

**TRAM VLAANDEREN MAASTRICHT  
PROGNOSE TRILLINGEN**

GEMEENTE MAASTRICHT

26 november 2013  
077425143:B - Definitief  
B02046.000016.0100





# Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>3</b>
1.1	Algemeen.....	3
1.2	Doel van dit rapport.....	4
1.3	Scope van het project.....	4
<b>2</b>	<b>Beoordelingskader</b> .....	<b>5</b>
2.1	Inleiding.....	5
2.2	Aanpak hinderbeoordeling volgens SBR.....	5
2.3	Aanpak hinderbeoordeling Maastricht.....	7
<b>3</b>	<b>Aanpak trillingsprognose</b> .....	<b>8</b>
3.1	Opzet trillingsprognose .....	8
3.2	Uitgangspunten .....	8
<b>4</b>	<b>Trillingsmetingen</b> .....	<b>11</b>
4.1	Algemeen.....	11
4.2	Veldonderzoek .....	11
4.3	Meetresultaten.....	15
4.4	Toets huidige situatie .....	18
4.5	Uit de metingen getrokken conclusies .....	19
<b>5</b>	<b>Prognose</b> .....	<b>21</b>
5.1	Aanpak prognose.....	21
5.2	Bronsterkte.....	21
5.3	Opslingerende werkingvloeren .....	25
5.4	Demping van de trillingen .....	25
<b>6</b>	<b>Toets trillingsintensiteit</b> .....	<b>26</b>
6.1	SBR-richtlijn Trillingen deel B Hinder voor personen in gebouwen .....	26
6.2	Toets prognose aan sbr-richtlijn Trillingen deel B.....	26
6.3	Trillingsdempende Maatregelen.....	28
<b>7</b>	<b>Conclusie</b> .....	<b>31</b>
<b>Bijlage 1</b>	<b>SBR-richtlijn Trillingen deel B Hinder voor personen in gebouwen</b> .....	<b>33</b>
<b>Bijlage 2</b>	<b>Theorie trillingen</b> .....	<b>36</b>
<b>Bijlage 3</b>	<b>Meetresultaten</b> .....	<b>39</b>
Bijlage 3.1	Spoor (Limmelderweg).....	39
Bijlage 3.2	Sint Maartenslaan 5.....	41
Bijlage 3.3	Van Hasselkade 10.....	43
Bijlage 3.4	Maasboulevard .....	45

<b>Bijlage 4</b>	<b>Trillingspredictie.....</b>	<b>47</b>
Bijlage 4.1	Spoor (Limmelderweg).....	47
Bijlage 4.2	Wegverkeer .....	47
Bijlage 4.3	Vloerbebouwing .....	48
<b>Bijlage 5</b>	<b>Referentiedocumenten .....</b>	<b>49</b>
<b>Colofon.....</b>		<b>50</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 ALGEMEEN

Om de bereikbaarheid tussen Belgisch en Nederlands Limburg (in het bijzonder Maastricht) te verbeteren heeft de Belgische vervoerder De Lijn in mei 2004 een tramverbinding tussen Hasselt en Maastricht voorgesteld. Dit als onderdeel van haar Spartacusplan om het Openbaar Vervoer (hierna te noemen OV) in Belgisch Limburg een kwaliteitsimpuls te geven en een volwaardig alternatief te bieden voor de auto. Belgische en Nederlandse overheden en vervoermaatschappij De Lijn werken sindsdien gezamenlijk aan het tot stand brengen van een tramverbinding tussen Hasselt en Maastricht. De provincie Limburg werkt met de gemeente Maastricht binnen de Projectorganisatie TVM aan de uitwerking en invulling van het Nederlandse deel van het Vlaamse Spartacusplan; de Tram Vlaanderen-Maastricht (TVM).

TVM valt uiteen in een buitenstedelijk tracé en een binnenstedelijk tracé. Op 31 mei 2011 heeft de gemeente Maastricht een definitieve keuze gemaakt voor het binnenstedelijk tracé (Boschstraat - Bassin - Maasboulevard - Wilhelminabrug naar station Maastricht) en inmiddels is in 2012 een planstudie uitgevoerd naar de haalbaarheid van het project. Parallel hieraan is tevens een haalbaarheidsstudie naar het buitenstedelijk tracé uitgevoerd. Op basis van deze haalbaarheidsstudies heeft de gemeenteraad van Maastricht op 18 december 2012 het besluit genomen om de volgende fase richting realisatie van de tramlijn te starten.

Het doel is om vóór 2018 een tramverbinding tussen Hasselt en Maastricht te realiseren om een stevige impuls te geven aan de bereikbaarheid van de aan deze tramverbinding gelegen stedelijke gebieden en hierdoor bij te dragen aan de versterking van het maatschappelijk en economisch functioneren van deze stedelijke gebieden.

Om de aanleg van de tramverbinding vanaf de Nederlands-Belgische grens ter plaatse van Lanaken via de binnenstad van Maastricht naar station Maastricht mogelijk te maken is het noodzakelijk om de tramlijn planologisch-juridisch te verankeren in een bestemmingsplan. Om het milieu volwaardig mee te kunnen nemen bij de besluitvorming over projecten die gevolgen kunnen hebben voor de (leef)omgeving wordt tegelijkertijd een m.e.r.-procedure doorlopen.

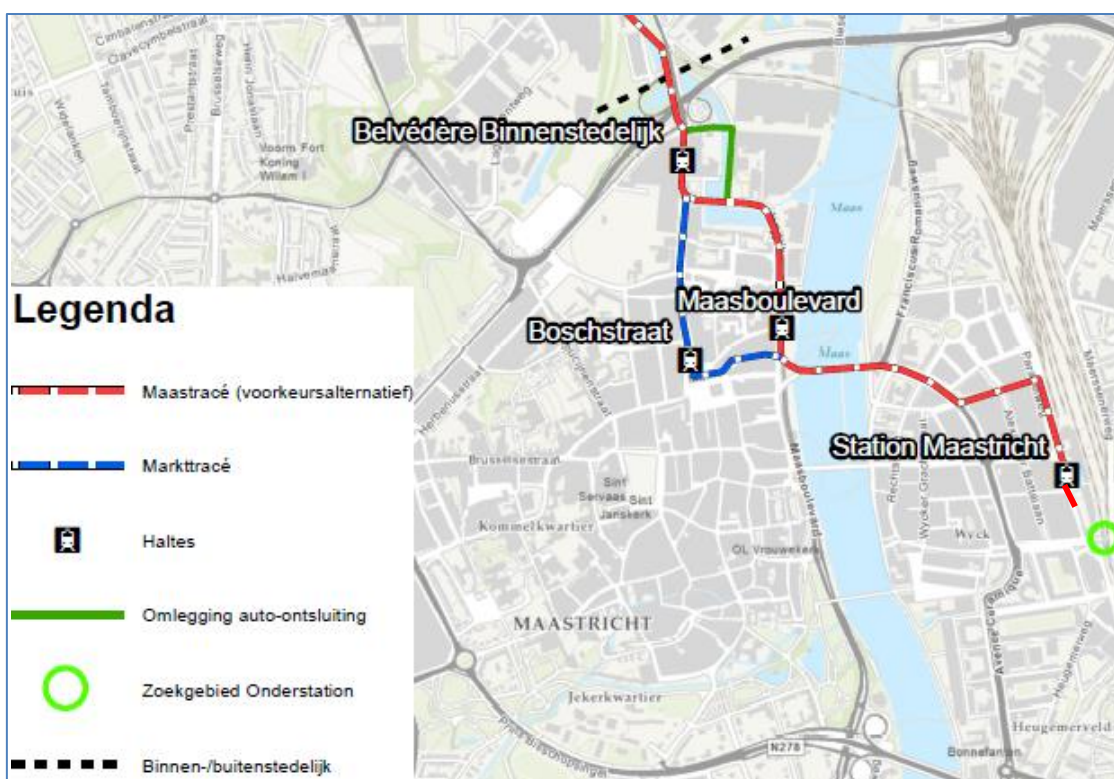
Het bestemmingsplan beoogt het vastleggen van de circa vijf kilometer geëlektrificeerde tramverbinding op Nederlands grondgebied met drie haltes; ter hoogte van Belvédère, de Van Hasseltkade en het Centraal Station van Maastricht. Buitenstedelijk wordt gebruik gemaakt van het bestaande goederenspoor. Binnenstedelijk wordt een nieuwe railverbinding aangelegd.

## 1.2 DOEL VAN DIT RAPPORT

Het voorliggende Trillingenonderzoek is uitgevoerd voor het opstellen van een bestemmingsplan, met als doel het in beeld brengen van de trillingen veroorzaakt in de gebruiksfase door de tram op de lijn Maastricht–Vlaanderen (Hasselt) en deze te toetsen aan de SBR-richtlijn Trillingen Deel B Hinder voor personen in gebouwen.

## 1.3 SCOPE VAN HET PROJECT

Het projectgebied is gelegen tussen het NS-station Maastricht en de kruising van de Bosscherweg met het goederenspoor aan de Noordzijde van Maastricht. In figuur 1 is de voorkeursvariant over de Maasboulevard in rood aangegeven en de variant over de Boschstraat en de Markt in blauw.



Figuur 1, Varianten Binnenstedelijke deel tramlijn Maastricht-Vlaanderen.

## 1.4 LEESWIJZER

In dit rapport wordt in hoofdstuk 2 een samenvatting gegeven van het gebruikte beoordelingskader, de SBR-richtlijn Trillingen deel B Hinder voor personen in gebouwen. In hoofdstuk 3 is de aanpak van de trillingsprognose weergegeven samen met de gehanteerde uitgangspunten. Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 ingegaan op de uitgevoerde trillingsmetingen. In hoofdstuk 5 wordt de trillingsprognose toegelicht. De toetsing van de trillingen in de huidige en toekomstige situatie zullen worden getoetst in hoofdstuk 6. Tot slot volgen in hoofdstuk 7 de conclusies en aanbevelingen.

# 2 Beoordelingskader

## 2.1 INLEIDING

Voor de beoordeling van trillingen is momenteel geen wettelijk kader beschikbaar. Overeenkomstig de gangbare praktijk wordt voor dit project gebruik gemaakt van de SBR richtlijnen trillingen (SBR, 2003)

De volgende richtlijnen zijn van toepassing:

- In de SBR-richtlijn deel A, schade aan gebouwen, worden criteria/grenswaarden van maximaal toelaatbare trillingen weergegeven om schade aan gebouwen te voorkomen.
- SBR-richtlijn deel B, hinder voor personen, definieert grenswaarden voor trillingen voor hinder voor personen.
- SBR-richtlijn deel C, storing aan apparatuur, worden grenswaarden voor maximaal toelaatbare trillingen weergegeven om storingen aan apparatuur te voorkomen.

De hinderbeleving, waarvoor in deel B van de richtlijn een beoordelingskader is opgenomen, wordt hier als uitgangspunt voor het toetsingskader gehanteerd.

Schade aan bebouwing, onderwerp in deel A van de richtlijn, komt aan de orde bij hogere trillingsniveaus dan hinder en is daardoor niet maatgevend.

Richtlijn C heeft betrekking op zeer specifieke trillingsgevoelige objecten. Omdat er bij het doorlopen van het tracé op Google Maps geen bedrijven zijn opgevallen waarvan verwacht wordt dat zij zeer specifieke trillingsgevoelige apparatuur hebben staan, wordt deel C verder niet in de beoordeling betrokken.

## 2.2 AANPAK HINDERBEOORDELING VOLGENS SBR

In SBR-richtlijn deel B, hinder voor personen, worden trillingen door spoorverkeer beoordeeld als een herhaald voorkomende trilling gedurende lange tijd.

Voor de aan te houden streefwaarden wordt onderscheid gemaakt in de functie van het gebouw en eventueel in de functie van de ruimte in dat gebouw:

- Gezondheidszorg.
- Wonen.
- Kantoor en onderwijs.
- Bijeenkomstgebouwen (bioscopen, aula's, schouwburgen, kerken).
- Kritische werkruimten (bepaalde ruimten in laboratoria, operatiekamers, studiezalen).

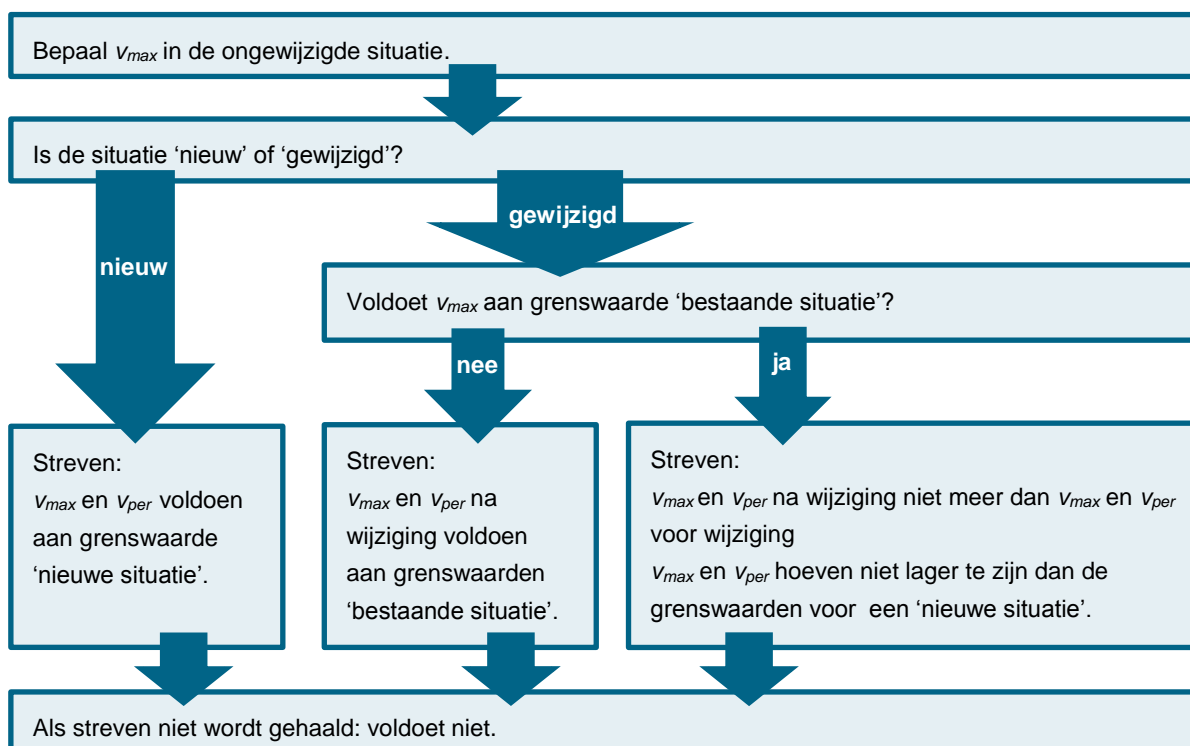
De richtlijn maakt onderscheid tussen de beoordeling van een bestaande, nieuwe, en gewijzigde situatie.

De aanpassingen die aan de bestaande wegen gaan plaatsvinden (aanleg tramlijn) worden beschouwd als een nieuwe situatie.

Beoordeling vindt plaats aan de hand van de maximale trillingssterkte ( $v_{eff,max}$ ) en de effectieve waarde van de maxima per beoordelingsperiode ( $v_{per}$ ). In de  $v_{per}$  wordt zowel de gemiddelde effectieve waarde van de (gemeten) trillingen meegenomen als de gesommeerde duur van de trillingen in de beoordelingsperiode.

De SBR-richtlijn deel B (hinder voor personen in gebouwen) geeft drie verschillende grenswaarden  $A_1$ ,  $A_2$  en  $A_3$  voor trillingen (dimensieloze snelheden) op. Deze streefwaarden zijn erop gericht hinder door trillingen te voorkomen (nieuwe situatie) of zoveel mogelijk te beperken (gewijzigde situatie). Voor een toelichting op de grenswaarden wordt verwezen naar bijlage 1.

Het volgende stroomschema (zie figuur 2) geeft een overzicht van de beoordelingsprocedure van de trillingssterkte op basis van streefwaarden voor de gewijzigde situatie.



Figuur 2, Schematisatie beoordeling trillingen gewijzigde situatie SBR-richtlijn Trillingen deel B.

De streefwaarden voor de bestaande situatie zijn weergegeven in tabel 1.

Gebouwfunctie	dag en avond			nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Gezondheidszorg	0,2	0,8	0,1	0,2	0,4	0,1
Wonen	0,2	0,8	0,1	0,2	0,4	0,1
Onderwijs en kantoor	0,3	1,2	0,15	0,3	1,2	0,15
Bijeenkomst	0,3	1,2	0,15	0,3	1,2	0,15
Kritische werkruimte	0,1	0,1	-	0,1	0,1	-

Tabel 1, Streefwaarden voor herhaald voorkomende trillingen voor bestaande situatie (SBR-richtlijn Trillingen deel B).



Ter vergelijking zijn in tabel 2 de streefwaarden voor een nieuwe situatie opgenomen.

Gebouwfunctie	dag en avond			nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Gezondheidszorg	0,1	0,4	0,05	0,1	0,2	0,05
Wonen	0,1	0,4	0,05	0,1	0,2	0,05
Onderwijs en kantoor	0,15	0,6	0,07	0,15	0,6	0,07
Bijeenkomst	0,15	0,6	0,07	0,15	0,6	0,07
Kritische werkruimte	0,1	0,1	-	0,1	0,1	-

Tabel 2, Streefwaarden voor continue trillingen voor nieuwe (of bestaande) situaties, (SBR-richtlijn Trillingen deel B).

### 2.3 AANPAK HINDERBEOORDELING MAASTRICHT

De voorgenoemde aanpassingen betreffen een aanpassing van de huidige situatie. Echter in de huidige situatie is wel een weg maar geen tram aanwezig. Om deze reden is er voor gekozen uit te gaan van een 'nieuwe situatie', zoals omschreven in de SBR.

De toetsing wordt overeenkomstig figuur 2 als volgt uitgevoerd:

- Er wordt een toetsing uitgevoerd van de bestaande situatie aan de streefwaarden voor herhaald voorkomende trillingen voor bestaande situaties (zie tabel 2).
- Voor de nieuwe situatie wordt vervolgens getoetst of de trillingsintensiteit niet de grenswaarden, zoals deze zijn genoemd in Tabel 1, overschrijden.
- Bij een overschrijding van de grenswaarden uit tabel 1 zal een trillingsreducerende maatregel worden voorgesteld waarmee de grenswaarden wel gehaald kunnen worden.

Omdat het merendeel van de bebouwing de functie wonen heeft en hiervoor de strengere eisen gelden is de toetsing in eerste instantie voor deze functie uitgevoerd.

Ten behoeve van de beoordeling van de trillingen zal hiermee voor de toekomstige situatie een "geen hinder"-grens worden bepaald, die de afstand aangeeft waarop geen hinder wordt verwacht voor de functie 'wonen en gezondheidszorg' (hierna te noemen 'wonen'). Voor bebouwing binnen deze afstand is de gebouwfunctie nader onderzocht en is in geval van een andere functie (kantoor, bedrijf) vervolgens het optredende trillingsniveau getoetst aan de streefwaarden die behoren bij de gebouwfunctie.

# 3

## Aanpak trillingsprognose

### 3.1 OPZET TRILLINGSPROGNOSE

#### *Algemeen*

Voor het prognosticeren van trillingen zijn geen algemene modellen beschikbaar die zondermeer een betrouwbare uitkomst leveren. Alle bestaande modellen dienen op metingen in het veld te worden gefit om een zo betrouwbaar mogelijk model te kunnen opstellen. In Maastricht was geen bruikbaar onderzoek bekend voor het opstellen van een trillingsprognose ten behoeve van de toekomstige tram. Ten behoeve van de voorliggende prognose zijn een drietal metingen uitgevoerd met de volgende doelen:

- Dempende werking van de grond op de trillingen inventariseren.
- Een inschatting kunnen maken van de bronwaarde van de trilling (trillingen op 5 m uit het spoor).
- Inventarisatie van de dempende/opslingerende werking van de trilling binnen gebouwen.
- Trillingen in de huidige situatie beoordelen (twee locaties, langs het tramtracé).

Naast een meting in het veld is tevens een literatuuronderzoek gedaan naar de bronwaarden van een tram op 5 m uit de sporen. Op basis van de metingen en de literatuur is een analytisch model opgesteld. Met behulp van dit model is de afname van de trillingsintensiteit ten opzichte van de afstand geprognoseerd.

Voor elk van de te onderscheiden deeltrajecten is met behulp van het beoordelingskader (SBR-richtlijn Trillingen deel B Hinder voor personen in gebouwen, zie hoofdstuk 2) een afstand bepaald waar geen trillingshinder meer verwacht wordt. Deze afstanden zijn langs het spoortracé gelegd en bepaald is waar mogelijk trillingshinder kan gaan optreden in de toekomstige situatie.

### 3.2 UITGANGSPUNTEN

De trillingen worden door de tram afgegeven aan de ondergrond en zullen door de ondergrond de bebouwing en de vloeren in de bebouwing bereiken. Hierin zijn de volgende lokale factoren bij het opstellen van een trillingsprognose beschouwd:

- Grondopbouw.
- Bebouwing (type en funderingswijze).
- Dienstregeling.
- Type tram.
- Sporen lay-out.

Onderstaand worden de bovengenoemde uitgangspunten nader toegelicht.

### Grondopbouw

Het DINO-loket van TNO ([www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl)) is geraadpleegd om inzicht te verkrijgen in de opbouw van de ondergrond langs het tramtracé. Bij dit loket zijn verschillende sonderingen en handboringen beschikbaar. Voor het centrum van Maastricht is de volgende grondopbouw maatgevend, zie tabel 3.

Op basis van de archiefgegevens is de variatie in de bodemopbouw beperkt, zodat de maatgevende grondopbouw representatief is voor het gehele tracé.

Bovenkant laag [m NAP]	
+43 tot +47 (maaiveld)	Toplaag, Zand en of leem, soms grind- of klei-insluitingen
+43	Leem
+44	Grind
+36	Mergel, (zacht kalksteen)
+28	Verkende diepte

Tabel 3, Schematisatie van de grondopbouw (centrum Maastricht).

Door metingen uit te voeren op locatie kan de dempende werking van de grond het best worden benaderd. In hoofdstuk 3 worden de uitgevoerde metingen nader toegelicht.

### Bebouwing

Het centrum van Maastricht bestaat veelal uit bebouwing van minimaal 40 jaar oud (ingeschat op basis van Google Maps).

Aan de hand van de ouderdom van de bebouwing en de grondopbouw wordt ingeschat dat de bebouwing de volgende kenmerken heeft:

- Fundering op staal.
- Houten vloeren.
- Metselwerk.
- Beschermd stadsgezicht en mogelijk monumentale panden.

Naast de bebouwing van 40 jaar en ouder is er een aantal panden in het centrum van Maastricht dat jonger is. Deze bebouwing verschilt van de oudere bebouwing. Aan deze bebouwing kunnen op basis van de uiterlijke kenmerken (Google Maps) de volgende kenmerken worden ingeschat:

- Fundering op staal maar mogelijk ook op palen.
- Betonnen vloeren.
- Betonbouw.

Naast de kenmerken van de bebouwing is voor het bepalen van trillingshinder ook van belang de bestemming van de bebouwing te kennen. Op basis van Google Maps is ingeschat dat de bebouwing veelal een woonbestemming heeft (hieronder vallen ook gezondheidszorg of hotels). Voor de bestemming wonen gelden de strengste richtlijnen.

### ***Dienstregeling tram***

Voor de toetsing van de trillingen is het van belang te weten hoe vaak er in een periode een tram passeert. Overeenkomstig de rapportage Akoestisch onderzoek tramverbinding Vlaanderen Maastricht (TVM) (ARCADIS 4 november 2013) zijn de volgende aantallen trams (vier bakken per tram) per periode aangehouden:

- Dag (7.00 uur tot 19.00 uur) 2 trams per uur, per richting.
- Avond (19.00 uur tot 23.00 uur) 1,25 trams per uur, per richting.
- Nacht (23.00 uur tot 7.00 uur) 1,125 trams per uur, per richting.

Naast het aantal trams wat per periode passeert is ook de snelheid van de trams van invloed op de trillingsintensiteit. Er wordt op verschillende trajecten met een verschillende snelheid gereden.

Onderstaand is een samenvatting van de bepaalde rij snelheden van de trams per locatie weergegeven.

▪ Bosschstraat	30 km/uur
▪ Maasboulevard	40 km/uur
▪ Markt/Gubblestraat	20 km/uur
▪ Wilhelminabrug/WilhelminaSingel/Sint Maartenslaan	30 km/uur
▪ Paralelweg / Spoorweglaan	20 km/uur

### ***Type tram***

Het materieel voor de tram is nog niet bekend. Wel is er een principe keuze gemaakt voor een Regio Citadis-achtige tram. Dit is vergelijkbaar met een Lightrail voertuig.

### ***Sporenlay-out***

De goederenspoorlijn bestaat uit een enkel spoor. Na het uittakken van de tram van het goederenspoor verdubbelt het tramspoor, zodat iedere rijrichting een afzonderlijk spoor heeft. De sporenlay-out is van invloed op de trillingen. Wissels en spoorvoegen hebben een nadelig effect op de trillingsintensiteit. De trilling veroorzaakt bij het doorrijden van een wissel is op basis van ervaringen met andere rail-infra projecten 1,5 maal groter dan het rijden van een tram op een vrije baan.

# 4 Trillingsmetingen

## 4.1 ALGEMEEN

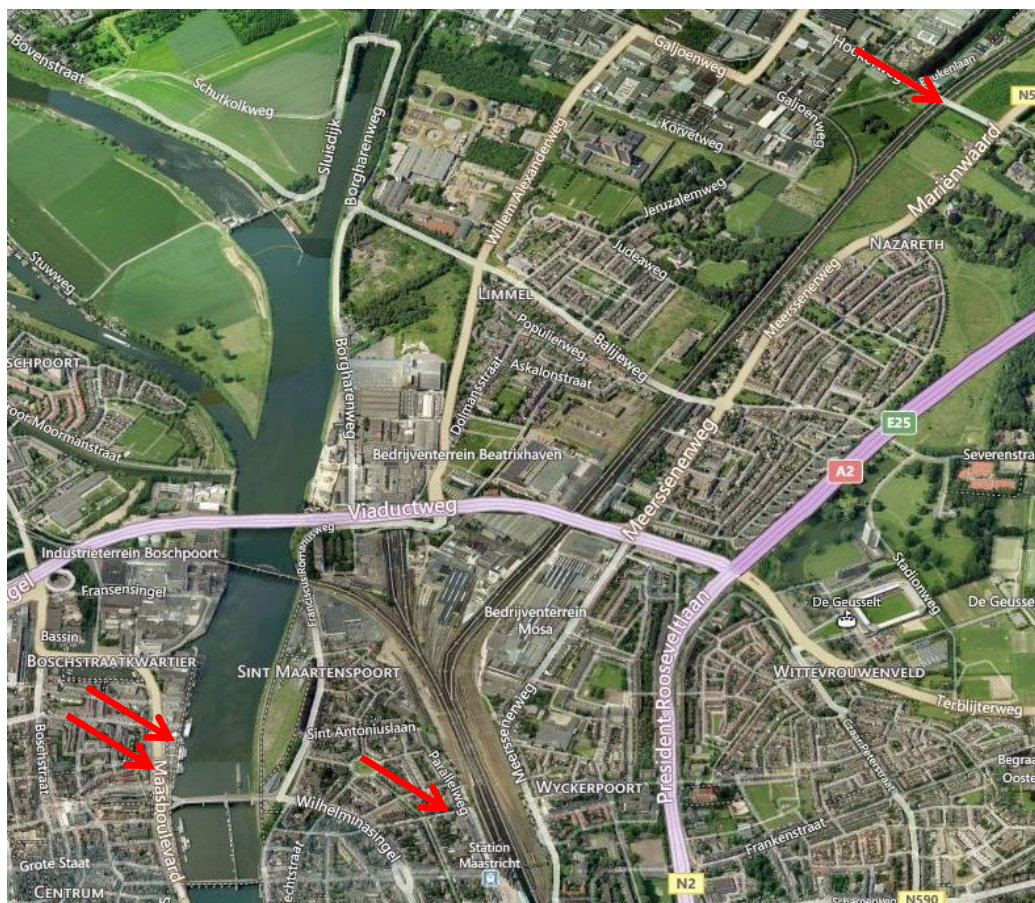
Voor het modeleren van trillingen in de grond is geen model beschikbaar. Projectspecifiek dient een model te worden ontwikkeld dat door het te fitten op meetresultaten een betrouwbaar resultaat levert. Hierdoor is het noodzakelijk om metingen op locatie uit te voeren op basis waarvan de dempende werking van de grond kan worden bepaald en de bronwaarde (trillingsintensiteit op 5 m uit de trillingsbron) en de overdracht naar de bebouwing geverifieerd kunnen worden. Onderstaand worden de trillingsmetingen nader toegelicht.

## 4.2 VELDONDERZOEK

Ten behoeve van het verkrijgen van voldoende informatie van de trillingen veroorzaakt door een tram en de dempende werking van de grond zijn op vier locaties trillingsmetingen uitgevoerd:

- Limmelderweg (24 oktober 2013, meting aan trillingen spoor).
- Maasboulevard (28 oktober 2013 schuin tegenover van Hasselkade 10).
- Van Hasselkade 10 (30 oktober 2013).
- Sint Maartenslaan 5 oneven (30 oktober 2013).

Een overzicht van de meetlocaties is weergegeven in figuur 3. In bijlage 3 zijn foto's van de meetlocaties weergegeven.



Figuur 3, Overzicht meetlocaties.

De locatie Limmelderweg is niet langs het tracé van één van beide varianten gelegen. Deze locatie is daarentegen langs het spoor gekozen om zo een inschatting te kunnen maken van de bronwaarde van een lightrail voertuig, zoals de GTW (Veolia Heuveland). Een dergelijk lightrail voertuig lijkt sterk op een tram en is daarmee het meest maatgevend voor een tram op een ondergrond zoals deze in Maastricht en omgeving wordt aangetroffen.

De metingen aan de bebouwing aan de Van Hasseltkade 10 en de Sint Maartenslaan 5 is geselecteerd aan de hand van de volgende criteria:

- Leeftijdbebouwing.
- Ligging ten opzichte van de toekomstige tramsporen.
- Bestemming van de panden.
- Ligging aan het voorkeurstracé.

Aangezien de bebouwing aan de Sint Maartenslaan en de van Hasseltkade dicht langs de weg zijn gelegen was hier niet de mogelijkheid om een meetraai op te stellen en de dempende werking van de grond te bepalen. Daarom is langs de Maasboulevard een aanvullende meting uitgevoerd.

Bij de metingen zijn de trillingsniveaus gemeten die bij de huidige wegconfiguratie en op het huidige spoor optreden. De trillingsmetingen in het veld en de primaire dataverwerking van deze onderzoeksgegevens zijn uitgevoerd door DPA Cauberg-Huygen. De meetresultaten zijn vastgelegd in bijlage 3.

Om de trillingen die de treinen in de grond veroorzaken te kunnen meten, is gebruik gemaakt van snelheidsopnemers. De snelheidsopnemers worden afgesteld op een vaste sample-periode van een aantal seconden. Per periode wordt steeds de hoogst gemeten waarde van de trillingssnelheid opgeslagen. Per passerend voertuig is tijdens de metingen steeds de tijd en het type voertuig genoteerd.

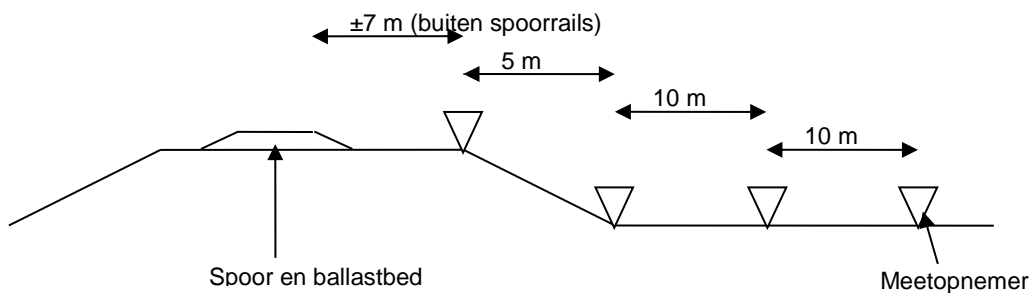
#### Opstelling Limmelderweg

De opstelling aan de Limmelderweg bestond uit een meetraai van vijf meetopnemers. De raai stond haaks op het spoor en langs een gedeelte van de spoorbaan. Deze is vrij van kunstwerken en wissels. De eerste meetopnemer werd op ongeveer 7 m van het spoor geplaatst, zie figuren 2 en 3.

De tweede meetopnemer is op een afstand van circa 12 m van het spoor neergezet, de derde op circa 22 m, de vierde op ongeveer 32 m en de vijfde op 42 m, zie figuur 2 en 3. Op deze manier worden de trillingen veroorzaakt door de trein op verschillende afstanden van het spoor gemeten.



Figuur 4, Meetopstelling Limmelderweg (meting trillingen spoor).



Figuur 5, Schematisatie meetopstelling Limmelderweg.

Hoe verder het meetsysteem zich van het spoor bevindt des te lager zal de gemeten trillingsintensiteit zijn. Op deze manier kan uit de meetresultaten de demping van de trillingssnelheid worden bepaald samen met de bronwaarde van de trilling op 5 m uit het spoor.

De trillingsmetingen aan de Limmelderweg zijn enkel op het maaiveld uitgevoerd. Er zijn geen metingen aan de bebouwing uitgevoerd.

De duur van de meting (exclusief opbouwen en testen van de meetopstelling) betreft zes uur.

#### *Maasboulevard*

De metingen aan de Maasboulevard zijn op vergelijkbare wijze uitgevoerd als de meting aan de Limmelderweg, met als verschil dat hier uitsluitend autoverkeer op een wegverharding (asfalt) als trillingsbron voorhanden was.

Duur van de meting (exclusief opbouwen en testen van de meetopstelling) betreft drie uur.

#### *Van Hasselkade 10 en Sint Maartenslaan 5*

Om naast een beeld van de dempende werking van de grond op de trillingsoverdracht ook een beeld te verkrijgen in hoeverre trillingen in de bebouwing een dempend effect of een opslingerend effect kennen is op twee locaties langs het voorkeustracé in de bebouwing gemeten. Op deze locaties is steeds op de straat tussen de gevel en de weg een trillingsopnemer op maaiveld geplaatst en zijn er twee opnemers in de bebouwing geplaatst. De eerste meter dicht op de fundering om na te gaan welk dempend effect de overgang van de grond naar de fundering heeft op de trilling. Een tweede meter is midden op de vloer van de tweede of derde verdieping geplaatst om hier het effect van de overgang van de trilling uit de constructie op de vloer te bepalen.



Figuur 6, Meetopstelling binnen, Links aan de Sint Maartenslaan (tweede verdieping), rechts Van Hasselkade (derde verdieping).

Tijdens een eerste verkenning op 28 oktober aan de Sint Maartenslaan bleek dat de trillingen die afgegeven werden door de bussen een te lage intensiteit hadden om binnen in het pand te kunnen meten. Daarom is besloten tijdens de meting op 30 oktober 2013 een 42 tons vrachtwagen (leeg 15 ton, lading 27 ton) in te zetten om meer trillingen te veroorzaken die wel meetbaar zijn. De vrachtauto heeft gedurende de meting 37 passages gemaakt in twee uur tijd, waardoor een voldoende grote set aan meetdata is verkregen.



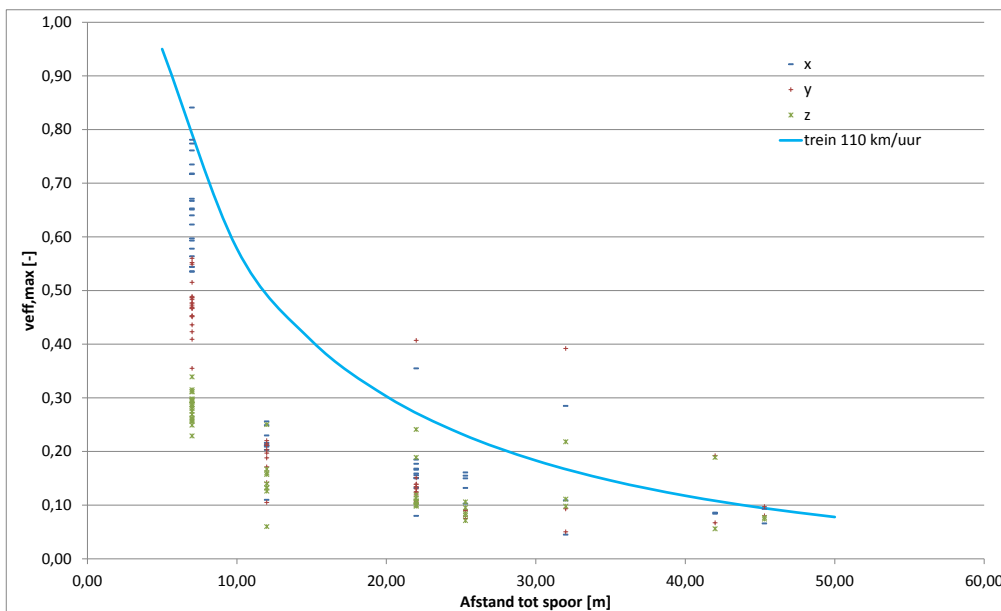
De duur van de metingen betrof (exclusief opbouwen en testen van de meetopstelling) voor de Van Hasseltkade en de Sint Maartenslaan beide twee uur.

### 4.3 MEETRESULTATEN

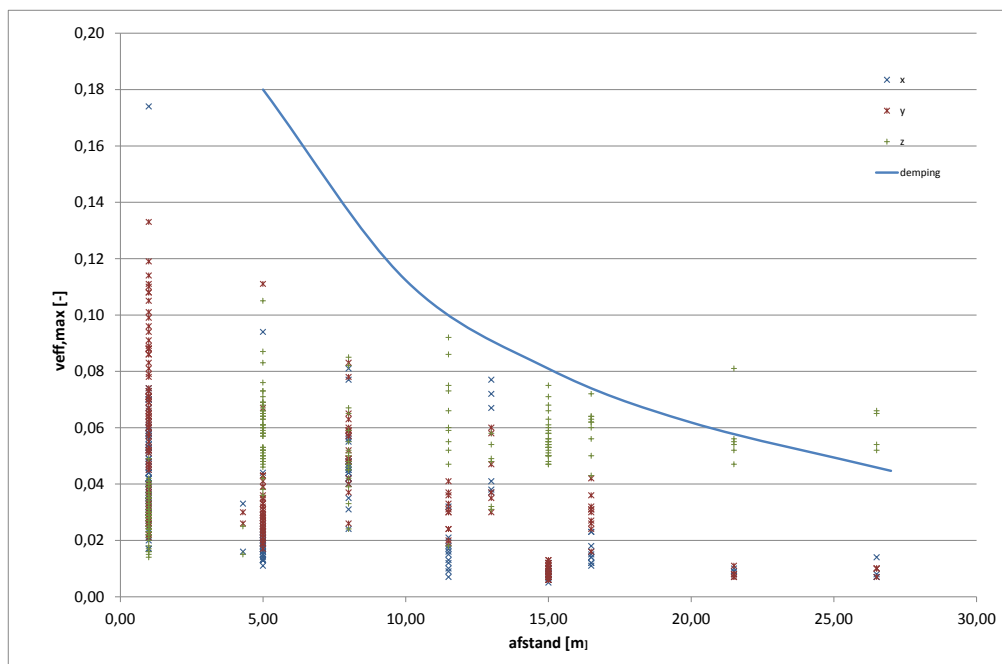
De meetresultaten zijn in drie onderdelen uitgewerkt, namelijk als volgt:

- Resultaten meting langs het bestaande spoor (meting Limmelderweg).
- Resultaten maaiveld meting langs de weg (Maasboulevard, Van Hasseltkade en Sint Maartenslaan).
- Resultaten van metingen in de panden (Van Hasseltkade en Sint Maartenslaan).

Hierdoor is na afloop van de meting de piekwaarde van de trilling in de verkregen data terug te vinden. Op deze wijze is voor alle meetopnemers de data uitgewerkt tot een trillingsintensiteit  $v_{max}$ . De meetdata is weergegeven in de figuren 7, 8 en 10.

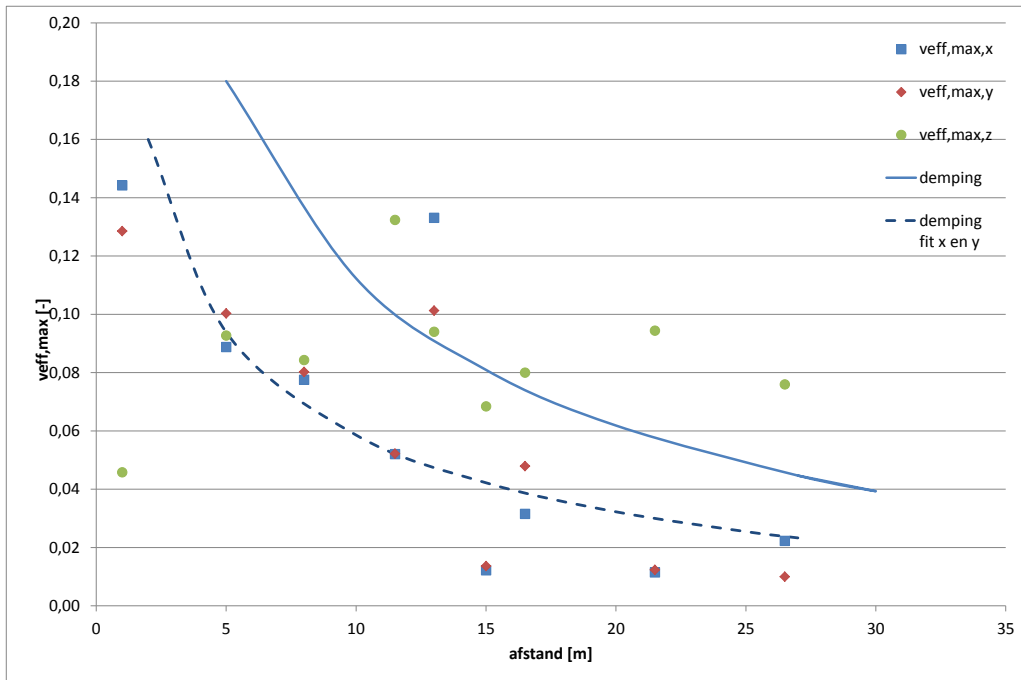


Figuur 7, Uitgewerkte meetresultaten GTW van Veolia, trillingsmetingen langs spoor (Limmelderweg).



Figuur 8, Uitgewerkte meetresultaten maaiveldmetingen Maasboulevard, Van Hasseltkade en Sint Maartenslaan.

In de grafieken van de figuren 5 en 6 is de lijn van 95%-waarden van de trillingsintensiteit weergegeven (op basis van vergelijking 2 uit paragraaf 5.4). De 95%-waarde is bepaald voor de GTW-voertuigen van Veolia. Op basis van deze meting is een dempingsconstante van de grond bepaald van  $\alpha = 0,03$ . Vervolgens is getoetst of deze dempingsconstante ook in de meetwaarden van de locaties in de stad zijn terug te vinden. In eerste instantie lijkt de dempingsconstante hier (figuur 8) minder goed te passen. Wanneer er nader wordt ingezoomd op de 95%-waarden van de meetdata blijkt dat de dempingsfactor goed overeenkomt met de x- en de y-waarde van de trillingsintensiteit, zie figuur 9. In de z-waarde van de trillingen is meer ruis aanwezig dan in de metingen uitgevoerd in de stad. Hiervoor is wel de dempingswaarde van  $\alpha = 0,03$  aangehouden, maar met een hoge bronwaarde op 5 m afstand.

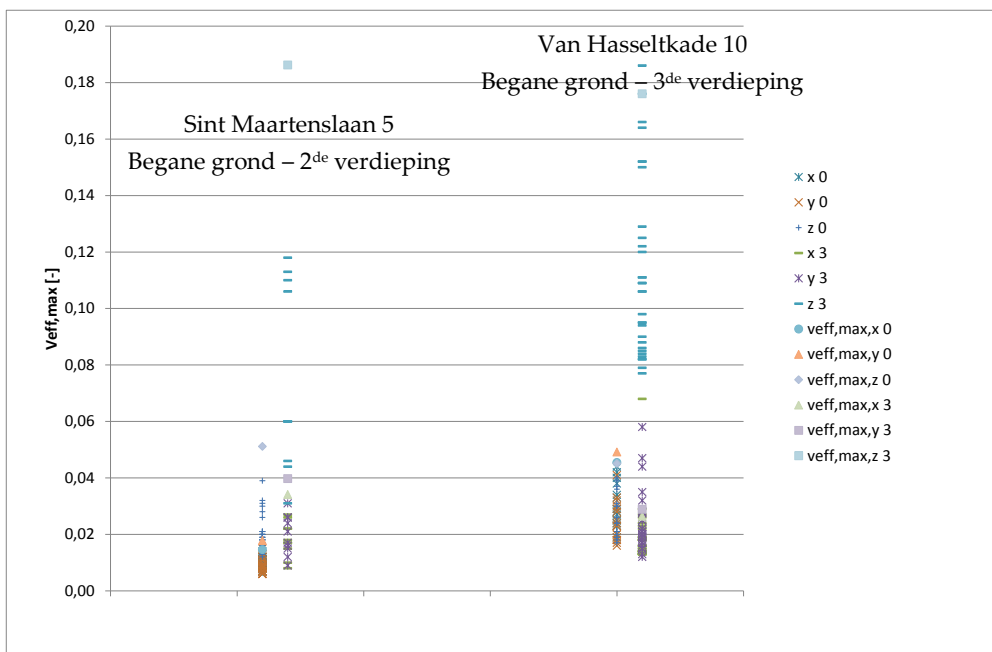


Figuur 9, 95%-waarden van de x-, y- en z-richting van de trillingsintensiteit.

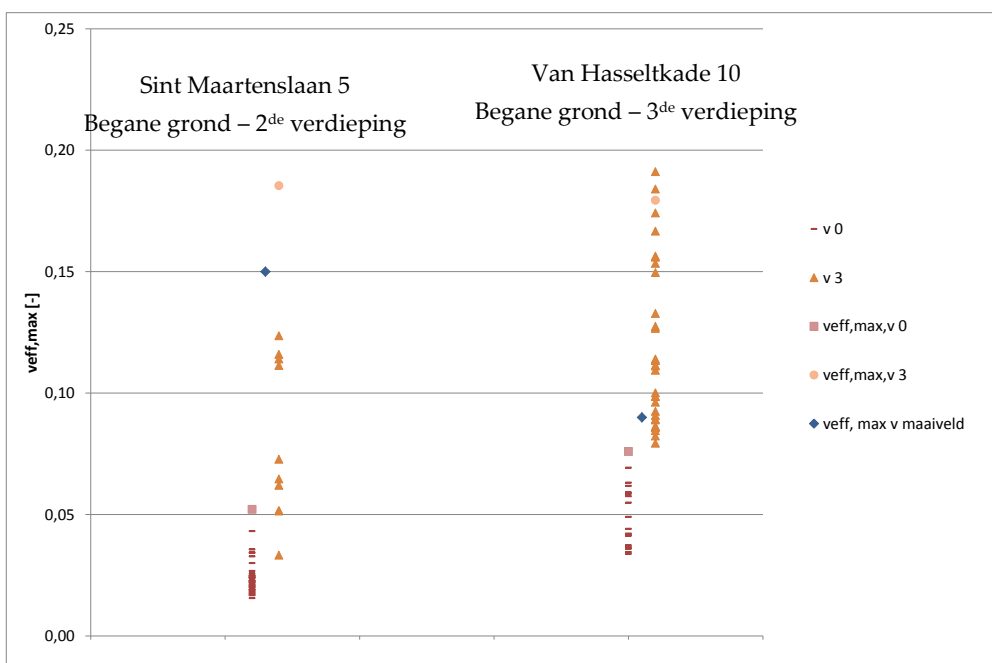
In figuur 10 zijn de trillingsmetingen die in de bebouwing zijn gemaakt gepresenteerd. Uit deze metingen blijkt een opslingerend effect van de vloeren op de tweede en derde verdieping. De meetwaarden van de begane grond (aangegeven met index 0) zijn beduidend lager dan de meetwaarden gemeten op de tweede en derde verdieping (index 3).

Om de opslingerende werking van de vloeren te bepalen is de vectoriele groote van de trilling bepaald, voor de trillingen op de vloeren. Tevens is de vectoriele trillingsintensiteit op maaiveld dicht bij de bebouwing bepaald. De tussenliggende factor geeft de opslingering van de vloeren. De volgende factoren zijn bepaald voor de opslingerende werking van de vloeren:

- Van Hasseltkade opslingering met factor 2.
- Sint Maartenslaan opslingering met factor 1,3.



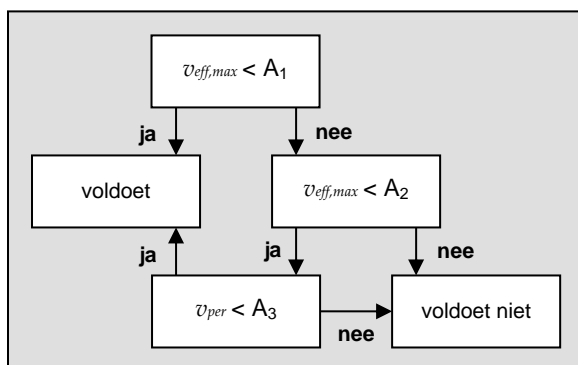
Figuur 10, Trillingsintensiteit op de Van Hasselkade 10 en Sint Maartenslaan 5.



Figuur 11, Vectoriele trillingsintensiteit op de vloer van de bebouwing.

#### 4.4 TOETS HUIDIGE SITUATIE

De toetsing van een gebouw op trillingshinder vindt plaats aan de hand van tabel 3 uit SBR-richtlijn Trillingen deel B Hinder voor personen in gebouwen. In onderstaande tabel 4 zijn de toetsingswaarde weergegeven. Toetsing vindt plaats volgens de volgende stappen, zie figuur 12.



Figuur 12, Stroomschema toetsing trillingsintensiteit, conform SBR-richtlijn Trillingen deel B.

Gebouwfunctie	dag en avond			nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Gezondheidszorg	0,2	0,8	0,1	0,2	0,4	0,1
Wonen	0,2	0,8	0,1	0,2	0,4	0,1
Onderwijs en kantoor	0,3	1,2	0,15	0,3	1,2	0,15
Bijeenkomst	0,3	1,2	0,15	0,3	1,2	0,15
Kritische werkruimte	0,1	0,1	-	0,1	0,1	-

Tabel 4, Streefwaarden voor herhaald voorkomende trillingen voor bestaande situatie (SBR-richtlijn Trillingen deel B).

Als eerste wordt in tabel 5 de waarde van  $v_{eff,max}$  getoetst aan de A1 waarde, zie tabel 5. De trillingsintensiteit is kleiner dan de streefwaarde van A1 dus in de bestaande situatie is geen trillingshinder te verwachten.

Locatie	$v_{eff,max}$ [-]	A1	Toets $v_{eff,max} < A1$
Van Hasseltkade 10	0,19	0,2	voldoet
Sint Maartenslaan 5	0,18	0,2	voldoet

Tabel 5, Toetsing trillingsintensiteit Van Hasseltkade 10 en Sint Maartenslaan 5.

Bij de toetsing wordt opgemerkt dat er in tegenstelling tot de SBR-richtlijn trillingen deel B Hinder voor personen niet gedurende een hele dag is gemeten. Gedurende een periode van twee uur is gedurende de dag gemeten. Uit de lijst van gepasseerde voertuigen (opgesteld door de veldmedewerker blijkt dat er gedurende de meetperiode voldoende zwaar verkeer (bussen en vrachtwagens) is gepasseerd om een reële inschatting van de  $v_{eff,max}$  te maken.

## 4.5 UIT DE METINGEN GETROKKEN CONCLUSIES

Op basis van de uitgewerkte metingen zijn de volgende conclusies getrokken:

- De metingen op de Limmelderweg geven een representatief beeld ten opzicht van de meetwaarden verzameld bij de metingen langs het voorkeustracé. De demping van de trillingen is vergelijkbaar van grootte. Opgemerkt wordt dat de trillingen in de stadse omgeving meer ruis vertoonden dan die langs het spoor. Verder zijn verschillen gevonden in de trillingsintensiteit. De treinen gemeten op het spoor hebben een hogere snelheid dan het huidige verkeer en veroorzaken daardoor een trilling met een hogere trillingsintensiteit dan het verkeer.

- In twee woningen zijn metingen uitgevoerd op de vloeren van de begane grond en de tweede en derde verdieping. Opvallend is dat de vloeren op de begane grond ten opzichte van de meting op maaiveld enige demping laten zien. Op de tweede of derde verdieping daarentegen wordt een opslingering van een factor 1,3 aan de Sint Maartenslaan tot 2 aan de Van Hasselkade bepaald, een forse opslingering ten opzichte van de meting op maaiveld.
- Voor de huidige situatie wordt op basis van de metingen beoordeeld dat er geen sprake is van trillingsniveaus die hinderlijk zijn in de bebouwing van de Van Hasselkade 10 en de Sint Maartenslaan 5.

# 5

## Prognose

### 5.1 AANPAK PROGNOSE

Voor de MER Maastricht Vlaanderen dient kwantitatief inzichtelijk te worden gemaakt of er hinder in de panden rond de toekomstige trambaan verwacht kan worden. Of er hinder optreedt zal worden getoetst aan de hand van de SBR-richtlijn trillingen deel B Hinder voor personen in gebouwen.

Voor het prognosticeren van trillingen zijn de volgende elementen van belang:

1. De bronsterkte, dat is het trillingsniveau dat door de bron (tram) wordt gegenereerd.
2. De overdracht van de trillingen door de ondergrond en de reductie van het trillingsniveau als gevolg van fysische en geometrische demping in de ondergrond.
3. De overdracht van de trillingen van de ondergrond via fundering en gebouw naar de vloerniveaus waarop de trillingen worden ervaren.

Voor het vaststellen van de bronsterkte (element 1) is gebruik gemaakt van literatuurgegevens, aangevuld met een trillingsmeting langs het spoor. De overdracht via de ondergrond (element 2) is op basis van trillingsmetingen langs de weg en het spoor bepaald. Voor de overdracht van trillingen in belendingen (element 3) zijn de metingen aan twee representatieve panden gebruikt, zie hoofdstuk 4.

Voor de predictie van de trillingsniveaus in de plansituatie wordt gebruik gemaakt van een eenvoudig analytisch predictiemodel, waarbij op basis van een gegeven bronsterkte (element 1), de vastgestelde ruimtelijke demping (element 2) en de overdracht van de ondergrond naar en in de belending (element 3) een prognose van de trillingssterkte in de belendingen wordt opgesteld.

### 5.2 BRONSTERKTE

De bronwaarde van de trillingen in de grond wordt op een afstand van 5 m uit de bron bepaald. In het voorliggende geval zal de bronwaarde van de trilling op 5 m uit de tramsporen bepaald worden. Om de bronwaarde voor de toekomstige tram in Maastricht te bepalen zijn de volgende twee onderzoeken gedaan:

- Literatuurstudie.
- Trillingsmetingen.

Onderstaand zullen de beide onderzoeken nader worden toegelicht.

### Literatuuronderzoek

Ten behoeve van het literatuuronderzoek zijn de volgende rapporten geanalyseerd:

- WNP raadgevende ingenieurs, Onderzoek trillingbeperkende maatregelen Regio Tram Groningen, Rapport 4121054.R01, 7 mei 2012.
- J.E. Coulter Associates Limited, Noise and Vibration impact assessment region of Waterloo Rapid Transit System, January 9 2012 (Ontario Canada).
- ARCADIS, RGLO MIT 4 BSL 3 WP 7.11 Trillingen, L3.7.11.1 Rapport Trillingen, 141222/EA7/1V6/260.061/nve, Versie 1.0, 2 oktober 2007.
- dGmR, Rapport V.2009.1067.02.R001, RijnGouweLijn-Oost, Trillingsonderzoek 2009, definitief, 15 januari 2010.

De bovengenoemde literatuur betreft verschillende meet- en berekeningsrapporten van trillingsonderzoeken voor trillingen veroorzaakt door trams en of lightrailvoertuigen. De onderzoeken verschillen van elkaar qua:

- Grondopbouw.
- Spoortypen (met of zonder ballast).
- Type voertuig.
- Uitwerking van de meting of prognose.

In tabel 6 is een samenvatting gemaakt van de verzamelde bronwaarden die als volgt zijn omgerekend naar een treinsnelheid van 40 km/uur:

$$v_{tram,x \text{ km/uur}} = v_{tram,40 \text{ km/uur}} \sqrt{\frac{x}{40}}$$

Vergelijking 1, Omrekening trillingsintensiteit afhankelijk van de snelheid van de tram.

Waarin:

$v_{tram}$ : trillingssnelheid [mm/s]

$x$ : snelheid tram [km/uur]

Type spoor	grondopbouw	$v_{max, tram}$ [-] op 5 m uit spoor	Opmerkingen
Spoor in ballast	Veen/klei lagen	3,48	Lightrail met 'vierkante' wielen.
		0,71 – 1,81	Lightrail.
	Zand en klei	0,40 mm/s - 0,80 mm/s	Rms.
		0,39 mm/s	Op staal gefundeerde woning.
Spoor in beton (ballastloos)	Veen/klei lagen	0,24	Vrije baan.
	Veen/klei lagen	0,34	Wissel.
	Klei op zand	0,12 mm/s – 0,63 mm/s	Afhankelijk van werking eventuele maatregelen (depend of opslingerend effect).

Tabel 6, Trillingsintensiteit tram gemeten op 5 m uit het spoor (op basis van literatuur onderzoek).

### Metingen

Langs het spoor in Maastricht zijn trillingsmetingen uitgevoerd om een inschatting te kunnen maken van de demping van de trillingen in de grond. Voor een nadere toelichting op de metingen wordt verwezen naar hoofdstuk 3. Tevens kunnen de metingen worden gebruikt om een inschatting van de bronwaarden van de tram te maken.



De treinen als trillingsbron kennen een aantal grote verschillen met een tram:

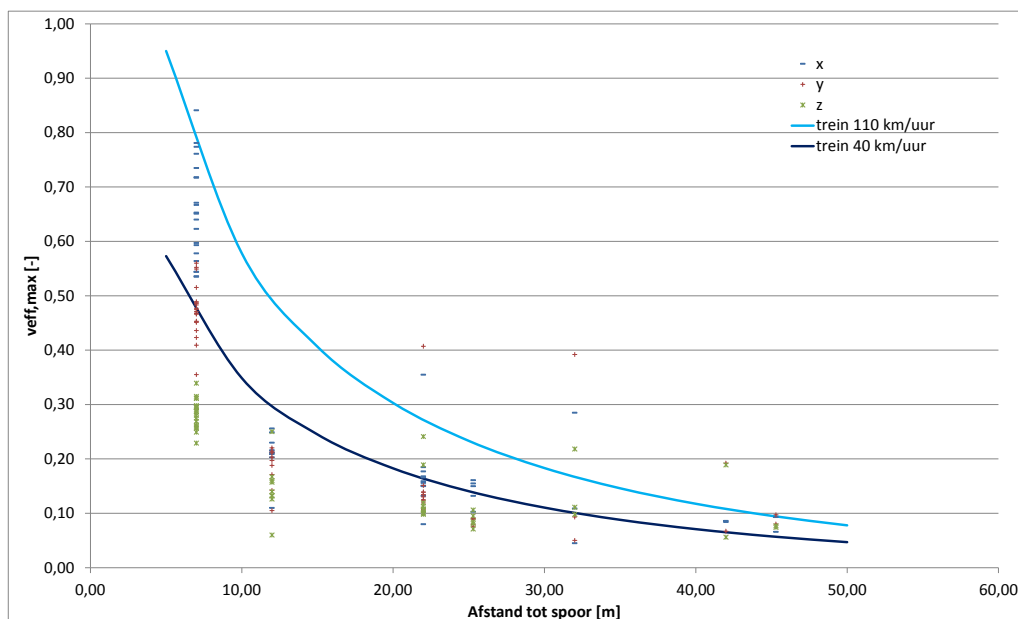
- Treinen hebben een hogere snelheid (110 km/uur versus 20 km/uur tot 40 km/uur).
- Treinen rijden op een spoor in ballast en trams op een spoor in beton (een spoor in beton heeft een gunstig effect op de trillingen).

Op basis van de metingen is een  $v_{eff,max}$  op 5 m uit het spoor bepaald van 0,95 voor de treinen van Veolia (GTW). Deze treinen hadden gemiddeld genomen een snelheid van 110 km/uur (laagste snelheid 91 km/uur, hoogste snelheid 129 km/uur).

Bij een lagere snelheid kan verwacht worden dat een lagere trillingsintensiteit zal optreden. Met behulp van vergelijking 1 is de trillingsintensiteit  $v_{eff,max}$  bij een rijksnelheid van 20 km/uur, 30 km/uur en 40 km/uur. In tabel 7 zijn de resultaten hiervan weergegeven.

Rijsnelheid [km/uur]	$v_{eff,max}$ [-]
20	0,41
30	0,50
40	0,57

Tabel 7, Omrekening bronwaarde trillingsintensiteit naar lagere rijksnelheid tram.



Figuur 13, Trillingsintensiteit gemeten trillingen GTW (treinen Veolia).

### Bronwaarde Maastricht

De werkelijke bronwaarde van de toekomstige tram is van meerdere factoren afhankelijk. Zo zijn onder meer de volgende factoren van invloed:

- Snelheid van het voertuig.
- Gewicht van het voertuig.
- Spoorconstructie.

Onderstaand worden de bovengenoemde effecten nader toegelicht.

#### *Snelheid van het voertuig*

Wanneer een tram (of trein) met een hogere snelheid rijdt zal er meer trillingsenergie aan de omgeving worden afgegeven dan als een tram met een lagere snelheid rijdt. Meer energie wil zeggen dat de intensiteit van de trillingen sterker wordt. Op basis van de metingen is voor een GTW trein, die gemiddeld genomen met een snelheid van 110 km/uur de meetlocatie is gepasseerd, onderzocht wat de trillingsintensiteit is op 5 m afstand van het spoor. Deze trillingsintensiteit  $v_{eff,max}$  betreft 1,0.

Bij een lagere snelheid mag verwacht worden dat een lagere trillingsintensiteit zal optreden. Met behulp van vergelijking 1 is de trillingsintensiteit  $v_{eff,max}$  bij een rijsnelheid van 40 km/uur ingeschat op 0,6.

#### *Gewicht voertuig*

Het gewicht per as van een voertuig is van invloed op de intensiteit van de trillingen die een voertuig veroorzaakt. Hoe zwaarder het gewicht op een as, des te groter de intensiteit van de trillingen wordt. De metingen die nu zijn uitgevoerd zijn aan een lichte trein, namelijk een GTW uitgevoerd. De toekomstige tram zal logischerwijs een vergelijkbaar of lager gewicht per as hebben dan de GTW.

#### *Spoorconstructie*

Op basis van de bovengenoemde onderzoeken is een inschatting gemaakt van de trillingsintensiteit van de toekomstige tram. Uitgaande dat een ballastloze constructie de trillingen beter dempen dan een spoor in ballast (mits er voor een doelmatige afvering van het systeem wordt gekozen), wordt voor een ballastloze constructie een factor 1,2 lagere bronwaarde van de trillingsintensiteit op 5 m aangehouden.

De bronwaarde  $v_{eff,max,5m}$  van de trillingen in Maastricht wordt, de bovenstaande factoren in ogenschouw nemende, aangehouden zoals is weergegeven in tabel 8. Deze waarden liggen aan de bovenzijde van het spectrum van de bronsterkte dat vanuit de literatuurstudie is bepaald.

Rijsnelheid [km/uur]	$v_{eff,max,5m}$ [-]
20	0,34
30	0,42
40	0,48

Tabel 8, Omrekening bronwaarde trillingsintensiteit naar lagere rijsnelheid tram.

#### *Overig*

Naast de bovengenoemde factoren zijn er nog meer factoren die een rol kunnen spelen op de intensiteit van de trillingen. Zo zijn daar bijvoorbeeld de afstand tussen de wielen en de lengte van de tram. Aangezien er nog geen definitieve keuze is gemaakt voor een tramtype zijn deze factoren buiten beschouwing gelaten. Verwacht wordt dat deze factoren maar beperkt van invloed zijn, doordat trams veelal aan een gelijk profiel dienen te voldoen.

### 5.3 OPSLINGERENDE WERKINGVLOEREN

Wanneer vloeren in trilling worden gebracht is het mogelijk dat de trilling een opslingering veroorzaakt. Dit betekent dat de trilling in plaats van uit te dempen beter voelbaar wordt. Uit de meetdata blijkt, dat er een opslingerende werking van de trilling in de panden is variërend tussen een factor 0 voor de begane grond tot een factor 1,3 tot 2 voor de tweede en derde verdieping. Zekerheidshalve wordt de bronwaarde van de trillingsintensiteit verhoogd met een factor 2, wat resulteert in de volgende waarden voor  $v_{eff,max}$ .

### 5.4 DEMPING VAN DE TRILLINGEN

Voor de prognose van de trillingen wordt een analytisch model gebruikt. Dit model is gebaseerd op twee principes, namelijk:

- Uitdemping door verspreiding van de trilling in drie richtingen.
- Uitdemping door materiaal demping.

In de gebruikte vergelijking van de Barkan-curve is dit als volgt genoteerd, zie vergelijking 2.

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

Vergelijking 2, Barkan-curve.

Waarin:

- $v(x)$  Trillingssnelheid op afstand  $x$  van de bron [mm/s].
- $v_0$  Bronsterkte van de trillingsintensiteit op een referentie-afstand  $x_0$  van de bron [mm/s].
- $x_0$  Referentie-afstand tot de bron [m].
- $x$  Afstand tot de bron [m].
- $\alpha$  Karakteristieke dempingsconstante ten gevolge van materiaaldemping [ $m^{-1}$ ].

Uit de meetdata van het treinverkeer is voor de GTW (treinen van Veolia Heuvelland) een dempingsfactor van  $\alpha = 0,03$  bepaald, zie ook curve in figuur 7. Vervolgens is de dempingsfactor getoetst op de metingen van het wegverkeer, zie figuur 8 en 9. Op basis van deze gegevens is geconcludeerd dat een dempingswaarde van  $\alpha = 0,03$  toegepast kan worden voor de trillingen van de tram in het binnenstedelijk gebied van Maastricht.

# 6

## Toets trillingsintensiteit

### 6.1 SBR-RICHTLIJN TRILLINGEN DEEL B HINDER VOOR PERSONEN IN GEBOUWEN

Voor de toetsing van de geprognoseerde trillingsintensiteiten wordt de SBR-richtlijn Trillingen deel B Hinder voor personen in gebouwen gehanteerd. Meer hierover wordt in hoofdstuk 2 toegelicht. Voor een meer uitgebreide toelichting wordt verwezen naar bijlage 1.

### 6.2 TOETS PROGNOSE AAN SBR-RICHTLIJN TRILLINGEN DEEL B

Voor de toetsing van de trillingen zijn de  $v_{eff,max}$  (maximale effectieve waarde van de momentane trillingsintensiteit) en de  $v_{per}$  (kwadratisch gemiddelde van de effectieve waarde van de maxima) van belang. De maximale waarde van de  $v_{eff,max}$  en de  $v_{per}$  zijn bekend, dit is namelijk de A2- en de A3-waarde uit SBR-richtlijn Trillingen deel B Hinder voor personen in gebouwen.

Voor de toetsing van de geprognoseerde trillingen die de toekomstige tram zal gaan veroorzaken, is gebruik gemaakt van de toetsingscriteria voor een nieuwe situatie. Hiervoor zijn de volgende grenswaarde van toepassing voor woongebouwen:

- A1 = 0,1
- A2 = 0,4
- A3 = 0,05

Voor kantoorpanden, bedrijfspanden en bijeenkomstruimten zijn de volgende grenswaarde van toepassing:

- A1 = 0,15
- A2 = 0,6
- A3 = 0,07

In onderstaande tabel 10 is berekend op welke afstand nog kan worden voldaan aan de grenswaarde uit de SBR-richtlijn trillingen. In de tabel is de rijsnelheid gegeven in de eerste kolom. In de tweede en de derde kolom is de afstand (gemeten vanuit de tramsporen) weergegeven tot waar trillingshinder wordt verwacht. Hiervoor is een splitsing gemaakt in gebouwen met een relatief jonge leeftijd (jonger dan 40 jaar) en gebouwen met een relatief oude leeftijd, namelijk ouder dan 40 jaar. Voor deze bebouwing is een verschillende opslingering van de vloeren meegenomen (opslingeringsfactor =1 voor jonge gebouwen en de opslingeringsfactor = 2 voor oude gebouwen)

Rijsnelheid [km/uur]	Afstand [m]	
	Jonge bouw	Oude bouw
20	4	9
30	5	11
40	6	13

Tabel 9, Berekening grens trillingshinder bij 4 trams en 15 vrachtwagens per uur.

Wanneer de afstanden worden vertaald naar de locaties waar de tram gaat rijden kan de volgende tabel worden opgesteld, zie tabel 11.

Locatie	Rijsnelheid tram	Afstand hindergrens	
		jonge bouw [m]	oude bouw [m]
Boschstraat	30 km/uur	5 m	11 m
Maasboulevard	40 km/uur	6 m	13 m
Markt / Gubbelstraat	20 km/uur	4 m	9 m
Wilhelminabrug / -singel / St Maartenslaan	30 km/uur	5 m	11 m
Paralelweg / Spoorweglaan	20 km/uur	4 m	9 m

Tabel 10, afstand grens trillingshinder.

Op basis van de bovenstaande gegevens zijn de beide tracés nader beoordeeld op risico voor hinder. Op verschillende locaties vindt een overschrijding plaats van de grens waar trillingshinder wordt verwacht voor wonen. Op deze locaties is een nadere beschouwing uitgevoerd naar de leeftijd van de bebouwing en de bestemming van de bebouwing. Op basis van deze gegevens is nogmaals aan de SBR-richtlijn Hinder voor personen in gebouwen getoetst en blijkt dat voor een gedeelte van de panden geen hinder verwacht wordt. Een samenvatting van deze beschouwing is weergegeven in tabel 11.

locatie	Type bouw	Bestemming	Rijsnelheid [km/uur]	Afstand hindergrens	Afstand tram - bebouwing	Toets hinder
Sint Maartenslaan 1 t/m 29, 2 t/m 18	> 40 jaar	wonen	30	11 m	7 m	hinder, verlaging $V_{eff,max}$ 40%
Sint Maartenslaan 26 t/m 30	> 40 jaar	bedrijven	30	7 m	11 m	geen hinder
Wilhelminasingel 41	> 40 jaar	wonen	30	11 m	8 m	hinder, verlaging $V_{eff,max}$ 35%
Wilhelminasingel Maasresidentie	< 40 jaar	wonen	30	5 m	7 m	geen hinder
Van Hasseltkade 6 t/m 11	> 40 jaar	wonen	40	13 m	11 m	hinder, verlaging $V_{eff,max}$ 30%
Maasboulevard 1, 5	< 40 jaar	bedrijven	40	4 m	5 m	geen hinder
Maasmolendijk 24	> 40 jaar	wonen	40	13 m	5 m	hinder
Maasmolendijk	> 40 jaar	bedrijven	40	9 m	10 m	geen hinder
Gubbelstraat	< 40 jaar	wonen	20	4 m	3 m	hinder, verlaging $V_{eff,max}$ 15%
Gubbelstraat	> 40 jaar	wonen	20	9 m	3 m	hinder, verlaging $V_{eff,max}$ 55%
Bedrijfspanen Boschstraat	> 40 jaar	bedrijven	30	7 m	5 m	hinder, verlaging $V_{eff,max}$ 30%
	< 40 jaar	bedrijven	30	5 m	5 m	geen hinder

Tabel 11, Locaties waar hinder mogelijk is op basis van de trillingsprognose.

Ten behoeve van de panden waar een overschrijding van de hindergrens is geprognosticeerd, dient in de toekomstige situatie een trillingsdempende maatregel te worden toegepast. Een toelichting op de trillingsdempende maatregelen is in paragraaf 6.3 opgenomen.

### 6.3 TRILLINGSDEMPENDE MAATREGELEN

Wanneer trillingen hinder veroorzaken kunnen er maatregelen worden getroffen de trillingen te dempen tot een niveau dat deze niet meer worden waargenomen. Het dempen van de trillingen kan op drie plaatsen in het systeem:

- Ter plaatse van de bron.
- In het gebied tussen de sporen en de bebouwing.
- Aan de bebouwing.

Onderstaand wordt een korte toelichting gegeven op de trillingsdempende maatregelen.

#### *Maatregelen aan de bron*

In het voorliggende geval betreft de bron de tram op het spoor. Zowel aan de tram als aan het spoor kunnen maatregelen worden getroffen. Hierbij kan aan de volgende maatregelen worden gedacht:

- Aanpassen spoorconstructie naar bijvoorbeeld 'Floating-slab' constructie.
- Tramtype (lichtere aslast, andere as configuratie).
- Verlagen rijsnelheid tram naar 20 km/uur.

De bovengenoemde maatregelen zijn alle goed toepasbaar en daarmee een mogelijke oplossing voor de trillingshinder. Met (een combinatie van) de bovengenoemde oplossingen kan de trillingsintensiteit voldoende worden verlaagd om wel aan de SBR-richtlijn Trillingen deel B Hinder voor personen in gebouwen te voldoen.

#### *Maatregelen tussen bron en gebouw*

Wanneer trillingen aan de bron niet voldoende kunnen worden gedempt kan ook worden gezocht naar een trillingsdempende oplossing tussen de bron en het gebouw in. De volgende maatregelen zijn hiervoor in omloop:

- Trillingsdempend scherm.
- Sloot.

Door de stadse omgeving is er langs de sporen van de tram maar weinig ruimte beschikbaar voor maatregelen als een sloot of een scherm. Hierdoor is het niet logisch om voor een dergelijke oplossing te kiezen.

#### *Maatregelen aan gebouw*

Aan een pand kunnen trillingsdempende maatregelen worden getroffen. De volgende mogelijkheden kunnen hiervoor een oplossing vormen:

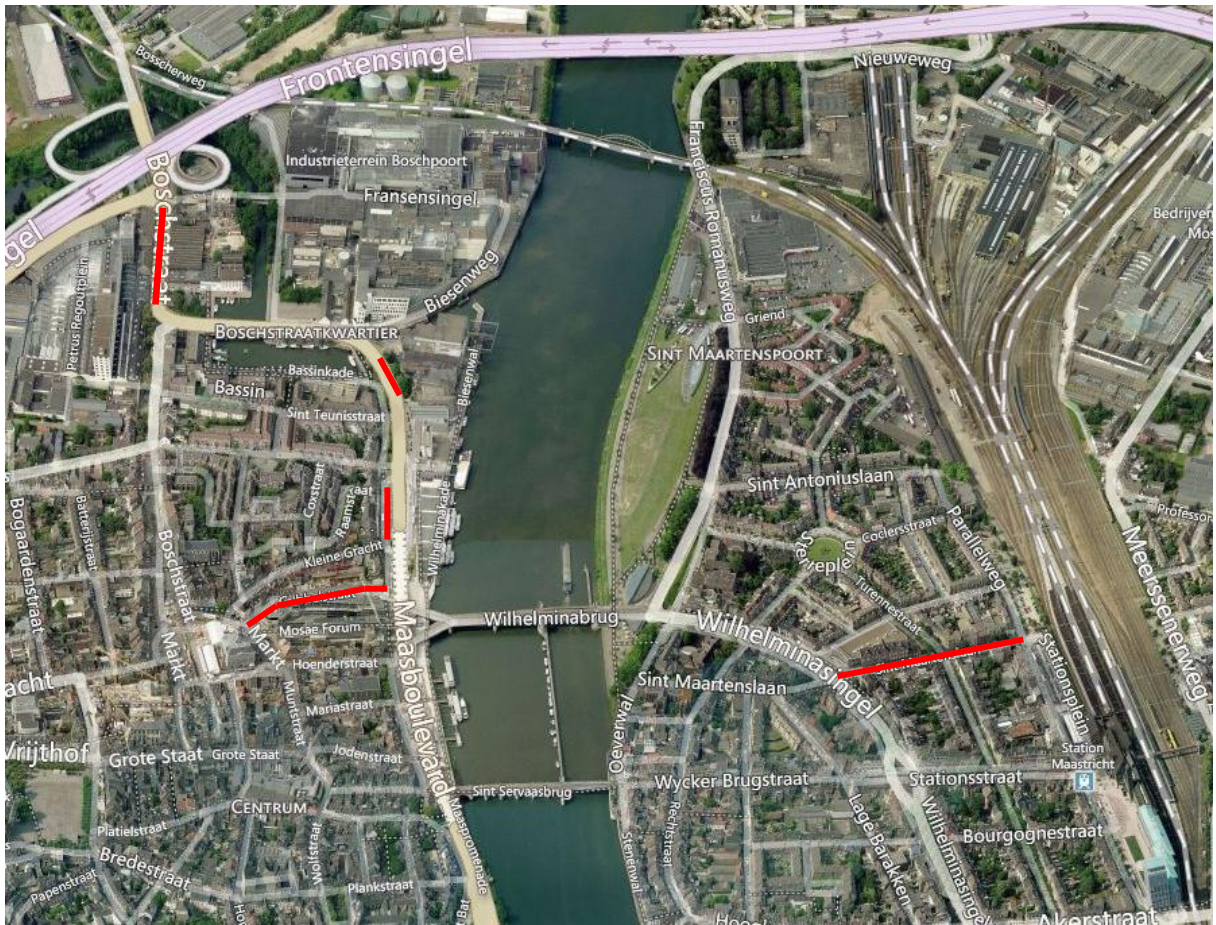
- Verstijven van vloeren (met name houten vloeren).
- Trillingsdempende constructie aanbrengen tussen vloer en fundering.

Het aanbrengen van een trillingsdempende constructie in de bebouwing is bij bestaande bebouwing een dure en lastige maatregel. Daarnaast brengt realisatie van een dergelijke constructie overlast voor de bewoners of gebruikers met zich mee. De bovengenoemde maatregelen worden dan ook niet als mogelijke oplossing gezien.

Geconcludeerd wordt dat met name trillingsbeperkende maatregelen aan de bron goed toepasbaar zijn in het binnenstedelijk gebied van Maastricht. Aangenomen wordt dat het verlagen van de rijsnelheid van de tram geen optie vormt aangezien dit de reistijd van de reizigers zal verlengen. Ook het beperken van het gewicht van de tram is een optie, maar of hierdoor een voldoende verlaging van de trillingsintensiteit kan worden behaald is onzeker.

Het toepassen van een Floating slabconstructie kan de trillingsintensiteit verlagen met 50% of meer (WPN, Onderzoek trillingsbeperkende maatregelen Regio Tram Groningen, 4121054.R01, 7 mei 2012 en Movares, MER 1<sup>e</sup> fase Goederenroute Oost-Nederland, RL197035, 28 oktober 2013). Een dergelijke verlaging van de trillingsintensiteit is voldoende om de geprognosticeerde trillingshinder te verhelpen. In figuur 14 is aangegeven waar floating slabconstructies toegepast dienen te worden.

In de ontwerpfase dient deze constructie nader te worden uitgewerkt.



Figuur 14, Locaties waar Floating slabconstructie toegepast dient te worden.



## 7

## Conclusie

Het voorliggende rapport geeft inzicht in de omgevingshinder ten gevolge van verkeerstrillingen langs het toekomstige tracé van de Tram Vlaanderen Maastricht.

Op basis van de uitgevoerde metingen wordt geconstateerd dat in de huidige situatie geen sprake is van trillingshinder. In de toekomstige situatie is enkel sprake van trillingshinder in de situatie dat de tram relatief dicht op de bebouwing komt te rijden. In tabel 12 is een samenvatting van de afstanden waarop hinder verwacht kan worden weergegeven. Buiten deze afstand wordt geen hinder door de tram verwacht.

Locatie	Rijsnelheid tram	Afstand waar binnen hinder kan worden verwacht
Boschstraat	30 km/uur	5,5 m
Maasboulevard	40 km/uur	6,5 m
Markt/Gubbelstraat	20 km/uur	4 m
Wilhelminabrug /-singel / St Maartenslaan	30 km/uur	5,5 m
Paralelweg / Spoorweglaan	20 km/uur	4 m

Tabel 12, Afstand grens trillingshinder.

Op basis van de bovenstaande gegevens wordt hinder door de toekomstige tram verwacht aan de panden, zoals vermeld in tabel 13.

Variant	locatie	Type bouw	Bestemming	Rijsnelheid tram	Afstand hindergrens
Beide	Sint Maartenslaan 1 t/m 29 en 2 t/m 18	Ouder 40 jaar	woonpanden	30	11 m
Beide	Wilhelminasingel 41	Ouder 40 jaar	Woonpand	30	11 m
Maasboulevard	Van Hasseltkade 6 t/m 11	Ouder 40 jaar	Woonpanden	40 km/uur	13 m
Maasboulevard	Maasmolendijk 24	Ouder 40 jaar	woonpand	40 km/uur	13 m
Markt	Gubbelstraat	Jonger 40 jaar	woonpanden	20 km/uur	4 m
Markt	Gubbelstraat	Ouder 40 jaar	woonpanden	20 km/uur	9 m
Beide	Boschstraat	Ouder 40 jaar	Bedrijfspanen	30 km/uur	7 m

Tabel 13, Locaties waar hinder mogelijk is op basis van de trillingsprognose.

In hoeverre er daadwerkelijk trillingshinder wordt ervaren is afhankelijk van de demping of opslinging van de fundering en de vloeren van de bebouwing. In de berekeningen is op basis van metingen in representatieve panden een conservatieve aanname gedaan. Zekerheid omtrent daadwerkelijke kans op trillingshinder vereist een vergelijkbare trillingsmeting aan de betreffende bebouwing.

Door maatregelen aan de tram of de sporen te treffen is het mogelijk de brontrillingen zodanig te dempen dat op alle locaties geen trillingshinder in de bebouwing langs het tramtracé zal optreden. Hierbij wordt gedacht aan de toepassing van een Floating slabconstructie (WPN, Onderzoek trillingsbeperkende maatregelen Regio Tram Groningen, 4121054.R01, 7 mei 2012 en Movares, MER 1<sup>e</sup> fase Goederenroute Oost-Nederland, RL197035, 28 oktober 2013). In de ontwerpfase dient deze constructie nader te worden uitgewerkt.

# Bijlage 1

## SBR-richtlijn Trillingen deel B Hinder voor personen in gebouwen

### Richtlijn Trillingen

Voor de beoordeling van trillingen wordt gebruik gemaakt van SBR-richtlijn deel A, B en C:

1. In de SBR-richtlijn deel A, schade aan gebouwen, worden criteria/grenswaarden van maximaal toelaatbare trillingen weergegeven om schade aan gebouwen te voorkomen.
2. SBR-richtlijn deel B, hinder voor personen, definieert grenswaarden voor trillingen voor hinder voor personen.
3. SBR-richtlijn deel C, storing aan apparatuur, worden grenswaarden voor maximaal toelaatbare trillingen weergegeven om storingen aan apparatuur te voorkomen.

### SBR-Richtlijn Trillingen deel A (schade aan gebouwen)

In de SBR-richtlijn deel A, schade aan gebouwen, worden afhankelijk van het type gebouw, de bouwkundige staat, het type trillingsbron en het type trillingsmeting grenswaarden voor trillingsniveaus genoemd, om schade aan de bebouwing ten gevolge van trillingen te voorkomen.

Gezien de mogelijke trillingsniveaus ten gevolge van de verkeerstrillingen door spoorverkeer en de geconstateerde afstanden, wordt schade, aan in goede staat verkerende gebouwen of onderdelen van gebouwen, niet verwacht.

Daarom wordt in het kader van dit rapport alleen ingegaan op gebouwen die onder categorie 3 vallen volgens de SBR deel A. Dit zijn in slechte staat verkerende gebouwen(onderdelen) uit metselwerk of monumentale gebouwen.

Voor de beoordeling van de trillingen in gebouwen (een monumentaal of een in slechte staat verkerend gebouw) wordt van de volgende toelaatbare trillingsniveaus (rekenwaarde) uitgegaan:

$v_{max, deel A} = 1,5 \text{ à } 1,8 \text{ mm/s}$ . Bij de genoemde grenswaarden is rekening gehouden met:

- Een partiële factor voor een indicatieve meting, die in het geval van een predictie gehanteerd kan worden.
- Een partiële factor voor herhaald kortdurende trillingen.
- De dominante frequentie van de trillingen in de grond tussen 10 Hz tot 36 Hz.

### SBR-richtlijn Trillingen deel B (hinder voor personen in gebouwen)

De SBR-richtlijn deel B geeft streefwaarden voor trillingshinder voor personen in gebouwen. Deze streefwaarden kunnen in drie categorieën worden opgesplitst, namelijk:

Categorie	
Wonen	Woonhuizen, gezondheidszorg-gebouwen.
Werken	Kantoor-, onderwijs- en bijeenkomstgebouwen.
Kritische werkruimte	Bepaalde ruimten in laboratoria, operatiekamers, studiezalen.

De SBR-richtlijn deel B (hinder voor personen in gebouwen) geeft drie verschillende streefwaarden A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> en A<sub>3</sub> voor trillingen per categorie op.

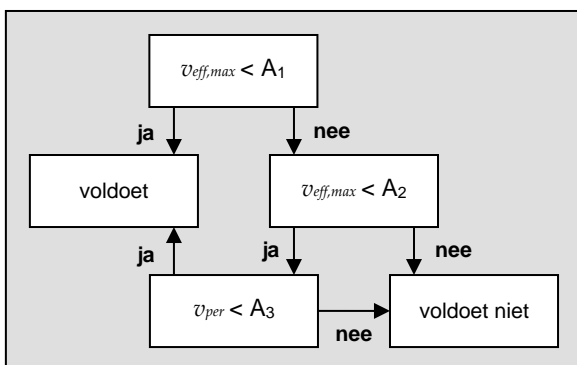
Tijdens gebruik moet worden voldaan aan streefwaarde  $A_1$  of een combinatie van  $A_2$  en  $A_3$ , waarbij  $A_1$  de onderste streefwaarde,  $A_2$  de bovenste streefwaarde en  $A_3$  de gemiddelde streefwaarde over een bepaalde periode is.

Het volgende stroomschema (zie figuur 15) geeft een overzicht van de beoordelingsprocedure van de trillingssterkte op basis van streefwaarden.

$A_1$  en  $A_2$  wordt op basis van trillingssterkte  $v_{eff,max}$  beoordeeld en  $A_3$  op basis van  $v_{per}$ .

Hierbij is  $v_{eff,max}$  de 95%-overschrijdingskans van de trillingssterkte in de beoordelingsperiode.

De  $v_{per}$  is de gemiddelde trillingssterkte over de beoordelingsperiode en als zodanig een functie van de effectieve waarde van de trilling, de tijdsduur dat een trillingsbron in bedrijf is en de totale tijdsduur van de beoordelingsperiode.



In de twee navolgende weergegeven tabellen staan de te hanteren streefwaarden in verband met herhaald voorkomende trillingen gedurende lange tijd, zoals railverkeer, voor een aanpassing van een bestaande situatie (tabel 15) en de aanleg van een nieuwe (tabel 14) situatie voor de gebouwfuncties wonen/gezondheidszorg en onderwijs/kantoor, weergegeven.

Er wordt bij de streefwaarden onderscheid gemaakt tussen de dag-/avondperiode (7.00 tot 23.00 uur) en de nachtperiode (23.00 tot 7.00 uur). De streefwaarden in een nieuwe situatie zijn twee keer zo streng als in een bestaande situatie.

Gebouwfunctie	dag en avond			nacht		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
gezondheidszorg	0,1	0,4	0,05	0,1	0,2	0,05
Wonen	0,1	0,4	0,05	0,1	0,2	0,05
onderwijs en kantoor	0,15	0,6	0,07	0,15	0,6	0,07

Tabel 14, Grens- en streefwaarden voor een nieuwe situatie.

Gebouwfunctie	dag en avond			nacht		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
gezondheidszorg	0,2	0,8	0,1	0,2	0,4	0,1
Wonen	0,2	0,8	0,1	0,2	0,4	0,1
onderwijs en kantoor	0,3	1,2	0,15	0,3	1,2	0,15

Tabel 15, Grens- en streefwaarden voor een bestaande situatie.

Indien niet aan de streefwaarden wordt voldaan, wordt aan de methode uit de bijlage 5 van de SBR getoetst. Daarbij wordt ervan uitgegaan dat mensen die nu een huis langs het spoor of de weg hebben niet meer hinder mogen ondervinden in de toekomstige situatie dan in de huidige situatie, een 'stand still'-principe.

De SBR-richtlijn deel B biedt hiervoor een hinderkwalificatie aan in bijlage 5 van deze richtlijn.

Het 'stand still'-principe werkt als volgt. De trillingen die hinder veroorzaken voor personen in de gebouwen langs het spoor zijn ingedeeld in vijf categorieën. Wanneer deze gebouwen, zowel in de oude als in de toekomstige situatie in de gelijke categorie blijven, is er geen sprake van (extra) hinder voor personen. Wanneer de trillingen voor de personen in de gebouwen in de nieuwe situatie, in een andere categorie vallen dan in de oude, is er wel sprake van trillingshinder.

In onderstaande tabel zijn de categorieën van de hinderkwalificatie weergegeven.

$v_{eff,max}$	Hinderkwalificatie
< 0,1	Geen hinder
0,1 – 0,2	Weinig hinder
0,2 – 0,8	Matige hinder
0,8 – 3,2	Hinder
> 3,2	Ernstige hinder

De bovengrenswaarde voor de kwalificatie "geen hinder" komt overeen met de streefwaarde A<sub>1</sub> voor wonen en gezondheidszorg voor een nieuwe situatie, terwijl de bovengrens van de kwalificatie "weinig hinder" overeenkomt met de streefwaarde A<sub>1</sub> voor wonen en gezondheidszorg voor bestaande situaties. Voor de gebouwfunctie "onderwijs en kantoor" liggen de grenswaarden 50% hoger dan voor de gebouwfuncties "wonen" en "gezondheidszorg".

Dit betekent dat voor deze gebouwfuncties de grenswaarde bij toepassing van het "stand still"-principe voor de categorieën "geen hinder" en "weinig hinder" 1,5 keer de in tabel 3.3 vermelde waarde bedragen.

### SBR-richtlijn Trillingen deel C (storing aan apparatuur)

Nabij de spoorlijn staan naast woonhuizen op specifieke locaties ook bedrijfspanden.

Daarmee is de kans aanwezig dat er trillingsgevoelige apparatuur in de omgeving van de spoorbaan aanwezig is.

Daarom dienen de trillingen eveneens op basis van SBR-richtlijn deel C, storing aan apparatuur te worden beoordeeld. Opgemerkt wordt dat in het kader van dit rapport ervan wordt uitgegaan dat dit in wezen computersystemen zijn.

Specifieke trillingsgevoelige apparatuur kan bestaan uit: optische instrumenten, microscopen, et cetera. Richtlijn deel C wijkt qua karakter af van de twee andere richtlijnen. Dit omdat voor storingen aan apparatuur geen echte "harde" grenswaarden in de richtlijn deel C gedefinieerd zijn.

In het kader van dit rapport worden computersystemen in kantoorgebouwen nader beoordeeld. Daarmee is van de volgende grenswaarden uitgegaan die op de SBR-richtlijn is gebaseerd:  $v_{max, \text{deel C}} = 0,2 \text{ mm/s}$ .

## Bijlage 2 Theorie trillingen

### Beschrijving trillingsmechanisme

Zwaar verkeer, heiwerkzaamheden, machines, et cetera zijn trillingsbronnen die trillingen veroorzaken. Wanneer deze trillingen in de ondergrond worden geïntroduceerd gaan de trillingen zich in de vorm van spanningsgolven voortplanten. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in verschillende typen golven:

- Compressiegolven (P-golven), in de richting als de voortplantingsrichting van de drukgolven (overwegend horizontaal).
- Schuifgolven (S-golven), die zich in alle richtingen voortplanten haaks op de voortplantingsrichting.
- Rayleighgolven (R-golven), die zich primair over het maaiveld voortplanten.

Daar waar de golven het maaiveld, een laagovergang of een bouwwerk bereiken, vindt 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.

Er zijn verschillende factoren die van invloed zijn op de intensiteit van een trilling in de grond. Voor de intensiteit van door treinverkeer opgewekte trillingen in woningen zijn de volgende factoren van belang:

- Eigenschappen van de onderscheiden grondlagen.
- Snelheid en gewicht van de passerende treinen.
- Kwaliteit van de treinwielen (in verband met vlakke wielen).
- Kwaliteit van de spoorligging; dat wil zeggen een spoor dat volkomen recht ligt in zowel verticale als horizontale richting wekt minder trillingen op dan een spoor dat niet volledig recht ligt.
- Wijze van funderen van de woningen.
- Afmetingen, aantal verdiepingen en constructiewijze van de woningen.

### Trillingen in de omgeving

Voor de predictie van de trillingsintensiteit in de woningen en kantoren langs de spoorbaan wordt gebruik gemaakt van de rekenmethoden uit de SBR-richtlijnen Trillingen, de CUR-publicatie 166 'Damwandconstructies' en op basis van opgedane ervaringen bij vergelijkbare projecten.

De compressie- (P) en de schuifgolven (S) verspreiden zich bolvormig vanuit de bron (de trein), terwijl de Raleigh-golven (R) zich cirkelvormig over het maaiveld voortplanten. Als gevolg van de ruimtelijke spreiding is sprake van een geometrische verzwakking van de trillingsamplitude, ook wel geometrische demping genoemd.

Daarnaast is nog sprake van een demping als gevolg van energieverliezen in het bodemmateriaal, ook materiaaldemping genoemd. De geometrische en de materiaaldemping van een trilling kan, ten aanzien van de (maatgevende) oppervlaktegolven (R) op een afstand  $x$  van de bron, bepaald worden met de volgende vergelijking van Barkan:

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

Vergelijking 3, Barkan curve.

Waarin:

- $v(x)$  Trillingssnelheid op afstand  $x$  van de bron [mm/s].
- $v_0$  Bronsterkte van de trillingsintensiteit op een referentie-afstand  $x_0$  van de bron [mm/s].
- $x_0$  Referentie-afstand tot de bron [m].
- $x$  Afstand tot de bron [m].
- $\alpha$  Karakteristieke dempingsconstante ten gevolge van materiaaldemping [ $m^{-1}$ ].

### Berekening referentiewaarden SBR-richtlijn B

De effectieve waarde van de trillingen in een beschouwde meetperiode  $v_{eff,max}$  kan volgens CUR 166 worden benaderd met:

$$v_{eff,max} = 0,42v_{max}$$

Vergelijking 4, Benadering effectieve waarde trillingsintensiteit.

De trillingssterkte over de beoordelingsperiode  $v_{per}$  kan worden berekend volgens:

$$v_{per} = v_{per,meet} \sqrt{\frac{T_b}{T_0}}$$

Vergelijking 5, Effectieve waarde van de trillingsintensiteit over de beoordelingsperiode.

Waarin:

- $v_{per}$  Berekening van de kwadratisch gemiddelde effectieve waarde van de maxima over de meetperiode.
- $T_b$  Aantal treinpassages maal een duur van 30 s.
- $T_0$  De duur van de beoordelingsperiode.

### Trillingen in de gebouwen

Golven in de bodem worden overgedragen op gebouwen die op of in deze bodem zijn gefundeerd. Door deze trillinggolven krijgen gebouwen een bepaalde verplaatsing opgelegd. Het verplaatsingspatroon in de bodem is in de tijd wisselend, de golven planten zich voort en stoten daarbij een gebouw met een bepaalde frequentie aan. De mate waarin een bouwwerk de opgelegde verplaatsing volgt, hangt af van de stijfheid van het gebouw en de afmetingen van het gebouw ten opzichte van de golflengte van de trilling.

Grote en stijve gebouwen volgen deze verplaatsing maar in zeer beperkte mate.

Daarentegen volgen kleine gebouwen of gebouwen die een beperkte samenhang vertonen, de opgelegde verplaatsing grotendeels, waarbij er in deze gebouwen naast een opgelegde verplaatsing ook vervormingen voordoen.

Doordat de golven in de bodem gebouwen met een bepaalde frequentie aanstoten is het mogelijk dat gebouwen of bepaalde onderdelen van gebouwen in hun eigen frequentie worden aangestoten, wat kan leiden tot een sterk vergrote respons (resonantie).

De mate van de vergrote respons hangt af van de demping en de frequentie.

Lage gebouwen zijn over het algemeen vrij sterk gedempt, wat resulteert in een beperkte opslingering.

Onderdelen van gebouwen zijn vaak minder sterk gedempt. De demping wordt veroorzaakt door materiaaldemping en geometrische demping. In het laatste geval stroomt de trillingsenergie via oplettingen of gedeeltelijke inklemmingen weg naar andere gebouwdelen. Daarnaast hangt de demping van gebouwonderdelen sterk af van de aanwezige inventaris.

In CUR-publicatie 166 'Damwandconstructies' wordt een methode gegeven voor de predictie van trillingen in gebouwen en onderdelen van gebouwen. In deze methode wordt een aantal reductiefactoren geïntroduceerd om demping van verschillende onderdelen te modelleren.

Ten eerste wordt de demping als gevolg van de overdracht van bodem naar fundatie bepaald welke afhankelijk is van:

- Type fundering (fundering op palen of op staal).
- Stijfheid en afmetingen van het gebouw, zowel verticaal als horizontaal.

Vervolgens wordt de demping, als gevolg van overdracht naar een onderdeel van het gebouw, bepaald, welke afhankelijk is van toegepast materiaal in de onderdelen.

De rekenmethode voor de bepaling van de trillingen in gebouwen, zoals gepresenteerd in CUR 166, wordt in deze rapportage gebruikt om een predictie te geven van de trillingen in de woningen en kantoren.

Deze prognoseberekening bestaat op basis van de bovengenoemde aspecten uit een zogenoemde overdrachtsberekening. Deze berekening is opgebouwd uit een serie schakelingen van overdrachtsverhoudingen in de grond (demping), grond-fundering, fundering-gebouw en gebouw-gebouwonderdelen. Vereenvoudigd kan deze functie als volgt worden weergegeven:

$$v_{prognose} = v_{op\ 5\ m} H_{demping\ bodem} H_{overdracht\ bodem\ gebouw}$$

Vergelijking 6, Prognose trillingsintensiteit.

Waarin:

$v_{op\ 5\ m}$	Initiële bronbelasting (trillingsintensiteit) in de grond op 5 m afstand vanuit de trillingsbron gemeten.
$H_{demping\ bodem}$	Demping in de grond.
$H_{overdracht\ bodem-gebouw}$	Overdrachtsfactoren bodem-gebouw(onderdelen) bestaande uit een aantal deelfactoren.

Voor een meer uitgebreide toelichting van de gevolgde methodiek wordt verwezen naar CUR 166.

Wanneer een trillingenonderzoek alleen op maaiveld plaatsvindt is er geen overdrachtsfactor te bepalen voor de overgang van een trilling uit de bodem naar een gebouw. Hierdoor is het nodig een aanname te doen voor de overdrachtscoëfficiënt voor de trilling als deze van de grond overgaat naar het gebouw. Uit de CUR 166 is af te leiden dat er twee factoren een rol spelen, namelijk de trillingsoverdracht van de bodem naar gebouwen. Een conservatieve aanname voor deze factor is een waarde van 0,7.

Naast de overdracht van de bodem naar de fundatie wordt de trilling vervolgens van de fundatie overgedragen naar andere onderdelen van een gebouw. Hiervoor kan op basis van de CUR 166 een waarde worden aangenomen van een factor 1,4.

In totaal zullen deze overdrachtscoëfficiënten samen een factor vormen van  $0,7 * 1,4 = 1,0$ .

Omdat dit een relatief ongunstige aanname is, is in de trillingenpredictie uitgegaan van de factor 1,0.

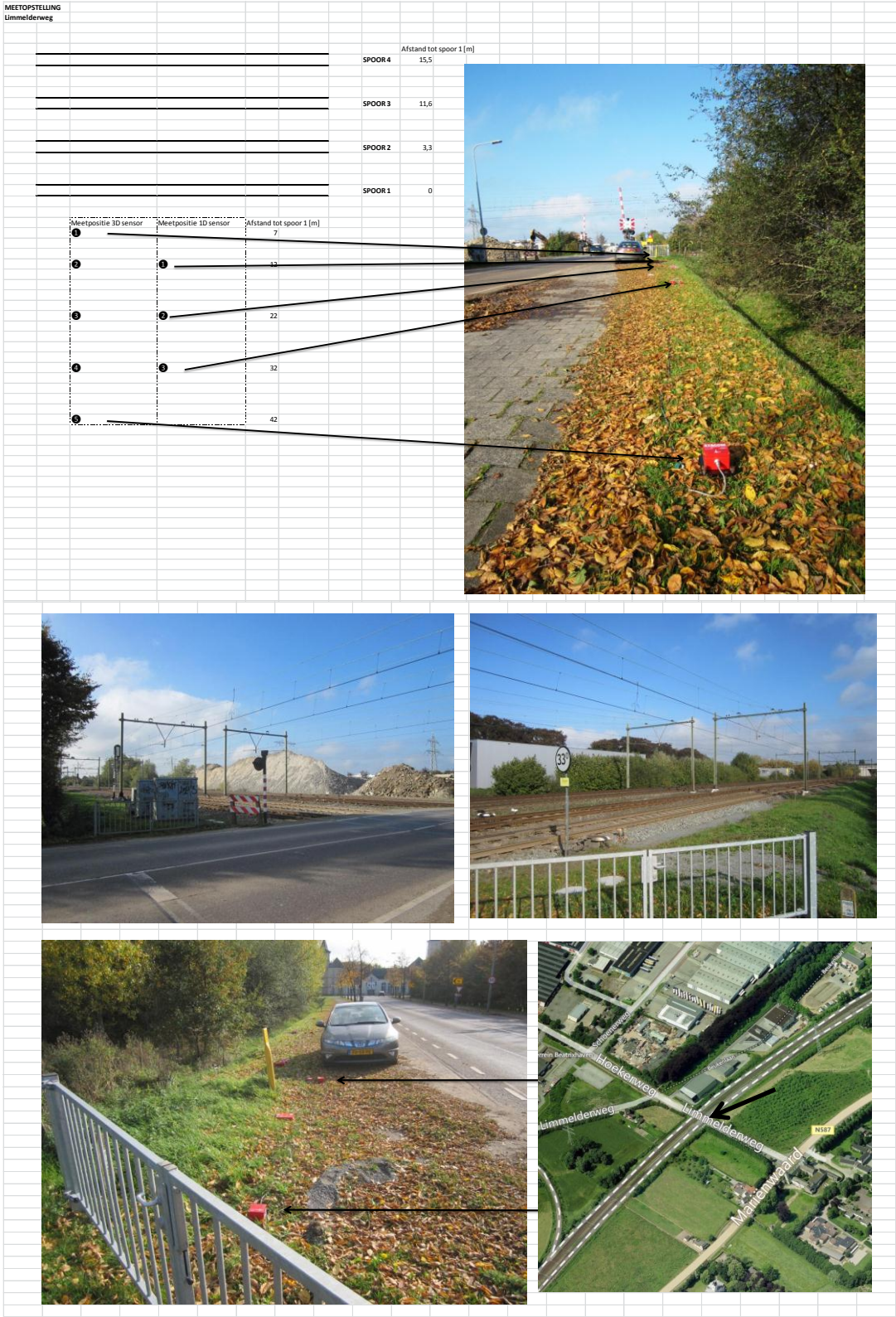


# Bijlage 3

# Meetresultaten

## Bijlage 3.1

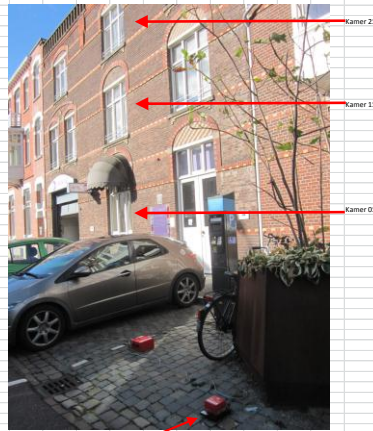
## Spoor (Limmelderweg)





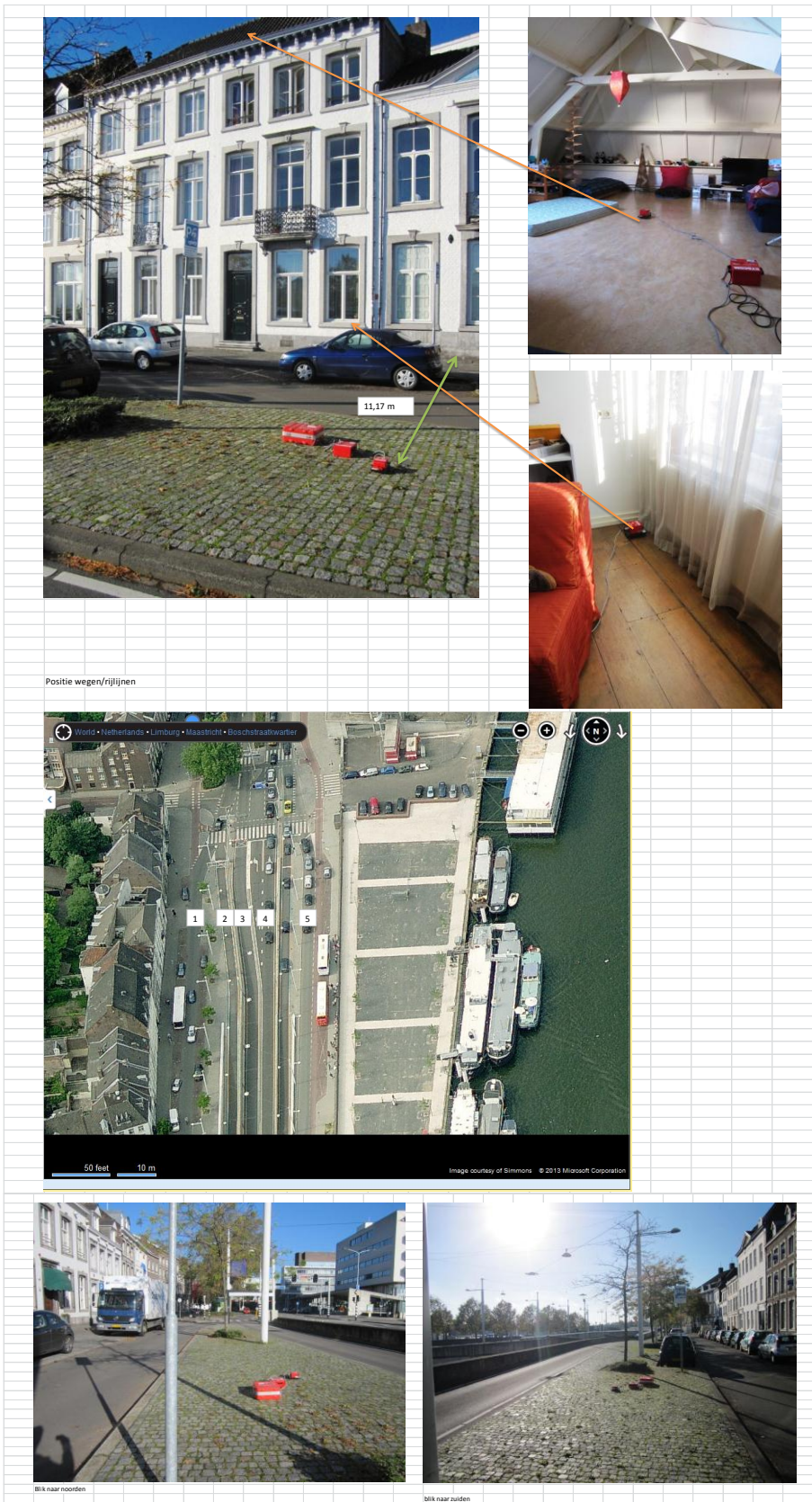
# Bijlage 3.2

# Sint Maartenslaan 5





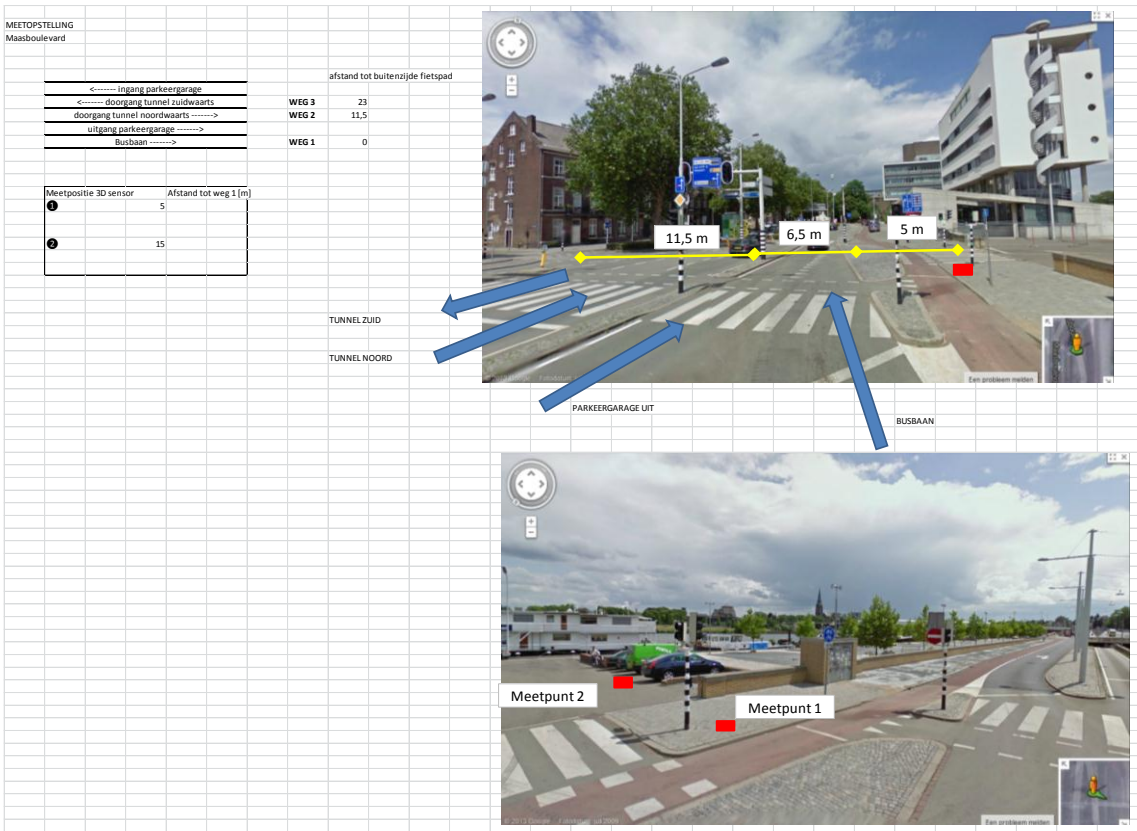
# Bijlage 3.3 Van Hasseltkade 10



<b>Van Hasseltkade 10</b>			
x = parallel aan de wg		Afstanden	
y = dwars op de weg		gevel - rijlijn 2	16 m meetpunt weg - rijlijn 2: 5 m
z = verticaal		gevel - rijlijn 3	19 m meetpunt weg - rijlijn 3: 8 m
<b>Afstand 3D sensor</b> buiten tot pand 11,17 m		gevel - rijlijn 4	24 m meetpunt weg - rijlijn 4: 13 m
ZT20 - Buiten		gevel - rijlijn 5	34 m meetpunt weg - rijlijn 5: 23 m
<b>30-10-2013</b>	ZT21 - BG		
<b>Wegen</b>	ZT22 - 3e verd		

Tijdstip	Vrachtwagen/B	Type/m	Welk rijlijn	Welke richting	Meetpunt weg			Meetpunt bgg			Meetpunt 3e verd			
					X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
10:40:19	Stadsbus		5	Noord										
10:41:21	Stadsbus		5	Noord										
10:42:00	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid	0,056	0,059	0,065	0,033	0,032	0,03	0,023	0,021	0,109	
10:45:09	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid	0,035	0,04	0,045				0,013	0,019	0,079	
10:47:57	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid	0,031	0,037	0,033				0,014	0,019	0,086	
10:48:12	Stadsbus		5	Noord										
10:48:37	Vrachtwagen	Zonder	1	Zuid										
10:49:29	Vrachtwagen	Zonder	5	Noord										
10:49:56	Stadsbus		5	Noord										
10:50:22	Stadsbus		5	Noord										
10:53:48	Vrachtwagen		3	Zuid	0,042	0,048	0,045				0,013	0,02	0,083	
10:54:47	Stadsbus		5	Noord										
10:55:15	Stadsbus		5	Noord										
10:56:22	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid	0,044	0,049	0,051				0,013	0,017	0,09	
10:58:08	Stadsbus		5	Noord										
10:58:20	Vrachtwagen	Met aan	4	Noord	0,072	0,058	0,054	0,04	0,028	0,04	0,026	0,047	0,176	
10:59:20	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid	0,047	0,045	0,047	0,029	0,024	0,019	0,014	0,013	0,077	
10:59:30	Stadsbus		5	Noord										
11:02:28	Vrachtwagen	Zonder	4	Noord	0,038	0,03	0,032	0,023	0,018	0,017	0,018	0,028	0,106	
11:03:33	Stadsbus		5	Noord										
11:04:13	Stadsbus		5	Noord										
11:04:24	Vrachtwagen	Zonder	1	Zuid	0,033	0,03	0,025	0,019	0,016	0,024	0,013	0,021	0,082	
11:05:15	Stadsbus		5	Noord										
11:05:59	Vrachtwagen	Zonder	4	Noord	0,041	0,037	0,048	0,028	0,018	0,036	0,018	0,032	0,152	
11:07:22	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid	0,024	0,026	0,024							
11:08:34	Stadsbus		5	Noord										
11:10:30	Stadsbus		5	Noord										
11:10:42	Vrachtwagen	Zonder	1	Zuid							0,013	0,018	0,088	
11:12:22	Vrachtwagen	Zonder	4	Noord	0,067	0,047	0,049	0,038	0,023	0,039	0,027	0,035	0,186	
11:13:10	Vrachtwagen	Zonder	5	Noord										
11:14:03	Stadsbus		5	Noord										
11:14:46	Vrachtwagen	Met aan	3	Zuid	0,045	0,059	0,048				0,018	0,019	0,085	
11:17:10	Stadsbus		5	Noord										
11:17:17	Stadsbus		5	Noord										
11:18:14	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid	0,045	0,042	0,05	0,024	0,02	0,019	0,015	0,012	0,084	
11:18:14	Stadsbus		5	Noord										
11:18:45	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid	0,048	0,052	0,047	0,028	0,025	0,018	0,016	0,017	0,111	
11:19:59	Stadsbus		5	Noord										
11:20:28	Stadsbus		5	Noord										
11:20:32	Stadsbus		5	Noord										
11:22:00	Vrachtwagen	Zonder	1	Zuid	Blijft een paar seconde staan									
11:25:09	Stadsbus		5	Noord										
11:25:40	Vrachtwagen	Met aan	3	Zuid	0,057	0,063	0,059	0,029	0,023	0,024	0,019	0,025	0,129	
11:26:17	Stadsbus		5	Noord										
11:26:17	Stadsbus		5	Noord										
11:26:44	Vrachtwagen	Zonder	1	Zuid										
11:27:00	Vrachtwagen	Zonder	1	Zuid										
11:33:14	Vrachtwagen	Met aan	4	Noord	0,037	0,035	0,031	0,024	0,017	0,021	0,014	0,022	0,095	
11:33:16	Stadsbus		5	Noord										
11:35:08	Stadsbus		5	Noord										
11:35:20	Vrachtwagen	Zonder	4	Noord										
11:35:43	Stadsbus		5	Noord										
11:38:48	Bus		1	Zuid										
11:39:17	Vrachtwagen	Met aan	3	Zuid	0,046	0,059	0,046	0,023	0,019	0,02	0,019	0,028	0,122	
11:40:02	Stadsbus		5	Noord										
11:41:15	Vrachtwagen	Zonder	4	Noord										
11:43:05	Vuilniswagen		4	Noord										
11:44:52	Stadsbus		5	Noord										
11:46:09	Stadsbus		5	Noord										
11:47:02	Vuilniswagen		1	Zuid	0,016	0,026	0,015							
11:48:08	Stadsbus		5	Noord										
11:49:10	Stadsbus		5	Noord										
11:49:43	Vrachtwagen	Met aan	3	Zuid	0,04	0,049	0,039				0,014	0,015	0,082	
11:50:10	Stadsbus		5	Noord										
11:51:37	Vrachtwagen	Met aan	3	Zuid				0,025	0,02	0,026	0,018	0,02	0,106	
11:52:22	Vrachtwagen	Zonder	1	Zuid										
11:53:20	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid	0,081	0,083	0,085	0,042	0,033	0,031	0,024	0,025	0,152	
11:54:05	Stadsbus		5	Noord										
11:54:27	Stadsbus		5	Noord										
11:55:10	Vrachtwagen	Met aan	3	Zuid	0,042	0,058	0,042				0,013	0,016	0,094	
11:56:00	Stadsbus		5	Noord										
11:56:20	Stadsbus		5	Noord										
12:00:35	Vrachtwagen	Met aan	3	Zuid	0,077	0,078	0,082	0,034	0,03	0,037	0,022	0,02	0,164	
12:03:04	Vuilniswagen		3	Zuid	0,055	0,065	0,067				0,015	0,02	0,125	
12:04:23	Stadsbus		5	Noord										
12:04:30	Stadsbus		5	Noord										
12:07:10	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid	0,048	0,048	0,055	0,025	0,018	0,021	0,014	0,015	0,098	
12:07:40	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid	0,048	0,06	0,052	0,027	0,041	0,03	0,016	0,017	0,109	
12:09:33	Vrachtwagen	Met aan	4	Noord	0,077	0,06	0,058	0,044	0,029	0,045	0,029	0,044	0,166	
12:10:08	Stadsbus		5	Noord										
12:11:25	Stadsbus		5	Noord										
12:11:30	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid	0,044	0,057	0,048							
12:11:56	Stadsbus		5	Noord										
12:12:09	Stadsbus		5	Noord										
12:18:27	Stadsbus		5	Noord										
12:18:50	Vuilniswagen		1	Zuid										
12:20:02	Stadsbus		5	Noord										
12:20:06	Stadsbus		5	Noord										
12:22:22	Stadsbus		1	Zuid										
12:23:30	Bus		4	Noord	0,029	0,021	0,032				0,068	0,058	0,12	
12:25:17	Stadsbus		5	Noord										
12:27:29	Stadsbus		5	Noord										
12:27:45	Stadsbus		5	Noord										
12:27:55	Stadsbus		5	Noord										
12:27:56	Stadsbus		5	Noord										
12:28:25	Vrachtwagen	Met aan	3	Zuid	0,044	0,055	0,043				0,019	0,026	0,15	
12:32:13	Stadsbus		5	Noord										
12:32:58	Stadsbus		5	Noord										
12:34:00	Vrachtwagen	Met aan	4	Noord										
12:34:15	Stadsbus		5	Noord										
12:34:55	Stadsbus		5	Noord										
12:35:56	Vrachtwagen	Met aan	4	Noord	0,044	0,038	0,028	0,024	0,018	0,029	0,016	0,021	0,095	
12:40:22	Vrachtwagen	Zonder	4	Noord	0,032	0,042	0,032	0,022	0,019	0,02	0,014	0,022	0,111	
12:40:45	Stadsbus		5	Noord										
12:44:40	Stadsbus		5	Noord										

# Bijlage 3.4 Maasboulevard



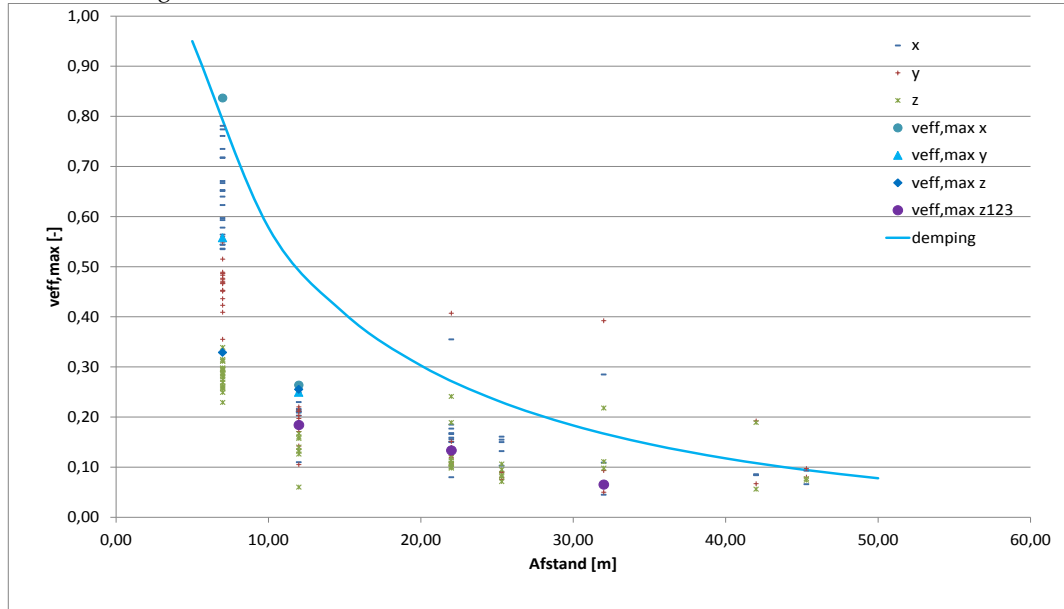
Maasboulevard (maaszijde)					ZT20			ZT21		
28-10-2013					Meetpunt 1			Meetpunt 2		
Wegen					Afstand tot busbaan 5			Afstand tot busbaan 15		
Tijdstip	Vrachtwagen/Busse/ Ander	Type/ met zonder aanhanger	Welk rijlijn	Welke richting	Trillingsrichting			Trillingsrichting		
					X	Y	Z	X	Y	Z
10:17	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid	0,023	0,036	0,043			
10:18	Stadsbus		1	Noord	0,021	0,035	0,066	0,007	0,007	0,047
10:19	Stadsbus		1	Noord	0,016	0,028	0,057			
10:20	Vrachtwagen	Met aanhanger	2	Noord	0,013	0,036	0,092	0,007	0,007	0,056
10:21	Stadsbus		2	Noord	0,044	0,067	0,083			
10:23	Vrachtwagen	Met aanhanger	2	Zuid	0,023	0,042	0,063			
10:24	Stadsbus		1	Noord						
10:25	Stadsbus		1	Noord	0,02	0,028	0,064	0,009	0,01	0,054
10:32	Vrachtwagen	Met aanhanger	2	Noord						
10:32	Vrachtwagen	Met aanhanger	3	Zuid						
10:32	Stadsbus		1	Noord						
10:34	Stadsbus		1	Noord	0,025	0,043	0,076	0,01	0,013	0,058
10:35	Stadsbus		1	Noord	0,023	0,036	0,065	0,01	0,01	0,055
10:35	Stadsbus		1	Noord	0,017	0,029	0,063	0,007	0,008	0,055
10:37	Stadsbus		1	Noord	0,016	0,022	0,052			
10:40	Stadsbus		1	Noord	0,027	0,039	0,073	0,009	0,011	0,066
10:41	Vrachtwagen	Zonder	1	Noord	0,022	0,033	0,069			
10:42	Vrachtwagen	Vuilniswagen	2	Noord	0,012	0,031	0,075	0,009	0,008	0,055
10:46	Stadsbus		1	Noord	0,023	0,029	0,064	0,008	0,009	0,055
10:47	Stadsbus		1	Noord	0,013	0,02	0,046			
10:47	Stadsbus		1	Noord	0,018	0,031	0,057			
10:49	Stadsbus		1	Noord	0,024	0,035	0,066	0,009	0,012	0,059
10:50	Vrachtwagen	Met aanhanger	3	Zuid						
10:51	Vrachtwagen	Met aanhanger	3	Zuid	0,015	0,032	0,064			
10:52	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid	0,014	0,031	0,062			
10:53	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid						
10:53	Vrachtwagen	Zonder	2	Noord						
10:54	Stadsbus		1	Noord	0,016	0,019	0,064	0,01	0,008	0,052
10:54	Vrachtwagen	Met aanhanger	2	Noord	0,018	0,037	0,073	0,01	0,008	0,047
10:54	Vrachtwagen	Met aanhanger	3	Zuid				0,014	0,01	0,052
10:55	Stadsbus		3	Noord	0,019	0,026	0,061	0,008	0,006	0,068
10:56	Vrachtwagen	Met aanhanger	2	Noord	0,032	0,041	0,086	0,009	0,011	0,081
10:58	Stadsbus		1	Noord	0,019	0,03	0,061			
10:58	Stadsbus		1	Noord	0,02	0,031	0,061	0,007	0,009	0,054
11:01	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid						
11:01	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid						
11:02	Stadsbus		1	Noord	0,025	0,043	0,071	0,01	0,008	0,058
11:02	Stadsbus		1	Noord	0,017	0,021	0,058	0,012	0,01	0,05
11:03	Stadsbus		1	Noord						
11:04	Stadsbus		1	Noord	0,013	0,019	0,042			
11:06	Bus		2	Noord	0,007	0,019	0,055			
11:07	Vrachtwagen	Zonder	2	Noord						
11:08	Stadsbus		1	Noord	0,017	0,025	0,052			
11:09	Stadsbus		1	Noord						
11:11	Stadsbus		1	Noord	0,017	0,023	0,063	0,006	0,006	0,05
11:11	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid	0,012	0,016	0,05			
11:12	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid						
11:16	Stadsbus		1	Noord	0,022	0,032	0,067			
11:18	Stadsbus		1	Noord	0,015	0,028	0,065	0,008	0,008	0,047
11:20	Vrachtwagen	Met aanhanger	3	Zuid	0,018	0,031	0,062	0,007	0,01	0,066
11:21	Stadsbus		1	Noord	0,017	0,025	0,048			
11:22	Stadsbus		2	Noord	0,018	0,027	0,06	0,006	0,008	0,053
11:25	Stadsbus		2	Noord	0,016	0,021	0,049			
11:25	Stadsbus		1	Noord	0,014	0,023	0,052	0,005	0,006	0,054
11:25	Stadsbus		1	Noord	0,015	0,024	0,06			
11:32	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid						
11:33	Stadsbus		1	Noord						
11:33	Stadsbus		1	Noord	0,013	0,024	0,049			
11:34	Stadsbus		1	Noord	0,013	0,017	0,038			
11:35	Vrachtwagen	Vuilniswagen	2	Noord	0,015	0,024	0,052			
11:39	Stadsbus		1	Noord	0,013	0,019	0,05	0,007	0,007	0,053
11:41	Stadsbus		1	Noord	0,02	0,027	0,036			
11:43	Vrachtwagen	Zonder	2	Noord						
11:45	Stadsbus		1	Noord	0,02	0,028	0,059	0,01	0,011	0,056
11:47	Stadsbus		1	Noord	0,013	0,019	0,048			
11:49	Stadsbus		1	Noord	0,029	0,043	0,047	0,007	0,009	0,048
11:55	Stadsbus		1	Noord	0,021	0,033	0,064			
11:55	Stadsbus		1	Noord						
11:59	Stadsbus		1	Noord	0,021	0,025	0,053			
12:01	Vrachtwagen	laadbak	2	Noord	0,016	0,033	0,018			
12:03	Stadsbus		1	Noord	0,022	0,033	0,064			
12:03	Vrachtwagen	Vuilniswagen	3	Zuid	0,014	0,027	0,06	0,008	0,01	0,054
12:03	Vrachtwagen	Met aanhanger	3	Zuid						
12:03	Stadsbus		1	Noord	0,017	0,026	0,053			
12:04	Stadsbus		1	Noord	0,094	0,111	0,105			
12:08	Stadsbus		1	Noord	0,021	0,028	0,058			
12:09	Stadsbus		2	Noord	0,021	0,029	0,069			
12:10	Stadsbus		1	Noord	0,015	0,031	0,052	0,007	0,009	0,05
12:10	Stadsbus		1	Noord	0,013	0,028	0,06	0,008	0,008	0,053
12:15	Vrachtwagen	Met aanhanger	2	Noord	0,01	0,02	0,047			
12:16	Vrachtwagen	Zonder	2	Noord	0,017	0,03	0,059	0,009	0,008	0,052
12:17	Vrachtwagen	Zonder	2	Noord	0,021	0,03	0,06			
12:17	Stadsbus		1	Noord						
12:18	Stadsbus		1	Noord	0,024	0,039	0,068	0,009	0,011	0,063
12:18	Vrachtwagen	Zonder	2	Noord						
12:24	Stadsbus		1	Noord	0,018	0,022	0,06	0,007	0,007	0,05
12:24	Stadsbus		1	Noord						
12:24	Stadsbus		1	Noord	0,019	0,025	0,066	0,007	0,007	0,051
12:26	Stadsbus		1	Noord	0,015	0,023	0,05			
12:28	Stadsbus		1	Noord						
12:28	Stadsbus		1	Noord	0,02	0,029	0,06			
12:34	Stadsbus		1	Noord	0,016	0,028	0,053			
12:34	Stadsbus		1	Noord						
12:34	Vrachtwagen	Vuilniswagen	3	Zuid						
12:34	Vrachtwagen	Zonder	2	Noord						
12:36	Stadsbus		1	Noord	0,026	0,041	0,073	0,01	0,012	0,061
12:39	Stadsbus		1	Noord	0,021	0,025	0,058			
12:41	Stadsbus		1	Noord						
12:46	Stadsbus		1	Noord	0,022	0,035	0,069	0,012	0,012	0,06
12:47	Vrachtwagen	Met aanhanger	2	Noord	0,009	0,024	0,066	0,008	0,007	0,054
12:48	Vrachtwagen	Vuilniswagen	3	Zuid	0,016	0,026	0,064			
12:48	Stadsbus		1	Noord						
12:49	Vrachtwagen	Zonder	3	Zuid	0,011	0,03	0,072	0,007	0,007	0,065
12:49	Stadsbus		1	Noord	0,011	0,024	0,05	0,008	0,008	0,056
12:51	Vrachtwagen	Vuilniswagen	3	Zuid	0,012	0,024	0,056			
12:53	Vrachtwagen	Met aanhanger	3	Zuid						
12:54	Bus		3	Zuid						
12:55	Stadsbus		1	Noord				0,008	0,007	0,053
12:56	Stadsbus		1	Noord	0,013	0,025	0,051			
12:57	Stadsbus		1	Noord						
13:03	Stadsbus		1	Noord	0,018	0,035	0,087	0,009	0,013	0,075
13:05	Stadsbus		1	Noord	0,019	0,031	0,058	0,008	0,009	0,071



## Bijlage 4 Trillingspredictie

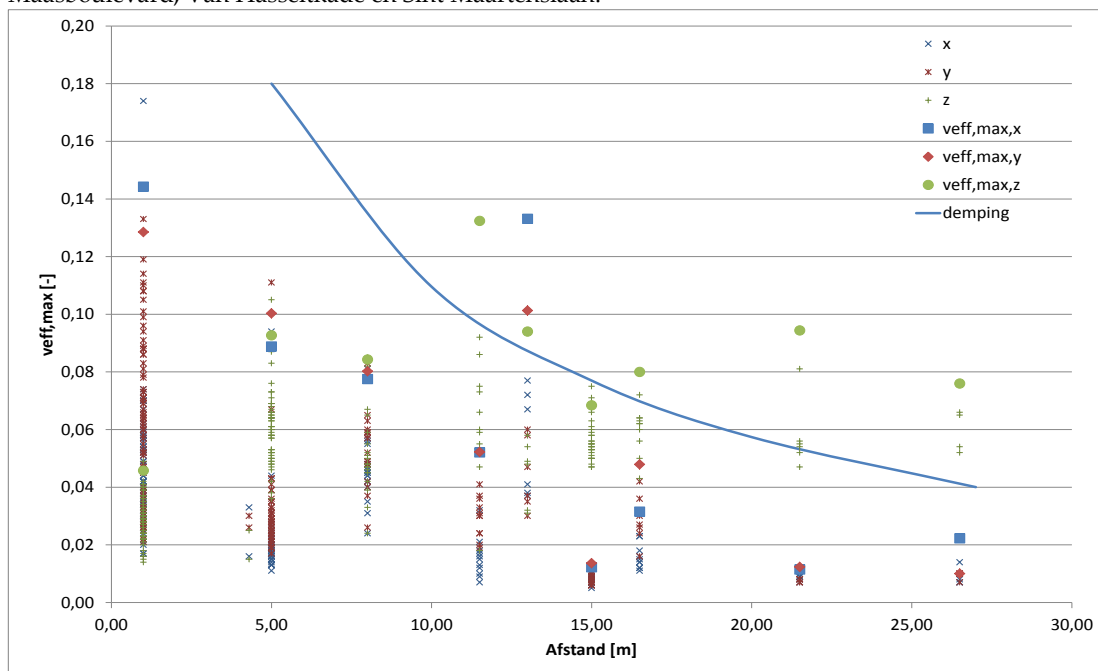
### Bijlage 4.1 Spoor (Limmelderweg)

Limmelderweg



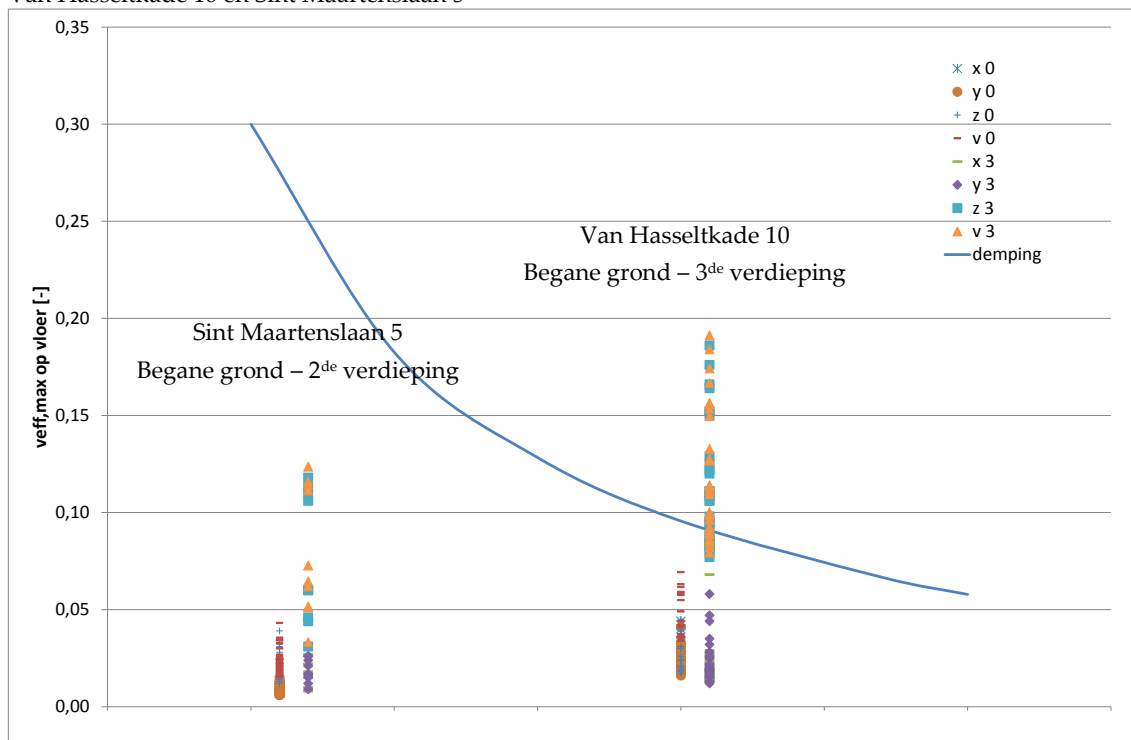
## Bijlage 4.2 Wegverkeer

Maasboulevard, Van Hasseltkade en Sint Maartenslaan.



## Bijlage 4.3 Vloerbebouwing

Van Hasselkade 10 en Sint Maartenslaan 5



## Bijlage 5 Referentiedocumenten

De volgende documenten zijn als referentiedocument gehanteerd, zie tabel 16.

Titel	datum	organisatie	
Overzichten treien meetlocatie spoor.xlsx Overzicht Maasboulevard 28-10-2013.xlsx Overzicht Sint Maartenslaan 30-10-2013.xlsx Overzicht Van Hasseltkade 30-10-2013.xlsx	31-10-2013 1-11-2013 1-11-2013 1-11-2013	DPA Cauberg Huygen	[1]
SBR meet- en beoordelingsrichtlijn, deel A: schade aan gebouwen	Oktober 2003	Stichting Bouwresearch	[2]
SBR meet- en beoordelingsrichtlijn, deel B: hinder voor personen in gebouwen	Oktober 2003	Stichting Bouwresearch	[3]
SBR meet- en beoordelingsrichtlijn, deel C: storing aan apparatuur	Oktober 2003	Stichting Bouwresearch	[4]
Onderzoek trillingbeperkende maatregelen Regio Tram Groningen, Rapport 4121054.R01	7 mei 2012	WNP raadgevende ingenieurs	[5]
Noise and Vibration impact assessment region of Waterloo Rapid Transit System	January 9 2012	J.E. Coulter Associates Limited	[6]
RGLO MIT 4 BSL 3 WP 7.11 Trillingen, L3.7.11.1 Rapport Trillingen, 141222/EA7/1V6/260.061/nve	2 oktober 2007	ARCADIS	[7]
Rapport V.2009.1067.02.R001, RijnGouweLijn-Oost, Trillingsonderzoek 2009	15 januari 2010	dGmR	[9]
Tekeningen Bestemmingsplan Tramlijn Maastricht-Vlaanderen ontwerp: NL.IMRO.0935.BPTVM2013-ow01-01 NL.IMRO.0935.BPTVM2013-ow01-02 NL.IMRO.0935.BPTVM2013-ow01-03 NL.IMRO.0935.BPTVM2013-ow01-04	13-06-2013	Gemeente Maastricht	[10]
Akoestisch onderzoek Tramverbinding Vlaanderen Maastricht (TVM)	4-11-2013	ARCADIS	[11]

Tabel 16, Referentiedocumenten.

# Colofon

## TRAM VLAANDEREN MAASTRICHT PROGNOSE TRILLINGEN

### **OPDRACHTGEVER:**

Gemeente Maastricht

### **STATUS:**

Definitief

### **AUTEUR:**

ir. A.V. van Uitert

### **GECONTROLEERD DOOR:**

ir. C.P. Schouten

### **VRIJGEGEVEN DOOR:**

ing. S.K.P. Kemps

26 november 2013

077425143:B

ARCADIS NEDERLAND BV  
Piet Mondriaanlaan 26  
Postbus 220  
3800 AE Amersfoort  
Tel 033 4771 000  
Fax 033 4772 000  
www.arcadis.nl  
Handelsregister 09036504