

Rapport

Trambaan en keerlus Technopolis Delft

Prognose trillingen door keerlus bij VSL-gebouw

Rapportnummer SG 921-6-RA-002 d.d. 28 februari 2013

Opdrachtgever: TU Delft, FMVG / in samenspraak met VSL
Rapportnummer: SG 921-6-RA-002
Datum: 28 februari 2013
Ref.: BSn/BSn/CJ/SG 921-6-RA-002

Lid NLingenieurs
ISO-9001 gecertificeerd

Peutz bv
Paletsingel 2, Postbus 696
2700 AR **Zoetermeer**
Tel. (079) 347 03 47
Fax (079) 361 49 85
info@zoetermeer.peutz.nl

Lindenlaan 41, Molenhoek
Postbus 66, 6585 ZH **Mook**
Tel. (024) 357 07 07
Fax (024) 358 51 50
info@mook.peutz.nl

Oosterweg 127, Haren (Gn)
Postbus 7, 9700 AA **Groningen**
Tel. (050) 520 44 88
Fax (050) 526 31 78
info@groningen.peutz.nl

Montageweg 5
6045 JA **Roermond**
Tel. (0475) 324 333
info@roermond.peutz.nl

www.peutz.nl

Peutz GmbH
Düsseldorf, Dortmund, Berlin
info@peutz.de
www.peutz.de

Peutz SARL
Paris, Lyon
Info@peutz.fr
www.peutz.fr

Peutz bv
London
info@peutz.co.uk
www.peutz.co.uk

Daidalos Peutz bvba
Leuven
Info@daidalospeutz.be
www.daidalospeutz.be

Peutz
Sevilla
info@peutz.es
www.peutz.es

Köhler Peutz Geveltechniek bv
Zoetermeer
Info@gevel.com
www.gevel.com

Opdrachten worden aanvaard
en uitgevoerd volgens De
Nieuwe Regeling 2011

BTW identificatienummer
NL004933837B01
KvK: 12028033

Inhoud

pagina

1. INLEIDING	3
2. PROJECTOMSCHRIJVING	4
2.1. Probleemstelling	4
2.2. Situatie	4
2.3. Trillingeisen VSL	5
3. ONDERZOEKSMETHODE	6
3.1. Algemeen	6
3.2. Meting van trillingniveaus	7
3.3. Bepaling trillingafname met de afstand	8
3.4. Rekenmodel trillingoverdracht van bron naar vloer	8
4. TRILLINGAFNAME MET DE AFSTAND	10
4.1. Bodemconstante	10
4.2. Overdrachtsfunctie Barkan voor bodemdemping	11
4.3. Overdrachtsfunctie voor bodemdemping grafisch	11
4.4. Onnauwkeurigheidsschatting	12
5. TRILLINGOVERDRACHT VAN BODEM NAAR VLOERCONSTRUCTIE	13
5.1. Signaalruisverhouding - achtergrondniveau	13
5.2. Vrachtwagen	14
5.3. Vallende bigbag zand	15
5.4. Wackerstamper	15
5.5. Trillingoverdracht van bodem naar vloerconstructie	16
6. TRILLINGBRONNEN	17
6.1. Interne bronnen, achtergrondniveau	17
6.2. Externe bronnen, keerlus	18
7. PROGNOSE TRILLINGNIVEAU	19
7.1. Inleiding	19
7.2. Prognose voor maaiveld nabij VSL-nanolab	19
7.3. Prognose voor vloer VSL-nanolab	20
7.4. Prognose voor sommatie	21
8. CONCLUSIE	22
BIJLAGE I Grafieken	

1. INLEIDING

In opdracht van de Technische Universiteit Delft wordt een nieuw faculteitsgebouw ontworpen voor de faculteit Technische Natuurwetenschappen. Langs de nieuwbouwlocatie is een trambaan geprojecteerd met een halte en keerlus ter hoogte van het TNW-gebouw.

TU Delft FMVG onderzoekt de mogelijkheden om de trambaan en met name de keerlus zodanig in te richten en te projecteren, dat ten aanzien van de bouwlocatie de hinderlijke verstoringen door trillingen veroorzaakt door de passerende trams geminimaliseerd kunnen worden.

Eén van de te onderzoeken mogelijkheden bestaat uit de verlenging van de trambaan en verplaatsing van de keerlus naar een locatie direct ten zuiden van de Heertjeslaan. De afstand van de keerlus tot aan de trillingarme laboratoria in het TNW-gebouw neemt hiermee toe, met een verwachte afname van de trillingbijdrage tot gevolg.

Het verplaatsen van de keerlus heeft daarentegen wel tot gevolg dat de afstand tussen keerlus en het laboratorium van VSL (voorheen: NMI) kleiner wordt.

In afstemming met TU Delft en VSL is een onderzoeksprotocol opgesteld op basis waarvan gefundeerde conclusies getrokken kunnen worden of het verplaatsen van de keerlus een negatief effect op de corebusiness van het VSL zou kunnen hebben.

In voorliggend rapport zijn de resultaten van het onderzoek gepresenteerd.

Het onderzoek is uitgevoerd in samenspraak met VSL/TNO, de metingen bij het VSL ter bepaling van de trillingoverdracht en de achtergrondtrillingniveaus in het VSL-nanolab zijn uitgevoerd onder toezicht en in samenspraak met VSL/TNO.

2. PROJECTOMSCHRIJVING

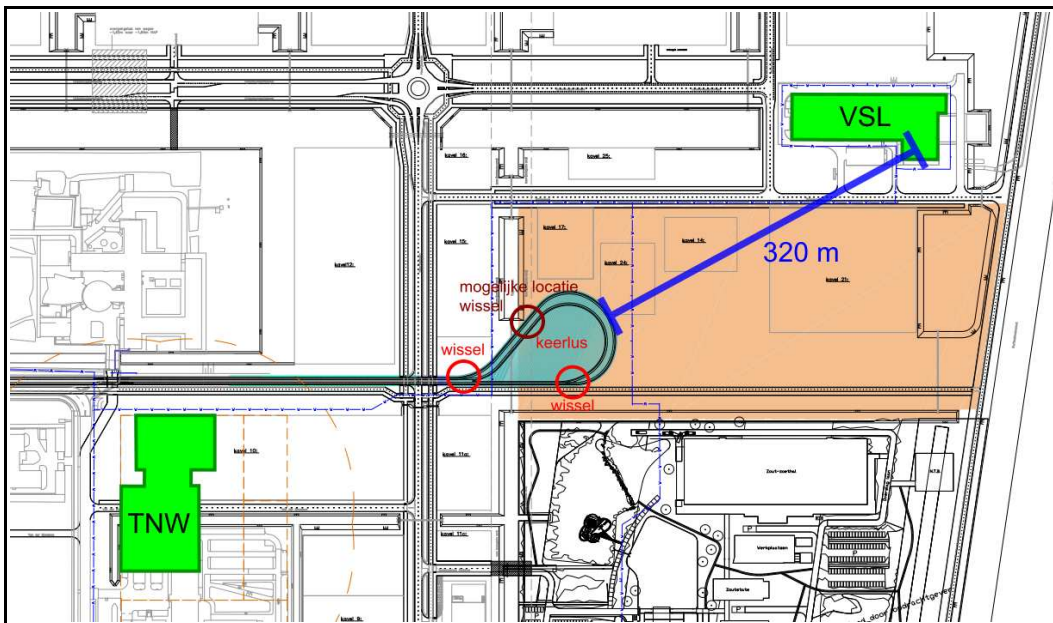
2.1. Probleemstelling

Ten behoeve van de trambaan naar Technopolis is ter hoogte van het RID en de nieuwbouwlocatie van TNW een keerlus geprojecteerd.

In verband met de strenge eisen inzake trillingen op de laboratoriumvloeren van de TNW-faculteit is door de TU Delft onderzoek laten doen naar het verplaatsen van de keerlus om een grotere afstand tot TNW en daarmee een lager trillingniveau te bewerkstelligen. Het verplaatsen van de keerlus heeft als gevolg dat de keerlus dichterbij het VSL-gebouw komt te liggen. Om de gevolgen voor het VSL inzichtelijk te maken is onderzoek gedaan naar de trillingniveaus op de maatgevende vloer van het VSL als gevolg van de keerlus op zekere afstand.

2.2. Situatie

Door de TU Delft is schetsmatig een voorstel gemaakt ten aanzien van de locatie van de keerlus. In onderstaande figuur is de situatieplattegrond weergegeven.



Figuur 1: Situatieplattegrond met TNW- en VSL-gebouw

De exacte informatie over de trambaan zoals vorm, fundering, uitvoering van de trambaan (enkel of dubbel) en locatie van de wissel is nog niet volledig uitgewerkt. Vooralsnog is uitgegaan van het ontwerp zoals dit is opgemaakt voor de huidige geplande locatie. De aangegeven afstand is de kortste afstand tussen keerlus en de maatgevende trillingarme vloer in het gebouw: het VSL-nanolab.

2.3. Trillingeisen VSL

In het VSL-gebouw is hoogwaardige onderzoeksapparatuur opgesteld waarmee metingen worden verricht die gevoelig zijn voor verstoringen door trillingen in de vloer.

Door VSL zijn de eisen opgegeven voor de meest kritische ruimten. De door VSL gebruikte apparatuur verrichten momentaan metingen en zijn met name gevoelig voor peak-to-peak verstoringen. Door VSL zijn de eisen dan ook als zodanig opgegeven. Bij beschouwing van rms-waarden wordt door VSL een waarde van 36% van de peak-to-peak-waarden geaccepteerd.

Tabel 1: Trillingeisen VSL

Ruimte	Frequentiebereik	Grenswaarde VSL-laboratoria	
		peak-to-peak waarde	rms-waarde
Nanolab	2 tot 30 Hz	70 nm	25 nm
Massalab	2 tot 30 Hz	250 nm	90 nm
Lab dynamische lengtemetingen	2 tot 30 Hz	500 nm	180 nm
Alle labs	30 tot 200 Hz	0,001 g = 10 mm/s ²	3,6 mm/s ²

Door VSL is tevens aangegeven dat een analyse op basis van een smalbandige Fourier transformatie het meest geschikt is voor de beoordeling van vibratiegedrag in de VSL-laboratoriumomgeving. Door VSL en TNO zijn metingen verricht waarbij van ieder snelheidssignaal per opnamer een gemiddelde peak-to-peak spectrum is gemaakt, daarbij is gemiddeld over meetblokken van 30 s. Door TNO is een sample rate gehanteerd van 1.000 Hz.

Door VSL wordt, gezien de onzekerheden, een veiligheidsmarge of risicomarge van 3 dB aangehouden, ofwel de trillingeisen worden een factor 0,70 bijgesteld.

Tabel 2: Trillingeisen VSL, met veiligheidsmarge

Ruimte	Frequentiebereik	Grenswaarde met veiligheidsmarge	
		peak-to-peak waarde	rms-waarde
Nanolab	2 tot 30 Hz	50 nm	18 nm
Massalab	2 tot 30 Hz	175 nm	63 nm
Lab dynamische lengtemetingen	2 tot 30 Hz	350 nm	125 nm
Alle labs	30 tot 200 Hz	7 mm/s ²	2,5 mm/s ²

3. ONDERZOEKSMETHODE

3.1. Algemeen

De invloed van de locatie van de keerlus op het trillingniveau in het VSL-gebouw is inzichtelijk gemaakt door een prognose te maken van de verwachte trillingniveaus.

Voor de bepaling van de (prognose) voor de trillingbijdrage van de trampassage op de vloer van het VSL-nanolab zijn de volgende aspecten in beschouwing genomen:

- trillingniveau van een vergelijkbare trambaan en een trampassage over een keerlus, hiervoor is uitgegaan van metingen bij de keerlus van Tanthof, Delft;
- trillingafname met de afstand, hiervoor is uitgegaan van het rekenmodel van Barkan, dat voor de lokale bodem is geverifieerd middels metingen langs de spoorbaan;
- trillingoverdracht van maaiveld naar vloer VSL-nanolab, hiertoe zijn overdrachtsmetingen gedaan met behulp van een vallende zandzak, een passerende vrachtwagen en een wackerstamper.

Op basis van metingen nabij een vergelijkbare trambaan in Tanthof, Delft zijn de trillingniveaus van de bron bepaald. Met betrekking tot fundatie is de gemeten situatie een worst case-situatie aangezien het een keerlus niet op betonfundatie betreft. Voor Technopolis wordt uitgegaan van betonfundatie

Met behulp van een rekenmodel voor frequentieafhankelijke trillingvoortplanting in de bodem is de trillingoverdracht over zekere afstand bepaald. Voor de afname met de afstand is uitgegaan van een frequentieafhankelijke trillingvoortplanting door de bodem volgens Barkan, waarin de overdracht van trillingen in de bodem wordt bepaald door de geometrische uitbreiding (wortel van quotiënt van afstanden) en door de bodemdemping (exponentiële term).

De afname met de afstand is bepaald op basis van een model voor bodemdemping. Hierbij wordt rekening gehouden met een betere afname voor trillingen met een hoge frequentie dan voor trillingen met een lage frequentie.

Voor de trillingoverdracht van de bodem naar de vloer van het VSL-gebouw is de trillingoverdracht bepaald middels simultane metingen zowel buiten op het maaiveld als binnen in het VSL-nanolab.

3.2. Meting van trillingniveaus

Afhankelijk van de betreffende meting is een meetpunt gekozen, bijvoorbeeld in het veld of op de vloer waarop een opstelling of bron is opgesteld. Op het meetpunt is een trillingopnemer geplaatst teneinde gedurende een bepaalde tijdsduur de trillingen in verticale richting (z-richting) en twee horizontale richtingen (x- en y-richting, axiaal) te registreren.

De metingen zijn uitgevoerd met behulp van de volgende instrumenten:

- trillingrecorder, fabricaat SYSCOM, type MR2002-CE;
- trillingopnemer, fabricaat SYSCOM, type MR2003+.

De metingen zijn geanalyseerd met behulp van analyseprogramma VIEW2002, Ziegler Consultants, versie 3.1.

De trillingopnemer is een triaxiale snelheidssensor en heeft een frequentiebereik van 1 tot 315 Hz. Het meetbereik in het tijddomein is 70 nm/s tot 2,3 mm/s. Het betreft hier de piekwaarden van de trillingsnelheid.

De trillingrecorder registreert de meetgegevens door het tijdsignaal discreet op te slaan, bemonsterd met een sample rate van maximaal 800 samples per seconde.

Van de gediscretiseerde tijdsignalen kan met behulp van het analyseprogramma een FFT-spectrum worden bepaald, waarmee tevens het trillingspectrum in RMS-waarden kan worden bepaald voor 1/3-octaaftanden (tertsbanden).

Voor de metingen wordt uitgegaan van records met een tijdlengte van 30 s. De Fouriertransformatie die hiermee mogelijk is, heeft betrekking op een tijdvak van $T = 20,48$ s en heeft een frequentieresolutie van $\Delta f = 0,049$ Hz.

Voor kortdurende verstoringen – bijvoorbeeld het vallen van een zandzak – wordt een bijpassend tijdvak gekozen voor de data-analyse. Dit heeft uiteraard gevolgen voor de frequentieresolutie. Waar van toepassing is één en ander nader vermeld.

De gemeten trillingniveaus worden in smalbandige Fouriertransformatie gepresenteerd als peak-to-peak waarden, en daarnaast voor de 1/3-octaaftanden als RMS-waarden (dB re. 10^{-9} m/s).

3.3. Bepaling trillingafname met de afstand

Voor de afname met de afstand is uitgegaan van een frequentie afhankelijke trillingvoortplanting door de bodem volgens Barkan, waarin de overdracht van trillingen in de bodem wordt bepaald door de geometrische uitbreiding (wortel van quotiënt van afstanden) en door de bodemdemping (exponentiële term).

De trillingafname in de bodem kan bepaald worden door van een zekere bron de veroorzaakte trillingen op verschillende afstanden te meten en onderling te vergelijken. Door de frequentiespectra voor de verschillende meetlocaties onderling te vergelijken is een frequentie afhankelijke relatie te onderscheiden tussen trillingafname en afstand.

3.4. Rekenmodel trillingoverdracht van bron naar vloer

De trillingen op de vloerconstructie ten gevolge van trillingen veroorzaakt door een bron in de omgeving kunnen worden bepaald door het bronspectrum te vermenigvuldigen met de relevante overdrachtsfuncties. Aangezien de trillingen (achtergrondniveau, trambaan) zijn gemeten in snelheden, worden de trillingen op de vloer als volgt berekend:

$$V_{vloer}(f) = H_{constr}(f) \cdot H_{bodem}(f) \cdot V_{bron}(f)$$

waarin: $H_{constr}(f)$: overdrachtsfunctie van bodem naar vloerconstructie;
 $H_{bodem}(f)$: overdrachtsfunctie van bodem over een bepaalde afstand;
 $V_{bron}(f)$: spectrum trillingbron, snelheid in bodem;
 $V_{vloer}(f)$: spectrum trillingen op vloer, snelheid;
 f : frequentie.

De overdrachtsfunctie van de bodem naar de vloer van het VSL-nanolab is bepaald door de trillingen in bodem en vloer simultaan te meten bij een trillingbron buiten. Hiertoe is zowel binnen op de vloer van het VSL-nanolab een trillingopnemer geplaatst, alsook naast het gebouw – in de fietsenberging – een trillingopnemer. Beide opnemers zijn op gelijke afstand van de externe trillingbronnen opgesteld, te weten:

- een passerende vrachtwagen, rijdend over een opzettelijk aangebrachte hobbel;
- een bigbag zand die uit de kraan valt;
- een wackerstamper die trillingen opwekt in het voorliggende grasveld.



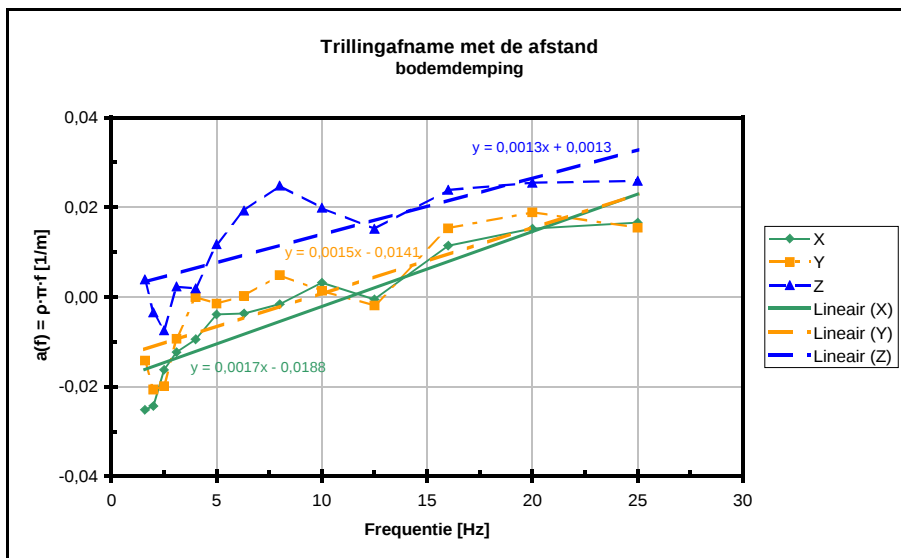
Figuur 2: Bepaling trillingoverdracht vloer met vallende bigbag zand

4. TRILLINGAFNAME MET DE AFSTAND

4.1. Bodemconstante

Op verschillende afstanden van de spoorbaan Delft – Rotterdam zijn de trillingniveaus gemeten die veroorzaakt worden door passerende treinen. Bij de metingen zijn treinen rijdend in beide richtingen in beschouwing genomen. De afstanden tot de spoorbaan zijn 60 m, 100 m en 150 m.

Op basis van de trillingniveaus die op de verschillende afstanden (60, 100 en 150 m) van de passerende treinen zijn gemeten, is de trillingafname bepaald voor de tertsbanden tot en met 25 Hz.



Figuur 3: Bodemdemping en trillingafname met de afstand, bepaald op basis van metingen

De bepaalde trillingafname met de afstand geldt in benadering voor een lijnvormige bron (feitelijk beweegt de trillingbron zich langs een lijn).

De bodemdemping is voor de verschillende trillingrichtingen (x-, y- en z-richting) grafisch weergegeven in bovenstaande figuur voor de tertsbanden van 1,6 tot en met 25 Hz. Tevens is voor elke serie een rechte getrokken die de frequentie afhankelijkheid van de bodemdemping uitdrukt.

Voor de helling (bodemconstante ρ maal π) worden voor de verschillende richtingen waarden gevonden van $1,3 \cdot 10^{-3}$ tot $1,7 \cdot 10^{-3}$ s/m, met een gemiddelde bodemconstante ρ van circa $4,7 \cdot 10^{-4}$ s/m. Voor onderhavig onderzoek wordt deze waarde gehanteerd voor de bepaling van de trillingreductie door afstand.

4.2. Overdrachtsfunctie Barkan voor bodemdemping

De overdrachtsfunctie voor bodemdemping wordt met de formule van Barkan als volgt:

$$H_{\text{bodem}}(f) = \frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{x_1}{x_2}} \times e^{-\rho \pi f (x_2 - x_1)}$$

waarin: $-\rho \pi = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ s/m}$ (zie voorgaande paragraaf).

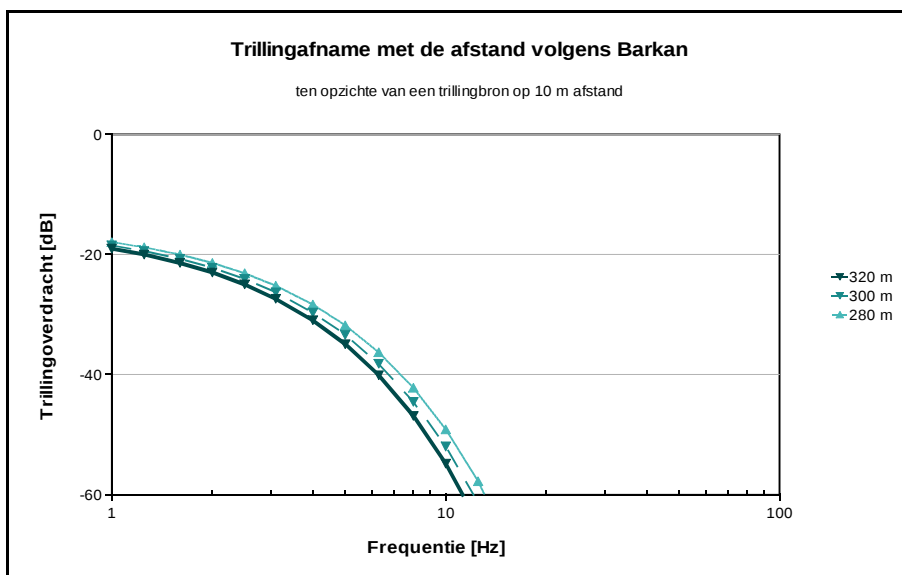
Als een trillingniveau v_1 is gemeten op een afstand x_1 vanaf de trillingbron, dan wordt met deze formule van Barkan het trillingniveau v_2 berekend op een afstand x_2 vanaf diezelfde trillingbron. Bij gebruik van het rekenmodel wordt rekening gehouden met de afstand tussen meetpunt en feitelijke trillingbron, om vervolgens het trillingniveau te bepalen op een afstand ten opzichte van de trillingbron. Met de *verhouding* (x_1/x_2) van beide afstanden is deze eerste afstand tussen meetpunt en trillingbron in het rekenmodel verdisconteerd.

In de formule van Barkan staat de eerste term voor de geometrische uitdijning van het golffront. Bijvoorbeeld, bij een meting op 10 m afstand van de bron en een ontvangstpunt op een afstand van 40 m van de bron bedraagt de eerste term $\sqrt{(10/40)} = 0,5$ ofwel -6 dB.

De tweede term (exponentiële term) staat voor de demping in de bodem (weerstand of wrijving). Deze demping (door wrijving in de bodem) is enerzijds afhankelijk van de bodemsamenstelling, anderzijds afhankelijk van de golflengte, ofwel de frequentie.

4.3. Overdrachtsfunctie voor bodemdemping grafisch

Als voor de initiële afstand tot de trillingbron een afstand van 10 m wordt aangehouden, kunnen de overdrachtsfuncties voor bodemdemping grafisch weergegeven worden zoals in figuur 4 voor verschillende afstanden tot de trillingbron (320 m, 300 m en 280 m).



Figuur 4: Overdrachtsfunctie voor bodemdemping voor verschillende afstanden ten opzichte van de initiële afstand van 10 m

4.4. Onnauwkeurigheidsschatting

Voor de afstand tussen het VSL-nanolab en de buitenbocht van de keerlus is circa 320 m aangehouden. Een eventuele afwijking van deze afstand leidt tot een afwijking van de trillingafname met de afstand. Het maatgevende frequentiebereik voor de vloer van het VSL-nanolab blijkt 2 tot 3 Hz te zijn, zie figuur 14 inzake de prognose op de vloer VSL-nanolab. Bij een afstand van 300 m of 280 m is de trillingafname bij deze frequenties 1 respectievelijk 2 dB minder.

De bodemconstante voor het rekenmodel van Barkan is voor deze bodem geverifieerd middels metingen nabij de spoorbaan.

Voor de helling (bodemconstante ρ maal π) worden voor de verschillende richtingen waarden gevonden van $1,3 \cdot 10^{-3}$ tot $1,7 \cdot 10^{-3}$ s/m, met een gemiddelde van $1,5 \cdot 10^{-3}$ s/m. Voor het rekenmodel is uitgegaan van een gemiddelde bodemconstante ρ van circa $4,7 \cdot 10^{-4}$ s/m. Als uitgegaan wordt van $(1,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$ s/m komt dit voor het frequentiebereik van 2 tot 3 Hz neer op een onnauwkeurigheid van $\pm 1,5$ dB.

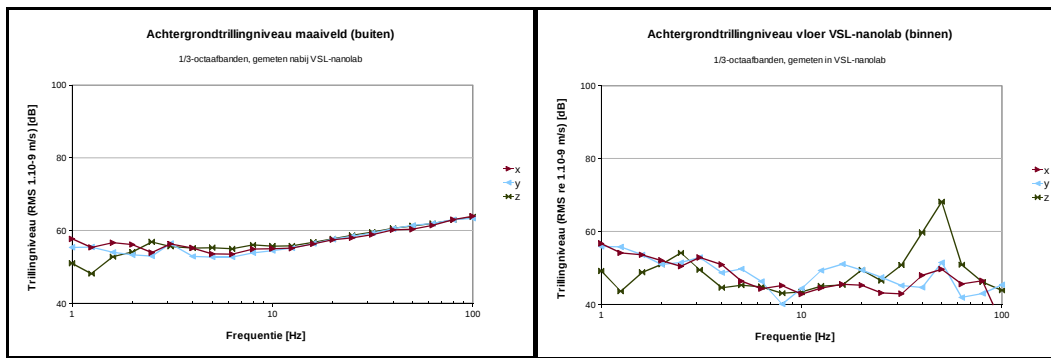
Vooralsnog is er geen verder uitgewerkt ontwerp voor de keerlus voorhanden. De afstand van 320 m kan als ontwerpuitgangspunt dienen.

De onnauwkeurigheid in het rekenmodel van Barkan is voor het maatgevende frequentiebereik van 2 tot 3 Hz bepaald op $\pm 1,5$ dB.

5. TRILLINGOVERDRACHT VAN BODEM NAAR VLOERCONSTRUCTIE

5.1. Signaalruisverhouding - achtergrondniveau

Voor de interpretatie van de metingen die gebruikt zijn om een inschatting te maken van de overdrachtsfunctie van bodem naar vloer, is in eerste instantie de signaalruisverhouding inzichtelijk gemaakt. In onderstaande figuren is het achtergrondniveau weergegeven, zowel voor het maaiveld (buiten) als de vloer van het VSL-nanolab (binnen).



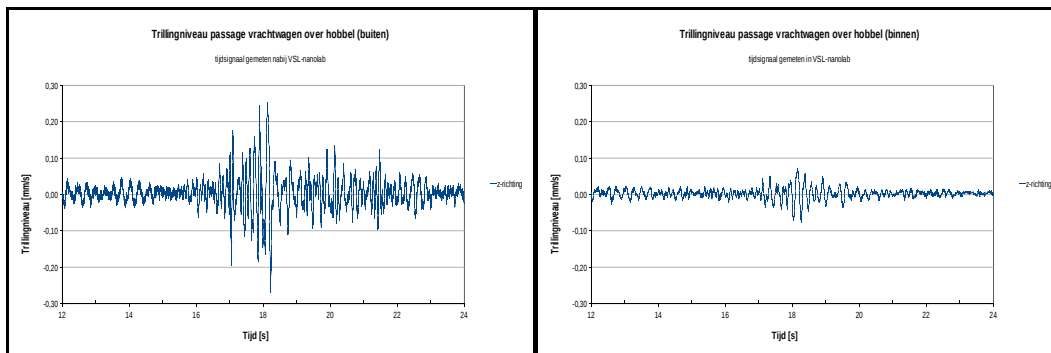
Figuur 5: Achtergrondtrillingniveau (a) maaiveld en (b) vloer VSL-nanolab

Uit deze figuren blijkt dat de overdracht niet goed bepaald kan worden als het bronsignaal (trillingen gemeten op maaiveld) lager zijn dan orde grootte 60 dB. Tevens dient het ontvangtsignaal (trillingen gemeten op vloer nanolab) hoger te zijn dan 55 à 60 dB.

Opvallend is het hoge trillingniveau in de z-richting rondom 50 Hz, gemeten op de vloer van het VSL-nanolab. Door de aanwezige, vooralsnog onbekende, interne bronnen is de overdrachtsfunctie rondom 50 Hz alleen te meten als het ontvangtsignaal hoger is dan 70 dB.

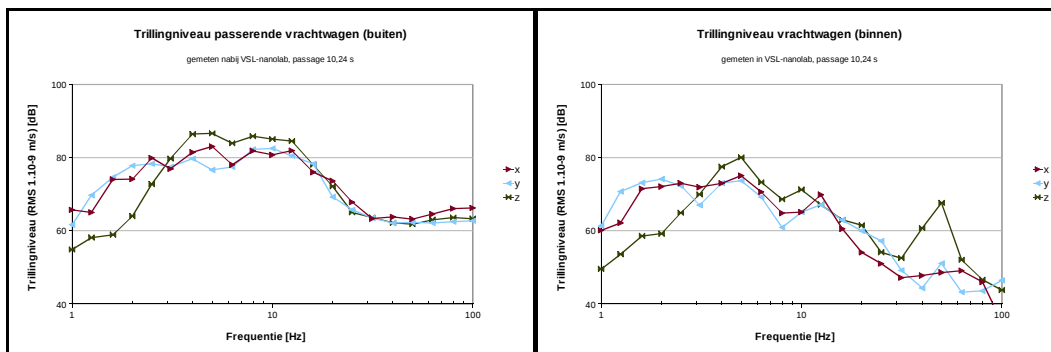
5.2. Vrachtwagen

Door de vrachtwagen te laten passeren over een opzettelijk aangebrachte hobbel op de weg langs het VSL-gebouw, kunnen de trillingniveaus zowel binnen als buiten worden gemeten en onderling vergeleken.



Figuur 6: Trillingmeting bij passage vrachtwagen over een hobbel op (a) maaiveld en op (b) vloer VSL-nanolab

Na frequentie-analyse kunnen beide trillingniveaus kwantitatief bepaald worden. Hierbij blijkt duidelijk dat het bronsignaal alleen bruikbaar is tot circa 20 Hz. Vanaf 20 Hz is het trillingniveau buiten vergelijkbaar met het achtergrondniveau. Daarnaast wordt het trillingniveau binnen vanaf 30 HZ bepaald door de interne bronnen.

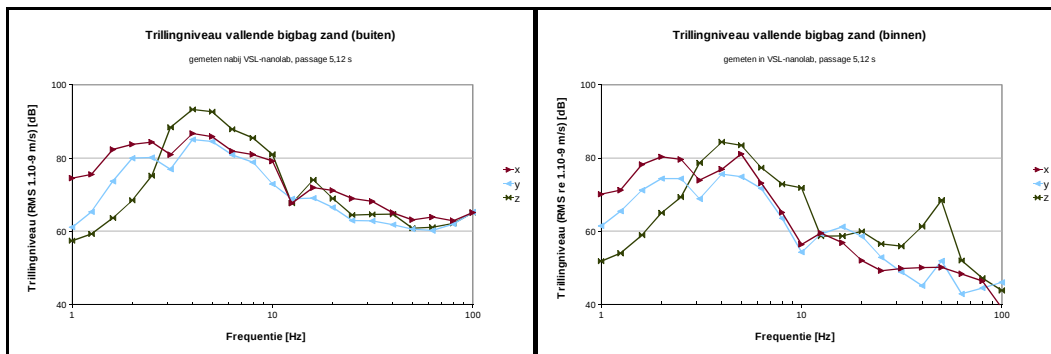


Figuur 7: Trillinganalyse van passage vrachtwagen op (a) maaiveld en op (b) vloer VSL-nanolab

De afstand tussen de passerende vrachtwagen en de meetposities (zowel binnen als buiten) bedraagt circa 30 m.

5.3. Vallende bigbag zand

Met de vallende bigbag zand worden hogere niveaus voor de frequenties boven 20 Hz opgewekt. Daarmee is deze proef bruikbaar om de trillingoverdracht over het gehele frequentiebereik te bepalen. Uitzondering vormen de trillingniveaus in z-richting, hierbij is het achtergrondniveau op de vloer van het VSL-nanolab wederom overheersend.

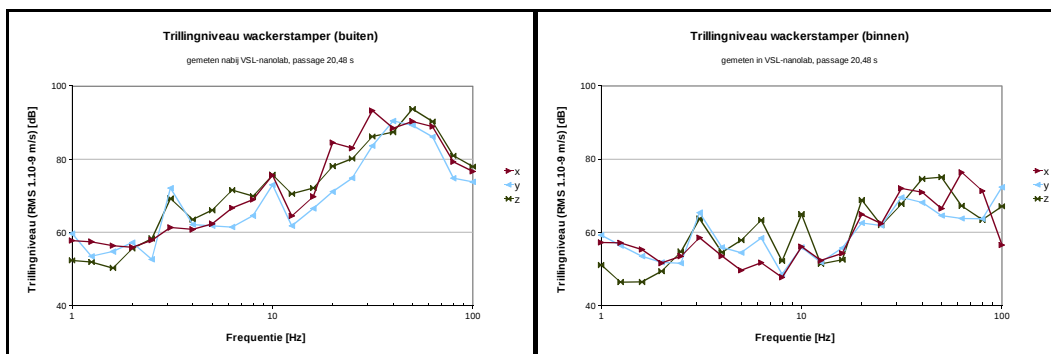


Figuur 8: Trillinganalyse van vallende bigbag zand op (a) maaiveld en op (b) vloer VSL-nanolab

De afstand tussen de vallende bigbag zand en de meetposities (zowel binnen als buiten) bedraagt circa 30 m.

5.4. Wackerstamper

De wackerstamper biedt voornamelijk een hoogfrequent bronspectrum aan (10 Hz en hoger). Het gemeten trillingniveau binnen is ruimschoots hoger dan het achtergrondtrillingniveau op de vloer VSL-nanolab. Daarmee is deze meting goed bruikbaar om de trillingoverdracht te bepalen voor het frequentiebereik van 20 tot 80 Hz.

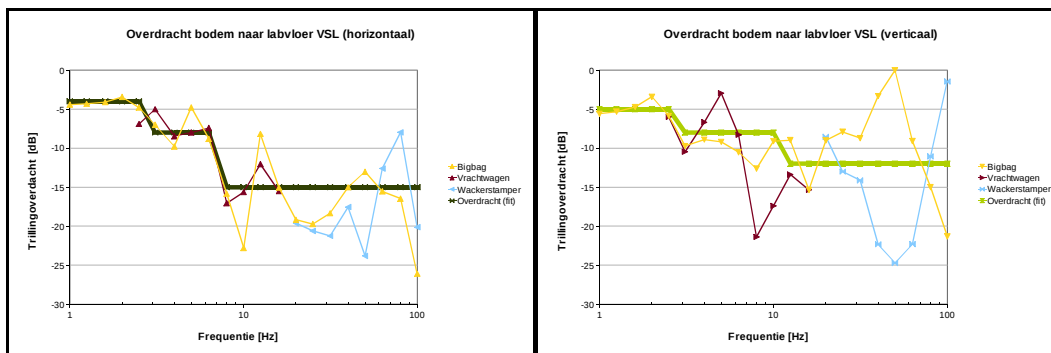


Figuur 9: Trillinganalyse van wackerstamper op (a) maaiveld en op (b) vloer VSL-nanolab

De afstand tussen de wackerstamper en de meetposities (zowel binnen als buiten) bedraagt circa 18 m.

5.5. Trillingoverdracht van bodem naar vloerconstructie

Door vergelijking van de bronsignalen en de ontvangstsignalen worden voor de verschillende metingen de overdrachtsfuncties gevonden. Met name de bigbag zand en de vrachtwagen zijn bruikbaar voor het frequentiebereik van 1 tot 20 Hz. De bigbag zand en de wackerstamper zijn bruikbaar voor het frequentiebereik van 20 tot 80 Hz. Uitzondering hiervoor zijn de trillingen in de z-richting: vanwege het hoge achtergrondniveau in het VSL-nanolab is voor de z-richting alleen de wackerstamper bruikbaar om de overdracht te bepalen.



Figuur 10: Overdrachten van bodem naar vloer voor (a) horizontale en (b) verticale trillingen

Op basis van de gemeten trillingoverdrachten is een fit gemaakt, die gehanteerd wordt voor het rekenmodel. Deze fit is – zowel horizontaal alsook verticaal – in bovenstaande figuren weergegeven.

Het maatgevende frequentiebereik voor de vloer van het VSL-nanolab blijkt 2 tot 3 Hz te zijn, zie figuur 14 inzake de prognose op de vloer VSL-nanolab. In dit frequentiebereik is met de bigbag zand een significant hoger trillingniveau buiten én binnen veroorzaakt, waarmee een zeer goede overdrachtsfunctie kan worden bepaald. Deze overdracht wordt op basis van de metingen met de vrachtwagen bevestigd.

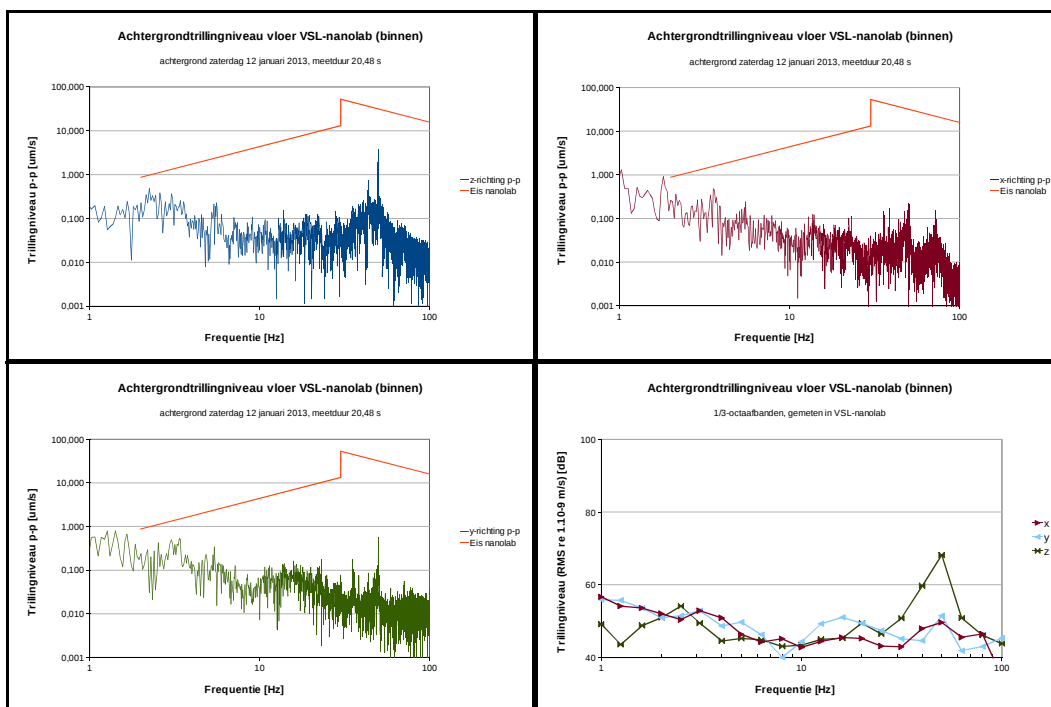
De onnauwkeurigheid in de overdrachtsfunctie is voor het maatgevende frequentiebereik van 2 tot 3 Hz bepaald op ± 1 dB, de meetonnauwkeurigheid.

6. TRILLINGBRONNEN

6.1. Interne bronnen, achtergrondniveau

Ter verificatie zijn op zaterdag 12 januari 2013 achtergrondmetingen verricht op de vloer van het VSL-nanolab. Deze metingen zijn vergelijkbaar met de eerder verrichte metingen door TNO/VSL qua locatie, meetmethode en analyse, behoudens het gegeven dat de metingen van TNO/VSL hebben plaatsgevonden op een reguliere werkdag.

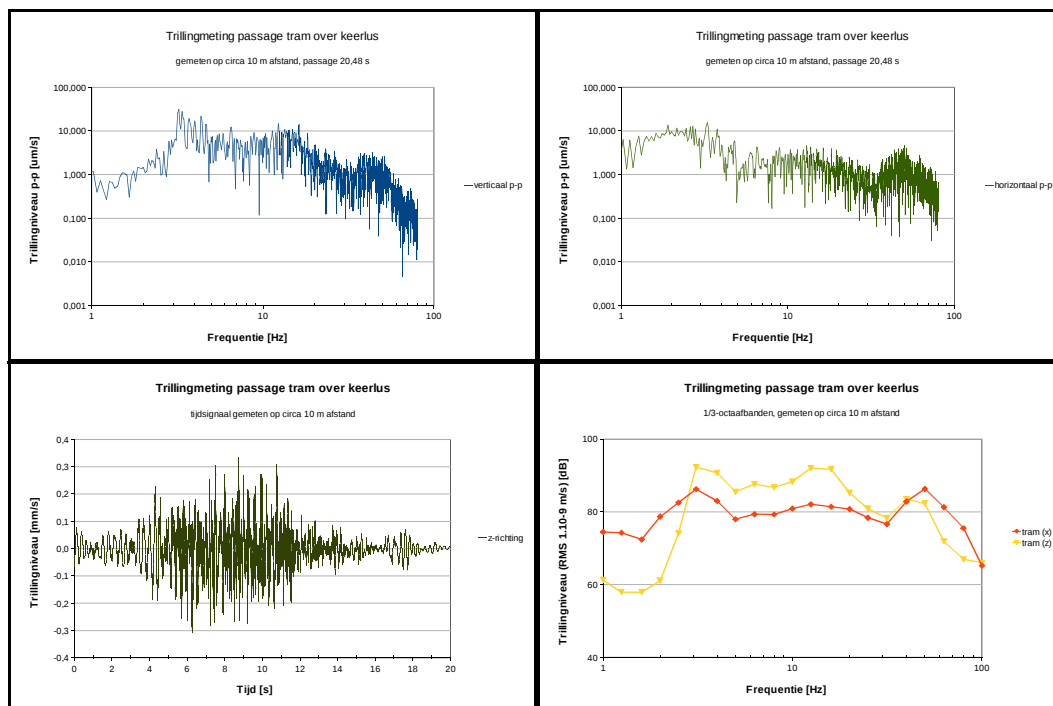
Op de betreffende zaterdag was nauwelijks sprake van activiteiten in en rondom het gebouw die gebruikelijk wel plaatsvinden op een reguliere werkdag. Overeenkomstig de verwachting zijn de gemeten trillingniveaus op de vloer van VSL-nanolab lager dan op de reguliere werkdag.



Figuur 11: Achtergrondtrillingniveau op vloer VSL-nanolab in smalbandige weergave (p-p) en in 1/3-octaaftanden (rms)

6.2. Externe bronnen, keerlus

De keerlus van de trambaan wordt beschouwd als maatgevende externe trillingbron. De afstand tot de wissel en de tramhalte zijn groter, terwijl met name de horizontale trillingen – dwars op de trambaan – in de keerlus relatief hoog zijn. In onderstaande figuren worden de trillingniveaus getoond, gemeten op een afstand van circa 10 m.



Figuur 12: Trillingen gemeten op 10 m afstand in maaiveld als gevolg van passage tram over keerlus als tijdsignaal, in smalbandige weergave (p-p) en in 1/3-octaaftanden (rms)

7. PROGNOSE TRILLINGNIVEAU

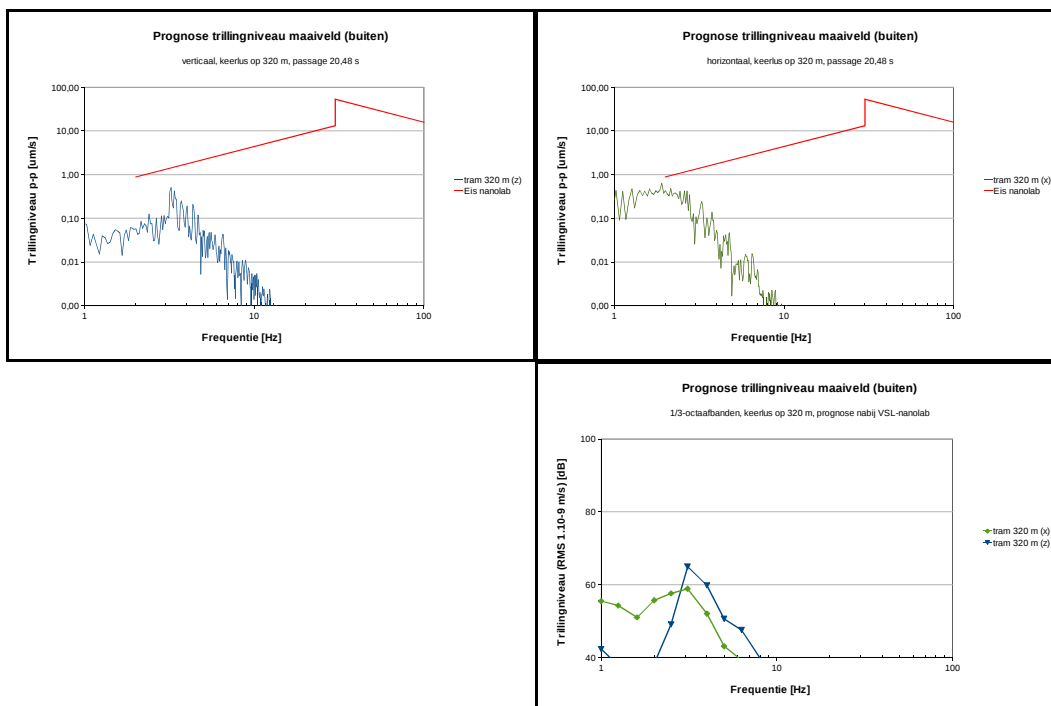
7.1. Inleiding

Voor het trillingniveau als gevolg van de trampassage over de keerlus op 320 m afstand is een prognose gemaakt met behulp van de bronniveaus, de trillingafname door de afstand en de overdracht van bodem naar vloer.

De prognose is gemaakt voor het trillingniveau in het maaiveld, nabij het VSL-gebouw, en voor het trillingniveau op de vloer van VSL-nanolab. Tenslotte is tevens een prognose gemaakt van de sommatie van de achtergrondtrillingen en de trampassage.

7.2. Prognose voor maaiveld nabij VSL-nanolab

In onderstaande figuren is de prognose gegeven voor de trillingniveaus in het maaiveld, nabij het VSL-gebouw, als gevolg van een trampassage over een keerlus op 320 m afstand.

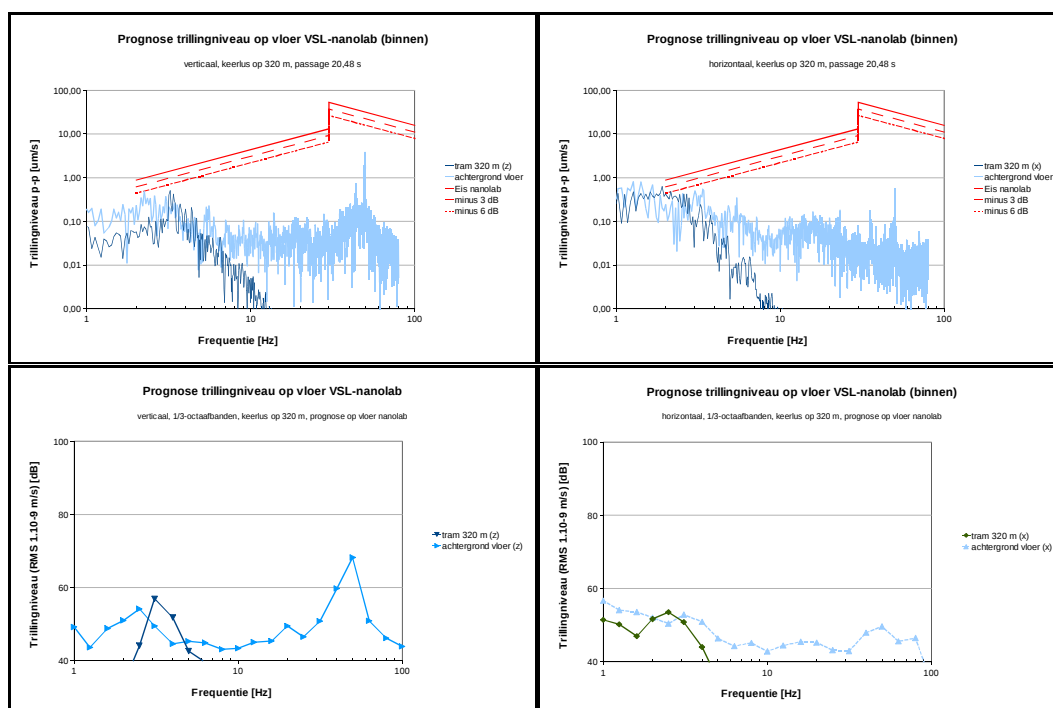


Figuur 13: Prognose trillingen in maaiveld, nabij VSL-gebouw, als gevolg van passage tram over keerlus in smalbandige weergave (p-p) en in 1/3-octaaftanden (rms)

De VSL-eis geldt uiteraard niet voor het maaiveld, maar deze is ter illustratie opgenomen.

7.3. Prognose voor vloer VSL-nanolab

In onderstaande figuren is de prognose gegeven voor de trillingniveaus op de vloer van VSL-nanolab als gevolg van een trampassage over een keerlus op 320 m afstand.

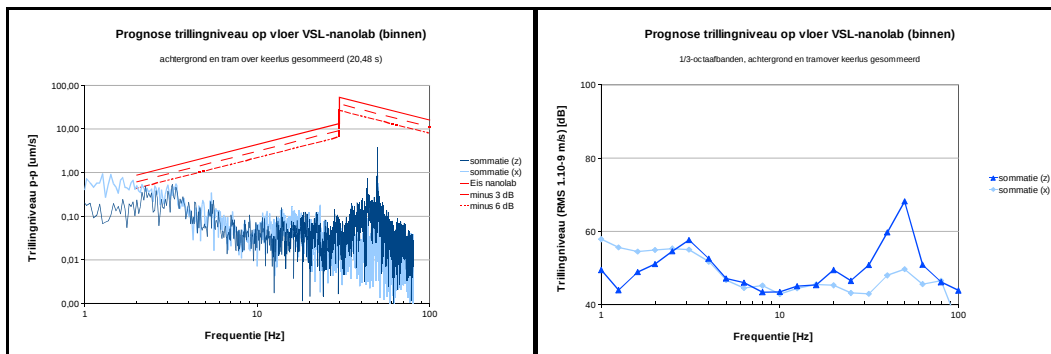


Figuur 14: Prognose trillingen op vloer VSL-nanolab als gevolg van passage tram over keerlus in smalbandige weergave (p-p) en in 1/3-octafbanden (rms)

De bijdrage van de trampassage over de keerlus is lager of vergelijkbaar aan het gemeten achtergrondniveau (zaterdagmeting). Daarnaast is het trillingniveau in de horizontale richting circa 6 dB lager dan het gestelde trillingeisen (VSL-eisen). Voor de verticale richting is de marge zelfs 9 dB.

7.4. Prognose voor sommatie

In onderstaande figuren is de prognose gegeven voor de gesommeerde trillingniveaus op de vloer van VSL-nanolab als gevolg van een trampassage over een keerlus op 320 m afstand, tezamen met het gemeten achtergrondniveau. Bij de sommatie is als worst-case uitgangspunt aangenomen dat elke 30 s een trampassage optreedt.



Figuur 15: Prognose energetisch gesommeerde trillingen op vloer VSL-nanolab in smalbandige weergave (p-p) en in 1/3-octafbanden (rms)

Ook uit sommatie blijkt de beperkte bijdrage van de trampassage over de keerlus: het gesommeerde niveau is nauwelijks te onderscheiden van het achtergrondniveau.

Het gesommeerde niveau blijft 6 dB of meer onder de gestelde trillingeisen (VSL-eisen).

8. CONCLUSIE

Op basis van het onderzoek en de prognose voor de trillingbijdrage als gevolg van de passage van de tram over de keerlus op een afstand van 320 m wordt het volgende geconcludeerd:

1. De prognose voor de trillingbijdrage op de vloer van VSL-nanolab als gevolg van de trampassage ligt onder het achtergrondtrillingniveau gemeten op zaterdag. Uit vergelijking met eerdere metingen uitgevoerd door VSL/TNO blijkt dat het gemeten achtergrondtrillingniveau op zaterdag lager ligt dan het trillingniveau dat gemeten is op een reguliere werkdag;
2. De trillingbijdrage op de vloer van VSL-nanolab als gevolg van de trampassage ligt voor de lage frequenties van 2 tot 5 Hz minimaal 6 dB onder de trillingeisen van VSL, zoals die zijn vermeld in paragraaf 2.3;
3. De trillingbijdrage op de vloer van VSL-nanolab als gevolg van de trampassage ligt minimaal 18 dB onder de trillingeisen van VSL voor de frequenties van 5 tot 10 Hz;
4. De trillingbijdrage als gevolg van de trampassage is verwaarloosbaar voor de frequenties hoger dan 10 Hz;
5. Uit vergelijking met eerdere metingen uitgevoerd door VSL/TNO blijkt dat de trillingbijdrage als gevolg van de trampassage op de vloer van VSL-nanolab lager ligt dan het achtergrondtrillingniveau gemeten op een reguliere werkdag;
6. De prognose voor het totale trillingniveau op de vloer van het VSL-nanolab bestaat uit de sommatie van de bijdrage door de trampassage en het achtergrondniveau. Deze prognose voor het totale trillingniveau ligt minimaal 6 dB onder de trillingeisen van VSL voor de lage frequenties van 2 tot 5 Hz;
7. De foutmarge voor de berekening is bepaald op $\pm 2,5$ dB in het maatgevende frequentiebereik van 2 tot 3 Hz;
8. Vanwege diverse onzekerheden wordt door VSL een veiligheidsmarge van 3 dB gereserveerd. De door VSL gehanteerde criteria komen daarmee 3 dB onder de trillingeisen van de VSL-laboratoria te liggen;
9. De prognose voor de trillingbijdrage met foutmarge ligt derhalve voor het maatgevende frequentiebereik van 2 tot 3 Hz minimaal 0,5 dB en maximaal 5,5 dB onder de door VSL gehanteerde criteria.

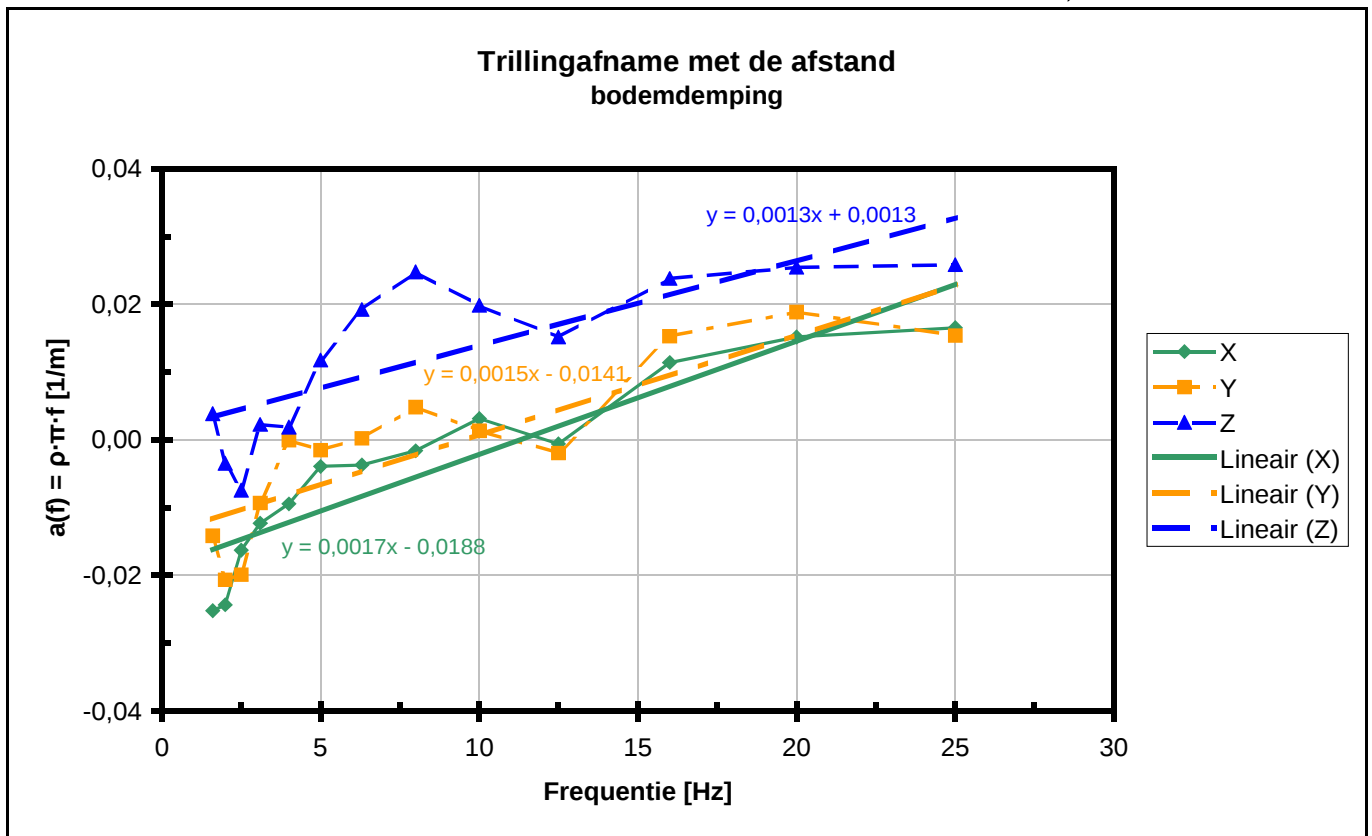
De passage van een tram over de keerlus veroorzaakt met name een trillingbijdrage in de lage frequenties (2 tot 5 Hz) terwijl voor hogere frequenties de prognose afneemt tot een verwaarloosbare bijdrage (vanaf 10 Hz). In het frequentiebereik van 2 tot 3 Hz is sprake van slechts minimaal 0,5 dB ruimte tussen prognose en de gehanteerde criteria.

Ten aanzien van deze laagfrequente trillingen wordt geadviseerd om bij het ontwerp, de uitvoering en het onderhoud van de keerlus aandacht te besteden aan de laagfrequente bijdrage (2 tot 5 Hz). Daarbij wordt geadviseerd om maatregelen te treffen om overschrijdingen te voorkomen van het trillingniveau zoals weergegeven in figuur 12, gemeten op 10 m afstand, en om middels een optimalisatie van de uitvoering van de keerlus een verdere, vooralsnog niet kwantificeerbare verlaging van de laagfrequente trillingbijdrage te realiseren.

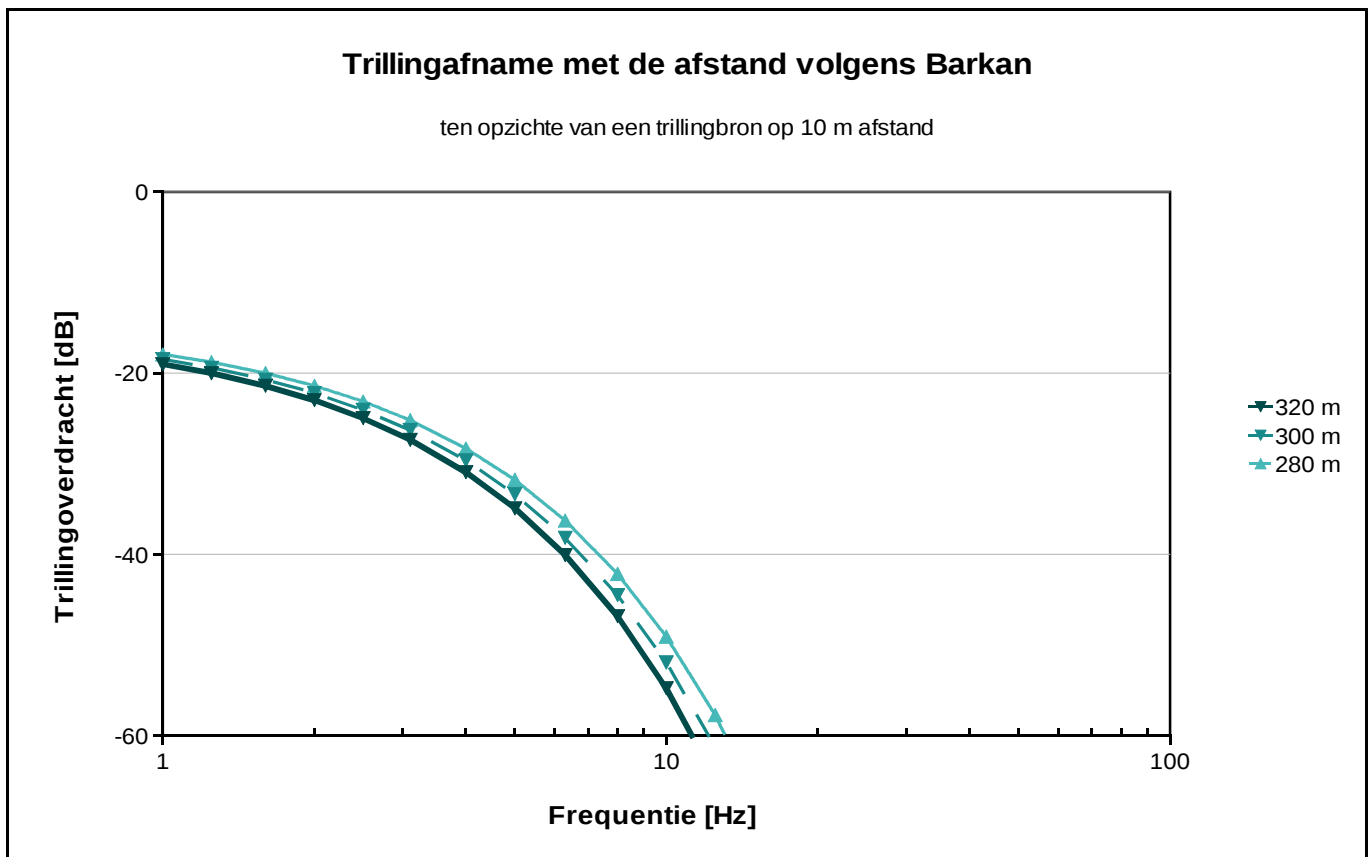
Zoetermeer,

Dit rapport bestaat uit:
23 pagina's.

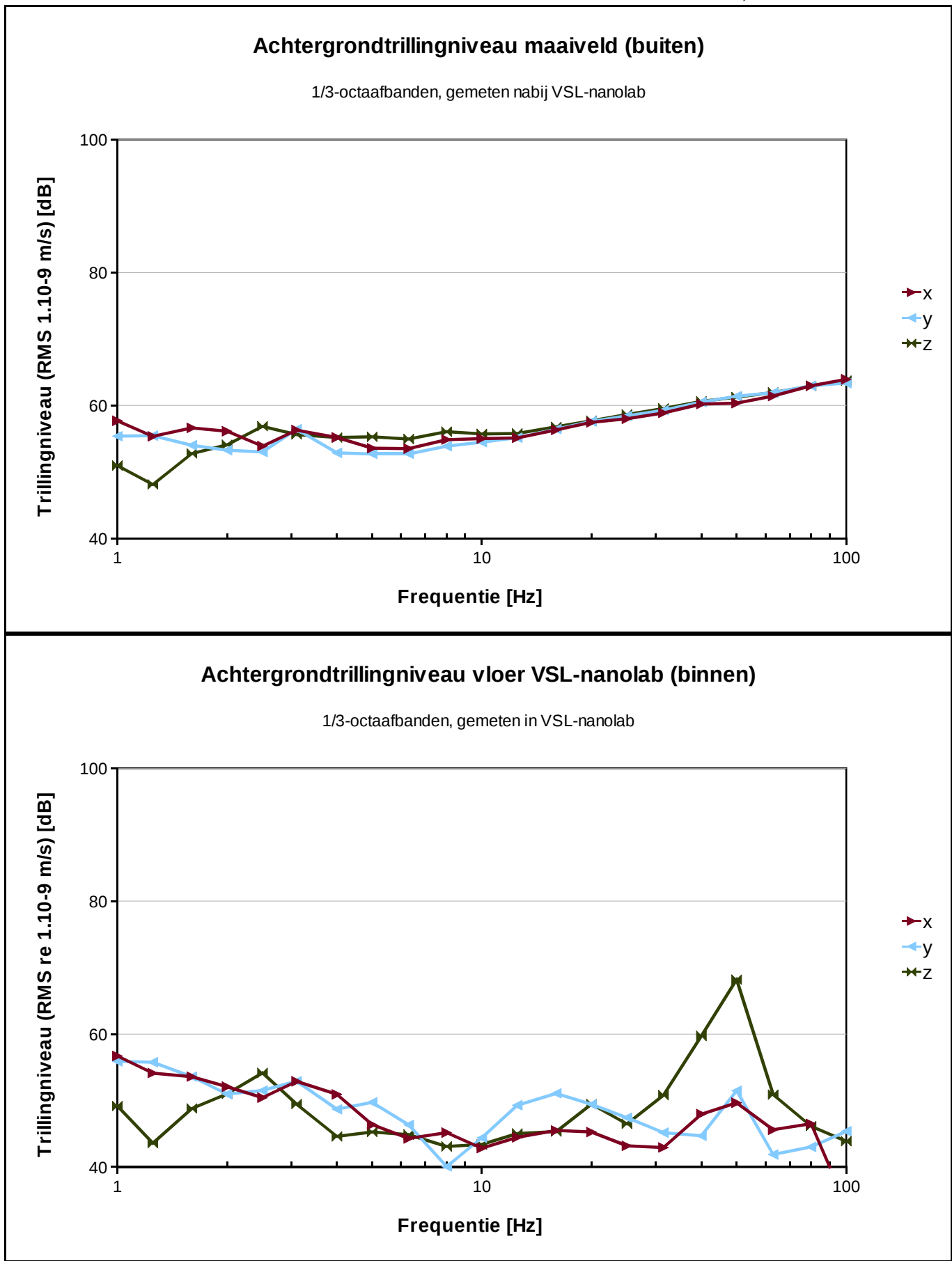
Bijlage I bevat 16 pagina's.



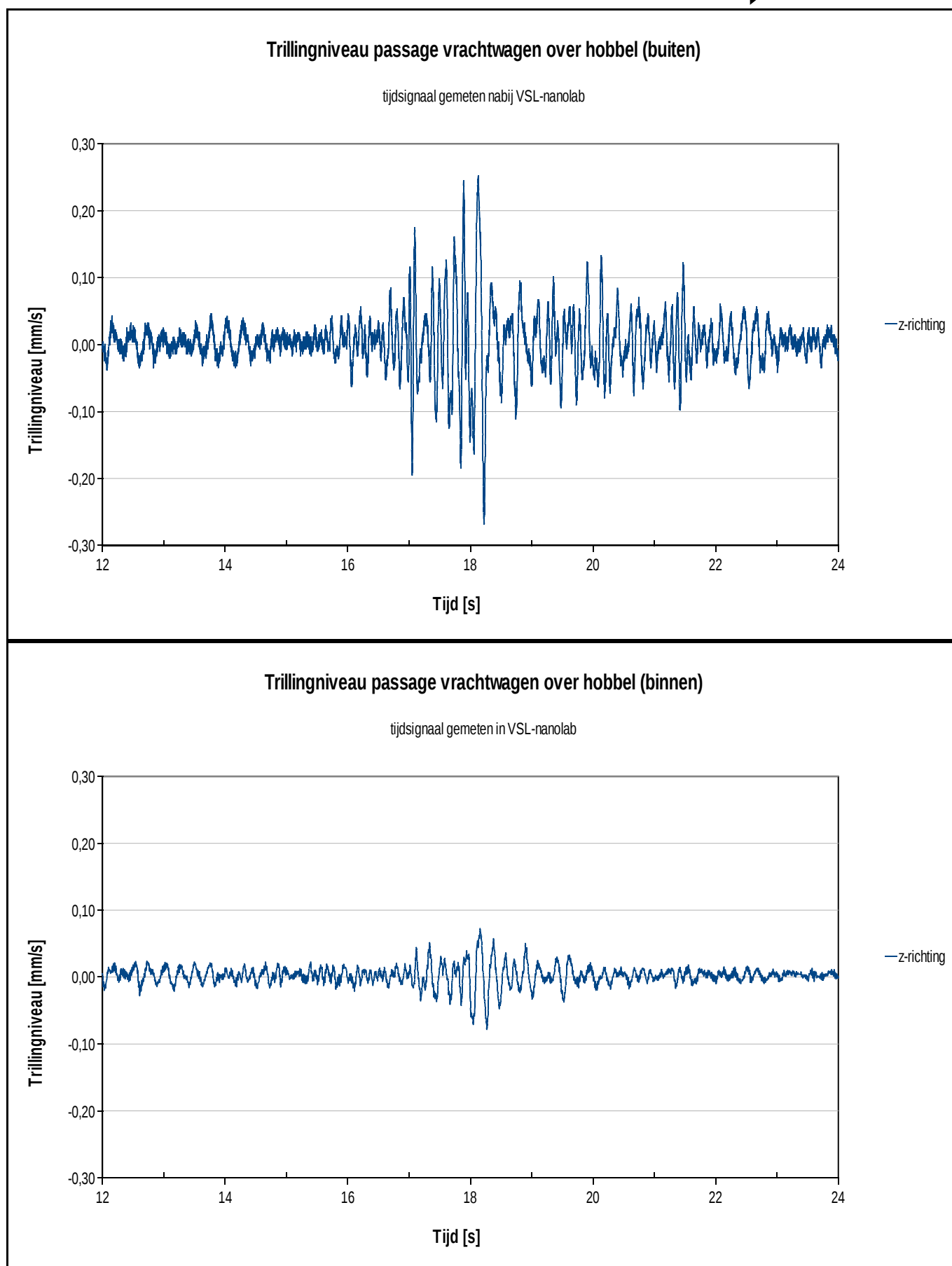
Figuur 3: Bodemdemping en trillingafname met de afstand, bepaald op basis van metingen



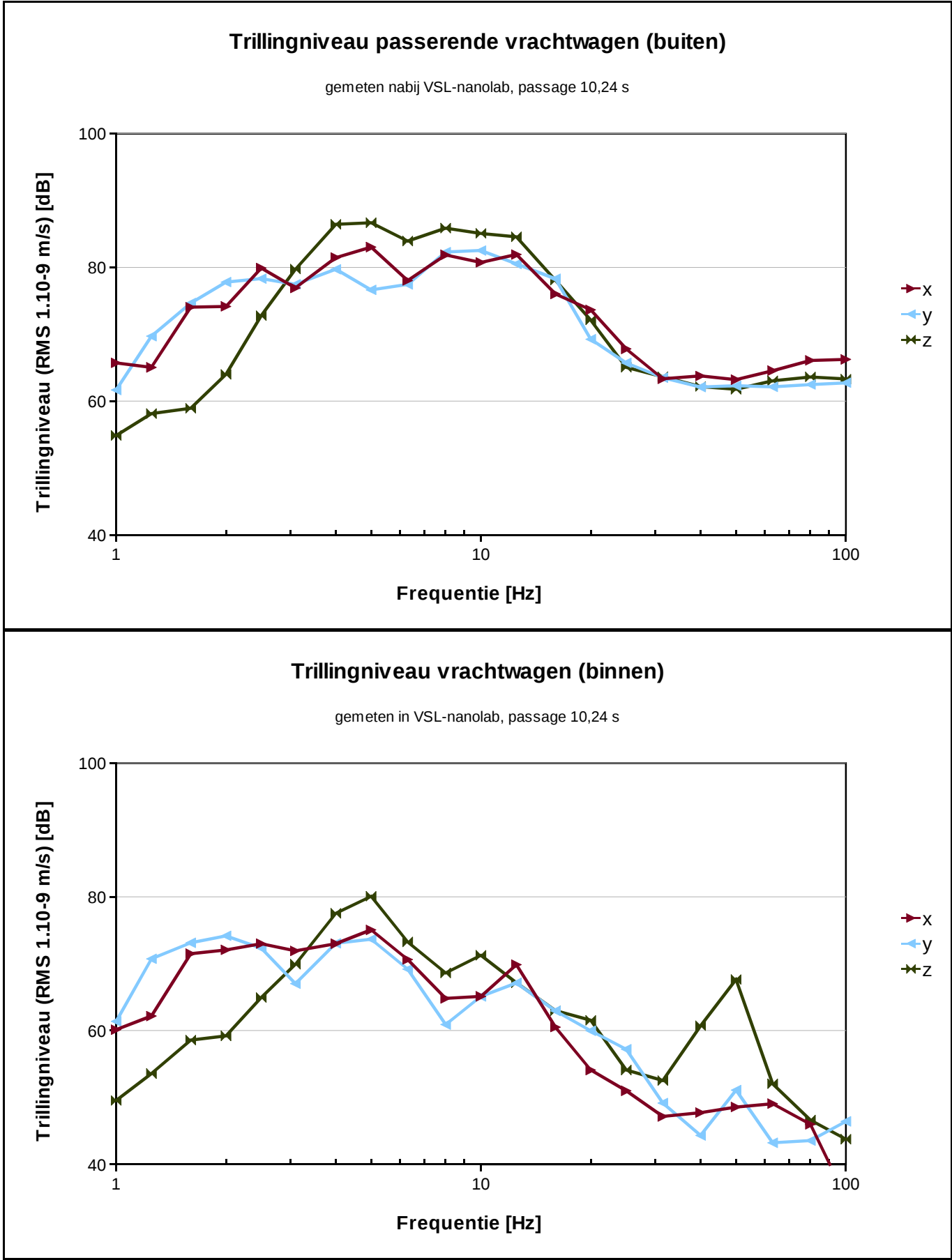
Figuur 4: Overdrachtsfunctie voor bodemdemping voor verschillende afstanden ten opzichte van de initiële afstand van 10 m.



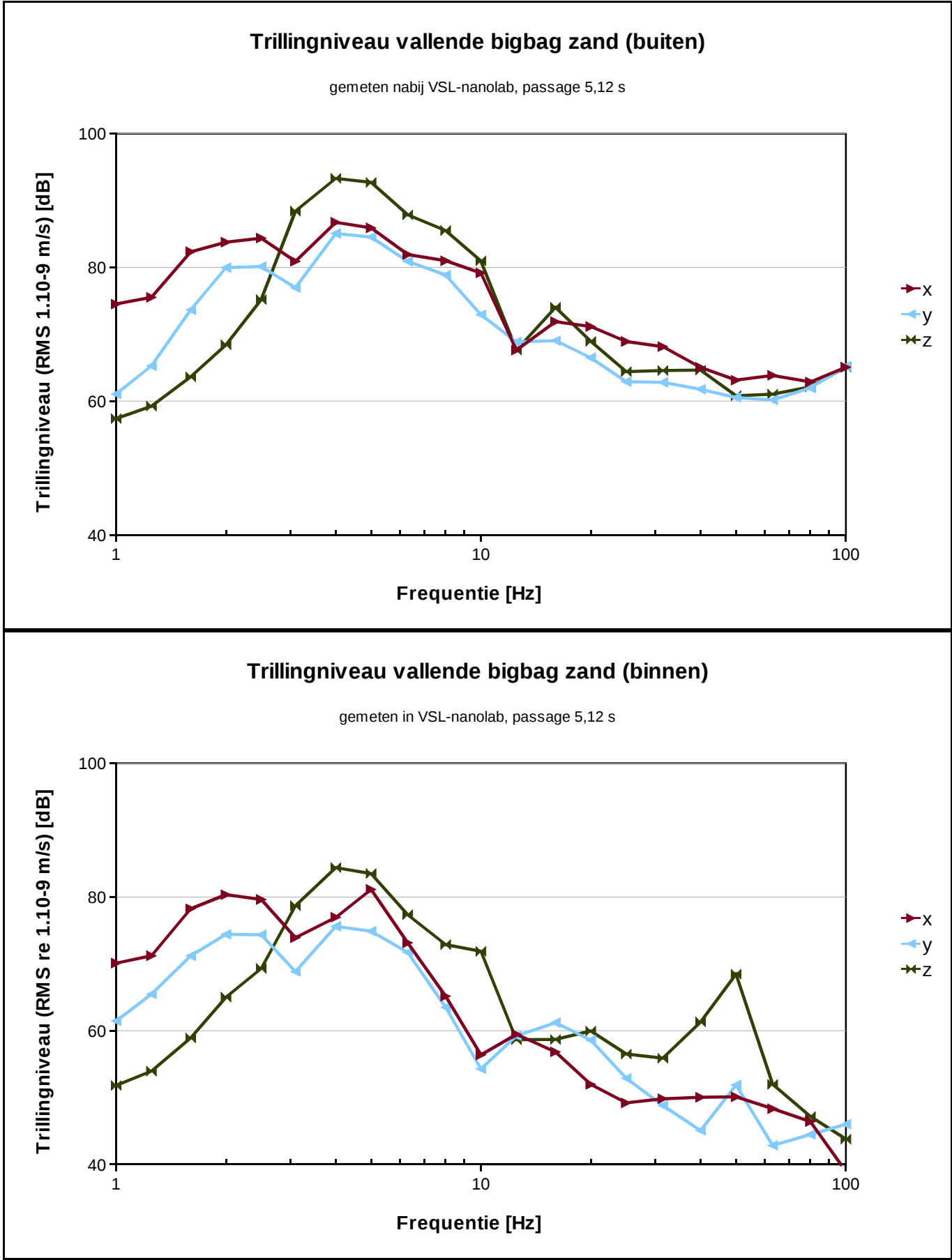
Figuur 5: Achtergrondtrillingniveau (a) maaiveld en (b) vloer VSL-nanolab



Figuur 6: Trillingmeting bij passage vrachtwagen over een hobbel op (a) maaiveld en op (b) vloer VSL-nanolab



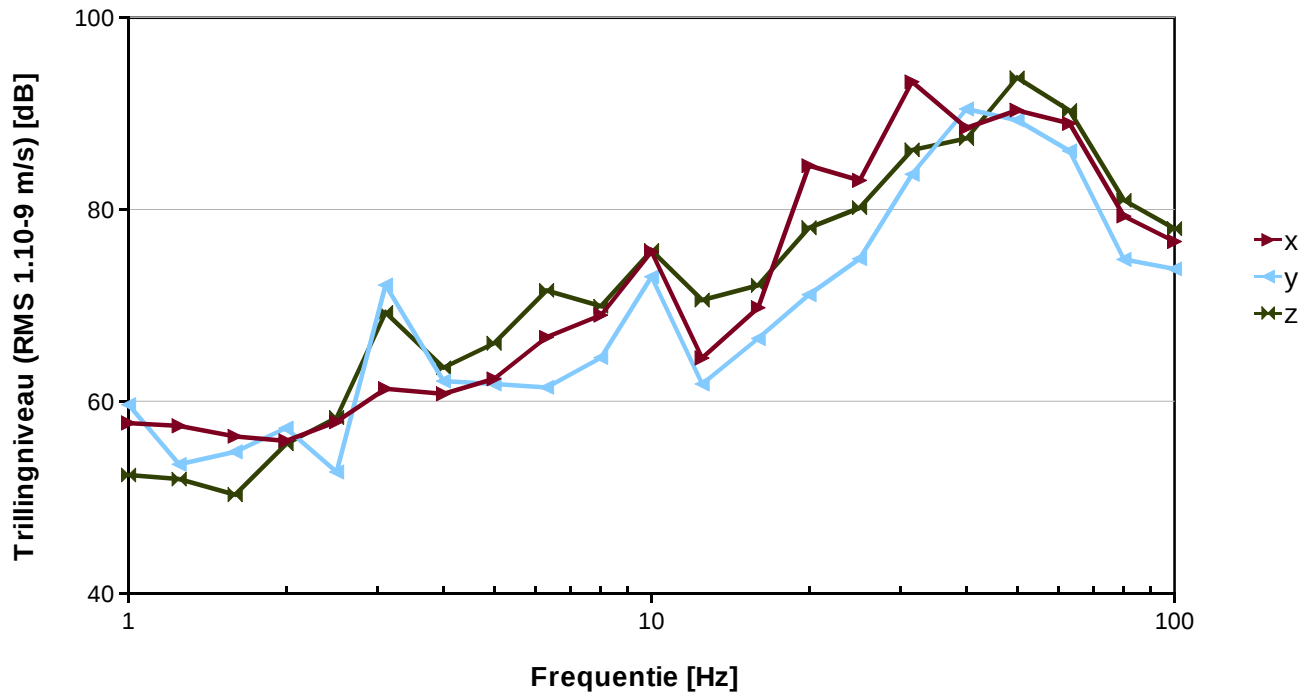
Figuur 7: Trillinganalyse van passage vrachtwagen op (a) maaiveld en op (b) vloer VSL-nanolab



Figuur 8: Trillinganalyse van vallende bigbag zand op (a) maaiveld en op (b) vloer VSL-nanolab

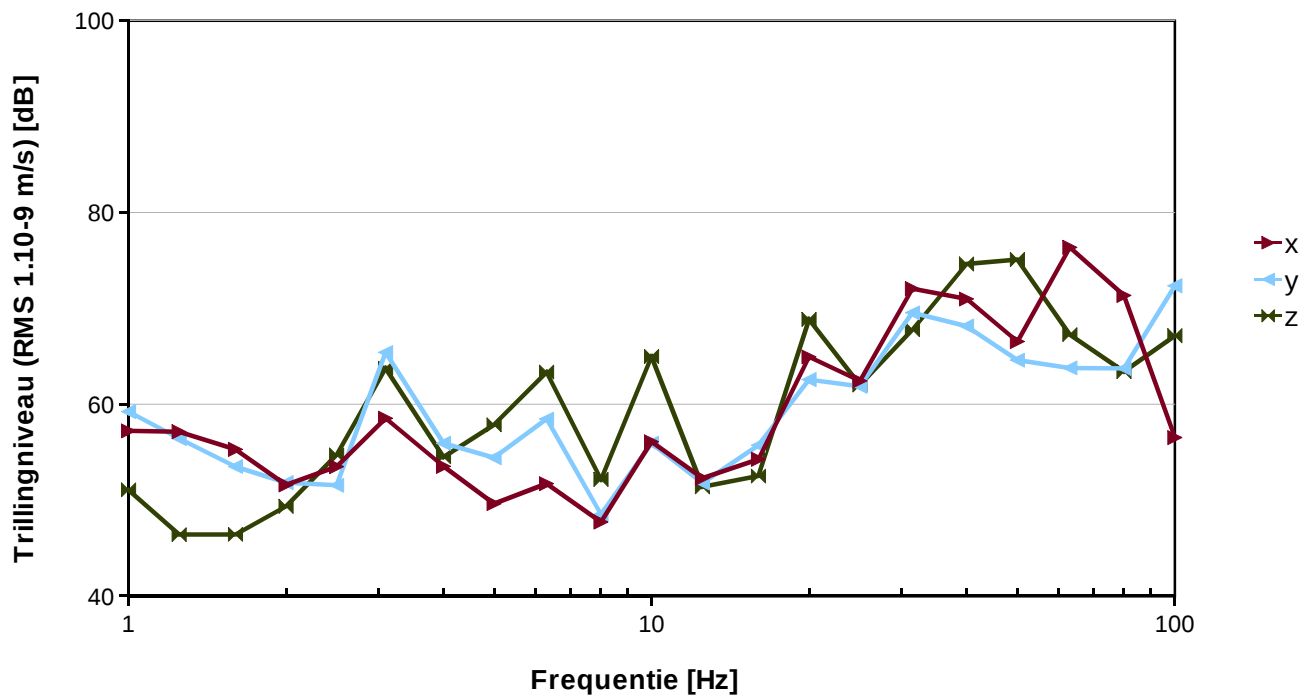
Trillingniveau wackerstamper (buiten)

gemeten nabij VSL-nanolab, passage 20,48 s

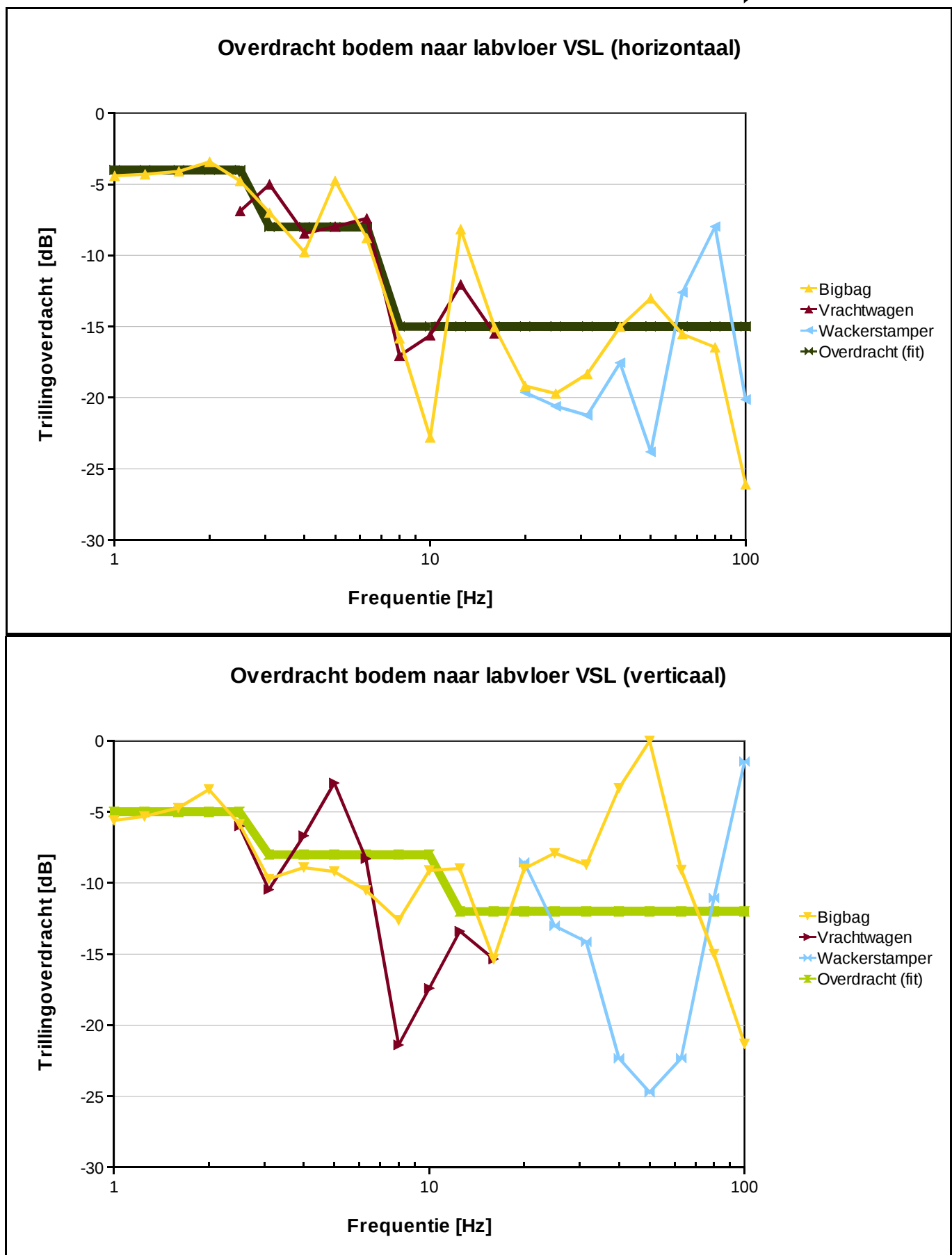


Trillingniveau wackerstamper (binnen)

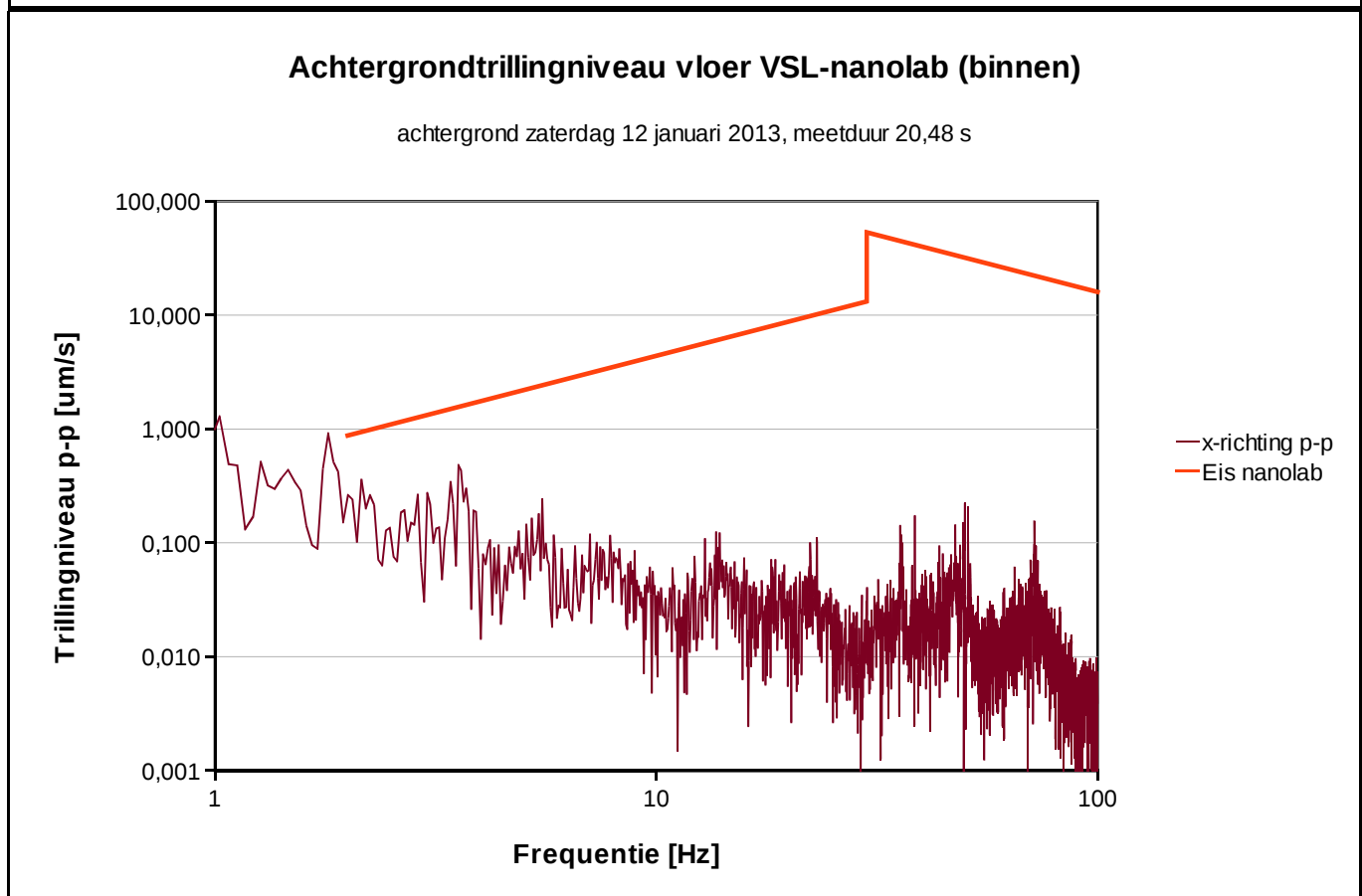
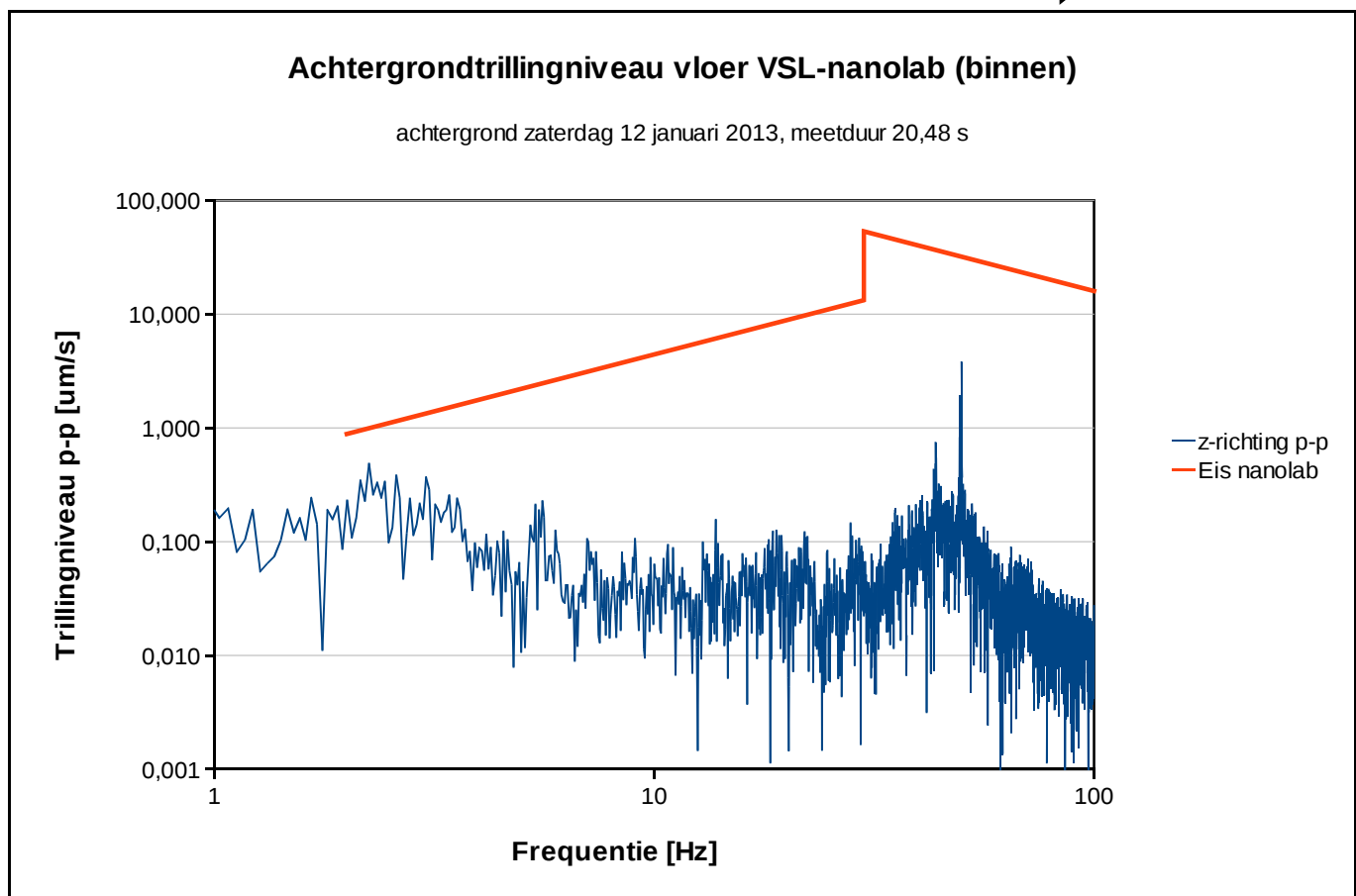
gemeten in VSL-nanolab, passage 20,48 s



Figuur 9: Trillinganalyse van wackerstamper op (a) maaiveld en op (b) vloer VSL-nanolab



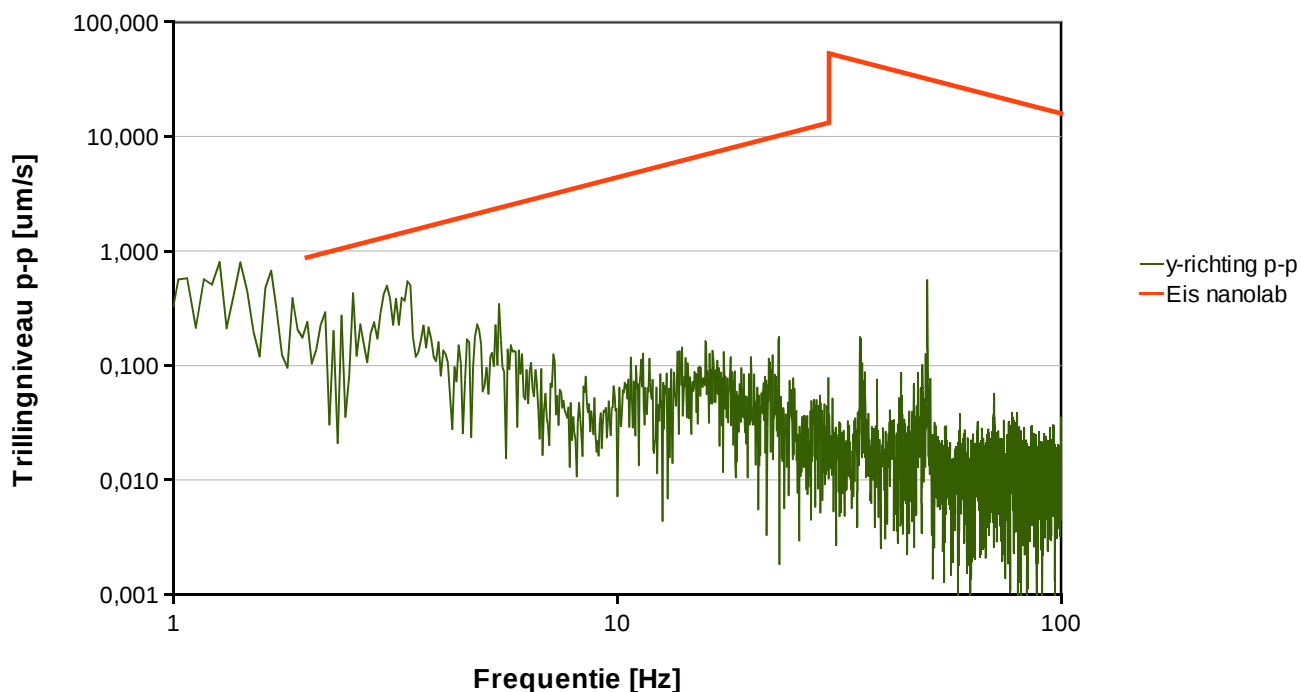
Figuur 10: Overdrachten van bodem naar vloer voor (a) horizontale en (b) verticale trillingen



Figuur 11 (a & b): Achtergrondtrillingniveau op vloer VSL-nanolab in smalbandige weergave (p-p) en in 1/3-octaaftanden (rms)

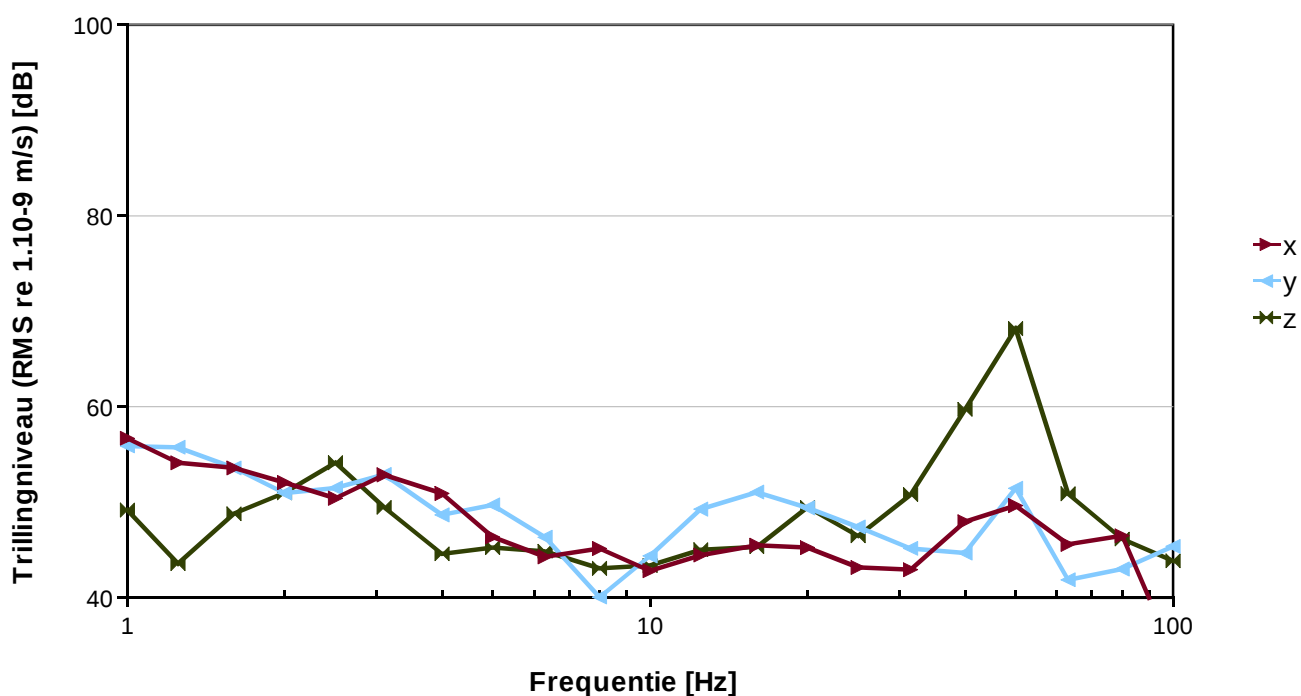
Achtergrondtrillingniveau vloer VSL-nanolab (binnen)

achtergrond zaterdag 12 januari 2013, meetduur 20,48 s

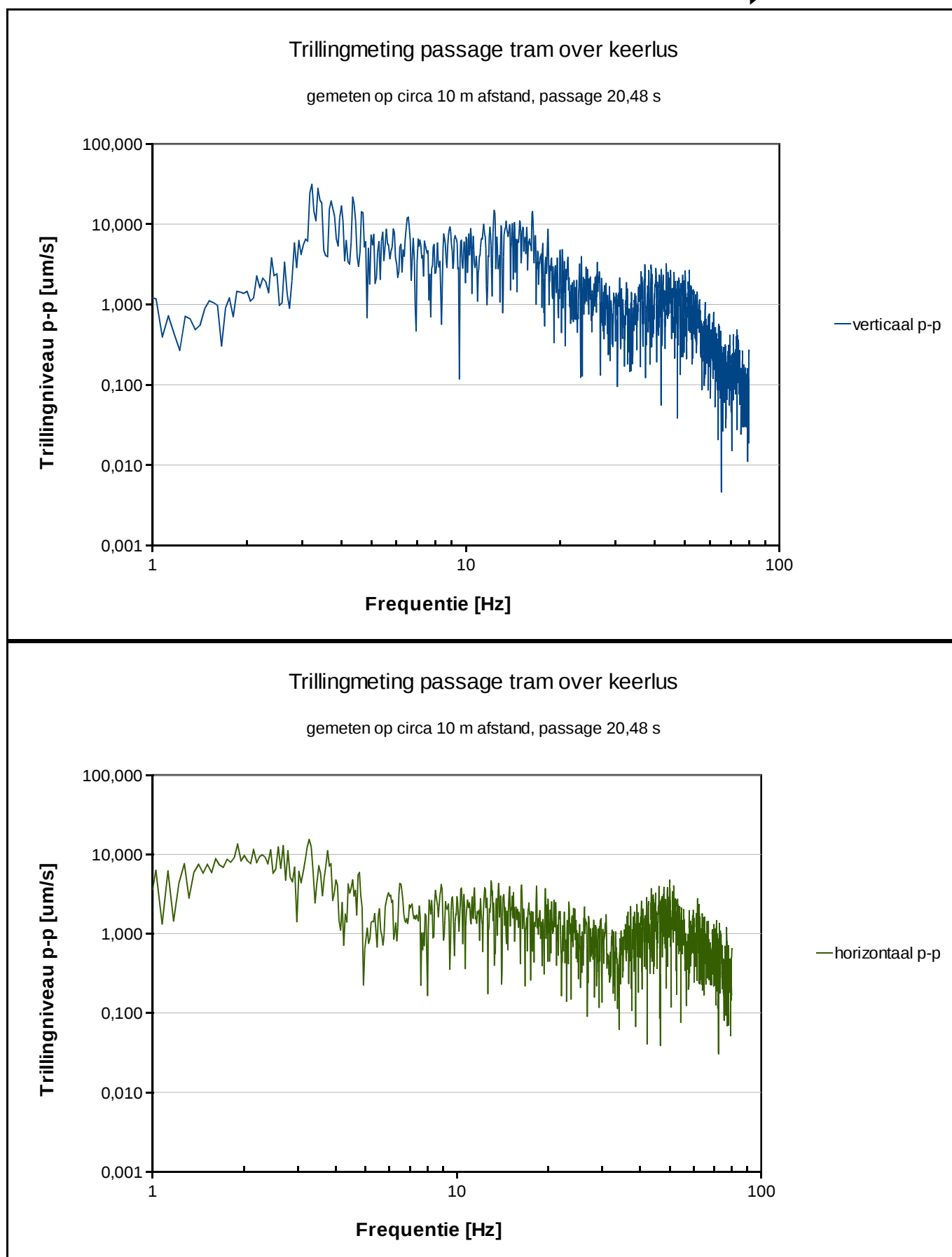


Achtergrondtrillingniveau vloer VSL-nanolab (binnen)

1/3-octaaftanden, gemeten in VSL-nanolab



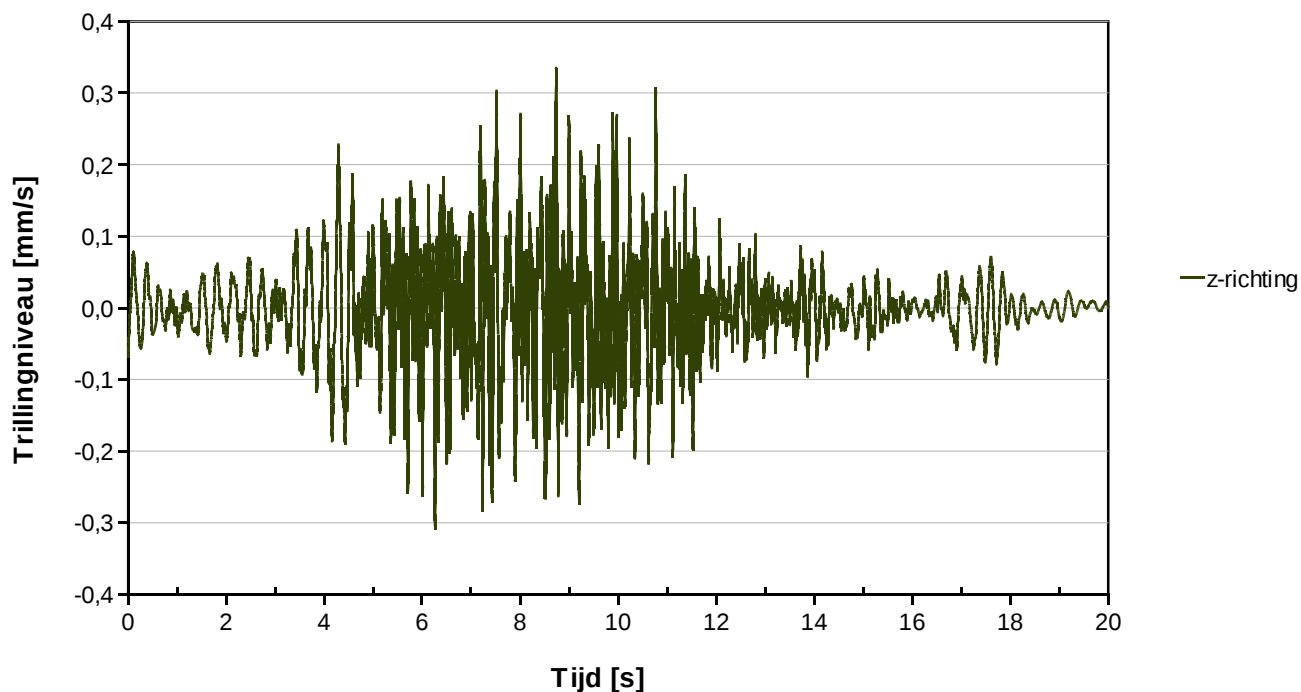
Figuur 11 (c & d): Achtergrondtrillingniveau op vloer VSL-nanolab in smalbandige weergave (p-p) en in 1/3-octaaftanden (rms)



Figuur 12 (a & b): Trillingen gemeten op 10 m afstand in maaiveld als gevolg van passage tram over keerlus als tijdsignaal, in smalbandige weergave (p-p) en in 1/3-octaaftanden (rms)

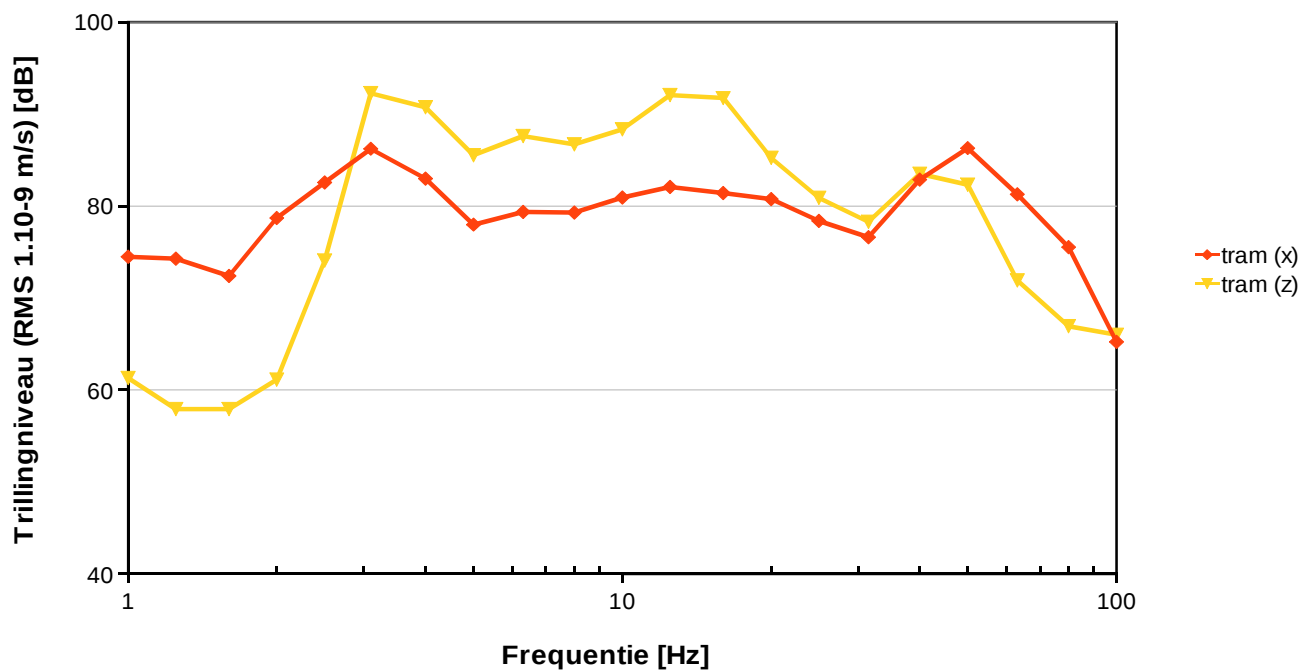
Trillingmeting passage tram over keerlus

tijdsignaal gemeten op circa 10 m afstand



Trillingmeting passage tram over keerlus

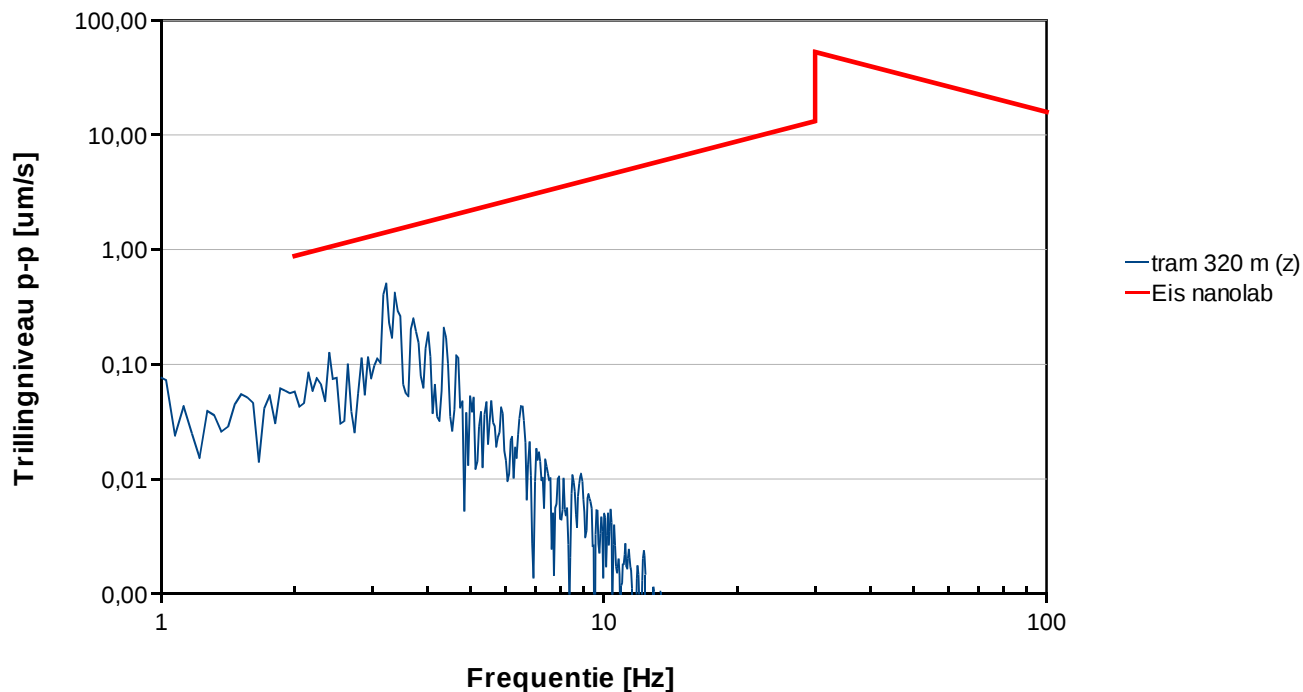
1/3-octaaftanden, gemeten op circa 10 m afstand



Figuur 12 (c & d): Trillingen gemeten op 10 m afstand in maaiveld als gevolg van passage tram over keerlus als tijdsignaal, in smalbandige weergave (p-p) en in 1/3-octaaftanden (rms)

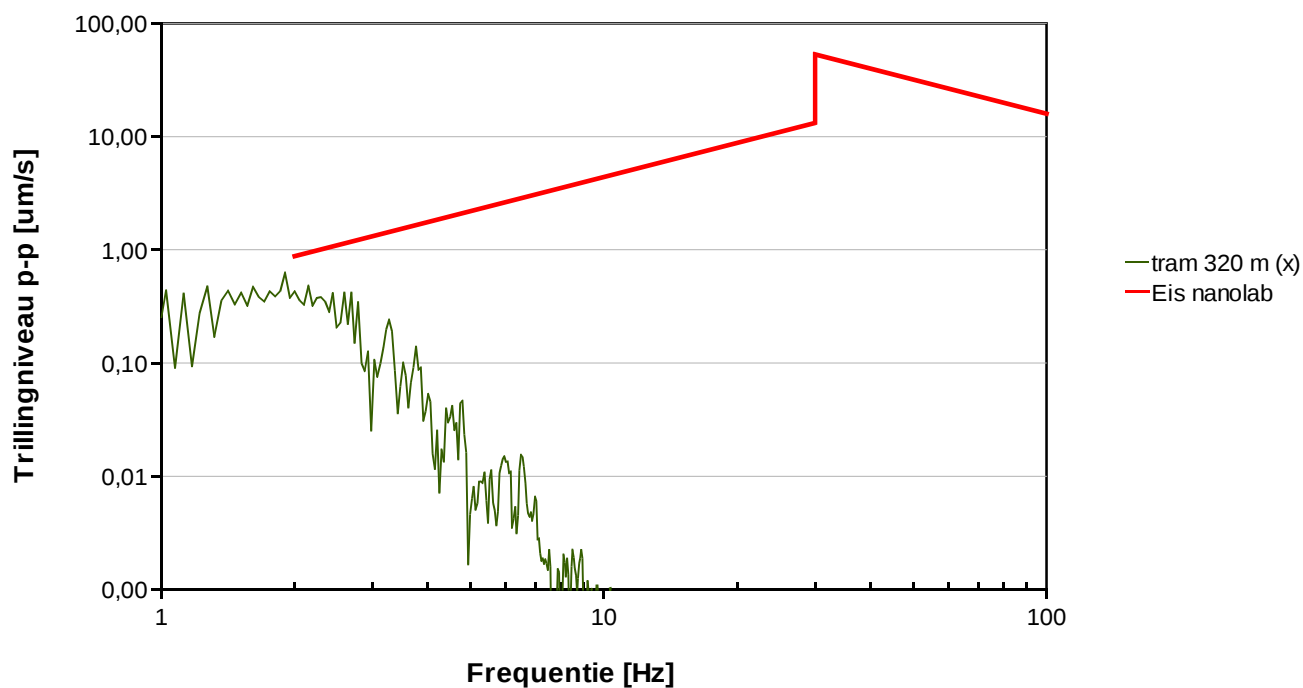
Prognose trillingniveau maaiveld (buiten)

verticaal, keerlus op 320 m, passage 20,48 s

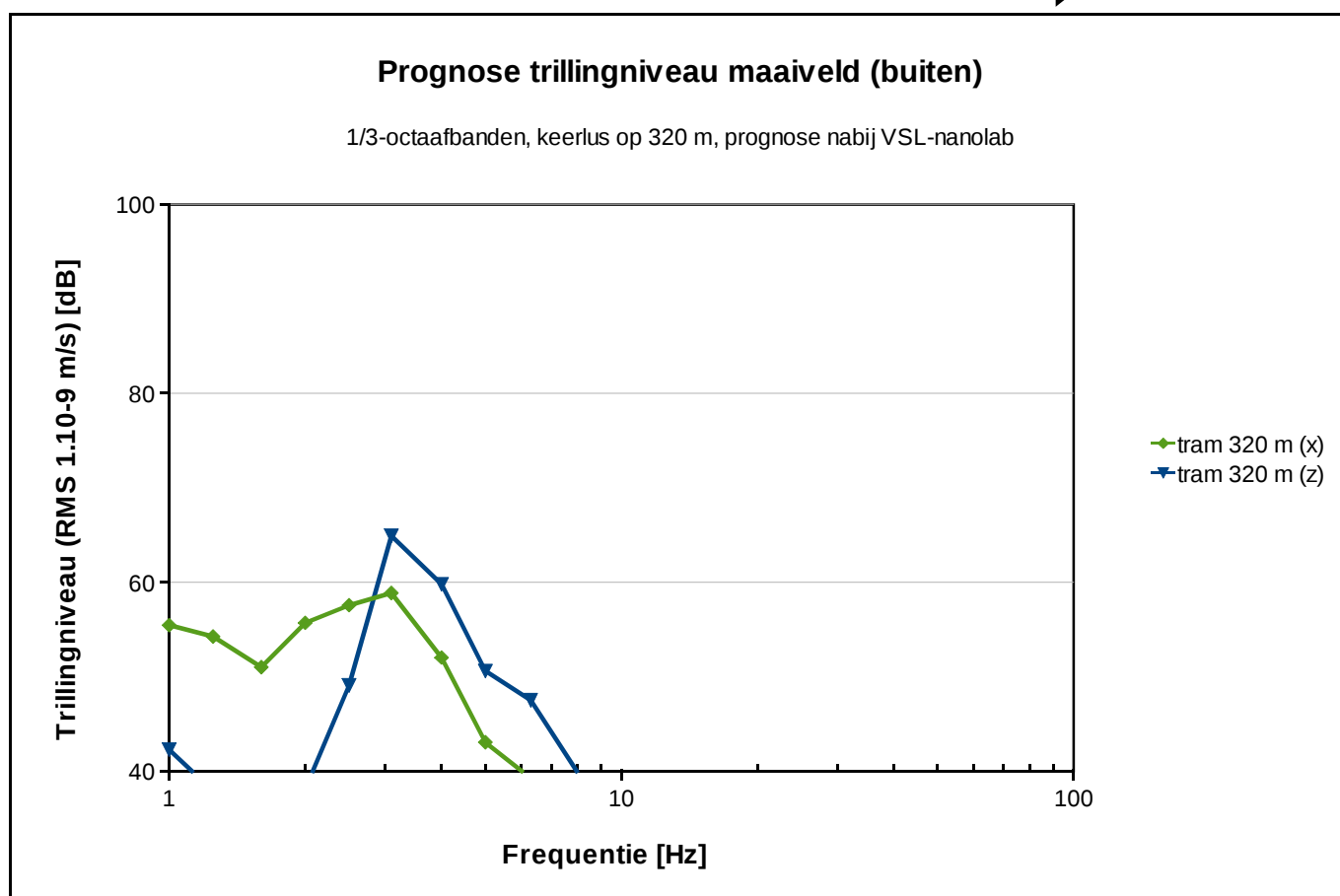


Prognose trillingniveau maaiveld (buiten)

horizontaal, keerlus op 320 m, passage 20,48 s



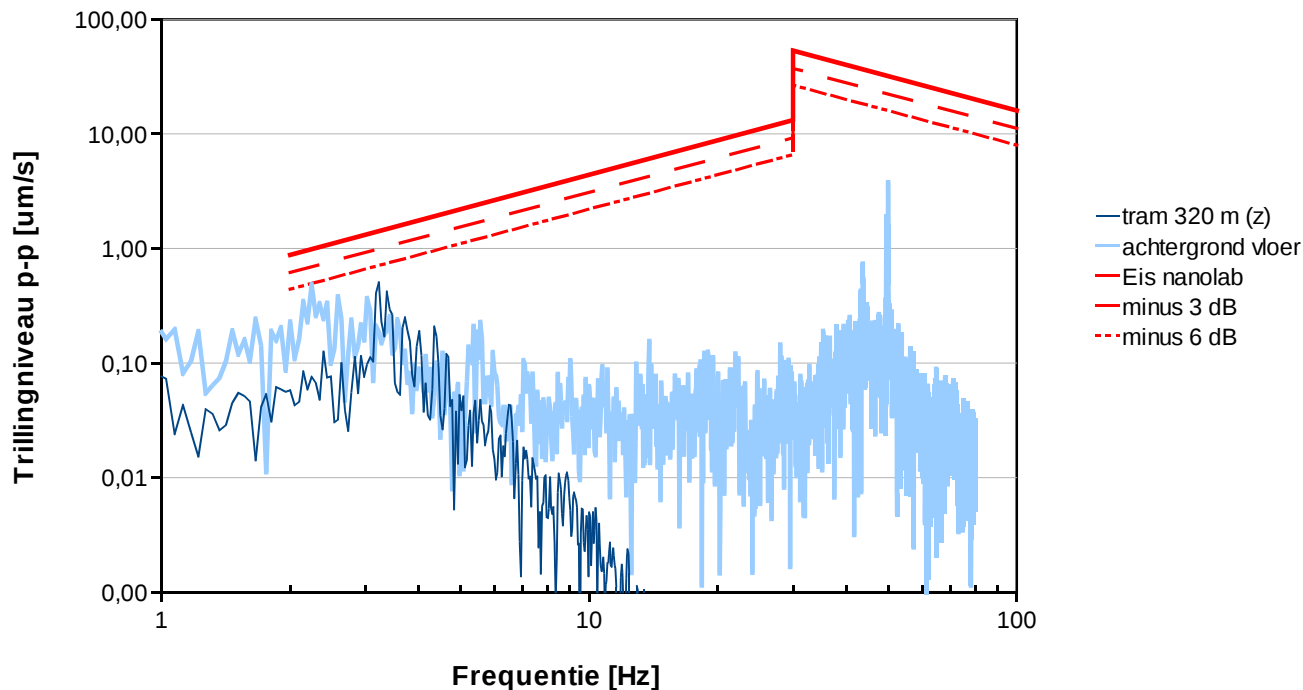
Figuur 13 (a & b): Prognose trillingen in maaiveld, nabij VSL-gebouw, als gevolg van passage tram over keerlus in smalbandige weergave (p-p) en in 1/3-octafbanden (rms)



Figuur 13 (c): Prognose trillingen in maaiveld, nabij VSL-gebouw, als gevolg van passage tram over keerlus in smalbandige weergave (p-p) en in 1/3-octaaftanden (rms)

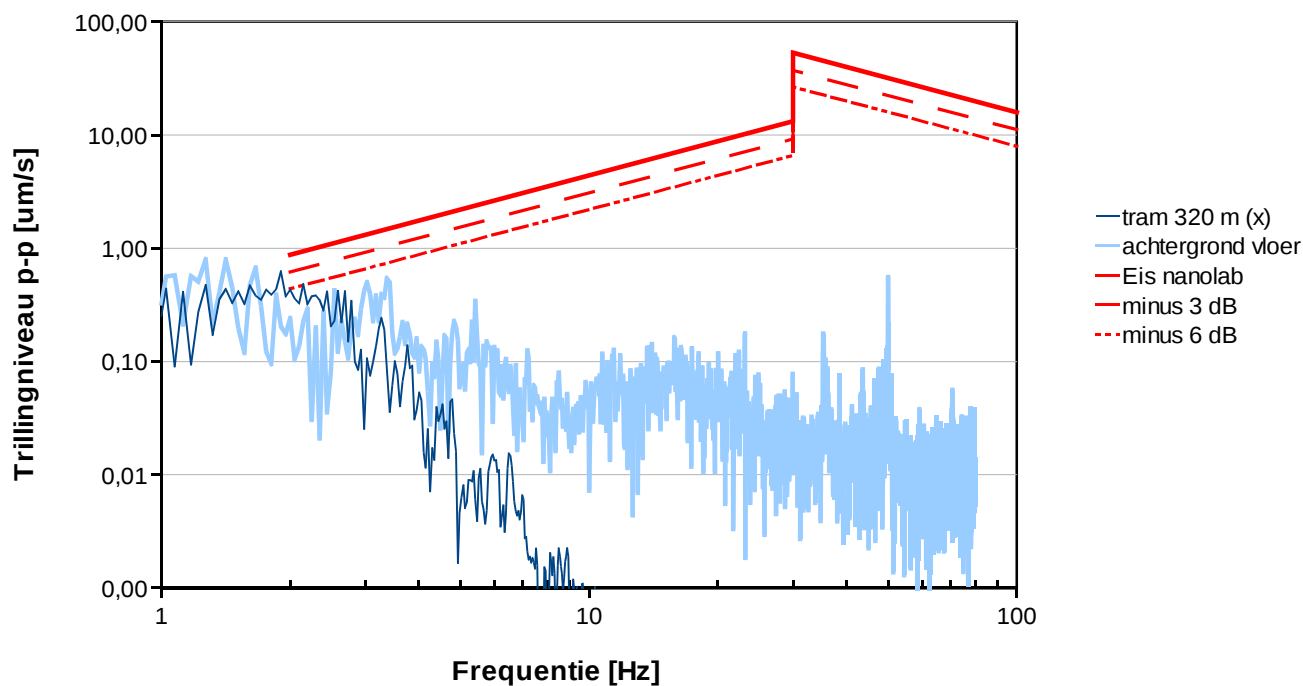
Prognose trillingniveau op vloer VSL-nanolab (binnen)

verticaal, keerlus op 320 m, passage 20,48 s



Prognose trillingniveau op vloer VSL-nanolab (binnen)

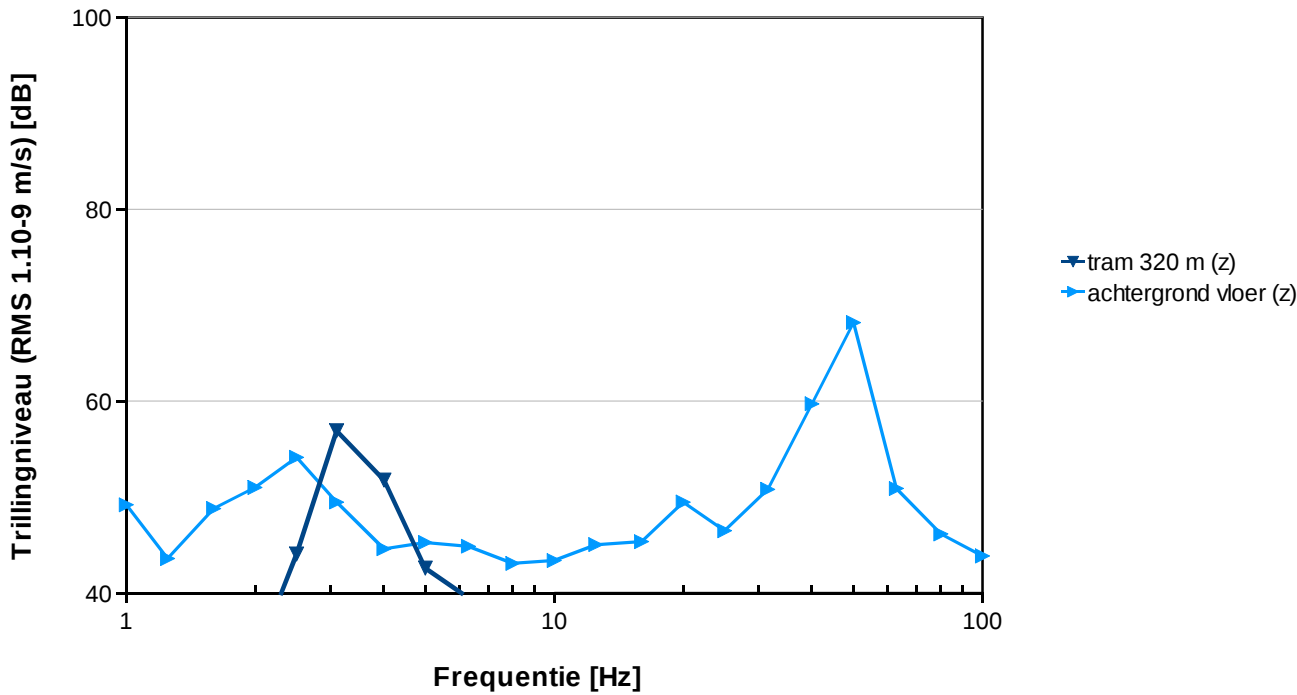
horizontaal, keerlus op 320 m, passage 20,48 s



Figuur 14(a & b): Prognose trillingen op vloer VSL-nanolab als gevolg van passage tram over keerlus in smalbandige weergave (p-p) en in 1/3-octaaftanden (rms)

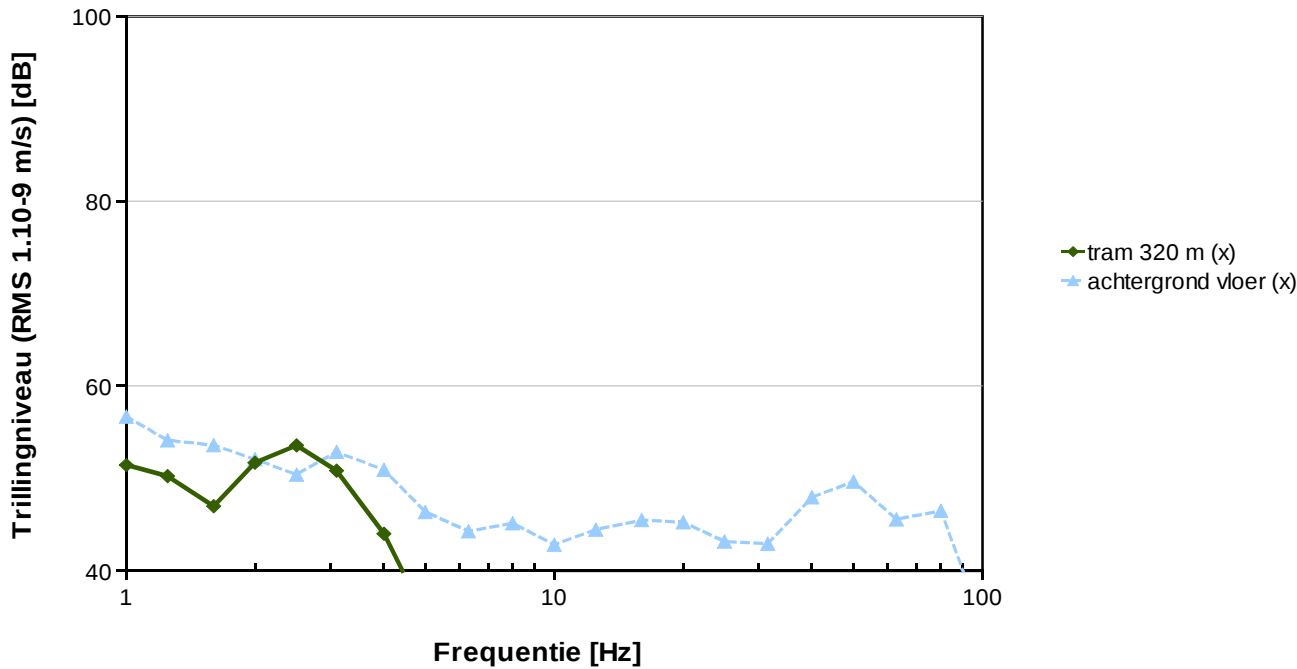
Prognose trillingniveau op vloer VSL-nanolab

verticaal, 1/3-octaaftanden, keerlus op 320 m, prognose op vloer nanolab



Prognose trillingniveau op vloer VSL-nanolab (binnen)

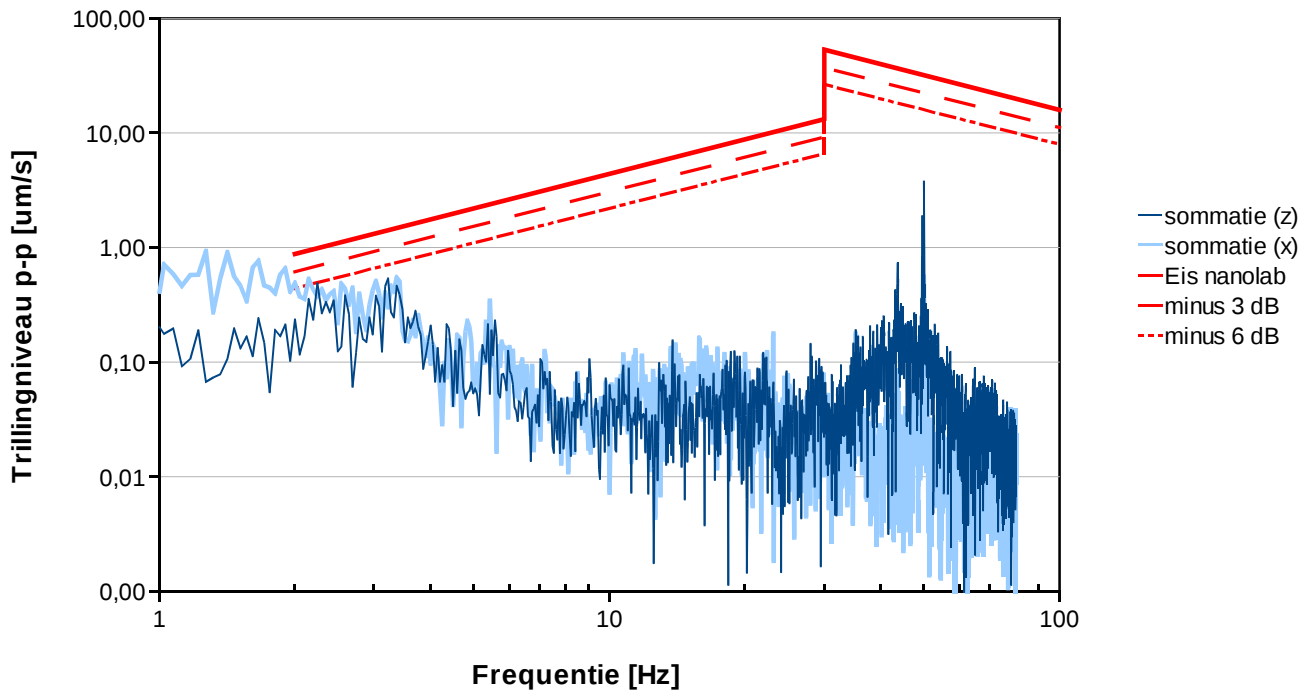
horizontaal, 1/3-octaaftanden, keerlus op 320 m, prognose op vloer nanolab



Figuur 14(c & d): Prognose trillingen op vloer VSL-nanolab als gevolg van passage tram over keerlus in smalbandige weergave (p-p) en in 1/3-octaaftanden (rms)

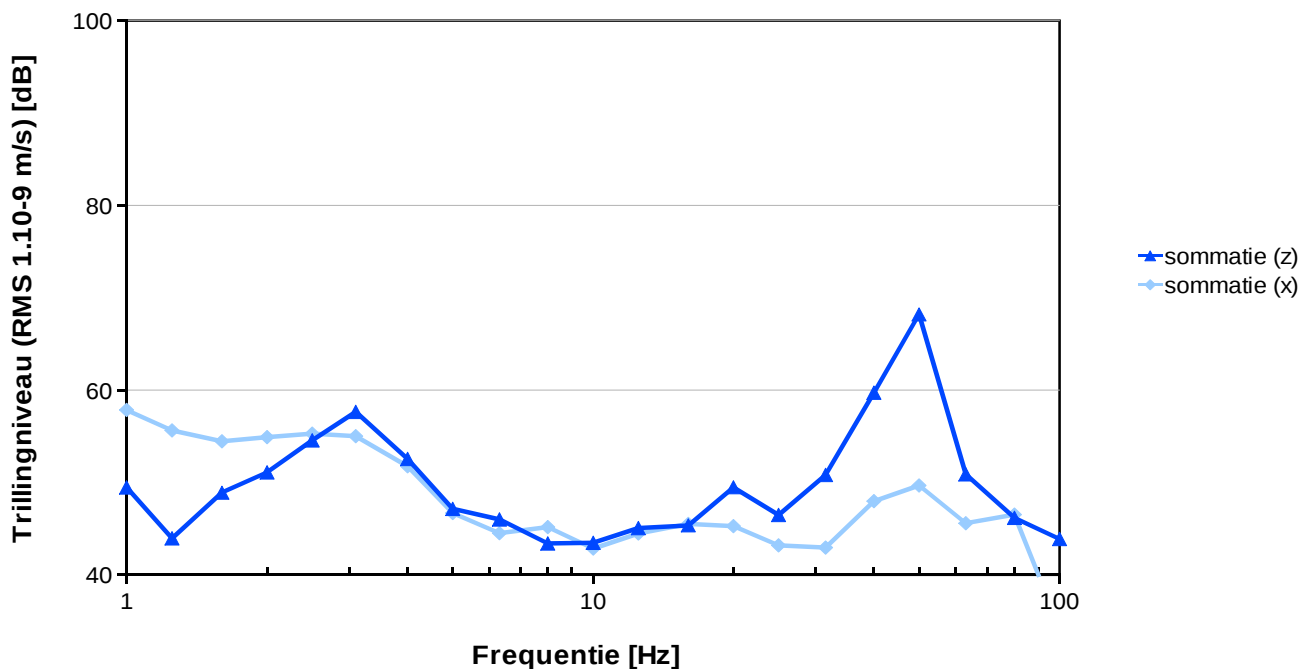
Prognose trillingniveau op vloer VSL-nanolab (binnen)

achtergrond en tram over keerlus gesommeerd (20,48 s)



Prognose trillingniveau op vloer VSL-nanolab (binnen)

1/3-octaaftanden, achtergrond en tramover keerlus gesommeerd



Figuur 15: Prognose energetisch gesommeerde trillingen op vloer VSL-nanolab in smalbandige weergave (p-p) en in 1/3-octaaftanden (rms)