken" wordt de beoordeling van de trillingssnelheid uitgevoerd. De beoordeling of de kans op schade acceptabel is volgt uit een vergelijking van de opgelegde trillingssnelheid en de grenswaarde. Volgens de richtlijn is de kans op schade aanvaardbaar klein (kleiner dan 1%) indien de grenswaarde niet overschreden worden. De grenswaarde wordt bepaald door de type trillingsbron, de constructie- en funderingswijze van de bebouwing (bouwkundige staat) en de uitgebreidheid van de soort meting.

Woningen

De woningen zijn opgetrokken uit metselwerk, waarbij de woningen gefundeerd worden op staal (verwachting).

Uitgangspunten t.b.v grenswaarde bepaling SBR A 2017

De volgende onderdelen zijn voor het afleiden van de grenswaarde aangehouden:

- *Type trillingsbron*
 Passages van (rail)verkeer wordt beschouwd als een trillingsbron die herhaald kortdurend trillingen veroorzaakt ("heien"), waarbij resonanties en/of vermoeiingseffecten in onderdelen van een bouwwerk kunnen optreden.
- *Type fundering*
 De woningen zijn gefundeerd op staal (geen palen), waarbij de zandlaag onder de fundering minimaal 8 m is (verwachting).
- *Categorie bebouwing*
 Omdat de woningen opgetrokken zijn uit metselwerk is een categorie 2 van toepassing, zijnde een object opgetrokken uit metselwerk en in (redelijk) goede staat van onderhoud.
- *Bouwkundig gevoelig*
 Conform de checklist uit SBR A zijn de woningen als "niet bouwkundig gevoelig" aangemerkt. Op moment dat een object een monumentale status heeft of in slechte staat is, dan is het object "bouwkundig gevoelig".
- *Soort meting (uitgebreidheid)*
 In geval van metingen, zal per woning 1 meetpunt aan de draagconstructie (gevel) zijn ingericht. Dit is een "indicatieve meting".

Voor de woningen gefundeerd op staal zijn aan de draagconstructie zowel de grenswaarden geldig voor objecten gefundeerd op palen als de grenswaarden voor objecten gefundeerd op staal van toepassing. In onderstaande tabellen zijn de grenswaarden opgenomen.

Tabel 3-1a: Grenswaarden [mm/s], object gefundeerd op palen

Dominante frequentie	Karakteristieke waarden		Partiële veiligheidsfactor			Rekenwaarde grenswaarde trillingssnelheid ²⁾	
			TB ¹⁾	BS ¹⁾	TM ¹⁾	Cat. 2 ²⁾	Cat. 2(M) ^{2,3)}
Freq.	Cat. 2		TB ¹⁾	BS ¹⁾	TM ¹⁾	Cat. 2 ²⁾	Cat. 2(M) ^{2,3)}
[Hz]	[mm/s]		[-]	[-]	[-]	[mm/s]	[mm/s]
10	5,0		1,5	1,0	1,0 / 1,6	3,3 / 2,1	1,9 / 1,2
15	6,3		1,5	1,0	1,0 / 1,6	4,2 / 2,6	2,5 / 1,5

¹⁾ TB = Type trillingsbron, BS = Bouwkundige staat, TM = type meting
²⁾ excl./incl. partiële veiligheidsfactor soort meting.
³⁾ incl. partiële veiligheidsfactor voor bouwkundig gevoelig

Tabel 3-1b: Grenswaarden [mm/s], object gefundeerd op staal, bouwkundig niet gevoelig

Laagdikte	Karakteristieke waarden	Rekenwaarde grenswaarde trillingssnelheid ²⁾	Rekenwaarde grenswaarde trillingssnelheid ²⁾
		Heien ²⁾ (TB = 1,6)	Heien ²⁾ (TB = 1,6)
		BS = 1,0 TM = 1,0 / 1,6 ¹⁾	BS = 1,7 TM = 1,0 / 1,6 ¹⁾
[m]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]
6	12,9	8,1 / 5,0	4,7 / 3,0
7	11,4	7,1 / 4,5	4,2 / 2,6
8	10,0	6,3 / 3,9	3,7 / 2,3
¹ TB = Type trillingsbron, BS = Bouwkundige staat, TM = type meting ² excl./incl. partiële veiligheidsfactor soort meting.			

De vet gemarkeerde waarden zijn van toepassing.

Hiaat SBR A richtlijn

De SBR-richtlijnen doen geen uitspraak bij trillingsintensiteiten die lager zijn dan de gestelde grenswaarde en / of die veelvuldig voorkomen gedurende langere tijd (maanden tot jaren). Er is sprake van **cosmetische schade** die uiteindelijk tot constructieve schade kan leiden. Vanuit de praktijk is bekend dat schade (scheurvorming in metselwerk) ontstaat bij objecten die een langdurige trillingsbelasting (hebben) ondergaan. Dergelijke schade treedt eerder op bij objecten gefundeerd op staal dan bij objecten gefundeerd op palen.

3.3.1 Streefwaarde SBR B

In de bijlage "Toelichting SBR - toetsingskader" wordt nader ingegaan op de bepaling van de streefwaarde.

Op basis van de type trilling(sbron), de functie van de ruimte en de situatie, wordt de streefwaarde voor een beoordelingsperiode bepaald (dag-, avond- of nachtperiode). De streefwaarde is dimensieloos. Indien de trillingsintensiteit beneden de streefwaarde blijft, mag verwacht worden dat er in de meeste situaties geen hinder voor personen zal optreden.

Uitgangspunten t.b.v streefwaarde bepaling SBR B 2006

De volgende onderdelen zijn voor het afleiden van de streefwaarden aangehouden:

- *Type trillingsbron*
Analoog aan SBR A 2017 worden passages van (rail)verkeer beschouwd als een trillingsbron die herhaald kortdurend trillingen veroorzaakt.
- *Situatie*
Een nieuwe situatie is van toepassing, de transportweg ligt er nog niet
- *Functie ruimte*
De functie van de ruimte is wonen.
- *Duur van de periode*
Alle perioden van de dag zijn van toepassing (dag-, avond- en nachtperiode).

Streefwaarden

De streefwaarden voor hinder zijn, in tegenstelling tot grenswaarden bij schade, niet primair frequentieafhankelijk en dimensieloos. In onderstaande tabel zijn deze voor een bestaande situatie opgenomen. Om praktische redenen en om een directe vergelijking van meetwaarden te kunnen maken zijn de streefwaarden omgerekend naar snelheidswaarden. Het handboek CUR 166 "Damwandconstructies" geeft een omrekenfactor van 0,42 voor trillingen die herhaald kortdurend van karakter zijn (zoals verkeerstrillingen).

In onderstaande tabel zijn de voor een bestaande situatie de streefwaarden opgenomen.

Tabel 3-2: Streefwaarden trillingsnelheid [-], voor nieuwe situatie, functie wonen

Beoordelingsperiode	Streefwaarde A1	Streefwaarde A2	Streefwaarde A3
	[-] / [mm/s]	[-] / [mm/s]	[-] / [mm/s]
Dag en avond	0,10 / 0,24	0,40 / 0,96	0,05 / 0,12
Nacht	0,10 / 0,24	0,20 / 0,48	0,05 / 0,12

Voelbaarheid en acceptatie trillingen

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

Tabel 3-3: Hinderkwalificatie

$V_{\text{eff,max}}$ [-]	$V_{\text{eff,max}}^{1)}$ [mm/s]	Hinderkwalificatie
< 0,1	<0,24	Geen hinder
0,1-0,2	0,24-0,48	Weinig hinder (bestaande situaties)
0,2-0,8	0,48-1,90	Matige hinder
0,8-3,2	1,90-7,62	Hinder
>3,2	>7,62	Ernstige hinder

1) In CUR166 is een omrekenfactor van 0,42 voor passerende voertuigen opgenomen

SBR-richtlijn B vermeldt:

"Het accepteren van (matige) hinder door overschrijding van de streefwaarden kan onder meer afhankelijk zijn van de mate waarin de trillingssterkte voorkomt, de aanwezigheid van andere trillingsbronnen (de achtergrondtrillingen), de mogelijkheid tot het treffen van trillingsreducerende maatregelen en de historie. In geval van mogelijke hinder dienen de betrokken partijen te overleggen.

4. MEETRESULTATEN

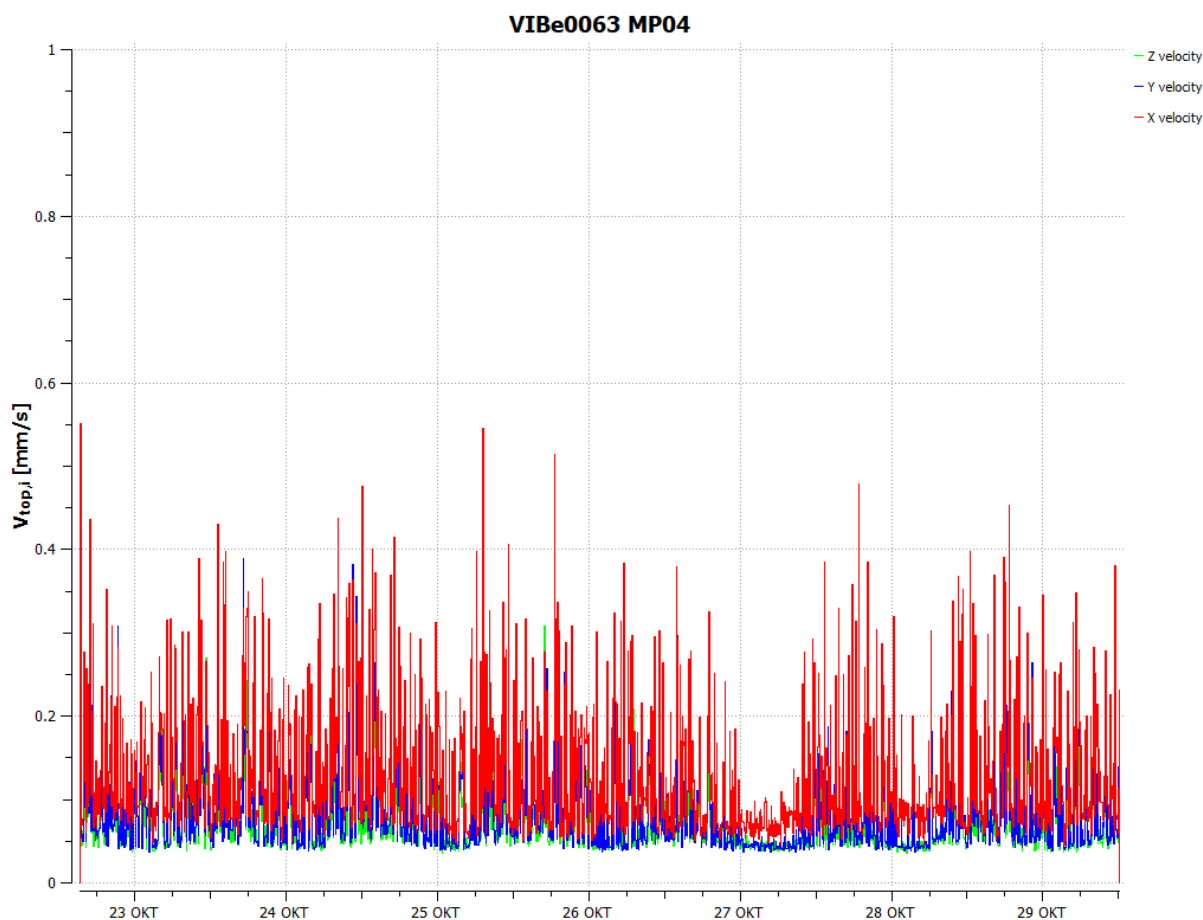
De trillingsmetingen hebben bruikbare meetresultaten opgeleverd. Tijdens de metingen hebben zich geen bijzonderheden voorgedaan, die op de metingen een mogelijk verstrend effect hebben gehad.

In de bijlagen zijn, van de totale meetperiode, de meetresultaten opgenomen. Als voorbeeld is in onderstaande figuren van een meetpunt een deel van de meetresultaten grafisch gepresenteerd.

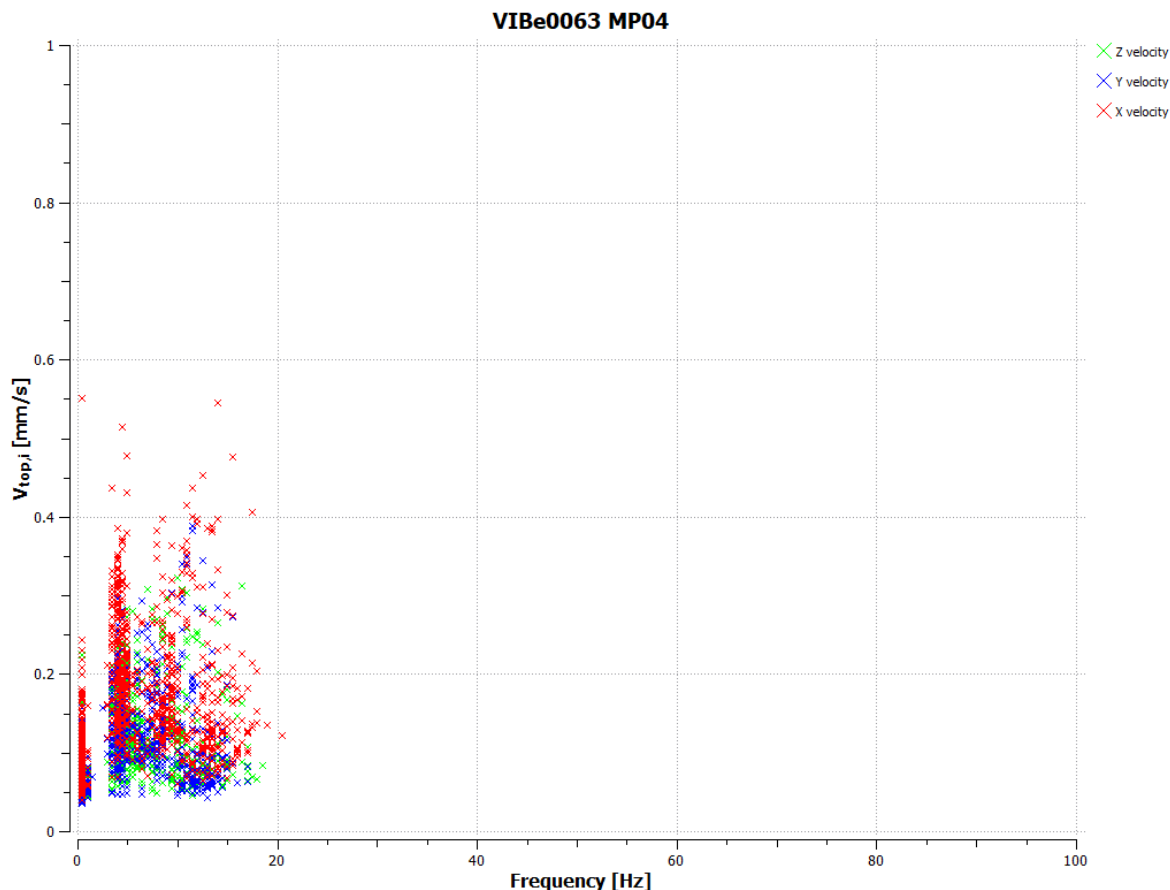
4.1 Meetraai 1 (zanderige ondergrond)

4.1.1 Meetresultaten (grafisch)

Van meetpunt 4 (locatie: nabij het spoor) zijn de meetwaarden van de trillingssnelheden grafisch weergegeven.



Figuur 4-1 Meetraai 1, MP 4, maaiveld naast spoor
VIB0063, snelheden versus tijd
Periode 22 t/m 29 oktober 2019



Figuur 4-2 Meetraai 1, MP 4 maaiveld naast spoor VIB0063, snelheden versus frequentie
Periode 22 t/m 29 oktober 2019

4.1.2 Beoordeling meetsignalen en meetwaarden

Beoordeling

Op moment dat bijzonderheden herkend worden / zijn, is daar melding van gemaakt. In het algemeen geldt dat de waarden in de nachtelijke uren niet anders zijn dan in de avond- en dagperiode.

Het trillingsbeeld is dusdanig dat er verdeeld over de periode van de dag geen onderscheid in aantal passages zichtbaar is. Met inzoomen in de data is te achterhalen dat gereden wordt op meerdere sporen (= verschillende afstanden). Met verder inzoomen in de data is te zien dat met verschillend materieel gereden wordt (lengte van de passage varieert).

Met betrekking tot de dominante frequentie van de trillingen veroorzaakt door passerend verkeer geldt dat deze doorgaans laagfrequent zijn (rond de 2,5 Hz tot 15 Hz).

Meetwaarden

In onderstaande tabel is een samenvatting van de meetresultaten opgenomen. De waarden zijn grafisch uit de grafieken bepaald.

Tabel 4-1: Samenvatting meetresultaten, meetraai 1 (zanderige ondergrond)

Meetpunt	Sysnr.	1 ^e spoor	2e spoor		1 ^e spoor	2e spoor ¹⁾
		Snelheid [mm/s]	Snelheid [mm/s]	Frequentie [Hz] ²⁾	Effectieve waarde [-]	Effectieve waarde [-]
MP 1	VIB 0145	0,30 – 0,45	0,15 – 0,18	4,0 (7,5 -10)	0,15 -10,18	0,11 – 0,12
MP 2	VIB 0062	0,22 – 0,32	0,20 – 0,25	4,0 (7,5 -10)	0,15 – 0,18	0,09 – 0,11
MP 3	VIB 0051	0,25 – 0,35	0,15 – 0,20	4,0 (7,5 -10)	0,14 – 0,18	0,09 – 0,11
MP 4	VIB 0063	0,30 – 0,55	0,20 – 0,30	4,5 (10 – 12)	0,17 – 0,20	0,10 – 0,12
1) Afstand tussen 1 ^e set en 2 ^e set sporen bedraagt circa 60 m 2) Tussen haakjes vermelde waarden zijn 2 ^e orde waarden						

Bijzonderheden

- In de nachtperiode van zondag 27 oktober 2019 (00:00 – rond 09:00) treden geen verhoogde waarden op (vermoedelijk is het spoor buiten dienst gesteld geweest).
- Opvallend is dat de waarden van meetpunt 1 over de gehele tijdsperiode verhoogde waarden laten zien in vergelijking tot meetpunt 2 (en meetpunt 3), terwijl verwacht zou worden dat de waarden juist lager zouden moeten zijn. Dit gezien de grotere afstand tot het spoor dan meetpunt 2.
- Bij meetpunt 1 (naast de weg) is op diverse dagen in de meetperiode rond 16:00 tot 19:00 uur verhoogde activiteit te zien (Y-richting) waarden 0,12 mm/s). Deze activiteit is niet op bij de andere meetpunten zichtbaar.

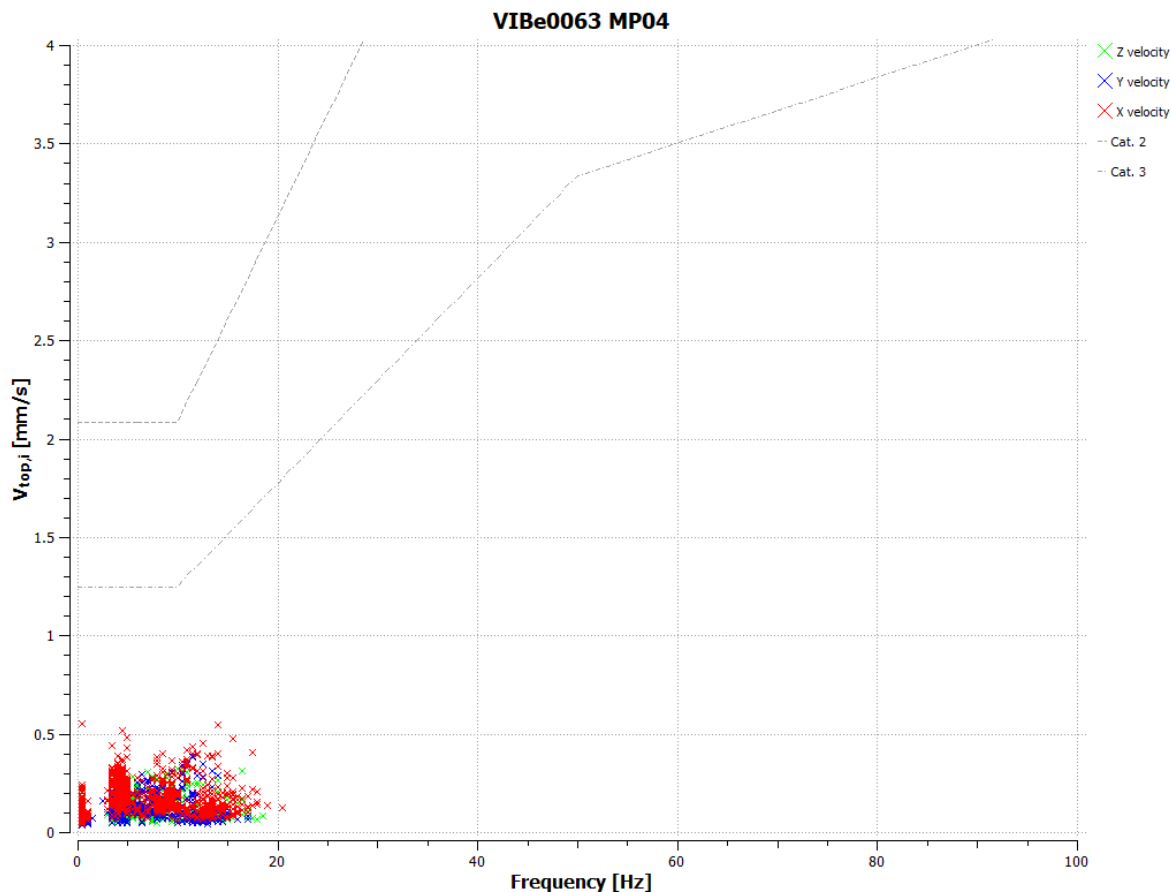
4.1.3 Toetsing SBR A

In de bijlagen is van de totale meetperiode grafisch de toetsing op SBR A opgenomen.

Doorgaans wordt de toetsing op risico op schade (SBR A) uitgevoerd op meetwaarden van het meetpunt geplaatst aan de draagconstructie (gevel) van een object. In dit geval is de toetsing op de grenswaarde toch uitgevoerd, ondanks dat op maaiveld gemeten is.

Als voorbeeld is van meetpunt 4 (nabij het spoor) in onderstaande figuur grafisch de toetsing op SBR A van de meetresultaten weergegeven. Zowel de grenswaarde lijn voor categorie 2 als van categorie 3 is opgenomen.

Opgemerkt wordt dat vanaf december 2017 de hernieuwde versie van SBR A richtlijn van toepassing is en dat geen sprake meer is van een categorie 3. Indien sprake is van “bouwkundige gevoelig” object (monumentale status) wordt een partiële factor in rekening gebracht. Daarmee is de grenswaarde-lijn vergelijkbaar met een categorie 3 indeling.



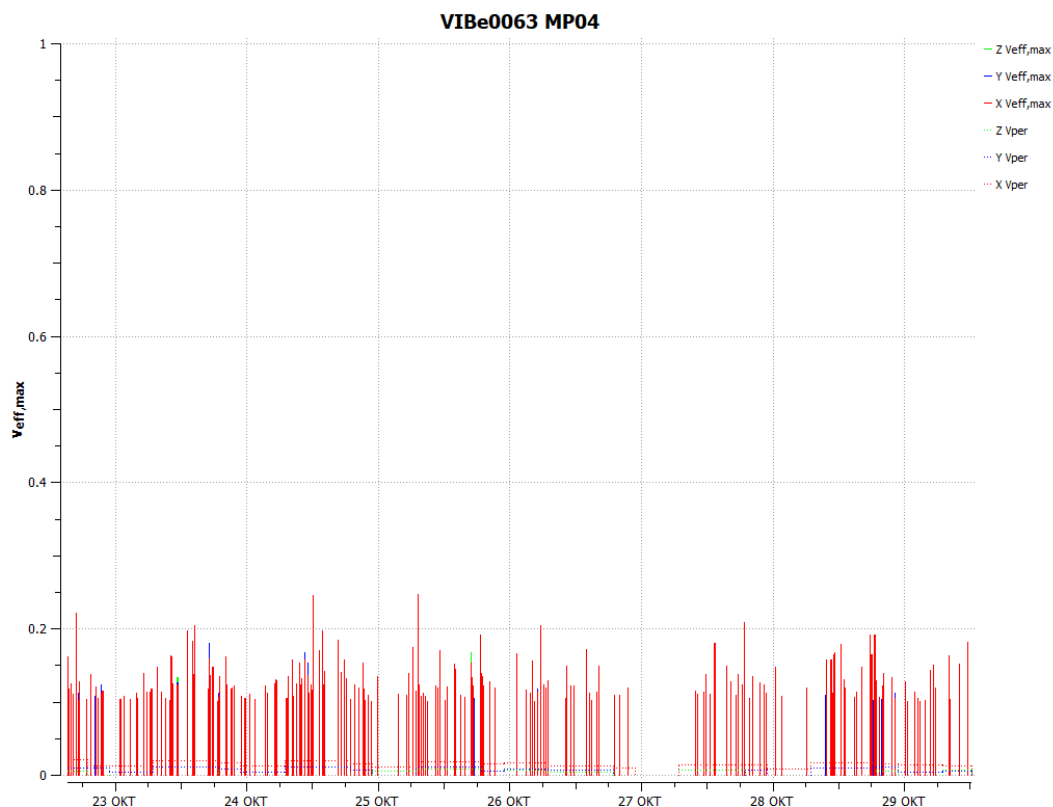
**Figuur 4-3 Beoordeling SBR A, MP 4 naast het spoor
VIB 0063, snelheden versus frequentie
Periode 22 t/m 29 oktober 2019**

4.1.4 Toetsing SBR B

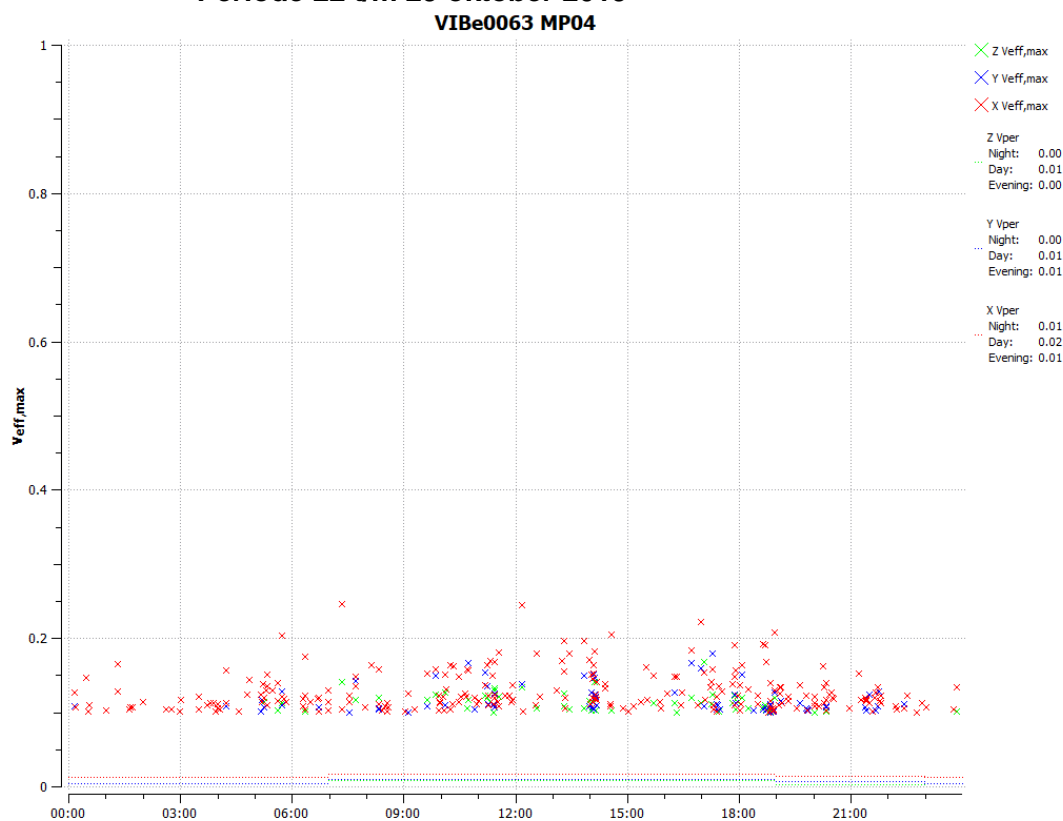
In de bijlagen is van voor de gehele meetperiode grafisch de toetsing op SBR B opgenomen.

Doorgaans wordt de toetsing op hinderbeleving (SBR B) uitgevoerd op meetwaarden van het meetpunt geplaatst op een vloer. In dit geval is, ondanks dat op maaiveld gemeten is, is toch de toetsing op de streefwaarden uitgevoerd (streefwaarde A1).

Als voorbeeld is, van meetpunt 4 (nabij het spoor) in onderstaande figuur grafisch de toetsing op SBR B van de meetresultaten weergegeven.



**Figuur 4-4a Beoordeling conform SBR B, MP 4 naast het spoor
VIB 0063, waarden versus tijd
Periode 22 t/m 29 oktober 2019**

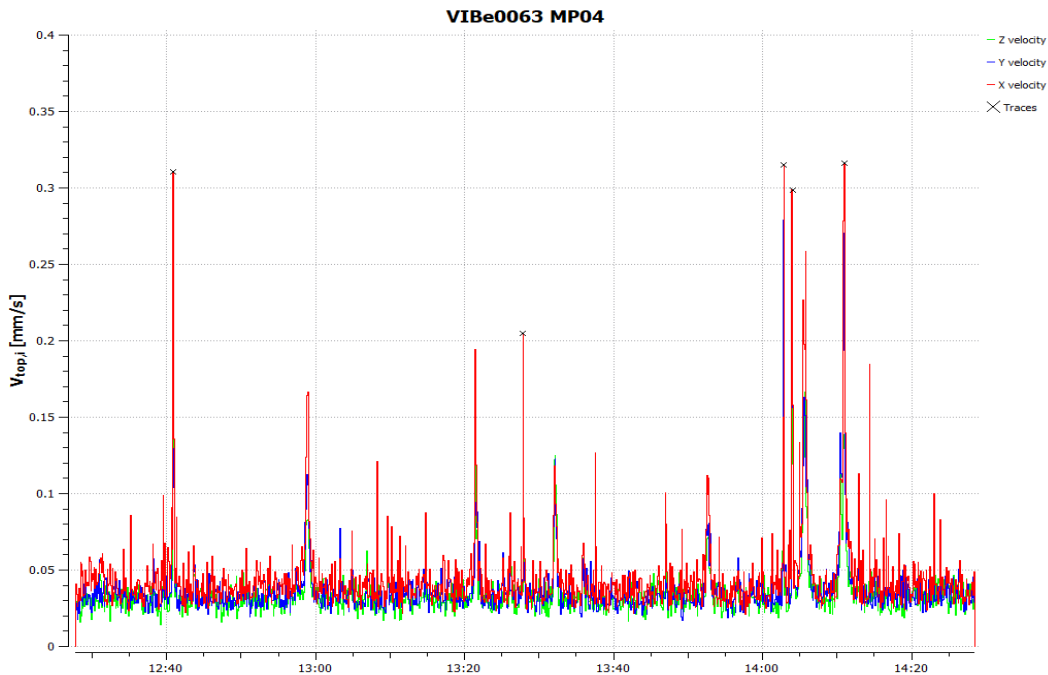


**Figuur 4-4b Beoordeling conform SBR B, MP 4 naast het spoor
VIB 0063, waarden versus tijd van de dag
Periode 22 t/m 29 oktober 2019**

4.1.5 Beoordeling signaal

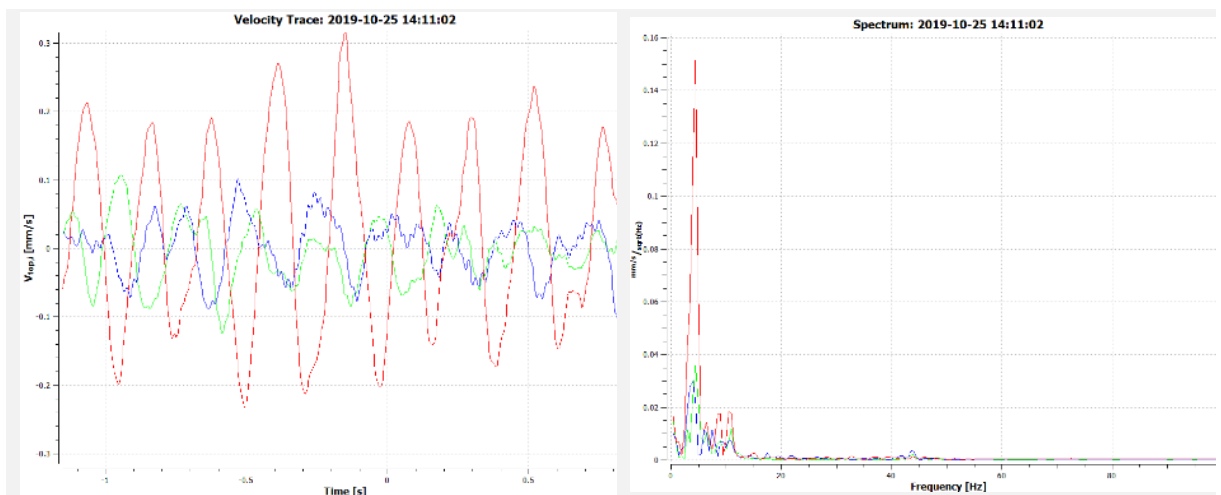
Er zijn onbemande metingen uitgevoerd, waardoor een directe correlatie tussen meetwaarden en trillingsbron (passerend railverkeer (type e.d.)) niet direct gelegd kan worden. De systemen hebben de mogelijkheid om in detail meetwaarden te bekijken. Met een zogenaamde trace van de trilling is het karakteristieke beeld van een trilling (en de bijbehorende frequentie) inzichtelijk te krijgen

Als voorbeeld zijn van meetpunt 4 (naast het spoor) van 25 oktober een tweetal verschillende trace weergaven opgenomen.

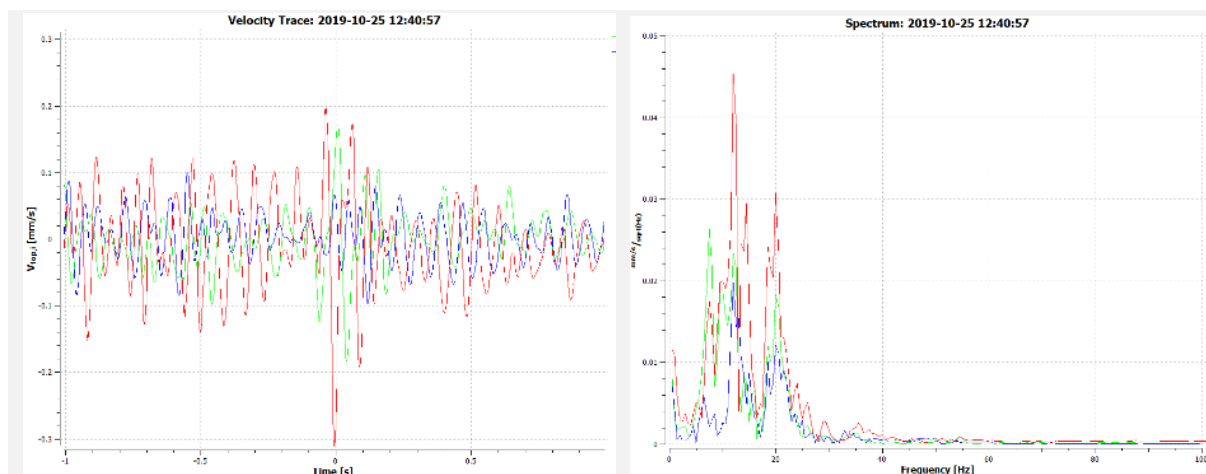


Figuur 4-5: VIB 0063, MP 4, meetwaarden van deel van 25 oktober 2019

In onderstaande figuren is in detail een piekwaarde weergegeven (met bijbehorend FFT beeld). Kenmerkend voor passages van verkeer is een breed frequentie spectrum (FFT).



**Figuur 4-6a: VIB 0063, Trace passage, 25 oktober 2019, 14:11 uur met bijbehorend FFT
Passage van goederen trein??**

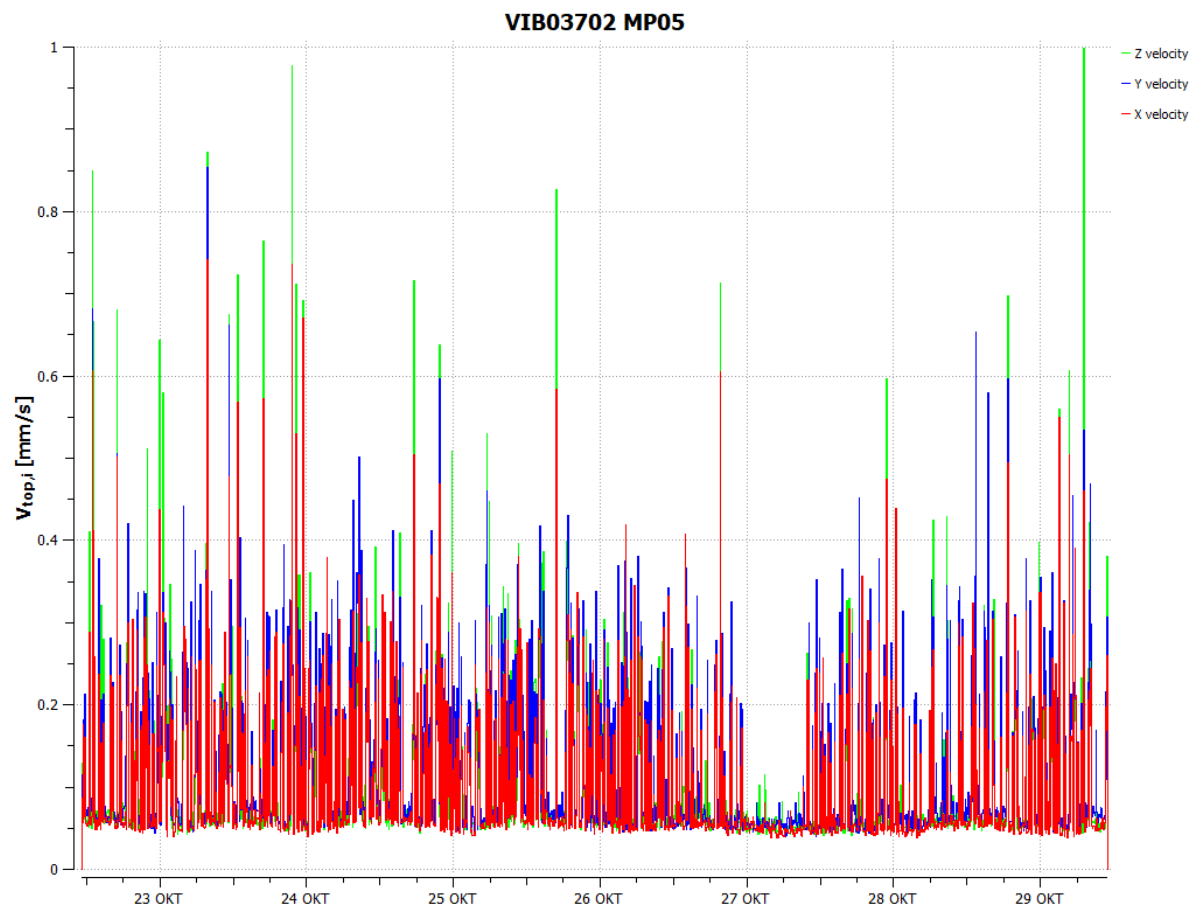


Figuur 4-6b: VIB 0063, Trace passage, 25 oktober 2019, 12:40 uur met bijbehorend FFT Passage van persontrein??

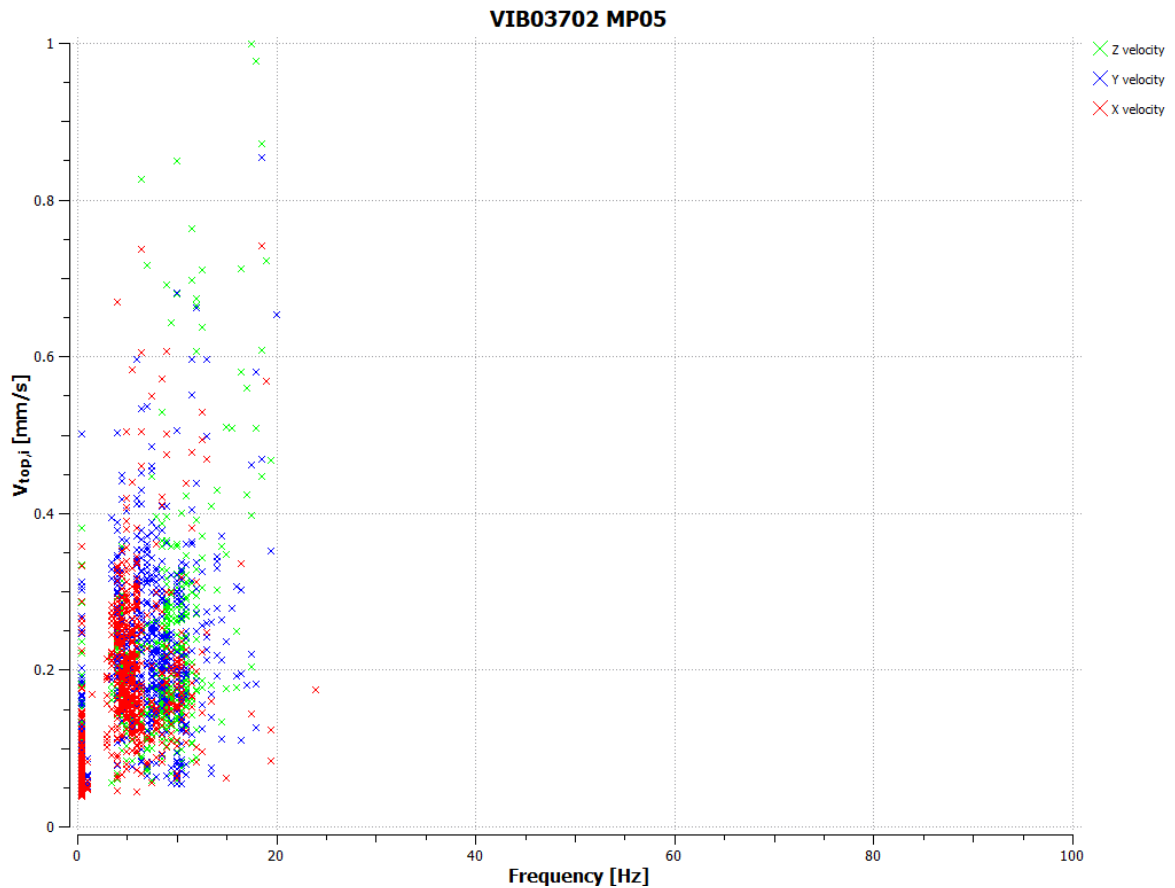
4.2 Meetraai 2 (kleilaag) raai 2

4.2.1 Meetresultaten (grafisch)

Van meetpunt 5 (locatie: nabij het spoor) zijn de meetwaarden van de trillingssnelheden grafisch weergegeven.



Figuur 4-7 Meetraai 2, MP 5 maaveld naast spoor VIB03702, snelheden versus tijd Periode 22 t/m 29 oktober 2019



Figuur 4-8 Meetraai 2, MP5 maaiveld naast spoor VIB03702, snelheden versus frequentie
Periode 22 t/m 29 oktober 2019

4.2.2 Beoordeling meetsignalen en meetwaarden

Beoordeling

Op moment dat bijzonderheden herkend worden / zijn, is daar melding van gemaakt. In het algemeen geldt dat de waarden in de nachtelijke uren niet anders zijn dan in de avond- dagperiode.

Het trillingsbeeld is dusdanig dat er verdeeld over de periode van de dag geen onderscheid in aantal passages zichtbaar is. Met inzoomen in de data is te achterhalen dat gereden wordt op meerdere sporen (= verschillende afstanden). Met verder inzoomen in de data is te zien dat met verschillend materieel gereden wordt, omdat de lengte van de passage varieert.

Met betrekking tot de dominante frequentie van de trillingen veroorzaakt door passerend verkeer geldt dat deze doorgaans laag frequent zijn (rond de 2,5 Hz tot 15 Hz).

Meetwaarden

In onderstaande tabel is een samenvatting van de meetresultaten opgenomen. De waarden zijn grafisch uit de grafieken bepaald.

Tabel 4-2: Samenvatting meetresultaten, meetraai 2 (kleiige ondergrond)

Meetpunt	Sysnr.	1 ^e spoor	2e spoor		1 ^e spoor	2e spoor ¹⁾
		Snelheid [mm/s]	Snelheid [mm/s]	Frequentie [Hz] ²⁾	Effectieve waarde [-]	Effectieve waarde [-]
MP 5	VIB 3702	0,66 – 0,97	0,31 – 0,41	5 (7,5 – 12,5)	0,25 – 0,54	0,15 – 0,19
MP 6	VIB 3719	0,31 – 0,46	0,19 – 0,27	4 (7,5 – 12,5)	0,19 – 0,23	0,12 – 0,15
MP 7	VIB 3701	0,32 – 0,39	0,19 – 0,25	4 (7,5 – 12,5)	0,16 – 0,19	0,09 – 0,12
MP 8	VIB 0492	0,26 – 0,34	0,14 – 0,22	4 (7,5 – 12,5)	0,17 – 0,19	0,09 – 0,12
3) Afstand tussen 1 ^e set en 2 ^e set sporen bedraagt circa 60 m 4) Tussen haakjes vermelde waarden zijn 2 ^e orde waarden						

Bijzonderheden

- In de nachtperiode van zondag 27 oktober 2019 (00:00 – rond 09:00) treden geen verhoogde waarden op (vermoedelijk is het spoor buiten dienst gesteld geweest).

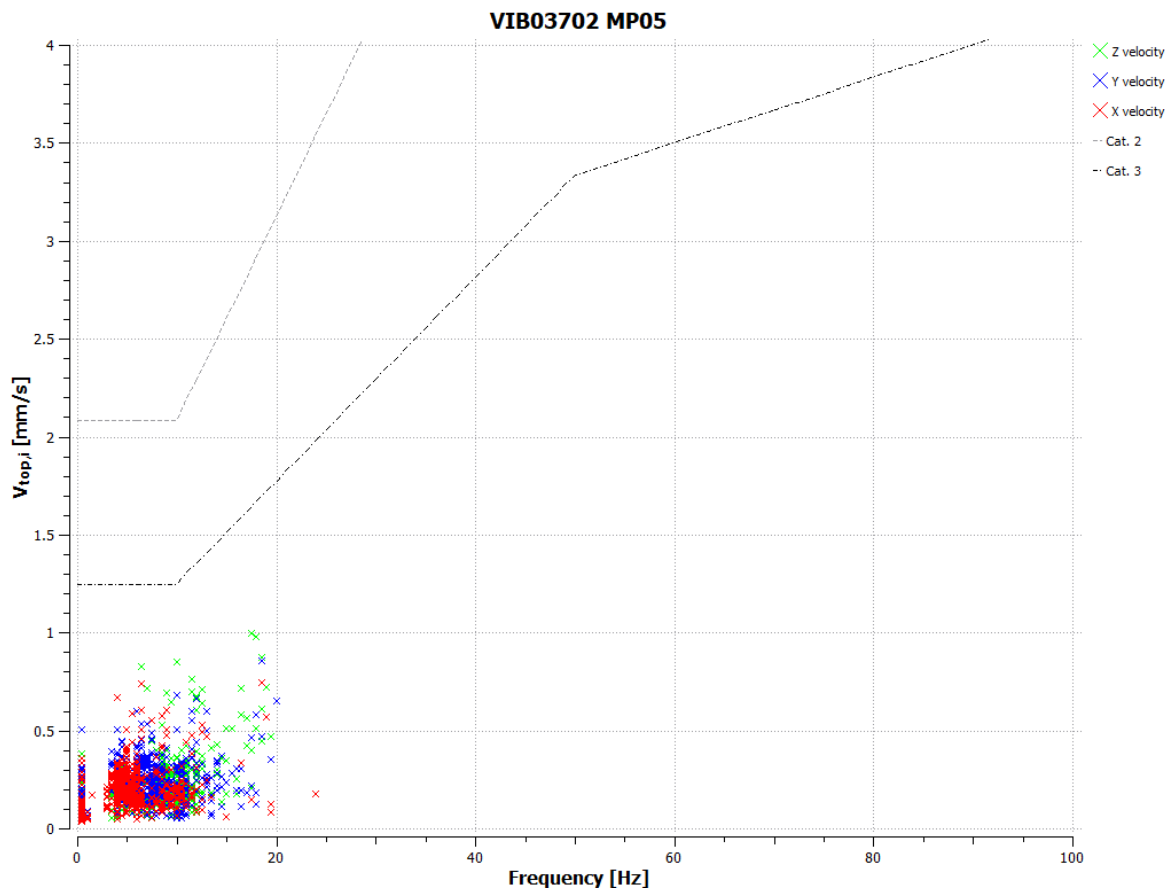
4.2.3 Toetsing SBR A

In de bijlagen is van de totale meetperiode grafisch de toetsing op SBR A opgenomen.

Doorgaans wordt de toetsing op risico op schade (SBR A) uitgevoerd op meetwaarden van het meetpunt geplaatst aan de draagconstructie (gevel) van een object. In dit geval is, ondanks dat op maaiveld gemeten is, toch de toetsing op de grenswaarde uitgevoerd.

Als voorbeeld is, van meetpunt 5 (nabij het spoor) in onderstaande figuur grafisch de toetsing op SBR A van de meetresultaten weergegeven. Zowel de grenswaarde lijn voor categorie 2 als van categorie 3 is opgenomen.

Opgemerkt wordt dat vanaf december 2017 de hernieuwde versie van SBR A richtlijn van toepassing is en dat geen sprake meer is van een categorie 3. Indien sprake is van “bouwkundige gevoelig” object (monumentale status) wordt een partiële factor in rekening gebracht. Daarmee is de grenswaarde lijn vergelijkbaar met een categorie 3 indeling.



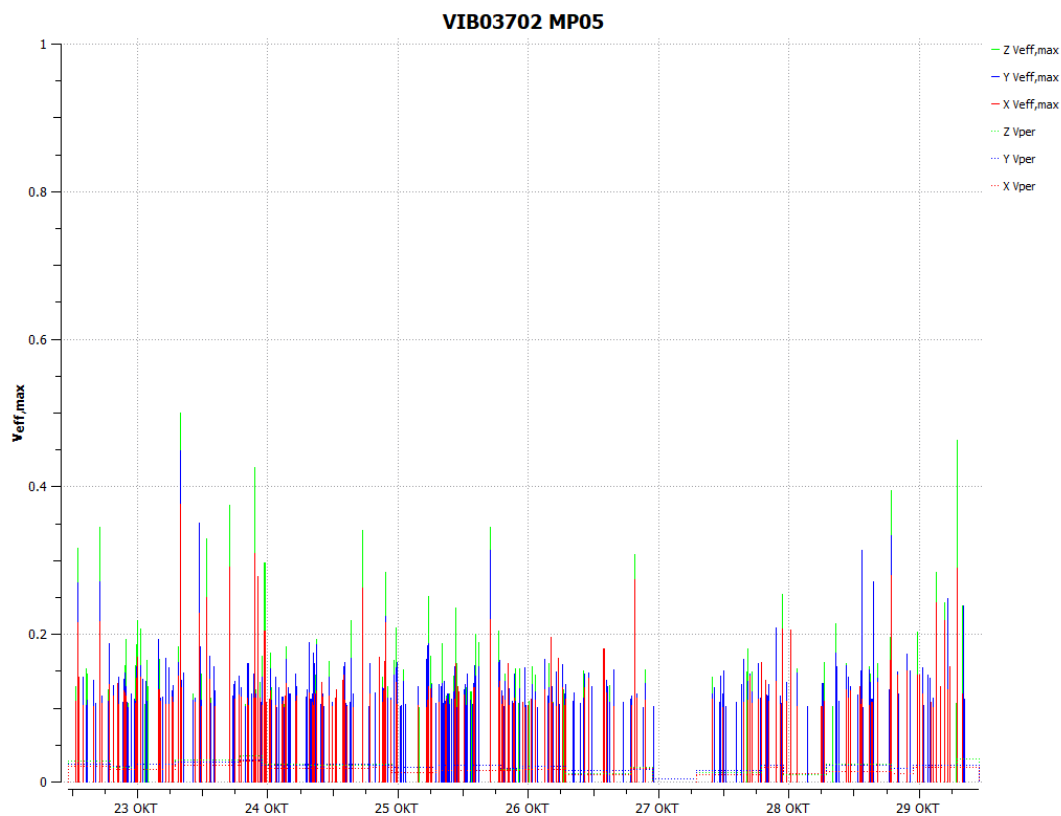
**Figuur 4-8 Beoordeling SBR A, MP 5 naast het spoor
VIB 3702, snelheden versus frequentie
Periode 22 t/m 29 oktober 2019**

4.2.4 Toetsing SBR B

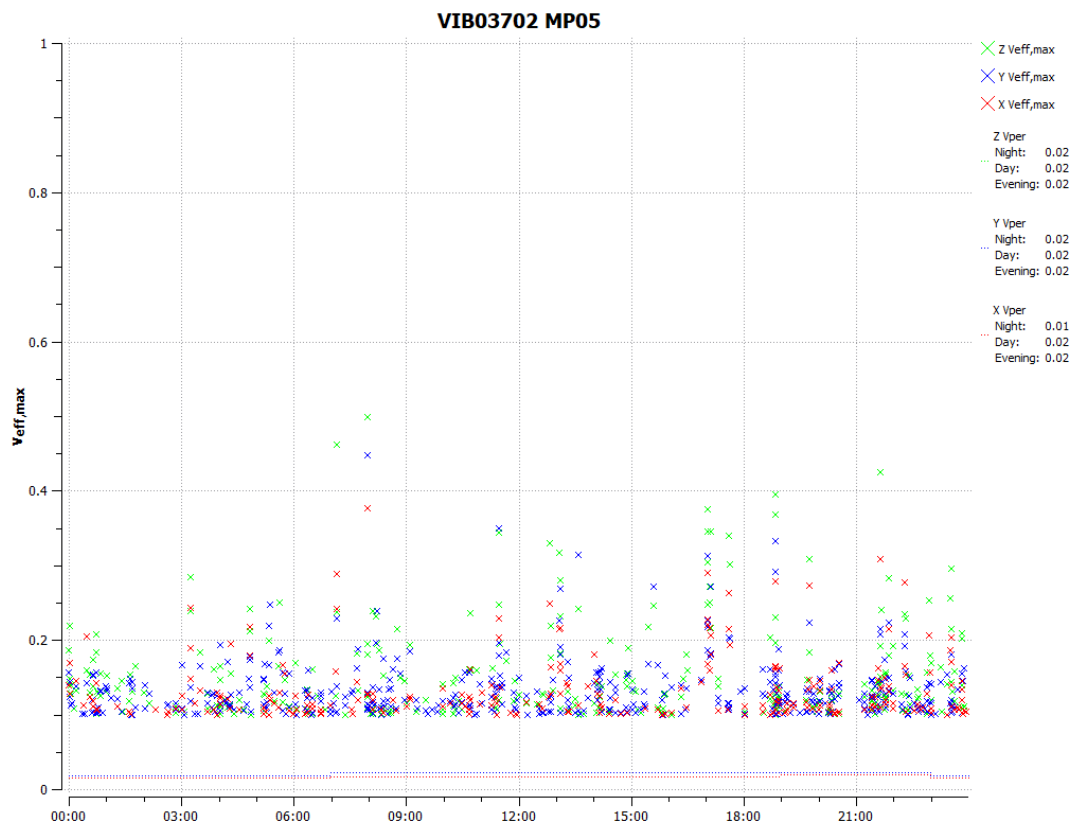
In de bijlagen is van voor de gehele meetperiode grafisch de toetsing op SBR B opgenomen.

Doorgaans wordt de toetsing op hinderbeleving (SBR B) uitgevoerd op meetwaarden van het meetpunt geplaatst op een vloer. In dit geval is, ondanks dat op maaiveld gemeten is, is toch de toetsing op de streefwaarden uitgevoerd (streefwaarde A1).

Als voorbeeld is, van meetpunt 5 (nabij het spoor) in onderstaande figuur grafisch de toetsing op SBR B van de meetresultaten weergegeven.



**Figuur 4-9a Beoordeling conform SBR B, MP 5 naast het spoor
VIB 3702, waarden versus tijd
Periode 22 t/m 29 oktober 2019**

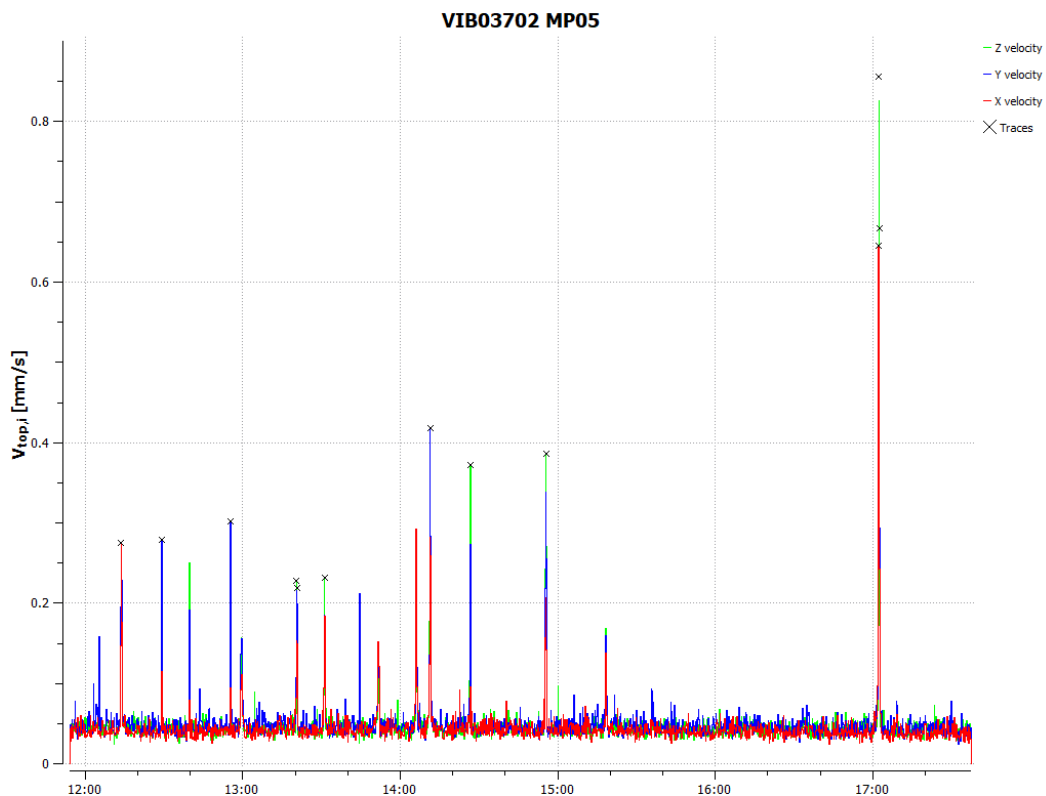


**Figuur 4-9b Beoordeling conform SBR B, MP 5 naast het spoor
VIB 3702, waarden versus tijd van de dag
Periode 22 t/m 29 oktober 2019**

4.2.5 Beoordeling signaal

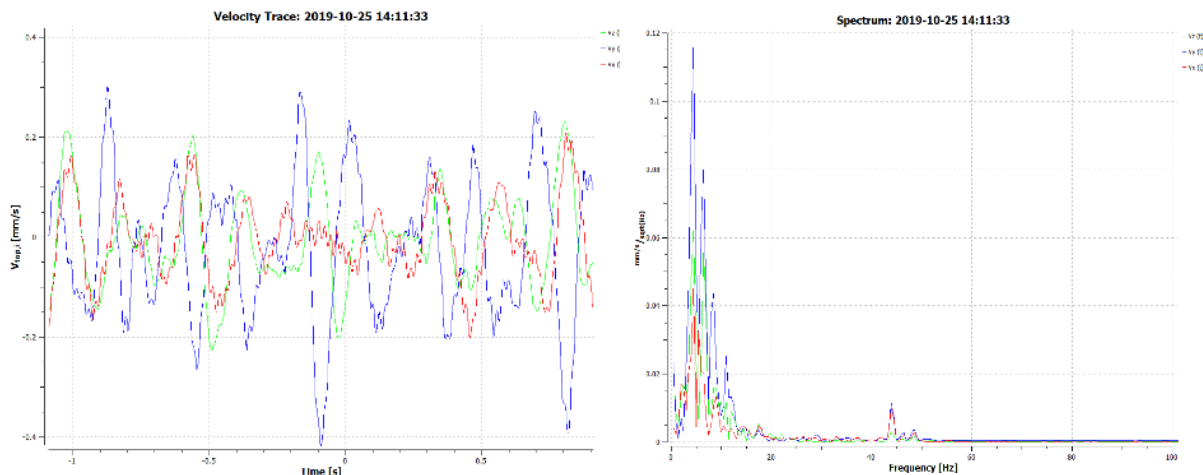
Er zijn onbemande metingen uitgevoerd, waardoor een directe correlatie tussen meetwaarden en trillingsbron (passerend railverkeer (type ed)) niet direct gelegd kan worden. De systemen hebben de mogelijkheid om in detail meetwaarden te bekijken. Met een zogenaamde trace van de trilling is het karakteristieke beeld van een trilling (en de bijbehorende frequentie) inzichtelijk te krijgen

Als voorbeeld zijn van meetpunt 5 (naast het spoor) van 25 oktober een tweetal verschillende trace weergaven opgenomen.

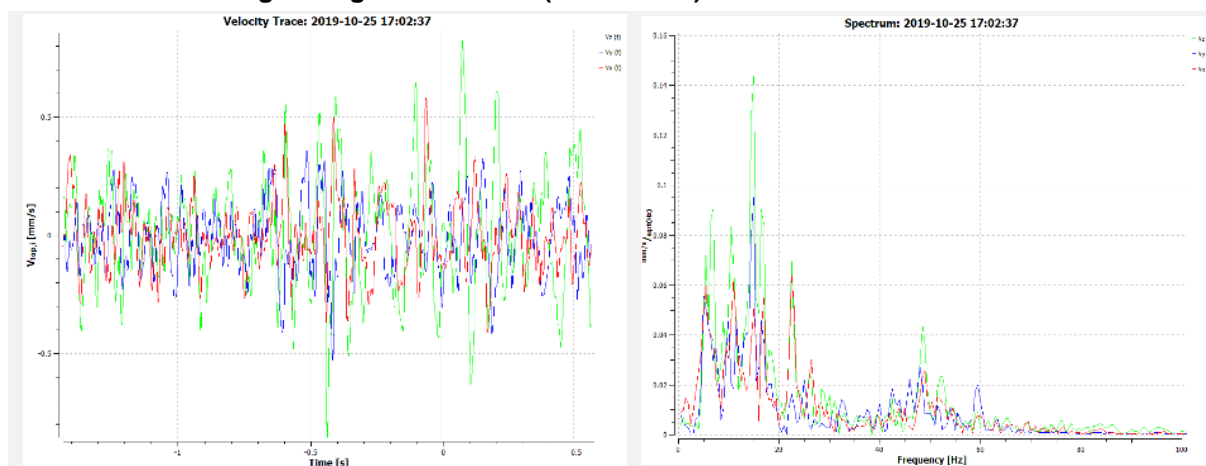


Figuur 4-10: VIB 3702, MP 5, meetwaarden van deel van 25 oktober 2019

In onderstaande figuren is in detail een piekwaarde weergegeven (met bijbehorend FFT beeld). Kenmerkend voor passages van verkeer is een breed frequentie spectrum (FFT).



Figuur 4-11a: VIB 3702, Tracé passage, 25 oktober 2019, 14:11:33 uur met bijbehorend FFT
Passage van goederen trein (vermoeden)



Figuur 4-12b: VIB 3702, Tracé passage, 25 oktober 2019, 17:02:37 uur met bijbehorend FFT
Passage van personentrein (vermoeden)

4.3 Conclusie meetresultaten

Ondanks dat niet aan de draagconstructie of op vloeren is gemeten, er is op maaiveld naast het spoor gemeten, is de toetsing op risico op schade SBR A en hinderbeleving SBR B toch uitgevoerd.

SBR A, Meetraai 1, zanderige ondergrond en Meetraai 2, kleiige ondergrond

Op basis van de meetresultaten en de beoordeling (en toetsing) van deze aan de grenswaarden conform SBR richtlijn A "Schade aan gebouwen", wordt geconcludeerd dat er als gevolg van de passages van railverkeer geen overschrijdingen van de grenswaarde zijn geweest (geldig voor alle meetpuntlocaties in beide meetraaien). Het risico op schade is aanvaardbaar klein.

SBR B, Meetraai 1, zanderige ondergrond en Meetraai 2, kleiige ondergrond

Op basis van de meetresultaten en de beoordeling (en toetsing) van deze aan de streefwaarden conform SBR richtlijn B "Hinder voor personen", wordt geconcludeerd dat er als gevolg van de passages van railverkeer hinderbeleving sporadisch overschrijdingen van de streefwaarde A1 zijn geweest (geldig voor alle meetpuntlocaties van beide meetraaien). Omdat streefwaarde A2 niet wordt overschreden en

mede gezien het aantal passages, is het niet aannemelijk dat hinderbeleving voor bewoners aanwezig is (streefwaarde A3 wordt niet overschreden).

Opgemerkt wordt dat de meetwaarden bij meetraai 2 (kleiige ondergrond) hoger waren dan die bij meetraai 1 (zanderige ondergrond).

5. ANALYSE MEETRESULTATEN

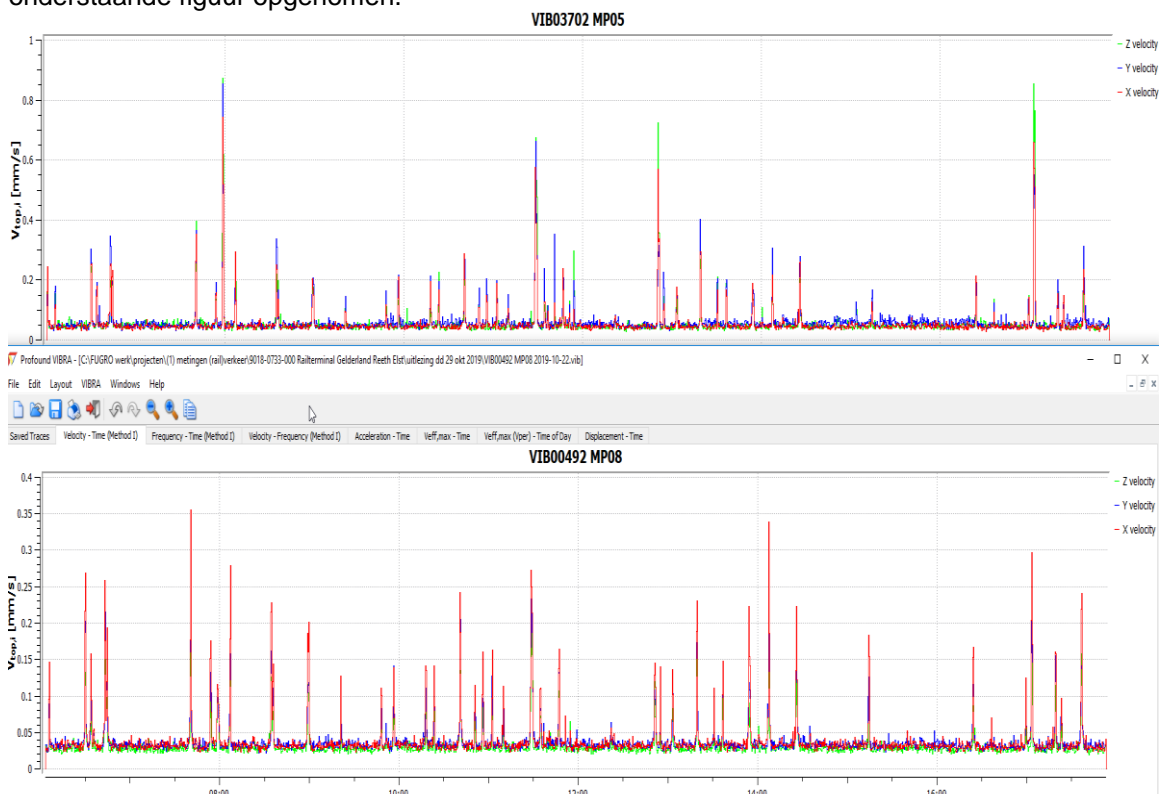
5.1 Meetresultaten

De trillingsmetingen hebben bruikbare meetresultaten opgeleverd. Tijdens de metingen hebben zich geen uitzonderlijke bijzonderheden voorgedaan die een verstoring effect op de metingen zouden kunnen hebben gehad. Opgemerkt wordt dat meetpunt 1 (meetraai 1, zanderige ondergrond naast de weg) ten opzichte van meetpunt 2 (meetraai 1, kortere afstand dan meetpunt 1 tot het spoor) relatief hoge waarden heeft gemeten ondanks dat de afstand groter is tot het spoor.

In hoofdstuk 4 is voor de zanderige ondergrond (meetraai 1) in tabel 4-1 en voor de kleiige ondergrond (meetraai 2) in tabel 4-2 een samenvatting opgenomen van de meetwaarden. Deze waarden zijn aan de hand van de ruwe meetdata grafisch vastgesteld.

Aantal trein passages

Bij de beoordeling op hinderbeleving gaat het aantal passages pas van invloed zijn op moment dat streefwaarde A1 wel maar niet streefwaarde A2 wordt overschreden. Als voorbeeld zijn van meetraai 2 (kleiige ondergrond), in detail (23 oktober 2019 van 08:00 tot 17:00 uur) van meetpunt 5 (maaiveld naast het spoor) en van meetpunt 8 (maaiveld naast de weg) het meetresultaat in onderstaande figuur opgenomen.



**Figuur 5-1: meetraai 2, MP 5 (boven) en MP 8 (onder)
23 oktober 2019, 08:00 tot 17:00**

Te zien is het aantal passages op het dichtbij gelegen spoor (MP 5 hoge pieken) die terug te vinden zijn in het resultaat van MP 8. Door het aantal pieken te tellen volgt het aantal passages. Omdat het onbemande metingen zijn geweest is niet direct de rijrichting aan te geven. Wordt in detail gekeken tussen de doorlooptijden van meetraai 1 en meetraai 2, dan is wel de rijrichting te achterhalen (en eventueel de rij snelheid).

Uit de meetdata volgt dat in de dagperiode circa 6 tot 10 passages per uur opgetreden zijn, in de avond en nachtperiode zijn circa 3 tot 5 passages per uur opgetreden.

Karakteristieken trilling

Per ingestelde sampletijd (in dit geval 3 sec) wordt een maximum snelheidswaarde met bijbehorende frequentie en versnelling opgeslagen. Het meetsysteem is dusdanig geprogrammeerd dat ook per uur circa 9 “traces” worden opgeslagen. Dit zijn signalen van passages waarbij de trilling hoogfrequent gesampled is en volledig is opgeslagen. Het systeem bepaald zelf welk dat signaal zal zijn. Bij de beoordeling van het signaal in hoofdstuk 4 zijn een aantal traces opgenomen.

Gesteld kan worden dat de passage van treinen te vergelijken is met stochastisch herhaalde trilling die geschematiseerd kan worden als een herhaald kortdurende trilling.

5.2 Modelling

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

Model CUR 166

De modellering (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, wordt met lokale omstandigheden rekening gehouden.

Gegeven de grondparameters en eigenschappen van de trillingsbron worden met de methode trillingsintensiteiten (snelheden of versnellingen) versus de afstand bepaald. In CUR 166 zijn overdrachtsfactoren opgenomen voor de prognoses naar waarden “aan de draagconstructie” (toetsing op schade SBR A) en naar prognoses van waarden “op vloeren” (toetsing op hinderbeleving (SBR B)).

Het model is met name opgezet voor analyses van trillingssnelheden [mm/s]. In de grond geschiedt de toetsing / beoordeling doorgaans in de versnellingsfeer [m/s^2]. Bijvoorbeeld bij beoordeling van verdichting van los gepakte zandlagen door trillingen. Met een bijbehorende frequentie (volgt uit de meetdata) is een versnelling af te leiden (integratie van de snelheid).

Prognose benadering verzamelingsverdeling

Het model CUR 166 (6^e druk) is opgezet met een “vereenvoudigde” lognormale verdeling voor de bronwaarde in de grond. Conform een nader geanalyseerde veiligheidsbenadering, dient in de analyse niet uitgegaan te worden van een “vereenvoudigde” benadering maar van een “uitgebreide” lognormale verdeling (dit is zonder verwaarlozing van diverse factoren) [art. geotechniek oktober 2014]. Op basis van praktijkervaringen binnen Fugro met vergelijkbare projecten, is gebleken dat uit vergelijkingen bij projecten waar naast prognose eveneens metingen zijn verricht, dat met het aanhouden van een normale verdeling een betere aansluiting wordt verkregen.

Trillingsbeeld en gehanteerde module

Het karakteristieke beeld van de trilling veroorzaakt door een treinpassage is een stochastisch verdeelde beweging. In vergelijking met het beeld bij een herhaald kortdurende trilling (= heien) of een continue trilling (= trillen damwand), lijkt deze nog het meest op een herhaald kortdurende trilling. De module heien is gehanteerd.

Fitten model op meetdata

De belangrijkste parameters die tot de fit leiden zijn:

- Bronsnelheid op referentie afstand 5 m, module heien
- Variatiecoëfficiënt bronsnelheid
- Dempingsconstante grond
- “Energieniveau”

Omrekenfactor CUR 166, SBR B

Bij beoordeling op hinderbeleving (SBR B) worden op vloeren de trillingsniveaus ($v_{\text{eff,max}}$) getoetst aan streefwaarden (A1, A2 en A3). De streefwaarden zoals deze zijn opgenomen in richtlijn SBR B zijn dimensieloos. Voor de beoordeling van hinder is het praktischer om streefwaarden en trillingsniveaus uit te drukken in de eenheid mm/s. Het handboek CUR166 “Damwandconstructies” bevat een omrekenwijze waarmee de dimensieloze waarden voor trillingen om te rekenen zijn naar mm/s. De karakteristieken van de trillingen veroorzaakt door passerend (tram)verkeer lijkt op een herhaald kortdurende trilling. Hiervoor is in CUR166 (6de druk) tabel 5.23 een factor 0,42 gedefinieerd.

Omreken en overdrachtsfactoren

Bij de overdracht van grond naar draagconstructie treedt doorgaans enige demping op. Bij de overdracht van draagconstructie naar vloeren treedt doorgaans enige opslingering op. In het handboek CUR 166 “Damwandconstructies” zijn overdrachtsfactoren voor grond naar draagconstructie en naar vloeren opgenomen. De volgende overdrachtsfactoren zijn gehanteerd:

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

Opgemerkt wordt dat “variatiecoëfficiënt” een parameter is waarmee de fit uitgevoerd wordt. Er wordt geen statistische bewerking uitgevoerd (hetgeen de term kan suggereren).

5.3 Postdictie

Voor de analyses is per meetpunt een range bepaald. Deze zijn als bolletjes in de “fit grafiek” weergegeven. Omdat de metingen uitgevoerd zijn op maaiveld (=grond) zijn de meetresultaten gefit op de prognoselijn geldig voor grond.

Voor de analyses met betrekking tot een mogelijk invloedsgebied zijn de grens- en streefwaarden uit de SBR A en B richtlijnen van belang. Omdat deze gelden “aan de draagconstructie” en “op vloeren” zijn overdrachtsfactoren toegepast (zoals opgenomen in CUR 166). Bij beoordeling op hinderbeleving dienen de waarden op vloeren (=mm/s) omgerekend te worden naar gewogen effectieve waarden (=dimensieloos). Deze worden dan getoetst aan de streefwaarden uit SBR B. In voorliggend geval is de streefwaarde [-] omgezet in een snelheidswaarde [mm/s].

In onderstaande tabel zijn de bronwaarden waarmee een “best fit” verkregen is, opgenomen.

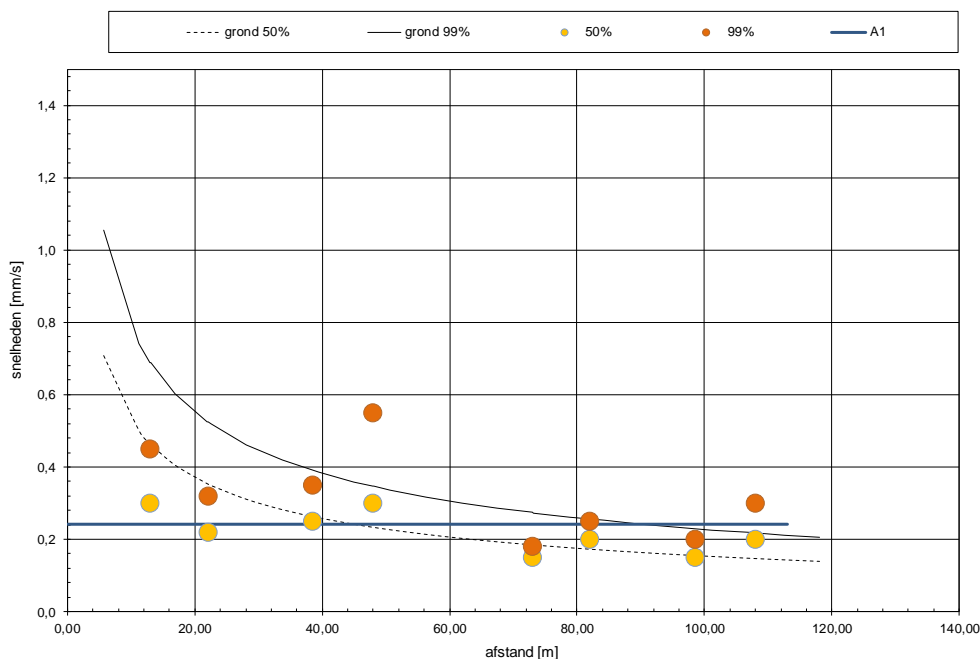
Tabel 5-1: Bronwaarden best fit

Grootheid	Meetraai 1 Zanderige ondergrond MP 1 t/m MP4	Meetraai 2 Kleiige ondergrond MP 5 t/m MP8
Bronwaarde v_{5m} , “heien”	0,025 mm/s	0,030 mm/s
Variatiecoëfficiënt	0,25	0,23
“Energieniveau heiblok”	1 kNm	0,6 kNm
Efficiëntie heiblok	90%	100%
Dempingsconstante	0,001 m ⁻¹	0,003 m ⁻¹

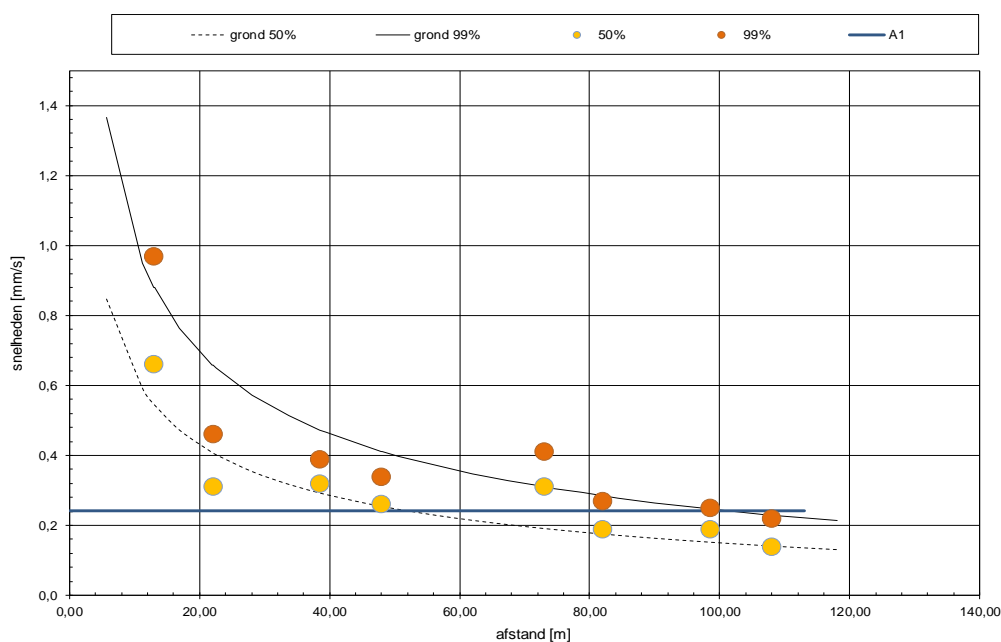
In onderstaande figuren is voor beide meetraaien de “gefittede” prognoselijn versus de afstand uitgezet. In de figuren is eveneens de (omgerekende van vloer naar grond) streefwaarde A1 lijn opgenomen.

Uitleg bij de figuur:

Met bolletjes zijn per meetpunt de range van meetwaarden weergegeven. De doorgetrokken zwarte lijn geldt voor bovengrenswaarden in de grond, de onderbroken prognoselijn voor “gemiddelde”. De horizontale lijn geeft de omgerekende streefwaarde A1 weer. Hierbij zijn de overdrachtsfactoren van grond naar draagconstructie en van draagconstructie naar vloer verwerkt.



Figuur 5-2: Meetraai 1, zanderige ondergrond postdictie



Figuur 5-3: Meetraai 2, kleiige ondergrond postdictie

5.4 Invloedsgebied spoor

Spoortrillingen

De grootte van het invloedsgebied voor schade dan wel hinder volgt uit het snijpunt van de prognose (gefite) lijn met de grens- of streefwaarde. In onderstaande tabel zijn de verwachte invloedsgebiedsgrootte opgenomen.

Tabel 5-2: Invloedsgebieden spoortrillingen

Kader	Grens- / streefwaarde	Meetraai 1 Zanderige ondergrond [m]	Meetraai 2 Kleiige ondergrond [m]
SBR A	2,1 mm/s	< 5 m	< 5 m
SBR B	A1 = 0,1 (0,23 mm/s)	Circa 90 m	Circa 100 m
	A2 = 0,4 (dag en avond (0,93 mm/s) A2 = 0,2 nacht (0,47 mm/s)	< 5 m Circa 27,5 m	< 5 m Circa 35 m
perceptie	0,4 [-] (0,93 mm/s)	< 5 m	< 5 m

Ten aanzien van spoortrillingen wordt het volgende geconcludeerd

- SBR A:
 - Buiten een de zone van circa 5 m wordt geen risico op schade verwacht;
- SBR B:
 - Toets 1: Buiten een de zone van circa 90 tot 100 m wordt geen hinderbeleving verwacht;
 - Toets 2a: Binnen een zone van circa 27,5 m tot 35 is in de nacht hinderbeleving aannemelijk, overdag en in de avond is hinderbeleving niet aannemelijk;
 - Toets 2b: Binnen een zone van 90 tot 100 m, maar buiten een zone van 27,5 m tot 35 m, is de hinderbeleving afhankelijk van het aantal maal dat de trilling zich voordoet (=passages). Op moment dat gedurende de dagperiode (= 12 uur) circa 1,9 passages of meer per zich voordoen mag verwacht worden dat hinderbeleving aannemelijk is. In de avondperiode is hinderbeleving aannemelijk bij circa 0,65 passages in de nacht bij circa 1,3 passages.

Uit de meetdata volgt dat in de dagperiode circa 6 tot 10 trein passages per uur opgetreden zijn, in de avond en nachtperiode zijn circa 3 tot 5 passages per uur opgetreden.

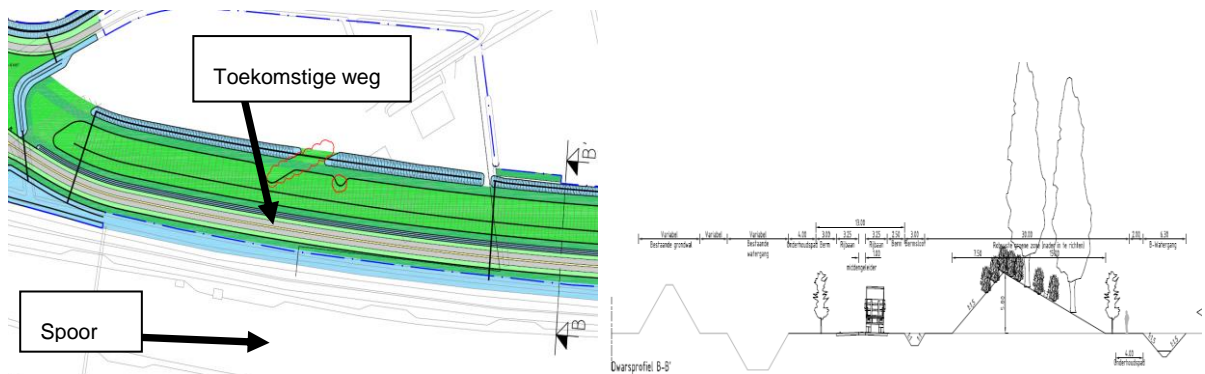
Perceptie hinderbeleving

Opgemerkt wordt dat trillingen, ondanks dat conform SBR B mogelijk geen hinderbeleving aan de orde is, de trillingen toch voelbaar kunnen zijn (perceptie). Met name in combinatie met het veroorzaakte geluid bij passages kunnen de trillingen als “hinderlijk” worden ervaren. Op moment dat “weinig hinder” (tabel 3-3) wordt aangehouden, is het invloedsgebied eveneens circa 10 m.

5.5 Invloed vrachtverkeer toekomstige weg

Aangenomen wordt dat trillingen veroorzaakt door passerend vrachtverkeer ondergeschikt zijn aan de trillingen veroorzaakt door passerend railverkeer. Op basis van praktijkervaringen blijkt dat de dominante frequenties van de trillingen veroorzaakt door passerend vrachtverkeer rond de 5 tot 12,5 Hz liggen. Doorgaans liggen de dominante frequenties van passerend (goederen) railverkeer rond de 7,5 tot 17,5 Hz. Bij beschouwing van de amplitudes zijn de amplitudes bij vrachtverkeer lager dan bij het railverkeer.

De toekomstige weg is op circa 75 m afstand uit het spoor gepland (onderstaande figuur). Opgemerkt wordt dat een aantal huidige opstallen nog aanwezig zijn op de toekomstige locatie van de weg (met name in de bocht bij de aansluiting op het bestaande wegennet).



Figuur 5-4: Ligging toekomstige weg

Momenteel varieert de afstand van de bestaande bebouwing (woningen) tot het spoor tussen circa 200 en 275 m. Omdat de trillingsbron (= vrachtwagens) circa 75 m dichterbij komt, ligt de bebouwing op circa 125 m tot 200 m uit de toekomstige weg, in de bocht op circa 100 m.

De metingen zijn verricht naast het spoor (= trillingsbron). Deze “trillingsbron” verschuift van spoor naar weg en komt dan circa 75 m dichterbij de bebouwing. Omdat verwacht wordt dat buiten een zone van 90 m tot 100 m tot de trillingsbron streefwaarde A1 (SBR B) niet wordt overschreden en de bebouwing op grotere afstand staat (circa 125 m tot 200 m), wordt geen hinderbeleving bij de bebouwing verwacht door passerend vrachtverkeer.

5.6 Trillingsreducerende maatregelen

Omdat de toekomstige afstand tussen de weg (vrachtauto's) en de bestaande bebouwing groter is dan het invloedsgebied (streefwaarde A1), wordt niet verwacht dat hinderbeleving door passages van vrachtauto's aannemelijk is. Het risico op schade door trillingen als gevolg van passages van vrachtauto's is aanvaardbaar klein. Gezien voorstaande worden trillingsreducerende maatregelen op voorhand niet voorzien.

Mocht toch gesteld worden dat absoluut geen risico op hinderbeleving aanwezig mag zijn, dan kunnen door het toepassen van trillingsreducerende maatregelen de trillingsintensiteiten worden gereduceerd. Dergelijke maatregelen kunnen aan de bron, in het medium (grond) of bij de ontvanger (woning) toegepast worden. Voor trillingen veroorzaakt door passages van wegverkeer gelden in algemeen zin de in onderstaande tabel opgenomen maatregelen. Bij het spoor zijn specifieke maatregelen te nemen, hier niet van toepassing. In de tabel is, beschouwend, eveneens aangegeven welke (en hoe) de maatregel eventueel toepasbaar zou kunnen worden.

Tabel 5-3: Overzicht mogelijke trillingsreducerende maatregelen

	Maatregel	Toepasbaar?	Wijze
	Bij de Bron (vrachtverkeer)		
B1	Snelheidsreductie	Nee	
B2	Verlaging verkeersintensiteit	Nee	
	Bij het Medium		
M1	Afstand vergroten	Ja	Weg verplaatsen
M2	Aanpassen wegconstructie (vlak maken, funderingsdikte vergroten)	(Nee)	Asfalt, menggranulaat
M3	Aanbrengen trillingsscherm	Ja	Naast de weg (of naast woning)
	Bij de Ontvanger		
O1	Aanpassen fundering	Nee	Gebouw op dempers
O2	Aanpassen woningskelet	Nee	Stijver maken van vloeren en wanden

Resume maatregelen

Maatregelen aan de bron (wegverkeer en wegconstructie) zijn in deze een optie. Maatregelen bij de ontvanger behoren weliswaar tot de mogelijkheden, maar zijn erg duur (verwachting) en vergen tijdens de uitvoering een nauwlettende directie die erop toeziet dat e.e.a. uitgevoerd wordt zoals gepland, maar hiervoor zullen de eigenaren geen toestemming verlenen (aannee). Verwacht wordt dat met het plaatsen van schermen in de grond direct naast de weg de grootste kans van slagen heeft. Gedacht kan worden aan een Polystyreen scherm van enige afmetingen die als verloren bekisting opgenomen kan worden.

Voor het dimensioneren van reducerende maatregelen (bij de weg en in de grond) wordt geadviseerd aanvullende trillingsmetingen uit te laten voeren. In deze kan niet volstaan worden met het hanteren van de standalone systemen zoals deze in voorliggende meting zijn gehanteerd, maar dient een systeem gehanteerd te worden, waarmee bemand wordt gemeten met versnellingsopnemers en waarbij de verscheidene meetpunten onderling aan elkaar gecorreleerd zijn (5 tot 10 meetpunten, XYZ). Fugro kan deze aanvullende metingen verzorgen.

6. CONCLUSIES

In opdracht van provincie Gelderland, afdeling Uitvoering Werken, te Arnhem heeft Fugro NL Land B.V. te Leidschendam een trillingsonderzoek uitgevoerd voor het project "Rail Terminal gelderland, risicoanalyses transporten" te Reeth (Elst). Het onderzoek is tweeledig. In 2 meetraaien zijn langs het spoor trillingsmetingen uitgevoerd. Op basis van de meetdata zijn analyses uitgevoerd ten aanzien van trillingsinvloedsgebieden (voor rail en wegverkeer) voor risico op schade dan wel hinder conform de SBR richtlijnen A en B.

Situatie

Te Reeth (Elst) is naast het spoor (de Betuweroute) een overslag terminal RTG gepland, waarbij goederen overgeslagen gaan worden van railvervoer naar wegvervoer. Ter aansluiting van de RTG terminal is een weg direct naast het spoor gepland die uiteindelijk aan gaat sluiten op de lokale weg Rijksweg Zuid. Mede door het passerende vrachtverkeer ontstaan trillingen in de ondergrond die mogelijk een risico op schade (SBR A-richtlijn) geven dan wel tot hinderbeleving voor bewoners (SBR B-richtlijn) leiden.

Momenteel ligt het spoor circa 200 m tot 255 m uit de bestaande bebouwing. Op termijn zal de toekomstige weg circa 75 m uit het spoor aangebracht worden, dit is circa 125 m tot 175 m tot de bestaande bebouwing. In de bocht bij de aansluiting op het bestaande wegennet bedraagt de afstand tussen de weg en de bebouwing circa 100 m. Opgemerkt wordt dat een aantal huidige opstallen nog aanwezig zijn op de toekomstige locatie van de weg (met name in de bocht bij de aansluiting op het bestaande wegennet).

Trillingsmetingen

In de periode 22 t/m 29 oktober 2019 zijn in 2 raaien haaks op het spoor trillingsmetingen uitgevoerd. Per meetraai is gemeten in 4 meetpunten geplaatst op maaiveld (niet aan de draagconstructie c.q. op vloeren). Er is sprake van 24-uurs metingen waarbij geen save-level is toegepast (alle meetwaarden gedurende 24 uur zijn opgeslagen, niet enkel waarden boven het save-level). Met een vertaalslag zijn de meetwaarden veroorzaakt door passerend railverkeer vertaald naar mogelijke waarden veroorzaakt door wegverkeer.

Toetsingskader

Van toepassing zijn richtlijn SBR A 2017 "Schade aan bouwwerken" en richtlijn SBR B "Hinder voor personen". Ten aanzien van risico op schade geldt voor een object ingedeeld in categorie 2 en nietbouwkundig gevoelig, een grenswaarde van 2,1 mm/s (frequentie 10 Hz). Ten aanzien van hinderbeleving geldt voor een nieuwe situatie en de functie wonen een streefwaarde $A1 = 0,1 [-]$ (inclusief omrekenfactor uit CUR166 $A1 = 0,23$ mm/s).

Ten aanzien van hinderbeleving wordt opgemerkt dat indien de waarden getoetst worden aan streefwaarde A1 (toets 1) en daaraan wordt voldaan een vervolg toetsing op streefwaarde A2 en A3 niet nodig is (toets 2a en 2b).

Analyses / postdictie

De prognosemethodiek voor trillingen zoals deze is opgenomen in het handboek CUR 166 "Damwandconstructies" is gehanteerd. Met de methodiek zijn prognoses van trillingsintensiteiten in de

grond / aan de draagconstructie en / of op vloeren versus de afstand te maken. De methode hanteert 2 verschillende modules, heien van palen of trillen van damwanden. Omdat de karakteristieken van een trilling veroorzaakt door een passage van een trein (of vrachtauto) het beste te vergelijken is met een herhaald kortdurende trilling, is de module heien gehanteerd.

Conform de richtlijnen gelden de grens- en streefwaarden voor meetresultaten uitgevoerd aan de draagconstructie c.q. op vloeren. Omdat gemeten is op maaiveld, zijn overdrachtsfactoren conform het handboek CUR 166 toegepast. Daarmee kunnen de gemeten waarden omgerekend worden naar waarden aan de draagconstructie c.q. op vloeren. Omgekeerd, deze factoren zijn gehanteerd om de grens- en streefwaarden om te rekenen naar toetswaarden "in de grond".

De meetdata is geanalyseerd, waarbij per meetpunt (XYZ) grafisch een range van waarden is afgeleid. Bij een kleiige ondergrond zijn iets hogere waarden gemeten dan bij een zanderige ondergrond (circa 25% hoger). De waarden zijn vervolgens versus de afstand uitgezet en "gefit" op prognoselijnen (postdictie). Door in de prognoses ook de omgerekende grens- en streefwaarden op te nemen, zijn zones af te leiden waarbinnen overschrijdingen te verwachten zijn (snijpunt van de omgerekende grens- c.q. streefwaarde lijn met de prognoselijnen).

Invloedsgebieden / analyses

Verwacht mag worden dat binnen dit gebied een overschrijding van de grens- c.q. streefwaarde kan optreden. In onderstaande tabel zijn voor trillingen veroorzaakt door passerend railverkeer invloedsgebiedsgroottes opgenomen.

Tabel 6-1: Invloedsgebiedsgrootte spoortrillingen

Kader	Grens- / streefwaarde	Meetraai 1 Zanderige ondergrond MP1 t/m MP 4 [m]	Meetraai 2 Kleiige ondergrond MP 5 t/m MP 8 [m]
SBR A	2,1 mm/s	< 5 m	< 5 m
SBR B	A1 = 0,1 (0,23 mm/s)	Circa 90 m	Circa 100 m
	A2 = 0,4 (dag en avond (0,93 mm/s) A2 = 0,2 nacht (0,47 mm/s)	< 5 m Circa 27,5 m	< 5 m Circa 35 m
perceptie	0,4 [-] (0,93 mm/s)	< 5 m	< 5 m

Conclusies postdictie analyses

Gezien de zwaarte van het vrachtverkeer (aanstoot ondergrond e.d.) en de rijnsnelheid ervan is aangenomen dat trillingen veroorzaakt door passerend vrachtverkeer ondergeschikt zijn aan de trillingen veroorzaakt door passerend railverkeer. Ten aanzien van spoortrillingen (en daarmee ook vrachtwagen trillingen) wordt het volgende geconcludeerd

- SBR A
 - Buiten een de zone van circa 5 m wordt geen risico op schade verwacht;
- SBR B
 - Toets 1: Buiten een de zone van circa 90 tot 100 m wordt geen hinderbeleving verwacht;
 - Toets 2a: Binnen een zone van circa 27,5 m tot 35 is in de nacht hinderbeleving aannemelijk, overdag en in de avond is hinderbeleving niet aannemelijk;
 - Toets 2b: Binnen een zone van 90 tot 100 m, maar buiten een zone van 27,5 m tot 35 m, is de hinderbeleving afhankelijk van het aantal maal dat de trilling zich voordoet (=passages).

Op moment dat gedurende de dagperiode (= 12 uur) circa 1,9 passages of meer per zich voordoen mag verwacht worden dat hinderbeleving aannemelijk is. In de avondperiode is hinderbeleving aannemelijk bij circa 0,65 passages, in de nacht bij circa 1,3 passages.

Uit de meetdata volgt dat in de dagperiode circa 6 tot 10 trein passages per uur opgetreden zijn, in de avond en nachtperiode zijn circa 3 tot 5 passages per uur opgetreden.

Opgemerkt wordt dat trillingen, ondanks dat conform SBR B mogelijk geen hinderbeleving aan de orde is, de trillingen toch voelbaar kunnen zijn (perceptie). Met name in combinatie met het veroorzaakte geluid bij passages kunnen de trillingen als “hinderlijk” worden ervaren.

Eindconclusie ten aanzien van toekomstig vrachtwagen transporten

Omdat, nadat de toekomstige weg aangelegd is, de afstand tot de weg en de bestaande bebouwing groter is dan circa 100 m, wordt geconcludeerd dat hinderbeleving niet aannemelijk zal zijn. Het risico op schade door trillingen is in alle gevallen aanvaardbaar klein.

Trillingsreducerende maatregelen

Ondanks dat geen hinderbeleving c.q. risico op schade verwacht wordt, kan het zo zijn dat door perceptie toch gesteld gaat worden dat absoluut geen risico op hinderbeleving aanwezig mag zijn. Dan kunnen door het toepassen van trillingsreducerende maatregelen de trillingsintensiteiten worden gereduceerd. Maatregelen kunnen aan de bron, in het medium (grond) of bij de ontvanger (woning) toegepast worden. Verwacht wordt dat de grootste kans van slagen gehaald wordt met maatregelen aan de bron (wegconstructie) c.q. in de grond (trillingscherm).

Voor het dimensioneren van reducerende maatregelen (bij de weg en in de grond) wordt geadviseerd aanvullende trillingsmetingen uit te laten voeren. In deze kan niet volstaan worden met het hanteren van de standalone systemen zoals deze in voorliggende metingen zijn gehanteerd, maar dient een systeem gehanteerd te worden, waarmee bemand wordt gemeten met versnellingsopnemers en waarbij de verscheidene meetpunten onderling aan elkaar gecorreleerd zijn (5 tot 10 meetpunten, XYZ).

Als input voor deze analyses (maatregelen aan de weg / trillingscherm) is een versnellingen versus tijd signaal van een gehele passage benodigd. Het versnellingen signaal dient alle wielpassages van de vrachtauto (of trein) te bevatten. Met bijvoorbeeld het eindige elementen programma PLAXIS is een trillingsscherm te dimensioneren. De locatie en de afmetingen van het trillingenscherm zijn dan nader te bepalen. Trillingsmetingen waarbij een gefoon wordt gebruikt, is niet afdoende omdat geen volledige passage “gepakt” wordt. In dit geval wordt geadviseerd 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. TOELICHTING MODELLERING TRILLINGEN

Modellering conform CUR 166

De modellering 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 lognormale verdeling. Op basis van praktijkervaringen, waarbij prognoses met metingen vergeleken zijn, is gebleken dat prognose waarden, waarbij een lognormale 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:

$$V_{0,(x=5m)} = u_0 \cdot \sqrt{\psi * E}$$

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:

$$v(x) = v_0 \sqrt{\frac{x_0}{x}} e^{-a(x-x_0)}$$

waarin:

- $v(x)$ = trillingssnelheid op afstand x van de bron [mm/s];
 v_0 = bronsterkte van de trillingsintensiteit op 5 m afstand van de bron [mm/s];
 x_0 = 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:

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

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:

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

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 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 [-]

B. TOELICHTING SBR – TOETSINGSKADER

Toetsingskader

Trillingsintensiteiten worden getoetst aan de grens- en / of streef- en / of toetswaarden uit de SBR richtlijnen uit september 2006 / december 2017, uitgegeven door Stichting Bouw Research, Rotterdam. De Raad van State erkent de richtlijnen als uitgangspunt voor jurisprudentie.

In totaal zijn er 3 SBR - richtlijnen, namelijk

- Richtlijn A (2017): 'Schade aan bouwwerken';
- Richtlijn B (2006): 'Hinder voor personen in gebouwen';
- Richtlijn C (2006): 'Storing aan apparatuur'.

In algemene zin geldt dat afhankelijk van de constructieve staat, funderingswijze en ouderdom van de bebouwing, functies van ruimten, karakteristieken van de trillingsgevoelige apparatuur en de afstand tot de werkzaamheden, de mogelijkheid bestaat dat de trillingen kunnen leiden tot:

- schade aan de draagconstructie van omliggende gebouwen;
- hinder voor personen in gebouwen;
- storing aan trillingsgevoelige apparatuur;
- zettingsschade door verdichting van los gepakt zand.

Grenswaarden conform SBR richtlijn A

De hoogte van de toelaatbare grenswaarden waarbij volgens de SBR richtlijn A de kans op schade aanvaardbaar klein is (minder dan 1%), is afhankelijk van:

- type trillingsbron;
- constructiewijze van de gebouwen;
- funderingswijze van de gebouwen.

Type trillingsbron

In SBR richtlijn A wordt onderscheid gemaakt in trillingsbronnen, die incidenteel voorkomende kortdurende trillingen veroorzaken, herhaald kortdurende trillingen veroorzaken of continue trillingen veroorzaken.

Het heien van palen (of passages van verkeer) wordt beschouwd als een trillingsbron die herhaald kortdurend trillingen veroorzaakt, waarbij resonanties en/of vermoeiingseffecten in onderdelen van een bouwwerk kunnen optreden. In dit geval dient een partiële veiligheidsfactor γ_t van 1,5 over de karakteristieke waarde V_{kar} van de grenswaarde te worden toegepast.

Het in- en uittrillen van damwandplanken wordt beschouwd als een trillingsbron die continue trillingen veroorzaakt, waarbij resonanties en/of vermoeiingseffecten in onderdelen van een bouwwerk kunnen optreden. In dit geval dient een partiële veiligheidsfactor γ_t van 2,5 over de karakteristieke waarde V_{kar} van de grenswaarde te worden toegepast.

Constructiewijze van gebouwen (categorie indeling)

In SBR richtlijn A wordt onderscheid gemaakt in de constructiewijze en in de staat van het bouwwerk. De onderstaande indeling in categorieën van bouwwerken en van onderdelen daarvan wordt aangehouden:

- categorie 1: in goede staat verkerende onderdelen van de draagconstructie van een gebouw, indien deze bestaan uit gewapend beton of hout;
- categorie 2: in goede staat verkerende onderdelen van de draagconstructie van een gebouw, indien deze bestaan uit metselwerk of uit brosse steenachtige materialen.

Opmerking t.a.v. categorie indeling, composiet

Indien de bebouwing een draagconstructie bestaande uit beton bevat waar tegenaan metselwerk is geplaatst, zou conform SBR A het object ingedeeld kunnen worden in categorie 1. Echter omdat metselwerk aanwezig is, zou het object toch in categorie 2 ingedeeld moeten worden. In werkelijkheid is sprake van een categorie ergens tussen beide categorieën in (categorie 1,5), waardoor een aangepaste grenswaarde van toepassing is. Het indelen in een tussenliggende categorie kan alleen geschieden in overleg met / toestemming van Bevoegd Gezag.

In de voorgaande versie uit 2006 van SBR A is sprake van een categorie 3 zijnde een object bestaande uit metselwerk in slechte staat of een object met een monumentale status (cultuurtechnische waarde). Afhankelijk van de bouwkundige staat c.q. monumentale status wordt in SBR A 20017 een partiële factor hiervoor in rekening gebracht.

Funderingswijze

Onderscheid wordt gemaakt in trillingsgevoelige en niet-trillingsgevoelige funderingen. Funderingen op staal worden over het algemeen als trillingsgevoelig aangemerkt waarbij rekening dient te worden gehouden met schade door (ongelijkmatige) zettingen.

Rekenwaarde van de grenswaarde

De rekenwaarde van de grenswaarde wordt bepaald volgens onderstaande relatie:

$$V_r = \frac{V_{kar}}{\gamma_t * \gamma_s}$$

waarin:

- V_r = rekenwaarde van de grenswaarde [mm/s];
 V_{kar} = karakteristieke waarde van de grenswaarde [mm/s];
 γ_t = partiële veiligheidsfactor soort meting [-].
 γ_s = partiële veiligheidsfactor bouwkundige staat / monumentale status [-].

Veiligheidsfactoren type bron en bouwkundige staat

Voor de afleiding van de grenswaarde zijn de in onderstaande tabel vermelde factoren van toepassing. Opgemerkt wordt dat door middel van partiële factoren een gevoelige bouwkundige staat / monumentale status in rekening gebracht wordt (voorheen categorie 3).

Tabel B.1: Veiligheidsfactoren ter bepaling van de grenswaarde

Type trillingsbron		funderingstype	
		Op palen	Op staal
Type trillingsbron	Herhaald kortdurend	1,5	1,6
Type trillingsbron	continue	2,5	2,0
Bouwkundige staat en / of monumentale status ¹⁾	Normaal	1,0	1,0
Bouwkundige staat en / of monumentale status ¹⁾	Gevoelig	1,7	1,7
Verdichtingsgevoelige ondergrond	$V_{kar} = 10 C_d$	nvt	1,0 tot 2,0 ²⁾

¹ in geval van EN een monumentale status EN in "gevoelige staat", wordt 1x de factor gehanteerd (niet 1,7 *1,7)
²afhankelijk van dikte laag

Partiele factor soort meting

SBR Richtlijn A maakt onderscheid tussen een indicatieve, een beperkte en een uitgebreide meting. Afhankelijk van de soort meting dient de meetwaarde vermenigvuldigd te worden met een partiële veiligheidsfactor volgens onderstaande tabel:

Tabel B.2: Partiele factoren, soort meting

Soort meting	Factor	Omschrijving meting
Indicatief	1,6	1 meetpunt (x, y, z) aan draagconstructie
Beperkt	1,4	2 meetpunten (x,y,z en x, y) aan draagconstructie en circa 10 m boven mp aan draagconstructie
Uitgebreid	1,0	Meerdere meetpunten in stijve punten van constructie

Conform SBR richtlijn A dienen de meetresultaten vermenigvuldigd te worden met de factor voor de type meting. Om praktische redenen wordt in de praktijk bij het programmeren van de meters (in dit geval niet van toepassing), de grenswaarde gedeeld door deze factor, omdat de meetwaarden op voorhand immers nog niet bekend zijn.

Dominante frequentie

Voor de toe te passen rekenwaarde van de grenswaarde is de dominante frequentie van de trilling een maatgevende factor. Op basis van meetwaarden (praktijkervaring) gelden:

- heien van prefab betonpalen 10 Hz tot 15 Hz
- heien van vibro palen 20 Hz tot 25 Hz
- inwendig geheide buispalen 5 Hz tot 15 Hz
- hoog frequent trillen van damwandplanken 30 tot 40 Hz
- laag frequent trillen van damwandplanken 20 tot 25 Hz
- sloopwerkzaamheden (snelslaghamer) 20 Hz tot 25 Hz.
- Passages van verkeer 5 Hz tot 15 Hz;
- Passages van railverkeer 10 Hz tot 20 Hz

Grenswaarde SBR A

In onderstaande tabellen zijn, voor objecten gefundeerd op palen, de rekenwaarden van de grenswaarden opgenomen.

Tabel B.3A: Grenswaarden [mm/s], object gefundeerd op palen, bouwkundig ongevoelig

Dominante frequentie	Karakteristieke waarden		Partiële veiligheidsfactor			Rekenwaarde grenswaarde trillingssnelheid ²⁾	
	Cat. 1	Cat. 2	TB ¹⁾	BS ¹⁾	TM ¹⁾	Cat. 1	Cat. 2
Freq.	[mm/s]	[mm/s]	[-]	[-]	[-]	[mm/s]	[mm/s]
10	20,0	5,0	1,5	1,0	1,0 / 1,6	13,3 / 8,3	3,3 / 2,1
15	22,5	6,3	1,5	1,0	1,0 / 1,6	15,0 / 9,4	4,2 / 2,6
20	25,0	7,5	1,5	1,0	1,0 / 1,6	16,7 / 10,4	5,0 / 3,1
25	27,5	8,8	1,5	1,0	1,0 / 1,6	18,3 / 11,5	5,8 / 3,6
30	30,0	10,0	2,5	1,0	1,0 / 1,6	12,0 / 7,5	4,0 / 2,5
35	32,5	11,3	2,5	1,0	1,0 / 1,6	13,0 / 8,1	4,5 / 2,8
40	35,0	12,5	2,5	1,0	1,0 / 1,6	14,0 / 8,8	5,0 / 3,1

¹ TB = Type trillingsbron, BS = Bouwkundige staat, TM = type meting
² excl./incl. partiële veiligheidsfactor soort meting.

Tabel B.3B: Grenswaarden [mm/s], object gefundeerd op palen, bouwkundig gevoelig

Dominante frequentie	Karakteristieke waarden		Partiële veiligheidsfactor			Rekenwaarde grenswaarde trillingssnelheid ²⁾	
	Cat. 1	Cat. 2	TB ¹⁾	BS ¹⁾	TM ¹⁾	Cat. 1	Cat. 2
Freq.	[mm/s]	[mm/s]	[-]	[-]	[-]	[mm/s]	[mm/s]
10	20,0	5,0	1,5	1,7	1,0 / 1,6	7,8 / 4,9	2,0 / 1,2
15	22,5	6,3	1,5	1,7	1,0 / 1,6	8,8 / 5,5	2,5 / 1,5
20	25,0	7,5	1,5	1,7	1,0 / 1,6	9,8 / 6,1	2,9 / 1,8
25	27,5	8,8	1,5	1,7	1,0 / 1,6	10,8 / 6,7	3,5 / 2,2
30	30,0	10,0	2,5	1,7	1,0 / 1,6	7,1 / 4,4	2,4 / 1,5
35	32,5	11,3	2,5	1,7	1,0 / 1,6	7,6 / 4,8	2,7 / 1,7
40	35,0	12,5	2,5	1,7	1,0 / 1,6	8,2 / 5,1	2,9 / 1,8

¹ TB = Type trillingsbron, BS = Bouwkundige staat, TM = type meting
² excl./incl. partiële veiligheidsfactor soort meting.

Voor objecten gefundeerd op staal (trillingsgevoelige fundering), zijn naast de rekenwaarde voor de **versnelling van 1 m/s²** in de grond onder de fundering eveneens de rekenwaarden van de grenswaarden aan de draagconstructie zoals opgenomen in onderstaande tabel geldig. Deze zijn afhankelijk van de laagdikte van de trillingsgevoelige laag onder de fundering.

Tabel B.4: Grenswaarden [mm/s], object gefundeerd op staal

Laagdikte	Karakteristieke waarden	Rekenwaarde grenswaarde trillingssnelheid ²⁾		Rekenwaarde grenswaarde trillingssnelheid ²⁾	
		Heien ²⁾ (TB = 1,6)	Trillen ²⁾ (BS = 2,0)	Heien ²⁾ (TB = 1,6)	Trillen ²⁾ (BS = 2,0)
		BS = 1,0 TM = 1,0 / 1,6 ¹⁾	BS = 1,0 TM = 1,0 / 1,6 ¹⁾	BS = 1,7 TM = 1,0 / 1,6 ¹⁾	BS = 1,7 TM = 1,0 / 1,6 ¹⁾
[m]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]
1	20,0	12,5 / 7,8	10,0 / 6,3	7,4 / 4,6	5,9 / 3,7
2	18,6	11,6 / 7,3	9,3 / 5,8	6,8 / 4,3	5,5 / 3,4
3	17,1	10,7 / 6,7	8,6 / 5,3	6,3 / 3,9	5,0 / 3,1
4	15,7	9,8 / 6,1	7,9 / 4,9	5,8 / 3,6	4,6 / 2,9
5	14,3	8,9 / 5,6	7,2 / 4,5	5,3 / 3,3	4,2 / 2,6
6	12,9	8,1 / 5,0	6,5 / 4,0	4,7 / 3,0	3,8 / 2,4
7	11,4	7,1 / 4,5	5,7 / 3,6	4,2 / 2,6	3,4 / 2,1
8	10,0	6,3 / 3,9	5,0 / 3,1	3,7 / 2,3	2,9 / 1,8
¹ TB = Type trillingsbron, BS = Bouwkundige staat, TM = type meting ² excl./incl. partiële veiligheidsfactor soort meting.					

Hiaat SBR A richtlijn

De SBR-richtlijnen doen geen uitspraak bij trillingsintensiteiten die lager zijn dan de gestelde grenswaarde en / of die veelvuldig voorkomen gedurende langere tijd (maanden tot jaren). Er is sprake van **cosmetische schade** die uiteindelijk tot constructieve schade kan leiden. Vanuit de praktijk is bekend dat schade (scheurvorming in metselwerk) ontstaat bij objecten die een langdurige trillingsbelasting (hebben) ondergaan. Dergelijke schade treedt eerder op bij objecten gefundeerd op staal dan bij objecten gefundeerd op palen.

Streefwaarden conform SBR-richtlijn B

Conform SBR richtlijn B is de streefwaarde afhankelijk van:

- de functie van een ruimte in een gebouw;
- de omstandigheden van de trillingsbron;
- het tijdstip waarop de trilling voorkomt op de dag.

Functie van een ruimte

In SBR richtlijn B wordt onderscheid gemaakt in functies als gezondheidszorg, wonen, kantoor en onderwijs, bijeenkomstgebouwen (bv bioscoop) en kritische werkruimten (bv laboratoria).

Omstandigheid van de trillingsbron

In SBR richtlijn B wordt onderscheid gemaakt in trillingsbronnen, die continue voorkomen gedurende lange tijd (bv. machines), die herhaald voorkomen gedurende lange tijd (bv. rail- en wegverkeer), die continue of herhaald voorkomen gedurende een periode korter dan 3 maanden (bv bouw en sloopwerkzaamheden) en die incidenteel kortdurend voorkomen (bv. explosies).

Herhalingsintensiteit

Ten behoeve van hinderbeleving is de herhalingsintensiteit van de optredende trilling van belang. Bij hinderbeleving dient een "gewogen gemiddelde periodieke waarde" bepaald te zijn, welke afhankelijk is van onder andere het aantal keren dat er een incident optreedt.

Tijdstip van voorkomen op de dag

In SBR richtlijn B wordt onderscheid gemaakt in een dag- (van 07:00 uur tot 19:00 uur), avond- (van 19:00 uur tot 23:00 uur) en een nachtperiode (van 23:00 uur tot 07:00 uur).

“Situatie”

De grootte van de streefwaarden is afhankelijk van de situatie (bestaande of nieuw). Op moment dat zowel de bron als de ontvanger (=woning o.i.d.) aanwezig zijn, is sprake van een bestaande situatie. Op moment dat of de bron of de ontvanger (nog) niet aanwezig is, is sprake van een nieuwe situatie. Alleen als zowel bron en ontvanger aanwezig zijn, en iets aan een van beide veranderd, is sprake van een gewijzigde situatie.

Streefwaarden

De streefwaarden zijn erop gericht hinderbeleving te voorkomen of zoveel mogelijk te beperken. Overschrijding van de streefwaarden dient aanleiding te zijn tot overleg tussen betrokken partijen. Er is geen sprake van harde grenzen.

De streefwaarden worden aangegeven door de waarden A1, A2 en A3 en zijn dimensieloos. Er wordt voldaan aan de streefwaarden indien de maximale trillingswaarde in de ruimte gemeten op de vloer kleiner is dan A1, of indien voldaan wordt aan de maximale trillingswaarde in de ruimte op de vloer kleiner is dan A2 waarbij de waarde van de trillingssterkte over de beoordelingsperiode kleiner is dan A3.

C. TRILLINGSTECHNISCHE VAKTERMEN

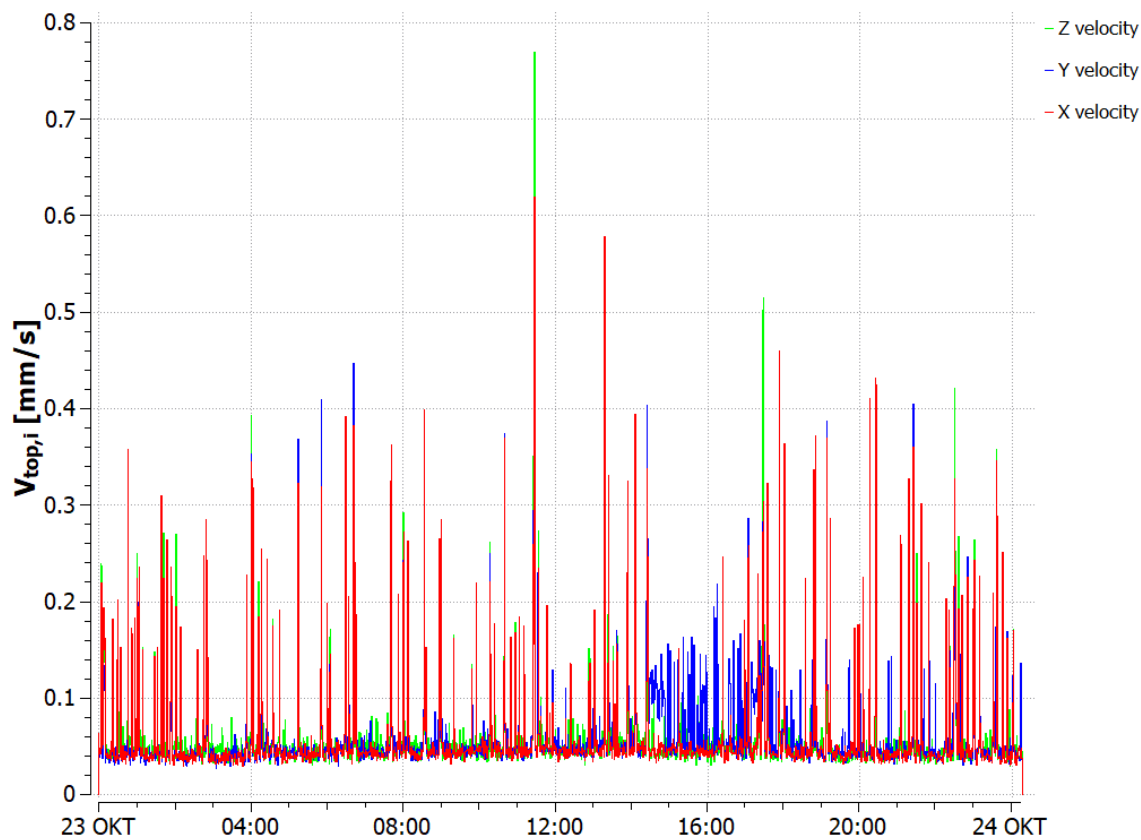
Trilling:	een periodieke beweging van een grootheid (verplaatsing, snelheid, versnelling) om een evenwichtsstand als functie van de tijd.
Trillingstijd:	de kleinste verschuiving in de tijd waarbij een periodieke tijdsfunctie met zichzelf samenvalt.
Topwaarde	de in absolute zin grootste afwijking van de momentane waarde van een grootheid ten opzichte van de gemiddelde waarde.
Frequentie	de reciproque van de trillingstijd.
Dominante frequentie:	de overheersende frequentie in dat deel van het signaal waar de topwaarde optreedt.
Verplaatsing:	een vectoriële grootheid die de verandering van een positie van een lichaam of van een punt aanduidt ten opzichte van een zekere referentie.
Snelheid:	een vectoriële grootheid die de tijdsafgeleide van de verplaatsing representeert.
Versnelling:	een vectoriële grootheid die de tijdsafgeleide van de snelheid representeert.
Trillingssterkte:	de sterkte van de trilling in relatie tot het van belang zijnde trillingseffect; in het geval van schade wordt onder de trillingssterkte verstaan de topwaarde van een trillingsgrootheid in combinatie met de dominante frequentie.
Draagconstructie:	het deel van een gebouw dat ervoor zorgt dat het gebouw als geheel en in het bijzonder de vloeren hun dragende functie kunnen blijven vervullen.
Grenswaarde schade:	waarde voor de toelaatbare trillingssterkte waarbij de kans op schade aan de draagconstructie (en overige onderdelen) van een bouwwerk aanvaardbaar klein is (minder dan 1%); schade kan de veiligheid en/ of levensduur van het bouwwerk beïnvloeden, of leiden tot een vermindering van de gebruikswaarde of de economische waarde van het bouwwerk.
Continue trilling:	een trilling die zodanige tijd continu aanwezig is, dat resonanties en/ of vermoeiingseffecten aan de draagconstructie van een bouwwerk kunnen optreden (bv. machines, intrillen damwanden).
Kortdurende trilling:	een door een stootvormige excitatie veroorzaakte trilling met een kortdurend, uitdempend karakter (bv. explosies, botsingen).
Herhaald kortdurende trilling:	een kortdurende trilling die meermalen voorkomt, steeds gescheiden door een tijdsinterval waarin een rustsituatie heerst, waarbij vermoeiingseffecten aan de draagconstructie van een bouwwerk kunnen optreden (bv. heiwerkzaamheden, weg- en railverkeer).
Indicatieve meting:	meting waarbij slechts met één meetpunt ter plaatse van de begane grond trillingen worden gemeten (conform § 8.5.2 SBR-richtlijn A 2017).
Beperkte meting:	meting waarbij met tenminste één meetpunt op de begane grond en met tenminste één meetpunt op de hoogste verdieping van het gebouw trillingen worden gemeten (conform § 8.5.3 SBR-richtlijn A 2017).
Uitgebreide meting:	meting waarbij met een groot aantal meetpunten wordt gemeten, dit in aanvulling op de meetpunten volgens de beperkte meting (conform § 8.5.4 SBR-richtlijn A 2017).
Beoordelingsperiode:	een tijdsinterval waarin een dag wordt verdeeld voor de toetsing van de trillingsterkte aan de streefwaarden in: dagperiode: van 7:00 tot 19:00; avondperiode: van 19:00 tot 23:00; nachtperiode: van 23:00 tot 7:00.
Effectieve trillingsnelheid:	voortschrijdende effectieve waarde van de gewogen momentane trillingsgrootheid.
Maximale effectieve trillingsnelheid:	grootste optredende waarde van de voortschrijdende effectieve waarde.
Trillingssterkte over beoordelingsperiode:	het kwadratisch gemiddelde van de grootste effectieve waarde per interval van 30 seconden in de desbetreffende beoordelingsperiode.

Streefwaarde hinder:	waarde voor de trillingssterkte waarbij verwacht wordt dat er nog net geen hinder voor personen optreedt; onder hinder wordt verstaan de verstoring en/ of belemmering van (fysieke) activiteiten en/ of processen die rust en/ of concentratie behoeven.
Streefwaarde A1:	onderste streefwaarde voor de maximale trillingssterkte van de voortschrijdende effectieve waarde .
Streefwaarde A2:	bovenste streefwaarde voor de maximale trillingssterkte van de voortschrijdende effectieve waarde.
Streefwaarde A3:	streefwaarde voor de trillingssterkte over de beoordelingsperiode dag, avond en nacht.

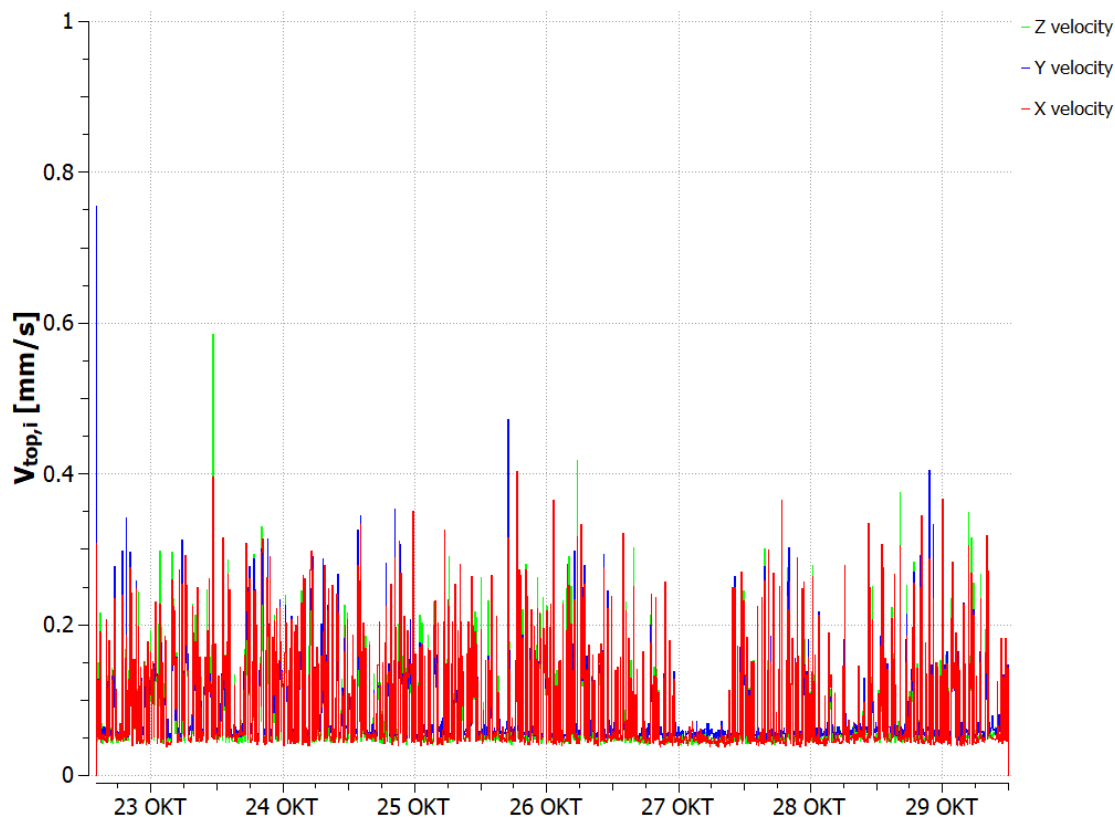
D. GRAFISCHE WEERGAVE MEETRESULTATEN

D.1 MEETRAAI 1, ZANDERIGE ONDERGROND, SNELHEDEN

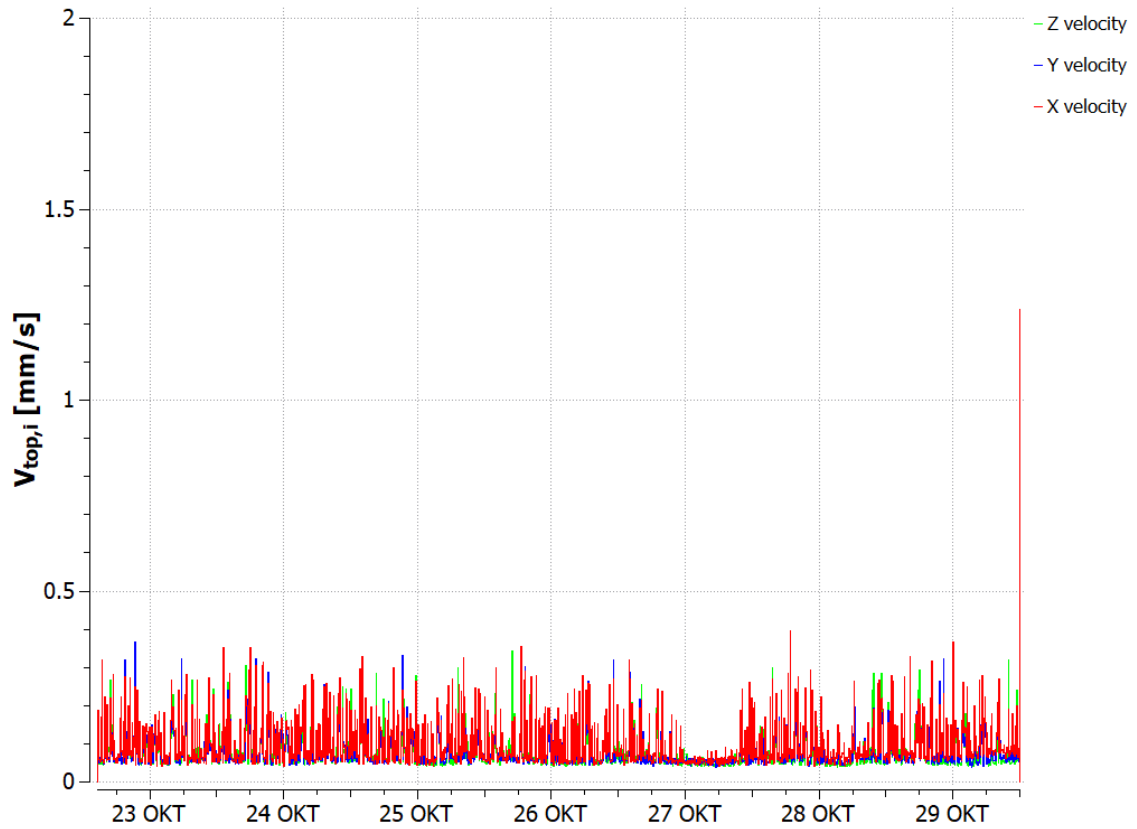
VIBe0145 MP1



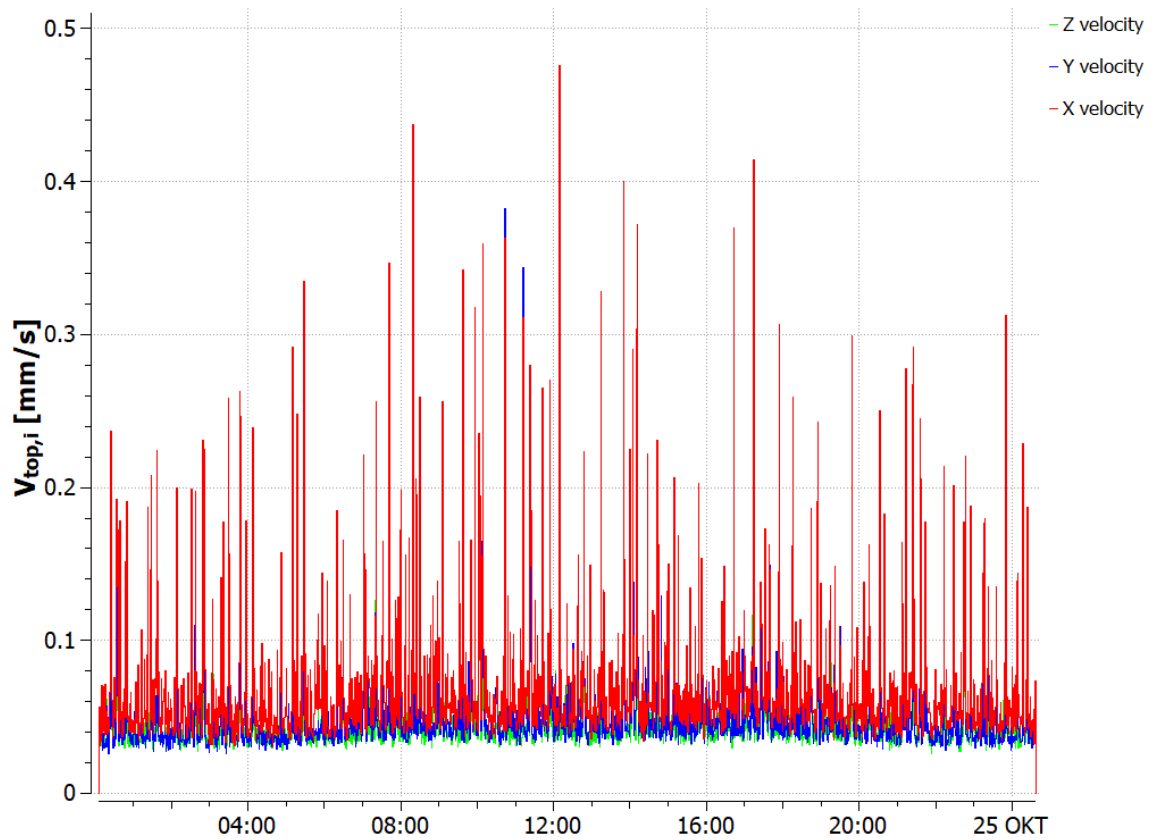
VIBe0062 MP02



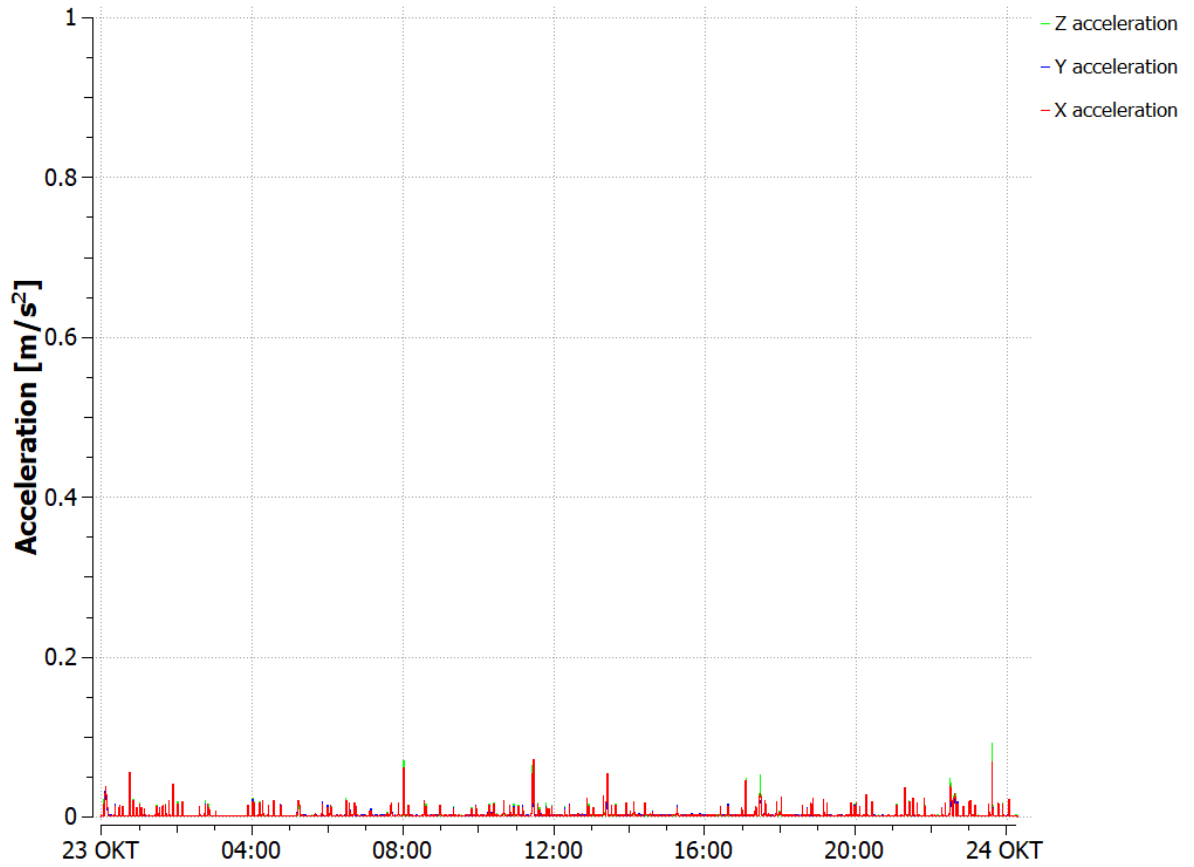
VIBe0051 MP03



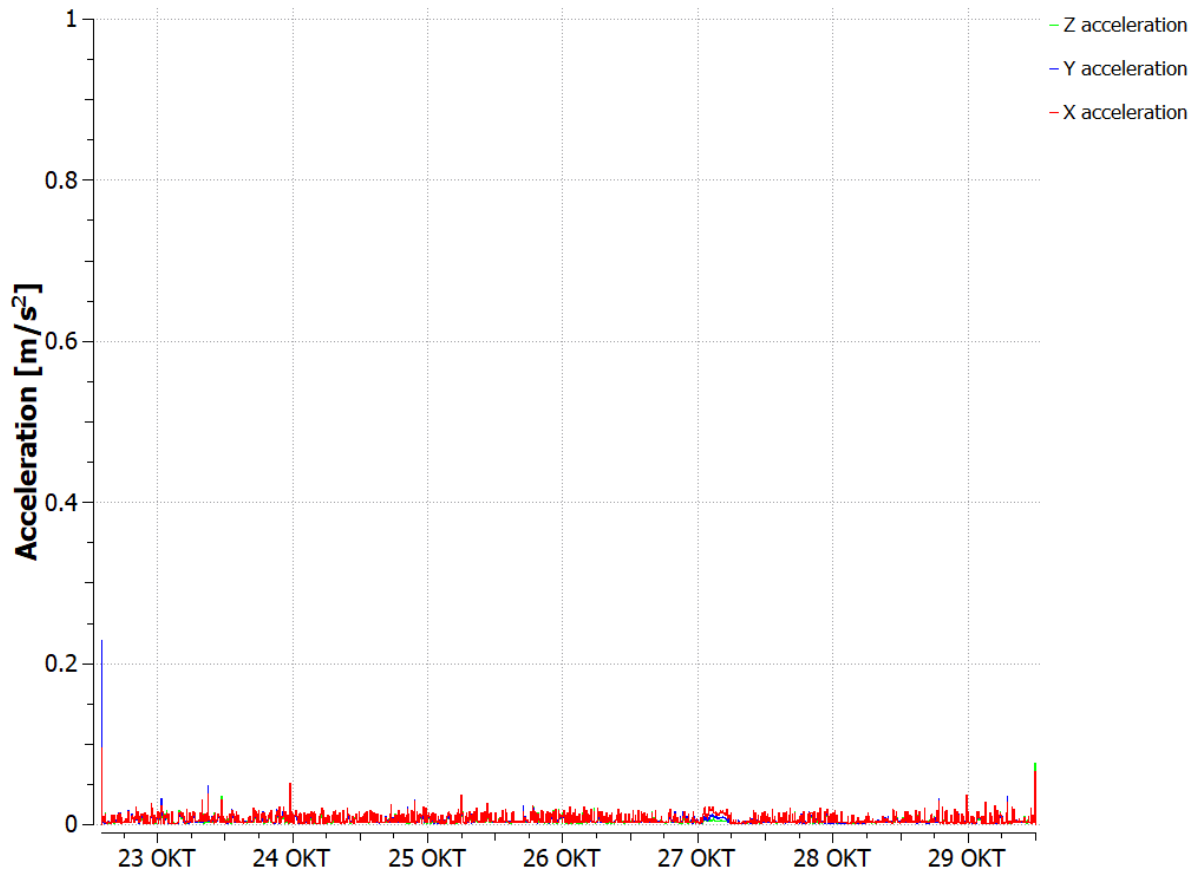
VIBe0063 MP04



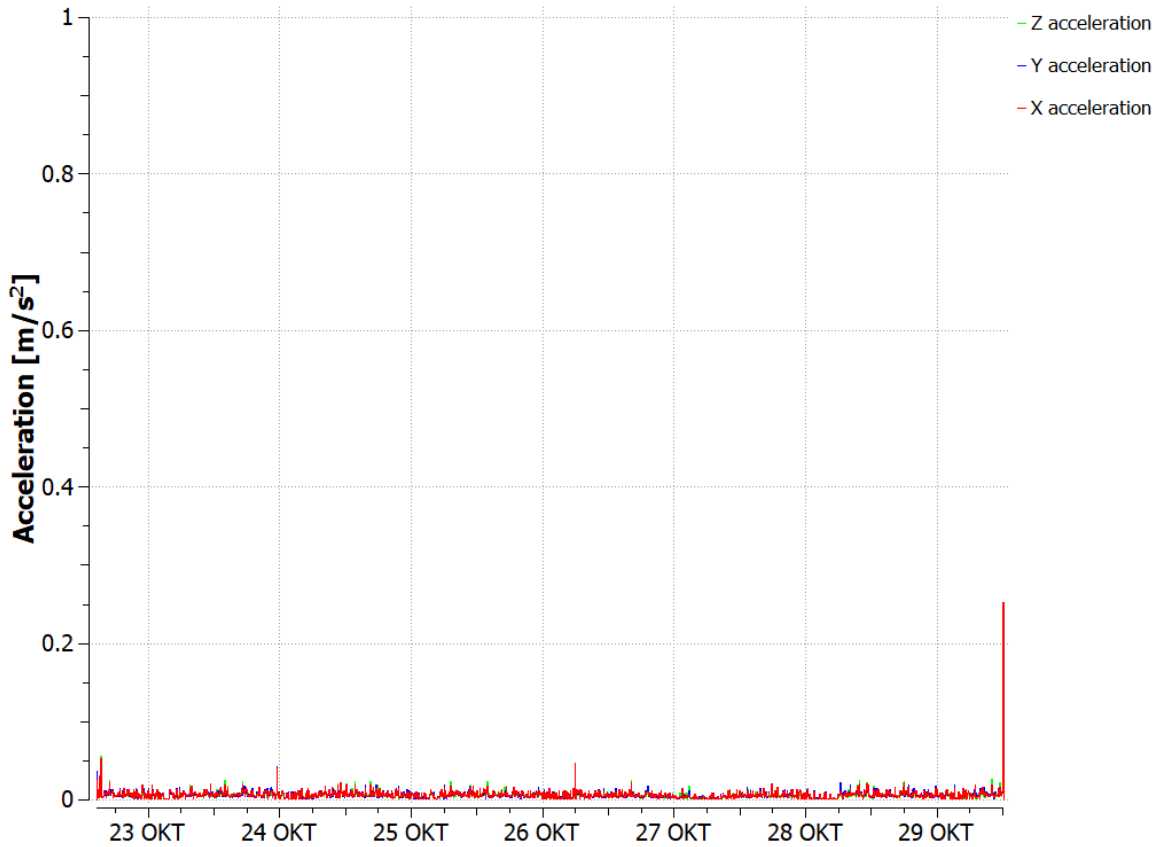
D.2 MEETRAAI 1, ZANDERIGE ONDERGROND, VERSNELLINGEN
VIBe0145 MP1



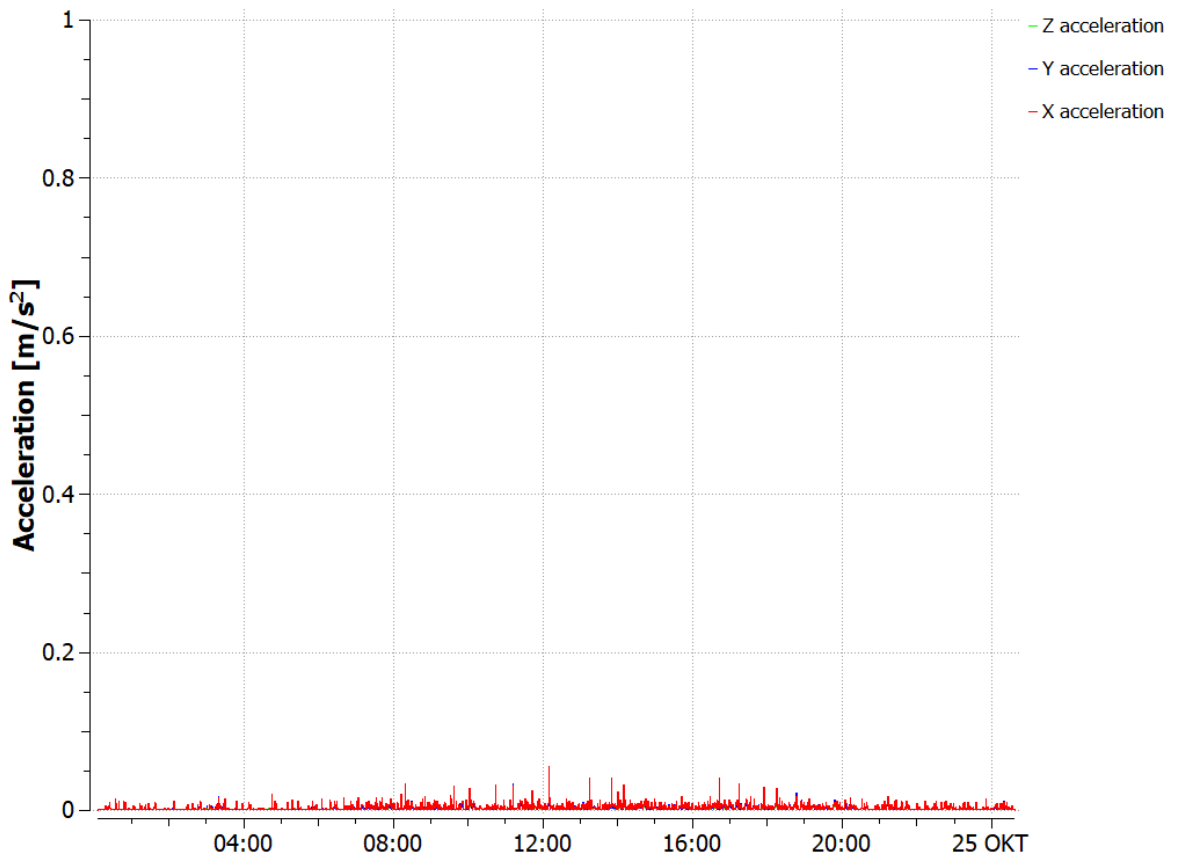
VIBe0062 MP02



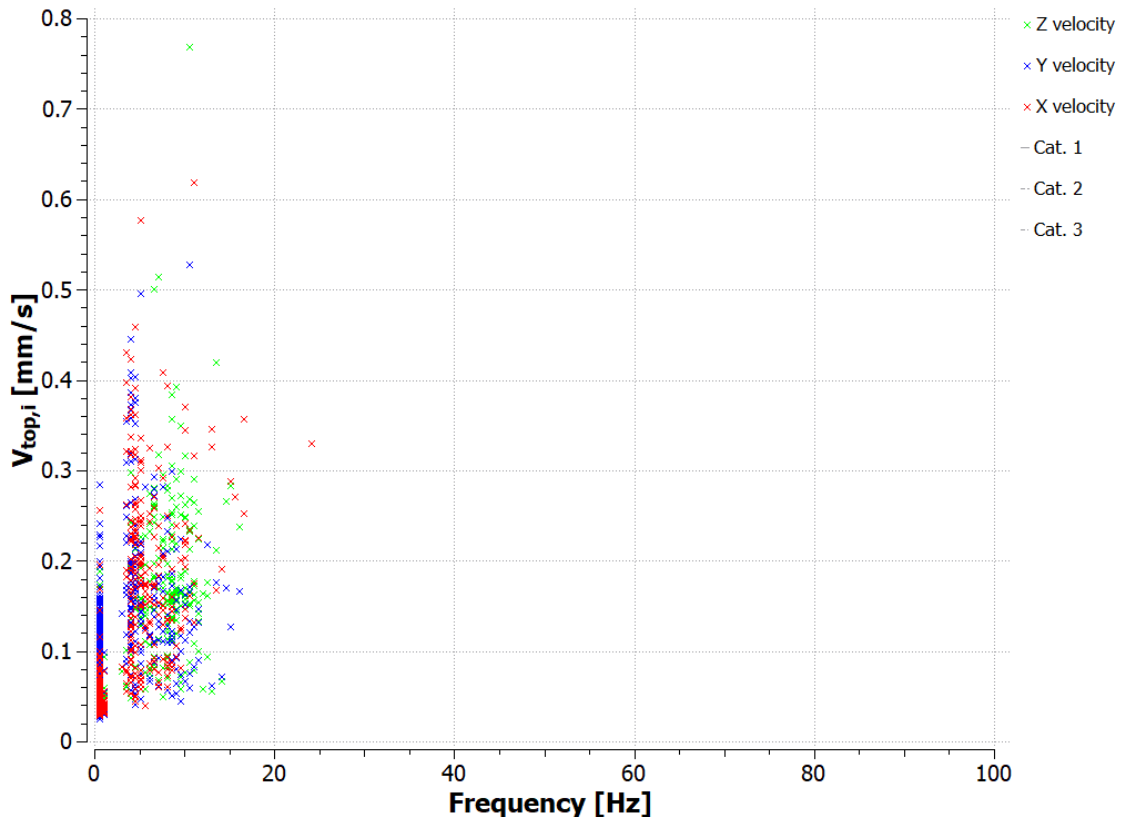
VIBe0051 MP03



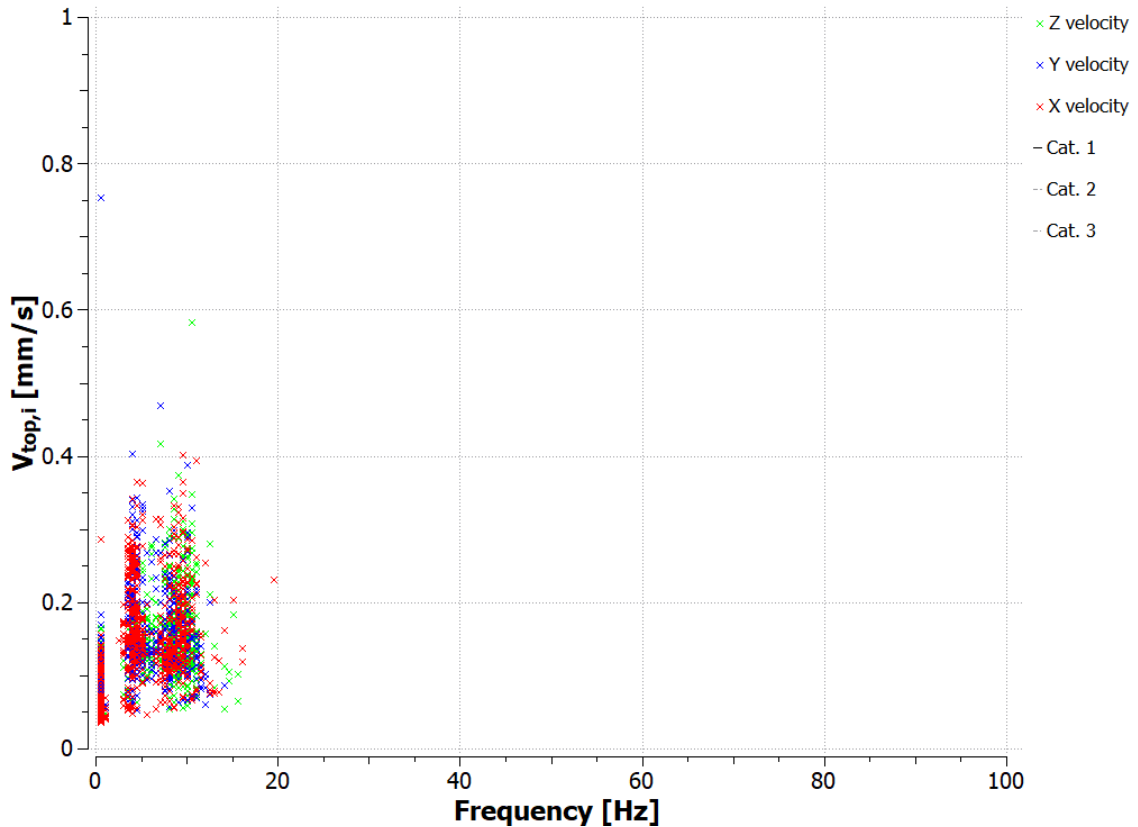
VIBe0063 MP04



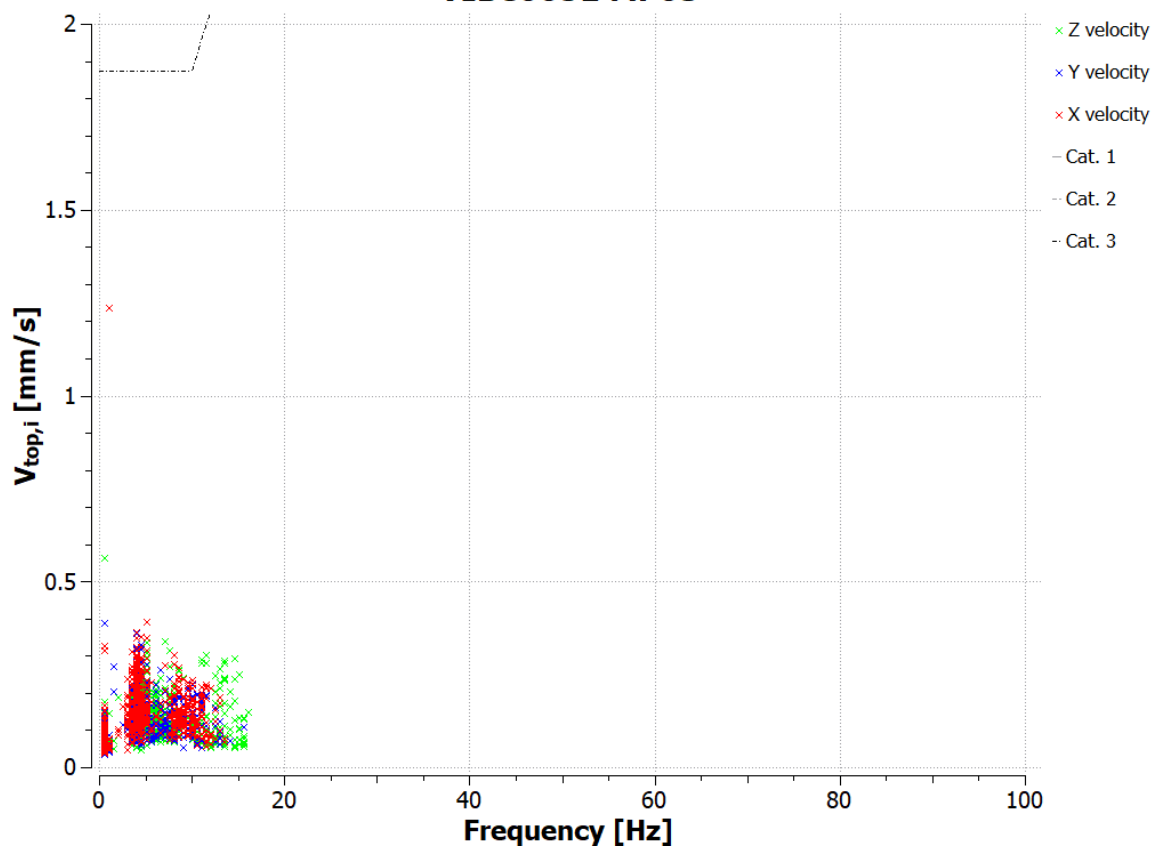
D.3 MEETRAAI 1, ZANDERIGE ONDERGROND, SNELHEID VERSUS FREQUENTIE
VIBe0145 MP1



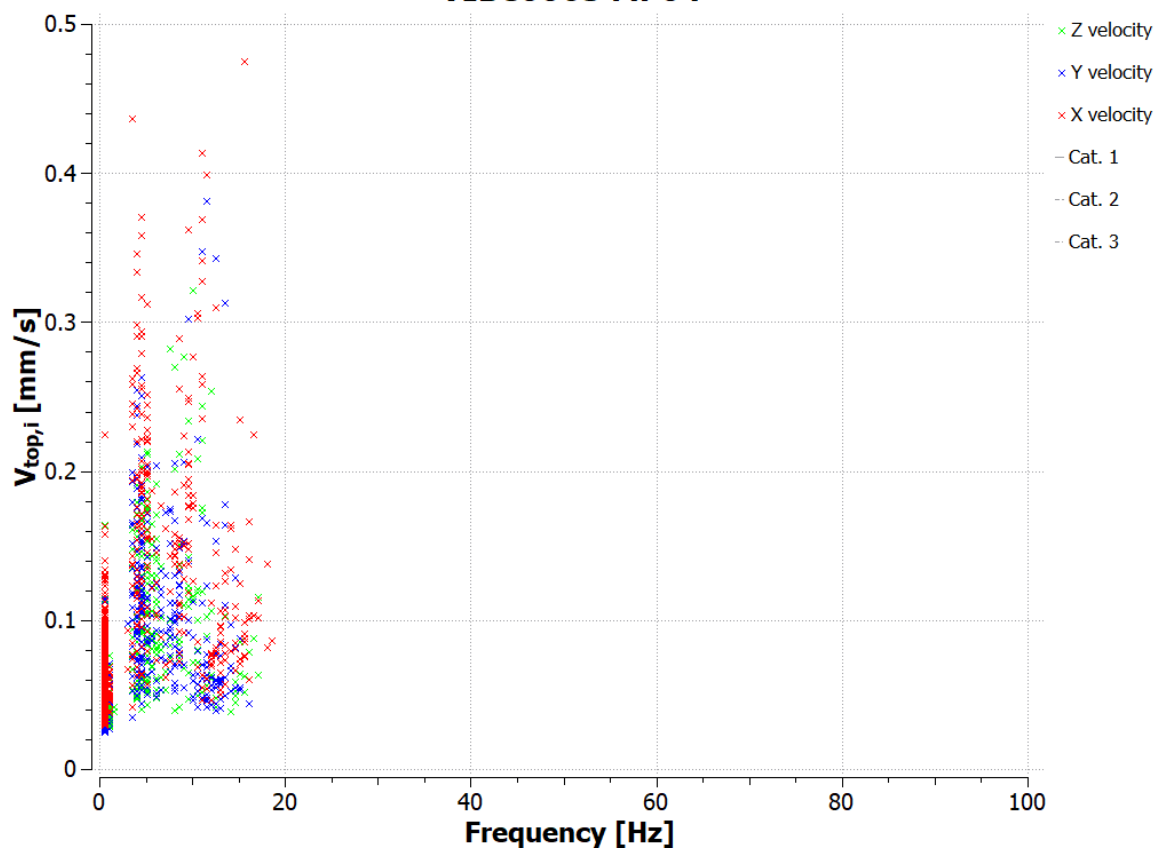
VIBe0062 MP02



VIBe0051 MP03

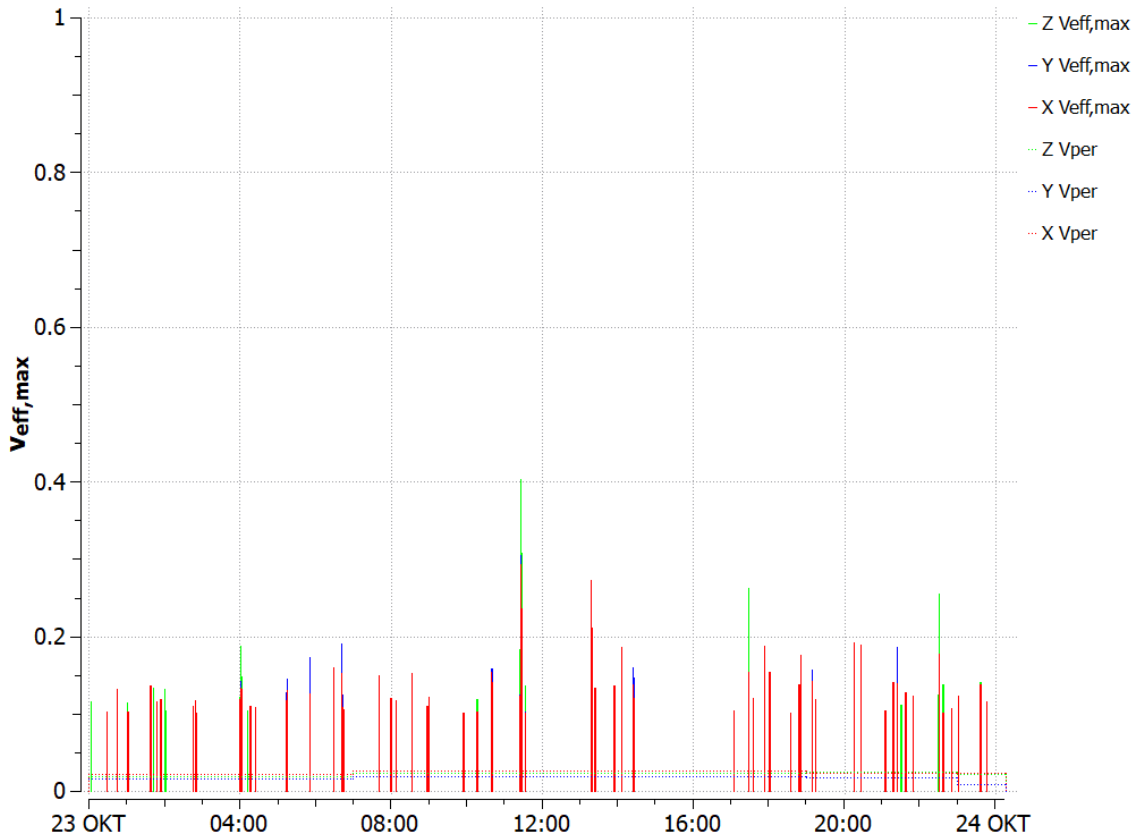


VIBe0063 MP04

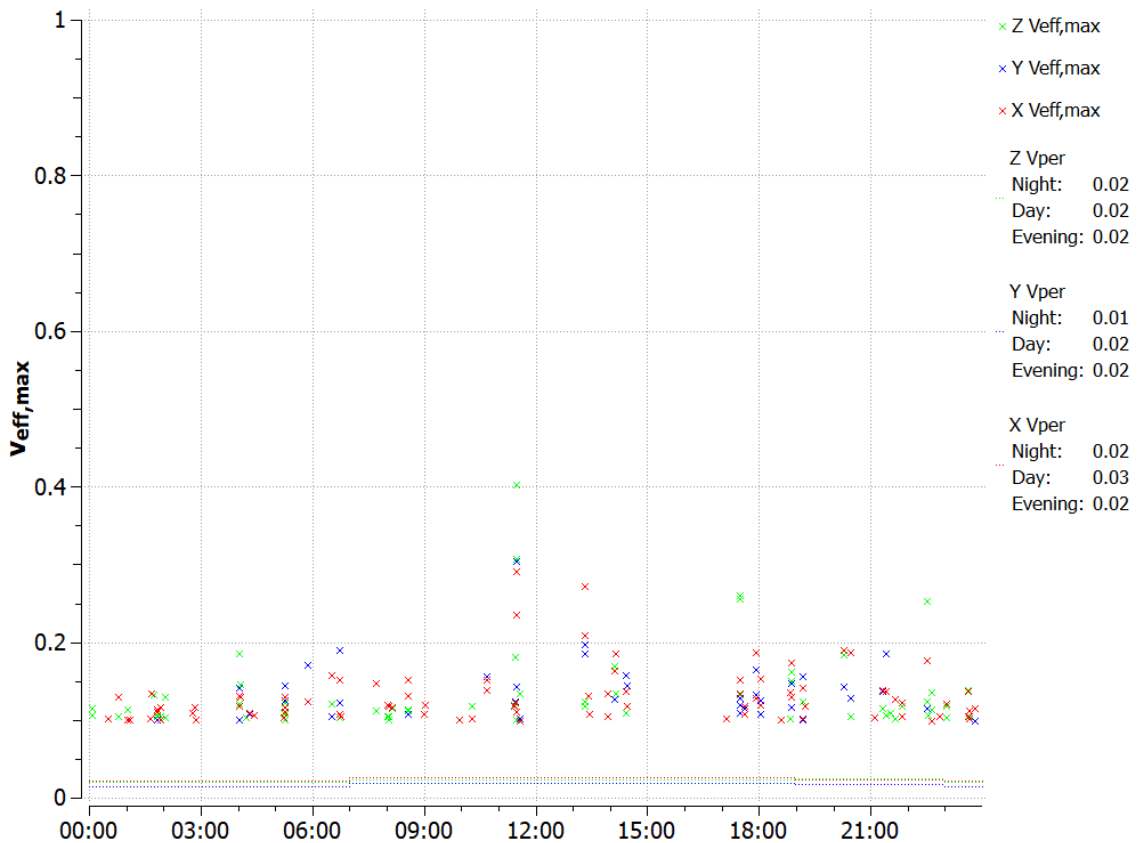


D.4 MEETRAAI 1, ZANDERIGE ONDERGROND, EFFECTIEVE SNELHEID

VIBe0145 MP1

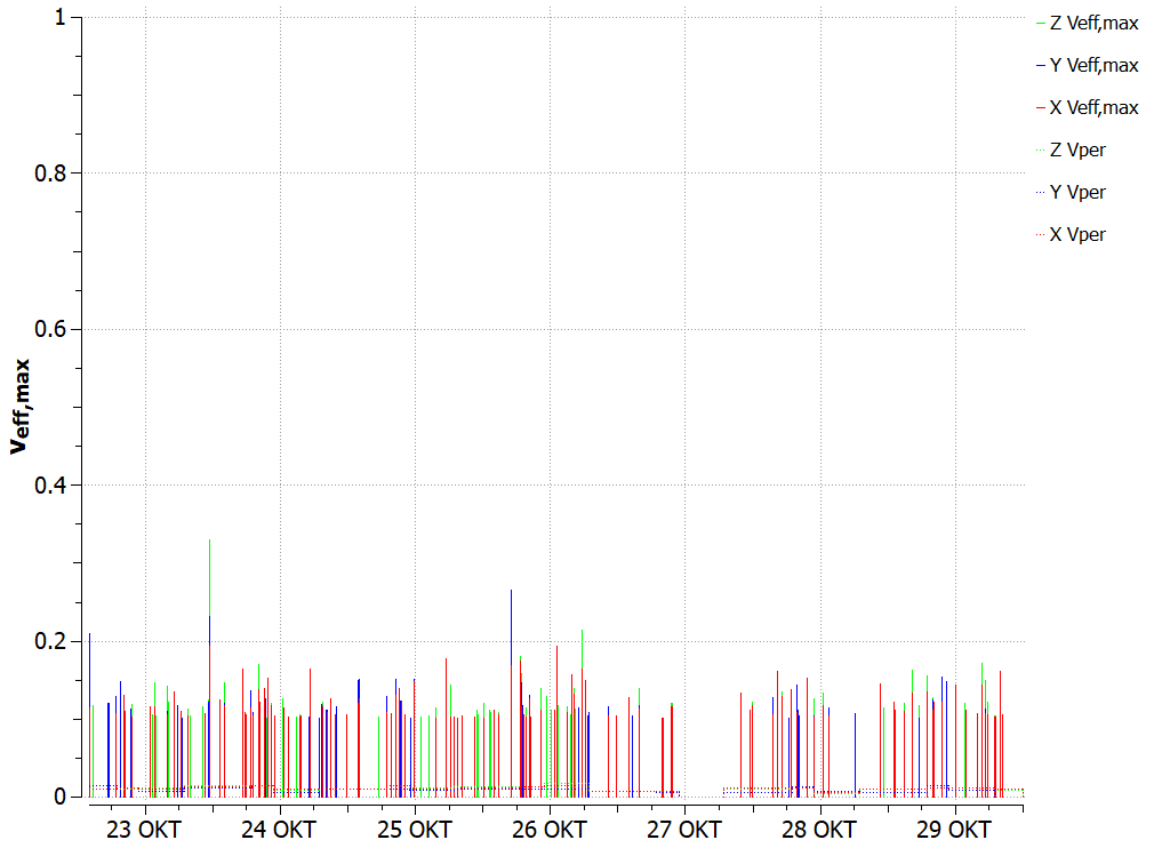


VIBe0145 MP1

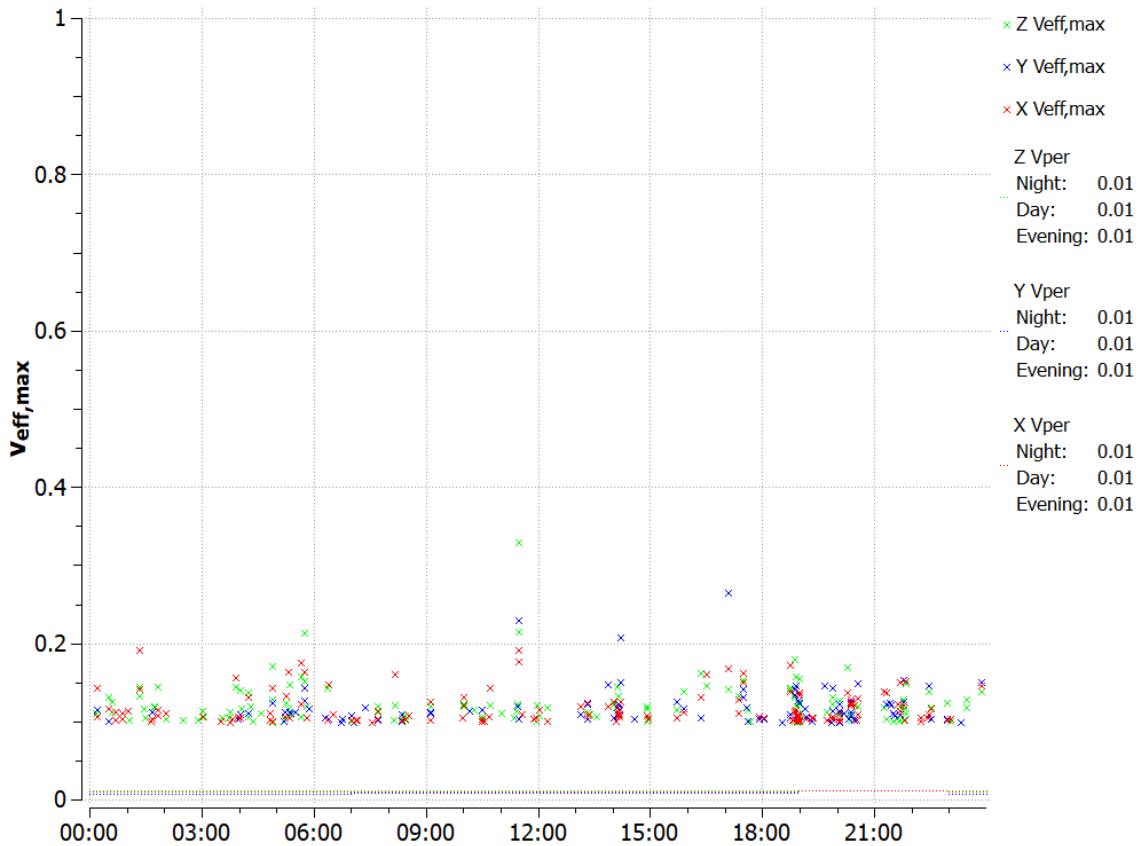




VIBe0062 MP02

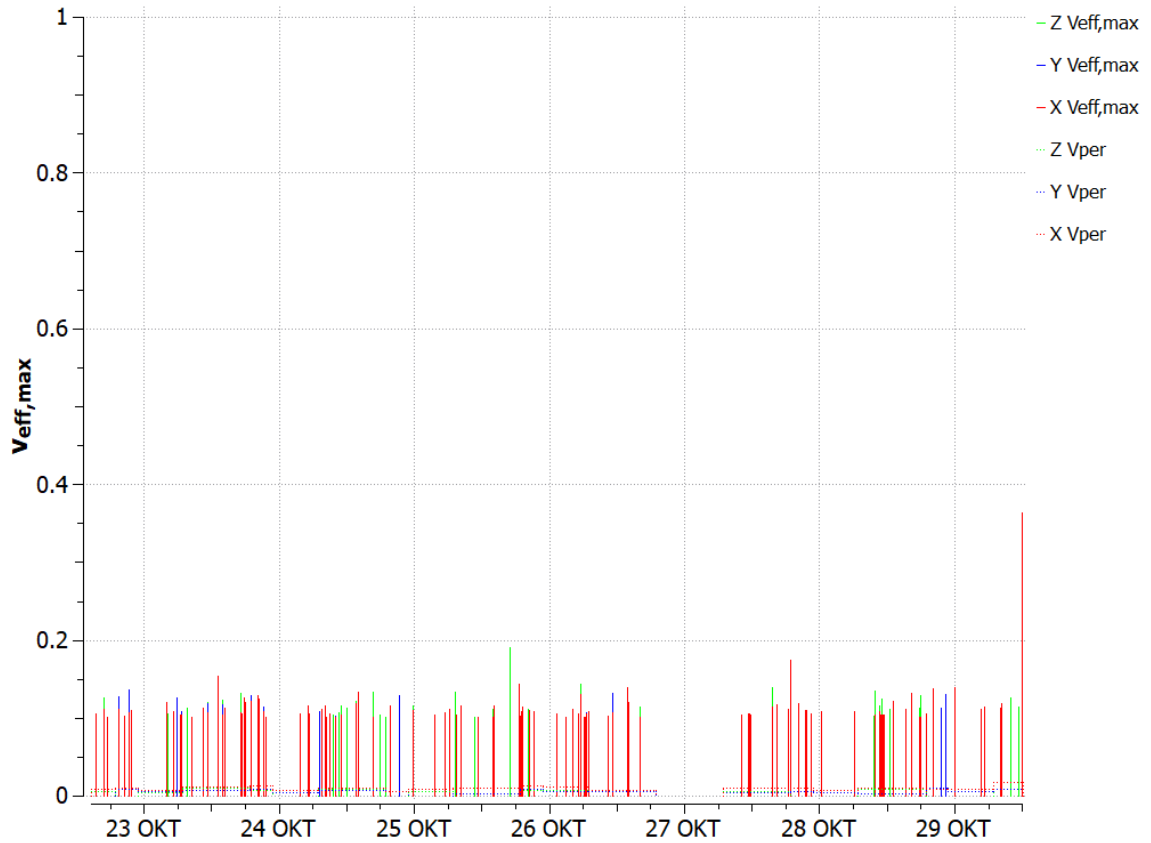


VIBe0062 MP02

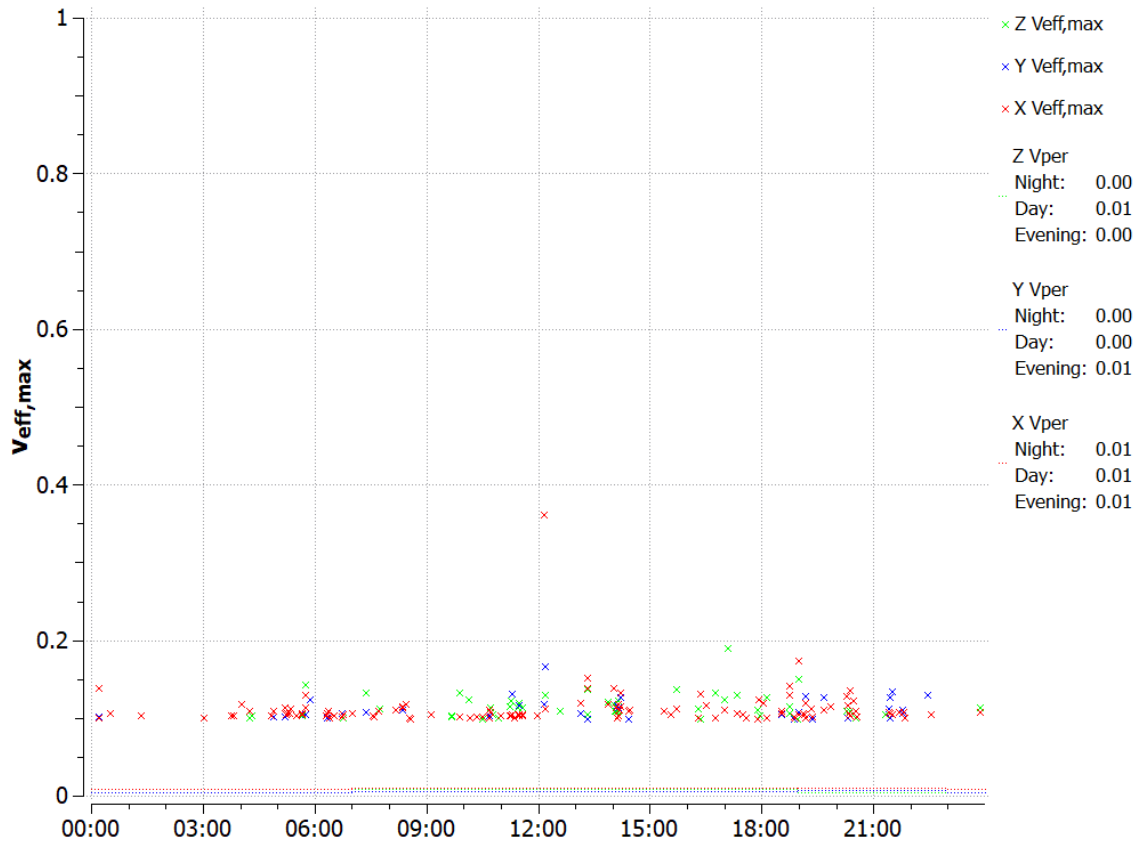




VIBe0051 MP03

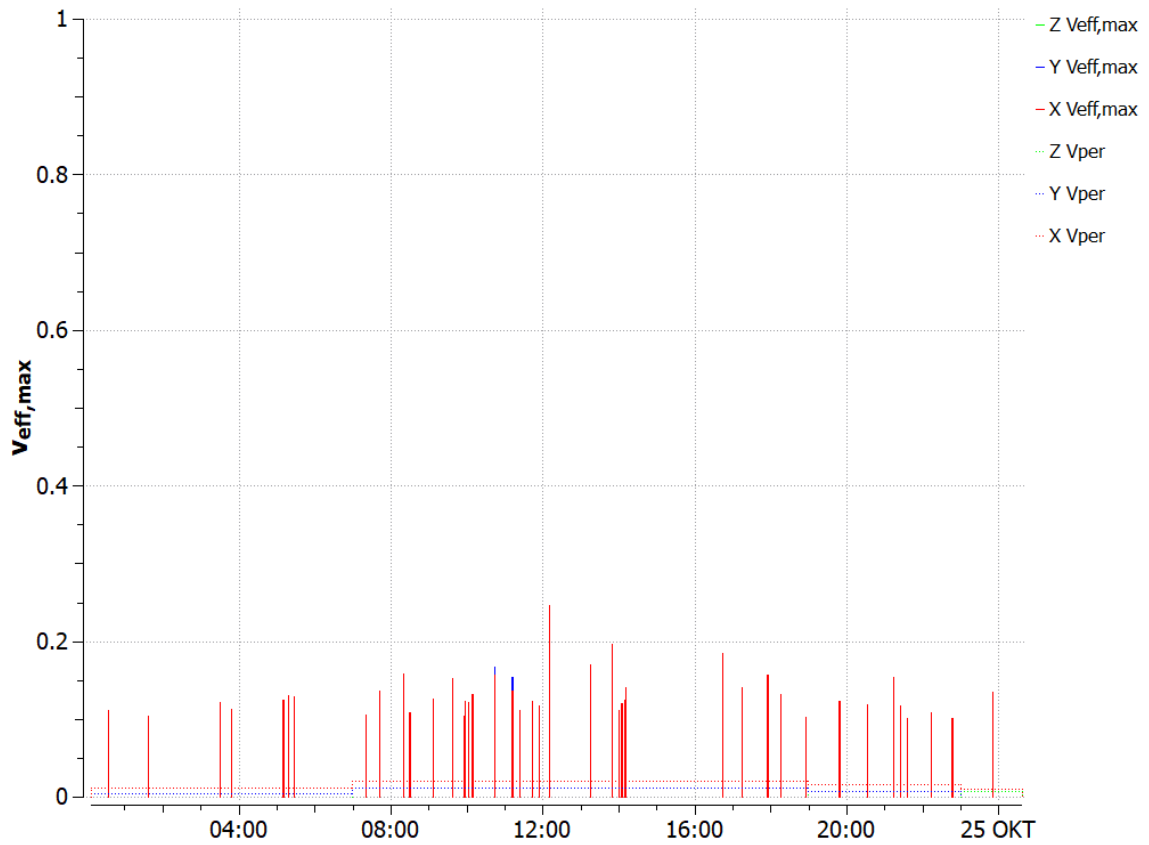


VIBe0051 MP03

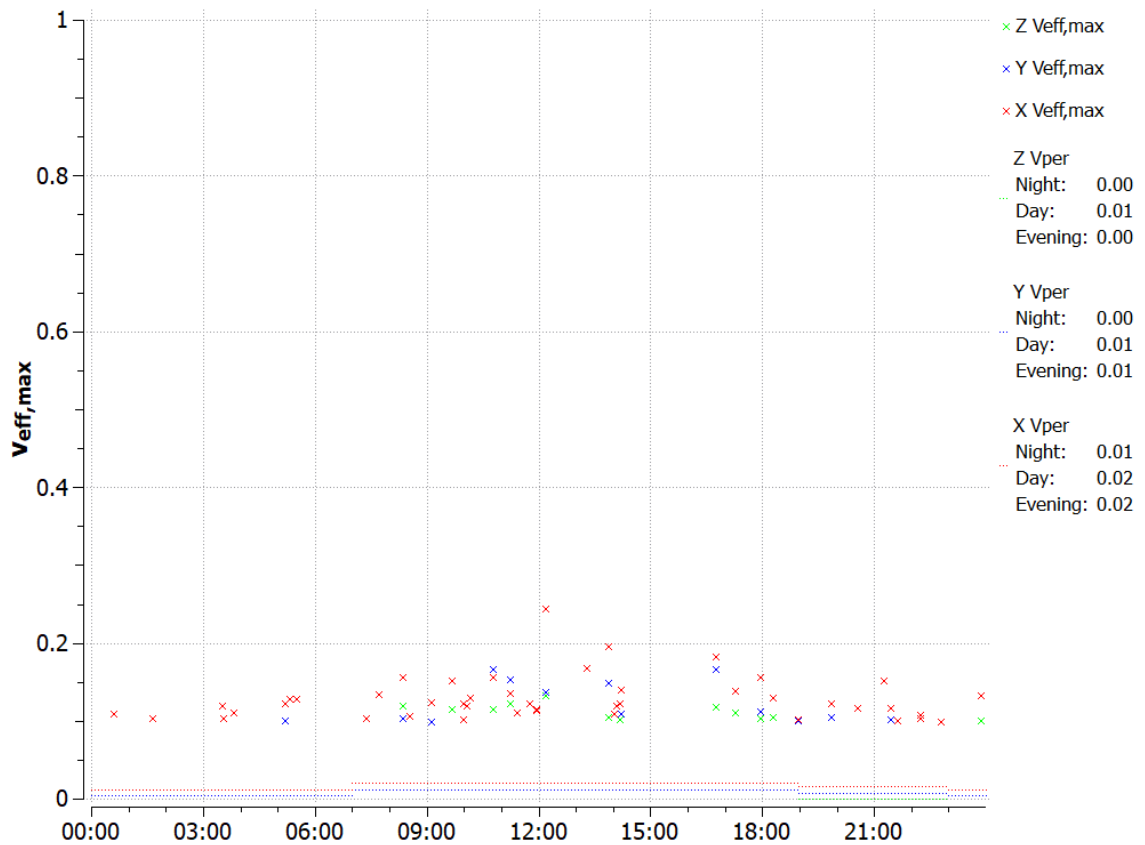




VIBe0063 MP04

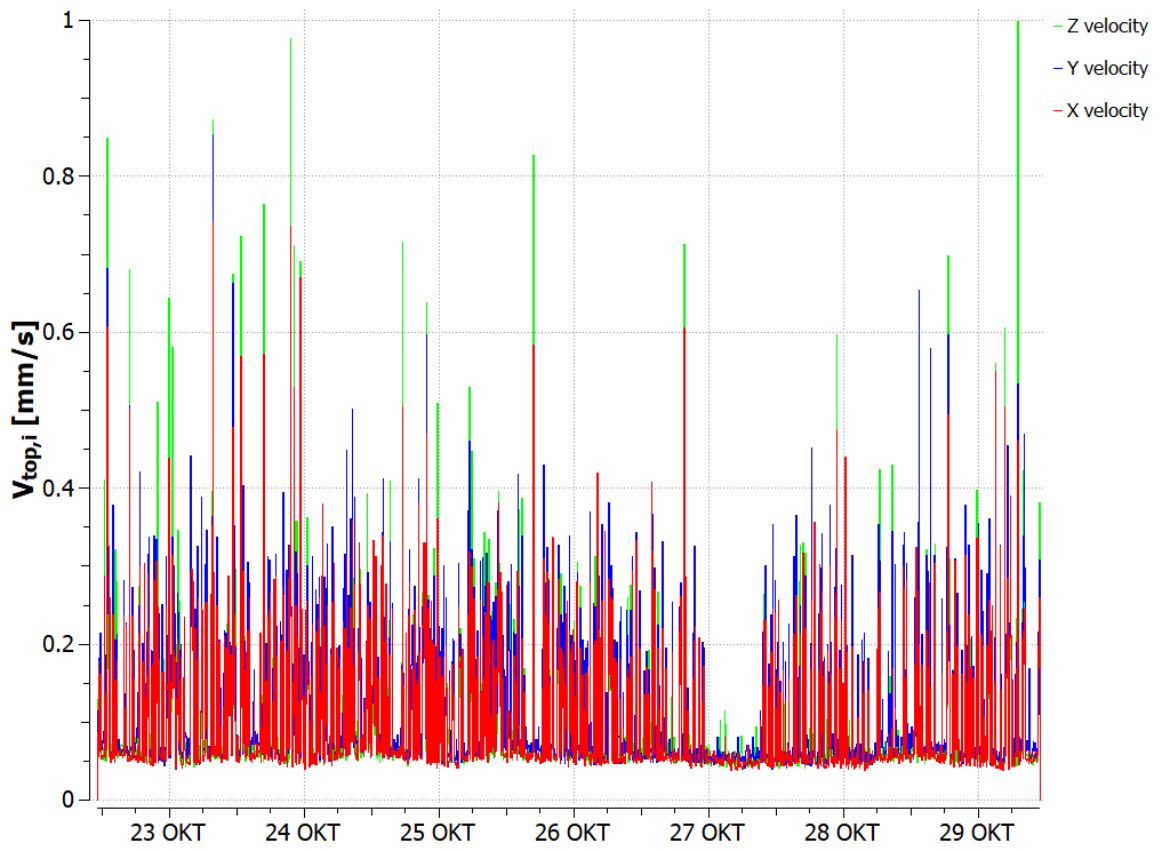


VIBe0063 MP04

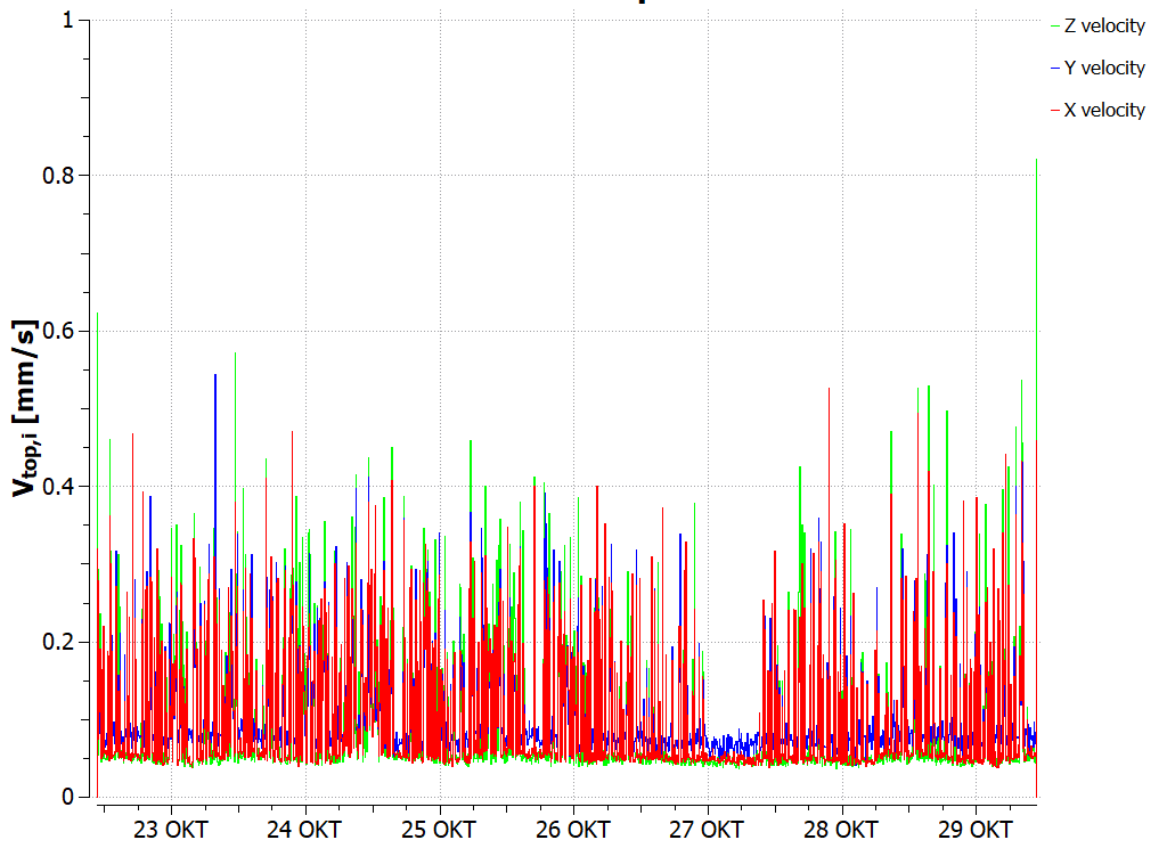


D.5 MEETRAAI 2, KLEIIGE ONDERGROND, SNELHEDEN

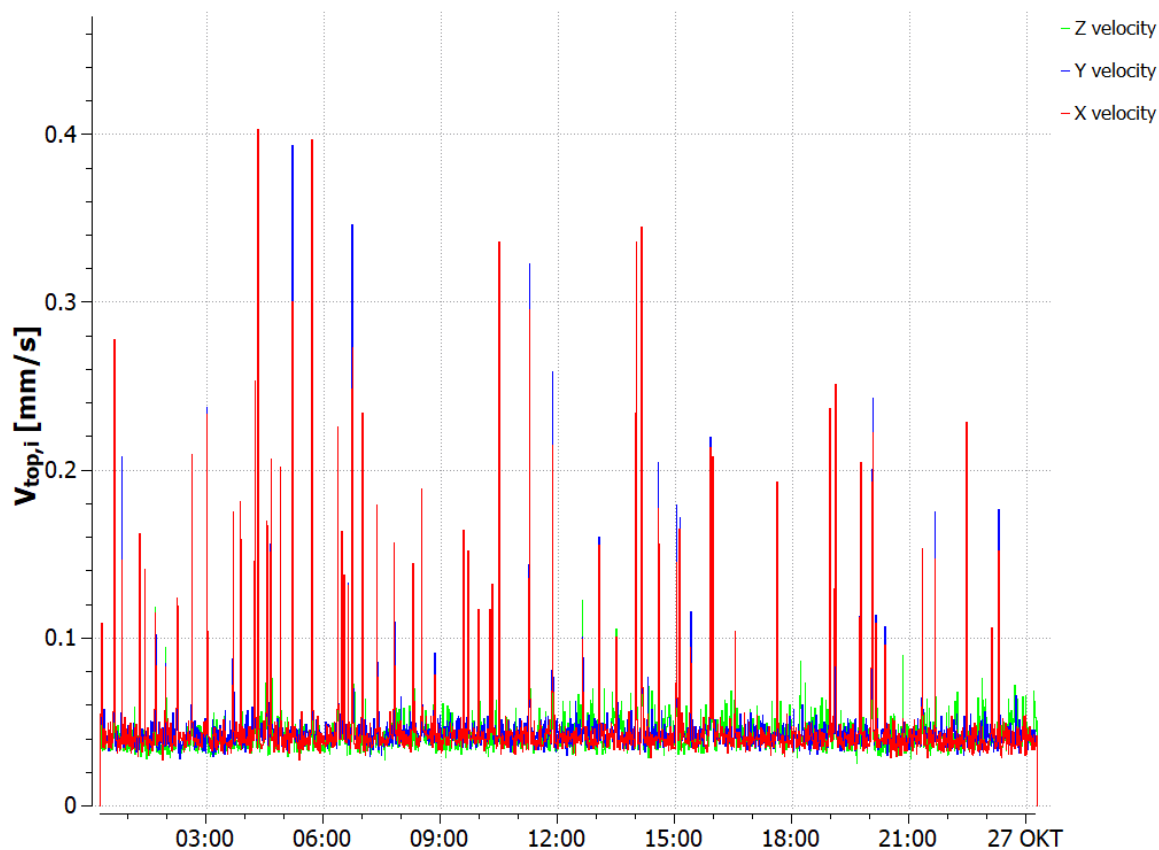
VIB03702 MP05



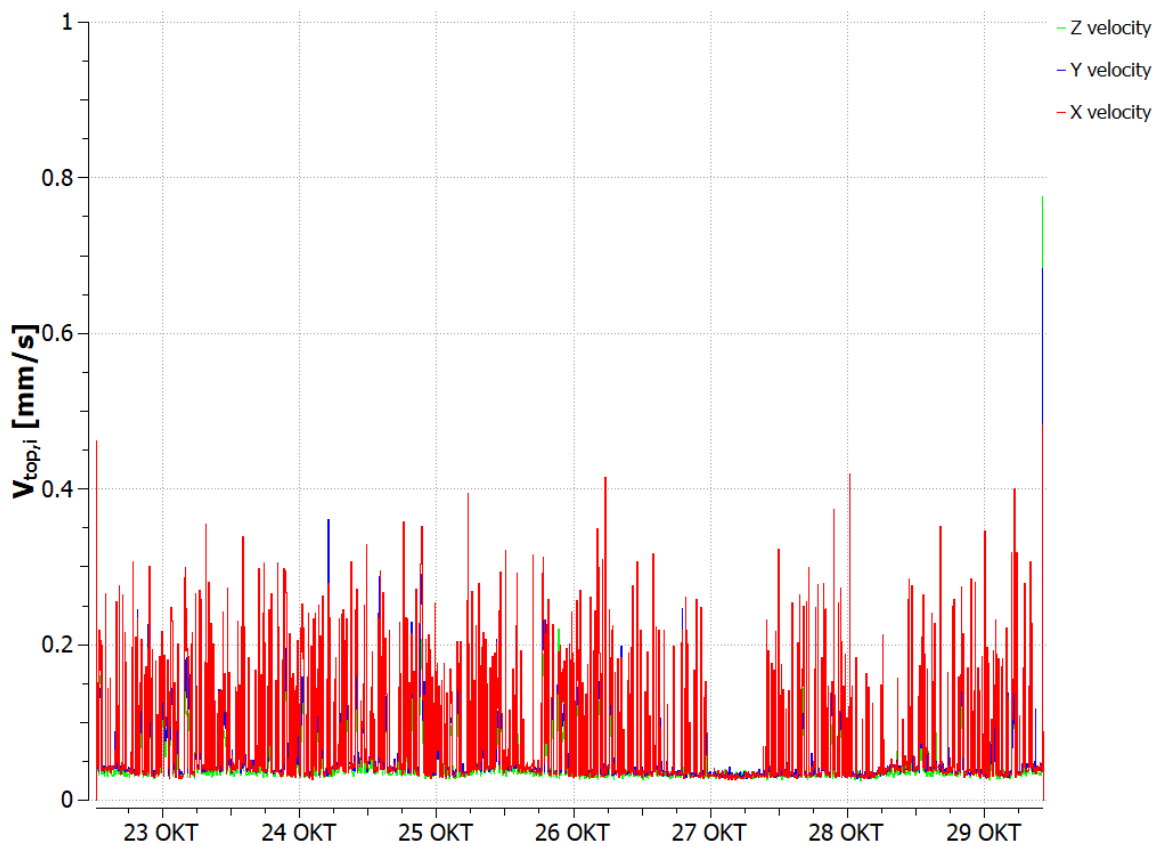
VIB03719 mp06



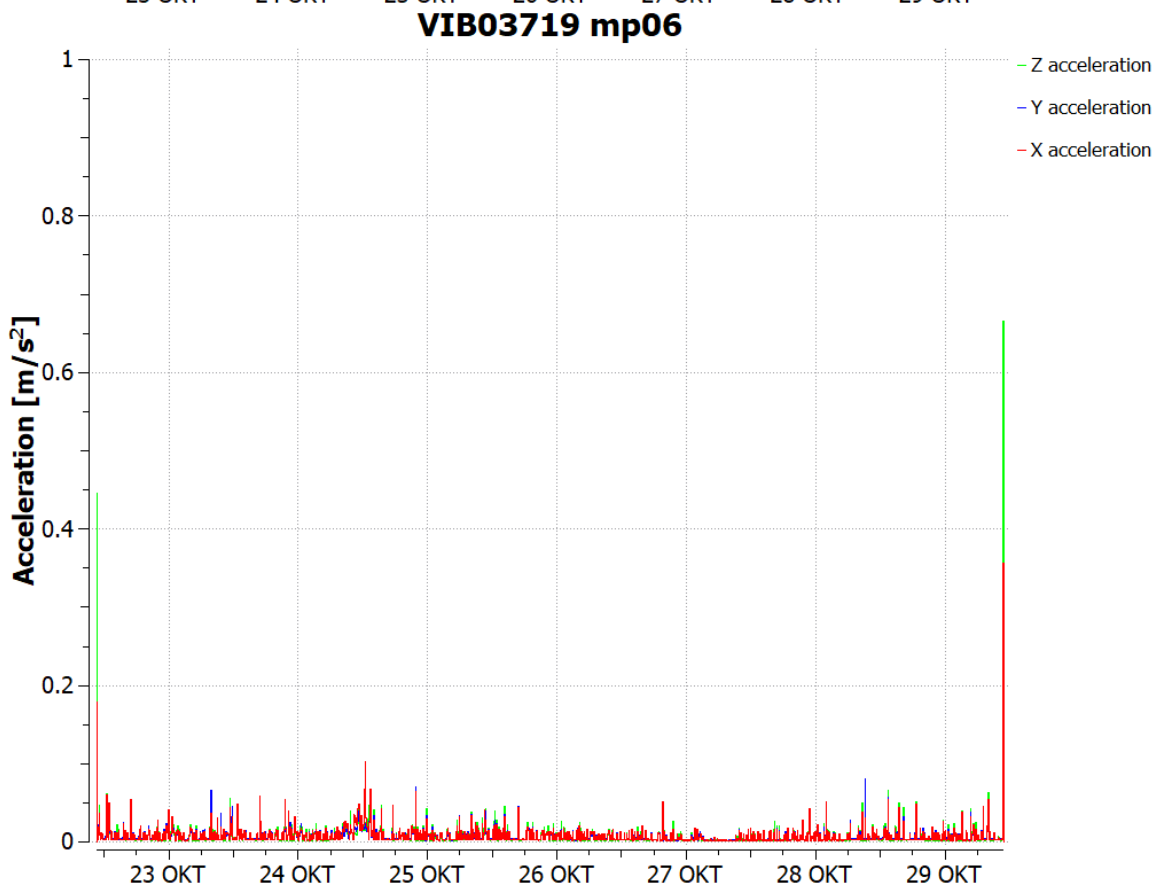
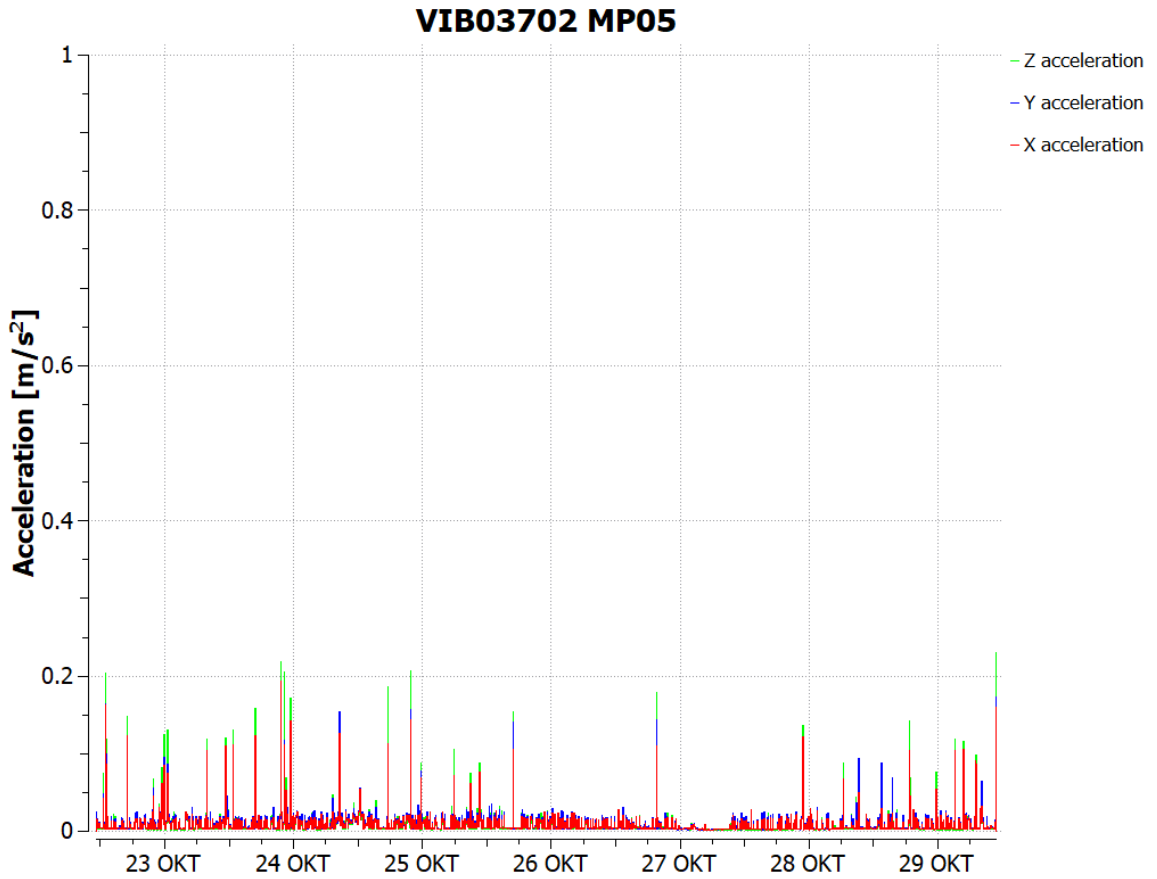
VIB03701 MP07



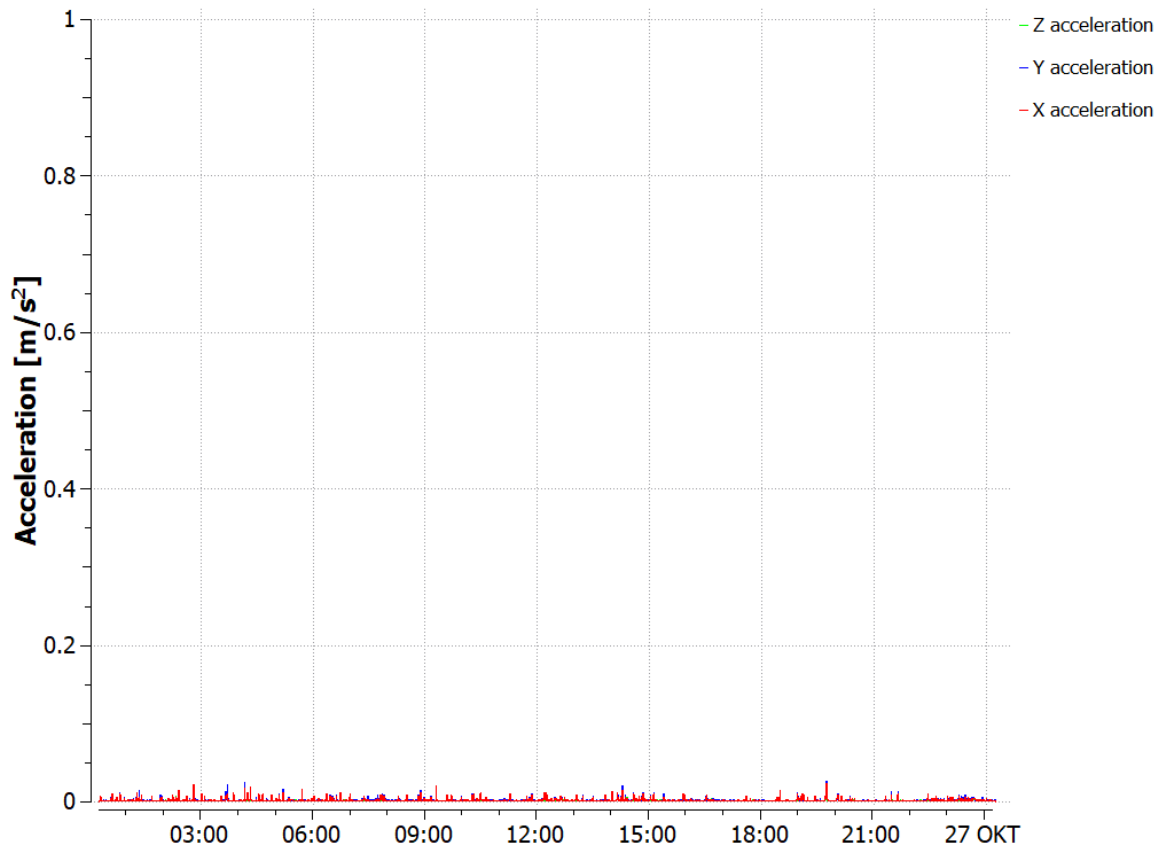
VIB00492 MP08



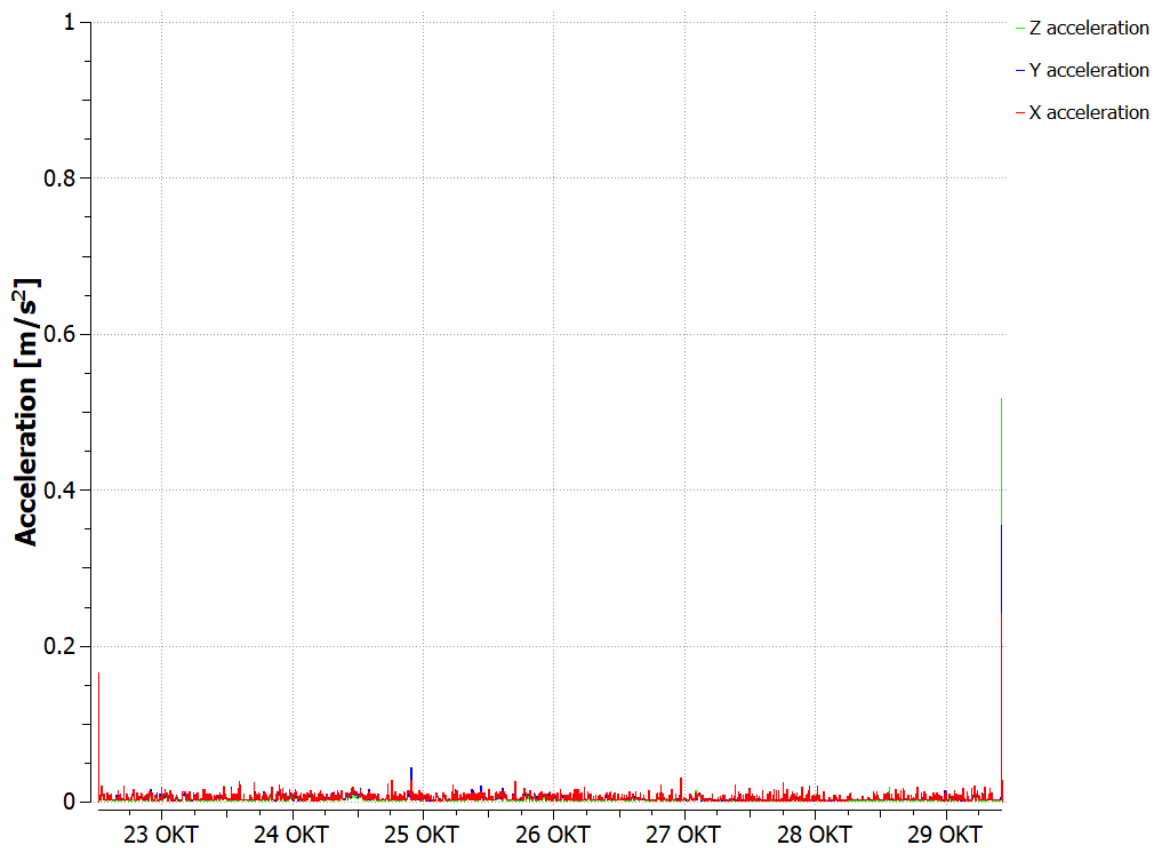
D.6 MEETRAAI 2, KLEIIGE ONDERGROND, VERSNELLINGEN



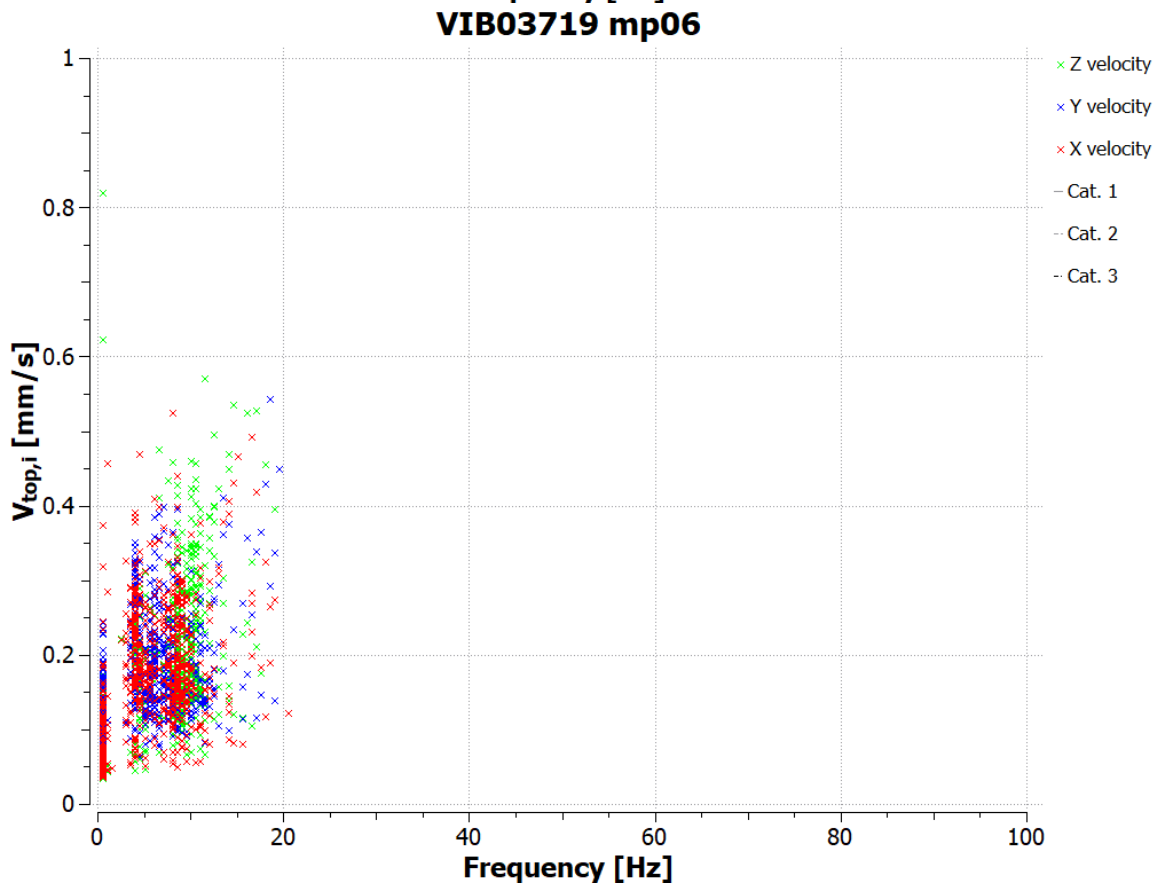
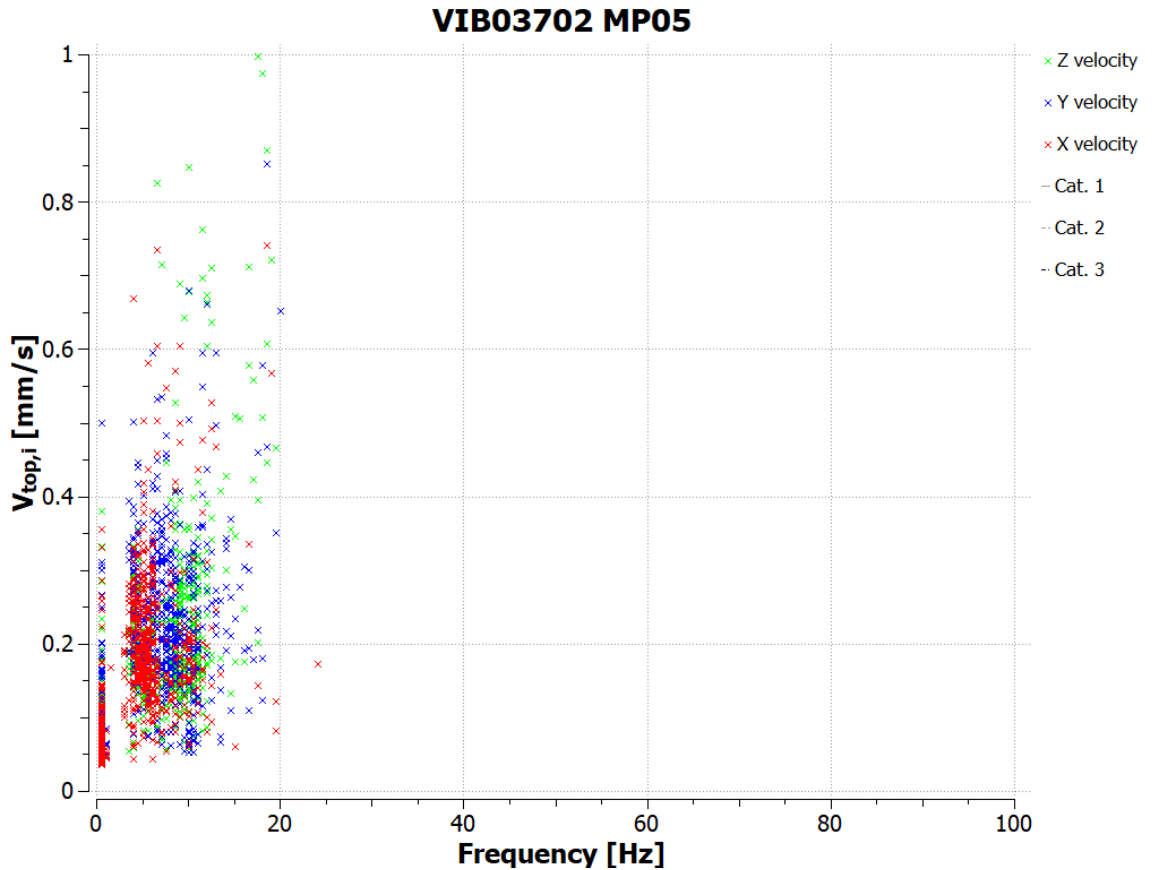
VIB03701 MP07



VIB00492 MP08

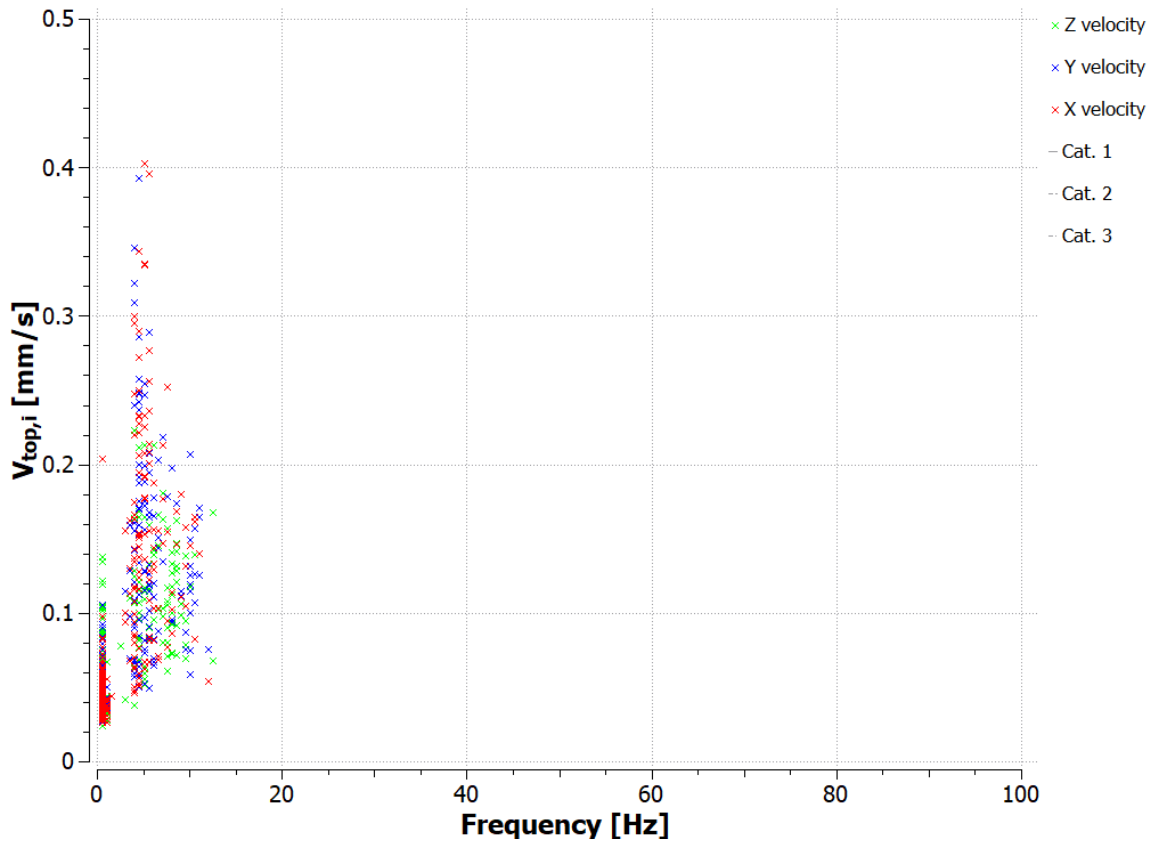


D.7 MEETRAAI 2, KLEIIGE ONDERGROND, SNELHEID VERSUS FREQUENTIE

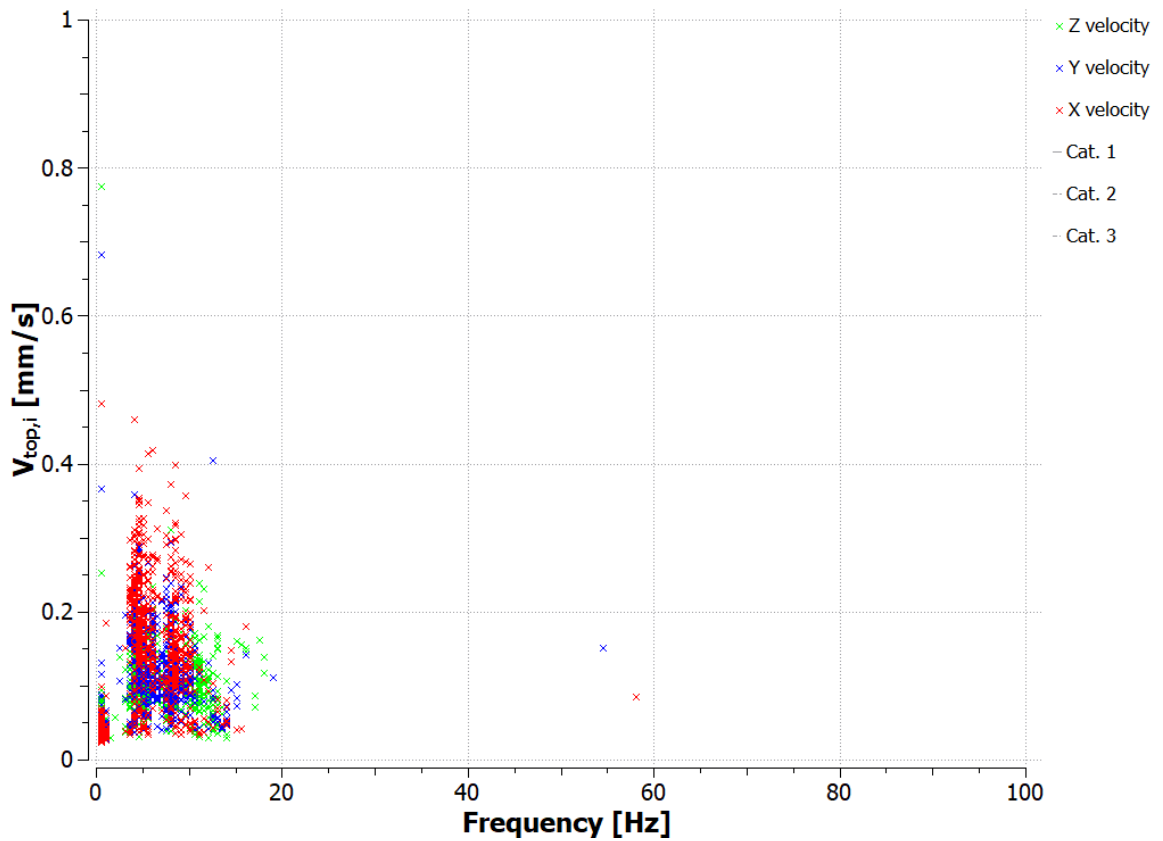




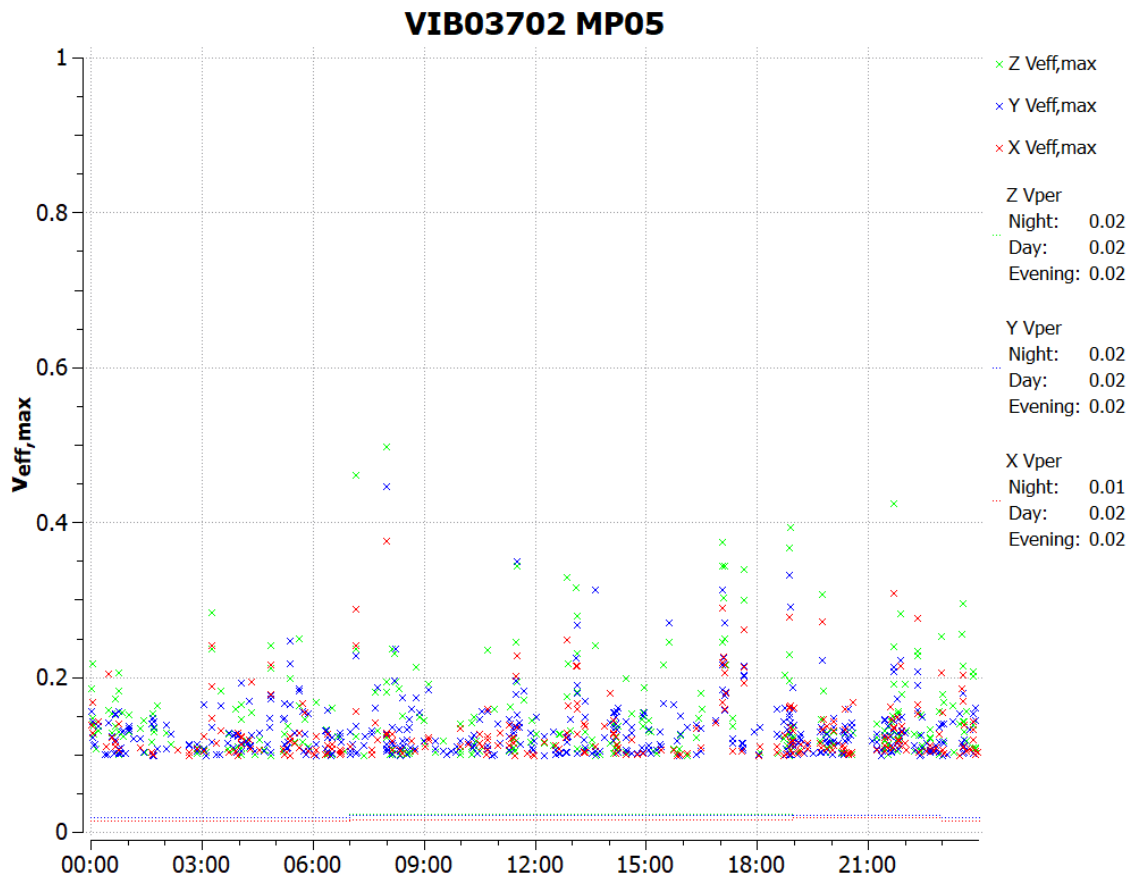
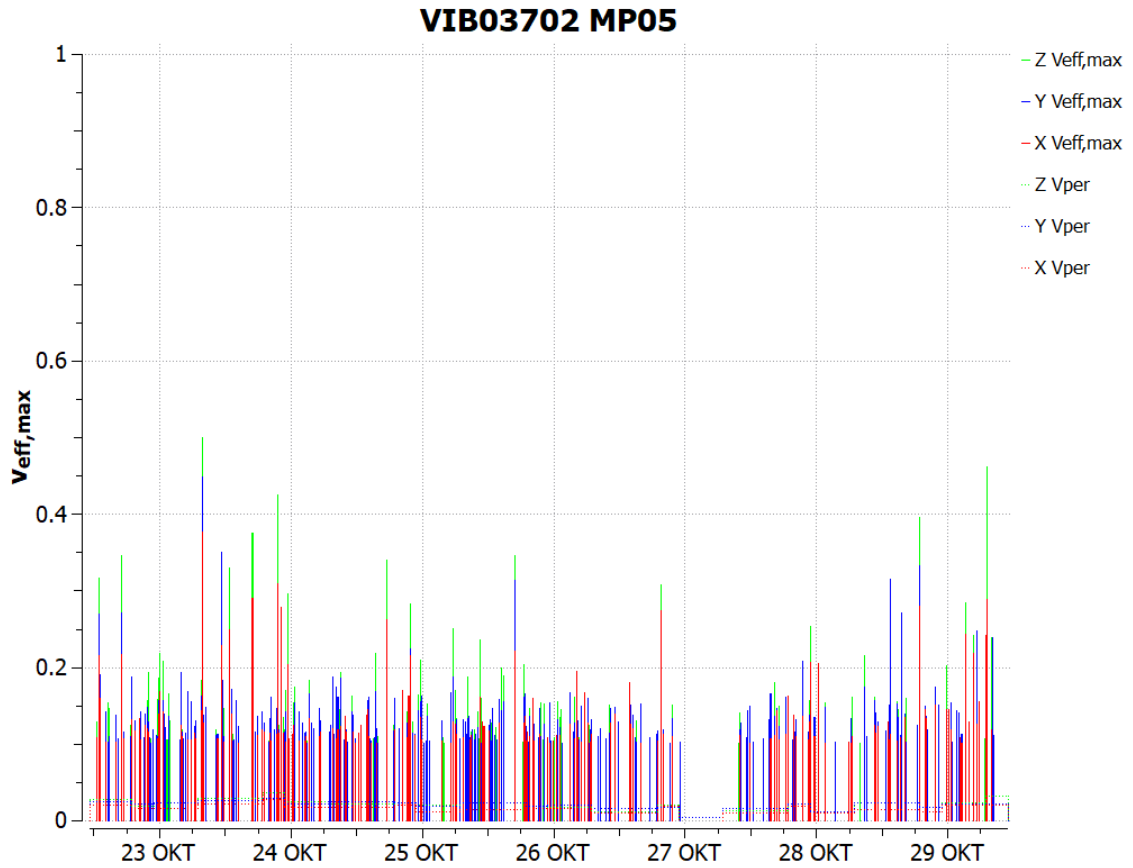
VIB03701 MP07



VIB00492 MP08

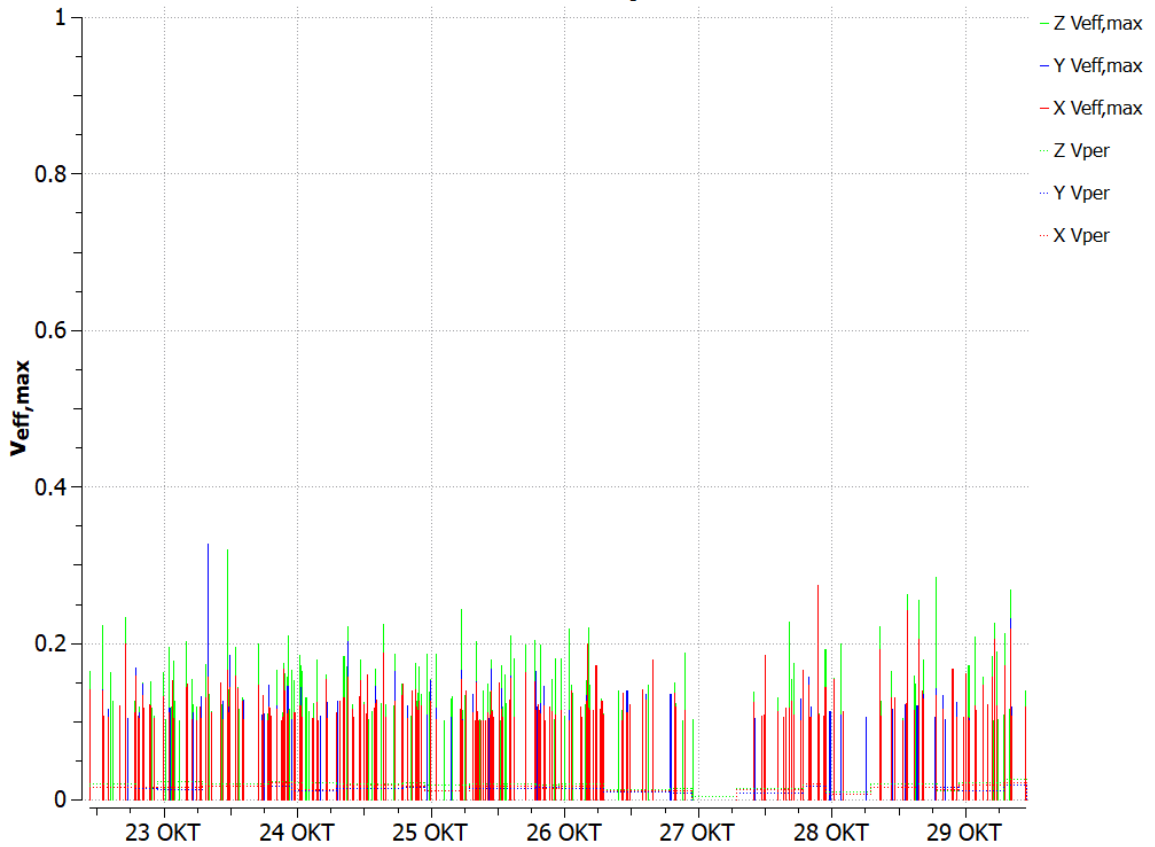


D.8 MEETRAAI 2, KLEIIGE ONDERGROND, EFFECTIEVE SNELHEID

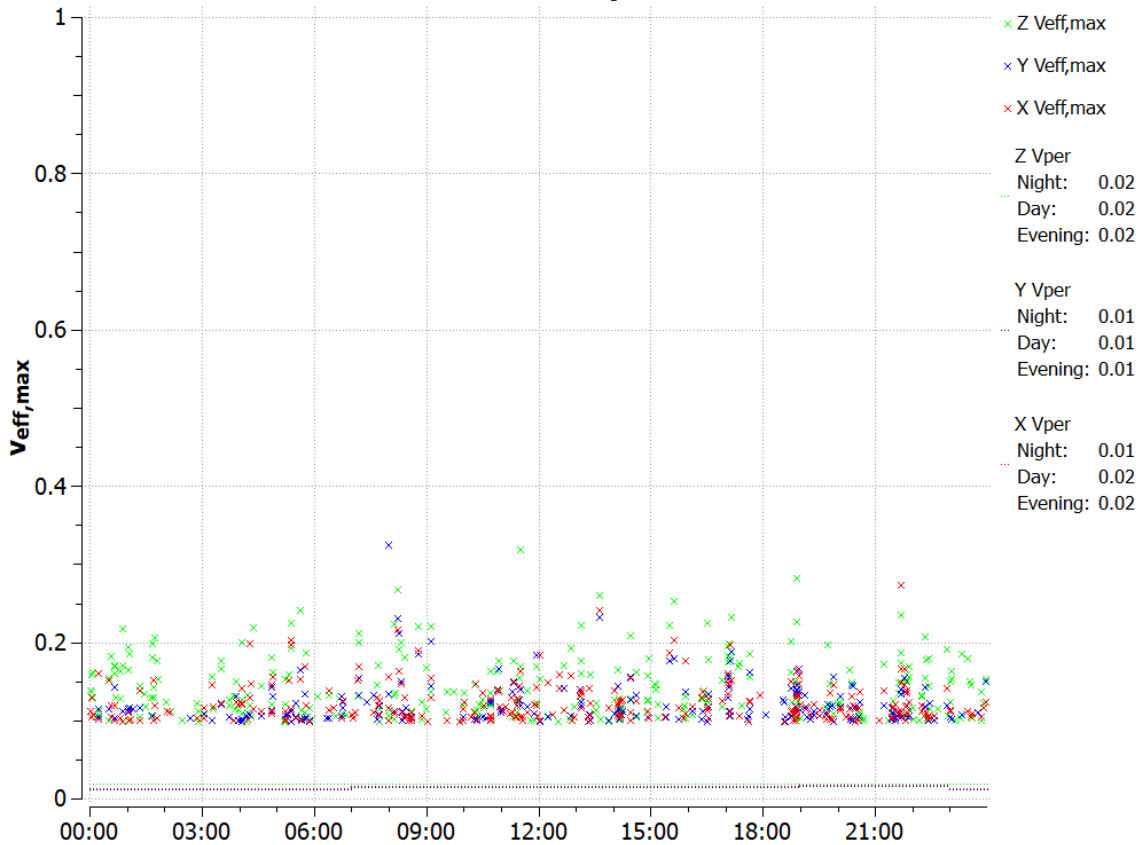




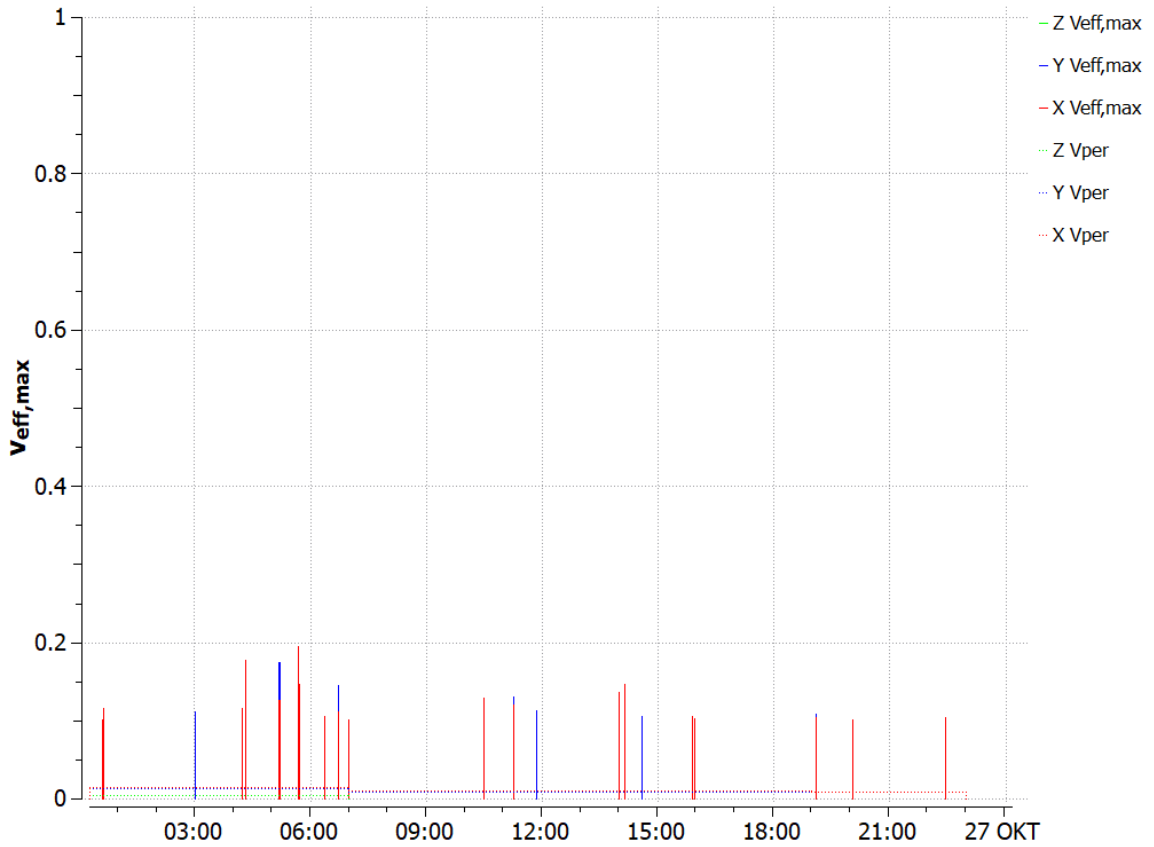
VIB03719 mp06



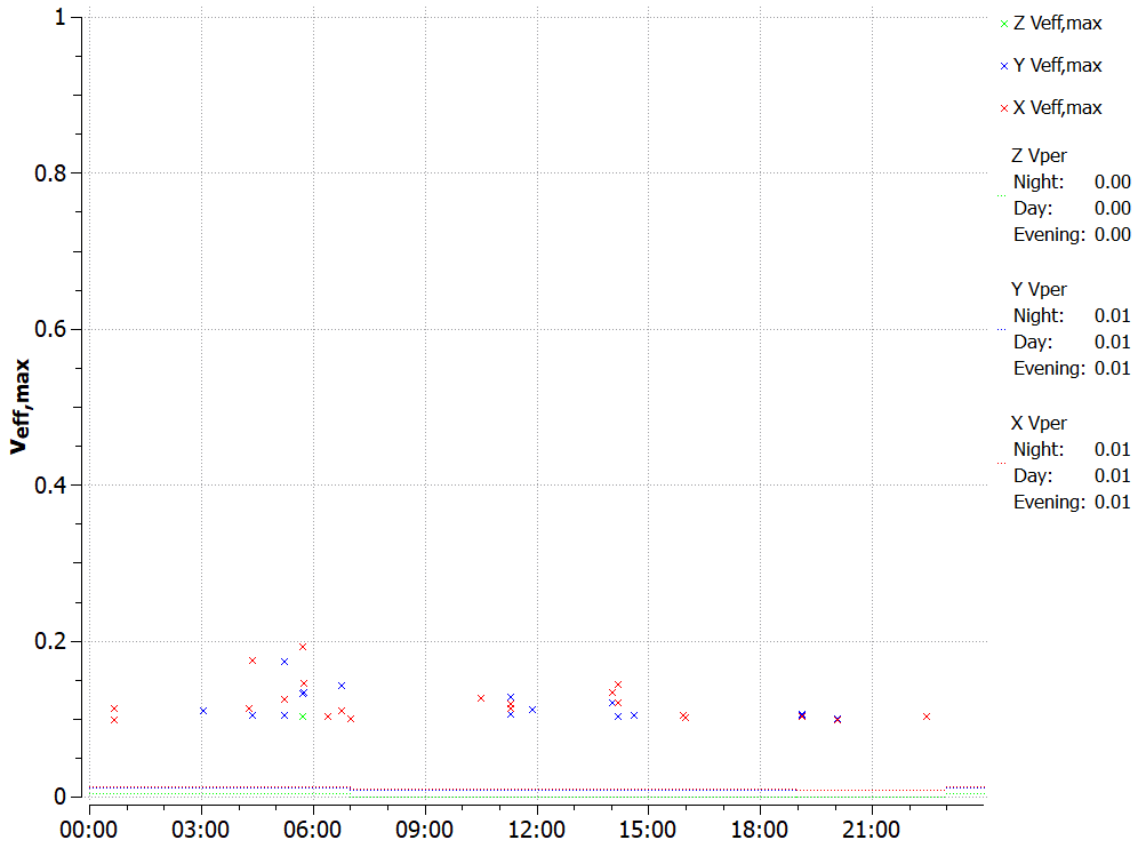
VIB03719 mp06



VIB03701 MP07

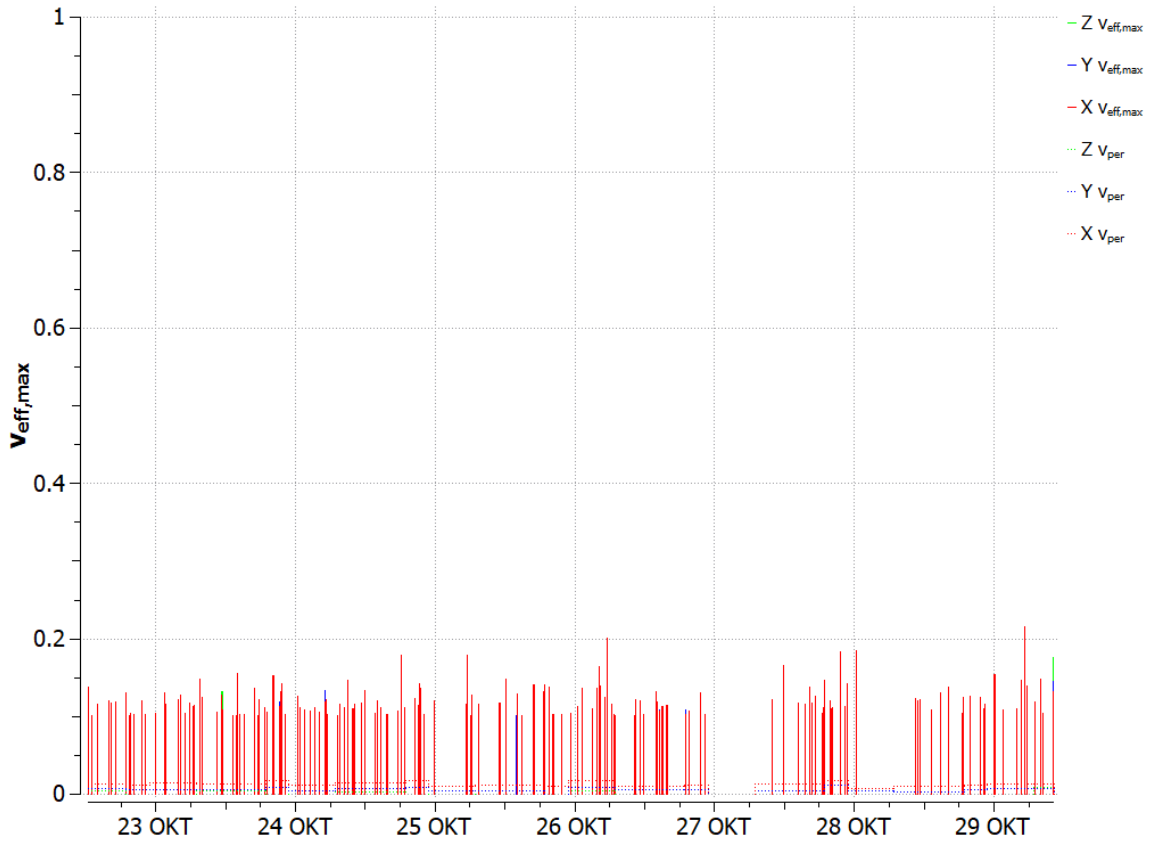


VIB03701 MP07





VIB00492 MP08



VIB00492 MP08

