

Rapport

Nieuwbouw TNW TU Delft / Tramlijn 19

Managementsamenvatting trillingen door trambaan

Rapportnummer SG 921-9-RA-001 d.d. 14 juni 2013

Opdrachtgever: TU Delft FMVG
Rapportnummer: SG 921-9-RA-001
Datum: 14 juni 2013
Ref.: BSn/BSn/CJ/SG 921-9-RA-001

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 TNW	5
2.4. Onderzoeksmethode	5
2.5. Samenvatting	5
3. SAMENVATTING ONDERZOEKSMETHODE	6
3.1. Meting trillingbronnen	6
3.2. Trillingafname door afstand	6
3.3. Trillingoverdracht trillingarme vloeren	6
3.4. Prognose trillingniveau op trillingarme vloeren	7
4. ONDERZOEKSRESULTATEN	8
4.1. Trajectdelen trambaan	8
4.2. Grafische presentatie	8
4.3. Recht trambaantraject	9
4.4. Tramhalte	10
4.5. Bocht met straal 30 m	11
4.6. Bocht met straal 45 m op betonfundatie	12
4.7. Wissel op betonfundatie	13
4.8. Rijsnelheden	14
4.9. Overzichtstabel	14

BIJLAGE I Documentenlijst

1. INLEIDING

In opdracht van de Technische Universiteit Delft wordt een nieuw faculteitsgebouw gerealiseerd voor de faculteit Technische Natuurwetenschappen. Langs de nieuwbouwlocatie is tramlijn 19 geprojecteerd met haltes en een keerlus in de nabijheid het TNW-gebouw.

Door en namens TU Delft FMVG zijn diverse onderzoeken uitgevoerd om de trambaan zodanig uit te voeren dat deze ten aanzien van de veroorzaakte trillingen wordt geoptimaliseerd. Hiertoe is onderzocht of het mogelijk is om de trillingniveaus ten gevolge van passage van een tram door de keerlus te verlagen. Tevens is onderzocht of er mogelijkheden bestaan de afstand tussen trambaan en het gebouw te vergroten voor kritische punten van de trambaan. Een en ander in samenspraak met Stadsgewest Haaglanden.

De diverse onderzoeken, metingen en berekeningen zijn gerapporteerd in meerdere rapporten. Daarbij zijn voor verschillende maatregelen de effecten inzichtelijk gemaakt.

Als onderdeel van de plan- en besluitvorming is in voorliggend rapport een managementsamenvatting opgesteld, waarbij de relevante onderdelen uit de verschillende onderzoeksrapportages overzichtelijk zijn opgenomen.

Voor een uiteenzetting van de meet- en berekeningsmethoden en de modellen wordt verwezen naar de eerdere rapportages. Deze worden in voorliggende managementsamenvatting niet uitvoerig toegelicht. In de bijlage is een overzicht gegeven van de verschillende relevante onderzoeksrapportages die aan deze managementsamenvatting ten grondslag liggen.

2.3. Trillingeisen TNW

De optredende trillingen worden uitgedrukt in snelheidsniveaus (rms-waarden per tertsband) in dB (re $1 \cdot 10^{-9}$ m/s). Trillingen kunnen ook ingedeeld worden in trillingklassen (zgn. VC-klassen). Voor de onderzoekslaboratoria in het TNW-gebouw worden specifieke trillingarme vloeren ontworpen. Deze vloeren moeten voldoen aan de volgende eisen:

- vloeren HR-labs: klasse VC-F, maximal 64 dB;
- vloeren MR-labs: klasse VC-E, maximaal 70 dB.

Om onzekerheden in uiteindelijke situatie en optredende trillingen te verdisconteren, houdt de opdrachtgever een marge van 3 dB aan.

2.4. Onderzoeksmethode

De methode zoals deze voor de eerdere onderzoeken is gehanteerd, laat zich als volgt samenvatten:

- bepaling van het trillingniveau naast een trajectdeel van een trambaan, op basis van metingen;
- bepaling van de trillingafname over een zekere afstand, op basis een rekenmodel geverifieerd met referentiemetingen;
- bepaling van de trillingoverdracht van maaiveld naar trillingarme vloeren, op basis van rekenmodel en verificatiemetingen;
- bepaling van de prognose van het trillingniveau op de trillingarme vloeren, als gevolg van de verschillende trajectdelen, op basis van prognosemodel.

Voor genoemde methodes, metingen en berekeningen, modellen en resultaten zijn uitvoerig omschreven in de eerdere rapportages. In voorliggende managementsamenvatting worden deze niet verder toegelicht.

2.5. Samenvatting

Ten behoeve van de plan- en besluitvorming is in voorliggend rapport een management-samenvatting opgesteld. In de loop van het projectonderzoek zijn diverse resultaten achterhaald, zijn resultaten verfijnd op basis van aangescherpte metingen of rekenmodellen, en zijn bepaalde onderzochte maatregelen praktisch onhaalbaar of zonder noemenswaardig effect gebleken.

In de managementsamenvatting zijn dergelijke achterhaalde of niet-relevante resultaten niet opgenomen.

3. SAMENVATTING ONDERZOEKSMETHODE

3.1. Meting trillingbronnen

Langs verschillende bestaande trambaantrajecten in Delft (Tanthof, Voorhof), Leidschendam en Den Haag (Ypenburg) zijn trillingmetingen verricht bij passerende trams. Hierbij zijn metingen verricht bij halteplaatsen, bochten, keerlus, wissels en rechte trambaantrajecten.

Overeenkomstig de definitie van de eis worden de gemeten trillingniveaus voor de 1/3-octaaftanden als RMS-waarden (dB re. 10^{-9} m/s) gepresenteerd. Hierbij komt 100 dB overeen met een $v_{rms} = 0,1$ mm/s.

De trillingmetingen zijn verricht bij meerdere passages van verschillende tramvoertuigen. Door verschillende onbekende en bekende oorzaken (bijvoorbeeld rijsnelheid, rondheid wielstellen) treden verschillen op in de gemeten trillingniveaus. Voor het prognosemodel is voor elke trillingbron uitgegaan van de hoogst optredende trillingniveaus.

Voor enkele situaties zijn metingen verricht op verschillende afstanden. Deze meetgegevens zijn gebruikt om de modellen te verifiëren. In voorliggende samenvatting zijn de trillingniveaus gepresenteerd voor één bepaalde afstand.

3.2. Trillingafname door afstand

Voor de bepaling van de trillingafname met de afstand is uitgegaan van het frequentieafhankelijke rekenmodel van Barkan. Voor de omgeving van Delft is de relevante bodemconstante voor dit rekenmodel vastgesteld en geverifieerd aan de hand van meerdere metingen.

Door tussenliggende bebouwing wordt een verdere trillingreductie gerealiseerd. Deze is alleen in rekening gebracht voor het rechte trambaantraject, aangezien alleen voor deze situatie sprake is van een groot tussenliggende gebouwmassa. De in rekening gebrachte trillingreductie als gevolg van tussenliggende bebouwing is behoudend, te weten 3 dB voor de HR-vloeren (ligging midden in het gebouw), en 1 dB voor de MR-vloeren (ligging aan de rand van het gebouw).

3.3. Trillingoverdracht trillingarme vloeren

Voor de trillingarme vloeren (HR-vloeren en MR-vloeren) van het TNW-gebouw zijn constructieve ontwerpen gemaakt, uitgaande van dikke betonvloeren van bepaalde afmetingen, met een fijn palengrid als fundatie. De palen onder de vloeren staan in geschoorde stand naar verschillende richtingen om maximale stijfheid te realiseren.

3.4. Prognose trillingniveau op trillingarme vloeren

The figure consists of three sub-graphs illustrating vibration levels and transmission characteristics.

- Left Graph: Trillingniveaue toepassing keekes**
 Title: garden in Delft, Tenthred, September 10/24
 Y-axis: Trillingniveau (max 1.5a ms) [dB]
 X-axis: Frequentie [Hz]
 Legend:
 - 1 Tram 1 op 20 m (z)
 - 2 Tram 19 op 20 m (z)
 - 3 Tram 1 op 20 m (z)
 - 4 Tram 19 op 20 m (z)
 - 5 Tram 19 op 20 m (z)
 - 6 Tram 19 op 20 m (z) (vel)
 - 7 Tram 1 op 20 m (z)
 - 8 Tram 19 op 20 m (z) (vel)
 - 9 Tram 1 op 20 m (z)
 - 10 Tram 19 op 20 m (z) (vel)
 - 11 Tram 1 op 20 m (z)
 - 12 Tram 19 op 20 m (z) (vel)
- Middle Graph: Afname met de afstand**
 Y-axis: Trillingniveau [dB]
 X-axis: Frequentie [Hz]
 Legend:
 - afstand 110 m
 - afstand 140 m
 - afstand 180 m
 - afstand 220 m
 - afstand 280 m
- Right Graph: Trillingsoverdracht vloer HR-lab**
 Y-axis: Trillingsoverdracht [dB]
 X-axis: Frequentie [Hz]
 Legend:
 - MVS (z)
 - MVS (y)
 - EEM (z)
 - EEM (y)

Voor het prognosemodel is voor de trillingbron uitgegaan van de hoogst optredende trillingniveaus. Het model voor de trillingafname met de afstand, de trillingreductie voor tussenliggende bebouwing en de trillingoverdracht van de vloerconstructies zijn behoudend – rekening houdend met meet- en modelonzekerheden.

SG 921-9-RA

4. ONDERZOEKSRESULTATEN

4.1. Trajectdelen trambaan

Als trillingbronnen waarvoor de afstand tot het TNW-gebouw en de prognose van de trillingbijdrage op de laboratoriumvloeren wordt bepaald, zijn verschillende trajectdelen van de trambaan onderscheiden, te weten:

- recht trambaantraject, min of meer constante rijsnelheid;
- stoppen bij een halteplaats;
- bocht met straal > 30 m;
- bocht met straal > 45 m (betonfundatie);
- wissel (betonfundatie).

De ten behoeve van de trillingmetingen geselecteerde trajectdelen zijn gekozen op basis van enerzijds de liggende planvorming rondom de tramlijn 19, in hoofdlijnen. Anderzijds op basis van de aanwezige, bestaande situaties. In de directe omgeving van Delft zijn diverse bestaande trambaantrajecten aanwezig die in meer of mindere mate afwijken van de geplande uitvoering voor tramlijn 19 in Technopolis. Het aantal bestaande trambaantrajecten dat qua bodemsamenstelling, trambaanfundering, gebruikte tramstellen, rijsnelheden, combinatie met autorijbanen of autobusbanen, wissels et cetera vergelijkbaar is met de geplande uitvoering is beperkt. Dit heeft in enkele situaties geleid tot de consessiemetingen uit te voeren bij een best gelijkende situatie, met enkele verschillen als onontkoombaar gegeven.

4.2. Grafische presentatie

Voor voornoemde trajectdelen (trillingbronnen) zijn in navolgende paragrafen de meet- en rekenresultaten gegeven, alsook de prognose voor de trillingniveaus op de labvloeren. Daarbij is steeds een zestal grafieken gepresenteerd:

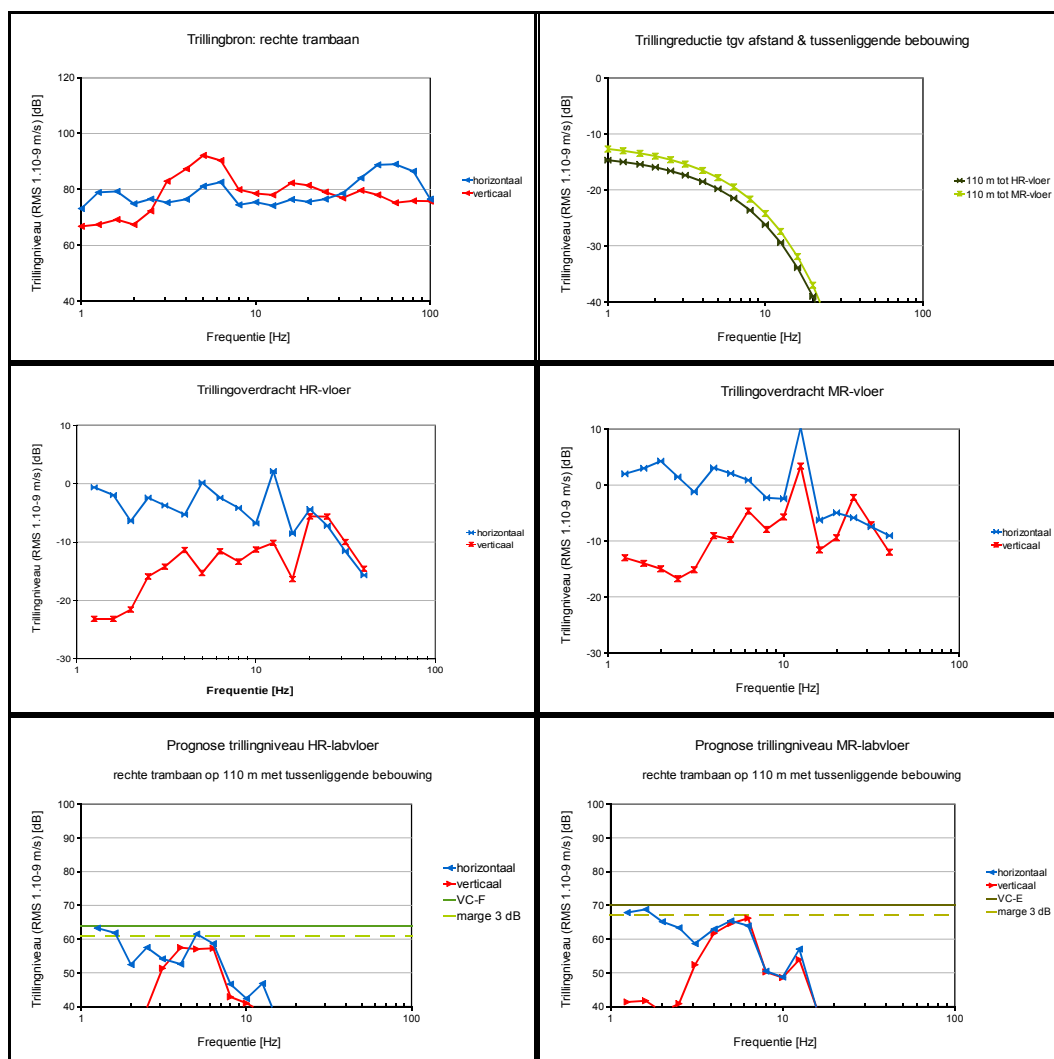
- (a) gemeten trillingniveaus nabij de trillingbron, het betreffende trajectdeel;
- (b) trillingafname voor een zekere afstand tot HR-vloer resp. MR-vloer;
- (c) trillingoverdracht vloerconstructie HR-vloer;
- (d) trillingoverdracht vloerconstructie MR-vloer;
- (e) prognose trillingniveau op HR-vloer, bij betreffende afstand;
- (f) prognose trillingniveau op MR-vloer, bij betreffende afstand.

Op basis van deze prognosemodellen is een zekere minimaal aan te houden afstand tot de HR-vloeren en MR-vloeren bepaald, alsook het hoogst te verwachten trillingniveau per tertsband.

4.3. Recht trambaantraject

In Delft, Voorhofdreef zijn trillingmetingen verricht langs een recht trambaantraject, op circa 10 m afstand, met min of meer constante rijsnelheid. Het aantal metingen is beperkt, gebruikt is de meting met het hoogste gemeten niveau.

Een kleinste afstand van 110 m is aangehouden voor de HR-vloeren en MR-vloeren. Daarnaast is rekening gehouden met de tussenliggende bebouwing.



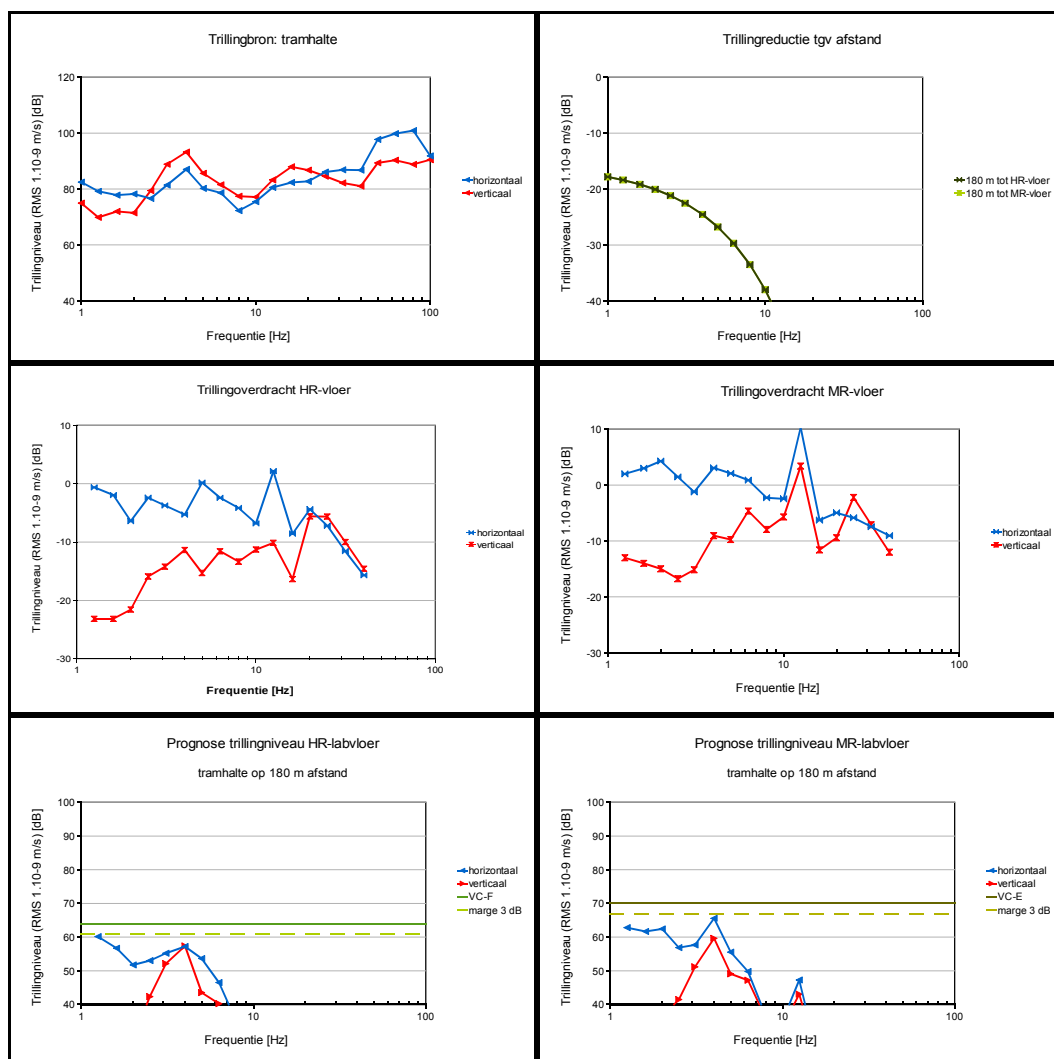
Figuur 3: Prognose trillingniveau op labvloeren bij 110 m afstand tot rechte trambaan, met tussenliggende bebouwing

Voor de HR-vloeren is de prognose een trillingniveau van 63 dB of lager per tertsbands. Voor de MR-vloeren is de prognose een trillingniveau van 69 dB of lager per tertsbands.

4.4. Tramhalte

In Delft, Buitenhofdreef (Voorhof) zijn trillingmetingen verricht naast een tramhalte, op circa 5 m afstand. Het aantal metingen is beperkt, gebruikt is de meting met het hoogste gemeten niveau.

Voor de tramhalte is een kleinste afstand van 180 m aangehouden zowel voor de HR-vloeren alsook voor de MR-vloeren.



Figuur 4: Prognose trillingniveau op labvloeren bij 180 m afstand tot tramhalte

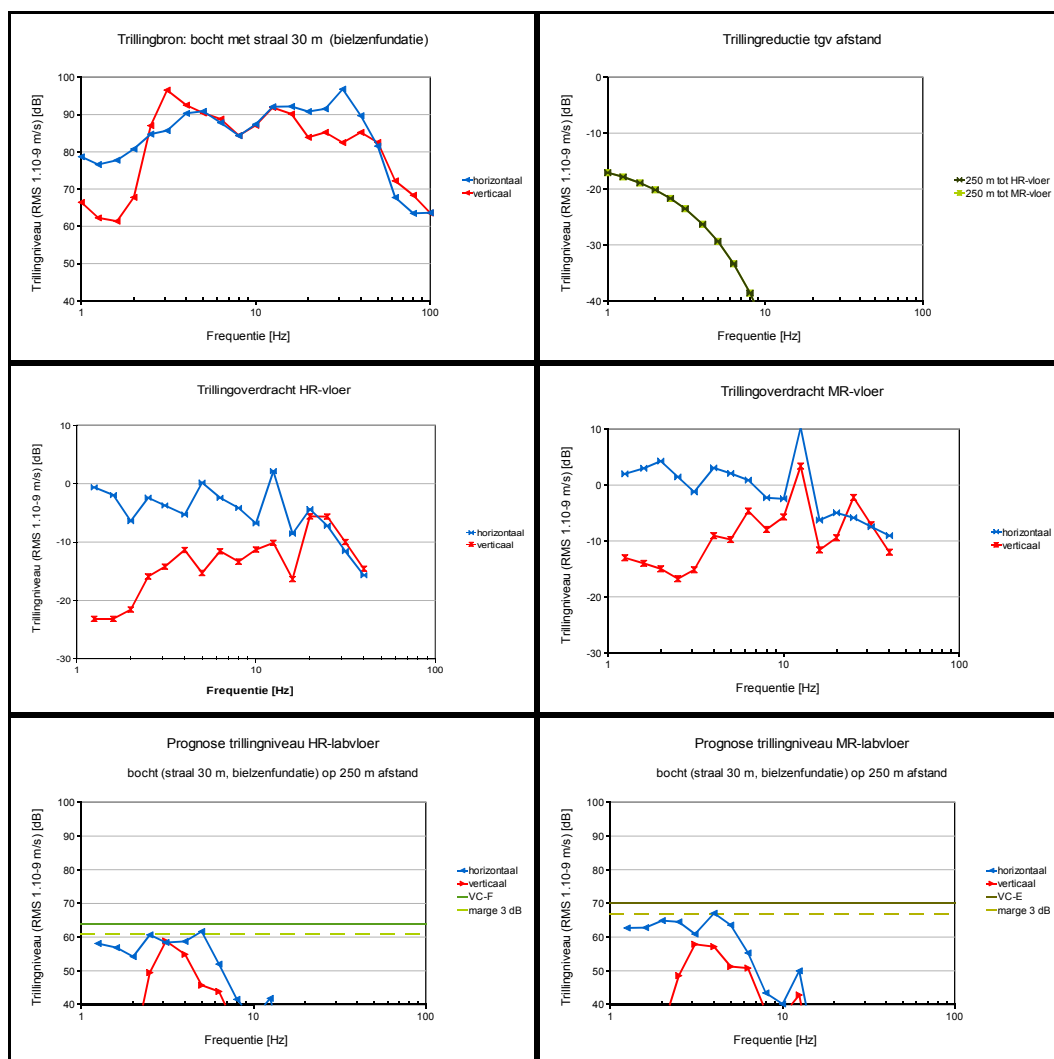
Voor de HR-vloeren is de prognose een trillingniveau van 61 dB of lager per tertsband.

Voor de MR-vloeren is de prognose een trillingniveau van 66 dB of lager per tertsband.

4.5. Bocht met straal 30 m

In Delft, Abtswoudsepark (Tanthof) zijn trillingmetingen verricht naast een bocht in de keerlus aldaar, op circa 10 m afstand. Er zijn meerdere metingen beschikbaar, er is uitgegaan van de hoogst optredende trillingniveaus per tertsband.

Voor de bocht met straal 30 m op bielzenfundatie is een kleinste afstand van 250 m aangehouden zowel voor de HR-vloeren alsook voor de MR-vloeren.



Figuur 5: Prognose trillingniveau op labvloeren bij 250 m afstand tot bocht met straal 30 m

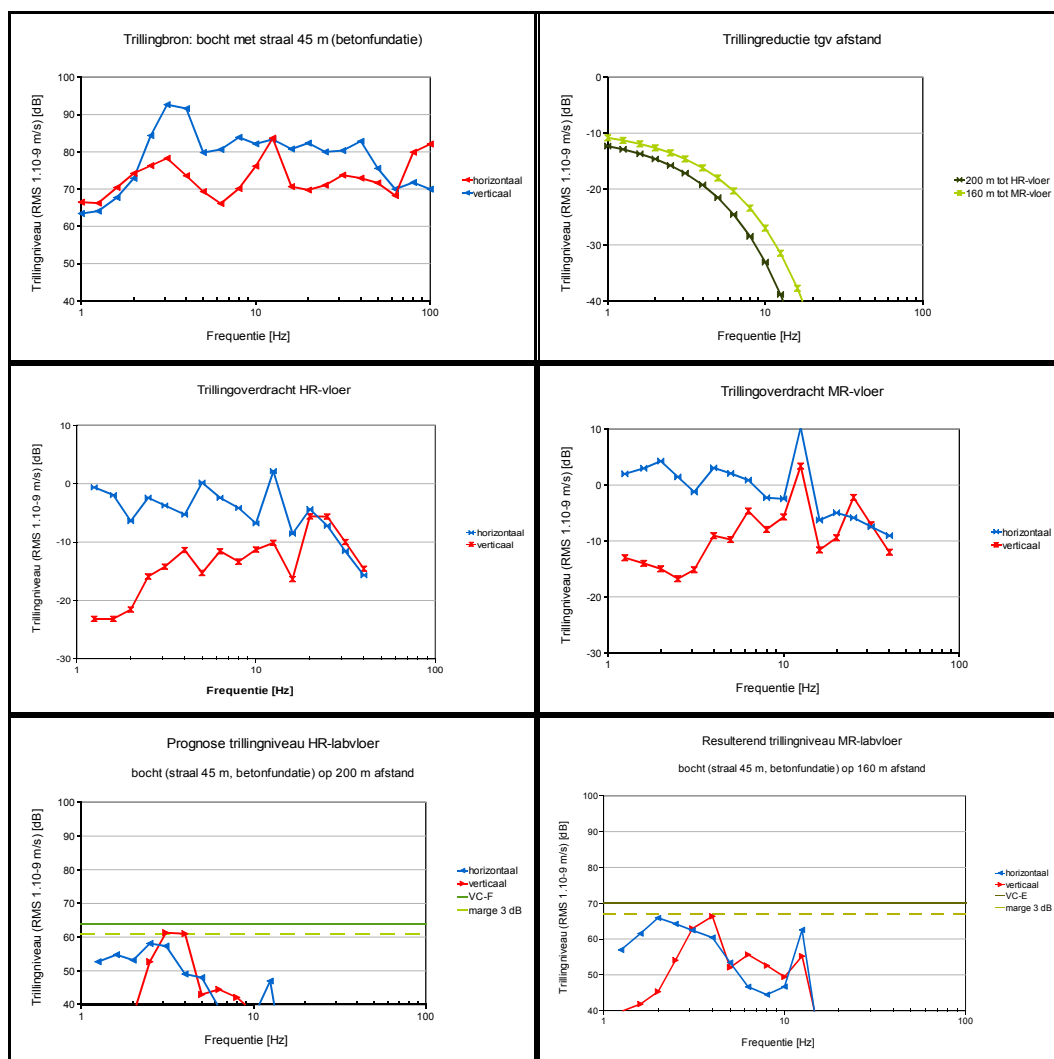
Voor de HR-vloeren is de prognose een trillingniveau van 62 dB of lager per tertsband.

Voor de MR-vloeren is de prognose een trillingniveau van 67 dB of lager per tertsband.

4.6. Bocht met straal 45 m op betonfundatie

In Delft, Papsouwse laan (Voorhof) zijn trillingmetingen verricht naast een bocht in de autorijbaan en autobusbaan aldaar, op circa 20 m afstand. Er zijn meerdere metingen beschikbaar, er is uitgegaan van de hoogst optredende trillingniveaus per tertsuband.

Voor de bocht met straal 45 m op betonfundatie is een kleinste afstand van 200 m aangehouden voor de HR-vloeren, en 160 m voor de MR-vloeren.



Figuur 6: Prognose trillingniveau op labvloeren bij 200 en 160 m afstand tot bocht met straal 45 m

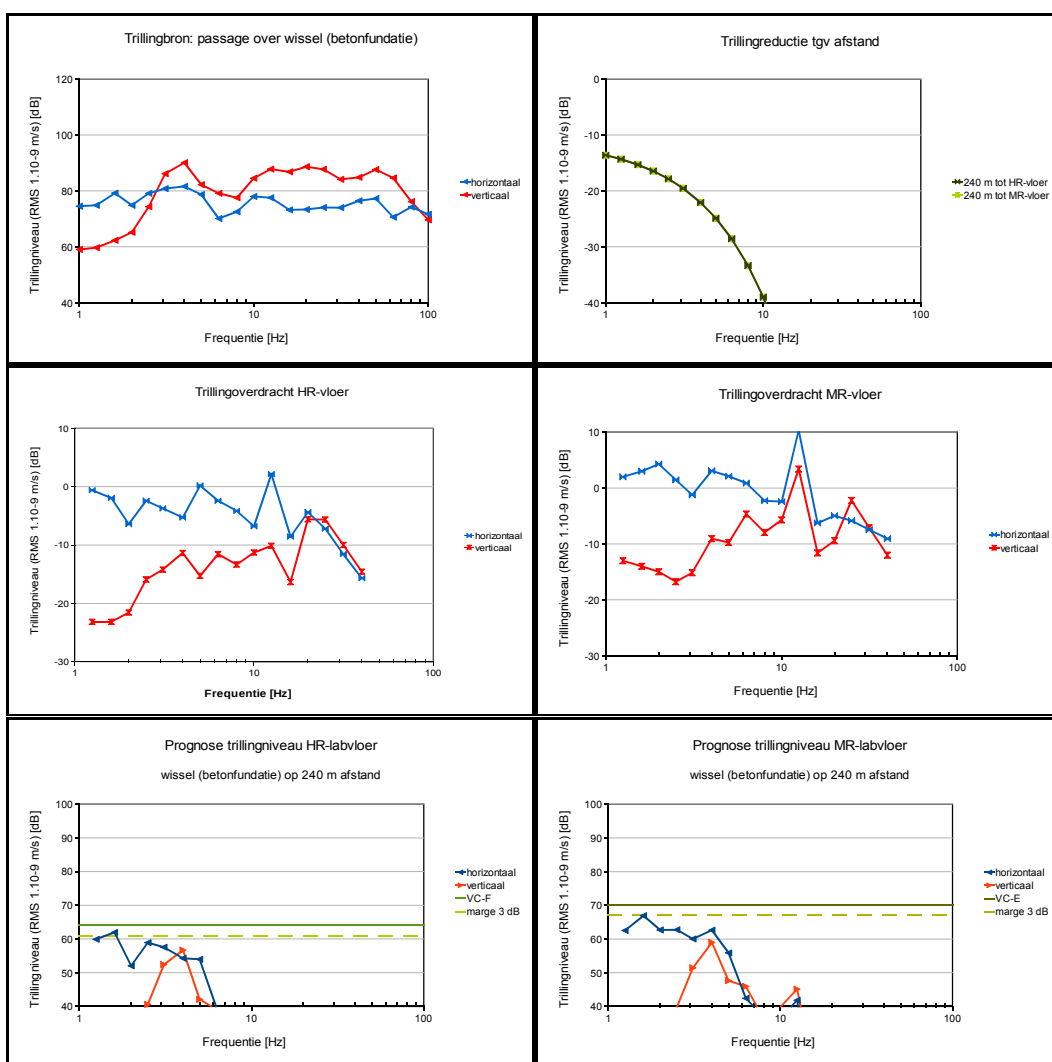
Voor de HR-vloeren is de prognose een trillingniveau van 61 dB of lager per tertsuband.

Voor de MR-vloeren is de prognose een trillingniveau van 66 dB of lager per tertsuband.

4.7. Wissel op betonfundatie

In Den Haag, Laan van Hoornwijck (Ypenburg) zijn trillingmetingen verricht naast een wissel, op circa 20 m afstand. Ter plaatse van de wissel gaan twee trambaantrajecten uiteen, één rechtdoorgaand traject en één afbuigend traject. Er zijn meerdere metingen beschikbaar, er is uitgegaan van de hoogst optredende trillingniveaus per tertsbands.

Voor de wissel op betonfundatie is een kleinste afstand van 240 m aangehouden zowel voor de HR-vloeren alsook voor de MR-vloeren.



Figuur 7: Prognose trillingniveau op labvloeren bij 240 m afstand tot wissel op betonfundatie

Voor de HR-vloeren is de prognose een trillingniveau van 62 dB of lager per tertsbands. Voor de MR-vloeren is de prognose een trillingniveau van 67 dB of lager per tertsbands.

4.8. Rijsnelheden

Uit de beschikbare meetdata blijkt dat een verlaging van de rijsnelheid een 5 à 10 dB lager trillingniveau tot gevolg kan hebben. Dit is niet in de prognoses opgenomen, aangezien partijen zijn overeengekomen uit te gaan van normaal gebruik van de trambaan en bijpassende rijsnelheden op het traject, zonder specifieke beperkingen.

4.9. Overzichtstabel

Bovenstaande minimaal aan te houden afstanden tussen het trambaantraject en de laboratoriumvloeren, alsook de prognose voor de optredende trillingniveaus zijn samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 1: Minimaal aan te houden afstand en prognose trillingbijdrage op laboratoriumvloer

Trillingbron	Minimale afstand	Prognose trillingniveau
HR-laboratoriumvloer, eis VC-F maximaal 64 dB per tertsband		
recht trambaantraject (met tussenliggende bebouwing)	110 m	63 dB
halteplaats	180 m	61 dB
bocht met straal >30 m	250 m	62 dB
bocht met straal >45 m, betonfundatie	200 m	61 dB
wissel op beton	240 m	62 dB
MR-laboratoriumvloer, eis VC-E maximaal 70 dB per tertsband		
recht trambaantraject (met tussenliggende bebouwing)	110 m	69 dB
halteplaats	180 m	66 dB
bocht met straal >30 m	250 m	67 dB
bocht met straal >45 m, betonfundatie	160 m	66 dB
wissel op beton	240 m	67 dB

Uit de beschikbare meetdata blijkt dat een verlaging van de rijsnelheid een 5 à 10 dB lager trillingniveau tot gevolg kan hebben.

Dit rapport bestaat uit:
14 pagina's.

Bijlage I bevat 1 pagina.

Zoetermeer,

In onderstaande documentenlijst zijn de meest relevante documenten genoemd, rapportages van eerdere metingen of berekeningen, die ten grondslag liggen aan deze managementsamenvatting.

Rapport	Datum	Relevante inhoud
SF 921-1-RA-001	6 december 2011	trillingonderzoek zuid-locatie, trillingoverdracht bodem, metingen achtergrondniveaus en trillingbronnen
SF 921-4-RA	25 juni 2012	variantenstudie vloerontwerp en trillingoverdracht vloerconstructies met enkelvoudige rekenmodellen
SF 921-5-RA	13 september 2012	berekening trillingoverdracht vloerconstructies met EEM-rekenmodel
SF 921-7-RA	17 oktober 2012	toetsing rekenmodellen trillingoverdracht vloerconstructies
SF 921-10-RA-001	20 maart 2013	verificatie van EEM-rekenmodel met proefpaalmetingen
SG 921-8-RA	17 april 2013	trillingmetingen trambaan, bochten, wissel