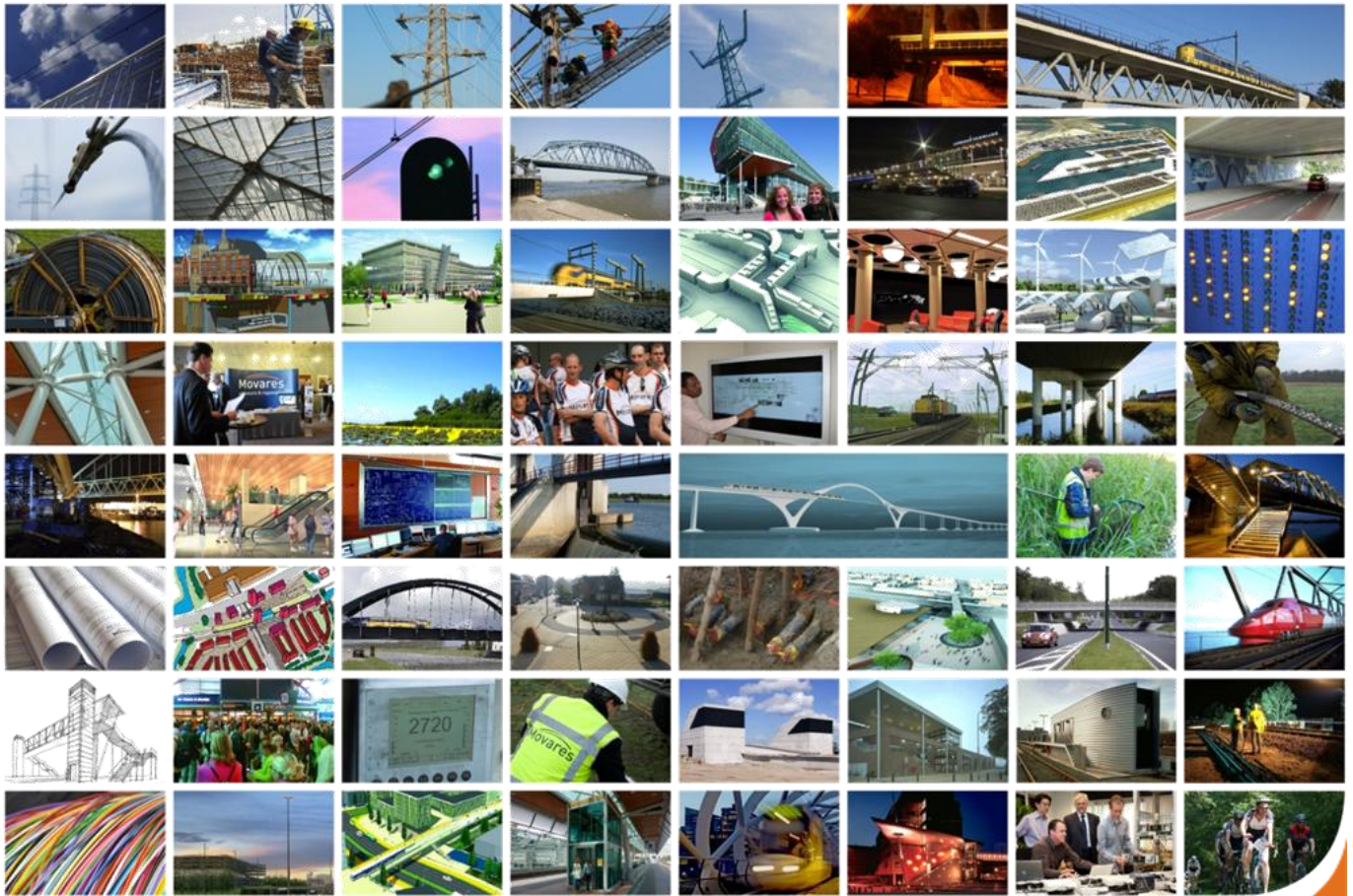




OND-ET-CON-TR-RAP-100

2 december 2014- Versie 2.0

Leeswijzer

Door het Kabinet is in 2010 de Voorkeursbeslissing over het Programma Hoogfrequent Spoorvervoer (PHS) genomen. Onderdeel van dit programma is de ombouw van station Utrecht Centraal tot een doorstroomstation: DoorStroomStation Utrecht (verder: DSSU). DSSU heeft als doel de capaciteit, kwaliteit en robuustheid van de railinfrastructuur rond Utrecht Centraal de komende jaren te vergroten. Daartoe worden de sporen binnen de bestaande sporenbundel volgens nieuwe inzichten opnieuw geordend. DSSU voorziet in aanpassing en beperkte uitbreiding van de spoorinfrastructuur en de perrons van Utrecht Centraal. Daarmee wordt het rijden met hogere intensiteiten en hogere snelheden van zowel goederen- als reizigerstreinen mogelijk gemaakt met een grotere betrouwbaarheid.

Om DSSU te realiseren is conform de Tracéwet een Tracébesluit nodig met een verkorte Tracéwetprocedure. Ter ondersteuning van de besluitvorming over het Tracébesluit is er voor gekozen om de procedure van de milieueffectrapportage (m.e.r.-procedure) te doorlopen en een milieueffectrapport (MER) op te stellen. In het Ontwerp Tracébesluit en het MER zijn de milieueffecten beschreven van de aanpassing en beperkte uitbreiding van de spoorinfrastructuur in Utrecht en van het veranderde gebruik. Op basis hiervan zijn waar nodig maatregelen ontwikkeld die negatieve effecten kunnen beperken.

Onderdeel van het Ontwerp Tracébesluit en het MER is een aantal zelfstandig leesbare onderzoeksrapporten voor verschillende milieuaspecten die als losse achtergrondrapporten beschikbaar zijn. Het voorliggende rapport betreft het onderzoeksrapport *Trillingen* ten behoeve van het Ontwerp Tracébesluit (OTB) en het MER. In dit onderzoeksrapport worden voor het milieuaspect trillingen de effecten van de aanpassing en beperkte uitbreiding van de spoorinfrastructuur en het veranderde spoorgebruik beschreven. Voor locaties waar een sterke toename in trillingshinder is, zijn maatregelen ontwikkeld en afgewogen op kosteneffectiviteit.

Samenvatting

Doelstelling

Ten behoeve van het project *Doorstroomstation Utrecht (DSSU)* wijzigt ProRail de sporen in de regio Utrecht. In het kader van dit project worden nieuwe sporen en wissels aangelegd, wijzigt de snelheid van een aantal treinen en wijzigt het spoorgebruik. Deze maatregelen hebben invloed op de trillingssterkte ten gevolge van passerende treinen in de gebouwen in de nabijheid van het spoor.

Het voorliggende rapport bevat twee verschillende trillingsonderzoeken:

1. het beoordelen van trillingshinder tijdens de exploitatiefase;
2. het beoordelen van trillingsschade tijdens de bouwphase.

Werkwijze

In het onderzoek naar trillingshinder tijdens de exploitatiefase is de trillingssituatie in de plansituatie, na realisatie van *DSSU*, vergeleken met de referentiesituatie in het jaar 2007. Middels een uitgebreid trillingsonderzoek in een zone van 500 meter rondom de sporen is de trillingssterkte in gebouwen vastgesteld. Hiertoe is het onderzoeksgebied geografisch opgedeeld in subgebieden, afhankelijk van bodemopbouw, bouwjaar en constructie van de woningen. In dit trillingsonderzoek wordt gebruik gemaakt van een getrapte aanpak:

1. Stap 1: inventarisatie van locaties waar mogelijk trillingshinder kan optreden met behulp van een globaal trillingsmodel;
2. Stap 2: knelpunteninventarisatie aan de hand van indicatieve metingen en empirische prognoses, verwerkt in een nauwkeurig trillingsmodel;
3. Stap 3: trillingsmetingen en nauwkeurige trillingsprognoses voor mogelijke knelpuntlocaties;
4. Stap 4: ontwerpen van trillingsmaatregelen.

Ten behoeve van de MER. is het effect van het project *DSSU* ten opzichte van de autonome groeisituatie in kaart gebracht met behulp van een modelberekening. Hiervoor is het aantal gehinderde personen per subgebied in kaart gebracht in de projectsituatie en de autonome groeisituatie.

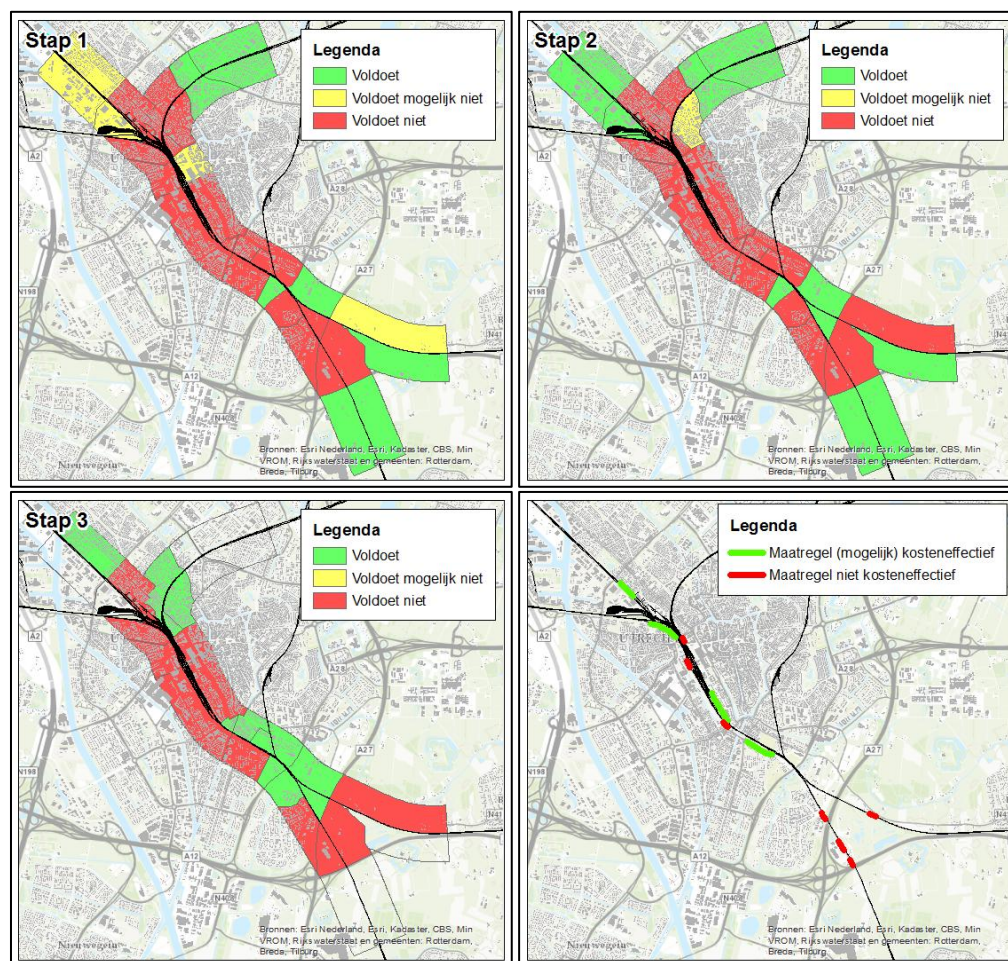
Het onderzoek naar trillingsschade tijdens de bouwphase is uitgevoerd met behulp van eindige elementenmodellen.

Conclusies

De beoordeling aan de hand van de Beleidsregel Trillinghinder Spoor (BTS 2014), uitgevoerd na bovengenoemde stappen 1, 2 en 3, is weergegeven in Figuur 1. Locaties die in een bepaalde stap afvallen, behoeven niet te worden meegenomen in vervolgstappen. Ter verificatie van de gekozen aanpak zijn op een groot aantal locaties nog wel aanvullende onderzoeken verricht. Andersom is op sommige locaties geen nader onderzoek verricht omdat de resultaten uit de andere aanvullende onderzoeken voor deze locaties gebruikt kunnen worden.

Er is een kans op overschrijdingen in de subgebieden Cremerstraat, Westplein, Raadwijk/Hendrik Tollensstraat, Tolsteegplantsoen, Nieuwe Houtenseweg noord/De Wadden, Nieuwe Houtenseweg zuid/Mereveldseweg, Koningsweg, Nicolaas Beetsstraat, Daalseplein en 2^e Daalsebuurt. Voor deze subgebieden zijn maatregelen ontworpen om de (toename in) trillingshinder te mitigeren. In het onderzoek naar

maatregelen is gefocust op maatregelen aan de transmissie en de bron. Maatregelen aan de ontvanger hebben niet de voorkeur vanwege de grote impact op bewoners van de betreffende panden. De locaties van de wel en niet kosteneffectieve maatregelen zijn weergegeven in Figuur 1. Op de volgende locaties zijn maatregelen (mogelijk) kosteneffectief: Cremerstraat, Tolsteegplantsoen en Saffierlaan, Nicolaas Beetsstraat en Arthur van Schendelstraat en Seringstraat. De afweging op doelmatigheid wordt uitgevoerd in het (O)TB.



Figuur 1 Resultaten trillingsonderzoek (O)TB

Tijdens de realisatiefase van *DSSU* worden op diverse locaties bouwwerkzaamheden uitgevoerd. Bij een deel van deze werkzaamheden is een kans op trillingsschade bij omliggende gebouwen niet uit te sluiten. Deze trillingsschade kan optreden door werkzaamheden als het intrillen van damwanden of bijvoorbeeld door heiwerkzaamheden. Met behulp van eindige elementen modellen is bepaald voor welke gebouwen trillingsschade niet kan worden uitgesloten.

In het ontwerp is sprake van werkzaamheden die mogelijk tot trillingsschade leiden bij het realiseren van de machinistentunnel tussen het 7^e perron en het opstel terrein ten zuiden van station Utrecht Centraal, en bij het realiseren van trillingsschermen bij een deel van de Seringstraat en een deel van de Arthur van Schendelstraat. Uit deze analyse blijkt dat bij het realiseren van de trillingsschermen schade aan gebouwen niet is uit te

sluiten. Bij de Seringstraat kan gekozen worden voor het inbrengen van de damwanden middels de trillingsarme drukmethode, waardoor schade aan de bebouwing wordt voorkomen. Bij de Arthur van Schendelstraat is de drukmethode geen optie, gezien de diepte van het scherm en de bodem in Utrecht. Het realiseren van het trillingsscherm op deze locatie zal daarom hoogstwaarschijnlijk tot schade aan de bebouwing leiden.

Begrippenlijst

BTS	Beleidsregel Trillinghinder Spoor, beoordelingsrichtlijn van de Staatssecretaris van Infrastructuur en Milieu ten aanzien van trillinghinder t.b.v. de vaststelling van tracébesluiten voor de aanleg, wijziging of opnieuw in gebruik nemen van een landelijke spoorweg, d.d. 10 april 2012, Staatscourant. 2012, nr. 7532 en de bijbehorende wijzigingen van 24 maart 2014, Staatscourant. 2014, nr. 8251
SBR-richtlijn	Door de Stichting BouwResearch opgestelde richtlijn om trillingen te beoordelen. De richtlijn bestaat uit 3 delen: • Deel A: schade aan gebouwen; • Deel B: hinder voor personen in gebouwen; • Deel C: verstoring van apparatuur.
Geovib	3D eindige elementenmodel dat de voortplanting van trillingen door de bodem berekent. Het model is heel geschikt om verschillende varianten van bijvoorbeeld de taludgeometrie door te rekenen, of om de invloed van trillingsmaatregelen te onderzoeken. Geovib is in het verleden ontwikkeld door Movares en wordt al jarenlang toegepast binnen trillingsonderzoeken. Het model is uitvoerig geverifieerd met behulp van metingen.
VibraDyna	Een door Movares ontwikkeld trillingsmodel dat de trillingen van weg- en railverkeer berekent. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van versie 1.4. Dit model is in het verleden al uitvoerig geverifieerd, zie ook Bijlage I.
(O)TB	(Ontwerp)tracébesluit (ontwerp)besluit op grond van de Tracéwet, waarin het project is vastgelegd
Referentiesituatie	Huidige situatie, wordt in de BTS referentiesituatie genoemd. In dit onderzoek wordt als jaartal 2007 gehanteerd
Plansituatie	Situatie die ontstaat na realisatie van <i>DSSU</i>
Uithoflijn	Tramlijn die door de Bestuursregio Utrecht (BRU) wordt gerealiseerd tussen Utrecht Centraal en universiteitscomplex De Uithof
OTC	Ondergrondse Trillingsreducerende Constructie, een constructie in de bodem waarmee trillingen worden gedempt of gereflecteerd, zodat in de bebouwing achter deze constructie minder trillingshinder wordt ervaren

Inhoudsopgave

Samenvatting	1
Begrippenlijst	4
1 Inleiding	8
1.1 Aanleiding	8
1.2 Doelstelling	8
1.3 Opbouw van het rapport	8
1.4 Toegepaste kaders en uitgangspunten	9
2 Situatiebeschrijving	10
2.1 Onderzoeksgebied	10
2.2 Referentiesituatie	12
2.2.1. <i>Spoorgebruik</i>	12
2.2.2. <i>Snelheden</i>	13
2.2.3. <i>Treinintensiteiten</i>	13
2.3 Plansituatie (na realisatie DSSU)	13
2.3.1. <i>Uitgangspunten</i>	13
2.3.2. <i>Spoorgebruik</i>	13
2.3.3. <i>Taludgeometrie</i>	14
2.3.4. <i>Treinsnelheid</i>	14
2.3.5. <i>Treinintensiteit</i>	15
2.3.6. <i>Invloed Uithoflijn</i>	16
3 Opzet trillingsonderzoek	19
3.1 Onderzoek naar trillingshinder	19
3.1.1. <i>Stap 1: Inventarisatie van trillingsgevoelige locaties</i>	19
3.1.2. <i>Stap 2: Indicatieve trillingsmeting en empirische prognose</i>	20
3.1.3. <i>Stap 3: Nauwkeurige trillingsprognoses in woningen</i>	20
3.1.4. <i>Stap 4: Ontwerpen van maatregelen en afwegen van varianten</i>	21
3.2 Onderzoek naar trillingsschade	21
4 Beoordelingskader trillingshinder en schade	22
4.1 Beoordeling trillingshinder	22
4.2 Beoordeling trillingsschade	22
5 Stap 1 – Globaal trillingsonderzoek	24
5.1 Inleiding	24
5.2 Vergelijking trillingscontouren	24
5.3 Knelpuntlocaties	24
6 Stap 2 – Nauwkeurig, locatiespecifiek trillingsonderzoek	27
6.1 Inleiding	27
6.2 Vergelijking trillingscontouren	28
6.3 Knelpuntlocaties	29
7 Stap 3 – Onderzoek op knelpuntlocaties	31
7.1 Onderzoeksaanpak	33

7.2	Prognosemodel	33
7.2.1.	<i>Invloed wissels</i>	34
7.2.2.	<i>Invloed spoorafstand</i>	34
7.2.3.	<i>Invloed taludwijziging en spooropbouw</i>	35
7.2.4.	<i>Invloed snelheidswijziging</i>	35
7.2.5.	<i>Invloed wijziging in treinintensiteit</i>	35
7.2.6.	<i>Bepaling gewijzigde trillingssterkte</i>	36
7.3	Resultaten	36
7.4	Bepaling trillingssituatie in niet-gemeten woningen	39
7.5	Betrouwbaarheid	39
7.6	Locaties voor maatregelen	40
8	Stap 4 – Trillingsmaatregelen	42
8.1	Gevolgde methodiek	42
8.2	Mogelijke maatregelen	43
8.2.1.	<i>Mogelijke maatregelen aan de bron</i>	44
8.2.2.	<i>Mogelijke maatregelen aan de transmissie</i>	45
8.2.3.	<i>Mogelijke maatregelen aan de ontvanger</i>	46
8.2.4.	<i>Voorgestelde maatregelen</i>	47
8.3	Gebiedsbegrenzing	47
8.4	Subgebied 1 (Cremerstraat)	49
8.4.1.	<i>Onderzochte maatregelen</i>	49
8.4.2.	<i>Voorgestelde maatregel</i>	50
8.5	Subgebied 2 (Westplein)	53
8.5.1.	<i>Onderzochte maatregelen</i>	53
8.5.2.	<i>Voorgestelde maatregel</i>	54
8.6	Subgebied 3 (Raadwijk/Hendrik Tollensstraat)	57
8.6.1.	<i>Onderzochte maatregelen</i>	57
8.6.2.	<i>Voorgestelde maatregel</i>	58
8.7	Subgebied 4 (Tolsteegplantsoen (Saffierlaan))	60
8.7.1.	<i>Onderzochte maatregelen</i>	60
8.7.2.	<i>Voorgestelde maatregel</i>	61
8.8	Subgebied 7 (Nieuwe Houtenseweg noord/De Wadden)	64
8.8.1.	<i>Onderzochte maatregelen</i>	64
8.8.2.	<i>Voorgestelde maatregel</i>	65
8.9	Subgebied 8 (Nieuwe Houtenseweg zuid/Mereveldseweg)	66
8.9.1.	<i>Onderzochte maatregelen</i>	67
8.9.2.	<i>Voorgestelde maatregel</i>	69
8.10	Subgebied 12 (Koningsweg)	70
8.10.1.	<i>Onderzochte maatregelen</i>	70
8.10.2.	<i>Voorgestelde maatregel</i>	71
8.11	Subgebied 17 (Nicolaas Beetsstraat)	72
8.11.1.	<i>Onderzochte maatregelen</i>	72
8.11.2.	<i>Voorgestelde maatregel</i>	73
8.12	Subgebied 18 (Daalseplein)	77
8.12.1.	<i>Onderzochte maatregelen</i>	77
8.12.2.	<i>Voorgestelde maatregel</i>	78
8.13	Subgebied 26 (2 ^e Daalsebuurt (Seringstraat))	79
8.13.1.	<i>Onderzochte maatregelen</i>	79
8.13.2.	<i>Voorgestelde maatregel</i>	80

9	Trillingsschade tijdens de bouwfase	83
9.1	Inleiding	83
9.2	Uitgangspunten	83
9.3	Modellering	84
9.4	Resultaten	84
10	Conclusies en aanbevelingen	89
10.1	Onderzoek naar trillingshinder	89
10.2	Onderzoek naar trillingsschade tijdens bouwfase	90
	Colofon	91

Bijlage I	VibraDyna
Bijlage II	Beoordelingskader
Bijlage III	Resultaten bodemonderzoek en maaiveldmetingen
Bijlage IV	Verwerkingsprocedure trillingsmetingen
Bijlage V	Mogelijke mitigerende maatregelen
Bijlage VI	Resultaten onderzoek naar trillingshinder

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Door het Kabinet is in 2010 de Voorkeursbeslissing over het Programma Hoogfrequent Spoorvervoer (PHS) genomen. Onderdeel van dit programma is de ombouw van station Utrecht Centraal tot een doorstroomstation: DoorStroomStation Utrecht (verder: *DSSU*). *DSSU* heeft als doel de capaciteit, kwaliteit en robuustheid van de railinfrastructuur rond Utrecht Centraal de komende jaren te vergroten. Door een aantal fysieke maatregelen wordt het rijden met hogere intensiteiten en hogere snelheden van zowel goederen- als reizigerstreinen mogelijk gemaakt met een grotere betrouwbaarheid. Het project *DSSU* omvat daartoe onder meer de realisatie van de volgende maatregelen:

- realiseren van twee extra perronsporen (20 en 21) aan weerszijden van een nieuw te realiseren perron 8 bij station Utrecht Centraal;
- realiseren van een 8^e spoor tussen station Utrecht Centraal en station Utrecht Vaartsche Rijn;
- realiseren van een keerspoor tussen de sporen 20 en 21;
- verwijdering en/of vervanging van wissels;

Om *DSSU* te realiseren is conform de tracéwet een tracébesluit nodig met een verkorte tracéwetprocedure. Ter ondersteuning van de besluitvorming over het tracébesluit zal de procedure van de milieueffectrapportage (verder: m.e.r.-procedure) worden doorlopen.

1.2 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om langs het gehele tracé waarbinnen veranderingen in de trillingssituatie plaatsvinden ten gevolge van het project *DSSU*, de trillingshinder in de referentie- en plansituatie in gebouwen rond het spoor vast te stellen. Het trillingsonderzoek dient als basis voor het Ontwerp Tracébesluit (OTB) van *DSSU*. Daarnaast wordt in dit onderzoek de kans op trillingsschade tijdens de bouwphase van *DSSU* beschreven.

1.3 Opbouw van het rapport

In dit trillingsonderzoek wordt zowel trillingshinder als trillingsschade onderzocht. Voor het onderzoek naar trillingshinder wordt de trillingssituatie in het planjaar, na realisatie van *DSSU*, vergeleken met de referentiesituatie in 2007. Voor het onderzoek naar trillingsschade wordt alleen de realisatiefase van het project beschouwd.

Ten behoeve van het onderzoek naar trillingshinder wordt een getrapte onderzoeksaanpak gehanteerd die uit meerdere stappen bestaat. De stappen gaan van globaal naar gedetailleerd, waarbij in elke stap de nauwkeurigheid groter wordt voor locaties met een grote kans op trillingshinder. Na elke stap in het onderzoek wordt nader onderzoek verricht op die locaties waar de kans op trillingshinder ten gevolge van treinverkeer aanwezig is, de zogenaamde zeefmethode.

De volgende stappen worden achtereenvolgens doorlopen:

1. Inventarisatie van locaties waar mogelijk trillingshinder kan optreden met behulp van een globaal trillingsmodel;
2. Knelpunteninventarisatie aan de hand van indicatieve metingen en empirische prognoses, verwerkt in een nauwkeurig trillingsmodel;
3. Trillingsmetingen en nauwkeurige trillingsprognoses voor mogelijke probleemlocaties;
4. Ontwerpen van trillingsmaatregelen en afweging van varianten.

De stappen worden nader toegelicht in hoofdstuk 3. Bij alle stappen wordt beoordeeld conform de BTS ten opzichte van de referentiesituatie (2007).

Voor het onderzoek naar trillingsschade wordt gebruik gemaakt van modelberekeningen op de locaties waar bouwwerkzaamheden worden uitgevoerd.

1.4 Toegepaste kaders en uitgangspunten

De Beleidsregel Trillinghinder Spoor (BTS) en het bijbehorende memo van Level Acoustics¹ vormen het kader voor de afweging van trillingshinder in het trillingsonderzoek ten behoeve van *DSSU*. Trillingsschade wordt afgewogen op basis van de SBR A-richtlijn (schade aan gebouwen).

¹ A. Koopman, LA.131001a.M04

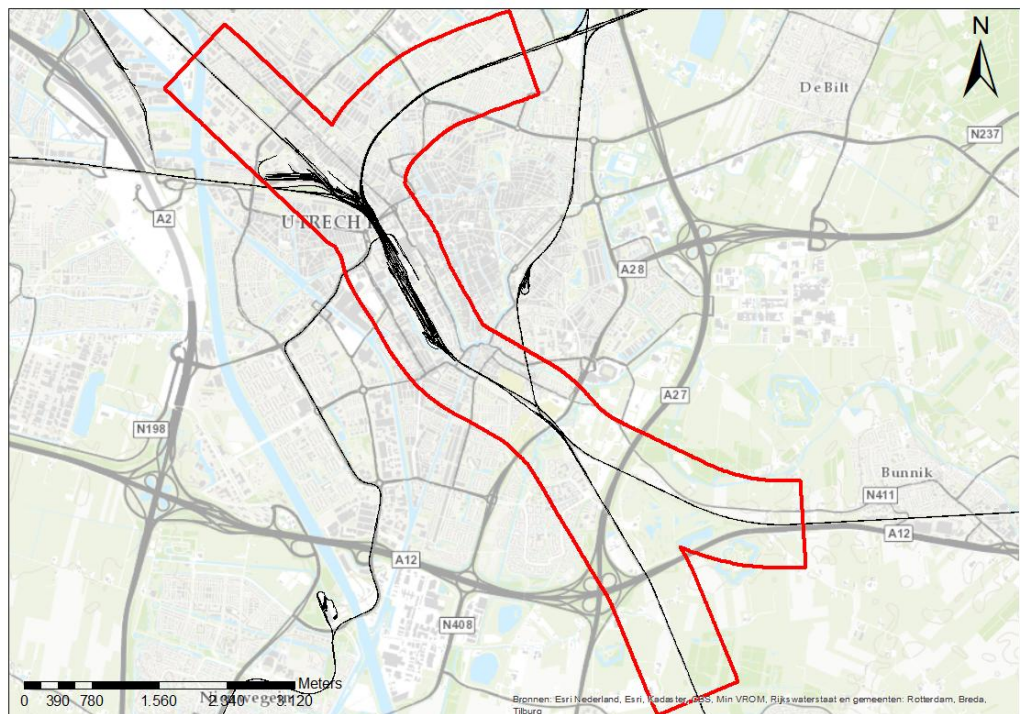
2 Situatiebeschrijving

In het trillingsonderzoek wordt onderscheid gemaakt tussen twee situaties:

1. De referentiesituatie conform de BTS, in 2007;
2. De plansituatie, de situatie die ontstaat na realisering van het project *DSSU*.

2.1 Onderzoeksgebied

Het tracédeel waarop dit trillingsonderzoek betrekking heeft, is het gebied tussen het Amsterdam-Rijnkanaal (km 0.96 (richting Woerden), resp. km 31.9 (richting Amsterdam)) / Utrecht Overvecht (km 3.5 (richting Amersfoort)) en km 6.1 (richting Houten) / 40.9 (richting Arnhem), zie Figuur 2-1. In dit gebied vinden snelheidsverschillen en/of infrastructurele wijzigingen plaats ten gevolge van het project *DSSU*. Deze wijzigingen kunnen invloed hebben op de trillingen in gebouwen rond het spoor.



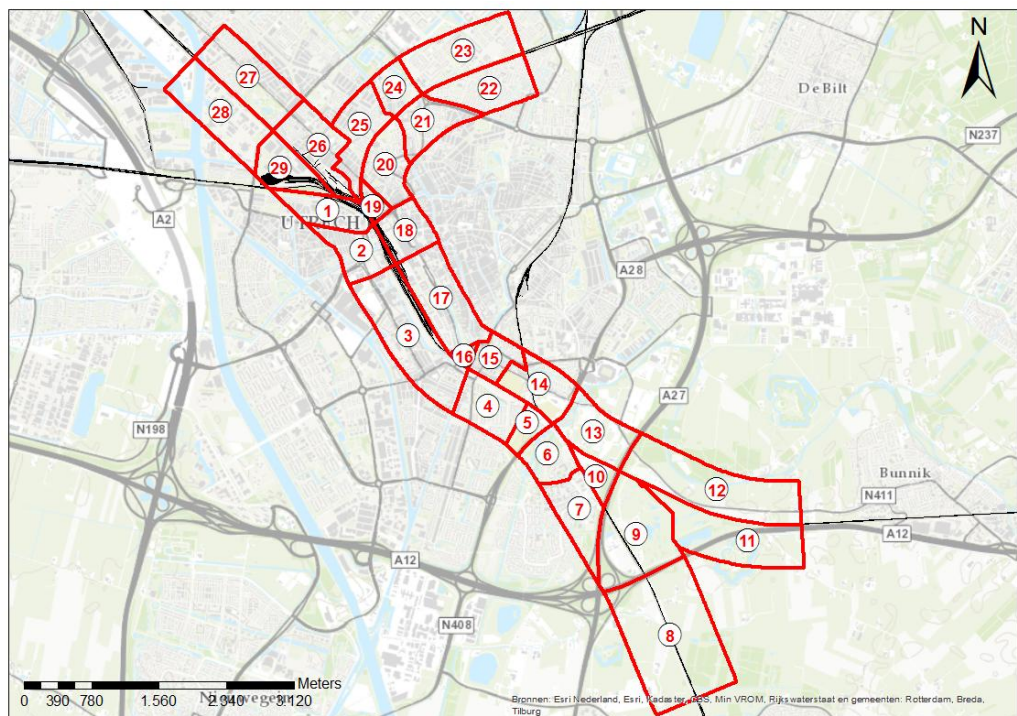
Figuur 2-1 Onderzoeksgebied trillingsonderzoek

Het onderzoeksgebied is opgedeeld in subgebieden, zie Figuur 2-2. Deze opdeling heeft plaatsgevonden op basis van type bebouwing, taludgeometrie, afstand tot het spoor, bodemgesteldheid en treinsnelheid. Door deze benaderingswijze is het mogelijk om bepaalde onderzoeksgebieden in hun geheel wel of niet mee te nemen in vervolgonderzoek.

De nummers van de subgebieden zijn weergegeven in Tabel 2-1. Per subgebied is een naam gekozen, meestal gebaseerd op een straat waarin het onderzoek is verricht. Deze namen worden in het vervolg van dit onderzoek gehanteerd.

Tabel 2-1 Subgebieden met namen en nummers

Nr	Naam subgebied in trillingsonderzoek	Belangrijke stra(a)t(en)
1	Cremerstraat	Cremerstraat, J.J.A. Goeverneurstraat
2	Westplein	Lange Hagelstraat, Sijpesteijnkade, Mineurslaan
3	Raadwijk / Hendrik Tollensstraat	Mineurslaan, Reviuskade, Da Costakade, Raadwijk, Vondellaan
4	Tolsteegplantsoen (Saffierlaan)	Tolsteegplantsoen, Saffierlaan, Kariboestraat, Lamstraat
5	Oude Houtensepad zuid	Houtensepad, Impalastraat
6	Engelsmanplaat	Engelsmanplaat
7	Nieuwe Houtenseweg noord / De Wadden	De Wadden, Nieuwe Houtenseweg
8	Oud Wulfseweg	Oud Wulfseweg, Mereveldseweg (ten zuiden van A12)
9	Nieuwe Houtenseweg zuid / Mereveldseweg	Nieuwe Houtenseweg, Mereveldseweg (ten noorden van A12)
10	Houtensepad	Houtensepad, Tussen de Rails
11	Marsdijk	Marsdijk, Achterdijk (ten zuiden van A12)
12	Koningsweg	Koningsweg, Provincialeweg, Achterdijk (ten noorden van A12)
13	Rijndijk	Rijndijk, Koningsweg
14	Oude Houtensepad noord	Oude Houtensepad, Kovelaastraat
15	Pelikaanstraat	Pelikaanstraat
16	Vaartsestraat	Vaartsestraat
17	Nicolaas Beetsstraat	Nicolaas Beetsstraat , Arthur van Schendelstraat, Stationsplein
18	Daalseplein	Smakkelaarseveld, Leidseveer, Nieuwe Daalstraat
19	Spijkerstraat	Wolfstraat, Spijkerstraat
20	Pijlsweerd	Turfstraat, Nieuwe Pijlsweerdstraat
21	Vecht zuidzijde	Vechtbrug, Gerbrandystraat
22	Tuindorp	Gijsbert Bromlaan, Albrecht Thaerlaan
23	Taag- en Rubicondreef	Van Brammendreef, Winterboeidreef
24	Vecht noordzijde	Verheulstraat, Loevenhoutsedijk
25	Ondiep	Petemoederslaan, Tichelaarslaan, Schutstraat
26	2 ^e Daalsebuurt	Concordiastraat, 2 ^e Daalsedijk, Seringstraat
27	Julianapark en Elinkwijk	Jan Overdijkstraat, Fahrenheitlaan, Bessemerlaan
28	Vlampijpstraat	Vlampijpstraat
29	Cartesiusweg	Spoordijk, Locomotiefstraat



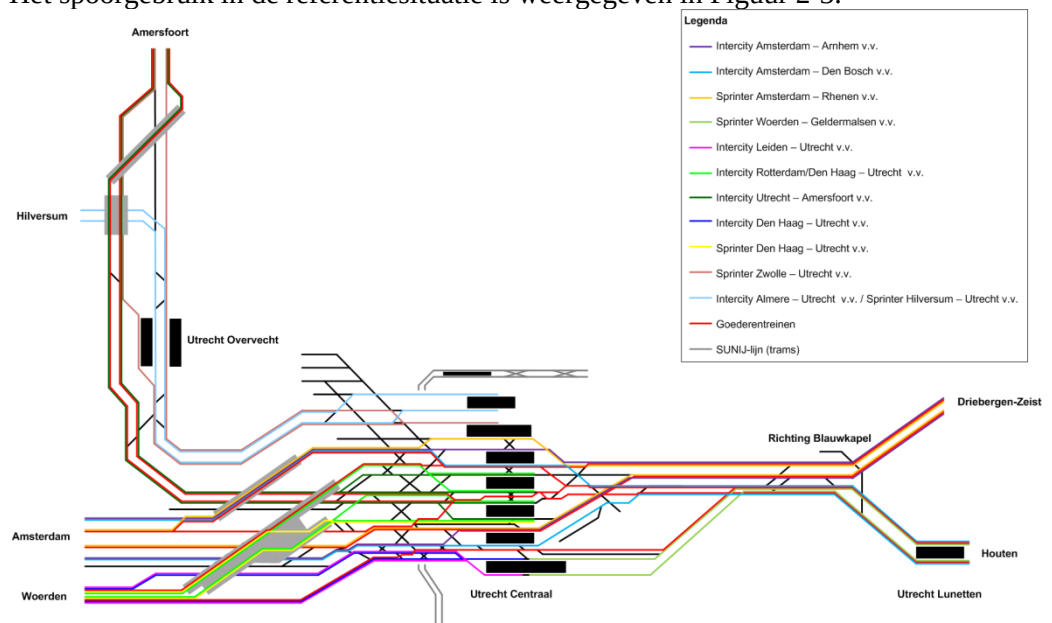
Figuur 2-2 Subgebieden trillingsonderzoek

2.2 Referentiesituatie

Deze paragraaf bevat een beschrijving van de referentiesituatie. Als referentiesituatie conform het vigerende beleidskader, de BTS, geldt de spoorligging van 2007, vóór aanvang van de werkzaamheden ten behoeve van *Sporen in Utrecht*. De beoordeling van trillingshinder vindt plaats ten opzichte van deze situatie. Alle overige gegevens, zoals spoorgebruik en treinintensiteiten, worden ook genomen uit dit referentiejaar.

2.2.1. Spoorgebruik

Het spoorgebruik in de referentiesituatie is weergegeven in Figuur 2-3.



Figuur 2-3 Lijnvoeringsschema in referentiesituatie

2.2.2. Snelheden

Voor de snelheidsprofielen worden de maximale te hanteren snelheden gebruikt, deze zijn bepaald aan de hand van de seinplaatsing en de aanzet- en remcurves van de diverse treintypes. De in dit onderzoek gehanteerde maximale snelheden van reizigers- en goederentreinen zijn weergegeven in Figuur 2-5.

2.2.3. Treinintensiteiten

De treinaantallen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 2-3 (zie pag. 15).

2.3 Plansituatie (na realisatie DSSU)

Deze paragraaf bevat een beschrijving van de plansituatie rond station Utrecht Centraal, na realisatie van DSSU. De belangrijkste wijzigingen zijn veranderingen in spoorgebruik, treinsnelheid en het verwijderen van een groot aantal wissels in de onmiddellijke nabijheid van station Utrecht Centraal.

2.3.1. Uitgangspunten

Voor de plansituatie is in het trillingsonderzoek gebruik gemaakt van de in Tabel 2-2 weergegeven documenten.

Tabel 2-2 Gebruikte documenten voor plansituatie

1. Tekeningen Definitief Ontwerp DSSU, Movares, DO-ET-BS-00-ST-17 tot en met DO-ET-BS-00-ST-27, DO-ET-BS-00-ST-55 en DO-ET-BS-00-ST-75, 12 februari 2014
2. Tekeningen keerwand Kruisvaart, Strukton Infratechnieken, TUO-GEO-2100-C tot TUO-GEO-2500-B en TUO-ALG-1000-B, 27 mei 2011
3. Tekeningen parkeergarage Halte Vaartsche Rijn, Strukton Infratechnieken, TUO-HVR-0001-C tot TUO-HVR-0104-A, 29 juli 2011
4. Tekeningen HOV-baan, Strukton Infratechnieken, TDO-HOV-0101-A tot TDO-HOV-0202-A, 26 oktober 2010
5. Dwarsprofielen definitief ontwerp DSSU, Movares, 6 oktober 2009
6. Dwarsprofielen Kruisvaart, Movares, 29 april 2009
7. Diverse bestemmingsplannen van nieuwbouwlocaties in een zone van 500 meter rond het spoor²

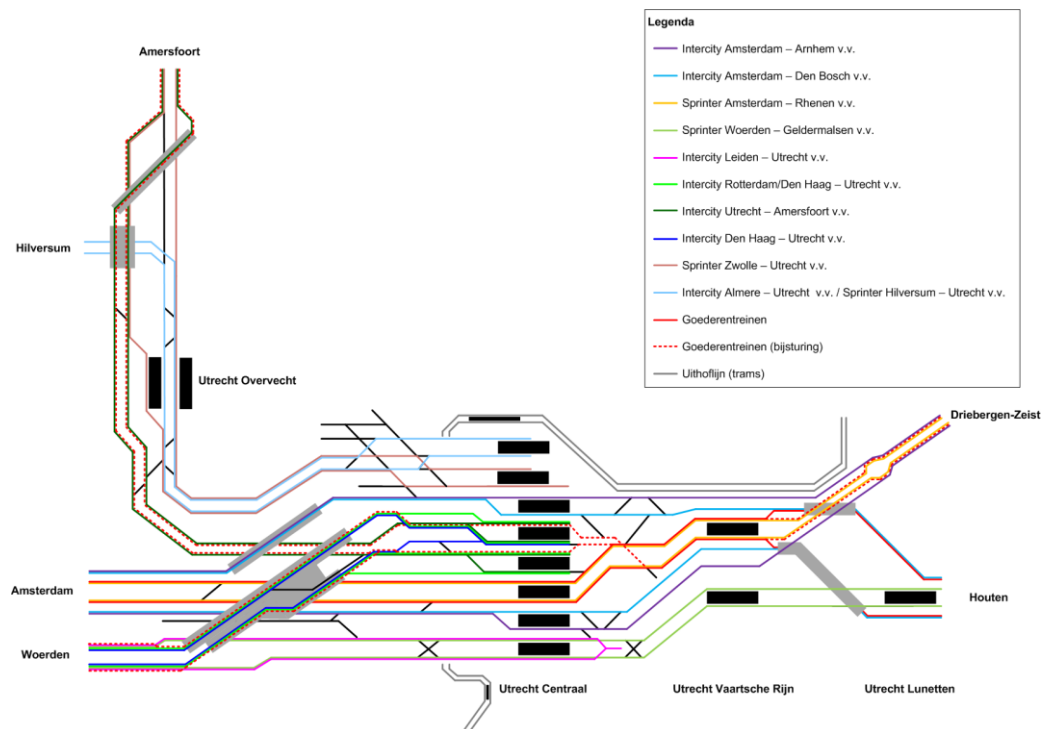
Ten opzichte van de referentiesituatie zijn in de plansituatie de volgende zaken gewijzigd:

1. Sporenlay-out en spoorgebruik wordt gewijzigd (zie tekeningen in OTB DSSU);
2. De geometrie van het spoortalud wordt gewijzigd. Op de locatie Engelsmanplaat bijvoorbeeld is een keerwand (ondergrondse, trillingsreducerende constructie) gerealiseerd in het kader van het project *Sporen in Utrecht* om de trillingssterkte in de woningen langs het spoor te reduceren. Deze keerwand is gerealiseerd omdat de spoorsloot werd gedempt, waardoor de trillingssterkte zou toenemen. Ook op andere locaties wijzigt de taludgeometrie;
3. Treinsnelheid wijzigt door een wijziging in seinplaatsing en spoorgebruik;
4. Treinintensiteit wijzigt;
5. Uithoflijn (tramlijn) is aangelegd.

2.3.2. Spoorgebruik

Het spoorgebruik in de plansituatie is weergegeven in Figuur 2-4. De belangrijkste wijziging is de ontvlechting van het treinverkeer op de diverse corridors. Verder vindt er in de plansituatie alleen nog incidenteel goederenvervoer plaats op de corridors Amersfoort – Utrecht, Rotterdam – Utrecht en Utrecht – Arnhem, zie ook Tabel 2-3.

² Van diverse nieuwbouwplannen zijn de exacte constructiegegevens niet beschikbaar. In dat geval is gerekend met worst-case constructiegegevens (maximale bouwhoogte, maximale vloeroverspanningen).



Figuur 2-4 Lijnvoeringsschema in plansituatie

2.3.3. Taludgeometrie

Door de uitbreiding van het aantal sporen, de realisatie van de Uithoflijn en de bouw van de parkeergarage bij de halte Vaartsche Rijn (allen realisaties in het kader van het project *Sporen in Utrecht*), wijzigt op een aantal locaties de vorm van het talud. Deze wijziging in taludvorm heeft invloed op de trillingssterkte in de woningen op die locaties. Bij de locatie Engelsmanplaat is daarnaast een ondergrondse, trillingsreducerende constructie gerealiseerd in het kader van het project *Sporen in Utrecht*.

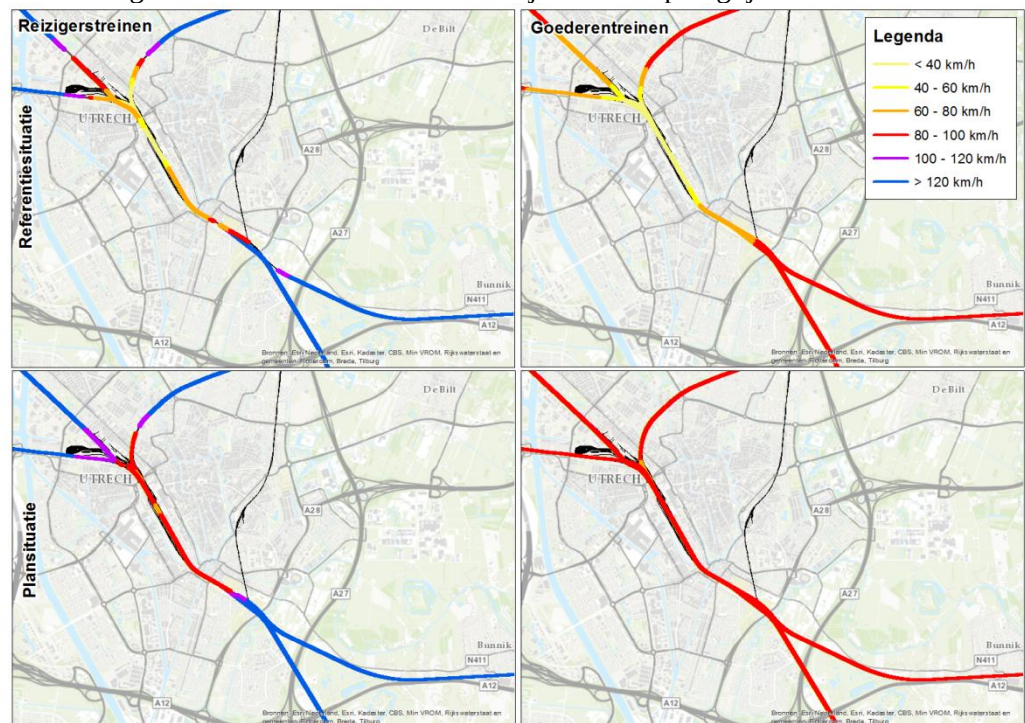
In het trillingsonderzoek wordt met behulp van Geovib-modellen de invloed van deze taludwijzigingen onderzocht. De bodemopbouw wordt gemodelleerd met behulp van sonderingen. Voor de taludgeometrie wordt gebruik gemaakt van beschikbare dwarsdoorsneden. Voor locaties waar dwarsprofielen niet beschikbaar zijn wordt gebruik gemaakt van de hoogtekaarten van het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN, versie 2).

2.3.4. Treinsnelheid

Ook voor de plansituatie zijn de snelheden van de treinen per locatie bepaald aan de hand van de seinplaatsing. De maximale snelheid van goederen- en reizigerstreinen in de referentie- en plansituatie is weergegeven in Figuur 2-5. In deze figuur vallen de volgende projecteffecten op:

- Reizigerstreinen remmen na realisatie van het project pas vlak voor het binnenkomen van het station. Hierdoor verbeteren de opvolgtijden tussen opeenvolgende treinen sterk. Dit wordt onder meer mogelijk gemaakt door het verwijderen van een groot aantal wissels.
De grootste wijzigingen voor reizigerstreinen vinden dan ook plaats in de onmiddellijke nabijheid van het station;
- Goederentreinen rijden met hogere snelheid door Utrecht Centraal. De

goederentreinen vanuit de richtingen Rotterdam en Amsterdam behoeven niet meer af te remmen voor station Utrecht Centraal, treinen vanuit het zuiden en vanuit Amersfoort moeten nog wel afremmen, maar kunnen ook met een hogere snelheid door Utrecht Centraal passeren. Vooral de hogere snelheid van de goederentreinen leidt tot aanzienlijk kortere opvolgtijden van de treinen.



Figuur 2-5 Maximale snelheden voor reizigers- (links) en goederentreinen (rechts) in de referentie- (boven) en plansituatie (onder)

2.3.5. Treinintensiteit

De treinintensiteiten in de referentie-, autonome groei- en plansituatie zijn weergegeven in Tabel 2-3. In deze tabel staat *Referentie* voor referentiesituatie en *Plan* voor plansituatie. De treinaantallen zijn gemiddeld over het jaar, en gebaseerd op de PHS prognose voor de plansituatie.

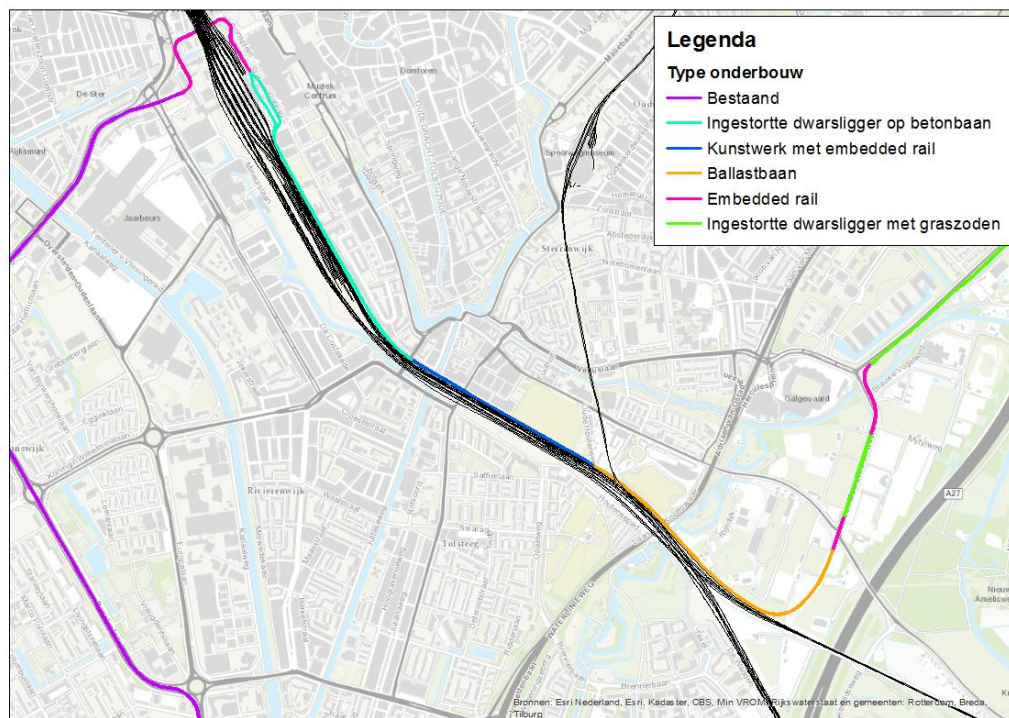
Tabel 2-3 Treinaantallen per uur per richting

Treintype en verbinding	Dag (7:00 – 19:00)		Avond (19:00 – 23:00)		Nacht (23:00 – 7:00)	
	Referentie	Plan	Referentie	Plan	Referentie	Plan
Intercity Amsterdam-Arnhem	4.00	6.00	3.50	6.00	1.00	1.93
Intercity Arnhem-Amsterdam	4.00	6.00	3.50	6.00	1.00	1.93
Intercity Amsterdam-Eindhoven	4.00	6.00	2.75	6.00	0.50	1.93
Intercity Eindhoven-Amsterdam	4.00	6.00	2.75	6.00	0.50	1.93
Sprinter Breukelen-Veenendaal Centrum	4.00	6.00	2.50	6.00	1.00	1.93
Sprinter Veenendaal Centrum-Breukelen	4.00	6.00	2.50	6.00	1.00	1.93
Sprinter Woerden-Geldermalsen	4.00	6.00	2.50	6.00	1.38	1.93
Sprinter Geldermalsen-Woerden	4.00	6.00	2.50	6.00	1.38	1.93
Intercity Leiden-Utrecht	2.00	2.00	2.00	2.00	0.75	0.64
Intercity Utrecht -Leiden	2.00	2.00	2.00	2.00	0.75	0.64
Intercity Rotterdam- Utrecht	4.00	4.00	3.50	4.00	0.75	1.29
Intercity Utrecht -Rotterdam	4.00	4.00	3.50	4.00	0.75	1.29
Intercity Utrecht -Amersfoort	4.33	4.00	3.50	4.00	1.00	1.29

Intercity Amersfoort- Utrecht	4.33	4.00	3.50	4.00	1.00	1.29
Intercity Den Haag- Utrecht	4.00	4.00	3.50	4.00	0.75	1.29
Intercity Utrecht -Den Haag	4.00	4.00	3.50	4.00	0.75	1.29
Sprinter Den Haag- Utrecht	2.00	-.--	2.00	-.--	0.75	-.--
Sprinter Utrecht -Den Haag	2.00	-.--	2.00	-.--	0.75	-.--
Sprinter Amersfoort- Utrecht	2.00	4.00	2.00	4.00	0.50	1.29
Sprinter Utrecht -Amersfoort	2.00	4.00	2.00	4.00	0.50	1.29
Intercity Hilversum - Utrecht	2.00	2.00	1.00	2.00	0.50	0.64
Intercity Utrecht - Hilversum	2.00	2.00	1.00	2.00	0.50	0.64
Sprinter Hilversum - Utrecht	2.00	4.00	2.00	4.00	0.88	1.29
Sprinter Utrecht -Hilversum	2.00	4.00	2.00	4.00	0.88	1.29
Goederen Amersfoort- Utrecht	0.11	0.14	0.29	0.15	0.12	0.09
Goederen Utrecht -Amersfoort	0.11	0.14	0.29	0.15	0.12	0.09
Goederen Rotterdam- Utrecht	0.44	0.14	0.48	0.15	0.35	0.09
Goederen Utrecht -Rotterdam	0.44	0.14	0.48	0.15	0.35	0.09
Goederen Amsterdam- Utrecht	1.02	0.70	1.06	0.76	0.56	0.48
Goederen Utrecht -Amsterdam	1.02	0.70	1.06	0.76	0.56	0.48
Goederen Utrecht -Eindhoven	0.89	0.84	1.08	0.91	0.61	0.57
Goederen Eindhoven- Utrecht	0.89	0.84	1.08	0.91	0.61	0.57
Goederen Utrecht -Arnhem	0.68	0.14	0.75	0.15	0.42	0.09
Goederen Arnhem- Utrecht	0.68	0.14	0.75	0.15	0.42	0.09
ICE Amsterdam-Arnhem	0.50	1.00	0.25	1.00	0.00	0.32
ICE Arnhem-Amsterdam	0.42	1.00	0.50	1.00	0.00	0.32

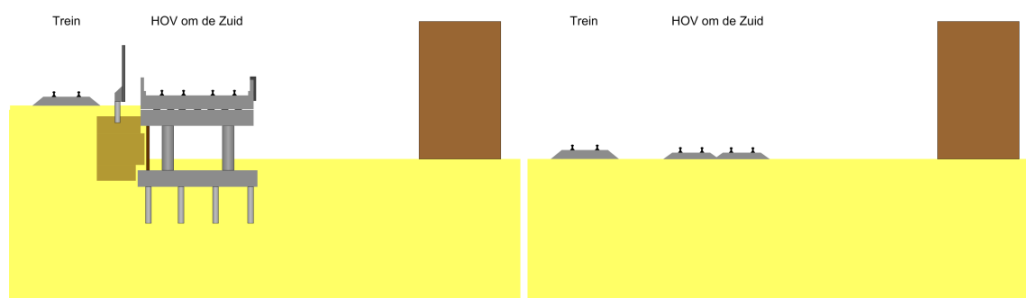
2.3.6. Invloed Uithoflijn

De bestaande tramlijn Nieuwegein – Utrecht doorgetrokken naar De Uithof, de zogenaamde Uithoflijn. De Uithoflijn loopt in het huidige onderzoeksgebied parallel aan het spoor en ligt aan de oostzijde van het spoortracé, zie ook Figuur 2-6. Voor de locaties waar de Uithoflijn op maaiveld ligt, zie Figuur 2-6, heeft de infrastructuur (aardebaan of betonbaan) van de Uithoflijn geen invloed op de trillingssterkte van de treinen.



Figuur 2-6 Type onderbouw Uithoflijn

Tussen de Bleekstraat en de Laan van Soestbergen ligt de Uithoflijn op een viaduct op poeren, parallel aan de Vaartsestraat en Pelikaanstraat. De poeren rusten op een ondiepe fundering vlak onder maaiveld, deze fundering bevindt zich op palen, zie Figuur 2-7. Gezien het hoge spoortalud, de ondiepe fundering en de palen daaronder, zal de invloed van de infrastructuur van de Uithoflijn op de trillingssterkte van treinen verwaarloosbaar zijn. De ondiepe fundering schermt de trillingen niet of nauwelijks af. De palen hebben geen invloed op de trillingssterkte van de treinen. De infrastructuur van de Uithoflijn heeft geen negatief (versterkend) effect op de trillingssterkte ten gevolge van het treinverkeer.



Figuur 2-7 Karakteristieke doorsnede Uithoflijn op kunstwerk (Vaartsestraat, Pelikaanstraat, links) en op maaiveld (Nicolaas Beetsstraat, Oude Houtensepad, Rijnijk, rechts)

Op basis van bovenstaande overwegingen is het ontwerp van de Uithoflijn niet meegenomen in de uitgevoerde berekeningen. Als er enig effect is van de infrastructuur van de Uithoflijn op de trillingssterkte van de treinen, dan zal dit effect positief zijn (lagere trillingen). De aanpassingen die aan het spoortalud worden

gemaakt om de Uithoflijn te kunnen realiseren (zoals damwanden en geogrids) zijn meegenomen in de berekeningen, omdat deze wijzigingen invloed hebben op de trillingssterkte van treinen.

3 Opzet trillingsonderzoek

Dit trillingsonderzoek bestaat uit twee onderdelen:

- Onderzoek naar trillingshinder tijdens de exploitatiefase ten behoeve van het (O)TB DSSU. In dit deel van het onderzoek worden alle gebouwen in een zone van 500 meter rond het spoor beoordeeld op het vigerende beoordelingskader, de BTS;
- Onderzoek naar trillingsschade tijdens de realisatiefase. Hierbij wordt voor gebouwen in de nabijheid van bouwwerkzaamheden een beoordeling uitgevoerd op de SBR A-richtlijn.

In dit hoofdstuk wordt de voor beide onderzoeken gevolgde aanpak nader toegelicht.

3.1 Onderzoek naar trillingshinder

Ten behoeve van het onderzoek naar trillingshinder worden verschillende stappen doorlopen. De stappen hebben een toenemende nauwkeurigheid, waarbij in elke volgende stap de nauwkeurigheid groter wordt. Op deze manier wordt alleen verder onderzoek gedaan op een locatie wanneer dat nodig is, de zogenaamde zeefmethode.

De volgende stappen worden achtereenvolgens doorlopen:

1. Stap 1: inventarisatie van locaties waar mogelijk trillingshinder – conform de definities van de BTS – kan optreden met behulp van een globale berekening in het trillingsmodel VibraDyna³;
2. Stap 2: verfijning van het onderzoek door gebruik te maken van valproeven⁴, maaiveldmetingen⁵ en gebouwgegevens – zoals bouwjaar, afmetingen, bouwstijl en bouwhoogte – middels een nauwkeurige berekening in VibraDyna;
3. Stap 3: uitvoeren van trillingsmetingen en maken van nauwkeurige trillingsprognoses voor mogelijke knelpuntlocaties;
4. Stap 4: ontwerpen van trillingsmaatregelen.

Bovengenoemde vier stappen worden in de volgende subparagrafen nader toegelicht.

3.1.1. Stap 1: Inventarisatie van trillingsgevoelige locaties

Om een goede voorspelling te kunnen maken van de trillingssituatie, is door Movares het rekenmodel VibraDyna ontwikkeld op basis van een groot aantal metingen die in geheel Nederland zijn uitgevoerd, aangevuld met gegevens uit modelberekeningen. Met dit model wordt voor het gehele onderzoeksgebied de trillingssituatie in beeld gebracht. Het model wordt toegepast op een zone van 500 meter aan weerszijden van de sporen.

Alle aannames in het model zijn worst-case⁶ (conservatief). Hierdoor is de door het model geprognosticeerde trillingssituatie per gebouw een bovengrens. In veel gebouwen zal de trillingssterkte in werkelijkheid lager zijn dan de waarde die uit het

³ VibraDyna is een door Movares ontwikkeld rekenmodel, gebaseerd op empirische formules, modelberekeningen en een groot aantal metingen, dat de trillingen van weg- en railverkeer berekent. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van versie 1.4.

⁴ Valproeven zijn metingen waarbij met behulp van een kunstmatige trillingsbron trillingen worden gegenereerd, waarna deze op verschillende afstanden tot de trillingsbron worden gemeten. Met behulp van dit type metingen kunnen de bodemeigenschappen worden bepaald. Deze bodemeigenschappen zijn van belang voor de uitdamping van de trillingen met de afstand tot het spoor.

⁵ Maaiveldmetingen: bij deze metingen worden de trillingen van de passerende treinen op een vaste referentieafstand van 20 meter gemeten op verschillende locaties langs het tracé.

⁶ Het model rekent met bovengrenzen. Dat betekent dat het model eerder een overschrijding van de richtlijn aangeeft dan in werkelijkheid doorgaans zal optreden. De door het model berekende trillingssituatie is de maximale trillingssituatie op een bepaalde locatie, zie ook Bijlage I.

model volgt. Door deze aanpak wordt voorkomen dat bepaalde gebouwen waar in werkelijkheid wel trillingshinder optreedt, niet worden meegenomen in de vervolgstappen van het trillingsonderzoek. Anderzijds resulteert dit wel in een overschatting van het aantal gebouwen met een overschrijding van het beoordelingskader.

Het model wordt toegepast op een zone van 500 meter rondom de sporen. Op grotere afstand tot het spoor is geen significante toename in trillingshinder te verwachten en zijn de trillingssterktes lager dan de streefwaarden uit de BTS. Trillingen zijn op dergelijke grote afstanden doorgaans niet voelbaar.

Met het model worden voor alle gebouwen in het onderzoeksgebied in de referentiesituatie, de autonome groeisituatie en de plansituatie de trillingssterkte en trillingsintensiteit bepaald. Deze stap van het onderzoek wordt in hoofdstuk 5 beschreven.

3.1.2. *Stap 2: Indicatieve trillingsmeting en empirische prognose*

Op locaties uit het stap 1-onderzoek waar (een toename van) trillingshinder niet valt uit te sluiten, is nader onderzoek verricht. De volgende metingen zijn uitgevoerd:

- Trillingsmetingen aan treinpassages op maaiveld loodrecht op het spoor, om de bronsterkte van de verschillende passerende treinen te bepalen;
- Valproeven om de afname van de trillingen met de afstand tot de trillingsbron van de lokale bodem vast te stellen (de bodemeigenschappen).

De resultaten van deze metingen zijn gebruikt als invoer in een nauwkeurige berekening in *VibraDyna*, waar vervolgens een nauwkeurige berekening is uitgevoerd met locatie- en frequentieafhankelijke parameters. In de berekeningen wordt rekening gehouden met de eigenschappen van de bebouwing, zoals de afmetingen, de hoogte en het type vloeren.

Door de modelresultaten in de referentie- en plansituatie te beoordelen op de BTS, wordt zichtbaar voor welke locaties er een kans is op overschrijden van het beoordelingskader. Deze stap wordt beschreven in hoofdstuk 6.

3.1.3. *Stap 3: Nauwkeurige trillingsprognoses in woningen*

In de derde stap van het trillingsonderzoek worden alleen die locaties beschouwd waar op basis van de resultaten van stap 2 (een toename van) trillingshinder waarschijnlijk is. Voor deze stap wordt gebruik gemaakt van metingen in gebouwen.

Na opdeling van het onderzoeksgebied in subgebieden, wordt per gebied een aantal representatieve woningen (qua ligging, type en bouwstijl) geselecteerd waarin metingen worden verricht.

Vanuit de metingen wordt vervolgens per treinpassage een prognose gemaakt voor de toekomstige trillingssterkte, aan de hand van de parameters die wijzigen. De invloed van wijzigingen in talud- en baanopbouw worden met behulp van modellen bepaald.

Het resultaat van deze stap is een trillingsprognose die kan worden beschouwd als de meest nauwkeurige prognose die met de thans beschikbare middelen mogelijk is. Indien er na deze stap nog steeds locaties overblijven waar (een toename van) trillingshinder waarschijnlijk is, dan zullen er voor deze locaties in stap 4 maatregelen worden beschouwd. De resultaten van de metingen en prognoses in gebouwen is in hoofdstuk 7 beschreven.

3.1.4. *Stap 4: Ontwerpen
van maatregelen en
afwegen van
varianten*

Voor elke locatie die op basis van de resultaten uit de voorgaande stap niet voldoet aan de BTS worden maatregelen ontworpen en doorgerekend. Vervolgens worden de kosten van de maatregelen geëvalueerd. Bij de afweging van maatregelen wordt aangegeven of bepaalde maatregelen kosteneffectief zijn, en daarmee mogelijk doelmatig. Deze laatste stap van het trillingsonderzoek ten behoeve van het OTB is in hoofdstuk 8 beschreven.

3.2 *Onderzoek naar
trillingsschade*

Ten behoeve van het onderzoek naar trillingsschade zijn 3D eindige elementen modellen opgesteld van de bouwwerkzaamheden die aanleiding kunnen geven tot trillingsschade. Met behulp van deze modellen is geanalyseerd op welke afstand mogelijk schade is te verwachten. Voor de gebouwen die binnen deze afstanden vallen, wordt geadviseerd om een vooropname uit te voeren. Het onderzoek naar trillingsschade wordt beschreven in hoofdstuk 9.

4 Beoordelingskader trillingshinder en schade

Treinverkeer, maar ook bouwwerkzaamheden en wegverkeer, kunnen aanleiding geven tot trillingen in gebouwen. Deze trillingen kunnen leiden tot hinder of schade. In het trillingsonderzoek ten behoeve van *DSSU* wordt zowel trillingshinder als trillingsschade beschouwd. De gehanteerde beoordelingsmethodiek voor zowel trillingshinder als voor trillingsschade wordt in dit hoofdstuk nader toegelicht.

4.1 Beoordeling trillingshinder

Tot op heden zijn richtlijnen voor trillingshinder nog niet vastgelegd in wetgeving, zoals dat bijvoorbeeld voor geluidhinder wel het geval is. Vooruitlopend op toekomstige wetgeving heeft het ministerie van Infrastructuur en Milieu in 2012 een *Beleidsregel Trillinghinder Spoor* (BTS) opgesteld, die een wijziging van en aanvulling op de eerder gebruikte SBR B-richtlijn is. In 2014 is een aangevulde versie van de BTS gepubliceerd. De BTS 2014 vult de SBR B-richtlijn met name aan op de volgende onderdelen:

1. De normstelling voor het al dan niet treffen van maatregelen. De BTS geeft aan wanneer het tracébesluit maatregelen dient te bevatten ter mitigatie van de trillinghinder die zal ontstaan als gevolg van de aanleg of wijziging van een spoorweg;
2. Een introductie van een kosteneffectiviteitscriterium. In dit kosteneffectiviteitscriterium wordt uitsluitend gegeven of bepaalde maatregelen, gezien de kosten, effectiviteit, milieu- en maatschappelijke impact en de mate van trillingshinder voldoende kosteneffectief zijn. In het tracébesluit wordt een richtbedrag van € 47.000 per woning met overschrijdingen genoemd. Voor kantoren wordt een bedrag van € 500 per medewerker aangehouden;
3. De trillingssterkte V_{max} wordt bepaald over een meetperiode van tenminste 1 week. Het resultaat is het maximale niveau in een week, vergelijkbaar met de grootte $V_{max,stat}$ van de SBR B-richtlijn. De meetmethode en de naverwerkingsmethode zijn gebaseerd op die van de SBR B-richtlijn, maar verder uitgebreid met het doel de reproduceerbaarheid van de metingen en berekeningen te vergroten. Deze methodiek is nauwkeurig beschreven in een memo van Level Acoustics⁷ en in Bijlage IV;
4. Introductie van een zogenaamde *R*-waarde, die een indicatie is van de reproduceerbaarheid van de meting. De *R*-waarde is uitgedrukt als een onzekerheidspercentage van de $V_{max, BTS}$. Gestreefd wordt naar een *R*-waarde van kleiner dan 10 procent;
5. Introductie van een zogenaamde *Q*-waarde, de verhouding tussen de trillingssterkte in de plan- en referentiesituatie⁸. Bij metingen met een hoge *R*-waarde wordt deze *Q*-waarde gecorrigeerd voor de lagere reproduceerbaarheid.

Trillingshinder wordt in dit onderzoek beoordeeld op de BTS. Een nadere omschrijving van het beoordelingskader is te vinden in Bijlage II.

4.2 Beoordeling trillingsschade

⁷ LA.131001a.M04

⁸ Voor nieuwbouwplannen bestaat er geen referentiesituatie, hier wordt beoordeeld op de BTS voor nieuwe situaties, zie ook Bijlage II.

De toetsing van trillingsschade vindt in Nederland vrijwel altijd plaats op basis van de SBR A-richtlijn, deze richtlijn beschrijft de meetmethodiek en toetsingscriteria voor trillingsschade. Ook van de SBR A-richtlijn is een omschrijving opgenomen in Bijlage II.

5 Stap 1 – Globaal trillingsonderzoek

5.1 Inleiding

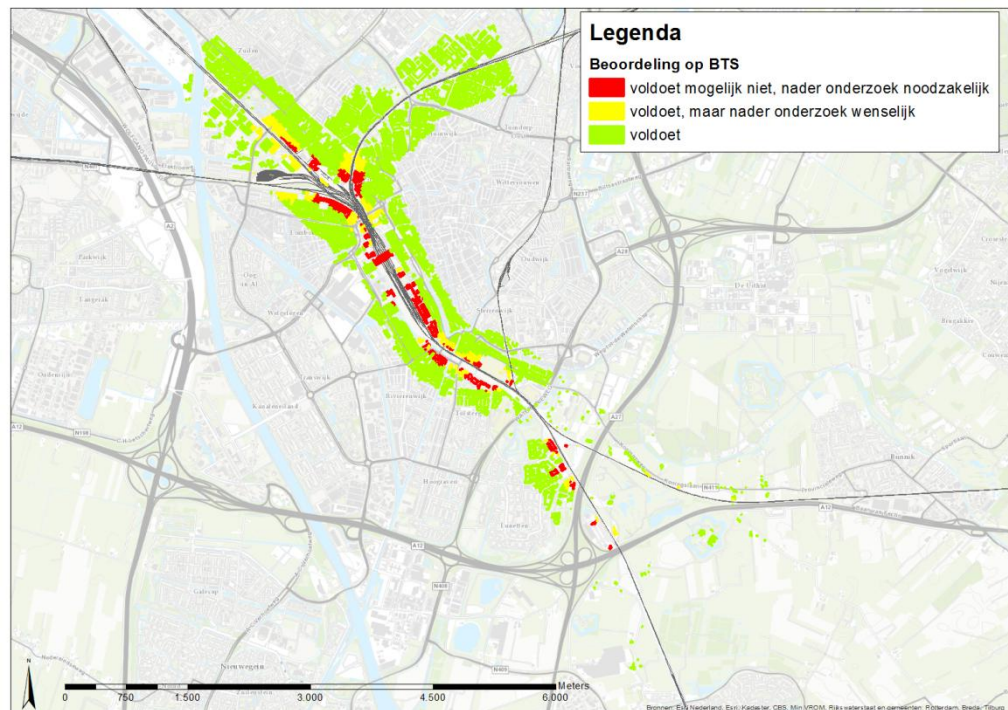
In de eerste stap van het onderzoek naar trillingshinder is de trillingssituatie in gebouwen op een globale manier bepaald. Er is een groot aantal factoren dat de trillingssterkte in een gebouw beïnvloedt. In deze eerste stap wordt een deel van deze factoren ingeschat op basis van *expert judgment* en langdurige ervaring met trillingshinder langs het spoor.

Het onderzoek in deze stap heeft nog een globaal karakter, met als doel om snel een predictie te maken van de trillingshinder op een willekeurige locatie langs het spoor. Omdat de analyse nog globaal is, zijn de aannames worstcase, zodat in ieder geval die locaties waar mogelijk hinder optreedt, worden meegenomen in de vervolgstappen.

5.2 Vergelijking trillingscontouren

Met behulp van VibraDyna is voor alle gebouwen binnen 500 meter van de sporen de trillingssterkte V_{max} , bepaald conform de BTS, en de trillingsintensiteit V_{per} bepaald. De resultaten zijn weergegeven in Bijlage V.

Voor de inventarisatie van knelpuntlocaties worden de waarden van V_{max} in de referentie- en plansituatie en de waarde van V_{per} in de plansituatie voor elk gebouw beoordeeld op de BTS. Het resultaat van deze beoordeling is weergegeven in Figuur 5-1. Meer gedetailleerde kaarten zijn te vinden in Bijlage VI.



Figuur 5-1 Beoordeling van de resultaten van het globale model

5.3 Knelpuntlocaties

Op basis van de resultaten zoals afgebeeld in Figuur 5-1 volgt een aantal knelpuntlocaties. Globaal beschouwd leidt het project DSSU met name tot overschrijdingen in de nabijheid van station Utrecht Centraal, omdat de toename in rijsnelheid daar het grootst is. In verder van het station gelegen subgebieden zijn ook overschrijdingen van het beoordelingskader mogelijk, dit komt door de hoge

trillingsintensiteit die in deze woningen kan optreden.

De gebieden waarin gebouwen zijn te vinden die mogelijk niet voldoen aan het beoordelingskader, zijn in Tabel 5-1 rood weergegeven. Daarnaast zijn er nog subgebieden waar zich gebouwen bevinden waar een overschrijding van het beoordelingskader niet is uit te sluiten, deze gebouwen zijn geel gearceerd. Beide types subgebieden worden in stap 2 nader onderzocht.

Tabel 5-1 Resultaten stap 1

Nr	Naam subgebied in trillingsonderzoek	Voldoet aan BTS
		Stap 1
1	Cremerstraat	
2	Westplein	
3	Raadwijk / Hendrik Tollensstraat	
4	Tolsteegplantsoen	
5	Oude Houtensepad zuid	
6	Engelsmanplaat	
7	Nieuwe Houtenseweg noord / De Wadden	
8	Oud Wulfseweg	
9	Nieuwe Houtenseweg zuid / Mereveldseweg	
10	Houtensepad	
11	Marsdijk	
12	Koningsweg	
13	Rijndijk	
14	Oude Houtensepad noord	
15	Pelikaanstraat	
16	Vaartsestraat	
17	Nicolaas Beetsstraat	
18	Daalseplein	
19	Spijkerstraat	
20	Pijlsweerd	
21	Vecht zuidzijde	
22	Tuindorp	
23	Taag- en Rubicondreef	
24	Vecht noordzijde	
25	Ondiep	
26	2 ^e Daalsebuurt	
27	Julianapark en Elinkwijk	
28	Vlampijpstraat	
29	Cartesiusweg	

Kleur	Omschrijving
	Voldoet mogelijk niet aan BTS, nader onderzoek noodzakelijk
	Voldoet aan BTS, nader onderzoek wenselijk
	Voldoet aan BTS

In stap 1 wordt conservatief beoordeeld of een locatie voor nader onderzoek in aanmerking komt, omdat er nog geen rekening wordt gehouden met een aantal effecten die invloed hebben op de trillingssituatie. Geel gemarkeerde locaties zijn locaties waar nog een kans op overschrijden is (zie ook Bijlage I). Ook deze locaties worden nader

onderzocht in stap 2 van het trillingsonderzoek. Deze tweede stap wordt beschreven in het volgende hoofdstuk.

6 Stap 2 – Nauwkeurig, locatiespecifiek trillingsonderzoek

6.1 Inleiding

In de tweede stap van het trillingsonderzoek wordt de trillingssituatie op een meer gedetailleerde wijze bepaald. De berekening wordt opnieuw uitgevoerd met behulp van *VibraDyna*, maar nu wordt gebruik gemaakt van een nauwkeurige berekening, waarbij gebruik wordt gemaakt van aanvullende informatie. Ten opzichte van de eerste stap van het trillingsonderzoek wordt een aantal parameters nu wel meegenomen:

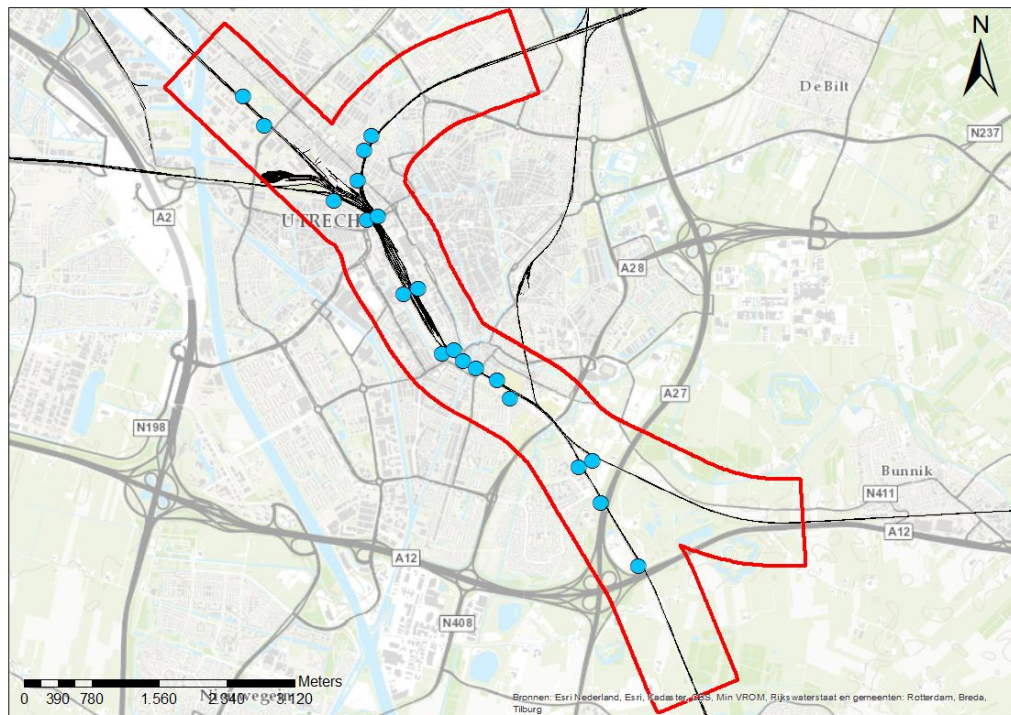
1. Er wordt gebruik gemaakt van de resultaten van valproeven en maaiveldmetingen aan treinpassages, zodat de bodemeigenschappen en de trillingssterktes op maaiveld nauwkeuriger kunnen worden meegenomen;
2. De eigenschappen van de bebouwing (zoals bouwjaar, bouwhoogte en bouwstijl) worden meegenomen;
3. De variatie in terreinhoogte wordt meegenomen;
4. De berekening wordt frequentieafhankelijk uitgevoerd. Hiermee wordt de nauwkeurigheid van de prognoses aanzienlijk verbeterd.

Op basis van de resultaten uit het globale trillingsonderzoek volgden een aantal knelpuntlocaties. Op deze locaties zijn additionele metingen verricht. Ter verificatie van het model van stap 1 is daarnaast ook op andere locaties een nader onderzoek uitgevoerd. Het type metingen is voor elk subgebied weergegeven in Tabel 6-1, zie ook Figuur 6-1. Grijs gearceerde vakken in Tabel 6-1 geven aan dat er in stap 2 geen onderzoeken zijn uitgevoerd op deze locatie, omdat er op omliggende locaties al onderzoek is verricht of al trillingsmetingen in gebouwen zijn uitgevoerd in eerdere onderzoeken.

Tabel 6-1 *Uitgevoerde metingen in stap 2*

Nr	Naam subgebied in trillingsonderzoek	Uitgevoerd onderzoek
1	Cremerstraat	Valproef en maaiveldmeting
2	Westplein	Onderzoek uitgevoerd op omliggende locaties
3	Raadwijk / Hendrik Tollensstraat	Valproef en maaiveldmeting
4	Tolsteegplantsoen	Valproef en maaiveldmeting
6	Engelsmanplaat	Valproef en maaiveldmeting
7	Nieuwe Houtenseweg noord / De Wadden	Valproef en maaiveldmeting
9	Nieuwe Houtenseweg zuid / Mereveldseweg	Valproef en maaiveldmeting
10	Houtensepad	Valproef
12	Koningsweg	Onderzoek uitgevoerd op omliggende locaties
14	Oude Houtensepad noord	Onderzoek uitgevoerd op omliggende locaties
15	Pelikaanstraat	Valproef en maaiveldmeting
16	Vaartsestraat	Valproef en maaiveldmeting
17	Nicolaas Beetsstraat	Valproef en maaiveldmeting
18	Daalseplein	Onderzoek uitgevoerd op omliggende locaties
19	Spijkerstraat	Valproef en maaiveldmeting
20	Pijlsweerd	Onderzoek uitgevoerd op omliggende locaties
25	Ondiep	Valproef en maaiveldmeting
26	2 ^e Daalsebuurt	Onderzoek uitgevoerd op omliggende locaties
27	Julianapark en Elinkwijk	Valproef en maaiveldmeting
28	Vlampijpstraat	Valproef en maaiveldmeting
29	Cartesiusweg	Onderzoek uitgevoerd op omliggende locaties

Op locaties waar geen onderzoeken zijn uitgevoerd, wordt geïnterpoleerd vanuit nabijgelegen locaties. Omdat de bodem in Utrecht vrij uniform is, uitgezonderd het gebied rond de Waterlinieweg, zorgen deze interpolaties niet voor een significante toename van de onzekerheid. De resultaten van de valproeven en maaiveldmetingen zijn opgenomen in Bijlage III.

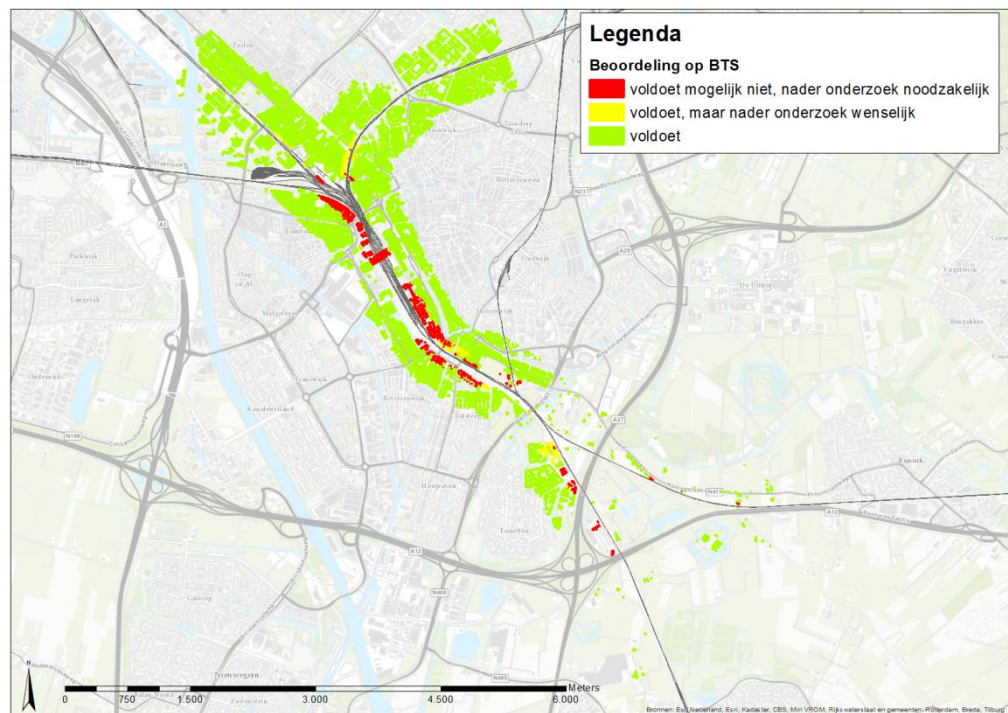


Figuur 6-1 Onderzoekslocaties t.b.v. stap 2

6.2 Vergelijking trillingscontouren

Met behulp van VibraDyna zijn voor alle gebouwen binnen 500 meter van de sporen de trillingssterkte V_{max} bepaald conform de BTS, en de trillingsintensiteit V_{per} bepaald. De resultaten zijn weergegeven in Bijlage VI.

Voor de inventarisatie van knelpuntlocaties worden de waarden van V_{max} in de referentie- en plansituatie en de waarde van V_{per} in de plansituatie voor elk gebouw beoordeeld op de BTS. Het resultaat van deze beoordeling is weergegeven in Figuur 6-2. Meer gedetailleerde kaarten zijn te vinden in Bijlage V.



Figuur 6-2 Beoordeling van de resultaten van het nauwkeurige model

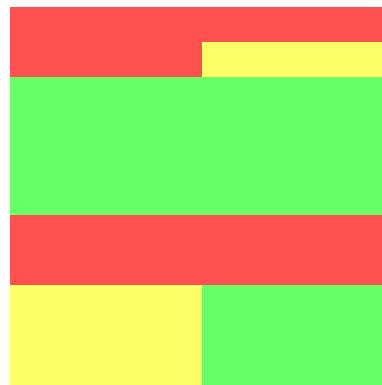
6.3 Knelpuntlocaties

Op basis van de resultaten zoals afgebeeld in Figuur 6-2 volgt een aantal knelpuntlocaties in de plansituatie. De gebieden waarin gebouwen zijn te vinden die mogelijk niet voldoen, zijn in Tabel 6-2 rood weergegeven. Deze gebieden worden in stap 3 nader onderzocht door middel van locatiespecifiek onderzoek (metingen in gebouwen).

Tabel 6-2 Resultaten stap 1 en 2

Nr	Naam subgebied in trillingsonderzoek	Voldoet aan BTS	
		Stap 1	Stap 2
1	Cremersstraat	Red	
2	Westplein		
3	Raadhijk / Hendrik Tollensstraat		
4	Tolsteegplantsoen		
5	Oude Houtensepad zuid	Green	
6	Engelsmanplaat		
7	Nieuwe Houtenseweg noord / De Wadden	Red	
8	Oud Wulfseweg		
9	Nieuwe Houtenseweg zuid / Mereveldseweg	Red	
10	Houtensepad		
11	Marsdijk	Green	
12	Koningsweg		
13	Rijndijk	Green	
14	Oude Houtensepad noord		
15	Pelikaanstraat	Red	
16	Vaartsestraat		
17	Nicolaas Beetsstraat		
18	Daalseplein		

19	Spijkerstraat
20	Pijlsweerd
21	Vecht zuidzijde
22	Tuindorp
23	Taag- en Rubicondreef
24	Vecht noordzijde
25	Ondiep
26	2 ^e Daalsebuurt
27	Julianapark en Elinkwijk
28	Vlampijpstraat
29	Cartesiusweg



Kleur	Omschrijving
	Voldoet mogelijk niet aan BTS, nader onderzoek noodzakelijk
	Voldoet aan BTS, nader onderzoek wenselijk
	Voldoet aan BTS

Het model dat in stap 2 wordt gebruikt heeft een betrouwbaarheid van 95 procent. Dat betekent dat in maximaal 5 procent van de gebouwen een hogere trillingssterkte of trillingsintensiteit optreedt dan het model berekent.

Omdat ook het nauwkeurige model bepaalde onzekerheden kent, worden ook locaties met een kleine kans op een overschrijding (in Tabel 6-2 geel gearceerde gebieden) meegenomen in het vervolgonderzoek van stap 3.

Verschillen tussen stap 1 en 2 worden veroorzaakt door (een combinatie van) de volgende aspecten:

1. Het model van stap 2 is nauwkeuriger dan het model van stap 1. Zo worden de werkelijke bodemeigenschappen meegenomen in stap 2 en worden veel parameters frequentieafhankelijk meegenomen;
2. In stap 2 worden gebouweigenschappen meegenomen. Nieuwe gebouwen zijn vaak steviger gebouwd en hebben betonnen vloeren, waardoor trillingen vaak minder sterk zijn dan in oude gebouwen met houten vloeren;
3. In stap 2 wordt de taludgeometrie meegenomen. Hierdoor is bijvoorbeeld de locatie Engelsmanplaat groen in plaats van geel. Op deze locatie is een Ondergrondse Trillingsreducerende Constructie (OTC) gerealiseerd die de trillingssterkte reduceert. In het globale onderzoek van stap 1 wordt deze OTC niet meegenomen.

7 Stap 3 – Onderzoek op knelpuntlocaties

In de derde stap van het trillingsonderzoek zijn trillingsmetingen uitgevoerd in gebouwen in de deelgebieden waar op basis van stap 2 niet wordt voldaan aan de streefwaarden met betrekking tot trillingshinder.

Ten opzichte van de tweede stap is het proces nog nauwkeuriger gemaakt, onder meer doordat in stap 3 gebruik wordt gemaakt van metingen in gebouwen. De volgende aspecten van de berekening worden in deze derde stap nauwkeuriger uitgevoerd:

1. Er worden metingen in representatieve⁹ gebouwen verricht, verdeeld over het subgebied. Vanuit deze metingen worden prognoses gemaakt voor de toekomst. Omdat er alleen wordt gerekend met toeslagen¹⁰, neemt de betrouwbaarheid aanzienlijk toe. Immers, de huidige situatie wordt betrouwbaar vastgesteld door middel van representatieve metingen, de toekomstige situatie wordt berekend vanuit de huidige situatie door gebruik te maken van genoemde toeslagen. Hoe beperkter het aantal wijzigingen op een locatie, hoe nauwkeuriger de toekomstige situatie kan worden vastgesteld;
2. Er wordt niet langer gerekend met verhoudingen tussen treinen, zoals in de modelberekeningen, maar met werkelijke treinpassages. Dit vergroot de betrouwbaarheid van de berekeningen en prognoses;
3. Er wordt frequentieafhankelijk gecorrigeerd voor een eventuele verandering in baanopbouw (dive-unders, zettingsvrije platen) en taludgeometrie, aan de hand van 3D eindige elementenmodellen.

Op basis van de nauwkeurige modelberekeningen uit stap 2 volgt een aantal knelpuntlocaties. Op deze locaties is een stap 3-onderzoek uitgevoerd. Ter verificatie van de modellen van stap 1 en 2 is daarnaast ook op andere locaties een stap 3-onderzoek uitgevoerd. De meetlocaties per subgebied zijn weergegeven in Tabel 7-1, zie ook Figuur 7-1.

Tabel 7-1 Uitgevoerde onderzoeken in stap 3

Nr	Naam subgebied in trillingsonderzoek	Uitgevoerd onderzoek
1	Cremerstraat	Cremerstraat 96 Cremerstraat 38 J.J.A Goeverneurstraat 47
2	Westplein	Jaarbeursplein 22 Stadsplateau 1
3	Raadwijk / Hendrik Tollensstraat	Jaarbeursplein 6 Hendrik Tollensstraat 1 en 5 Raadwijk 2 bis A
4	Tolsteegplantsoen	Tolsteegplantsoen 10-3 Tolsteegplantsoen 45-3 Saffierlaan 660 Saffierlaan 770 Kariboestraat 49

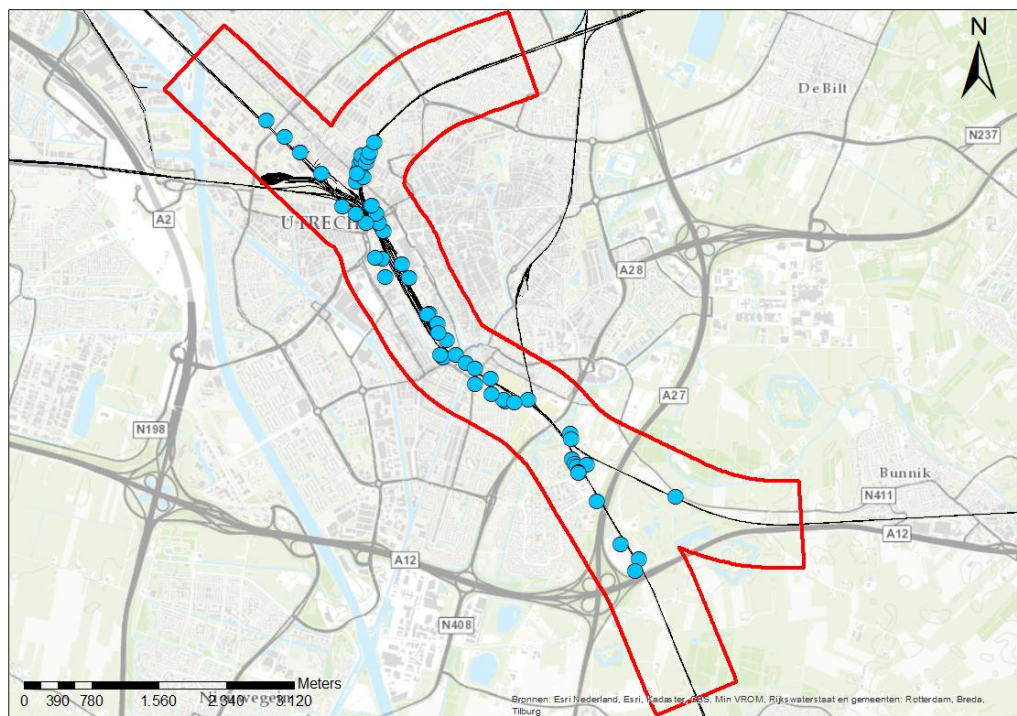
⁹ Representatieve gebouwen zijn geselecteerd op basis van afstand tot het spoor en gebouwkenmerken, zoals bouwperiode, gebouwfmetingen en constructiewijze.

¹⁰ Voorbeelden van deze toeslagen zijn: toeslag voor een snelheidswijziging, voor een wijziging in geometrie van de spoordijk, voor een andere afstand tot het spoor of een nieuw te realiseren wissel.

6	Engelsmanplaat	Engelsmanplaat 18 Engelsmanplaat 36 Engelsmanplaat 48
7	Nieuwe Houtenseweg noord / De Wadden	De Wadden 87 De Wadden 99 Nieuwe Houtenseweg 2
9	Nieuwe Houtenseweg zuid / Mereveldseweg	Nieuwe Houtenseweg 27 Nieuwe Houtenseweg 55 Mereveldseweg 15
10	Houtensepad	Houtensepad 200
12	Koningsweg	Koningsweg 187
13	Rijndijk	Rijndijk 27 Rijndijk 23
14	Oude Houtensepad noord	Oude Houtensepad 76
15	Pelikaanstraat	Pelikaanstraat 40 bis Pelikaanstraat 9
16	Vaartsestraat	Vaartsestraat 224 Vaartsestraat 176
17	Nicolaas Beetsstraat	Arthur van Schendelstraat 670 Arthur van Schendelstraat 623 Arthur van Schendelstraat 203 Nicolaas Beetsstraat 222 Nicolaas Beetsstraat 212 Laan van Puntenburg 100 Katreinetoren
18	Daalseplein	Leidseveer 10 Daalseplein 101
19	Spijkerstraat	Wolfstraat 100 Spijkerstraat 26
20	Pijlsweerd	Turfstraat 39 Nieuwe Pijlsweerdstraat 23 Nieuwe Pijlsweerdstraat 63 Nieuwe Pijlsweerdstraat 83 Oudenoord 700
25	Ondiep	Leliestraat 55 Schutstraat 89 Schutstraat 64 Schutstraat 20 Amsterdamsestraatweg 171C Dijkstraat 20
26	2 ^e Daalsebuurt	Concordiastraat 67 Seringstraat 6 Seringstraat 136
27	Julianapark en Elinkwijk	Jan Overdijkstraat 39D

De resultaten van de metingen en berekeningen per meetlocatie zijn opgenomen in een afzonderlijk rapport¹¹.

¹¹ Boon, ir. P.M., *Trillingsonderzoek DSSU, Meetresultaten en predicties in gebouwen*, Movares Nederland B.V., D79-PBO-KA1400102, 31 juli 2014, versie 0.4



Figuur 7-1 Uitgevoerde metingen in gebouwen t.b.v. stap 3

7.1 Onderzoeksaanpak

In stap 3 wordt de volgende onderzoeksaanpak gehanteerd:

1. Er wordt een trillingsmeting uitgevoerd in gebouwen op representatieve locaties in de omgeving van gebouwen waar op basis van stap 2 een overschrijding van het beoordelingskader wordt verwacht. De meetlocaties zijn per subgebied geselecteerd op basis van ligging ten opzichte van het spoor, gebouwkenmerken en de afstand tot wissels en andere trillingsbronnen in de spoorbaan. De metingen hebben een meetduur van minimaal een week, op een aantal locaties is (aanzienlijk) langer gemeten.
Van elke meetlocatie zijn alle meetwaarden (zowel treinen als andere trillingsbronnen) geregistreerd en weergegeven in de subrapporten.
2. Voor de locaties aan de zuidzijde van het station wordt een berekening voor de referentiesituatie gemaakt (voor aanvang van de werkzaamheden ten behoeve van het project *Sporen in Utrecht*) aan de hand van de resultaten van de meting. Op het moment van de meting was het spoorgebruik, de rijsnelheid en de sporenlay-out namelijk al grotendeels gewijzigd. Per trein is een berekening gemaakt van de trillingssterkte in de referentiesituatie, aan de hand van de sporenlay-out in de referentie- en meetsituatie, de treinsnelheden in beide situaties, de taludgeometrie en de baanopbouw. Alle factoren met frequentieafhankelijkheid worden hierin frequentieafhankelijk verrekend;
3. Op analoge wijze als voor de referentiesituatie, wordt ook per trein voor de plansituatie een frequentieafhankelijke berekening uitgevoerd;
4. De resultaten van de prognose worden beoordeeld op de streefwaarden, die volgen uit de referentiesituatie (conform de BTS).

Het prognosemodel is beschreven in de volgende paragraaf.

7.2 Prognosemodel

De trillingssterkte op een bepaalde positie wordt bepaald door een groot aantal factoren. In stap 3 worden de volgende parameters onderscheiden:

- De treinsnelheid. De trillingssterkte schaaft exponentieel met de treinsnelheid;
- Invloed van wissels. De invloed van wissels neemt af met de afstand tot de wissels;
- Invloed van wijzigingen in taludgeometrie;
- Invloed van wijzigingen in spooropbouw, zoals de aanleg van bijvoorbeeld dive-unders;
- Wijzigingen in spoorligging (sporen komen verder weg of dichterbij te liggen).

Overige factoren, zoals aslast, afvering, wielonrondheid en overdracht in de woning tussen fundering en vloerniveau wijzigen niet bij dit project, doordat de momenteel gebruikte treintypes en de bebouwing na realisatie van het project niet gewijzigd zijn. De invloed hiervan is daarom niet meegenomen.

In stap 3 worden alle wijzigingen relatief (d.w.z. ten opzichte van de metingen) beschouwd, hierdoor is de betrouwbaarheid van de berekeningen groot. Alle wijzigingen worden als toeslagfactor ten opzichte van de gemeten waarde toegepast.

De invloed van de wijzigingen is onderzocht met behulp van metingen en modellen. Toeslagfactoren voor de uitdamping van de bodem, de geometrie- en baanopbouw wijziging zijn locatiespecifiek, alle overige factoren zijn universeel toepasbaar. In de volgende subparagrafen wordt de invloed van de factoren nader toegelicht.

7.2.1. Invloed wissels

De invloed van wissels is in kaart gebracht door op een groot aantal locaties waar wissels in de nabijheid liggen, de gemeten resultaten van sporen zonder wissels te vergelijken met de resultaten van sporen met wissels. Zodoende kan de invloed van wissels worden gemodelleerd als toeslag op het trillingssignaal van een doorgaande trein. Meer gedetailleerde informatie over de gebruikte toeslag per wissel is opgenomen in het rapport waarin de resultaten van de metingen en berekeningen worden beschreven¹². Overigens leidt het project DSSU tot een aanzienlijk geringer aantal wissels in het onderzoeksgebied.

7.2.2. Invloed spoorafstand

De overdracht van trillingen door de bodem kan worden beschreven met behulp van de Barkanvergelijking. De Barkanvergelijking wordt in stap 3 alleen gebruikt om relatieve veranderingen van sporen en wissels te beschrijven. Omdat het in vrijwel alle gevallen om kleine veranderingen gaat, heeft de Barkanvergelijking en de nauwkeurigheid van de parameters daarin slechts een beperkte invloed op het eindresultaat. De parameters in de Barkanvergelijking zijn bepaald uit valproeven en metingen aan treinpassages op maaiveldniveau. Meer gedetailleerde informatie over de gebruikte bodemparameters per meetlocatie is opgenomen in het rapport waarin de resultaten van de metingen en berekeningen worden beschreven¹³.

Naast de gewijzigde spoorafstand door de andere spoorligging, verandert voor een deel van de treinen de spoorafstand aanzienlijk doordat deze treinen in de toekomst op andere sporen gaan rijden. Bij het maken van de prognose voor de plansituatie wordt

¹² Boon, ir. P.M., *Trillingsonderzoek DSSU, Meetresultaten en predicties in gebouwen*, Movares Nederland B.V., D79-PBO-KA1400102, 31 juli 2014, versie 0.4

¹³ Idem

hierbij gebruik gemaakt van de lijnvoeringsschema's uit hoofdstuk 2. De positie van de sporen is weergegeven in de plankaarten in het (O)TB.

7.2.3. Invloed taludwijziging en spooropbouw

Op een aantal locaties wijzigt in de autonome groei- en plansituatie de vorm van het talud. Dat kan door een aantal wijzigingen:

1. Het verwijderen, aanpassen of aanbrengen van een spoorloot;
2. Het inbrengen van damwanden;
3. Het plaatsen van voorzieningen t.b.v. de *Uithoflijn*;
4. Het realiseren van een OTC of trillingsscherp bij Engelsmanplaat;
5. Wijziging van de taludhelling door het uitbreiden van de sporen.

Door deze wijzigingen kan de trillingssterkte in omliggende gebouwen wijzigen. De invloed van de taludwijzigingen is daarom doorgerekend met behulp van het 3D eindige elementen programma Geovib. Hierbij is een model gemaakt van de grondopbouw en de taludvorm in de verschillende situaties. Vervolgens wordt voor alle situaties het tertsbandspectrum van een treinpassage bepaald. De ratio van beide spectra bepaalt de toeslagfactor ten gevolge van de taludwijziging.

Bij de subgebieden Oude Houtensepad noord, Oude Houtensepad zuid, Rijndijk, Houtensepad en Engelsmanplaat zijn in het kader van het project *Sporen in Utrecht* dive-unders aangelegd voor treinen in de richting Houten en vice versa. Voor de ingang van de dive-unders komt een zettingsvrije plaat te liggen. Zettingsvrije platen en dive-unders hebben invloed op de trillingssterkte. Bij een spoor op maaiveldniveau heeft een zettingsvrije plaat doorgaans een reducerende invloed op de trillingssterkte. In uitzonderingsgevallen kan de trillingssterkte toenemen, bijvoorbeeld bij een verhoogd talud. In dat geval kunnen de palen onder een zettingsvrije plaat de trillingen dieper in de bodem introduceren, waardoor de reflecterende werking van het talud afneemt en de trillingen kunnen toenemen in een woning. Gezien de taludgeometrie ter plaatse van de zettingsvrije platen (spoor op maaiveldniveau) zal hier bij dit project geen sprake van zijn.

Om een conservatieve inschatting te maken van de trillingssterkte, wordt er niet gecorrigeerd voor de dive-unders en zettingsvrije platen.

7.2.4. Invloed snelheidswijziging

Door wijzigingen in seinplaatsing en posities van wissels veranderen de snelheidsprofielen van de treinen. Om de invloed van de snelheid op de trillingssterkte vast te stellen is op een aantal locaties gedurende langere tijd gemeten. De relatie tussen snelheid en trillingssterkte kent een exponentieel verband tot snelheden rond de kritische treinsnelheid. De kritische treinsnelheid is afhankelijk van de bodem. Omdat de invloed van snelheidswijzigingen sterk verschilt per locatie, wordt gerekend met een gemiddelde waarde en een onzekerheidsmarge.

7.2.5. Invloed wijziging in treinintensiteit

In de berekeningen voor stap 3 wordt voor elke trein de trillingssterkte in de plansituatie bepaald op basis van het trillingssignaal uit de metingen. Als gevolg van deze aanpak wordt er niet gecorrigeerd voor aanpassingen in het aantal passerende treinen. De berekende waarde van V_{per} uit de prognose dient daarom nog te worden gecorrigeerd voor wijzigingen in treinintensiteit. Een verhoging van de treinintensiteit leidt tot een hogere waarde van de trillingsintensiteit V_{per} . De nieuwe waarde van V_{per} kan worden berekend met behulp van de volgende vergelijking:

$$V_{per,nieuw} = V_{per,nieuw,ongecorrigeerd} \cdot \sqrt{\frac{n_{nieuw}}{n_{oud}}}$$

Hierbij is n de treinintensiteit in treinen per periode (dag, avond, nacht).

$V_{per,nieuw,ongecorrigeerd}$ is de trillingsintensiteit zoals deze volgt uit de prognoses, deze waarde is nog niet gecorrigeerd voor wijzigingen in aantal treinen.

7.2.6. Bepaling gewijzigde trillingssterkte

Met behulp van de verschillende toeslagfactoren is de trillingssterkte per trein in de referentie- en plansituatie bepaald vanuit de metingen.

7.3 Resultaten

De resultaten van de metingen, inclusief berekeningen voor de referentie- en plansituatie, zijn weergegeven in Tabel 7-2. De verwerkingsprocedure van de metingen is opgenomen in Bijlage IV. De berekeningen hebben plaatsgevonden vanuit de metingen die zijn uitgevoerd in 2014. Mogelijke overschrijdingen van de streefwaarden uit de BTS zijn oranje gearceerd. Per meetlocatie zijn achtereenvolgens weergegeven:

- de R -waarde van de referentiesituatie, plansituatie en de gecombineerde R_Q -waarde. Deze reproduceerbaarheidswaarde (in procenten) geeft aan of de datasets van de metingen en prognoses voor de verschillende situaties voldoende reproduceerbaar zijn. Conform het memo van Level Acoustics¹⁴ wordt gestreefd naar een R -waarde die niet groter is dan 10 procent. Bij de belangrijke grenswaarde A_2 in de BTS van 0.4 is de onzekerheid dan in de orde van de afrondingsfout. Voor het, door middel van een voor- en nameting, toetsen of er sprake is van een toename van meer dan 30 procent, is het ook van belang dat de onzekerheid in beide metingen niet te groot is. Als de onzekerheid na een week meten nog steeds groter is dan 10 procent, is er op de meeste locaties langer gemeten om deze onzekerheid te verkleinen. Op locaties waar niet mogelijk was, is de onzekerheid verrekend in de toetswaarden;
- de berekende of gemeten trillingssterkte in de referentiesituatie (ref);
- de berekende trillingssterkte voor de plansituatie (plan);
- de verhouding tussen de trillingssterkte $V_{max, BTS}$ in de plan- en referentiesituatie, eventueel gecorrigeerd voor een hoge R_Q -waarde, zie Bijlage IV. De streefwaarde voor deze Q -waarde is 1.3.
- de maximale waarde van de trillingsintensiteit V_{per} in de referentiesituatie (ref);
- de maximale waarde van de trillingsintensiteit V_{per} in de plansituatie (plan).

Zowel voor $V_{max, BTS}$ als voor V_{per} is de maximale waarde over alle sensoren weergegeven. Overschrijdingen van de streefwaarden uit de BTS zijn oranje gearceerd. Locaties waar de Q -waarde groter is dan 1.3, maar waar dat veroorzaakt wordt door een hoge R -waarde, zijn geel gearceerd. Voor deze geel gemarkeerde locaties wordt een gevoeligheidsanalyse naar de invloed van goederentreinen op de resultaten uitgevoerd.

Een aantal opmerkingen bij Tabel 7-2:

- De overschrijdingen bij de Cremerstraat worden met name veroorzaakt door de hogere snelheid van de goederentreinen. Omdat ook reizigerstreinen hier een

¹⁴ A. Koopman, LA.131001.M04.2

relatief hoge trillingssterkte hebben, is ook de trillingsintensiteit bij Cremerstraat 96 hoger dan de streefwaarde uit de BTS;

- De overschrijdingen bij het Stads kantoor worden veroorzaakt door de hogere rijsnelheid van de goederentreinen en het dichterbij komen rijden van een deel van deze treinen;
- De overschrijdingen bij de Hendrik Tollensstraat worden veroorzaakt door de hogere rijsnelheid van de goederentreinen. De geometriewijziging en het verwijderen van de wissels compenseren de toename in trillingssterkte niet volledig;
- De overschrijdingen bij het Tolsteegplantsoen en de Saffierlaan worden veroorzaakt door zowel de hogere rijsnelheid van de goederentreinen als het aanzienlijk dichterbij komen van (een deel van) de treinen. Alleen in de hoogste verdiepingen van het gebouw aan de Saffierstraat treedt een overschrijding op van de streefwaarden, in lagere verdiepingen is de trillingssterkte lager dan de A1-waarde uit de BTS, zie de resultaten voor Saffierstraat 660;
- De overschrijdingen bij de Nieuwe Houtenseweg worden vooral veroorzaakt door het dichterbij komen van de treinen. In mindere mate draagt ook de toenemende rijsnelheid van een deel van de goederentreinen bij aan de toename in trillingssterkte;
- De overschrijdingen van de trillingsintensiteit V_{per} bij de Koningsweg worden met name veroorzaakt door het toenemende aantal treinen, en in mindere mate door de hogere rijsnelheid van de treinen. Ook in de huidige situatie is de trillingsintensiteit al hoger dan de streefwaarde uit de BTS;
- Bij de Nicolaas Beetsstraat en Arthur van Schendelstraat worden de overschrijdingen veroorzaakt door de hogere rijsnelheid van een deel van de goederentreinen. Rond het station is de toename in rijsnelheid van goederentreinen het grootst;
- De overschrijdingen van de trillingsintensiteit V_{per} bij de Seringstraat worden met name veroorzaakt door het toenemende aantal treinen, en in mindere mate door de hogere rijsnelheid van de treinen. Ook in de situatie van de metingen ligt de trillingsintensiteit al rond de streefwaarde uit de BTS.
- Verschillen tussen meetlocaties binnen een subgebied worden met name veroorzaakt door verschillen in gebouwkenmerken tussen de gebouwen. Zo zal een snelheidstoename van goederentreinen meer effect hebben op de trillingssterkte voor gebouwen waar goederentreinen hogere trillingssterktes hebben dan passagierstreinen, dan voor gebouwen waar beide types treinen vergelijkbare trillingssterktes geven. Hetzelfde geldt voor de invloed van het plaatsen of verwijderen van wissels en aanpassingen aan het talud;
- Op een aantal locaties is de Q-waarde groter dan 1.3, maar zijn locaties niet oranje gearceerd. Dit komt doordat op die locaties de streefwaarde (A1) voor de V_{max} niet wordt overschreven. In dat geval is de hoogte van de Q-waarde niet relevant bij de beoordeling op de BTS;
- Bij een deel van de locaties is gebruik gemaakt van metingen die in het kader van het project *Sporen in Utrecht* zijn uitgevoerd. De resultaten zijn eerder gepubliceerd ten behoeve van het TB *Sporen in Utrecht*¹⁵. De resultaten in Tabel 7-2 van genoemd rapport wijken soms af van de resultaten in Tabel 7-2

¹⁵ Zie Boon, ir. P.M., *Sporen in Utrecht, Trillingsonderzoek t.b.v. tracébesluit*, Movares Nederland B.V., D79-PBO-KA-1400005, 31 maart 2014

van het huidige rapport. Bij Houtensepad 200 en Nicolaas Beetsstraat 222 wordt nu gebruik gemaakt van een nieuwe meting met een langere looptijd. Bij alle locaties wordt in het voorliggende rapport de trillingssterkte V_{max} , gecorrigeerd voor R-waarde getoond, terwijl in het rapport ten behoeve van *Sporen in Utrecht* de ongecorrigeerd V_{max} wordt getoond.

Tabel 7-2 Resultaten metingen in gebouwen

Geb.	Meetlocatie	Bestemming	R-waarde			Trillingssterkte (V_{max})			Trillingsintensiteit (V_{per})		
			ref	plan	Q	ref	plan	Q	ref	plan	streef
1	Cremerstraat 96	Wonen	7	7	10	0.47	0.74	1.55	0.06	0.11	0.1
	Cremerstraat 38	Wonen	8	6	10	0.38	0.57	1.50	0.05	0.09	0.1
	J.J.A. Goeverneurstraat 47	Wonen	7	7	10	0.29	0.37	1.28	0.03	0.04	0.1
2	Jaarbeursplein 22	Kantoor	6	6	9	0.18	0.28	1.56	0.01	0.02	0.15
	Stadsplateau 1 (Stadskantoor)	Kantoor	6	8	10	0.27	0.50	1.84	0.03	0.04	0.15
3	Jaarbeursplein 6 (Beatrixgebouw)	Bijeenkomst	7	7	10	0.13	0.23	1.71	0.01	0.01	0.15
	Hendrik Tollenstraat 1 en 5	Wonen	6	9	11	0.32	0.55	1.69	0.03	0.03	0.1
	Raadwijk 2bisA	Wonen	13	16	20	0.31	0.38	1.44	0.02	0.02	0.1
4	Tolsteegplantsoen 10-3	Wonen	23	19	30	0.40	0.32	1.07	0.04	0.02	0.1
	Tolsteegplantsoen 45-3	Wonen	8	11	14	0.25	0.45	1.63	0.01	0.02	0.1
	Saffierlaan 680 (10)	Wonen	8	9	12	0.18	0.25	1.39	0.01	0.01	0.1
	Saffierlaan 770 (10)	Wonen	8	11	13	0.19	0.28	1.37	0.01	0.01	0.1
	Kariboestraat 49	Wonen	8	13	15	0.26	0.34	1.35	0.02	0.02	0.1
	Engelsmanplaat 18	Wonen	18	16	24	1.30	0.57	0.56	0.06	0.03	0.1
6	Engelsmanplaat 36	Wonen	12	13	18	1.06	0.60	0.66	0.07	0.03	0.1
	Engelsmanplaat 48	Wonen	12	12	17	1.12	0.52	0.54	0.07	0.03	0.1
	De Wadden 87	Wonen	21	21	29	0.46	0.34	0.95	0.02	0.02	0.1
7	De Wadden 99	Wonen	4	7	9	0.32	0.41	1.28	0.03	0.04	0.1
	Nieuwe Houtenseweg (1)2	Kantoor	5	6	8	0.48	0.64	1.34	0.02	0.03	0.15
	Nieuwe Houtenseweg 27	Wonen	8	10	13	0.37	0.59	1.46	0.04	0.06	0.1
8	Nieuwe Houtenseweg 55	Wonen	11	10	14	0.23	0.33	1.46	0.01	0.02	0.1
	Mereveldseweg 15	Wonen	14	15	21	2.01	2.17	1.30	0.11	0.09	0.1
	Houtensepad 200	Wonen	6	6	9	0.32	0.37	1.15	0.03	0.02	0.1
12	Koningsweg 187	Wonen	15	17	22	2.43	2.73	1.36	0.19	0.29	0.1
13	Rijndijk 27	Wonen	13	12	17	0.42	0.41	1.14	0.03	0.05	0.1
	Rijndijk 23	Wonen	8	8	11	0.30	0.33	1.21	0.02	0.04	0.1
14	Oude Houtensepad 76	Wonen	16	13	20	1.91	1.62	1.05	0.10	0.09	0.1
15	Pelikaanstraat 40 bis	Wonen	12	10	16	0.78	0.54	0.89	0.11	0.06	0.1
	Pelikaanstraat 9	Wonen	17	20	27	0.80	0.57	0.88	0.06	0.06	0.1
16	Vaartsestraat 224	Wonen	17	16	23	0.98	0.67	0.85	0.07	0.04	0.1
	Vaartsestraat 176	Wonen	13	14	20	0.39	0.42	1.28	0.03	0.03	0.1
17	Arthur van Schendelstraat 670	Kantoor	5	5	7	0.24	0.33	1.36	0.02	0.02	0.15
	Arthur van Schendelstraat 623	Wonen	3	5	6	0.19	0.28	1.46	0.02	0.02	0.1
	Arthur van Schendelstraat 203	Wonen	9	9	13	0.34	0.51	1.48	0.02	0.03	0.1
	Nicolaas Beetsstraat 222	Kantoor	10	11	15	0.48	0.83	1.78	0.03	0.03	0.15
	Nicolaas Beetsstraat 212	Wonen	8	9	12	0.17	0.26	1.50	0.01	0.02	0.1
	Laan van Puntenburg 100	Kantoor	6	7	9	0.23	0.28	1.18	0.02	0.02	0.15
18	Stationshal 17 (Katreinetoren)	Wonen	11	9	15	0.36	0.30	1.09	0.02	0.02	0.1
	Leidseveer 10	Kantoor	7	4	8	0.34	0.28	0.81	0.02	0.02	0.15
	Daalseplein 100	Kantoor	4	3	5	0.27	0.40	1.49	0.03	0.06	0.15

19	Wolfstraat 100	Wonen	8	9	12	0.24	0.30	1.30	0.01	0.02	0.1
	Spijkerstraat 26	Wonen	11	12	17	0.39	0.48	1.43	0.02	0.03	0.1
20	Turfstraat 39	Wonen	19	19	27	0.18	0.22	1.57	<0.01	<0.01	0.1
	Nieuwe Pijlsweerdstraat 23	Wonen	18	17	25	0.23	0.25	1.34	<0.01	0.01	0.1
	Nieuwe Pijlsweerdstraat 63	Wonen	26	28	38	0.24	0.28	1.60	<0.01	<0.01	0.1
	Nieuwe Pijlsweerdstraat 83	Wonen	16	14	22	0.33	0.35	1.34	0.01	0.01	0.1
	Oudenoord 700	Onderwijs	3	3	4	0.23	0.27	1.17	0.02	0.03	0.15
25	Leliestraat 55	Wonen	9	10	14	0.39	0.45	1.17	0.03	0.05	0.1
	Schutstraat 89	Wonen	9	9	13	0.45	0.53	1.16	0.04	0.06	0.1
	Schutstraat 64	Wonen	10	7	13	0.16	0.18	1.17	0.01	0.02	0.1
	Schutstraat 20	Wonen	8	12	15	0.12	0.16	1.35	<0.01	<0.01	0.1
	Amsterdamsestraatweg 171c	Wonen	14	14	19	0.17	0.21	1.48	<0.01	0.02	0.1
26	Dijkstraat 20	Wonen	8	5	9	0.15	0.19	1.26	0.01	0.02	0.1
	Concordiastraat 67	Kantoor	4	5	6	0.21	0.26	1.28	0.01	0.01	0.15
	Seringstraat 6	Wonen	9	9	13	0.86	0.99	1.15	0.09	0.11	0.1
	Seringstraat 136	Wonen	8	7	10	0.61	0.68	1.11	0.10	0.15	0.1
	Jan Overdijkstraat 39D	Wonen	9	10	14	0.32	0.39	1.22	0.02	0.02	0.1

Bij de geel gearceerde meetlocaties kan een overschrijding niet worden uitgesloten op basis van een meetduur van een of twee weken. Uit de metingen blijkt onder meer dat type lading, beladingsgraad en intensiteit van de goederentreinen sterk wisselen, en dat voor een betrouwbare vaststelling van de trillingssterkte V_{max} daarom een langere meetduur nodig is van mogelijk enkele maanden. Om te komen tot een goed onderbouwde analyse van de huidige en toekomstige trillingssterkte, is de dataset van de meting aangevuld met een groot aantal goederentreinen vanuit een nabijgelegen meetlocatie waar gedurende langere tijd is gemeten. De gevolgde methodiek en resultaten zijn beschreven in het meetrapport¹⁶. Hieruit blijkt dat het project naar alle waarschijnlijkheid niet tot overschrijdingen van de BTS zal leiden op de beschouwde locaties, uitgezonderd op Kariboestraat 49. Alleen voor deze locatie zullen daarom maatregelen worden afgewogen op kosteneffectiviteit, in aanvulling op de overige oranje gearceerde gebouwen in Tabel 7-2.

Ter verificatie van de gevolgde methode wordt momenteel op deze locaties gedurende een aantal maanden gemeten met als doel om de variatie in trillingssterkte ten gevolge van de goederentreinen volledig in beeld te brengen. Na realisatie van het project zal opnieuw worden gemeten op dezelfde locaties om het berekende effect van het project te verifiëren.

7.4 Bepaling trillingssituatie in niet-gemeten woningen

In stap 3 zijn metingen verricht op een aantal locaties per subgebied. Om te bepalen of ook in overige gebouwen in het subgebied geen overschrijding van het beoordelingskader optreedt, worden de modelresultaten van de nauwkeurige berekening uit stap 2 gecorrigeerd aan de hand van de meet- en rekenresultaten uit stap 3.

7.5 Betrouwbaarheid

De betrouwbaarheid van de prognoses in stap 3 wordt in dit onderzoek per locatie aangegeven middels een bandbreedte op de eindresultaten. Voor elke factor die in het prognosemodel wordt gebruikt is de onzekerheid bepaald aan de hand van metingen of modellen. Niet voor elke locatie geldt dezelfde betrouwbaarheid omdat er op sommige

¹⁶ Boon, ir. P.M., *Trillingsonderzoek DSSU, Meetresultaten en predicties in gebouwen*, Movares Nederland B.V., D79-PBO-KA1400102, 31 juli 2014, versie 0.4

locaties bepaalde wijzigingen niet optreden. Hoe minder wijzigingen, hoe groter de betrouwbaarheid van de prognose.

In dit onderzoek wordt daarom voor elke locatie, naast een prognose voor de trillingssituatie na realisatie van het project, een spreiding in de verwachte resultaten weergegeven in het meetrapport¹⁷. De beoordeling vindt, zoals gebruikelijk, plaats op de verwachtingswaarde van de toekomstige trillingssituatie.

De betrouwbaarheid van de prognose hangt eveneens sterk samen met de betrouwbaarheid van de meting op basis waarvan de prognoses of berekeningen zijn gemaakt. Alleen bij het meten van voldoende treinpassages is de meting, en daarmee ook de prognose, voldoende betrouwbaar. De betrouwbaarheid van de meting wordt in dit onderzoek aangegeven middels een zogenaamde *R*- of reproduceerbaarheidswaarde. Een *R*-waarde van kleiner dan 10 procent impliceert een goed reproduceerbare meting, de resultaten van een tweede meting zullen maximaal 10 procent afwijken van de gepresenteerde meetresultaten.

7.6 Locaties voor maatregelen

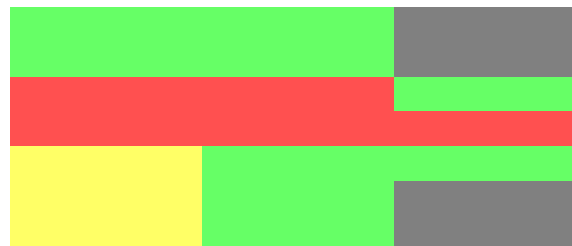
Op basis van de resultaten in Tabel 7-2 volgt een aantal locaties met mogelijke overschrijdingen. Voor deze locaties worden in de vierde stap van het trillingsonderzoek maatregelen afgewogen op kosteneffectiviteit. De gebieden waarin gebouwen zijn te vinden die niet voldoen, zijn in Tabel 7-3 rood gearceerd. Het ontwerpen van maatregelen is in hoofdstuk 8 beschreven.

Tabel 7-3 Resultaten stap 1, 2 en 3

Nr	Naam subgebied in trillingsonderzoek	Voldoet aan BTS		
		Stap 1	Stap 2	Stap 3
1	Cremerstraat			
2	Westplein			
3	Raadwijk / Hendrik Tollensstraat			
4	Tolsteegplantsoen			
5	Oude Houtensepad zuid			
6	Engelsmanplaat			
7	Nieuwe Houtenseweg noord / De Wadden			
8	Oud Wulfseweg			
9	Nieuwe Houtenseweg zuid / Mereveldseweg			
10	Houtensepad			
11	Marsdijk			
12	Koningsweg			
13	Rijndijk			
14	Oude Houtensepad noord			
15	Pelikaanstraat			
16	Vaartsestraat			
17	Nicolaas Beetsstraat			
18	Daalseplein			
19	Spijkerstraat			
20	Pijlsweerd			
21	Vecht zuidzijde			
22	Tuindorp			

¹⁷ Boon, ir. P.M., *Trillingsonderzoek DSSU, Meetresultaten en predicties in gebouwen*, Movares Nederland B.V., D79-PBO-KA1400102, 31 juli 2014, versie 0.4

23	Taag- en Rubicondreef
24	Vecht noordzijde
25	Ondiep
26	2 ^e Daalsebuurt
27	Julianapark en Elinkwijk
28	Vlampijpstraat
29	Cartesiusweg



Kleur	Omschrijving
	Voldoet mogelijk niet aan BTS, nader onderzoek noodzakelijk
	Voldoet aan BTS, nader onderzoek wenselijk
	Voldoet aan BTS
	Niet nader onderzocht

Bij een aantal subgebieden zijn er overschrijdingen na het uitvoeren van de metingen en nauwkeurige prognoses uit stap 2. De overschrijdingen zijn vrijwel altijd het gevolg van de hogere rijnsnelheid van de goederentreinen, bij sommige locaties in combinatie met het dichterbij komen van de sporen. In twee subgebieden (Koningsweg en 2^e Daalsebuurt) zijn er overschrijdingen van de trillingsintensiteit V_{pers} , maar neemt de trillingssterkte V_{max} niet voelbaar toe.

Verschillen tussen stap 2 en 3 kunnen worden veroorzaakt door (een combinatie van) de volgende aspecten:

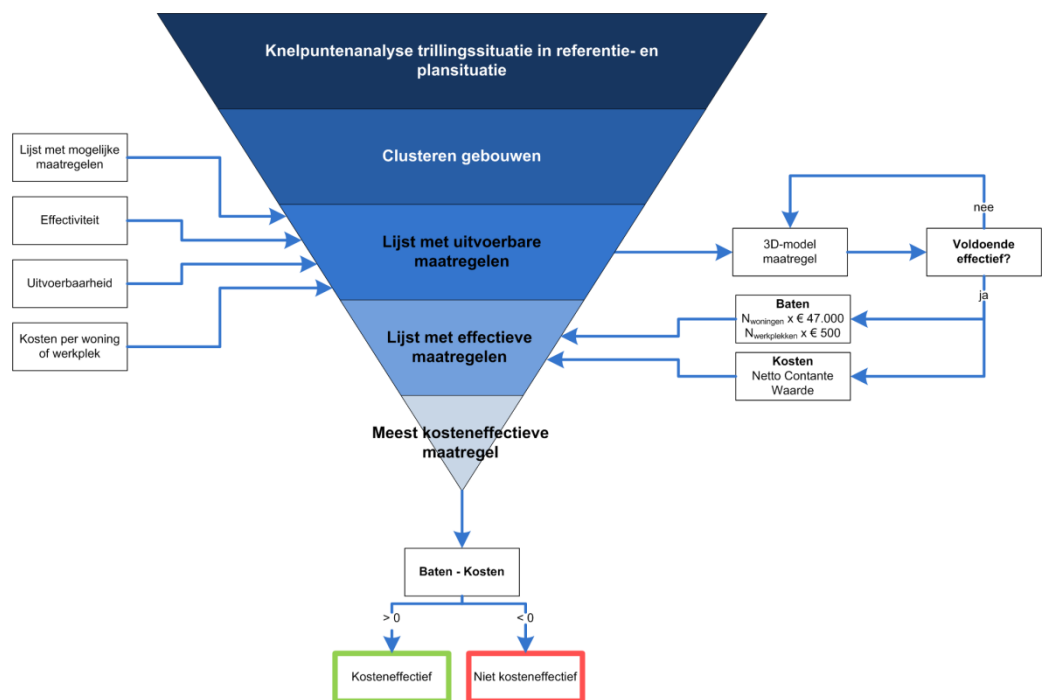
1. Het model van stap 3 is nauwkeuriger dan het model van stap 2, omdat alleen gerekend wordt met toeslagfactoren voor de wijzigingen in bijvoorbeeld treinsnelheid, de ligging van sporen en wissels en talugeometrie. Hoe geringer deze wijzigingen zijn, hoe meer de plansituatie overeenkomt met de gemeten referentiesituatie, en hoe betrouwbaarder de berekeningen dus zijn;
2. Het model van stap 3 rekent met nauwkeurige, modelbepaalde parameters voor de wijzigingen in taludgeometrie. Vooral op locaties met sterke wijzigingen in taludgeometrie is het model van stap 3 aanzienlijk nauwkeuriger dan het model van stap 2;
3. In stap 3 wordt in gebouwen gemeten, hierdoor worden de specifieke gebouweigenschappen nauwkeuriger meegenomen dan in stap 2. Elk gebouw heeft een specifieke overdracht tussen fundering en midden vloerveld. Hierdoor is het ene gebouw gevoeliger voor een toename van de trillingssterkte in het laagfrequente gebied dan een ander gebouw. Verschillen tussen stap 2 en stap 3 worden meestal veroorzaakt door gebouwspecifieke kenmerken;

8 Stap 4 – Trillingsmaatregelen

In de vierde stap van het trillingsonderzoek worden trillingsmaatregelen ontworpen voor deelgebieden waar op basis van stap 1, 2 en 3 van het trillingsonderzoek een kans is op overschrijdingen.

8.1 Gevolgde methodiek

De keuze voor een bepaalde trillingsmaatregel bestaat uit een aantal stappen. Deze stappen zijn schematisch weergegeven in Figuur 8-1.



Figuur 8-1 *Stappenplan voor kosteneffectiviteitsafweging*

De volgende stappen worden genomen:

- Knelpuntenanalyse: het bepalen van de streefwaarden, V_{per} en V_{max} in de referentie- en plansituatie, dit vindt plaats op basis van het model van stap 2 en de metingen uit stap 3;
- Clustering van gebouwen: bepalen aantal gebouwen waar een kans op een overschrijding is. Een groep gebouwen waarvoor een aaneengesloten maatregel nodig is, wordt een cluster genoemd;
- Overzicht van voorhanden maatregelen uitkiezen. Afwegen of een maatregel wel of niet mogelijk is (ruimtetechnisch, fysieke obstakels, effectiviteit en kosten) op basis van expert judgment;
- Gedetailleerd doorrekenen van uitvoerbare maatregelen. Van de effectieve maatregelen worden de kosten over de looptijd, in de vorm van een Netto Contante Waarde (NCW) bepaald, alsmede de baten. De baten zijn gedefinieerd als het aantal woningen waarvoor de maatregel voldoende effectief is bij beoordeling op de BTS, maal het richtbedrag van € 47.000 per woning. Voor kantoren wordt een bedrag van €500 per werkplek gehanteerd. Resultaat van deze stap is een lijst met effectieve maatregelen;

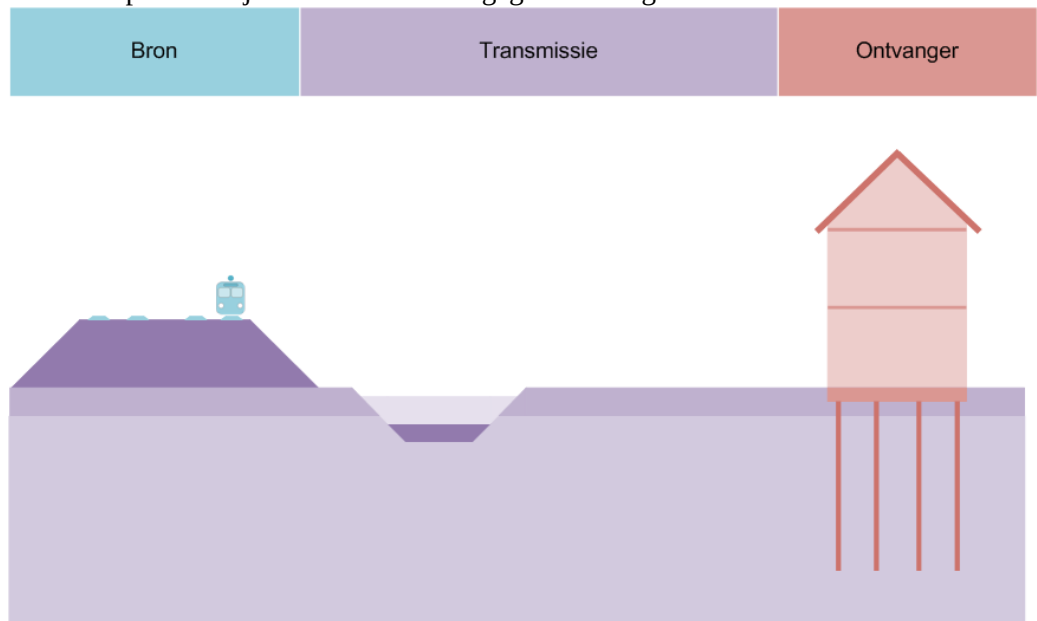
- Uit de lijst met effectieve maatregelen wordt de meest kosteneffectieve maatregel geselecteerd (grootste reductie in aantal gehinderden tegen laagste prijs). Wanneer het saldo (baten minus kosten) positief is, is de maatregel kosteneffectief en wordt deze voorgesteld ter afweging in het tracébesluit.

8.2 Mogelijke maatregelen

Trillingen ten gevolge van treinverkeer kunnen op drie posities worden gereduceerd:

1. Bij de bron (treinen¹⁸ of spoorconstructie);
2. Tussen de bron en de ontvanger (in de bodem);
3. Bij de ontvanger (gebouw).

Deze drie posities zijn schematisch weergegeven in Figuur 8-2.



Figuur 8-2 Schematisch overzicht spoorstelsel

Voor het zoeken naar mogelijkheden voor het reduceren van de trillingshinder is het van belang de spoorbaanconstructie als complex massa-veersysteem te beschouwen. Er zijn twee mogelijke principes om de trillingshinder te reduceren:

- Het verhogen van de impedantie van de aangestoten constructie (de mate waarin een constructie in beweging kan worden gebracht). Dit kan bijvoorbeeld door het verhogen van de stijfheid van de constructie of het vergroten van de massa;
- Het ontkoppelen van de bron en de ontvanger door het toepassen van verende of reflecterende tussenlagen. Dit type maatregel wordt het meest toegepast.

In de praktijk is het reduceren van trillingshinder zeer moeilijk. De effectiviteit van een maatregel hangt af van een groot aantal factoren. Maatregelen die op de ene locatie effectief zijn, kunnen op een andere locatie de trillingssterkte niet of veel minder reduceren. Het uitvoeren van een maatregelenonderzoek dient daarom altijd locatiespecifiek plaats te vinden.

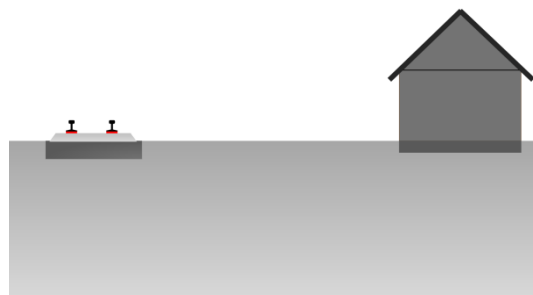
¹⁸ ProRail noch het ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M) kan spoorwegondernemingen dwingen om ander materieel te rijden of bepaalde vervoerders snelheidsbeperkingen op te leggen. Hoewel deze maatregelen dus effectief kunnen zijn, zijn dit momenteel juridisch gezien geen maatregelen die kunnen worden ingezet.

Door middel van bronnenonderzoek, expert interviews en brainstormsessies is een breed scala aan mogelijke trillingsmaatregelen bepaald. De verschillende types maatregelen worden in de onderstaande subparagrafen nader toegelicht, een meer gedetailleerde opsomming van de mogelijke maatregelen is opgenomen in Bijlage V.

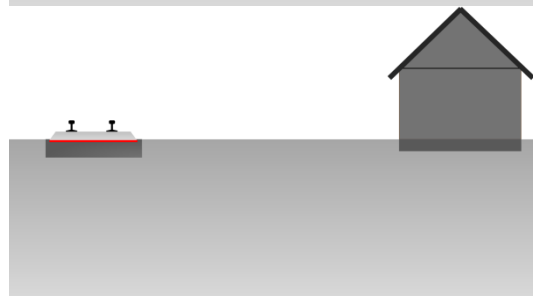
8.2.1. Mogelijke maatregelen aan de bron

De meest effectieve aanpak is het reduceren van de trillingen bij de bron: de trein of het spoorstelsel. Mogelijke maatregelen zijn:

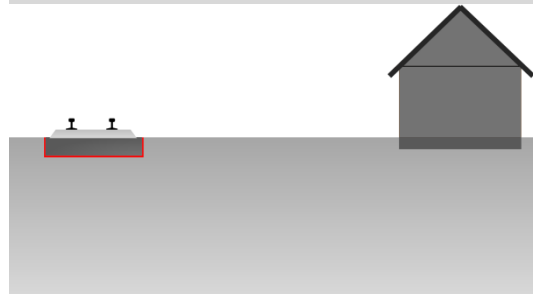
Railpads, een verende constructie tussen spoorstaaf en dwarsligger. Deze maatregel heeft pas effect bij frequenties boven de 40 Hz en is daardoor onvoldoende effectief voor goederentreinen, waarbij de dominante frequentie vaak tussen de 3 en 10 Hz ligt.



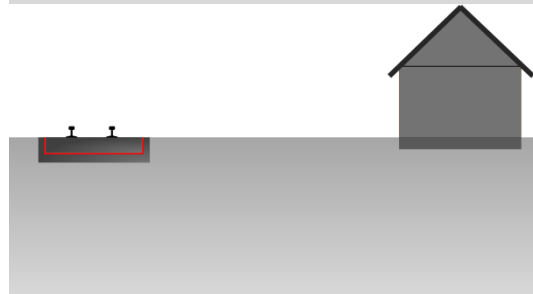
Under sleeper pads, een verende constructie tussen dwarsligger en ballast of betonplaat. Deze maatregel heeft effect bij frequenties boven de 25 Hz, en is daardoor onvoldoende effectief voor goederentreinen.



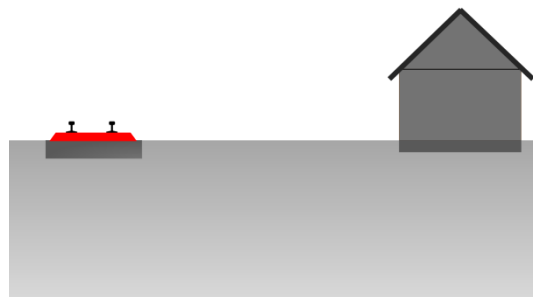
Ballastmatten, een verende constructie onder het ballast. Deze maatregel heeft effect bij frequenties boven de 20 Hz, en is daardoor ook onvoldoende effectief voor goederentreinen.



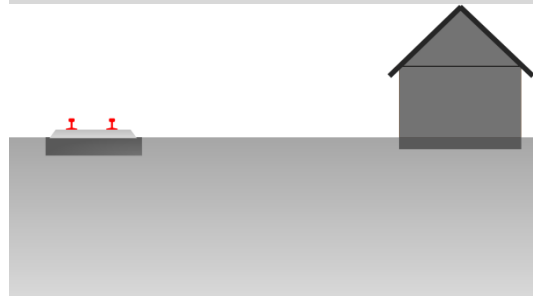
Floating slab track, een verende oplegging van het gehele spoorstelsel. Deze maatregel heeft effect bij frequenties boven de 5 Hz, en kan daardoor voldoende effectief zijn voor goederentreinen.



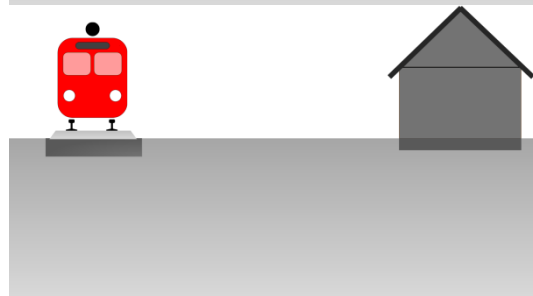
Aanpassing dwarsliggers, door de stijfheid of massa van de dwarsliggers aan te passen (grotere dwarsliggers, ander materiaal, holle dwarsliggers, etc.) kunnen de trillingen worden gereduceerd. Deze maatregelen hebben effect bij frequenties boven de 8 Hz, en zijn daarom meestal onvoldoende effectief voor goederentreinen.



Aanpassing spoorligging, bijvoorbeeld door het verplaatsen van wissels en andere oneffenheden in het spoor, zoals de aansluiting tussen aardebaan en kunstwerk. Deze oneffenheden hebben vooral op korte afstand (minder dan 50 meter) tot het spoor een grote invloed op de trillingssterkte.



Aanpassing aan voertuigen, bijvoorbeeld door het reduceren van de treinsnelheid, beter toezicht op de kwaliteit van het materieel of het aanpassen van de afveerconstructie van treinwagons.¹⁹

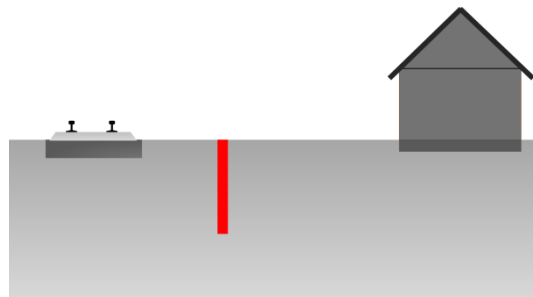


8.2.2. Mogelijke maatregelen aan de transmissie

Bij maatregelen aan de transmissie of de overdracht kan reductie van trillingshinder worden bereikt door de trillingen te absorberen of te reflecteren. Absorptie van trillingen is praktisch vrijwel niet uitvoerbaar, reflectie van trillingen kan worden bereikt door het introduceren van een fysieke barrière tussen de bron en de ontvanger. Een dergelijke barrière kan worden gerealiseerd van een zeer licht materiaal zoals EPS (of zelfs geen materiaal, zoals bij een sloot), of juist een zeer zwaar en stijf materiaal (zoals beton). Belangrijk is dat er een impedantiesprong wordt gecreëerd. Het ontwerpen van maatregelen aan de transmissie dient daarom altijd locatie specifiek te worden uitgevoerd, zodat de lokale bodemkarakteristieken worden meegenomen.

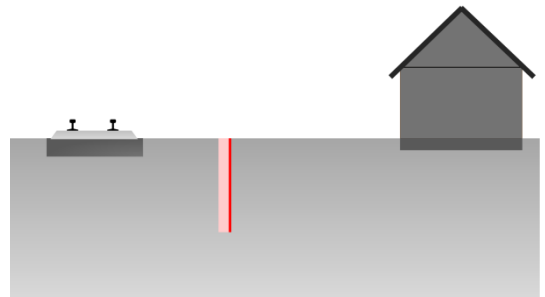
Mogelijke transmissiemaatregelen zijn onder meer:

Ondergrondse trillingsreducerende constructie (OTC), bijvoorbeeld van beton of EPS. Een dergelijke constructie kan de trillingen absorberen (bij een zware constructie) en reflecteren, waardoor er een barrière ontstaat tussen bron en ontvanger.

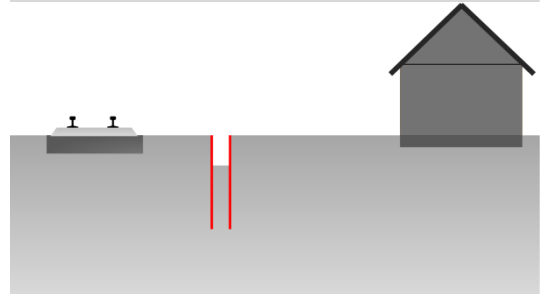


¹⁹ ProRail noch het ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M) kan spoorwegondernemingen dwingen om ander materieel te rijden of bepaalde vervoerders snelheidsbeperkingen op te leggen. Hoewel deze maatregelen dus effectief kunnen zijn, zijn dit momenteel juridisch gezien geen maatregelen die kunnen worden ingezet.

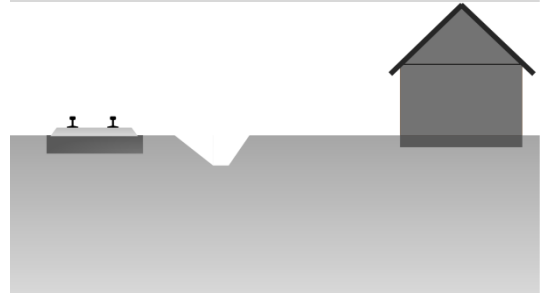
Beklede ondergrondse trillingsreducerende constructie (beklede OTC), waarbij de barrière wordt voorzien van een extra laag slap materiaal, bijvoorbeeld rubber, om een extra impedantiesprong te creëren. Deze maatregel heeft doorgaans meer effect dan een niet-beklede barrière.



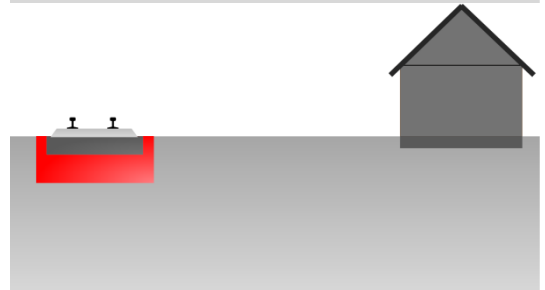
Toepassen van een sleuf tussen twee damwanden, bij deze constructie wordt een smalle sloot gerealiseerd tussen twee damwanden. De verschillende materialen zorgen voor impedantiesprongen, waardoor reflectie van de trillinggolven optreedt.



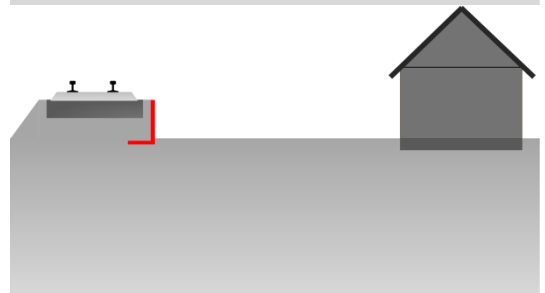
Sloot, hierbij wordt een fysieke onderbreking gecreëerd in het pad van de trillingen tussen bron en ontvanger.



Aanpassen van de bodem onder het spoor, bijvoorbeeld door het toepassen van grondverbetering of het realiseren van een zettingsvrije plaat (onderheide betonnen plaat)



Aanpassen van het spoortalud, bijvoorbeeld door het realiseren van een betonnen L-wand of het toepassen van geogrids. Treinen op een verhoogd talud geven doorgaans minder trillingen dan treinen die op maaiveld rijden.



Voor al deze maatregelen geldt dat het effect voor reizigerstreinen groter is dan voor goederentreinen. Afhankelijk van de lokale bodemopbouw kunnen de maatregelen ook effect hebben voor goederentreinen.

8.2.3. Mogelijke maatregelen aan de ontvanger

De laatste categorie maatregelen zijn maatregelen aan de ontvanger, aan de gebouwen. Nadeel van deze categorie is dat de meeste opties grote impact hebben op de

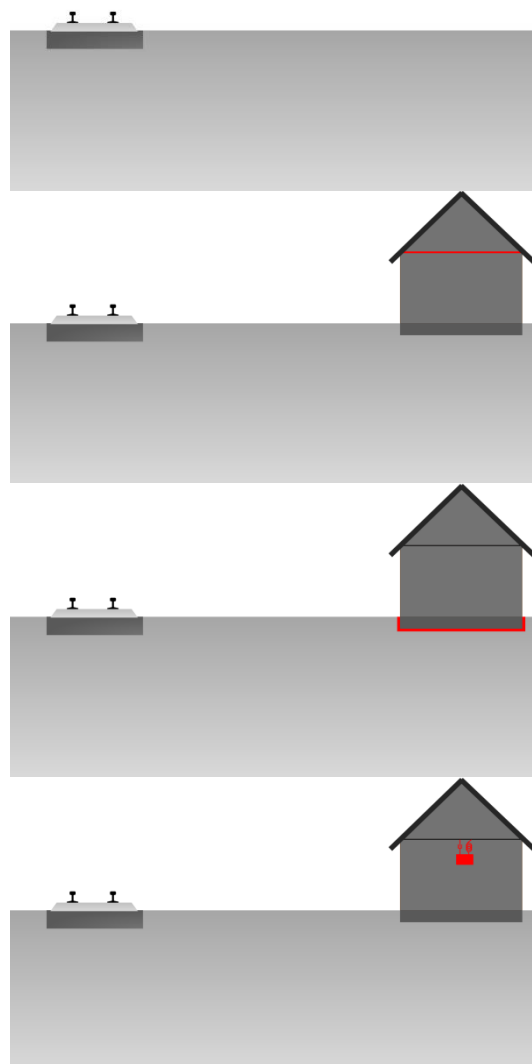
gebruikers van de gebouwen en vrijwel niet uitvoerbaar zijn voor bestaande gebouwen. De volgende maatregelen zijn mogelijk:

Opkopen, de gebouwen worden opgekocht en de bewoners of gebruikers verhuizen.

Verstijven van vloeren en muren, hierbij worden (veelal houten) vloeren en soms ook muren vervangen of verstevigd door stalen of betonnen elementen.

Inpakken van de fundering, vooral bij gebouwen die op staal zijn gefundeerd. Hierbij wordt de fundering ingepakt in een dempend materiaal, bijvoorbeeld rubber.

Tuned mass damper, een afgeregeld massa-veersysteem dat trillingen kan uitdempen toepassen in een woning. Een dergelijk systeem werkt vooral bij trillingen die alleen bij een bepaalde frequentie optreden, de trillingen van treinverkeer hebben vaak een breed frequentiespectrum, zodat deze maatregel vaak niet voldoende effectief is.



8.2.4. Voorgestelde maatregelen

In de volgende subparagrafen wordt per subgebied aangegeven welke maatregelen, gezien de kosten, effectiviteit en inpassing de voorkeur verdienen. Voor meer details over de onderzochte maatregelen per subgebied en de afwegingen die zijn gemaakt, wordt verwezen naar het maatregelenrapport²⁰.

8.3 Gebiedsbegrenzing

Uit hoofdstuk 7 blijkt dat er overschrijdingen zijn in delen van de subgebieden 1 (Cremerstraat), 2 (Westplein), 3 (Raadwijk/Hendrik Tollensstraat), 4 (Tolsteegplantsoen), 7 (Nieuwe Houtenseweg noord/De Wadden), 9 (Nieuwe

²⁰ Boon, ir. P.M., *Trillingsonderzoek Doorstroomstation Utrecht, onderzoek naar mitigerende maatregelen*, Movares Nederland B.V., D79-PBO-KA1400110

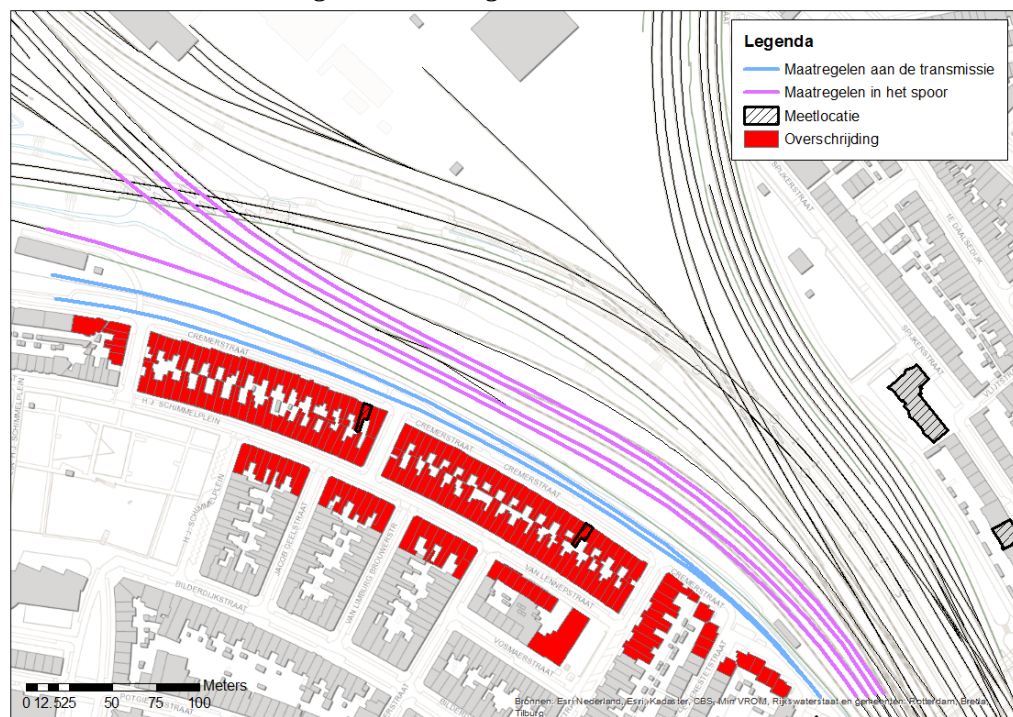
Houtenseweg zuid/Mereveldseweg), 12 (Koningsweg), 17 (Nicolaas Beetsstraat), 18 (Daalseplein) en 26 (2^e Daalsebuurt).

Voor deze gebieden zijn de resultaten van de metingen in gebouwen (stap 3) vergeleken met de resultaten van het nauwkeurige model voor de verschillende meetlocaties. Aan de hand van deze vergelijking zijn de modelresultaten vertaald naar een nauwkeuriger prognose op basis van stap 3 voor alle niet-gemeten locaties in deze onderzoeksgebieden.

In de volgende subparagrafen worden de subgebieden met overschrijdingen nader geanalyseerd en worden maatregelen afgewogen.

8.4 Subgebied 1 (Cremerstraat)

In een deel van subgebied 1 (Cremerstraat) zijn er overschrijdingen in de plansituatie. Op basis van het nauwkeurige trillingsmodel, waarbij de resultaten zijn gecorrigeerd met behulp van de metingen, is per gebouw aangegeven of de locatie wel of niet voldoet aan het beoordelingskader, zie Figuur 8-3.



Figuur 8-3 Locaties overschrijdingen, subgebied Cremerstraat

Meetlocaties zijn gearceerd weergegeven en locaties met overschrijding zijn rood weergegeven. Er zijn 241 adressen met een overschrijding, waarvan 3 met een kantoorbestemming. Op twee adressen hiervan is een meting uitgevoerd.

8.4.1. Onderzochte maatregelen

Voor het gedeelte van dit subgebied wat niet voldoet is een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. In dit onderzoek is gefocust op een aantal maatregelen aan de bron (het spoor) en de transmissie (bodem). Voor de transmissiemaatregelen zijn een aantal locaties beschouwd, zie ook Figuur 8-3. Maatregelen aan de bron worden toegepast op de sporen die mogelijk voor overschrijdingen zorgen. In dit geval zijn dat de vier meest dichtbij gelegen doorgaande sporen. Op de eerste twee sporen rijden reizigerstreinen van en naar Vleuten, op het derde spoor rijden reizigerstreinen vanuit Amsterdam richting Utrecht, op het vierde spoor goederentreinen vanuit Amsterdam richting Utrecht. De locaties voor maatregelen zijn weergegeven in Figuur 8-3. Voor maatregelen in het spoor bedraagt de totale vereiste lengte 2120 meter, voor maatregelen aan de transmissie bedraagt de lengte ongeveer 510 en 540 meter.

In Tabel 8-1 zijn de maatregelen uit paragraaf 8.2 weergegeven, met daarbij een indicatie van de uitvoerbaarheid (realiseerbaarheid en inpasbaarheid), verwachte effectiviteit en de kosten per gebouw voor de 241 adressen met een overschrijding in dit subgebied. Maatregelen die negatief (-) of nagenoeg geen effect (0) scoren op effectiviteit of negatief scoren op uitvoerbaarheid en/of kosten, worden niet nader onderzocht.

Tabel 8-1 Mogelijke trillingsmaatregelen Cremerstraat

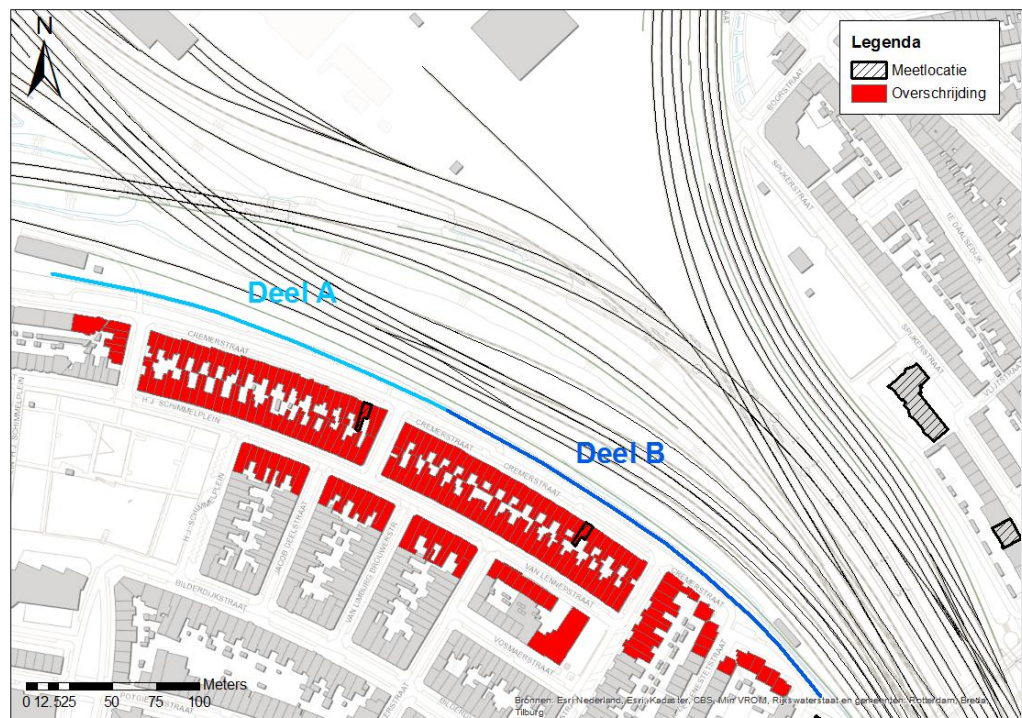
	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw	Nader onderzoeken
Bronmaatregelen				
Railpads	--	0	26 - 35 k€	nee
Under sleeper pads	--	0	29 - 36 k€	nee
Ballastmatten	--	0	36 - 47 k€	nee
Floating slab track	--	+	116 - 169 k€	nee
Aanpassing dwarsliggers	--	0	28 - 157 k€	nee
Aanpassing spoorligging	--	0		nee
Aanpassing aan voertuigen				nee
Transmissiemaatregelen				
OTC	++	++	11 - 70 k€	ja
Beklede OTC	++	++	16 - 76 k€	ja
Sleuf tussen twee damwanden	+	+	13 - 94 k€	ja
Sloot aanleggen of verdiepen	-	+	3 - 22 k€	nee
Aanpassen bodem	--	+	44 - 326 k€	nee
Aanpassen spoortalud				nee
Ontvangermaatregelen				
Amoveren	--	++	150 - 400 k€	nee
Verstijven van vloeren en muren	--	+	21 - 85 k€	nee
Inpakken van fundering	-	+	40 - 90 k€	nee
Tuned Mass Damper	+	--	10 - 30 k€	nee

Omschrijving per categorie			
Kleurcode	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw
--	Niet uitvoerbaar	Sterk negatief effect	Kosten zijn hoger dan richtbedrag
-	Zeer moeilijk uitvoerbaar	Licht negatief effect	
0	Moeilijk uitvoerbaar	Geen effect	Kosten kunnen hoger zijn dan richtbedrag
+	Relatief eenvoudig uitvoerbaar	Licht positief effect	
++	Zeer eenvoudig uitvoerbaar	Sterk positief effect	Kosten zijn lager dan richtbedrag
	Niet van toepassing	Niet van toepassing	

Voor deze locatie zijn diverse types trillingsschermen en een sleuf tussen twee damwanden onderzocht, op de verschillende aangegeven locaties.

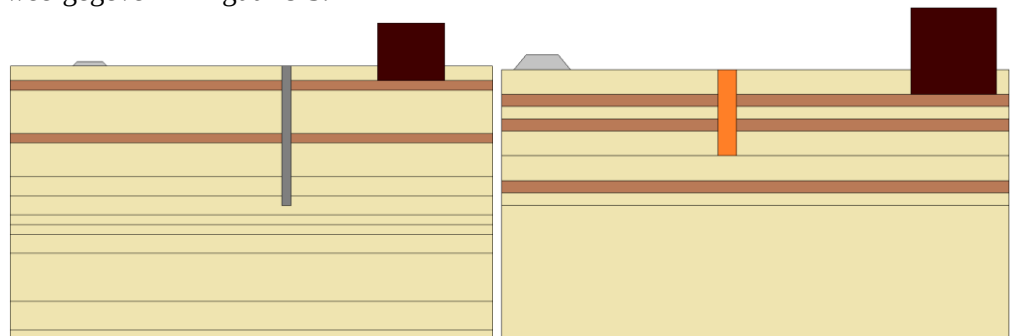
8.4.2. Voorgestelde maatregel

Gezien de verschillen in bodemopbouw, afstand tot het spoor en gebouweigenschappen, is het geclusterde gebied aan de Cremerstraat opgedeeld in twee delen, een A- en B-deel, zie Figuur 8-4. De voorgestelde maatregellocatie bevindt zich in het park voor de woningen. De andere beschouwde maatregellocaties leiden tot hogere kosten of minder effectieve maatregelen, bijvoorbeeld door hogere kosten voor het omleggen van kabels en leidingen, het buiten dienst nemen van de sporen of het opbreken van de Cremerstraat.



Figuur 8-4 Voorgestelde maatregellocatie in subgebied Cremerstraat

De minst kostbare maatregel met voldoende effect in het A-deel is een trillingsscherm van beton van 14.5 meter diep en 1.0 meter breed. Voor het B-deel volstaat een kleinere maatregel, hier voldoet een trillingsscherm van jetgrout met een diepte van 7.0 meter en een breedte van 1.5 meter. Doorsneden van de gebruikte 3D-modellen zijn weergegeven in Figuur 8-5.



Figuur 8-5 Doorsneden van de 3D-modellen van de voorgestelde maatregel. Links een trillingsscherm van beton (15.4 m diep, 1.0 m breed) in deel A, rechts een trillingsscherm van jet-grout (7.0 m diep, 1.5 m breed) in deel B

De kosten-batentabel van de voorgestelde maatregelen is weergegeven in Tabel 8-2. Door het nemen van de voorgestelde maatregelen neemt het aantal gebouwen met een overschrijding af van 241 naar 0. Uit de kosten-batentabel blijkt dat de voorgestelde maatregelen hier kosteneffectief zijn. Het voorgestelde bedrag per gebouw voor maatregelen komt neer op € 30.000 tot € 37.000.

Tabel 8-2 Kosten-batentabel voor subgebied Cremerstraat

Kosten	Kosten per meter	Lengte maatregel	Totaal
Deel A	€ 22.000 – 26.000	243 m	€ 5.5 – 6.2 mln.
Deel B	€ 6.000 – 10.000	273 m	€ 1.7 – 2.6 mln.
Subtotaal		516 m	€ 7.1 – 8.9 mln.

Baten	Aantal adressen	Richtbedrag / adres	
Subtotaal	241	€ 47.000	€ 11.3 mln.
Saldo			€ 2.5 – 4.2 mln.

Het inpassen van deze maatregel leidt tot een aantal knelpunten. Zo moet de Cremerstraat gedurende langere tijd deels worden afgesloten en moeten kabels en leidingen worden omgelegd. Voor het realiseren van met name het A-deel van de maatregel dienen verder enkele bomen te worden verwijderd, gezien het ruimtebeslag voor realisatie van de maatregel.

8.5 Subgebied 2 (Westplein)

In een deel van subgebied 2 (Westplein) is er een overschrijding in de plansituatie in het in aanbouw zijnde Stads kantoor, zie Figuur 8-6.



Figuur 8-6 Locatie overschrijding, subgebied Westplein

Meetlocaties zijn gearceerd weergegeven, de locatie met overschrijding is rood gearceerd. Er is 1 adres met een overschrijding, het in aanbouw zijnde Stads kantoor. Dit gebouw heeft een kantoorbestemming dat ruimte biedt aan circa 2500 werkplekken.

8.5.1. Onderzochte maatregelen

Voor het gedeelte van dit subgebied wat niet voldoet is een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. In dit onderzoek is gefocust op een aantal maatregelen aan de bron (het spoor) en de transmissie (bodem). Voor de transmissie maatregelen is slechts een locatie mogelijk, direct naast het nieuw te bouwen spoor, zie ook Figuur 8-6. Maatregelen aan de bron worden toegepast op de sporen die mogelijk voor overschrijdingen zorgen. In dit geval zijn dat de twee meest dichtbij gelegen sporen voor goederenverkeer. De locaties voor maatregelen zijn weergegeven in Figuur 8-6. Voor maatregelen in het spoor bedraagt de vereiste lengte 370 meter, voor maatregelen aan de transmissie bedraagt de lengte 126 meter.

In Tabel 8-3 zijn de maatregelen uit paragraaf 8.2 weergegeven, met daarbij een indicatie van de uitvoerbaarheid (realiseerbaarheid en inpasbaarheid), verwachte effectiviteit en de kosten per werkplek voor de locatie met een overschrijding in dit subgebied. Het gebouw biedt ruimte voor ca. 2500 werkplekken. Maatregelen die negatief (-) of nagenoeg geen effect (0) scoren op effectiviteit of negatief scoren op uitvoerbaarheid en/of kosten, worden niet nader onderzocht.

Tabel 8-3 Mogelijke trillingsmaatregelen Westplein

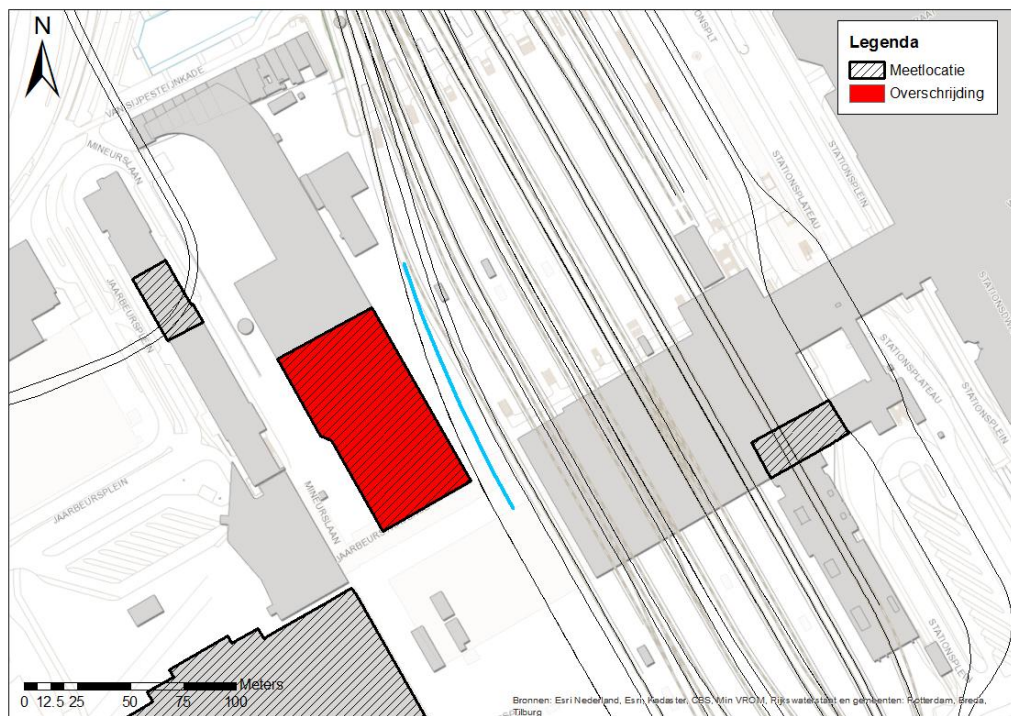
	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per werkpl.	Nader onderzoeken
Bronmaatregelen				
Railpads	--	0	430 - 578 €	nee
Under sleeper pads	--	0	474 - 592 €	nee
Ballastmatten	--	0	592 - 785 €	nee
Floating slab track	--	+	1.939 - 2.842 €	nee
Aanpassing dwarsliggers	--	0	459 - 2.635 €	nee
Aanpassing spoorligging	--	0		nee
Aanpassing aan voertuigen				nee
Transmissiemaatregelen				
OTC	+	++	250 - 1.664 €	ja
Beklede OTC	0	++	370 - 1.820 €	ja
Sleuf tussen twee damwanden	--	+	297 - 2.252 €	ja
Sloot aanleggen of verdiepen	--	+	58 - 520 €	nee
Aanpassen bodem	--	+	740 - 5.476 €	nee
Aanpassen spoortalud				nee
Ontvangermaatregelen				
Amoveren	--	++	40.000 - 80.000 €	nee
Verstijven van vloeren en muren	--	0	1.200 - 8.000 €	nee
Inpakken van fundering	--	+	200 - 2.000 €	nee
Tuned Mass Damper	+	--	40 - 400 €	nee

Omschrijving per categorie			
Kleurcode	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw
--	Niet uitvoerbaar	Sterk negatief effect	Kosten zijn hoger dan richtbedrag
-	Zeer moeilijk uitvoerbaar	Licht negatief effect	
0	Moeilijk uitvoerbaar	Geen effect	Kosten kunnen hoger zijn dan richtbedrag
+	Relatief eenvoudig uitvoerbaar	Licht positief effect	
++	Zeer eenvoudig uitvoerbaar	Sterk positief effect	Kosten zijn lager dan richtbedrag
	Niet van toepassing	Niet van toepassing	

Voor deze locatie zijn diverse types trillingsschermen onderzocht.

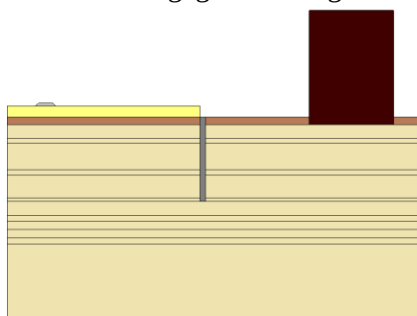
8.5.2. Voorgestelde maatregel

De voorgestelde maatregellocatie bevindt zich in het in nog niet gerealiseerde nieuwe perron, zie Figuur 8-7. De andere beschouwde maatregellocaties leiden tot hogere kosten door het buiten dienst nemen van de sporen.



Figuur 8-7 Voorgestelde maatregellocatie in subgebied Westplein

De minst kostbare maatregel met voldoende effect is een trillingsscherm van beton van 16.5 meter diep en een breedte van 1.0 meter. Een doorsnede van het gebruikte 3D-model is weergegeven in Figuur 8-8.



Figuur 8-8 Doorsnede van het 3D-model van de voorgestelde maatregel, een trillingsscherm van beton van 16.5 m diep en 1.0 m breed

De kosten-batentabel van de voorgestelde maatregel is weergegeven in Tabel 8-4. Door het nemen van de voorgestelde maatregel neemt het aantal adressen met een overschrijding af van 1 naar 0 gebouwen en van 2500 werkplekken naar 0. Uit de kosten-batentabel blijkt dat de voorgestelde maatregel niet kosteneffectief is.

Tabel 8-4 Kosten-batentabel voor subgebied Westplein

Kosten	Kosten per meter	Lengte maatregel	Totaal
Subtotaal	€ 25.000 – 29.000	126 m	€ 3.2 – 3.6 mln.

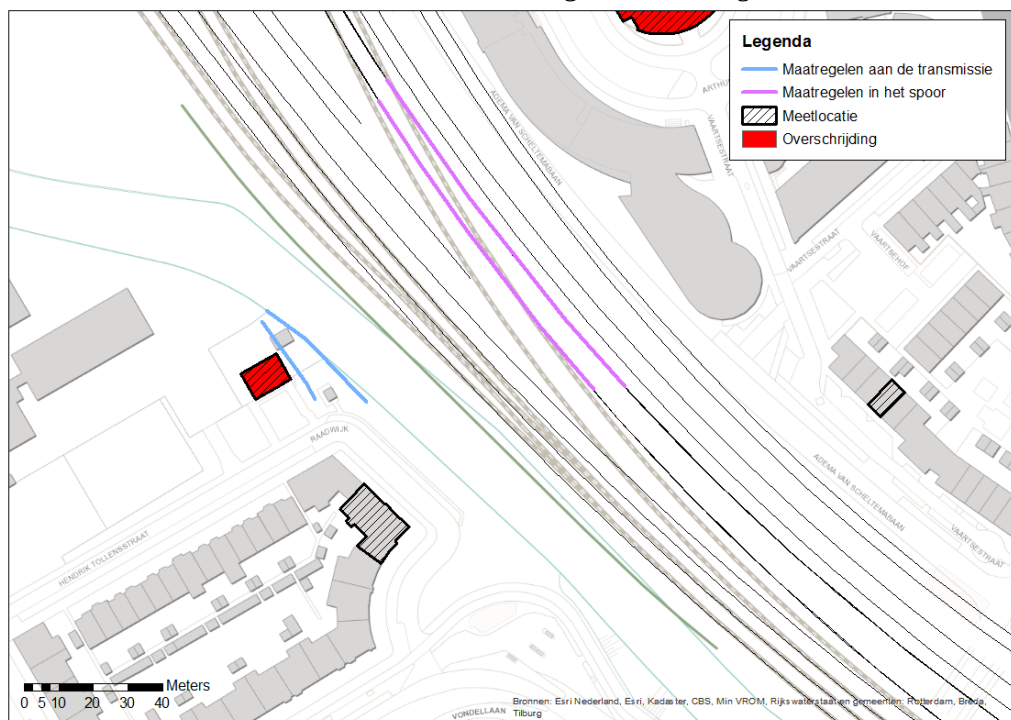
Baten	Aantal werkplekken	Richtbedrag / werkplek	
Subtotaal	2500	€ 500	€ 1.25 mln.
Saldo			- € 2.35 – 1.95 mln.

Naast de bovengenoemde standaard bouwkosten van deze maatregel, kan het te investeren bedrag voor maatregelen aanzienlijk hoger uitvallen. Zo moeten de twee meest dichtbijgelegen sporen gedurende langere tijd buiten dienst worden gesteld. In het bepalen van de kosten van de maatregelen is geen rekening gehouden met de kosten van eventuele (gedeeltelijke) buitendienststellingen, deze kosten kunnen aanzienlijk oplopen.

Verder zijn er risico's ten aanzien van de uitvoering van de maatregel. Door de uitbreiding van de OV-terminal van Utrecht Centraal, staan er op diverse locaties op het nieuw te bouwen perron poeren. Het scherm moet daar tussenin worden gerealiseerd, zonder schade aan de bestaande poeren toe te brengen. Dit is niet mogelijk met de diepwandmethode, waarmee een betonnen trillingsscherm doorgaans wordt gerealiseerd. Ook de benodigde ruimte om een dergelijk betonnen trillingsscherm te realiseren ontbreekt. Er zal dus moeten worden uitgeweken naar een afwijkende realisatiemethode voor dit trillingsscherm.

8.6 Subgebied 3 (Raadwijk/Hendrik Tollensstraat)

In een deel van subgebied 3 (Raadwijk/Hendrik Tollensstraat) is er een overschrijding in de plansituatie. Op basis van het nauwkeurige trillingsmodel, waarbij de resultaten zijn gecorrigeerd met behulp van de metingen, kan per gebouw worden aangegeven of de locatie wel of niet voldoet aan het beoordelingskader, zie Figuur 8-9.



Figuur 8-9 Locaties met overschrijdingen, subgebied Raadwijk/Hendrik Tollensstraat

Meetlocaties zijn gearceerd weergegeven en locaties met een overschrijding zijn rood weergegeven. Er zijn 4 adressen met een overschrijding.

8.6.1. Onderzochte maatregelen

Voor het gedeelte van dit subgebied wat niet voldoet is een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. In dit onderzoek is gefocust op een aantal maatregelen aan de bron (het spoor) en de transmissie (bodem). Voor de transmissiemaatregelen zijn twee locaties beschouwd, zie ook Figuur 8-9: voor de woningen langs en aan de rand van de Kruisvaart. Maatregelen aan de bron worden toegepast op de sporen die mogelijk voor overschrijdingen zorgen. In dit geval zijn dat de twee sporen waarop het goederenverkeer rijdt. De locaties voor maatregelen zijn weergegeven in Figuur 8-9. Voor maatregelen in het spoor bedraagt de totale vereiste lengte 215 meter, voor maatregelen aan de transmissie varieert de lengte tussen de 30 en 40 meter, afhankelijk van de afstand tot de bebouwing.

In Tabel 8-5 zijn de maatregelen uit paragraaf 8.2 weergegeven, met daarbij een indicatie van de uitvoerbaarheid (realiseerbaarheid en inpasbaarheid), verwachte effectiviteit en de kosten per gebouw voor de 4 adressen met een overschrijding in dit subgebied. Maatregelen die negatief (-) of nagenoeg geen effect (0) scoren op effectiviteit of negatief scoren op uitvoerbaarheid en/of kosten, worden niet nader onderzocht.

Tabel 8-5 Mogelijke trillingsmaatregelen Raadwijk/Hendrik Tollensstraat

	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw	Nader onderzoeken
Bronmaatregelen				
Railpads	+	0	157 - 211 k€	nee
Under sleeper pads	+	0	173 - 216 k€	nee
Ballastmatten	+	0	216 - 287 k€	nee
Floating slab track	-	+	708 - 1.037 k€	nee
Aanpassing dwarsliggers	+	0	168 - 962 k€	nee
Aanpassing spoorligging	+	0		nee
Aanpassing aan voertuigen				nee
Transmissiemaatregelen				
OTC	+	+	47 - 312 k€	ja
Beklede OTC	-	+	70 - 342 k€	nee
Sleuf tussen twee damwanden	-	+	56 - 423 k€	nee
Sloot aanleggen of verdiepen	-	+	11 - 98 k€	nee
Aanpassen bodem	+	+	270 - 1998 k€	nee
Aanpassen spoortalud	0	0	77 - 312 k€	nee
Ontvangermaatregelen				
Amoveren	--	++	150 - 1.000 k€	nee
Verstijven van vloeren en muren	-	+	21 - 85 k€	nee
Inpakken van fundering	-	+	40 - 90 k€	nee
Tuned Mass Damper	+	--	10 - 30 k€	nee

Omschrijving per categorie			
Kleurcode	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw
--	Niet uitvoerbaar	Sterk negatief effect	Kosten zijn hoger dan richtbedrag
-	Zeer moeilijk uitvoerbaar	Licht negatief effect	
0	Moeilijk uitvoerbaar	Geen effect	Kosten kunnen hoger zijn dan richtbedrag
+	Relatief eenvoudig uitvoerbaar	Licht positief effect	
++	Zeer eenvoudig uitvoerbaar	Sterk positief effect	Kosten zijn lager dan richtbedrag
	Niet van toepassing	Niet van toepassing	

Voor deze locatie zijn diverse types trillingsschermen onderzocht op de twee aangegeven locaties.

8.6.2. Voorgestelde maatregel

Om de uitbreiding van de sporen in het kader van het project *Sporen in Utrecht* te realiseren is aan de spoorzijde van de Kruisvaart een keerwand met geluidsscherm gerealiseerd. Deze keerwand, en ook de Kruisvaart, reduceren de trillingen op deze locatie, met name in het hoogfrequente gebied. Hierdoor resteren voornamelijk laagfrequente trillingen in de gebouwen met overschrijdingen. Deze laagfrequente trillingen zijn niet of slechts met zeer kostbare maatregelen te reduceren.

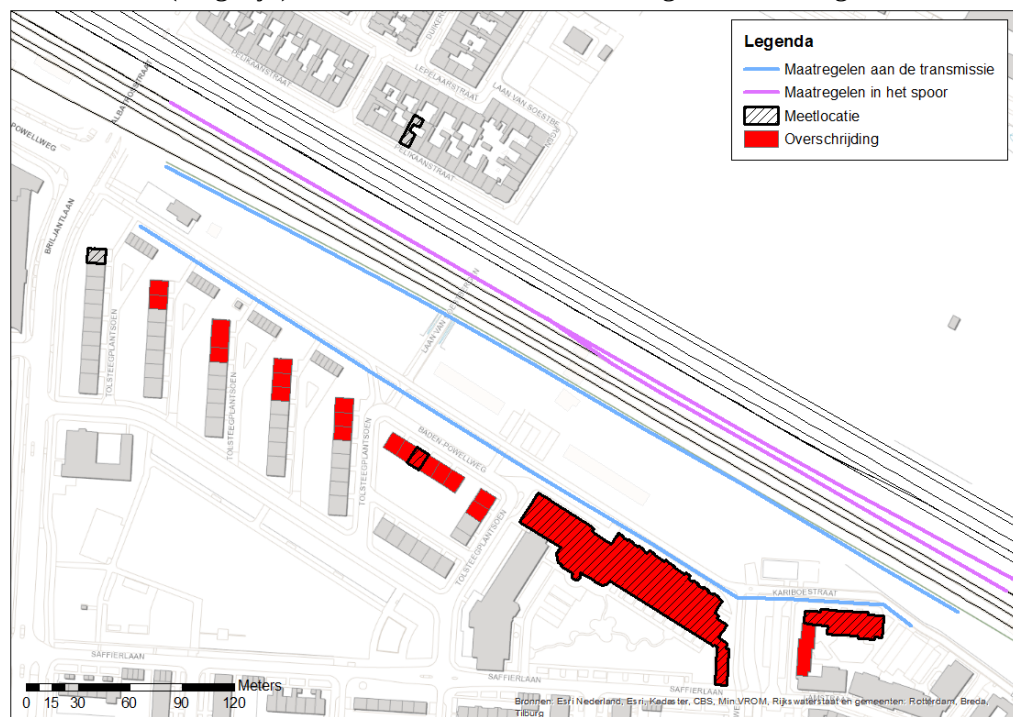
Op deze locatie zijn geen maatregelen gevonden die kosteneffectief zijn. De meest effectieve maatregel, het vervangen van de huidige damwanden langs de Kruisvaart door diepere exemplaren, reduceert de trillingssterkte onvoldoende en heeft al een kostprijs van meer dan € 60.000 per woning.

Behalve dat deze maatregel niet kosteneffectief is, leidt het inpassen tot een aantal knelpunten. Zo moeten kabels en leidingen worden verlegd en dient de straat Raadwijk gedurende langere tijd te worden afgesloten. Het realiseren van het betonnen

trillingsscherm zou met een trillings- en zettingsarme methode plaats moeten vinden, om schade aan de woningen te voorkomen.

8.7 Subgebied 4 (Tolsteegplantsoen (Saffierlaan))

In een deel van subgebied 4 (Tolsteegplantsoen) zijn er overschrijdingen in de plansituatie. Op basis van het nauwkeurige trillingsmodel, waarbij de resultaten zijn gecorrigeerd met behulp van de metingen, kan per gebouw worden aangegeven of de locatie wel of (mogelijk) niet voldoet aan het beoordelingskader, zie Figuur 8-10.



Figuur 8-10 Locaties met overschrijdingen, subgebied Tolsteegplantsoen (Saffierlaan)

Er zijn metingen uitgevoerd in de gearceerde gebouwen. Bij een deel van het Tolsteegplantsoen, de Kariboestraat en de Saffierlaan (bovenste verdieping van het gebouw) zijn er overschrijdingen van het beoordelingskader. Er zijn 131 adressen met een overschrijding.

8.7.1. Onderzochte maatregelen

Voor het gedeelte van dit subgebied wat niet voldoet is een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. In dit onderzoek is gefocust op een aantal maatregelen aan de bron (het spoor) en de transmissie (bodem). Voor de transmissie maatregelen zijn twee locaties beschouwd, zie ook Figuur 8-10: voor het gebouw en langs het talud. Maatregelen aan de bron worden toegepast op de sporen die mogelijk voor overschrijdingen zorgen. In dit geval zijn dat de twee sporen waarop het goederenverkeer in zuidelijke richting rijdt. De locaties voor maatregelen zijn weergegeven in Figuur 8-10. Voor maatregelen in het spoor bedraagt de totale vereiste lengte 870 meter, voor maatregelen aan de transmissie varieert de lengte tussen de 510 en 525 meter, afhankelijk van de afstand tot de bebouwing.

In Tabel 8-6 zijn de maatregelen uit paragraaf 8.2 weergegeven, met daarbij een indicatie van de uitvoerbaarheid (realiseerbaarheid en inpasbaarheid), verwachte effectiviteit en de kosten per gebouw voor de 131 adressen met een overschrijding in dit subgebied. Maatregelen die negatief (-) of nagenoeg geen effect (0) scoren op effectiviteit of negatief scoren op uitvoerbaarheid en/of kosten, worden niet nader onderzocht.

Tabel 8-6 Mogelijke trillingsmaatregelen Tolsteegplantsoen (Saffierlaan)

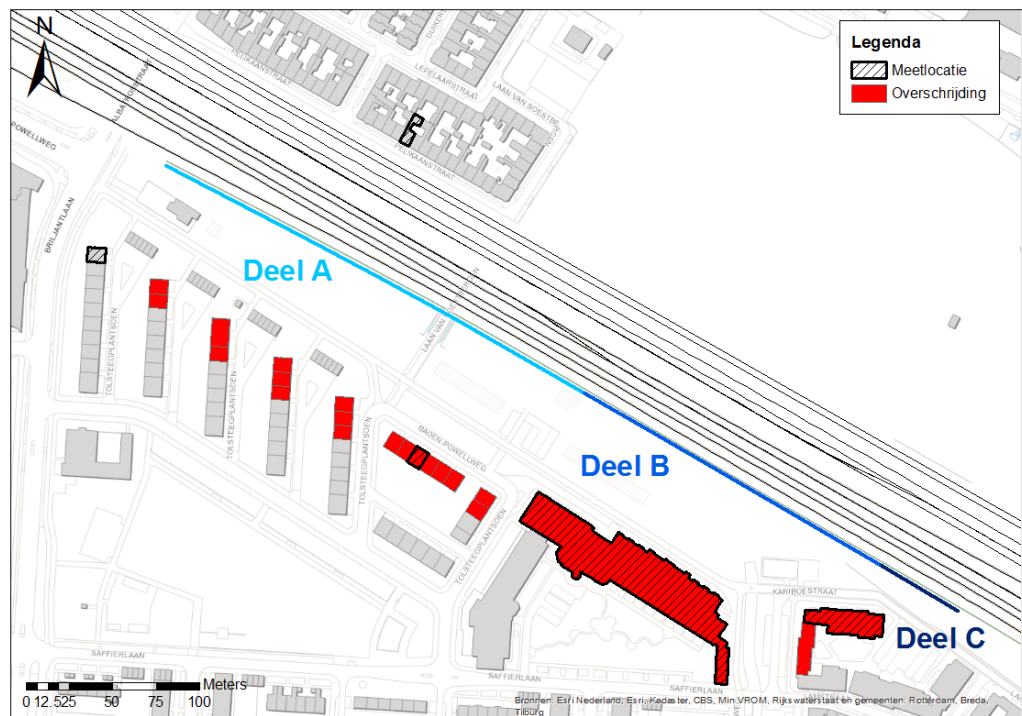
	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw	Nader onderzoeken
Bronmaatregelen				
Railpads	--	0	18 - 25 k€	nee
Under sleeper pads	--	0	20 - 25 k€	nee
Ballastmatten	--	0	25 - 33 k€	nee
Floating slab track	--	+	81 - 119 k€	nee
Aanpassing dwarsliggers	--	0	20 - 111 k€	nee
Aanpassing spoorligging	--	0		nee
Aanpassing aan voertuigen				nee
Transmissiemaatregelen				
OTC	++	++	19 - 125 k€	ja
Beklede OTC	++	++	28 - 137 k€	ja
Sleuf tussen twee damwanden	+	+	23 - 169 k€	ja
Sloot aanleggen of verdiepen	+	+	5 - 39 k€	ja
Aanpassen bodem	--	+	31 - 229 k€	nee
Aanpassen spoortalud	--	+	31 - 125 k€	nee
Ontvangermaatregelen				
Amoveren	--	++	150 - 1.000 k€	nee
Verstijven van vloeren en muren	-	+	21 - 85 k€	nee
Inpakken van fundering	-	+	40 - 90 k€	nee
Tuned Mass Damper	+	--	10 - 30 k€	nee

Omschrijving per categorie			
Kleurcode	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw
--	Niet uitvoerbaar	Sterk negatief effect	Kosten zijn hoger dan richtbedrag
-	Zeer moeilijk uitvoerbaar	Licht negatief effect	
0	Moeilijk uitvoerbaar	Geen effect	Kosten kunnen hoger zijn dan richtbedrag
+	Relatief eenvoudig uitvoerbaar	Licht positief effect	
++	Zeer eenvoudig uitvoerbaar	Sterk positief effect	Kosten zijn lager dan richtbedrag
	Niet van toepassing	Niet van toepassing	

Voor deze locatie zijn diverse types trillingsschermen, een sloot en een sleuf tussen twee damwanden onderzocht op de twee aangegeven locaties.

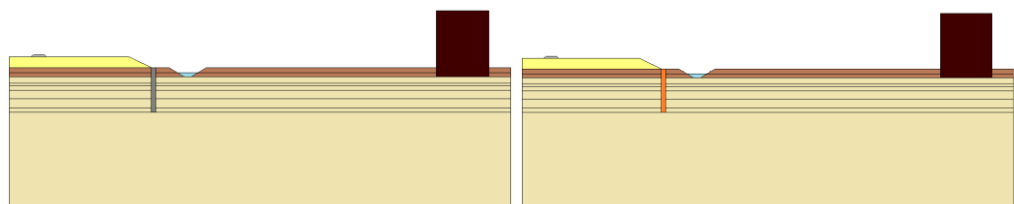
8.7.2. Voorgestelde maatregel

Gezien de verschillen in bodemopbouw, afstand tot het spoor en gebouweigenschappen, is het geclusterde gebied opgedeeld in drie delen, een A-, B- en C-deel, zie Figuur 8-11. De voorgestelde maatregellocaties bevinden zich in de teen van het talud. De andere beschouwde maatregellocaties leiden tot hogere kosten of minder effectieve maatregelen.



Figuur 8-11 Voorgestelde maatregellocatie in subgebied Tolsteegplantsoen (Saffierlaan)

De minst kostbare maatregel met voldoende effect in het A-deel is een trillingsscherm van beton van 10.1 meter diep en 1.0 meter breed. Voor het B- en C-deel voldoet een trillingsscherm van jet-grout met een diepte van 10.1 meter en een breedte van 1.0 meter. Doorsneden van de gebruikte 3D-modellen zijn weergegeven in Figuur 8-12.



Figuur 8-12 Doorsneden van de 3D-modellen van de voorgestelde maatregel. Links een trillingsscherm van beton (10.1 m diep, 1.0 m breed) in deel A, rechts een trillingsscherm van jet-grout (10.1 m diep, 1.0 m breed) in deel B en C

De kosten-batentabel van de voorgestelde maatregelen is weergegeven in Tabel 8-7. Door het nemen van de voorgestelde maatregelen neemt het aantal gebouwen met een overschrijding af van 131 naar 0. Uit de kosten-batentabel blijkt dat de voorgestelde maatregelen kosteneffectief zijn. Het bedrag per woning voor de voorgestelde maatregelen varieert tussen de € 46.000 en € 60.000.

Tabel 8-7 Kosten-batentabel voor subgebied Tolsteegplantsoen (Saffierlaan)

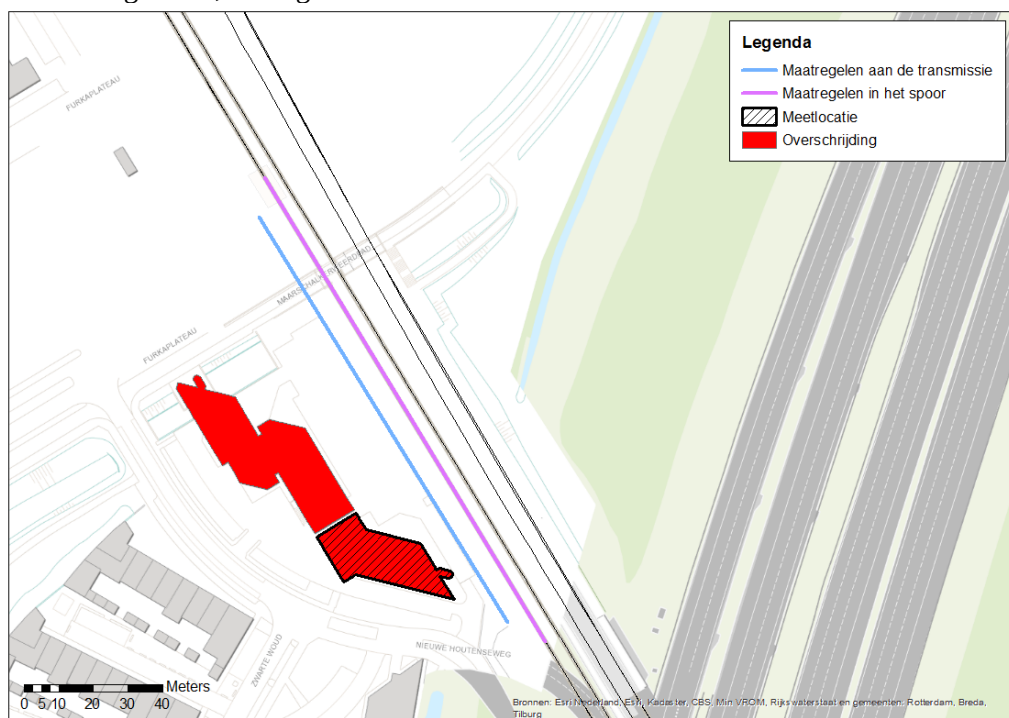
Kosten	Kosten per meter	Lengte maatregel	Totaal
Deel A	€ 16.000 – 20.000	279 m	€ 4.7 – 5.6 mln.
Deel B	€ 5.000 – 10.000	193 m	€ 1.2 – 1.8 mln.
Deel C	€ 5.000 – 10.000	53 m	€ 0.3 – 0.5 mln.
Subtotaal		516 m	€ 6.1 – 7.9 mln.

Baten	Aantal adressen	Richtbedrag / adres	
Subtotaal	131	€ 47.000	€ 6.2 mln.
Saldo			- € 1.7 – +0.2 mln.

De realisatie van deze maatregel leidt tot overlast voor de omgeving. Het park voor de woningen wordt gedurende langere tijd gebruikt als bouwterrein.

8.8 Subgebied 7 (Nieuwe Houtenseweg noord/De Wadden)

In een deel van subgebied 7 (Nieuwe Houtenseweg noord/De Wadden) is er een kans op overschrijdingen in de plansituatie. Op basis van het nauwkeurige trillingsmodel, waarbij de resultaten zijn gecorrigeerd met behulp van de metingen, kan per gebouw worden aangegeven of de locatie wel of mogelijk niet voldoet aan het beoordelingskader, zie Figuur 8-13.



Figuur 8-13 Locaties met overschrijdingen, subgebied Nieuwe Houtenseweg noord/De Wadden

Er zijn metingen uitgevoerd in het gearceerde gebouw. Gebouwen met een kans op een overschrijding zijn rood gearceerd. Er zijn 3 adressen met een overschrijding, al deze gebouwen hebben de bestemming *kantoor*.

8.8.1. Onderzochte maatregelen

Voor het gedeelte van dit subgebied wat niet voldoet is een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. In dit onderzoek is gefocust op een aantal maatregelen aan de bron (het spoor) en de transmissie (bodem). Voor de transmissie maatregelen is, gezien de beperkte ruimte, slechts een locatie beschouwd, zie ook Figuur 8-13.. Maatregelen aan de bron worden toegepast op de sporen die mogelijk voor overschrijdingen zorgen. In dit geval is dat alleen het meest dichtbijgelegen spoor, dit spoor wordt bereden door goederentreinen richting Houten. De locaties voor maatregelen zijn weergegeven in Figuur 8-13. Voor maatregelen in het spoor bedraagt de vereiste lengte 155 meter, voor maatregelen aan de transmissie bedraagt de lengte 137 meter.

In Tabel 8-8 zijn de maatregelen uit paragraaf 8.2 weergegeven, met daarbij een indicatie van de uitvoerbaarheid (realiseerbaarheid en inpasbaarheid), verwachte effectiviteit en de kosten per medewerker voor de 3 adressen met een overschrijding in dit subgebied. De drie gebouwen bieden ruimte voor circa 370 werkplekken. Maatregelen die negatief (-) of nagenoeg geen effect (0) scoren op effectiviteit of negatief scoren op uitvoerbaarheid en/of kosten, worden niet nader onderzocht.

Tabel 8-8 Mogelijke trillingsmaatregelen Nieuwe Houtenseweg noord/De Wadden

	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per werkpl.	Nader onderzoeken
Bronmaatregelen				
Railpads	--	0	1.206 – 1.621 €	nee
Under sleeper pads	--	0	1.330 – 1.663 €	nee
Ballastmatten	--	0	1.663 – 2.203 €	nee
Floating slab track	--	+	5.444 – 7.979 €	nee
Aanpassing dwarsliggers	--	0	1.289 – 7.397 €	nee
Aanpassing spoorligging	--	0		nee
Aanpassing aan voertuigen				nee
Transmissiemaatregelen				
OTC	+	++	1.738 – 11.582 €	nee
Beklede OTC	+	++	2.570 – 12.668 €	nee
Sleuf tussen twee damwanden	+	+	2.064 – 15.672 €	nee
Sloot aanleggen of verdiepen	0	+	595 – 3.620 €	nee
Aanpassen bodem	--	+	2.078 – 15.376 €	nee
Aanpassen spoortalud	-	+	2.824 – 11.582 €	nee
Ontvangermaatregelen				
Amoveren	--	++	27.000 – 110.000 €	nee
Verstijven van vloeren en muren	-	+	2.700 – 11.000 €	nee
Inpakken van fundering	-	+	1.100 – 2.200 €	nee
Tuned Mass Damper	+	--	500 – 1.400 €	nee

Omschrijving per categorie			
Kleurcode	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw
--	Niet uitvoerbaar	Sterk negatief effect	Kosten zijn hoger dan richtbedrag
-	Zeer moeilijk uitvoerbaar	Licht negatief effect	
0	Moeilijk uitvoerbaar	Geen effect	Kosten kunnen hoger zijn dan richtbedrag
+	Relatief eenvoudig uitvoerbaar	Licht positief effect	
++	Zeer eenvoudig uitvoerbaar	Sterk positief effect	Kosten zijn lager dan richtbedrag
	Niet van toepassing	Niet van toepassing	

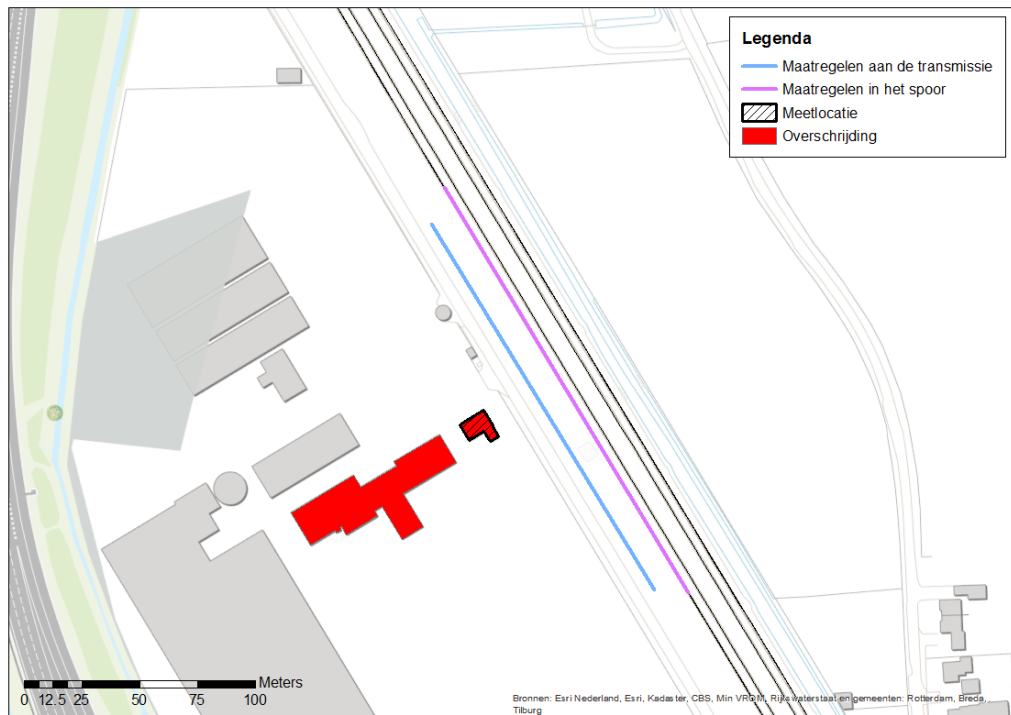
Uit Tabel 8-8 volgt dat er geen kosteneffectieve maatregelen zijn voor deze locatie. Alle maatregelen met voldoende effectiviteit hebben hogere kosten dan € 500 per werkplek.

8.8.2. Voorgestelde maatregel

Voor dit subgebied zijn geen kosteneffectieve maatregelen mogelijk.

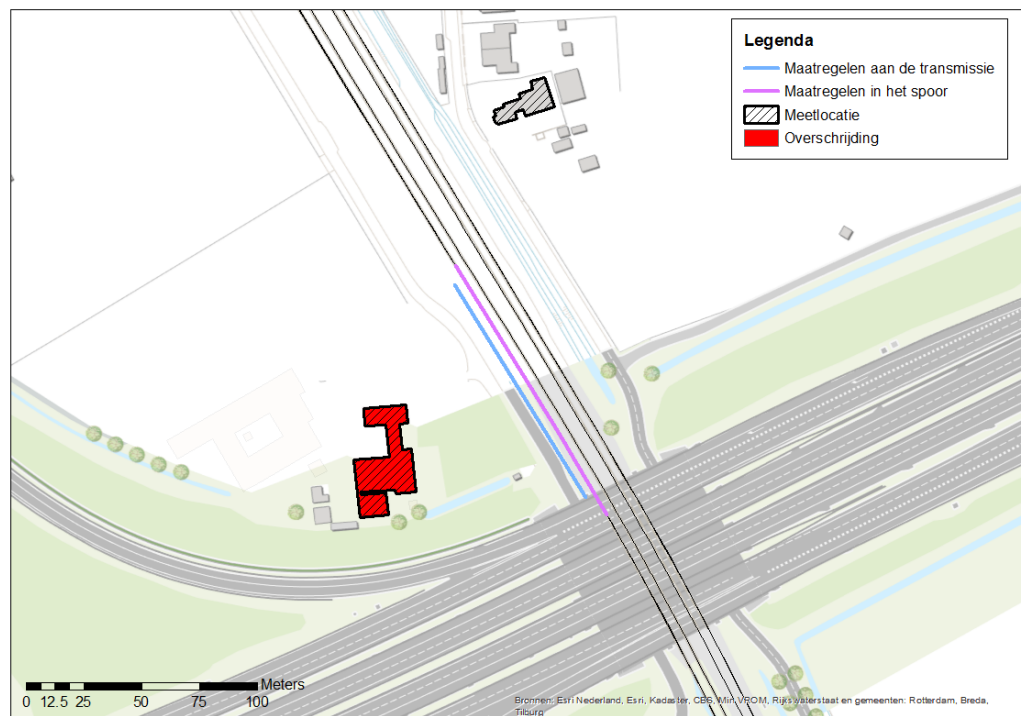
8.9 Subgebied 8 (Nieuwe Houtenseweg zuid/Mereveldseweg)

In twee gedeeltes van subgebied 8 (Nieuwe Houtenseweg zuid/Mereveldseweg) is er een overschrijding in de plansituatie: rond Nieuwe Houtenseweg 27 en rond Nieuwe Houtenseweg 55. Op basis van het nauwkeurige trillingsmodel, waarbij de resultaten zijn gecorrigeerd met behulp van de metingen, kan per gebouw worden aangegeven of de locatie wel of niet voldoet aan het beoordelingskader, zie Figuur 8-14 en Figuur 8-15.



Figuur 8-14 Locaties met overschrijdingen, subgebied Nieuwe Houtenseweg zuid/Mereveldseweg, rond Nieuwe Houtenseweg 27

Er zijn metingen uitgevoerd in het gearceerde gebouw. Er zijn 2 adressen met een overschrijding, deze adressen zijn rood gearceerd. Een van deze gebouwen heeft de bestemming *kantoor*.



Figuur 8-15 Locaties met overschrijdingen, subgebied Nieuwe Houtenseweg zuid/Mereveldseweg, rond Nieuwe Houtenseweg 55

Er zijn metingen uitgevoerd in de gearceerde gebouwen, er is alleen een overschrijding in de meetlocatie, Nieuwe Houtenseweg 55. Het betreft 1 adres.

8.9.1. Onderzochte maatregelen

Voor beide gedeeltes van dit subgebied die niet voldoen is een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. In dit onderzoek is gefocust op een aantal maatregelen aan de bron (het spoor) en de transmissie (bodem). Voor de transmissiemaatregelen is een locatie beschouwd, zie ook Figuur 8-14 en Figuur 8-15: langs het talud. Maatregelen aan de bron worden toegepast op de sporen die mogelijk voor overschrijdingen zorgen. In dit geval is dat het meest dichtbijgelegen spoor, dit spoor wordt bereden door goederentreinen in de richting Houten. De locaties voor maatregelen zijn weergegeven in Figuur 8-14 en Figuur 8-15. Voor maatregelen in het spoor bedraagt de totale vereiste lengte 205 meter bij nummer 27, en 125 meter bij nummer 55. Voor maatregelen aan de transmissie bedraagt de lengte 185 meter bij nummer 27, en 108 meter bij nummer 55.

In Tabel 8-9 zijn de maatregelen uit paragraaf 8.2 weergegeven voor Nieuwe Houtenseweg 27, met daarbij een indicatie van de uitvoerbaarheid (realiseerbaarheid en inpasbaarheid), verwachte effectiviteit en de kosten per gebouw voor de 2 adressen met een overschrijding. Maatregelen die negatief (-) of nagenoeg geen effect (0) scoren op effectiviteit of negatief scoren op uitvoerbaarheid en/of kosten, worden niet nader onderzocht.

Tabel 8-9 *Mogelijke trillingsmaatregelen bij Nieuwe Houtenseweg 27*

	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw	Nader onderzoeken
Bronmaatregelen				
Railpads	--	0	298 - 400 k€	nee
Under sleeper pads	--	0	328 - 410 k€	nee
Ballastmatten	--	0	410 - 544 k€	nee
Floating slab track	--	+	1.343 – 1.968 k€	nee
Aanpassing dwarsliggers	--	0	318 – 1.825 k€	nee
Aanpassing spoorligging	--	0		nee
Aanpassing aan voertuigen				nee
Transmissie maatregelen				
OTC	++	++	444 – 2.960 k€	nee
Beklede OTC	++	++	657 – 3.238 k€	nee
Sleuf tussen twee damwanden	++	+	528 – 4.006 k€	nee
Sloot aanleggen of verdiepen	++	+	102 - 925 k€	nee
Aanpassen bodem	--	+	513 – 3.793 k€	nee
Aanpassen spoortalud	0	+	722 – 2.960 k€	nee
Ontvangermaatregelen				
Amoveren	--	++	150 – 1.000 k€	nee
Verstijven van vloeren en muren	-	+	21 - 85 k€	nee
Inpakken van fundering	-	+	40 - 90 k€	nee
Tuned Mass Damper	+	--	10 - 30 k€	nee

Omschrijving per categorie			
Kleurcode	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw
--	Niet uitvoerbaar	Sterk negatief effect	Kosten zijn hoger dan richtbedrag
-	Zeer moeilijk uitvoerbaar	Licht negatief effect	
0	Moeilijk uitvoerbaar	Geen effect	Kosten kunnen hoger zijn dan richtbedrag
+	Relatief eenvoudig uitvoerbaar	Licht positief effect	
++	Zeer eenvoudig uitvoerbaar	Sterk positief effect	Kosten zijn lager dan richtbedrag
	Niet van toepassing	Niet van toepassing	

Uit Tabel 8-9 volgt dat er geen kosteneffectieve maatregelen zijn voor deze locatie. Alle maatregelen met voldoende effectiviteit hebben hogere kosten dan het richtbedrag van € 47.000 per gebouw met een overschrijding.

In Tabel 8-10 zijn de maatregelen uit paragraaf 8.2 weergegeven voor Nieuwe Houtenseweg 55, met daarbij een indicatie van de uitvoerbaarheid (realiseerbaarheid en inpasbaarheid), verwachte effectiviteit en de kosten per gebouw voor het adres met een overschrijding in dit subgebied. Maatregelen die negatief (-) of nagenoeg geen effect (0) scoren op effectiviteit of negatief scoren op uitvoerbaarheid en/of kosten, worden niet nader onderzocht.

Tabel 8-10 Mogelijke trillingsmaatregelen bij Nieuwe Houtenseweg 55

	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw	Nader onderzoeken
Bronmaatregelen				
Railpads	--	0	363 - 488 k€	nee
Under sleeper pads	--	0	400 - 500 k€	nee
Ballastmatten	--	0	500 - 663 k€	nee
Floating slab track	--	+	1.638 – 2.400 k€	nee
Aanpassing dwarsliggers	--	0	388 – 2.225 k€	nee
Aanpassing spoorligging	--	0		nee
Aanpassing aan voertuigen				nee
Transmissiemaatregelen				
OTC	++	++	504 – 3.360 k€	nee
Beklede OTC	++	++	746 – 3.675 k€	nee
Sleuf tussen twee damwanden	++	+	599 – 4.547 k€	nee
Sloot aanleggen of verdiepen	++	+	116 – 1.050 k€	nee
Aanpassen bodem	--	+	625 – 4.625 k€	nee
Aanpassen spoortalud	0	+	819 – 3.360 k€	nee
Ontvangermaatregelen				
Amoveren	--	++	150 – 1.000 k€	nee
Verstijven van vloeren en muren	-	+	21 - 85 k€	nee
Inpakken van fundering	-	+	40 - 90 k€	nee
Tuned Mass Damper	+	--	10 - 30 k€	nee

Omschrijving per categorie			
Kleurcode	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw
--	Niet uitvoerbaar	Sterk negatief effect	Kosten zijn hoger dan richtbedrag
-	Zeer moeilijk uitvoerbaar	Licht negatief effect	
0	Moeilijk uitvoerbaar	Geen effect	Kosten kunnen hoger zijn dan richtbedrag
+	Relatief eenvoudig uitvoerbaar	Licht positief effect	
++	Zeer eenvoudig uitvoerbaar	Sterk positief effect	Kosten zijn lager dan richtbedrag
	Niet van toepassing	Niet van toepassing	

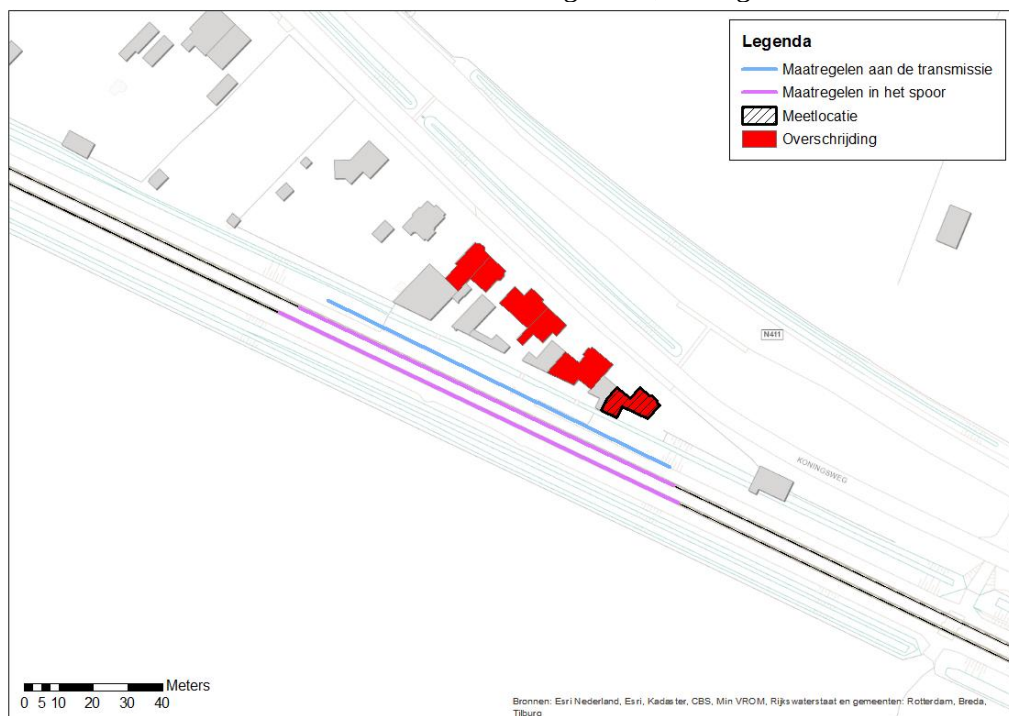
Uit Tabel 8-10 volgt dat er geen kosteneffectieve maatregelen zijn voor deze locatie. Alle maatregelen met voldoende effectiviteit hebben hogere kosten dan het richtbedrag van € 47.000 per gebouw met een overschrijding.

8.9.2. Voorgestelde maatregel

Voor dit subgebied zijn geen kosteneffectieve maatregelen mogelijk.

8.10 Subgebied 12 (Koningsweg)

In een deel van subgebied 12 (Koningsweg) neemt de trillingsintensiteit in de plansituatie toe. Op basis van het nauwkeurige trillingsmodel, waarbij de resultaten zijn gecorrigeerd met behulp van de metingen, kan per gebouw worden aangegeven of de locatie wel of niet voldoet aan het beoordelingskader, zie Figuur 8-16.



Figuur 8-16 Locaties met overschrijdingen, subgebied Koningsweg

Er zijn metingen uitgevoerd in het gearceerde gebouw. Gebouwen met een overschrijding zijn rood gearceerd. Er zijn 6 adressen met een overschrijding.

8.10.1. Onderzochte maatregelen

Voor het gedeelte van dit subgebied wat niet voldoet is een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. In dit onderzoek is gefocust op een aantal maatregelen aan de bron (het spoor) en de transmissie (bodem). Voor de transmissiemaatregelen is, gezien de beperkte ruimte, slechts een locatie beschouwd, zie ook Figuur 8-16. Maatregelen aan de bron worden toegepast op de sporen die mogelijk voor overschrijdingen zorgen. In dit geval zijn dat beide sporen. De locaties voor maatregelen zijn weergegeven in Figuur 8-16. Voor maatregelen in het spoor bedraagt de vereiste lengte 240 meter, voor maatregelen aan de transmissie bedraagt de lengte 110 meter.

In Tabel 8-11 zijn de maatregelen uit paragraaf 8.2 weergegeven, met daarbij een indicatie van de uitvoerbaarheid (realiseerbaarheid en inpasbaarheid), verwachte effectiviteit en de kosten per gebouw voor de 6 adressen met een overschrijding in dit subgebied. Maatregelen die negatief (-) of nagenoeg geen effect (0) scoren op effectiviteit of negatief scoren op uitvoerbaarheid en/of kosten, worden niet nader onderzocht.

Tabel 8-11 Mogelijke trillingsmaatregelen Koningsweg

	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw	Nader onderzoeken
Bronmaatregelen				
Railpads	--	0	116 - 156 k€	nee
Under sleeper pads	--	0	128 - 160 k€	nee
Ballastmatten	--	0	160 - 212 k€	nee
Floating slab track	--	+	524 - 768 k€	nee
Aanpassing dwarsliggers	--	0	124 - 712 k€	nee
Aanpassing spoorligging	--	0		nee
Aanpassing aan voertuigen				nee
Transmissiemaatregelen				
OTC	+	++	88 - 587 k€	nee
Beklede OTC	+	++	131 - 642 k€	nee
Sleuf tussen twee damwanden	+	+	105 - 794 k€	nee
Sloot aanleggen of verdiepen	-	+	21 - 184 k€	nee
Aanpassen bodem	--	+	200 - 1.480 k€	nee
Aanpassen spoortalud	+	+	143 - 587 k€	nee
Ontvangermaatregelen				
Amoveren	--	++	150 - 1.000 k€	nee
Verstijven van vloeren en muren	-	+	21 - 85 k€	nee
Inpakken van fundering	-	+	40 - 90 k€	nee
Tuned Mass Damper	+	--	10 - 30 k€	nee

Omschrijving per categorie			
Kleurcode	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw
--	Niet uitvoerbaar	Sterk negatief effect	Kosten zijn hoger dan richtbedrag
-	Zeer moeilijk uitvoerbaar	Licht negatief effect	
0	Moeilijk uitvoerbaar	Geen effect	Kosten kunnen hoger zijn dan richtbedrag
+	Relatief eenvoudig uitvoerbaar	Licht positief effect	
++	Zeer eenvoudig uitvoerbaar	Sterk positief effect	Kosten zijn lager dan richtbedrag
	Niet van toepassing	Niet van toepassing	

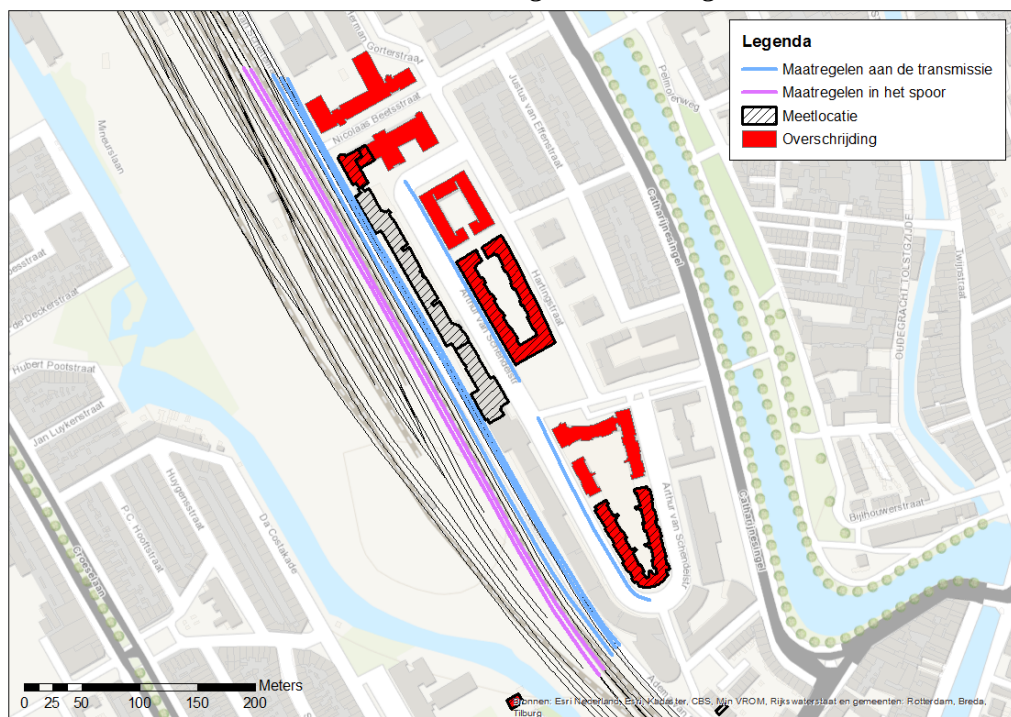
Uit Tabel 8-11 volgt dat er geen kosteneffectieve maatregelen zijn voor deze locatie. Alle maatregelen met voldoende effectiviteit hebben hogere kosten dan het richtbedrag van € 47.000 per gebouw met een overschrijding.

8.10.2. Voorgestelde maatregel

Voor dit subgebied zijn geen kosteneffectieve maatregelen mogelijk.

8.11 Subgebied 17 (Nicolaas Beetsstraat)

In een deel van subgebied 17 (Nicolaas Beetsstraat) zijn er overschrijdingen in de plansituatie. Op basis van het nauwkeurige trillingsmodel, waarbij de resultaten zijn gecorrigeerd met behulp van de metingen, kan per gebouw worden aangegeven of de locatie wel of niet voldoet aan het beoordelingskader, zie Figuur 8-17.



Figuur 8-17 Locaties met overschrijdingen, subgebied Nicolaas Beetsstraat

Er zijn metingen uitgevoerd in de gearceerde gebouwen. Locatie met een overschrijding zijn rood gearceerd. Er zijn 479 adressen met een overschrijding, waarvan 4 met een bestemming *kantoor*.

8.11.1. Onderzochte maatregelen

Voor het gedeelte van dit subgebied wat niet voldoet is een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. In dit onderzoek is gefocust op een aantal maatregelen aan de bron (het spoor) en de transmissie (bodem). Voor de transmissiemaatregelen zijn vier locaties beschouwd, zie ook Figuur 8-17: in de teen van het talud, onder de nieuw te realiseren *Uithoflijn*, tussen de bebouwing en de *Uithoflijn* en in de Arthur van Schendelstraat. Maatregelen aan de bron worden toegepast op de sporen die mogelijk voor overschrijdingen zorgen. In dit geval zijn dat de twee sporen waarop het goederenverkeer rijdt. De locaties voor maatregelen zijn weergegeven in Figuur 8-17. Voor maatregelen in het spoor bedraagt de totale vereiste lengte 1210 meter, voor maatregelen aan de transmissie varieert de lengte tussen de 570 en 585 meter, afhankelijk van de locatie van de maatregel. De lengte van de potentiële maatregellocatie in de Arthur van Schendelstraat bedraagt 390 meter.

In Tabel 8-12 zijn de maatregelen uit paragraaf 8.2 weergegeven, met daarbij een indicatie van de uitvoerbaarheid (realiseerbaarheid en inpasbaarheid), verwachte effectiviteit en de kosten per gebouw voor de 490 adressen met een overschrijding in dit subgebied. Maatregelen die negatief (-) of nagenoeg geen effect (0) scoren op effectiviteit of negatief scoren op uitvoerbaarheid en/of kosten, worden niet nader onderzocht.

Tabel 8-12 Mogelijke trillingsmaatregelen Nicolaas Beetsstraat

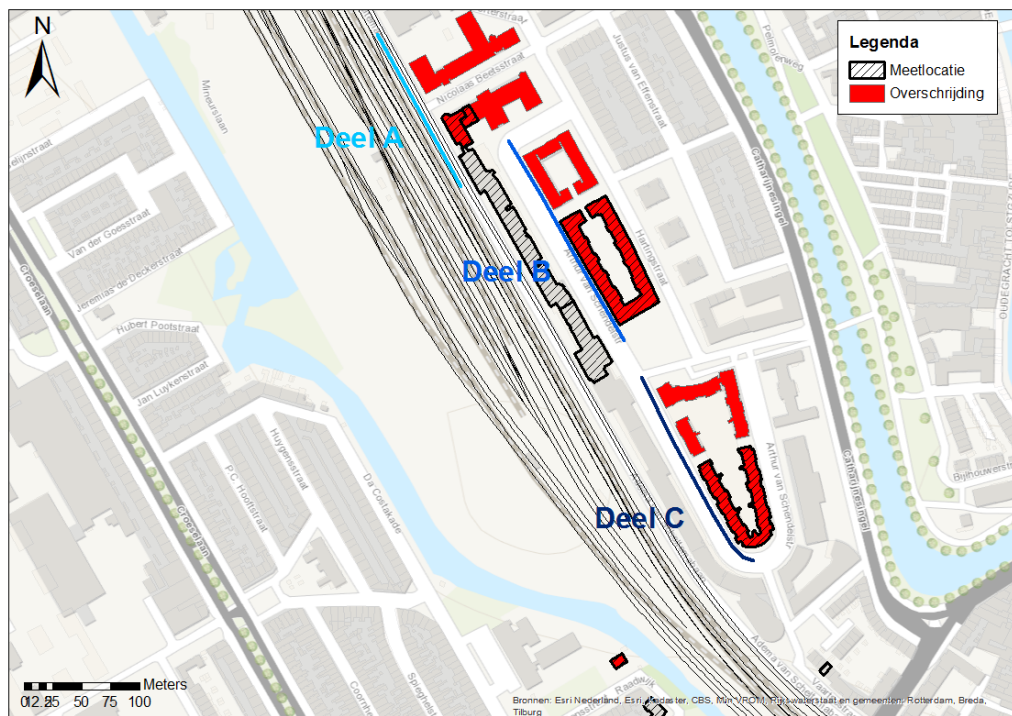
	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw	Nader onderzoeken
Bronmaatregelen				
Railpads	+	0	8 - 10 k€	nee
Under sleeper pads	+	0	9 - 11 k€	nee
Ballastmatten	+	0	11 - 14 k€	nee
Floating slab track	-	+	34 - 49 k€	nee
Aanpassing dwarsliggers	+	0	8 - 45 k€	nee
Aanpassing spoorligging	+	0		nee
Aanpassing aan voertuigen				nee
Transmissiemaatregelen				
OTC	++	++	6 - 39 k€	ja
Beklede OTC	++	++	9 - 42 k€	ja
Sleuf tussen twee damwanden	+	+	7 - 52 k€	ja
Sloot aanleggen of verdiepen	--	+	2 - 12 k€	nee
Aanpassen bodem	+	0	13 - 94 k€	nee
Aanpassen spoortalud				nee
Ontvangermaatregelen				
Amoveren	--	++	150 - 1.000 k€	nee
Verstijven van vloeren en muren	-	+	21 - 85 k€	nee
Inpakken van fundering	-	+	40 - 90 k€	nee
Tuned Mass Damper	+	--	10 - 30 k€	nee

Omschrijving per categorie			
Kleurcode	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw
--	Niet uitvoerbaar	Sterk negatief effect	Kosten zijn hoger dan richtbedrag
-	Zeer moeilijk uitvoerbaar	Licht negatief effect	
0	Moeilijk uitvoerbaar	Geen effect	Kosten kunnen hoger zijn dan richtbedrag
+	Relatief eenvoudig uitvoerbaar	Licht positief effect	
++	Zeer eenvoudig uitvoerbaar	Sterk positief effect	Kosten zijn lager dan richtbedrag
	Niet van toepassing	Niet van toepassing	

Voor deze locatie zijn diverse types trillingsschermen en een sleuf tussen twee damwanden onderzocht op de aangegeven locaties.

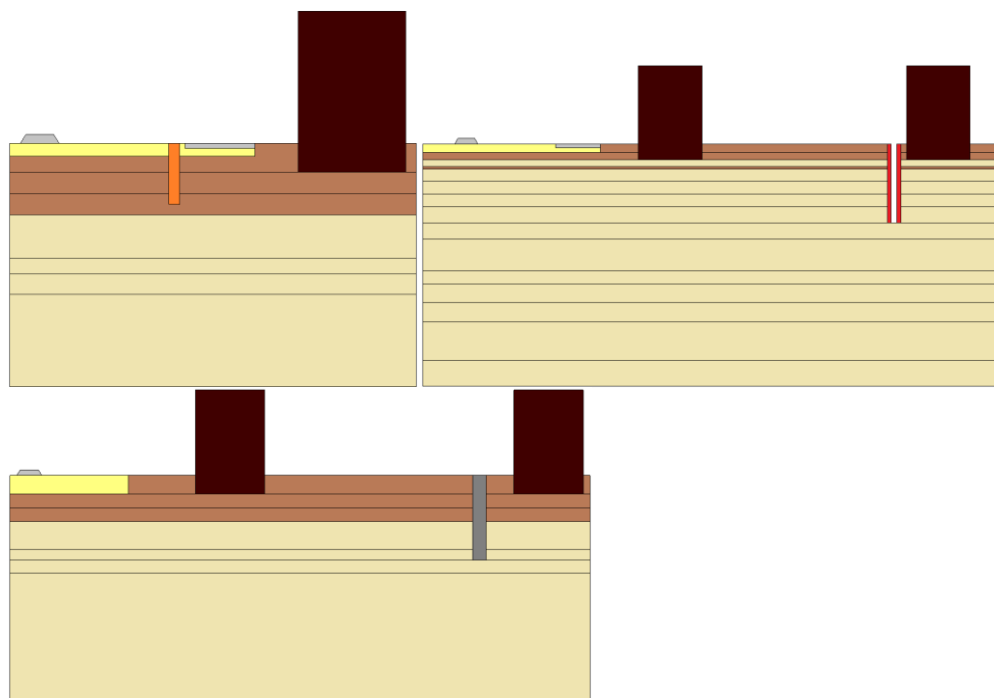
8.11.2. Voorgestelde maatregel

Gezien de verschillen in bodemopbouw, afstand tot het spoor en gebouweigenschappen, is het geclusterde gebied opgedeeld in drie delen, een A-, B- en C-deel, zie Figuur 8-18. In deel A bevindt de voorgestelde maatregellocatie zich in de teen van het talud, tussen de nieuw te realiseren tramlijn en de sporen. In deel B en C bevindt de voorgestelde maatregellocatie zich vlak voor de bebouwing. De andere beschouwde maatregellocaties leiden tot hogere kosten of minder effectieve maatregelen, bijvoorbeeld door hogere kosten voor het omleggen van kabels en leidingen, het buiten dienst nemen van de sporen of conflictering met het definitief ontwerp van de tramlijn.



Figuur 8-18 Voorgestelde maatregellocatie in subgebied Nicolaas Beetsstraat

De minst kostbare maatregel met voldoende effect in het A-deel is een trillingsscherm van jet-grout van 5.7 meter diep en 1.0 meter breed. Voor het B-deel is een holle ruimte, omgeven door twee AZ26-damwanden van 12.3 meter diep voldoende effectief. Voor het C-deel voldoet een trillingsscherm van beton met een diepte van 12.3 meter en een breedte van 2.0 meter. Doorsneden van de gebruikte 3D-modellen zijn weergegeven in Figuur 8-19.



Figuur 8-19 Doorsnedes van de 3D-modellen van de voorgestelde maatregel. Linksboven een trillingsscherm van jet-grout (5.7 m diep, 1.0 m breed) in deel A, rechtsboven een holle ruimte, omgeven door twee AZ26-damwanden (12.2 m. diep) en onder een trillingsscherm van beton (12.3 m diep, 2.0 m breed) in deel C

De kosten-batentabel van de voorgestelde maatregelen is weergegeven in Tabel 8-13. Door het nemen van de voorgestelde maatregelen neemt het aantal gebouwen met een overschrijding af van 479 naar 0. Uit de kosten-batentabel blijkt dat de voorgestelde maatregelen hier kosteneffectief zijn. Het voorgestelde bedrag per gebouw voor maatregelen komt neer op € 23.000 tot € 27.000.

Tabel 8-13 Kosten-batentabel voor subgebied Nicolaas Beetsstraat

Kosten	Kosten per meter	Lengte maatregel	Totaal
Deel A	€ 3.000 – 8.000	150 m	€ 0.6– 1.1 mln.
Deel B	€ 19.000 – 24.000	200 m	€ 3.6– 4.3 mln.
Deel C	€ 35.000 – 39.000	189 m	€ 6.7– 7.3 mln.
Subtotaal		539 m	€ 10.9-12.7 mln.

Baten	Aantal adressen	Richtbedrag / adres	
Subtotaal	479	€ 47.000	€ 22.5 mln.
Saldo			€ 9.8 – 11.6 mln.

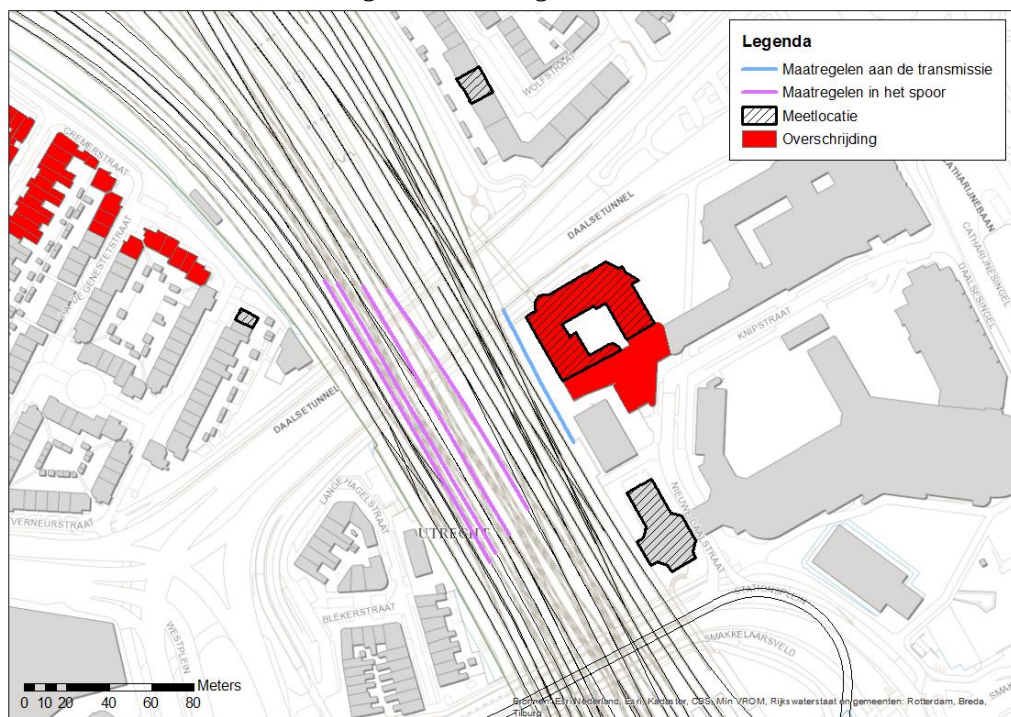
Het inpassen van deze maatregel leidt tot een aantal knelpunten. Voor deel A moet een groot aantal kabels en leidingen worden omgelegd, en moet zowel het meest dichtbijgelegen spoor als de Adema van Scheltemabaaan gedurende de realisatiefase van het trillingsscherm buiten dienst worden genomen. In het bepalen van bovengenoemde kosten van de maatregelen is geen rekening gehouden met de kosten van eventuele (gedeeltelijke) buitendienststellingen en omleidingen voor de busroutes, deze kosten kunnen aanzienlijk oplopen. Gezien de marge in het saldo voor maatregelen, zullen de kosten van een dergelijke buitendienststelling niet leiden tot een

andere conclusie ten aanzien van het wel of niet kosteneffectief zijn van de voorgestelde maatregel.

Voor deel B en C moet de Arthur van Schendelstraat gedurende langere tijd worden afgesloten. Het realiseren van een maatregel in de Arthur van Schendelstraat leidt tot forse overlast voor de omgeving. Ook is de ruimte in deze straat te beperkt om een trillingsscherp met de normaal gebruikelijke diepwandmethode te realiseren. Er zal dus moeten worden uitgeweken naar een afwijkende realisatiemethode voor dit trillingsscherp, waarbij het voorkomen van schade aan de bebouwing (gezien de korte afstand tussen trillingsscherp en bebouwing) belangrijk is. Voor het realiseren van een maatregel moet daarnaast een groot aantal kabels en leidingen worden verlegd.

8.12 Subgebied 18 (Daalseplein)

In een deel van subgebied 18 (Daalseplein) is er een overschrijding in de plansituatie. Op basis van het nauwkeurige trillingsmodel, waarbij de resultaten zijn gecorrigeerd met behulp van de metingen, kan per gebouw worden aangegeven of de locatie wel of niet voldoet aan het beoordelingskader, zie Figuur 8-20.



Figuur 8-20 Locaties met overschrijdingen, subgebied Daalseplein

Er zijn metingen uitgevoerd in het gearceerde gebouw, de locaties met een overschrijding van het beoordelingskader zijn rood gearceerd. Er zijn 2 adressen met een overschrijding, beide hebben de bestemming *kantoor* en bieden ruimte aan circa 507 werkplekken.

8.12.1. Onderzochte maatregelen

Voor het gedeelte van dit subgebied wat niet voldoet is een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. In dit onderzoek is gefocust op een aantal maatregelen aan de bron (het spoor) en de transmissie (bodem). Voor de transmissie maatregelen is gezien de beperkte ruimte slechts een locatie beschouwd, zie ook Figuur 8-20: tussen het gebouw en het spoor, in de teen van het talud. Maatregelen aan de bron worden toegepast op de sporen die mogelijk voor overschrijdingen zorgen. In dit geval zijn dat de vier sporen waarop het goederenverkeer rijdt. De locaties voor maatregelen zijn weergegeven in Figuur 8-20. Voor maatregelen in het spoor bedraagt de totale vereiste lengte 560 meter, voor maatregelen aan de transmissie bedraagt de lengte 70 meter.

In Tabel 8-14 zijn de maatregelen uit paragraaf 8.2 weergegeven, met daarbij een indicatie van de uitvoerbaarheid (realiseerbaarheid en inpasbaarheid), verwachte effectiviteit en de kosten per medewerker voor de 2 adressen met een overschrijding in dit subgebied. Maatregelen die negatief (-) of nagenoeg geen effect (0) scoren op effectiviteit of negatief scoren op uitvoerbaarheid en/of kosten, worden niet nader onderzocht.

Tabel 8-14 Mogelijke trillingsmaatregelen Daalseplein

	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per werkpl.	Nader onderzoeken
Bronmaatregelen				
Railpads	--	0	3.204 – 4.308 €	nee
Under sleeper pads	--	0	3.535 – 4.419 €	nee
Ballastmatten	--	0	4.419 – 5.855 €	nee
Floating slab track	--	+	14.470 – 21.208 €	nee
Aanpassing dwarsliggers	--	0	3.425 – 19.661 €	nee
Aanpassing spoorligging	--	0		nee
Aanpassing aan voertuigen				nee
Transmissiemaatregelen				
OTC	+	++	663 – 4.419 €	nee
Beklede OTC	0	++	981 – 4.833 €	nee
Sleuf tussen twee damwanden	0	+	787 – 5.979 €	nee
Sloot aanleggen of verdiepen	--	+	152 – 1.381 €	nee
Aanpassen bodem	--	+	5.523 – 40.868 €	nee
Aanpassen spoortalud	0	+	1.077 – 4.419 €	nee
Ontvangermaatregelen				
Amoveren	--	++	53.600 – 110.000 €	nee
Verstijven van vloeren en muren	--	+	2.600 – 11.000 €	nee
Inpakken van fundering	-	+	1.340 – 1.900 €	nee
Tuned Mass Damper	+	--	500 – 1.600 €	nee

Omschrijving per categorie			
Kleurcode	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw
--	Niet uitvoerbaar	Sterk negatief effect	Kosten zijn hoger dan richtbedrag
-	Zeer moeilijk uitvoerbaar	Licht negatief effect	
0	Moeilijk uitvoerbaar	Geen effect	Kosten kunnen hoger zijn dan richtbedrag
+	Relatief eenvoudig uitvoerbaar	Licht positief effect	
++	Zeer eenvoudig uitvoerbaar	Sterk positief effect	Kosten zijn lager dan richtbedrag
	Niet van toepassing	Niet van toepassing	

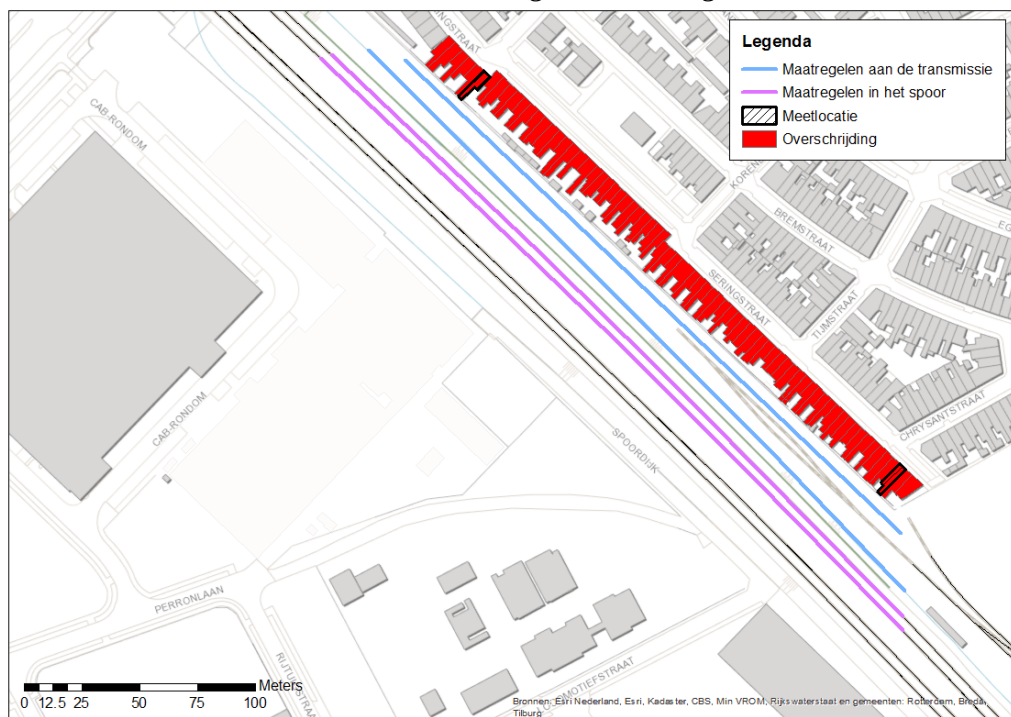
Uit Tabel 8-14 volgt dat er geen kosteneffectieve maatregelen zijn voor deze locatie. Alle maatregelen met voldoende effectiviteit hebben hogere kosten dan het richtbedrag van € 500 per werkplek.

8.12.2. Voorgestelde maatregel

Voor dit subgebied zijn geen kosteneffectieve maatregelen mogelijk.

8.13 Subgebied 26 (2^e Daalsebuurt (Seringstraat))

In een deel van subgebied 26 (2^e Daalsebuurt) zijn er overschrijdingen in de plansituatie. Op basis van het nauwkeurige trillingsmodel, waarbij de resultaten zijn gecorrigeerd met behulp van de metingen, kan per gebouw worden aangegeven of de locatie wel of niet voldoet aan het beoordelingskader, zie Figuur 8-21.



Figuur 8-21 Locaties met overschrijdingen, subgebied 2^e Daalsebuurt (Seringstraat)

De meetlocaties zijn gearceerd weergegeven, de locaties met een overschrijding van het beoordelingskader zijn rood gearceerd. Er zijn 74 adressen met een overschrijding, de overschrijdingen komen met name door de toename van het aantal treinen.

8.13.1. Onderzochte maatregelen

Voor het gedeelte van dit subgebied wat niet voldoet is een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. In dit onderzoek is gefocust op een aantal maatregelen aan de bron (het spoor) en de transmissie (bodem). Voor de transmissiemaatregelen zijn twee locaties beschouwd, zie ook Figuur 8-21: in de teen van het talud en vlak achter de tuinen van de woningen. Maatregelen aan de bron worden toegepast op de sporen die mogelijk voor overschrijdingen zorgen. In dit geval zijn dat de twee meest dichtbij gelegen sporen, hierop rijdt het verkeer richting Amsterdam. De locaties voor maatregelen zijn weergegeven in Figuur 8-21. Voor maatregelen in het spoor bedraagt de totale vereiste lengte 700 meter, voor maatregelen aan de transmissie varieert de lengte voor maatregelen tussen de 309 en 330 meter, afhankelijk van de locatie van de maatregel.

In Tabel 8-15 zijn de maatregelen uit paragraaf 8.2 weergegeven, met daarbij een indicatie van de uitvoerbaarheid (realiseerbaarheid en inpasbaarheid), verwachte effectiviteit en de kosten per gebouw voor de 74 adressen met een overschrijding in dit subgebied. Maatregelen die negatief (-) of nagenoeg geen effect (0) scoren op effectiviteit of negatief scoren op uitvoerbaarheid en/of kosten, worden niet nader onderzocht.

Tabel 8-15 Mogelijke trillingsmaatregelen 2^e Daalsebuurt (Seringsstraat)

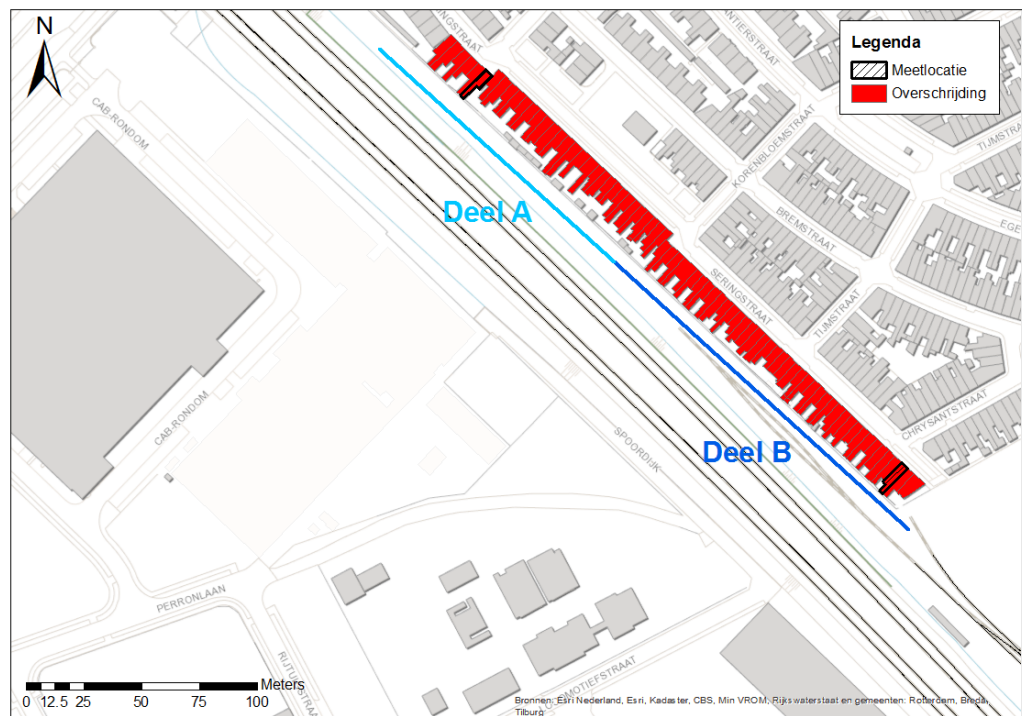
	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw	Nader onderzoeken
Bronmaatregelen				
Railpads	--	0	28 - 37 k€	nee
Under sleeper pads	--	0	31 - 38 k€	nee
Ballastmatten	--	0	38 - 51 k€	nee
Floating slab track	--	+	124 - 182 k€	nee
Aanpassing dwarsliggers	--	0	30 - 169 k€	nee
Aanpassing spoorligging	--	0		nee
Aanpassing aan voertuigen				nee
Transmissiemaatregelen				
OTC	++	++	20 - 130 k€	ja
Beklede OTC	+	++	29 - 142 k€	ja
Sleuf tussen twee damwanden	+	+	24 - 176 k€	ja
Sloot aanleggen of verdiepen	-	+	5 - 41 k€	nee
Aanpassen bodem	--	+	48 - 350 k€	nee
Aanpassen spoortalud	--	+	32 - 130 k€	nee
Ontvangermaatregelen				
Amoveren	--	++	150 - 1.000 k€	nee
Verstijven van vloeren en muren	-	+	21 - 85 k€	nee
Inpakken van fundering	-	+	40 - 90 k€	nee
Tuned Mass Damper	+	--	10 - 30 k€	nee

Omschrijving per categorie			
Kleurcode	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw
--	Niet uitvoerbaar	Sterk negatief effect	Kosten zijn hoger dan richtbedrag
-	Zeer moeilijk uitvoerbaar	Licht negatief effect	
0	Moeilijk uitvoerbaar	Geen effect	Kosten kunnen hoger zijn dan richtbedrag
+	Relatief eenvoudig uitvoerbaar	Licht positief effect	
++	Zeer eenvoudig uitvoerbaar	Sterk positief effect	Kosten zijn lager dan richtbedrag
	Niet van toepassing	Niet van toepassing	

Voor deze locatie zijn diverse types trillingsschermen en een sleuf tussen twee damwanden onderzocht op de twee aangegeven locaties.

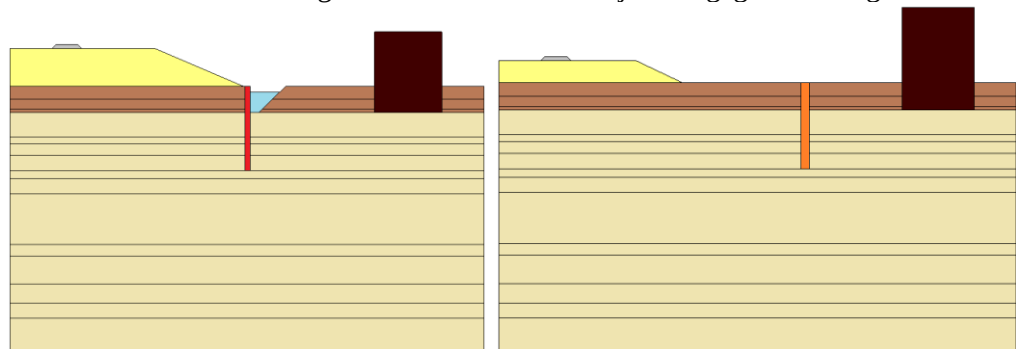
8.13.2. Voorgestelde maatregel

Gezien de verschillen in afstand tot het spoor en gebouweigenschappen is het geclusterde gebied opgedeeld in twee delen, een A- en B-deel, zie Figuur 8-22. De voorgestelde maatregellocatie bevindt zich vlak achter de tuinen van de woningen. De andere beschouwde maatregellocaties leiden tot hogere kosten of minder effectieve maatregelen, bijvoorbeeld door hogere kosten voor het omleggen van kabels en leidingen of het buiten dienst nemen van de sporen.



Figuur 8-22 Voorgestelde maatregellocatie in subgebied 2^e Daalsebuurt (Seringsstraat)

De minst kostbare maatregel met voldoende effect in het A-deel is een sloot, met aan een zijde een AZ36-damwand tot 10.0 m diep. Voor het B-deel voldoet een trillingsscherm van jet-grout met een diepte van 10.0 meter en een breedte van 1.0 meter. Doorsneden van de gebruikte 3D-modellen zijn weergegeven in Figuur 8-23.



Figuur 8-23 Doorsneden van de 3D-modellen van de voorgestelde maatregel. Links een met sloot met AZ36-damwand (10.0 m diep) in deel A, rechts een trillingsscherm van jet-grout (10.0 m diep, 1.0 m breed) in deel B

De kosten-batentabel van de voorgestelde maatregelen is weergegeven in Tabel 8-16. Door het nemen van de voorgestelde maatregelen neemt het aantal gebouwen met een overschrijding af van 74 naar 0. Uit de kosten-batentabel blijkt dat de voorgestelde maatregelen kosteneffectief zijn. Het bedrag voor de voorgestelde maatregelen per woning varieert tussen de € 31.000 en € 46.000.

Tabel 8-16 Kosten-batentabel voor subgebied 2^e Daalsebuurt (Seringstraat)

Kosten	Kosten per meter	Lengte maatregel	Totaal
Deel A	€ 10.000 – 14.000	137 m	€ 1.3 – 1.8 mln.
Deel B	€ 5.000 – 10.000	172 m	€ 1.0 – 1.6 mln.
Subtotaal		309 m	€ 2.3 – 3.4 mln.

Baten	Aantal adressen	Richtbedrag / adres	
Subtotaal	74	€ 47.000	€ 3.5 mln.
Saldo			€ 0.1 – 1.2 mln.

Het inpassen van deze maatregel leidt wel tot een aantal knelpunten. Zo moeten kabels en leidingen moeten worden omgelegd en is de ruimte voor inpassing beperkt. Waarschijnlijk dient het meest dichtbijgelegen spoor gedurende de realisatiefase van de maatregelen buiten dienst te worden genomen. In het bepalen van de kosten van de maatregelen is geen rekening gehouden met de kosten van eventuele (gedeeltelijke) buitendienststellingen, deze kosten kunnen aanzienlijk oplopen.

Verder zijn er risico's ten aanzien van de uitvoering van met name het B-deel van de maatregel. Doordat er dichtbij de gebouwen wordt gewerkt, ontstaat er kans op zettings- en trillingsschade.

9 Trillingsschade tijdens de bouwphase

9.1 Inleiding

Tijdens de realisatiefase van *DSSU* worden op diverse locaties bouwwerkzaamheden uitgevoerd. Bij een deel van deze werkzaamheden is een kans op trillingsschade bij omliggende gebouwen niet uit te sluiten. Deze trillingsschade kan optreden door werkzaamheden als het intrillen van damwanden of bijvoorbeeld door heiwerkzaamheden.

Daarom is een nadere analyse met behulp van eindige elementen modellen uitgevoerd om te bepalen voor welke gebouwen trillingsschade niet kan worden uitgesloten, en waar daarom een vooropname en eventueel maatregelen dienen te worden getroffen tijdens de uitvoering van de werkzaamheden. De vooropnames zijn bedoeld om de huidige schade van gebouwen vast te stellen, zodat na de werkzaamheden eventueel een causaal verband kan worden gelegd tussen de opgetreden schade en de uitgevoerde werkzaamheden.

In het huidige ontwerp is naar verwachting sprake van werkzaamheden met kans op schade op een aantal locaties:

1. Het realiseren van trillingsschermen op een aantal locaties.
Trillingsschermen van beton of jet-grout worden trillingsarm aangebracht met behulp van de jet-grout of diepwandmethode. Het realiseren van deze schermen zal daarom niet leiden tot trillingsschade in gebouwen en wordt daarom niet nader onderzocht. Trillingsschermen die (deels) bestaan uit damwanden, zoals bij de Seringstraat (deel A) en de Arthur van Schendelstraat (deel B) kunnen wel tot schade leiden en zijn daarom nader onderzocht;
2. Het realiseren van een keerwand op opstel terrein ten zuiden van Utrecht Centraal. De keerwand wordt eveneens trillingsarm gerealiseerd, bovendien is de afstand tot de bebouwing dermate groot dat deze niet tot trillingsschade aan de bebouwing zal leiden;
3. Het realiseren van een machinistentunnel tussen het 7^e perron en het opstel terrein ten zuiden van Utrecht Centraal. Werkzaamheden die hierbij plaatsvinden zijn het heien van palen en het intrillen van damwanden;
4. Verdichtingswerkzaamheden van de bodem. Bij de uitvoering van de werkzaamheden past de aannemer lichtere verdichtingsmachines toe in de nabijheid van bebouwing, waardoor er geen kans is op trillingsschade aan de bebouwing.

9.2 Uitgangspunten

Er zijn vier modellen gemaakt, waarvan de uitgangspunten per model zijn weergegeven in Tabel 9-1.

Tabel 9-1 *Uitgangspunten modelberekeningen*

Model	Omschrijving	Sondering/Boring	Palen
M.1	Heien machinistentunnel	S531/639	200 x 200 mm, tot -8 m NAP
M.2	Intrillen damwanden machinistentunnel	S531/639	AZ37-700, tot -8 m NAP
M.3	Intrillen damwand trillingsscherm	S531/737	AZ36-700, 10 m diep
M.4	Intrillen damwand trillingsscherm	S531/642	2 keer AZ26-700, 12.2 m diep

In de berekeningen is een veiligheidsfactor van 2.0 toegepast op de trillingssnelheden. Uit nadere analyse van de trillingssignalen is gebleken dat de oscillaties tengevolge

van heien een grote component in het frequentiegebied van onder de 10 Hz hebben, daarom is de maximaal toegestane amplitude uit dit frequentiegebied in de SBR A-richtlijn toegepast. Voor het intrillen van damwanden is een frequentie van 38 Hz uitgehouden om de grenswaarden uit de SBR A-richtlijn te bepalen.

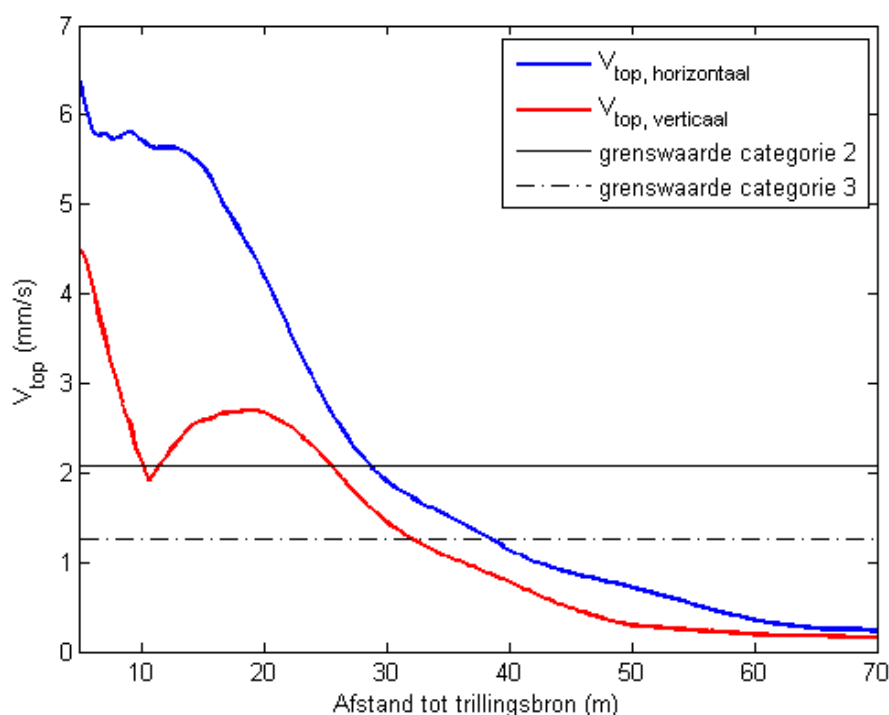
Rond alle locaties is voornamelijk sprake van gebouwen in categorie 2 van de SBR A-richtlijn, zie Bijlage II. Het betreft gebouwen in goede staat.

9.3 Modelleren

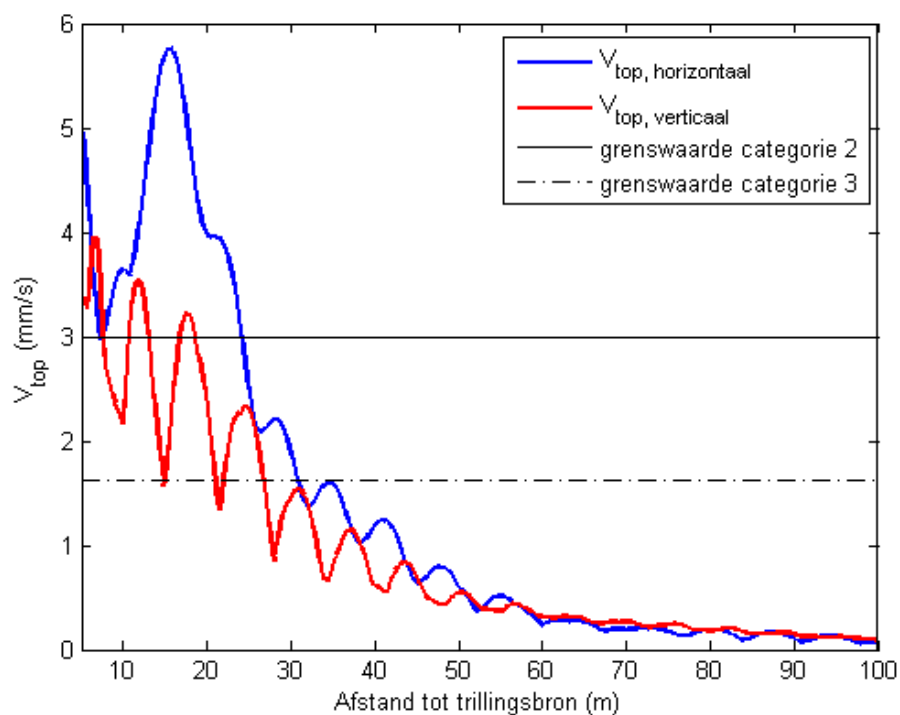
Voor het bepalen van de afstanden waarop schade kan ontstaan aan gebouwen is gebruik gemaakt van 3D-rekenmodellen met de grondopbouw van de verschillende locaties. De modellen zijn axi-symmetrisch gemaakt. Dit is gebaseerd op het feit dat de golven zich in een cirkel uitbreiden vanaf de puntbron (de heipaal). Het inheien van de heipalen gebeurt met een heiblok. In het model is de zwaarte van het heiblok afhankelijk van de grote van de paal.

9.4 Resultaten

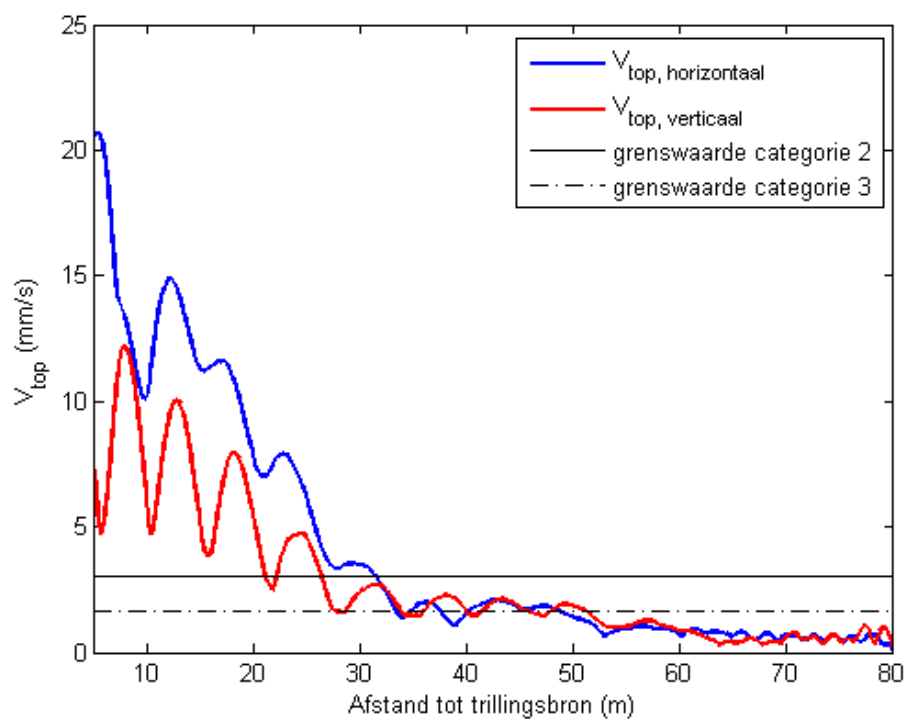
De trillingssnelheid (zowel in horizontale als in verticale richting) als functie van de afstand en de grenswaarden uit de SBR A-richtlijn voor categorie 2- en 3-gebouwen, is weergegeven in Figuur 9-1 tot en met Figuur 9-4.



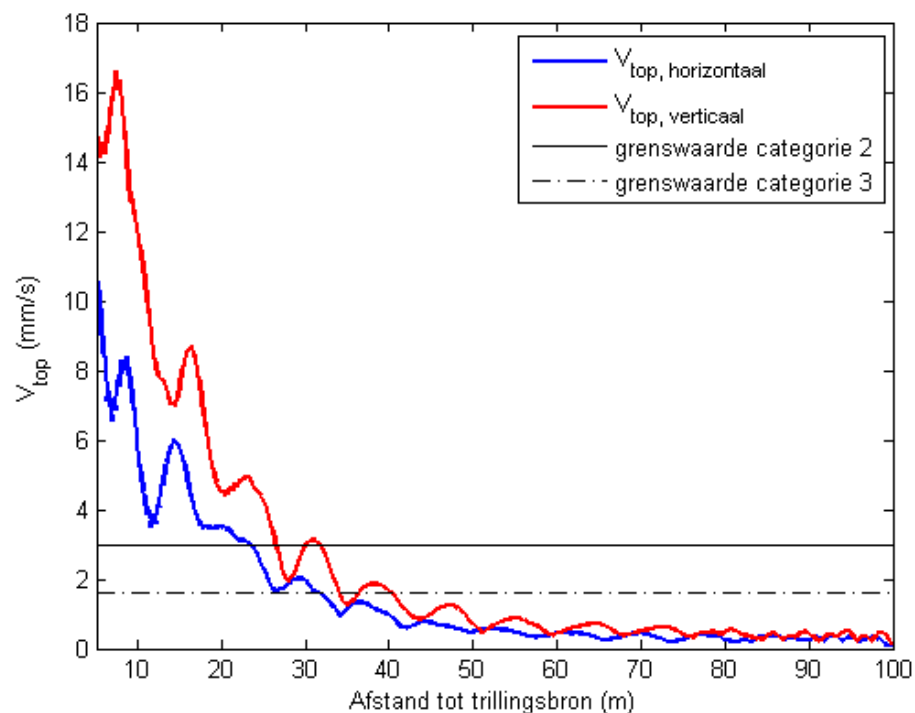
Figuur 9-1 Trillingssnelheid als functie van de afstand, model M.1, heien machinistentunnel



Figuur 9-2 Trillingssnelheid als functie van de afstand, model M.2, intrillen damwanden machinistentunnel



Figuur 9-3 Trillingssnelheid als functie van de afstand, model M.3, intrillen damwand trillingsscherm Seringstraat (deel A)



Figuur 9-4 Trillingssnelheid als functie van de afstand, model M.4, intrillen damwanden trillingsscherm Arthur van Schendelstraat (deel B)

De contourafstanden voor categorie 2- en 3-gebouwen voor de verschillende werkzaamheden zijn weergegeven in Tabel 9-2.

Tabel 9-2 Contourafstanden mogelijke bouwschade

Werkzaamheden	Toegestane afstand (m)	
	Categorie 2	Categorie 3
Machinistentunnel	29	38
Trillingsscherm Arthur van Schendelstraat	32	40
Trillingsscherm Seringstraat	31	51

De contourafstanden voor categorie 2- en 3-gebouwen zijn geprojecteerd rond de werkzaamheden van de trillingsschermen en de te realiseren machinistentunnel, zie Figuur 9-5 tot en met Figuur 9-7. Binnen de aangegeven afstanden tot de werkzaamheden is trillingsschade ten gevolge van de bouwwerkzaamheden niet uit te sluiten.

Bij het realiseren van de machinistentunnel bevinden zich geen gebouwen binnen de contouren waar schade mogelijk is.

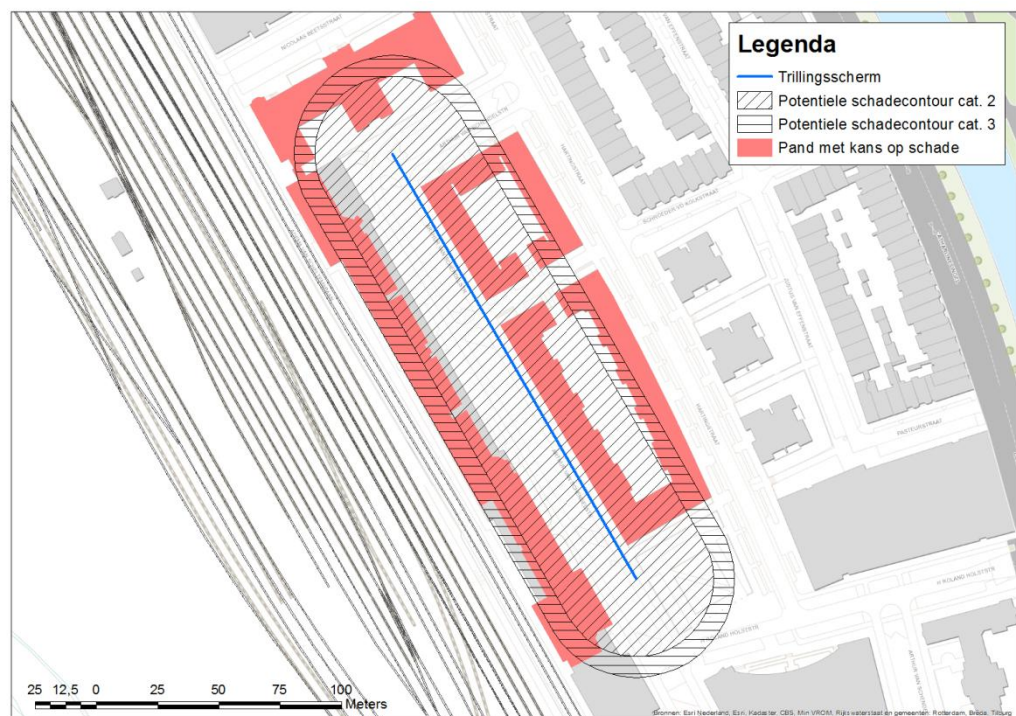
Bij het trillingsscherm in de Arthur van Schendelstraat bevindt zich een groot aantal gebouwen binnen de contouren waar schade kan optreden. Gezien de korte afstand tot de bebouwing dient een trillingsarme bouwmethode te worden toegepast. In Utrecht is het echter niet mogelijk om damwanden met een diepte van meer dan 10 meter aan te brengen middels het trillingsarme indrukken. Het trillingsscherm op deze locatie

heeft een diepte van ruim 12 meter en kan daarom niet gerealiseerd worden met deze methode. Het aanbrengen van dit trillingsscherm zal daarom hoogstwaarschijnlijk tot schade aan gebouwen in de omgeving leiden.

Ook bij het trillingsscherm in de Seringstraat bevindt zich een aantal gebouwen binnen de contouren waar schade kan optreden. Voor deze locatie wordt geadviseerd een trillingsarme bouwmethode toe te passen. Gezien de diepte van het trillingsscherm op deze locatie is dat mogelijk.



Figuur 9-5 Schadecontouren bij opstelsterrein zuidzijde Utrecht Centraal (heien machinistentunnel en intrillen damwanden machinistentunnel)



Figuur 9-6 Schadecontouren bij realiseren trillingsscherm Arthur van Schendelstraat



Figuur 9-7 Schadecontouren bij realiseren trillingsscherm Seringstraat

10 Conclusies en aanbevelingen

In het voorliggende trillingsonderzoek zijn de trillingseffecten voor het project *Doorstroomstation Utrecht (DSSU)* bepaald. Het doel van dit onderzoek is tweeledig:

1. Het vaststellen en beoordelen van de trillingshinder tijdens de exploitatiefase, na realisatie van het project. Dit onderzoek is uitgevoerd ten behoeve van het (O)TB;
2. Het beoordelen van de trillingsschade tijdens de bouwphase.

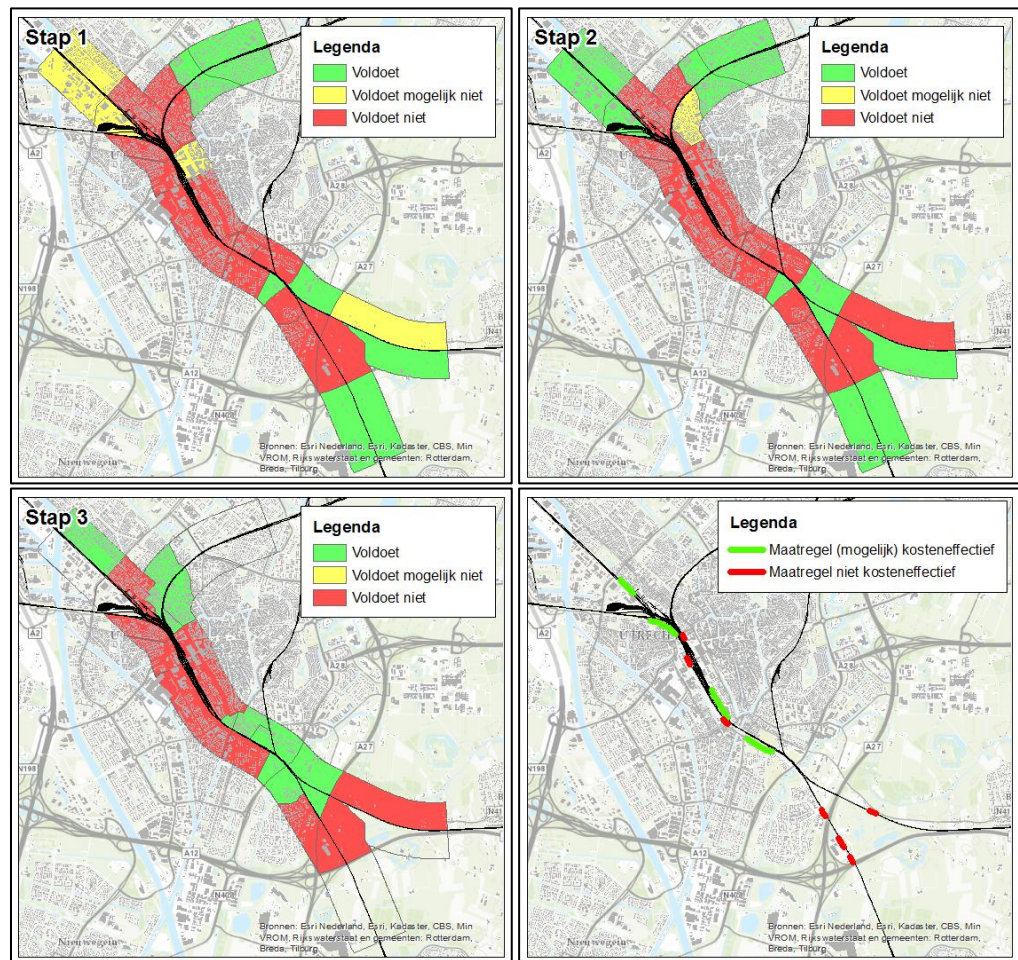
10.1 Onderzoek naar trillingshinder

In dit onderzoek is de trillingssituatie na realisatie van *DSSU* vergeleken met de referentiesituatie in het jaar 2007. Middels een uitgebreid trillingsonderzoek in een zone van 500 meter rondom de sporen is de trillingssterkte in gebouwen vastgesteld. Hiertoe is het onderzoeksgebied geografisch opgedeeld in subgebieden, afhankelijk van bodemopbouw, bouwjaar en constructie van de woningen. In dit trillingsonderzoek wordt gebruik gemaakt van een getrapte aanpak:

1. Stap 1: inventarisatie van locaties waar mogelijk trillingshinder kan optreden met behulp van een globaal trillingsmodel;
2. Stap 2: knelpunteninventarisatie aan de hand van indicatieve metingen en empirische prognoses, verwerkt in een nauwkeurig trillingsmodel;
3. Stap 3: trillingsmetingen en nauwkeurige trillingsprognoses voor mogelijke knelpuntlocaties;
4. Stap 4: ontwerpen van trillingsmaatregelen.

De beoordeling aan de hand van de Beleidsregel Trillinghinder Spoor (BTS), uitgevoerd na bovengenoemde stappen 1, 2 en 3, is weergegeven in Figuur 1. Locaties die in een bepaalde stap afvallen, behoeven niet te worden meegenomen in vervolgstappen. Ter verificatie van de gekozen aanpak zijn op een groot aantal locaties nog wel aanvullende onderzoeken verricht. Andersom is op sommige locaties geen nader onderzoek verricht omdat de resultaten uit de andere aanvullende onderzoeken voor deze locaties gebruikt kunnen worden.

Er is een kans op overschrijdingen in de subgebieden Cremerstraat, Westplein, Raadwijk/Hendrik Tollensstraat, Tolsteegplantsoen, Nieuwe Houtenseweg noord/De Wadden, Nieuwe Houtenseweg zuid/Mereveldseweg, Koningsweg, Nicolaas Beetsstraat, Daalseplein en 2^e Daalsebuurt. Voor deze subgebieden zijn maatregelen ontworpen om de (toename in) trillingshinder te mitigeren. In het onderzoek naar maatregelen is gefocust op maatregelen aan de transmissie en de bron. Maatregelen aan de ontvanger hebben niet de voorkeur vanwege de grote impact op bewoners van de betreffende panden. De locaties van de wel en niet kosteneffectieve maatregelen zijn weergegeven in Figuur 1. Op de volgende locaties zijn maatregelen (mogelijk) kosteneffectief: Cremerstraat, Tolsteegplantsoen en Saffierlaan, Nicolaas Beetsstraat en Arthur van Schendelstraat en Seringstraat. De afweging op doelmatigheid wordt uitgevoerd in het (O)TB.



Figuur 1 Resultaten trillingsonderzoek (O)TB

10.2 Onderzoek naar trillingsschade tijdens bouwfase

Tijdens de realisatiefase van DSSU worden op diverse locaties bouwwerkzaamheden uitgevoerd. Bij een deel van deze werkzaamheden is een kans op trillingsschade bij omliggende gebouwen niet uit te sluiten. Deze trillingsschade kan optreden door werkzaamheden als het intrillen van damwanden of bijvoorbeeld door heikwerkzaamheden. Met behulp van eindige elementen modellen is bepaald voor welke gebouwen trillingsschade niet kan worden uitgesloten.

In het ontwerp is sprake van werkzaamheden die mogelijk tot trillingsschade leiden bij het realiseren van de machinistentunnel tussen het 7^e perron en het opstelsterrein ten zuiden van station Utrecht Centraal, en bij het realiseren van trillingsschermen bij een deel van de Seringstraat en een deel van de Arthur van Schendelstraat. Uit deze analyse blijkt dat bij het realiseren van de trillingsschermen schade aan gebouwen niet is uit te sluiten. Bij de Seringstraat kan gekozen worden voor het inbrengen van de damwanden middels de trillingsarme drukmethode, waardoor schade aan de bebouwing wordt voorkomen. Bij de Arthur van Schendelstraat is de drukmethode geen optie, gezien de diepte van het scherm en de bodem in Utrecht. Het realiseren van het trillingsscherm op deze locatie zal daarom hoogstwaarschijnlijk tot schade aan de bebouwing leiden.

Colofon

Opdrachtgever ProRail B.V.

Uitgave Movares Nederland B.V.

Divisie Ruimte, Mobiliteit en Infra
Afdeling Infrastructuur: Waterbouw en Geotechniek

Daalseplein 100
Postbus 2855
3500 GW Utrecht

Telefoon 030-265 5322

Ondertekenaar ir. P.M. Boon
Adviseur

Projectnummer RL121372

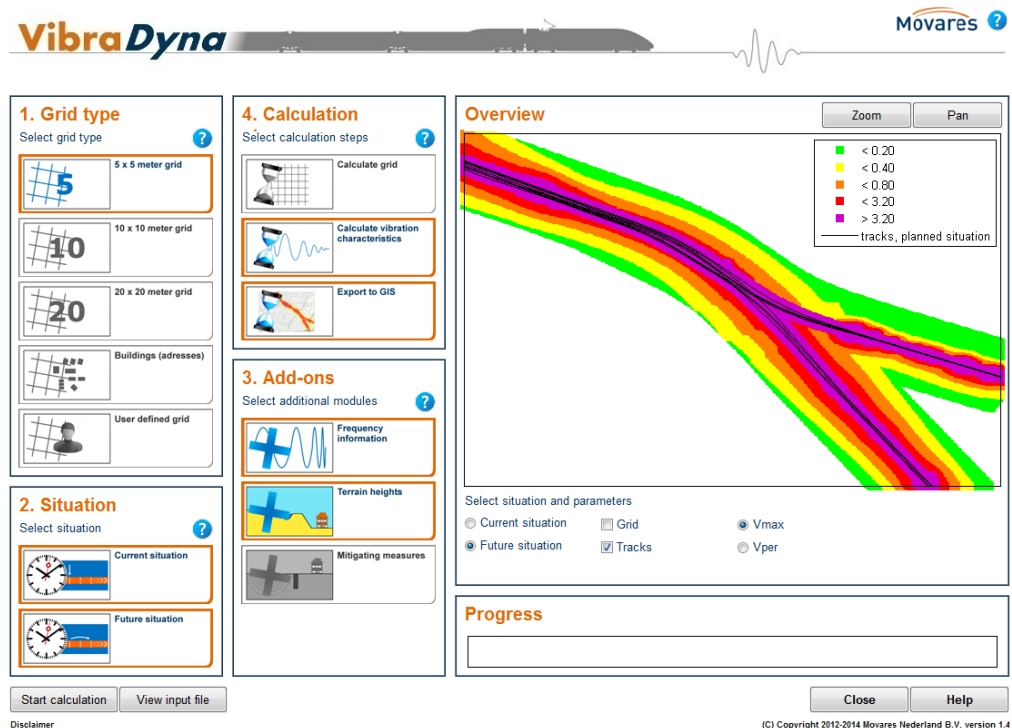
Opgesteld door ir. P.M. Boon

© 2014, Movares Nederland B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Movares Nederland B.V.

Bijlage I VibraDyna

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van VibraDyna, een door Movares ontwikkeld trillingsmodel dat met behulp van een database en door de gebruiker geselecteerde specifieke gegevens de trillingssituatie berekend ten gevolge van rail- of wegverkeer, zie Figuur I-1.



Figuur I-1 VibraDyna

In het huidige onderzoek is gebruik gemaakt van twee types berekeningen in VibraDyna:

1. Een snelle, globale berekening op basis van expert judgment voor stap 1 van het trillingsonderzoek ten behoeve van het (O)TB;
2. Een nauwkeurige berekening op basis van metingen. Dit type onderzoek is gebruikt in de tweede stap van het trillingsonderzoek ten behoeve van het (O)TB en het trillingsonderzoek ten behoeve van de MER.

Beide types modellen worden hieronder nader toegelicht.

Globale berekening op basis van expert judgement

De berekeningen in VibraDyna kunnen aanzienlijk worden versneld en versimpeld door alleen gebruik te maken van de database van het model. Deze database bevat gegevens over de grondopbouw, trillingssterktes, invloed van wissels en kunstwerken en talloze andere aspecten, en is opgebouwd op basis van jarenlange ervaring met metingen langs spoorlijnen en wegen. Alle aannames in het model zijn worst-case (conservatief).

In- en uitvoer

Gebruikers kunnen de volgende parameters variëren:

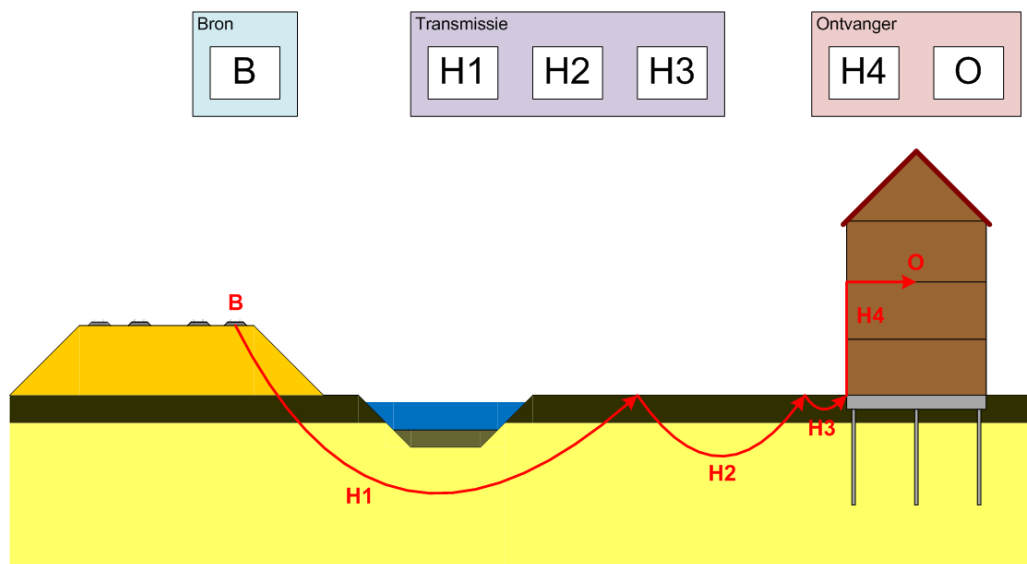
1. Afstand van gebouw tot het spoor;
2. Bodemtype (zand, veen, klei, etc.). Deze gegevens zijn op hoofdlijnen uit archieven beschikbaar;
3. Voertuigtypes;
4. Voertuigsnellheden;
5. Voertuigintensiteiten in dag-, avond- en nachtperiode;
6. Wissels en kunstwerken.

Output van het model is de trillingssterkte en trillingsintensiteit op de door de gebruiker opgegeven locatie(s). Resultaten kunnen worden gevisualiseerd in bijvoorbeeld een GIS-applicatie.

Bron, transmissie en ontvanger

VibraDyna is gebaseerd op de Barkanvergelijking, een empirische vergelijking die de prolongatie van trillingsgolven door de bodem beschrijft. Uit onderzoek blijkt dat deze empirische relatie goed bruikbaar is om de afname van trillingen met de afstand tot een trillingsbron te beschrijven.

In de overdracht van trillingen van bron naar ontvanger onderscheid gemaakt tussen de bron, de transmissie (of overdracht) en de ontvanger. Een voorbeeld van een dwarsdoorsnede van een gebied langs het spoor is weergegeven in Figuur I-2. Bron, transmissie en ontvanger zijn daarin aangegeven.



Figuur I-2 *Transmissie van trillingen*

In de globale berekening worden alle parameters niet-frequentieafhankelijk beschouwd.

Database

Er is een aantal bronparameters dat de trillingssterkte beïnvloedt, deze bronparameters kunnen worden onderscheiden in twee categorieën:

1. Treinafhankelijke parameters, zoals treinsnelheid, aslast, afvering en wielruwheid. Deze parameters worden deels ingegeven door de gebruikers, en zijn deels opgenomen in de database van *VibraDyna*;
2. Baanparameters, zoals oneffenheden in de baan, zetting van de baan en de aanwezigheid van wissels en kunstwerken. Deze parameters zijn opgenomen in de database van *VibraDyna*.

Parameters uit categorie 1 worden meegenomen door onderscheid te maken tussen verschillende treintypes en door het introduceren van een variatie op de betrouwbaarheid. Parameters uit categorie 2 worden meegenomen als afzonderlijke trillingsbronnen.

Berekening

Met behulp van de relaties tussen de treintypes en de Barkanvergelijking wordt de trillingssterkte V_{max} per treintype bepaald in de referentie- en plansituatie.

De trillingsintensiteit V_{per} wordt berekend met behulp van de maximale uurintensiteit van de verschillende treintypes. Dit resulteert in een conservatieve inschatting van V_{per} , aangezien niet alle maximale uurintensiteiten in dezelfde periode (dag, avond of nacht) optreden.

Nauwkeurige berekening op basis van metingen

Voor veel onderzoeken is een grotere precisie van het onderzoek gewenst dan een bepaling op basis van expert judgment, zodat posities van knelpuntlocaties beter inzichtelijk kunnen worden gemaakt. In dat geval kan een nauwkeuriger berekening worden uitgevoerd met *VibraDyna*, waarbij gebruik wordt gemaakt van metingen. Deze metingen worden door de gebruiker zelf uitgevoerd en als invoer in het model gestopt.

De volgende meetresultaten kunnen worden ingevoerd in het model:

- Trillingsmetingen aan voertuigpassages op maaiveld loodrecht op het spoor of de weg, om de bronsterkte van de verschillende passerende voertuigen te bepalen;
- Valproeven om de afnamecurve van de lokale bodem vast te stellen (de bodemeigenschappen).

Ten opzichte van de globale berekening wordt deze nauwkeuriger berekening frequentieafhankelijk uitgevoerd. Daarnaast wordt rekening gehouden met lokale variaties in taludgeometrie, bodem- en baanopbouw. Daardoor heeft dit type model een grotere betrouwbaarheid.

Frequentieafhankelijkheid

In het nauwkeurige model wordt gerekend met zogenaamde tertsbandspectra van trillingssignalen van treinen. Uit een groot aantal onderzoeken blijkt dat de tertsbandspectra van treinen, mits genormaliseerd voor snelheid, per treintype weinig

variatie kennen. De beperkte variatie die er is wordt vooral veroorzaakt door de wielruwheid en aslast.

Ook een groot aantal andere invloeden is frequentieafhankelijk. Te denken valt aan de invloed van wissels, geometriewijzigingen, de eigenschappen van gebouwen of de demping van de bodem, bepaald uit valproefmetingen. Door deze invloeden frequentieafhankelijk in het model in te voeren, wordt de nauwkeurigheid van het trillingsmodel vergroot ten opzichte van het werken met scalaire grootheden.

Relatie tussen tertsbandspectrum en v_{eff}

De trillingssterkte v_{eff} is een gewogen voortschrijdend gemiddelde, dat gecorrigeerd is voor frequenties. Deze grootheid wordt gebruikt voor toetsing van de trillingssterkte aan de BTS.

Er is een verhouding tussen de v_{rms} -waarde van het trillingssignaal en de trillingssterkte v_{eff} . Deze verhouding is van belang omdat het model rekent met tertsbandspectra, maar toetsing vindt plaats op basis van de trillingssterkte v_{eff} .

De v_{rms} -waarde kan worden bepaald uit het tertsbandspectrum door energetisch te sommeren over de frequenties, na het toepassen van de correctie uit de SBR B-richtlijn:

$$v_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^N F_c(f) \cdot v_i(f)^2}$$

Hierbij is $v_i(f)$ het tertsbandspectrum en $F_c(f)$ de correctiefactor van de SBR B-richtlijn. De waarde van v_{rms} kan niet één op één vertaald worden naar de waarde van v_{eff} . De omrekening vindt daarom plaats via een statistische verdeling die uit een groot aantal metingen is bepaald.

Berekening

De berekening in *VibraDyna* vindt plaats volgens een aantal stappen. Met behulp van de relaties tussen de treintypen en een frequentieafhankelijke Barkanvergelijking wordt de trillingssterkte V_{max} bepaald voor de referentie- en plansituatie.

De trillingsintensiteit V_{per} wordt op analoge wijze als in stap 1 berekend.

Betrouwbaarheid van *VibraDyna*

In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van trillingsmodellen in plaats van metingen in gebouwen. Het gebruik van trillingsmodellen in plaats van het uitvoeren van metingen heeft een aantal voordelen:

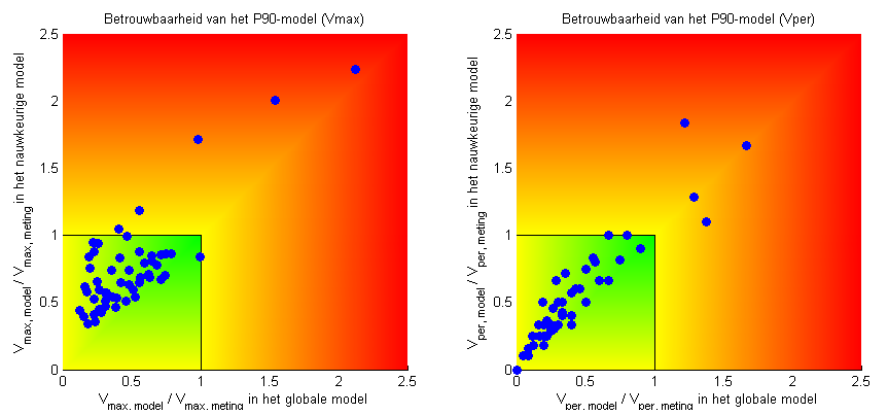
- Het maakt het mogelijk om sneller een goede prognose te geven van de trillingssterkte;
- Het maakt het mogelijk om een groter aantal verschillende locaties te beschouwen. Het uitvoeren van metingen op een groot aantal locaties is zowel tijdrovend als kostbaar en kan bij het gebruik van een trillingsmodel achterwege blijven.

Nadeel van het gebruik van modellen is dat een model slechts een *benadering* van de werkelijkheid is. Zo kunnen gebouwen met een ongunstige overdrachtskarakteristiek (tussen maaiveld en de bewoonde vloeren) sterk afwijken van de gemiddelde prognoses die het model hanteert. Om er toch voor te zorgen dat de modellen zo betrouwbaar mogelijk zijn, is de volgende aanpak gehanteerd:

1. Modelparameters zijn bepaald op basis van een groot aantal metingen in een groot aantal gebouwen door het gehele land, over langere tijd. De beoordeling van de trillingssterkte vindt plaats op basis van een bovengrens die statistisch wordt bepaald. Hierdoor is het percentage gebouwen waar in werkelijkheid een hogere trillingssterkte wordt gemeten, zeer klein. Bij het nauwkeurige model is het mogelijk om gebouweigenschappen toe te voegen, zodat de invloed van sterk afwijkende bebouwing sterk wordt gereduceerd;
2. Het model is uitvoerig geverifieerd in eerdere onderzoeken met behulp van metingen in gebouwen. Uit deze verificatiemetingen volgt dat het gebruikte model een hoge betrouwbaarheid heeft, zie onder meer de trillingsonderzoeken ten behoeve van de Tracébesluiten *Sporen in Arnhem* [1] en *Sporen in Utrecht* [2];
3. In de beoordeling van de modelresultaten worden drie categorieën onderscheiden:
 - a. Gebouwen die voldoen aan het beoordelingskader;
 - b. Gebouwen die wel voldoen aan het beoordelingskader, maar waarbij nog een kans op een overschrijding is;
 - c. Gebouwen die niet voldoen aan het beoordelingskader.

Locaties waarvan niet zeker is dat ze voldoen aan het beoordelingskader, komen voor nader onderzoek in aanmerking. Door deze conservatieve manier van beoordeling worden alle locaties (extreme uitschieters uitgezonderd) waar een mogelijke overschrijding is van het beoordelingskader, net zo lang onderzocht totdat duidelijk is dat er geen overschrijdingen zullen optreden. Wanneer in stap 3 van het onderzoek blijkt dat er desondanks overschrijdingen zijn van het beoordelingskader, dan worden in stap 4 maatregelen ontworpen om de locatie alsnog te laten voldoen aan de streefwaarden.

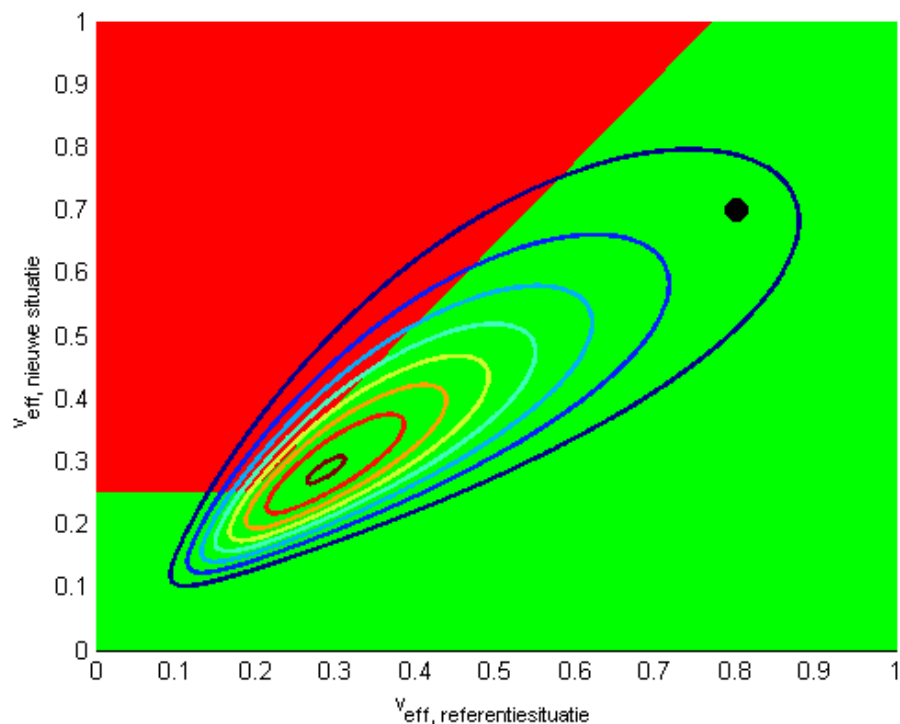
De maximale trillingssterkte en trillingsintensiteit wordt door *VibraDyna* met een betrouwbaarheid van 95 procent bepaald door het model, zie Figuur I-3 voor de verhouding tussen de in het model bepaalde waarden en de gemeten waarden voor het globale en nauwkeurige model van de trillingssterkte V_{max} . De blauwe punten geven de verschillende meetlocaties aan. Hoe meer een punt zich in een groen vlak bevindt, hoe nauwkeuriger het model de predictie geeft. Voor de meetlocaties in het groen-gele vlak (90 tot 95 procent van de meetlocaties) is het model voldoende conservatief. Voor de meetlocaties in het rood-gele vlak is de modelberekening niet conservatief genoeg, het gaat hier in alle gevallen om meetlocaties met een zeer hoge overdracht tussen fundering en midden vloerveld op de hoogste verdieping (verhouding van meer dan 5).



Figuur I-3 Verhouding tussen gemeten waarden en waarden uit VibraDyna (P90-model)

Bij beoordeling op de BTS speelt vooral de toename in trillingssterkte een belangrijke rol. Om deze toename conservatief genoeg te berekenen, rekent VibraDyna met simultane probabilistische verdelingen van de trillingssterkte per meetpunt. Voor elke factor die de trillingssterkte beïnvloedt, de correlatie te bepalen tussen deze factor in de referentie- en plansituatie. Door vervolgens een simultane probabilistische verdeling op te stellen, kunnen kansdichtheidscontouren worden getrokken zoals in Figuur I-4.

De zwarte punt geeft de 95-procentswaarde van de trillingssterkte weer, deze waarde komt over het algemeen redelijk goed overeen met de maximaal optreedt.



Figuur I-4 Voorbeeld 95-procentswaarde in referentie- en plansituatie (zwarte stip) en kansdichtheidscontouren van mogelijke trillingssterktes (correlatiecoëfficiënt van 0.85)

Hoe groter de correlatie tussen de beide situaties is (d.w.z., hoe minder veranderingen er zijn tussen referentie- en plansituatie), hoe meer de contouren worden samengetrokken naar de lijn die loopt tussen de zwarte punt en het centrum van de contouren in Figuur I-4, en hoe betrouwbaarder de predictie dus is.

Door de simultane probabilistische verdeling van de trillingssterkte in de referentie- en plansituatie te integreren over het groene gebied in Figuur I-4, kan een kans worden toegekend aan of een woning voldoet in de plansituatie. Voor de in Figuur I-4 getoonde verdeling en contouren is deze kans bijvoorbeeld gelijk aan 85 procent.

Enkele aandachtspunten bij deze overschrijdingskansen:

1. Voor het getoonde voorbeeld is er nog een kans van 15 procent op een overschrijding van de grenswaarden. Bij overschrijdingen is de waarde van de trillingssterkte in de nieuwe situatie echter aanzienlijk lager dan de 95-procentswaarde die weergegeven is door de zwarte stip in Figuur I-4. Op basis van uitgebreid onderzoek is ervoor gekozen om locaties nader te onderzoeken indien de overschrijdingskans groter is dan 80 procent. De overschrijdingskans wordt alleen meegenomen om te bepalen of een woning of deelgebied wordt meegenomen in een vervolgonderzoek, niet bij het al dan niet nemen van maatregelen;
2. In het globale model wordt een eventuele wijziging in taludgeometrie nog niet meegenomen. Daarom wordt in dit model extra conservatief getoetst door te rekenen met een lagere correlatiecoëfficiënt (meer spreiding in resultaten mogelijk);
3. In de diverse trillingsmodellen wordt de trillingssterkte per trein bekeken, vervolgens wordt voor elk roosterpunt in de modellen de maximale trillingssterkte bepaald. De werkelijke spreiding in de prognose kan dus afwijken van de spreiding voor de maximale trillingssterkte, maar omdat de waarde van de trillingssterkte van de overige treinen altijd lager is dan die van de maximale treinpassage, wordt desondanks een conservatieve inschatting gemaakt over het wel of niet meenemen van een locatie in een vervolgonderzoek.

Bijlage II Beoordelingskader

Algemeen

Treinverkeer, maar ook bouwwerkzaamheden en wegverkeer, kunnen aanleiding geven tot trillingen in gebouwen. Deze trillingen kunnen leiden tot hinder of schade. De Duitse DIN 4150-2 (1999) norm beschrijft criteria voor het meten en beoordelen van trillingen. De Nederlandse SBR richtlijn is hierop gebaseerd.

De SBR richtlijn is in Nederland de meest gebruikte richtlijn voor het beoordelen van trillingen en bestaat uit 3 delen:

- Deel A: schade aan gebouwen;
- Deel B: hinder voor personen in gebouwen;
- Deel C: verstoring van apparatuur.

Daarnaast heeft het ministerie van Infrastructuur en Milieu een *Beleidsregel Trillingshinder Spoor* (BTS) opgesteld, dat een wijziging van en aanvulling op de SBR B-richtlijn is.

In dit onderzoek wordt verstoring aan apparatuur niet onderzocht. Voor het onderzoek naar trillingshinder ten behoeve van het (O)TB wordt gebruik gemaakt van de BTS, voor het onderzoek naar trillingsschade wordt de SBR A-richtlijn gebruikt. In de volgende paragrafen staan deze de beoordelingskaders achtereenvolgens beschreven.

BTS (Beleidsregel Trillingshinder Spoor) – beoordelingskader trillingshinder

Tot op heden zijn er nog geen richtlijnen voor trillingshinder vastgelegd in wetgeving, zoals dat bijvoorbeeld voor geluidhinder wel het geval is. Vooruitlopend op toekomstige wetgeving heeft het ministerie van Infrastructuur en Milieu in 2012 een *Beleidsregel Trillingshinder Spoor* (BTS) opgesteld, dat een wijziging van en aanvulling op de SBR B richtlijn is. Naar aanleiding van de uitspraken van de Afdeling Bestuursrechtspraak van de Raad van State op 2 oktober 2013 in zake de tracébesluiten *Sporen in Arnhem 2012* en *Sporen in Utrecht 2012 deeltracé Utrecht Centraal – Houten*, is de BTS gewijzigd om tegemoet te komen aan de kritiekpunten. De belangrijkste wijzigingen ten opzichte van de eerdere BTS komen tot uiting in:

- Een nadere invulling van het kosteneffectiviteitscriterium, met een richtbedrag van € 47.000 per woning met overschrijdingen. Dit bedrag is gebaseerd op een MKBA²¹, uitgevoerd door Witteveen+Bos, Royal Haskoning DHV en TNO;
- Een aanpassing van de meetprocedure. De trillingssterkte wordt bepaald over een meetperiode van tenminste een week;
- De introductie van een naverwerkingsmethode, met als doel een reproduceerbare maximale trillingssterkte te genereren, die vergelijkbaar is met de methode zoals gehanteerd in de SBR B-richtlijn;
- De introductie van een reproduceerbaarheidswaarde *R*. Deze factor is een indicatie van de onzekerheid in de meting en eventuele prognoses die zijn gemaakt, en geeft aan in hoeverre het resultaat van een herhaling van de

²¹ MKBA = Maatschappelijke Kosten Baten Analyse, methodiek om de maatschappelijk gezien acceptabele kosten van een maatregel te bepalen. Zie Ruijgrok, dr. ir. E.C.M. e.a., *Kosteneffectiviteitstoetsing Trillingsreducerende Maatregelen Spoor*, Witteveen+Bos, juni 2013, projectcode ut702-1-1

meting of berekeningen kan afwijken van het gegeven resultaat. Wanneer deze R -waarde hoger is dan 10 procent, wordt bij het beoordelen van de trillingssituatie en het nemen van maatregelen rekening gehouden met deze onzekerheid.

In de BTS wordt onderscheid gemaakt tussen nieuwe en bestaande situaties, waarbij de grenswaarden voor nieuwe situaties strenger zijn dan voor bestaande situaties. Dit project valt onder bestaande (gewijzigde) situaties. BTS artikel 1 spreekt van een ‘bestaande situatie als een referentiesituatie waarin reeds sprake is van trillingen als gevolg van railverkeer’.

De BTS maakt daarnaast onderscheid tussen de dag- en avondperiode en de nachtperiode. Hierbij geldt dat de grenswaarden van de trillingssterktes gedurende de nacht lager zijn dan die gedurende de dag en avond.

Om de trillingssterkte in een gebouw te bepalen dient de effectieve trillingssnelheid v_{eff} gemeten te worden in een gebouw gedurende een periode van minimaal een week. Deze effectieve trillingssnelheid wordt bepaald als voortschrijdend gemiddelde per 30 seconden. Vervolgens wordt per 30 seconden de maximale waarde van dit voortschrijdend gemiddelde genomen. Middels een statistische procedure wordt vervolgens een waarde bepaald voor $V_{max, BTS}$, zie ook Bijlage IV. Deze waarde wordt gebruikt voor toetsing aan de streefwaarden.

V_{per} geeft een indicatie van de trillingsintensiteit. Deze waarde wordt bepaald door het kwadratisch gemiddelde te nemen van de maximale trillingssterkte per 30 seconden indien deze boven de drempelwaarde van 0,1 valt. Trillingssnelheden onder de 0,1 zijn nauwelijks voelbaar en worden niet meegenomen in de bepaling van de V_{per} . Het kwadratisch gemiddelde wordt vervolgens gecorrigeerd voor de tijd waarin de trillingssnelheden boven de 0,1 uitkomen. Zie voor de exacte bepaling de SBR B-richtlijn.

Normstelling in de BTS

De grenswaarden in de BTS verschillen over de dag en avond (7.00 – 23.00 uur) en nacht (23.00 – 7.00 uur) en zijn verschillend per gebouwfunctie. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen gebouwen met een kritische werkruimte (gevoelige apparatuur e.d.), gezondheidszorg en wonen en kantoren en gebouwen ten behoeve van bijeenkomsten. Bij elke gebouwfunctie horen andere toegestane trillingssterktes, zie Tabel II-1 voor de normstelling voor bestaande situaties.

De BTS kent drie grenswaarden: A1, de streefwaarde voor de trillingssterkte V_{max} , A2, de grenswaarde voor de trillingssterkte V_{max} en A3, de grenswaarde voor de trillingsintensiteit V_{per} .

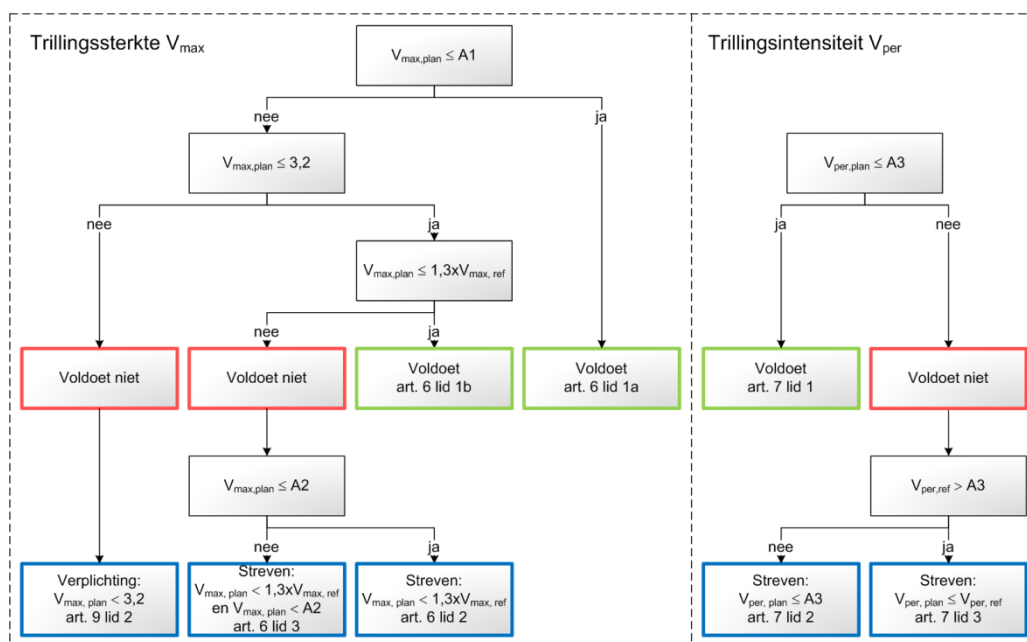
Tabel II-1 Normstelling bestaande situatie volgens BTS

Gebouwfunctie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Gezondheidszorg en wonen	0.2	0.8	0.1	0.2	0.4	0.1
Onderwijs, kantoor en bijeenkomsten	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15
Kritische ruimte	0.1	0.1	---	0.1	0.1	---

Beoordeling van trillingssituatie

Voor het beoordelen of een bepaalde locatie voldoet aan de BTS voor bestaande situaties moet het schema in Figuur II-1 worden doorlopen. Dit schema geeft aan wanneer maatregelen dienen te worden afgewogen. Maatregelen ter voorkoming of beperking van de trillingshinder met betrekking tot de waarde van V_{max} kunnen achterwege blijven indien wordt voldaan aan één van de twee volgende condities:

1. De waarde van V_{max} in de plansituatie is lager dan A1 en de waarde van de trillingsintensiteit V_{per} is lager dan A3;
2. De toename in trillingssterkte in de plansituatie ten opzichte van de referentiesituatie is 30 procent of minder en de waarde van de trillingsintensiteit V_{per} is lager dan A3 en de trillingssterkte in de plansituatie is lager dan de grenswaarde van 3.2.



Figuur II-1 Beoordeling van gewijzigde situaties in de BTS

SBR richtlijn deel A – beoordelingskader trillingsschade

Schade als gevolg van treinverkeer

Bouwwerkzaamheden kunnen leiden tot schade aan gebouwen in de omgeving van de werkzaamheden. Heien, het intrillen van damwanden en sloopwerkzaamheden kunnen hoge trillingsnelheden veroorzaken, die zeker op korte afstand van de trillingsbron tot schade in gebouwen kunnen leiden.

Schade ten gevolge van treinverkeer

De sterkte van trillingen ten gevolge van treinverkeer zijn voor vrijwel alle gebouwen te gering om schade aan gebouwen te veroorzaken. Op afstanden groter dan 10 meter vanaf de spoorbaan is de trillingssnelheid, gemeten aan de fundering, zonder uitzondering kleiner dan 2 mm/s. Voor de meeste woningen (categorie 2 conform de SBR A-richtlijn) wordt een ondergrens voor de trillingssnelheid van 5 mm/s aangehouden. Onder deze grens is de kans op schade kleiner dan 1 procent. Omdat dergelijke trillingssterktes niet optreden, wordt in het vervolg van dit rapport niet op

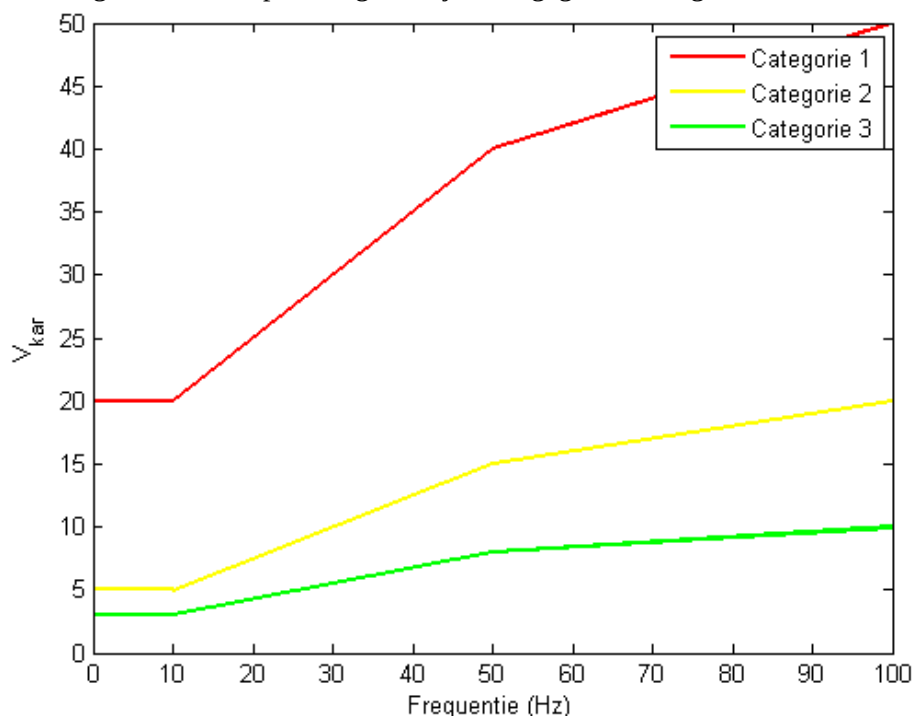
mogelijke schade-effecten tijdens de exploitatiefase ingegaan. Toetsing aan de SBR A-richtlijn heeft daarom niet plaatsgevonden voor de exploitatiefase.

Algemeen

De grenswaarden voor trillingen t.a.v. schade volgens SBR A-richtlijn worden vastgesteld op basis van drie beoordelingscriteria:

1. Type bouwwerk. Er worden drie verschillende typen van bouwwerken onderscheiden:
 - a. Categorie 1: in goede staat verkerende onderdelen van een draagconstructie indien deze bestaan uit gewapend beton of hout; onderdelen van een bouwwerk die geen deel uitmaken van de draagconstructie, indien deze bestaan uit gewapend beton of hout en draagconstructies van bouwwerken die geen gebouw zijn en bestaan uit metselwerk zoals pijlers van viaducten, kademuren en dergelijke;
 - b. Categorie 2: in goede staat verkerende onderdelen van de draagconstructie van een gebouw, indien deze bestaan uit metselwerk; in goede staat verkerende onderdelen van een gebouw die niet tot de draagconstructie behoren, zoals bijvoorbeeld scheidingsconstructies, welke bestaan uit niet-gewapend beton, metselwerk of uit brosse steenachtige materialen;
 - c. Categorie 3: onderdelen van oude en monumentale gebouwen met grote cultuurhistorische waarde. In slechte staat verkerende gebouwen uit metselwerk of onderdelen daarvan.

De grenswaarden per categorie zijn weergegeven in Figuur II-3.



Figuur II-3 Grenswaarden in SBR A-richtlijn

2. Type trillingsbron. Er worden drie verschillende typen van trillingsbronnen onderscheiden, elk met een eigen veiligheidsfactor:

- a. Bronnen die incidenteel voorkomende kortdurende trillingen veroorzaken ten gevolge van een stootvormige excitatie. Het aantal malen dat het trillingsverschijnsel voorkomt is zo gering dat er geen rekening behoeft te worden gehouden met vermoeiingseffecten van constructiematerialen. Voorbeelden van dit type trillingen zijn explosies en botsingen. De veiligheidsfactor die gehanteerd moet worden is 1.0;
- b. Bronnen die herhaalde kortdurende belastingen veroorzaken bij een stootvormige excitatie. Hieronder worden bronnen verstaan die zodanig vaak voorkomen dat met vermoeiingseffecten in materialen rekening moet worden gehouden. Een voorbeeld van dit type trillingen is heiwerkzaamheden. De veiligheidsfactor die gehanteerd moet worden is 1.5;
- c. Bronnen die continue trillingen veroorzaken. Hieronder worden verstaan alle bronnen die niet onder de voorgaande twee categorieën kunnen worden ingedeeld. Resonanties en / of vermoeiingseffecten in de onderdelen van een gebouw kunnen optreden. Voorbeelden van dit type trillingen zijn machines met roterende onderdelen, vibratoren, verdichtingswerk d.m.v. trilwalsen en het inbrengen van damwanden d.m.v. trilblokken. De veiligheidsfactor die gehanteerd moet worden is 2.5.

In dit onderzoek wordt schade gerelateerd aan de bouw van kunstwerken. Het gaat dan om bouw- en sloopwerkzaamheden waarbij heipalen worden aangebracht en damwanden worden ingetrild. Deze trillingsbronnen vallen onder categorie 2. De bijbehorende veiligheidsfactor is 1.5. De grenswaarden dienen door deze veiligheidsfactor te worden gedeeld.

3. Type meting. Afhankelijk van hoeveelheid meetpunten, is opnieuw een driedeling gemaakt:
 - a. Indicatieve meting. Bij een indicatieve meting wordt slechts op één meetpunt in drie richtingen gemeten. Dit meetpunt wordt gemonteerd op een stijf punt aan de fundering. De gekozen horizontale richtingen worden zoveel mogelijk gekozen overeen komend met de hoofdasen van het gebouw. De veiligheidsfactor is 1.6;
 - b. Beperkte meting. Bij een beperkte meting wordt ten minste in één meetpunt op het begane grondniveau en ten minste één meetpunt op de hoogste verdieping van het gebouw gemeten. De veiligheidsfactor is 1.4;
 - c. Uitgebreide meting. Bij een uitgebreide meting dient een groter aantal meetpunten te worden gemeten, als aanvulling op de beperkte meting. (een uitgebreide beschrijving is in de SBR trillingsrichtlijn deel A gegeven). De veiligheidsfactor is 1.0;

In dit onderzoek wordt nog geen gebruik gemaakt van meetpunten, daarom wordt de hoogste veiligheidsfactor (1.6, indicatieve meting) gehanteerd.

Toetsing

Na de grenswaarden voor een bepaald gebouw gedeeld te hebben door de partiële veiligheidsfactor behorend bij het type trillingsbron, kan de met behulp van berekeningen bepaalde trillingssnelheid ten gevolge van werkzaamheden getoetst worden aan de grenswaarde. Daar bovenop wordt een veiligheidsfactor gehanteerd.

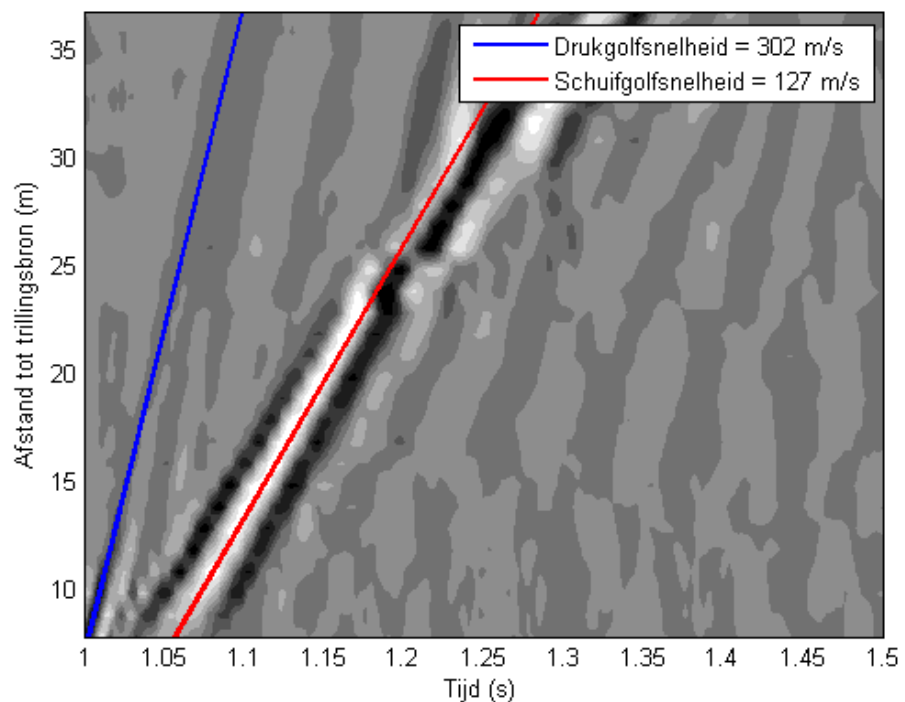
In dit onderzoek wordt aangegeven voor hoeveel gebouwen een overschrijding van de SBR A-richtlijn wordt geprognoseerd. Deze toetsing vindt alleen plaats in de nabijheid van hei- en trilwerkzaamheden.

Bijlage III Resultaten bodemonderzoek en maaiveldmetingen

Voor de tweede stap van het trillingsonderzoek zijn metingen uitgevoerd aan de bodemopbouw en treinpassages. De bodemopbouw is bepaald met behulp van valproefmetingen.

Valproeven

Bij de valproeven is er gebruik gemaakt van een kunstmatige gecontroleerde bron die de bodem in trilling brengt. Trillingssensoren registreerden de resulterende bodemtrillingen. Door de trillingssensoren in een rij op de bodem te plaatsen, kunnen de loopsnelheden van de verschillende typen trillingsgolven (druk golf en schuif golf) bepaald worden. De schuif golf is de dominante trillingsgolf. Een voorbeeld hiervan staat in Figuur III-1. In deze figuur zijn de geregistreerde trillingen in de tijd uitgezet tegen de afstand tot de trillingsbron.



Figuur III-1 Voortplanting van trillingen in de bodem

Als kunstmatige trillingsbron is gebruik gemaakt van een kleine heistelling met een valgewicht van 600 kg, zie Figuur III-2. Het valgewicht valt binnen een stalen buis naar beneden op een staalplaat, waarbij de buis dient als geleiding van het valgewicht. De staalplaat is 1.25m x 1.25m en dient om de belasting van het valgewicht te spreiden op de bodem. De valhoogte bedroeg 0.5 of 1.0 meter.



Figuur III-2 Opstelling valgewicht (links) en voetplaat en geleidingsbuis (rechts)

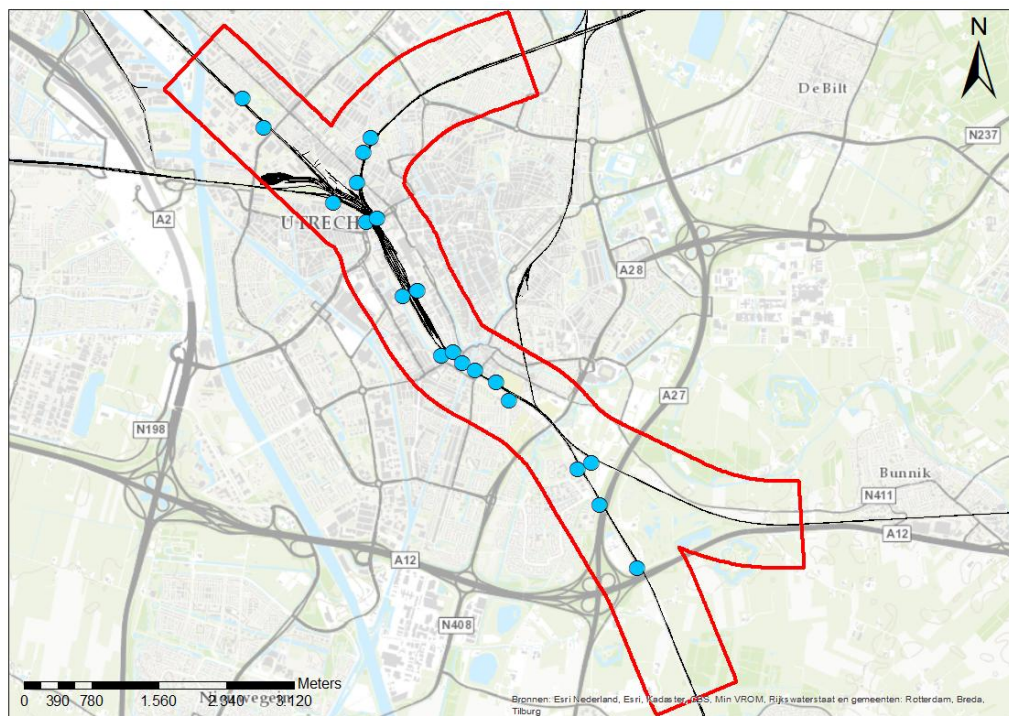
Door de afstand tussen trillingsbron en trillingsopnemers te variëren kan op elke willekeurige afstand tot de trillingsbron de trillingssterkte worden gemeten als functie van de tijd. Door per positie een aantal trillingssignalen te middelen neemt de invloed van de achtergrondtrillingen (ruis) af.

Door de trillingssignalen als functie van de tijd te transformeren naar het frequentie-domein (Fourier-transformatie) kan voor elke afstand tot de trillingsbron een tertsbandspectrum worden gegenereerd. Vervolgens kan met behulp van de zogenaamde Barkanvergelijking de trillingssterkte op een willekeurige afstand tot het spoor worden bepaald. De gebruikte Barkanvergelijking luidt:

$$V(r, f) = V(r_0, f) \frac{r_0}{r} e^{-\alpha(f)(r-r_0)}$$

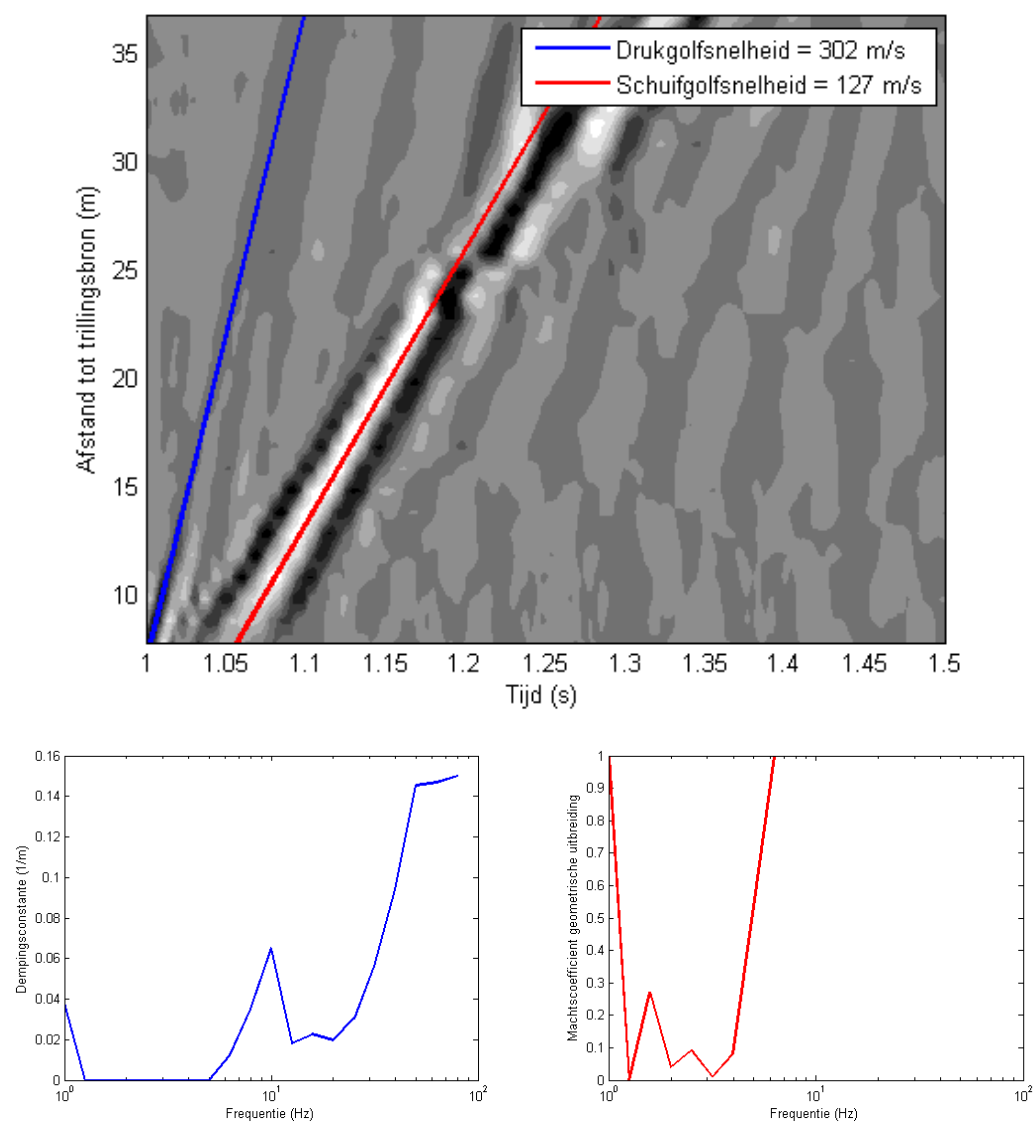
Hierin is $V(r, f)$ de trillingssterkte op een willekeurige afstand r tot de trillingsbron, r_0 een referentieafstand, n een frequentieafhankelijke factor die de geometrische uitbreiding van de trillingen beschrijft en α een frequentieafhankelijke factor die de bodemdemping beschrijft. Met behulp van de kleinste-kwadratenmethode is deze relatie voor elke frequentie in het tertsbandspectrum te bepalen.

De valproeven voor het project *DSSU* zijn uitgevoerd op in totaal 19 locaties, verdeeld langs het tracé, zie Figuur III-3.

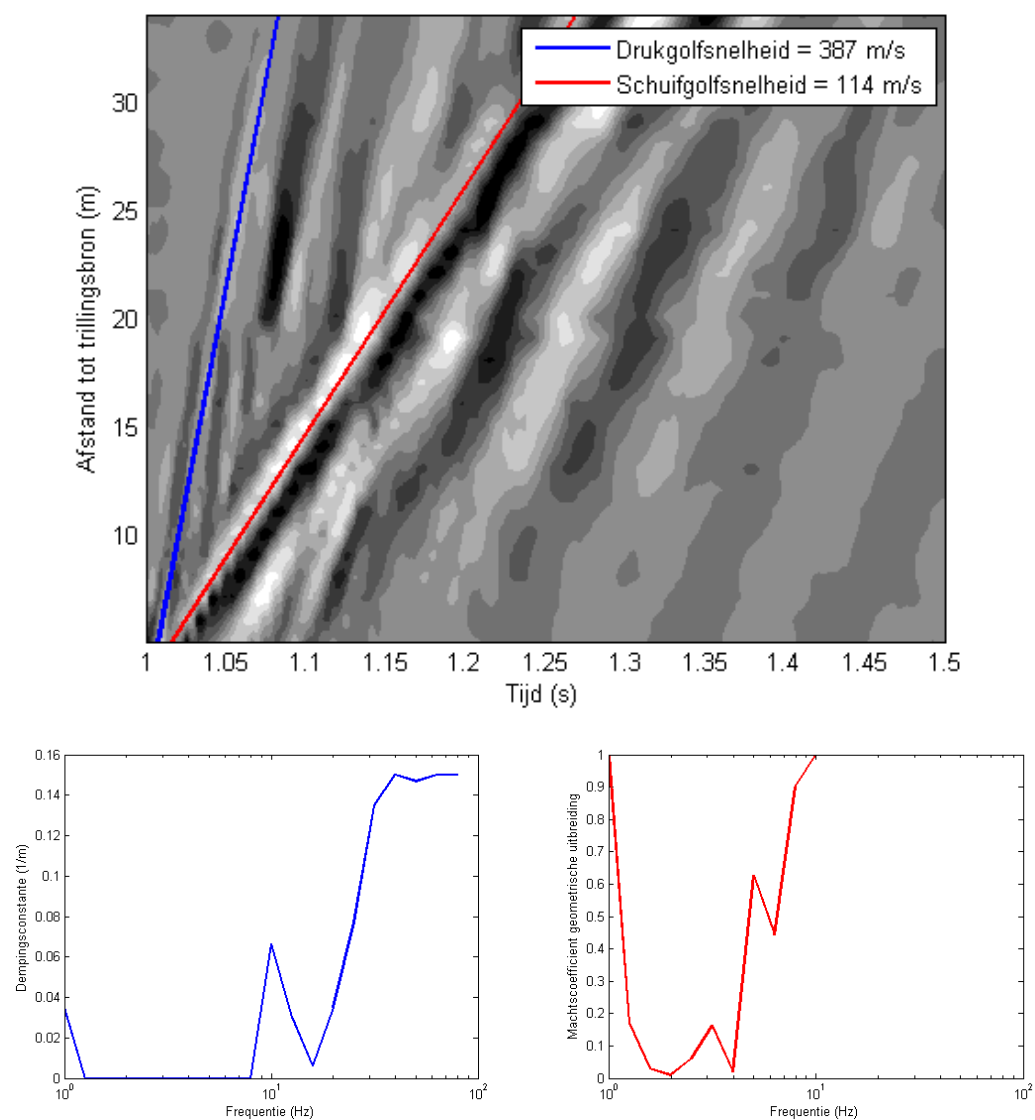


Figuur III-3 Locaties voor valproeven en maaiveldmetingen

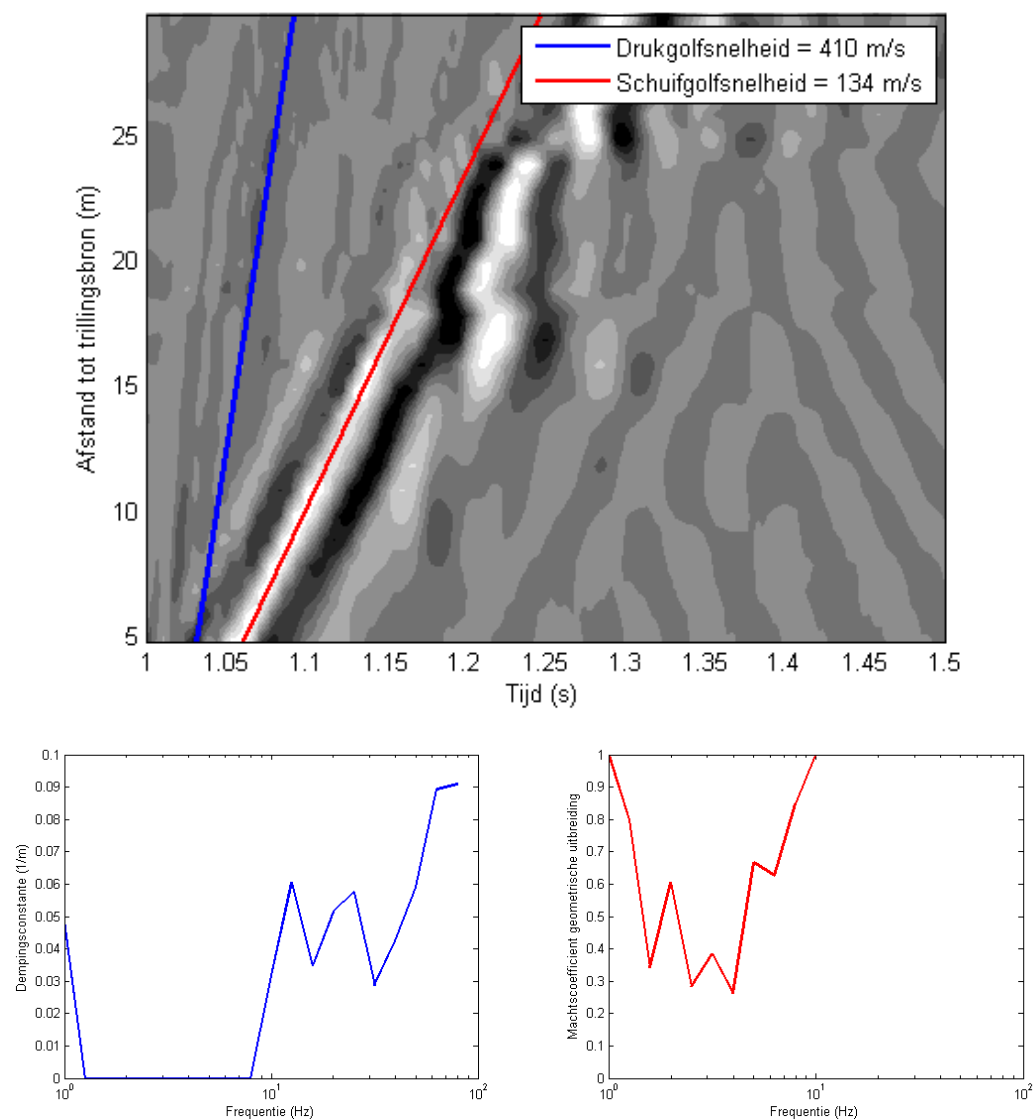
Op alle 19 locaties zijn valproeven uitgevoerd, op een deel van de locaties zijn ook maaiveldmetingen verricht. De beelden van de valproeven (golfpatronen, dempingsparameter en geometrische uitbreidingsfactor) zijn per locatie weergegeven in Figuur III-4 tot en met Figuur III-22.



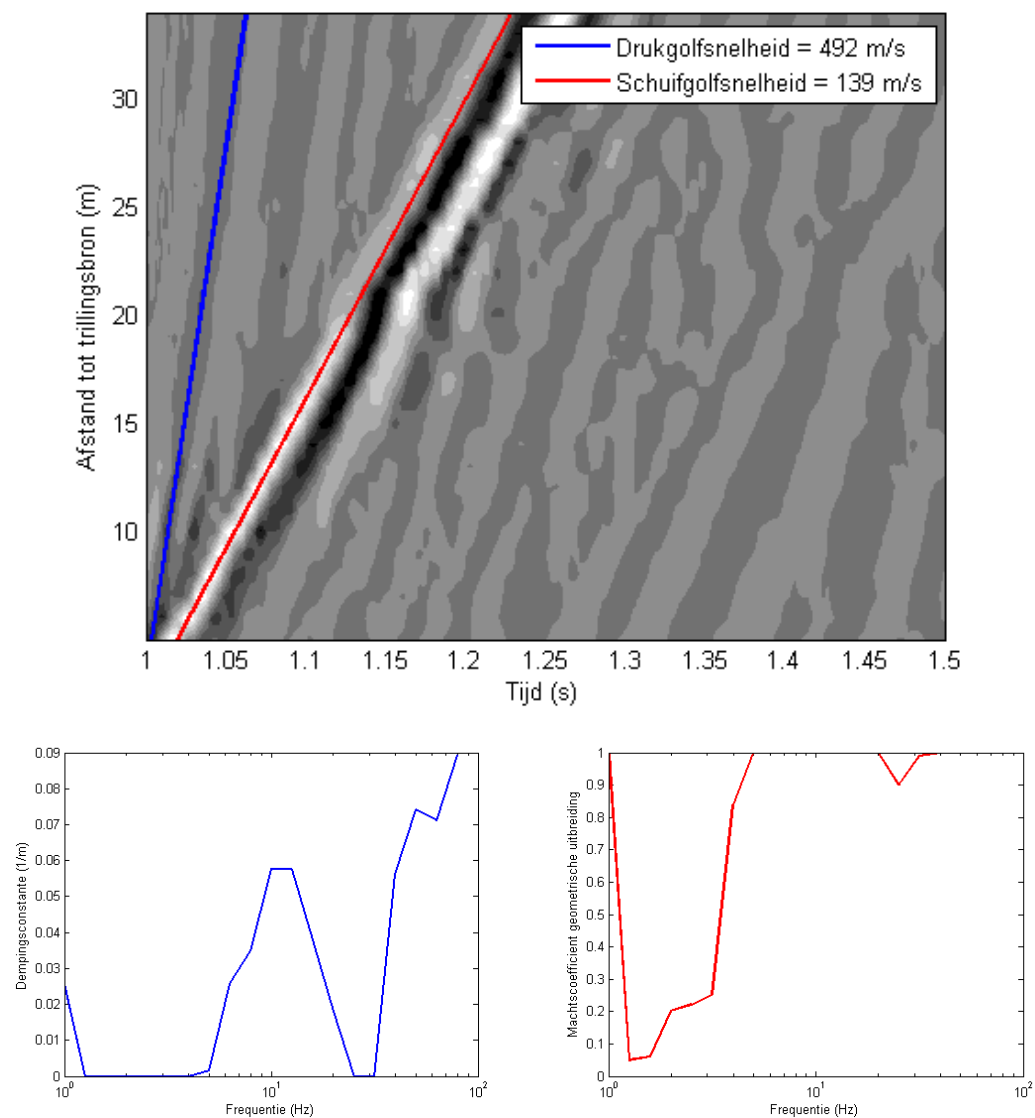
Figuur III-4 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 1. De meting is verricht aan de Van Lennepdwarsstraat



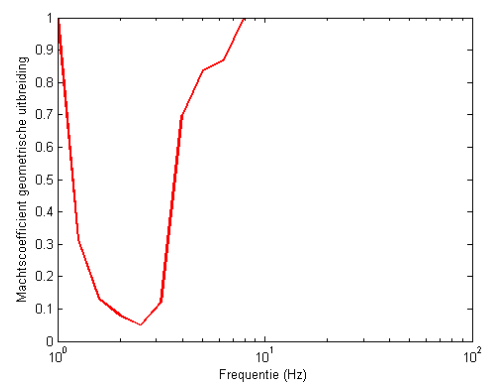
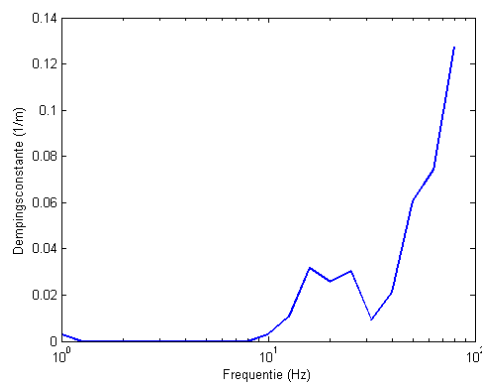
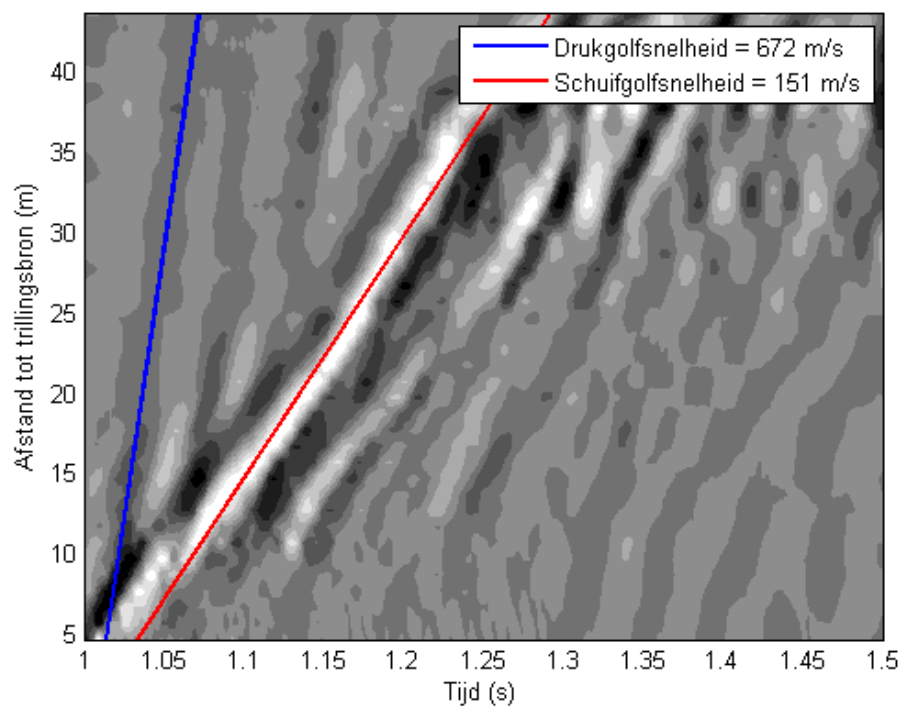
Figuur III-5 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 1. De meting is verricht aan de Gouverneurstraat



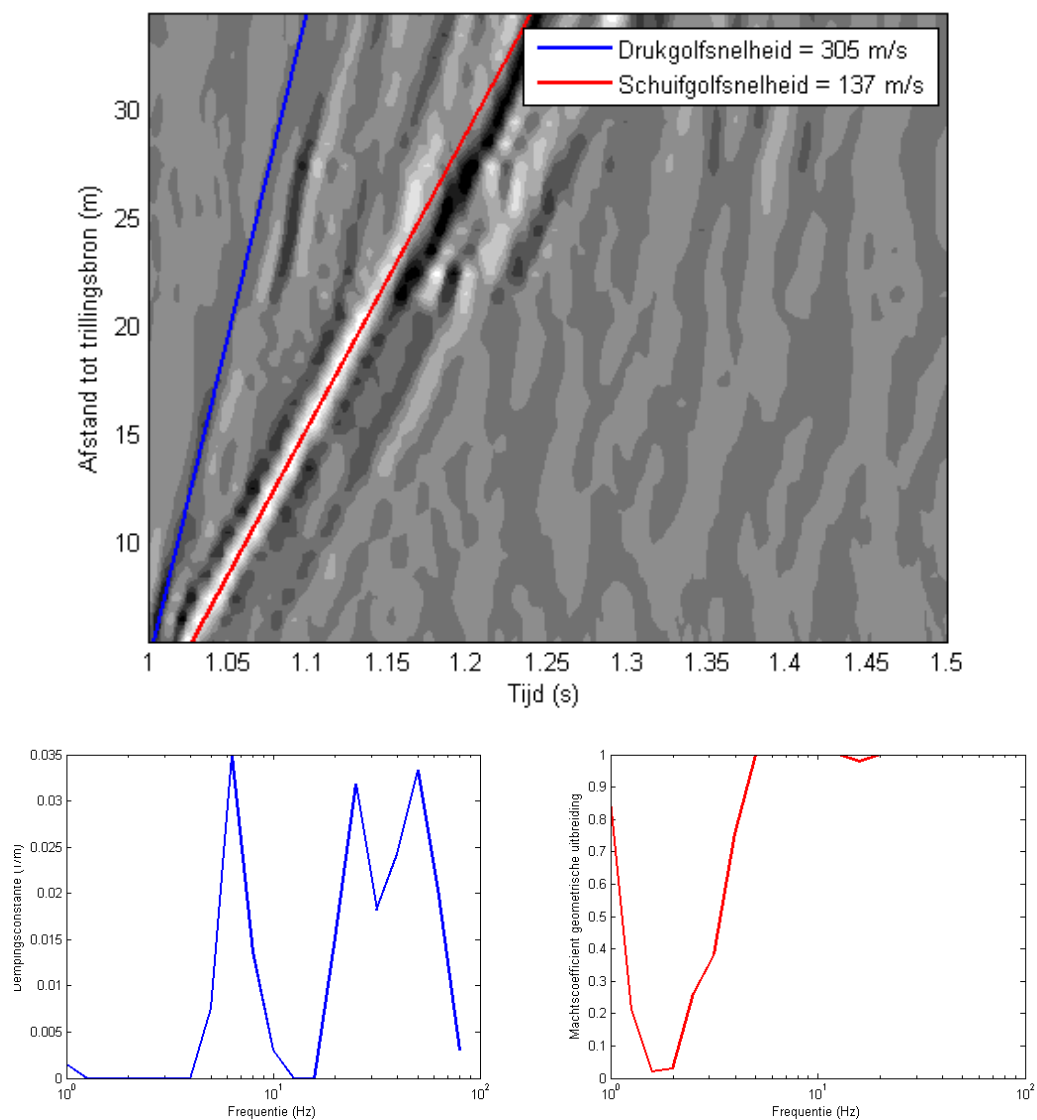
Figuur III-6 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 19. De meting is verricht aan de Wolfstraat



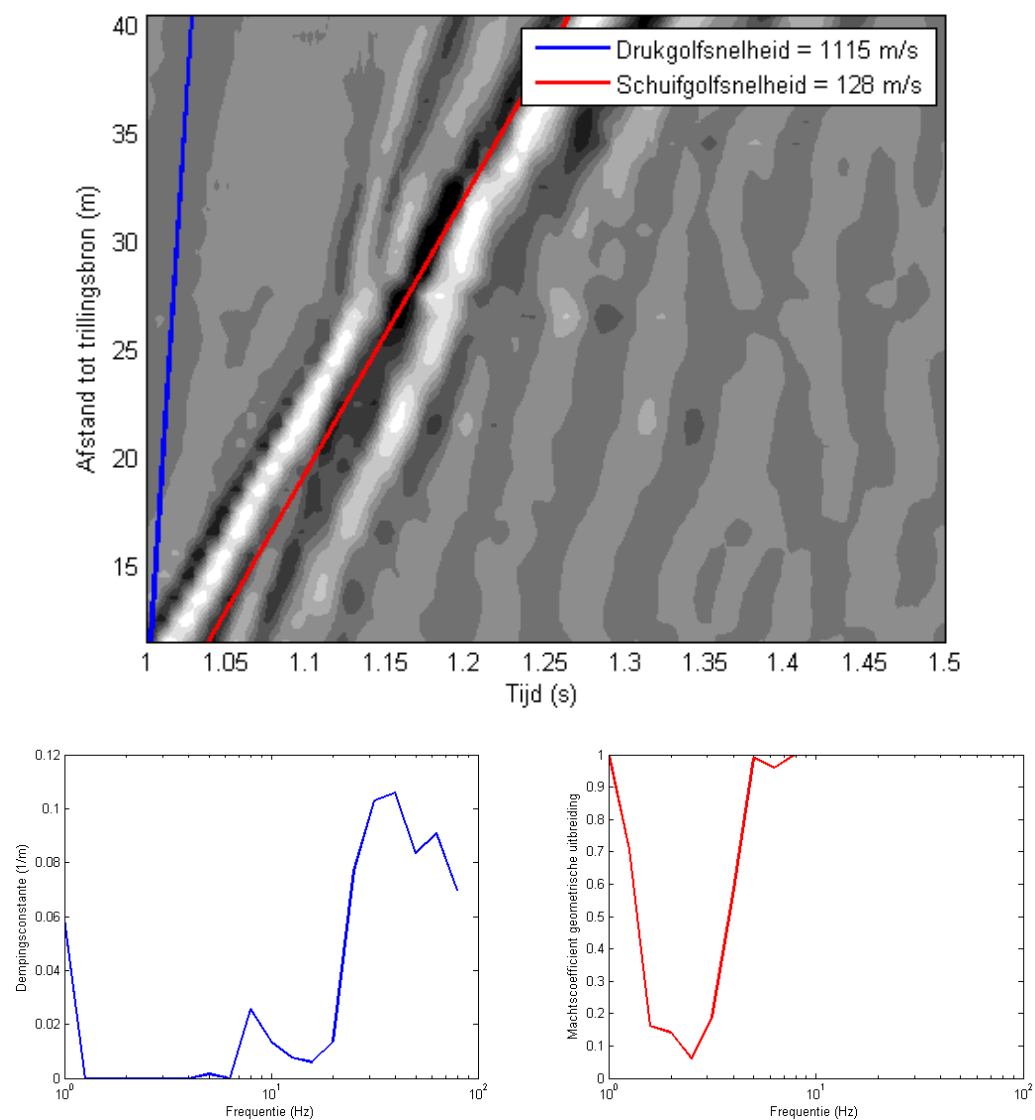
Figuur III-7 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 25. De meting is verricht aan de Oudenoord



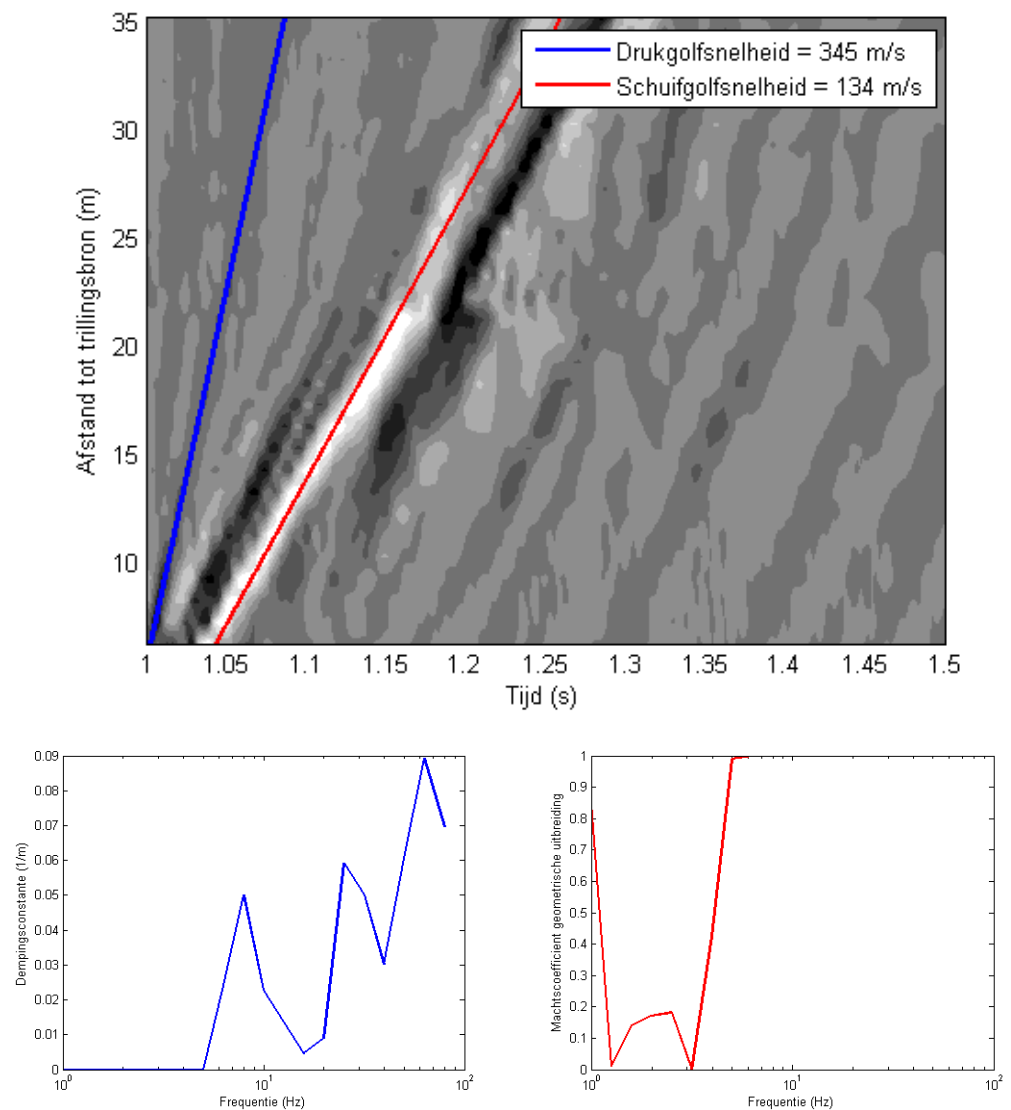
Figuur III-8 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 28. De meting is verricht aan de Cartesiusweg



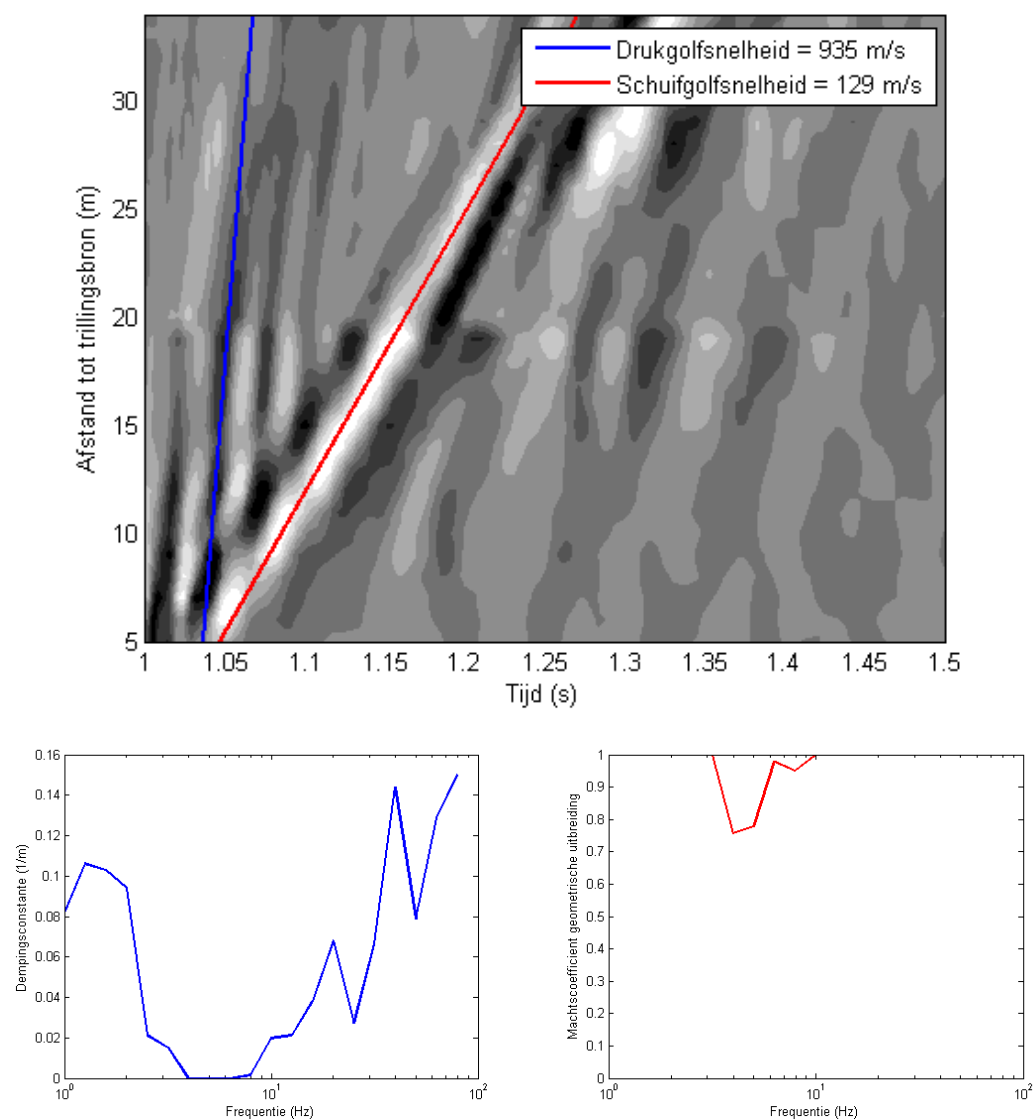
Figuur III-9 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 27. De meting is verricht aan de Julianaparklaan



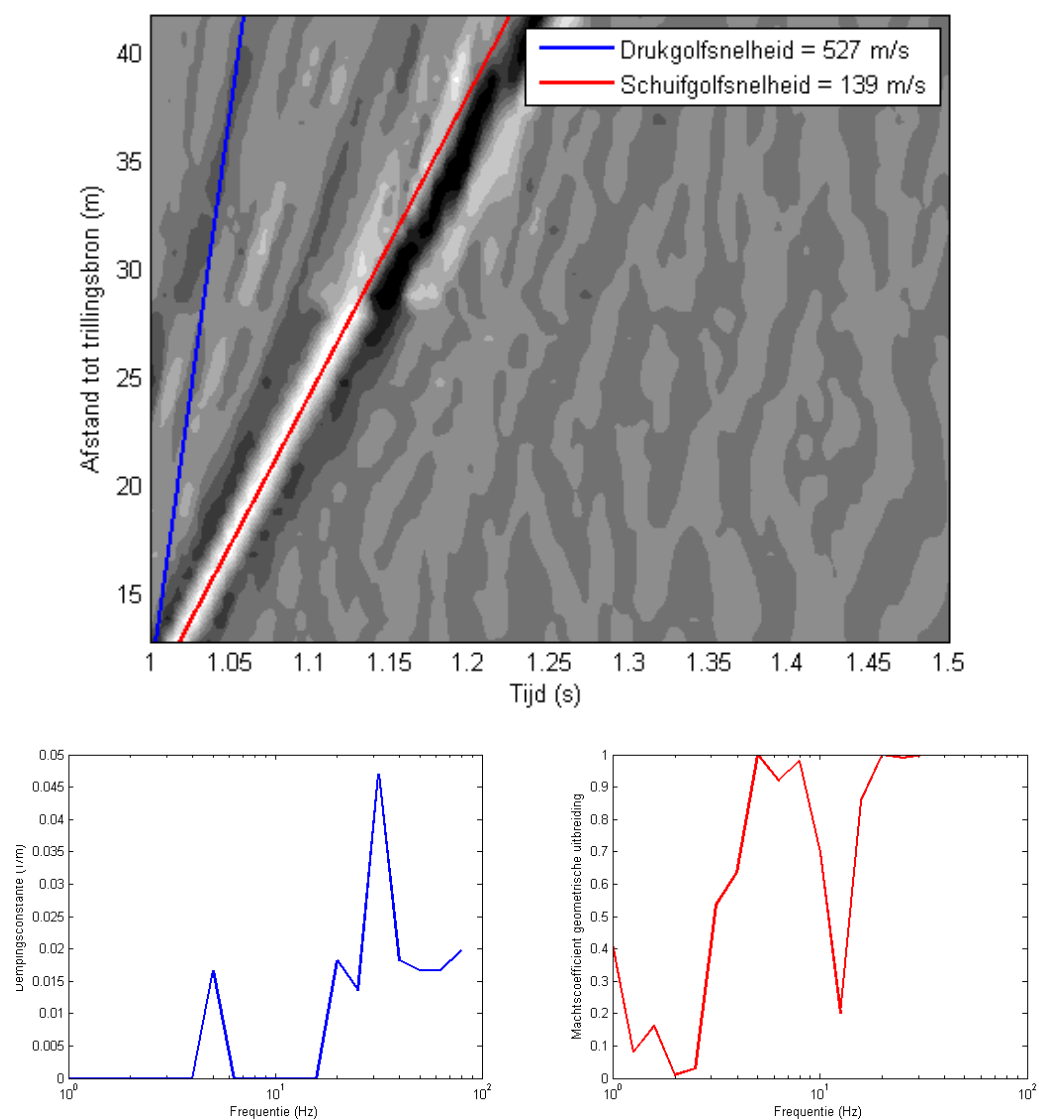
Figuur III-10 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 25. De meting is verricht aan de 2^e Daalsedijk



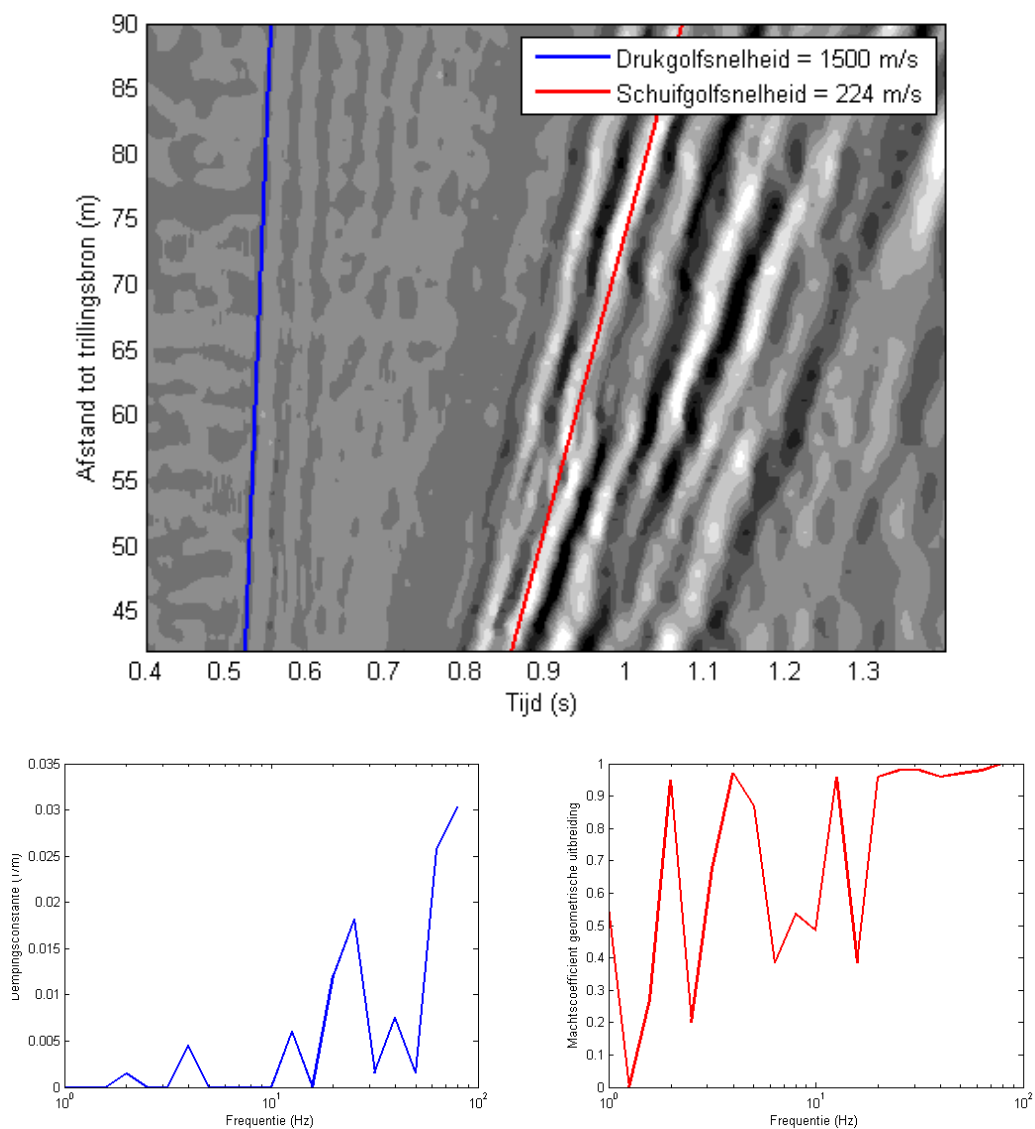
Figuur III-11 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 25. De meting is verricht aan de Laan van Engelsewier



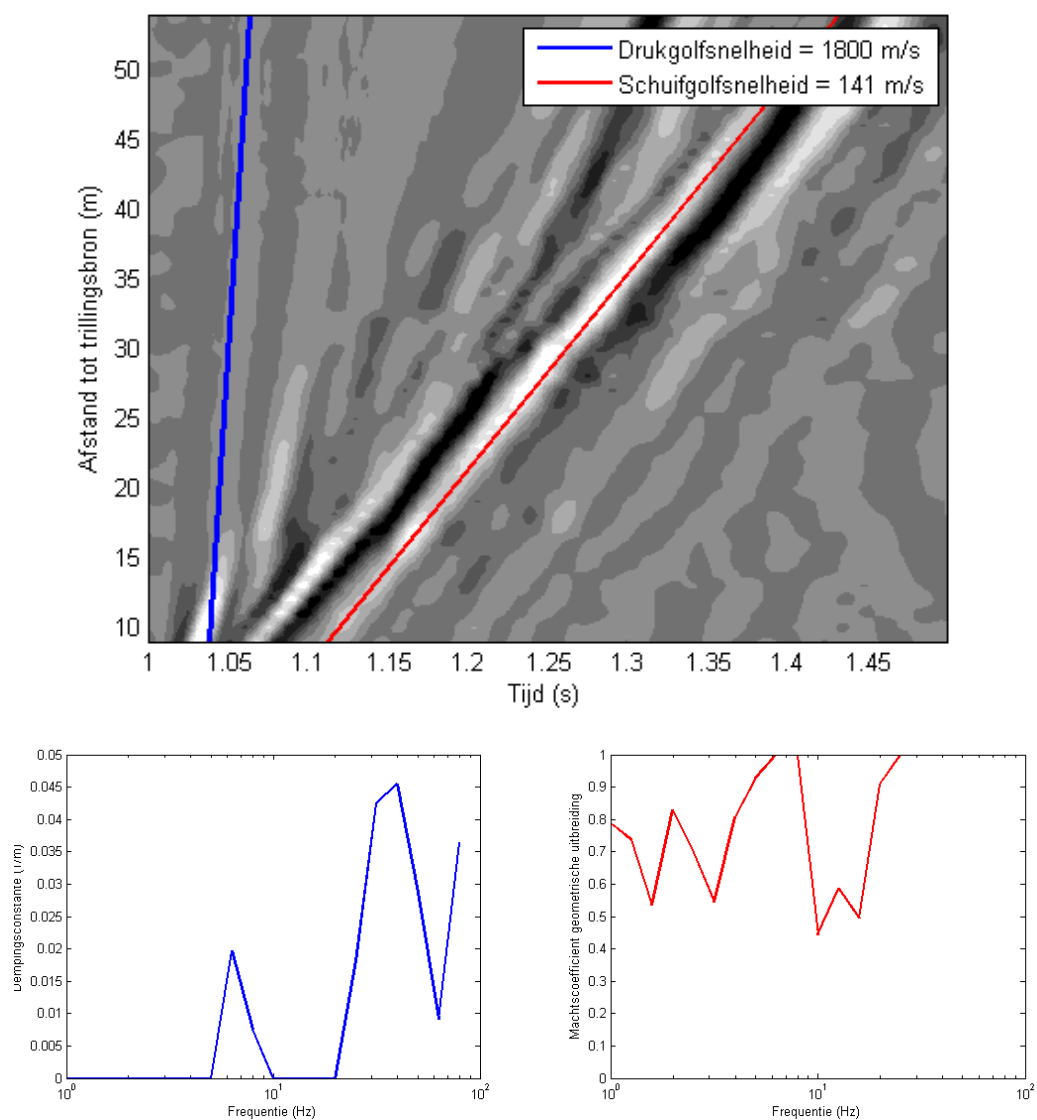
Figuur III-12 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 17. De meting is verricht aan de Nicolaas Beetsstraat



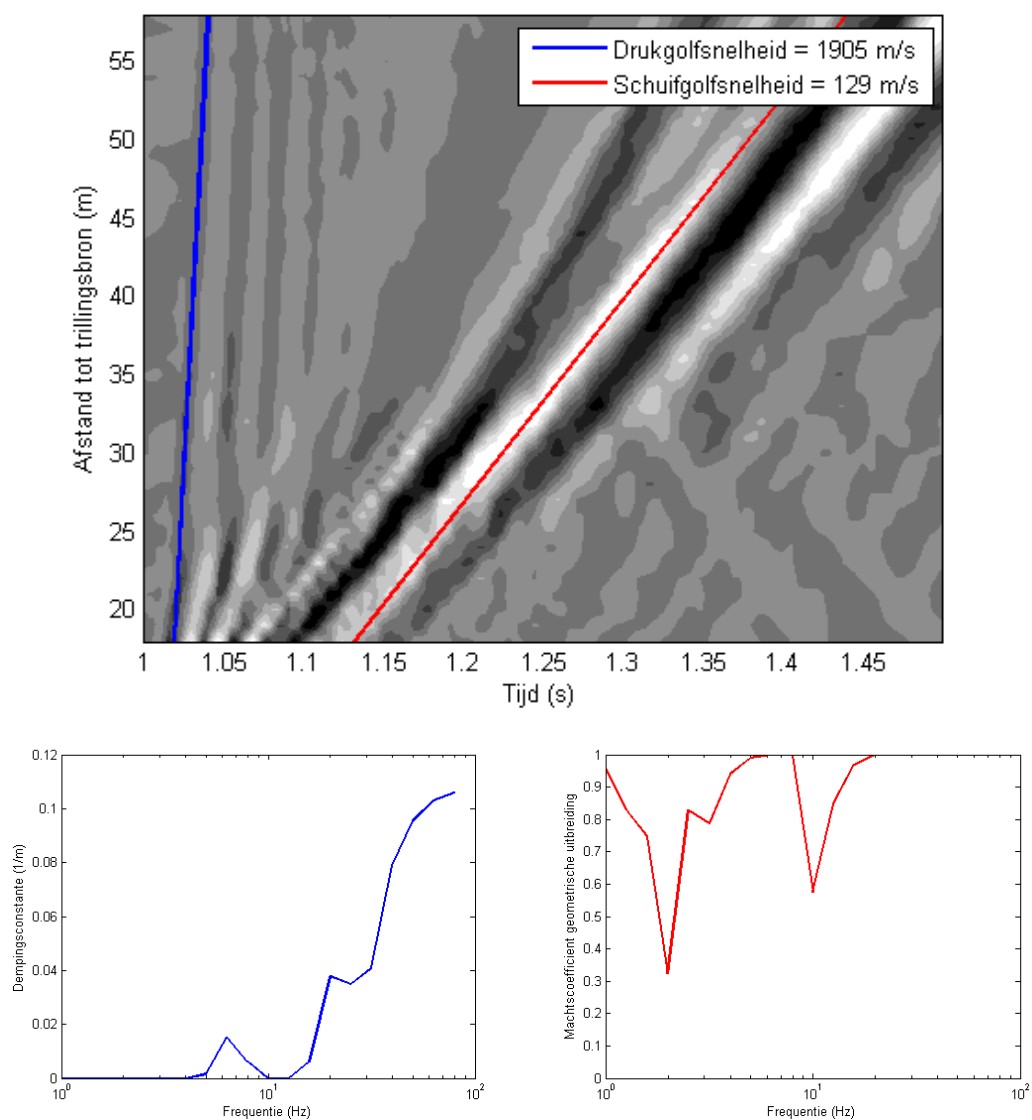
Figuur III-13 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 3. De meting is verricht aan de Mineurslaan



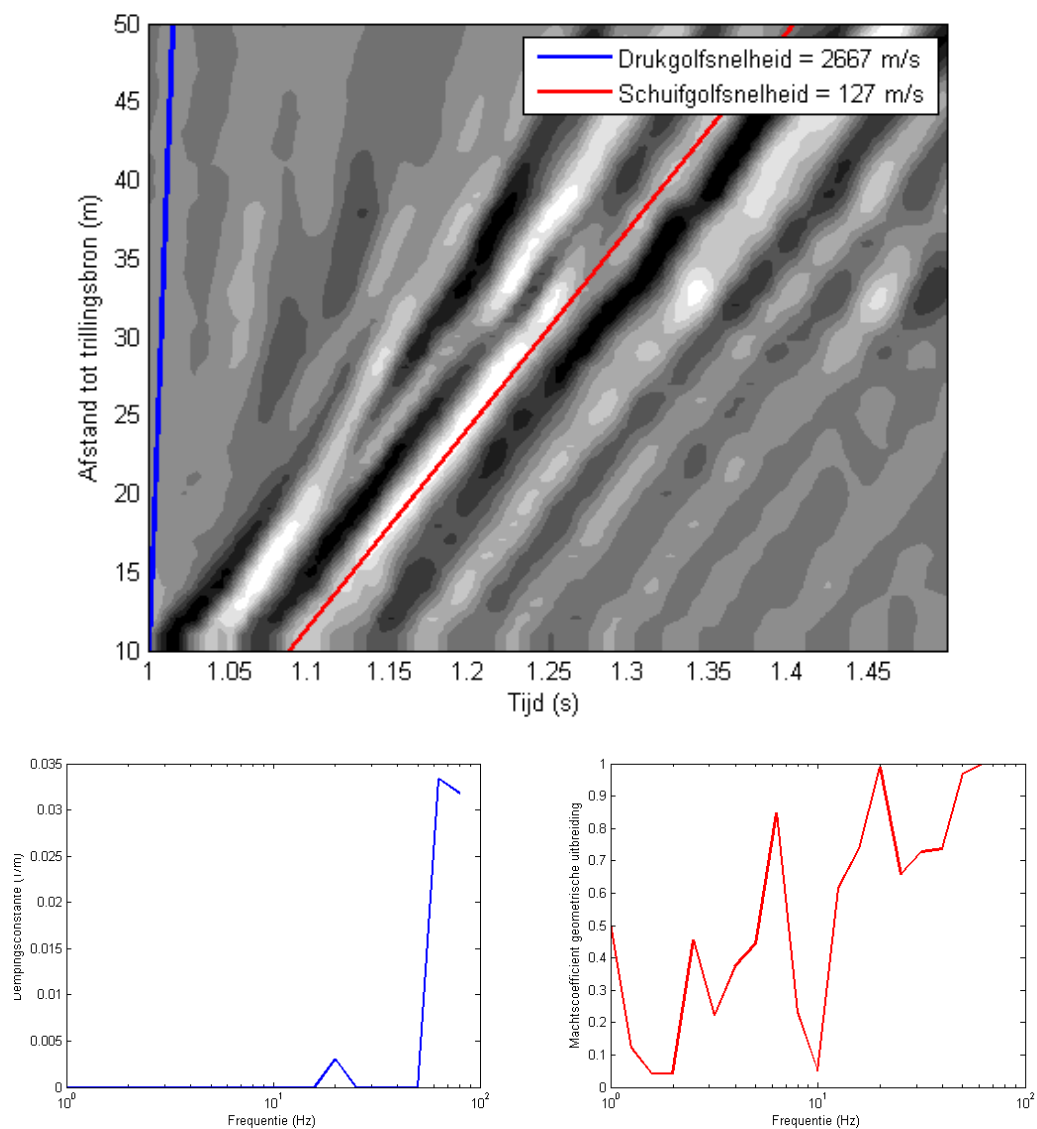
Figuur III-14 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 3. De meting is verricht aan de Hendrik Tollensstraat



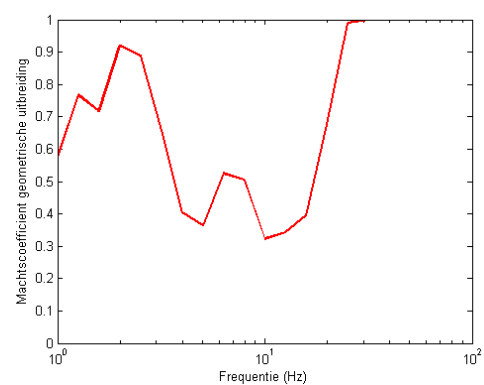
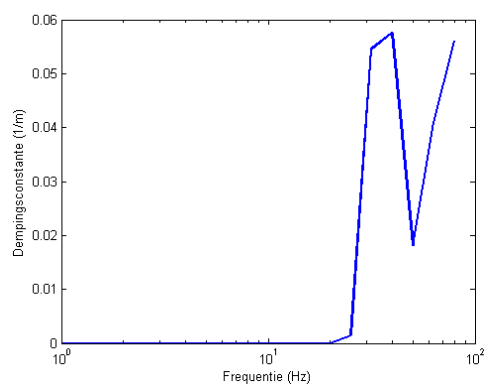
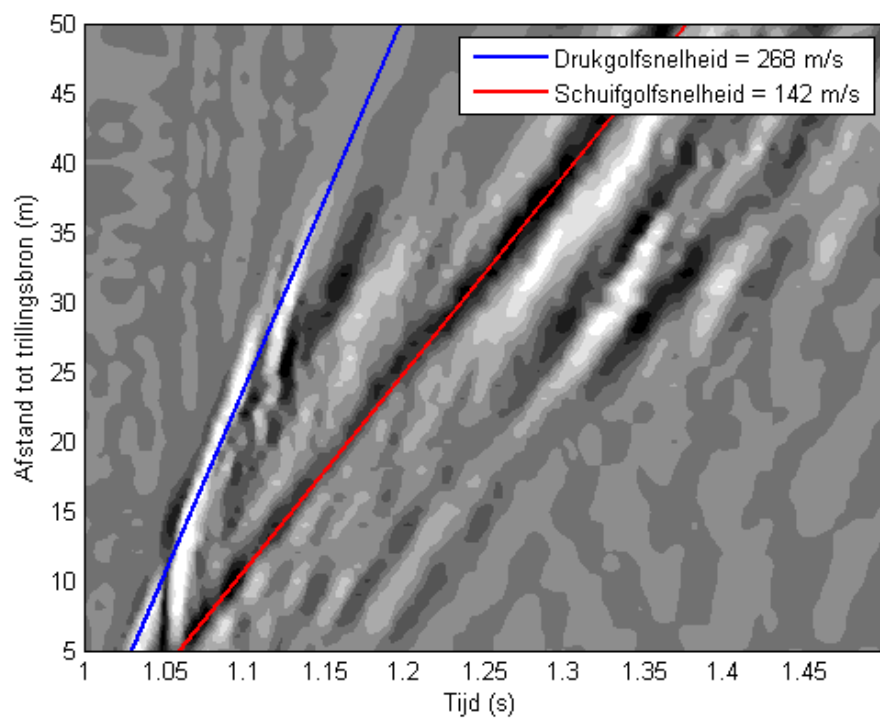
Figuur III-15 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 4. De meting is verricht aan het Tolsteegplantsoen



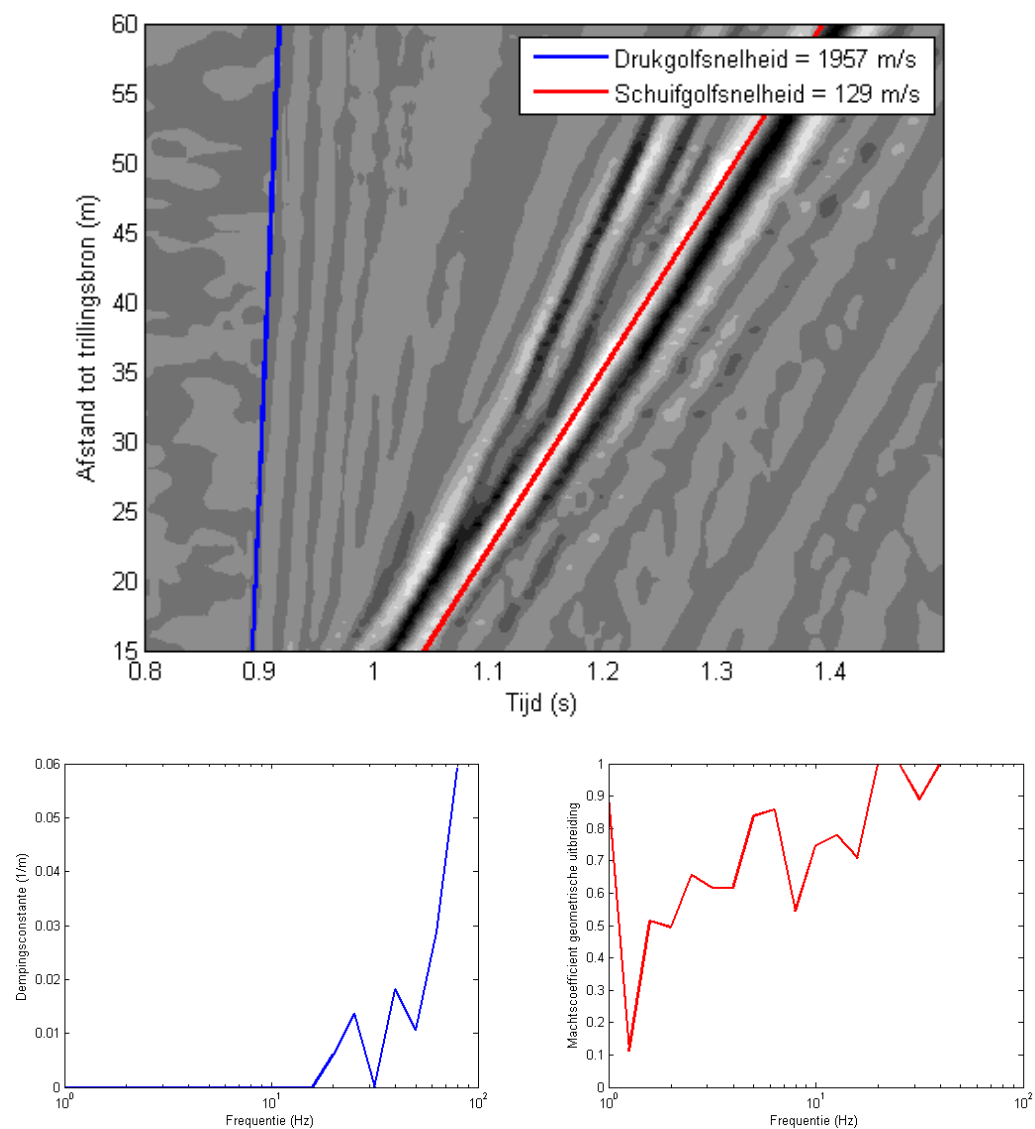
Figuur III-16 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 6. De meting is verricht aan de Engelsmanplaat



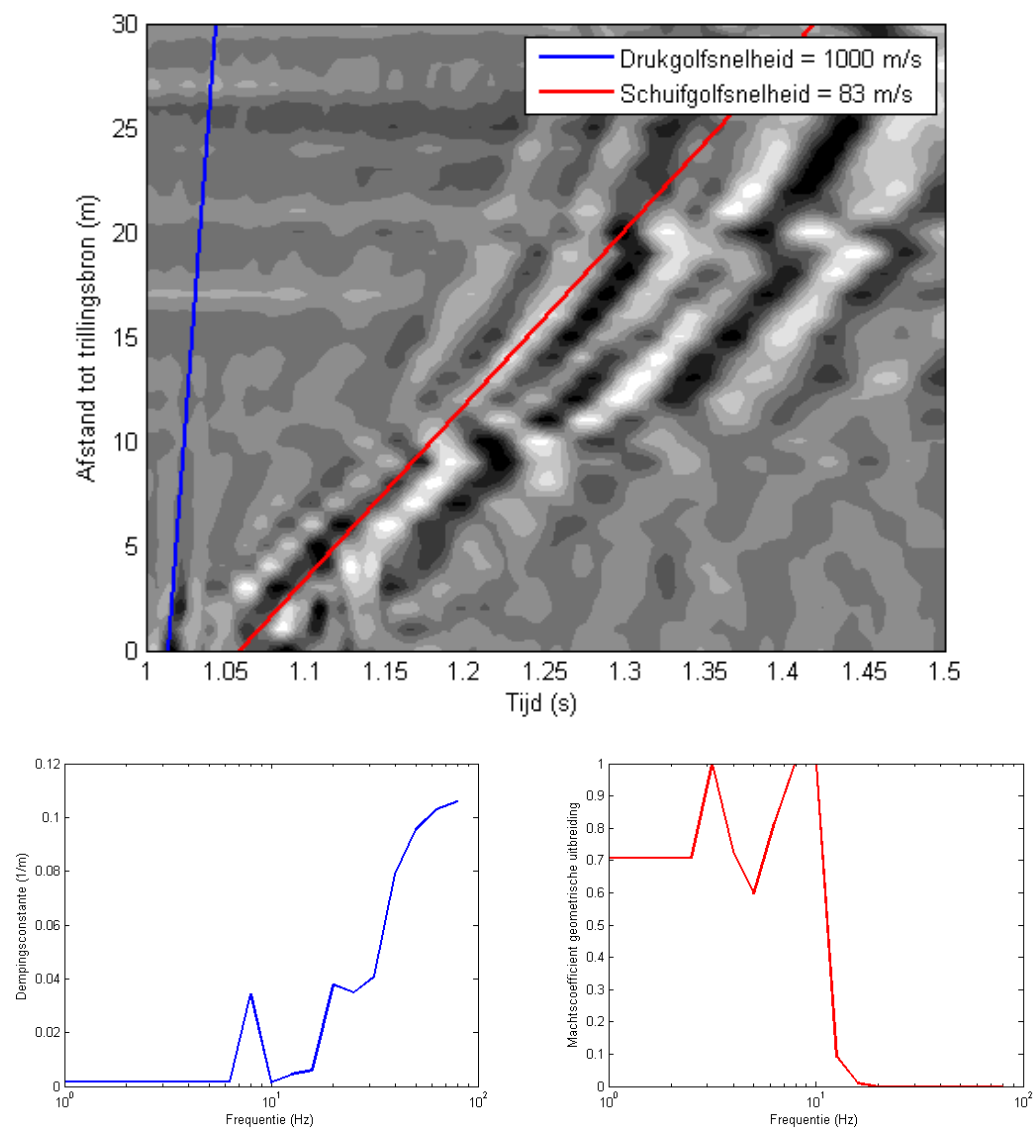
Figuur III-17 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 7. De meting is verricht aan De Wadden



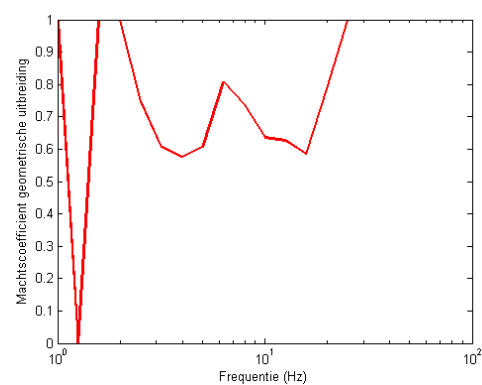
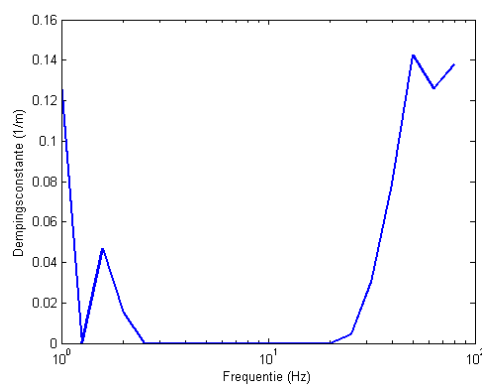
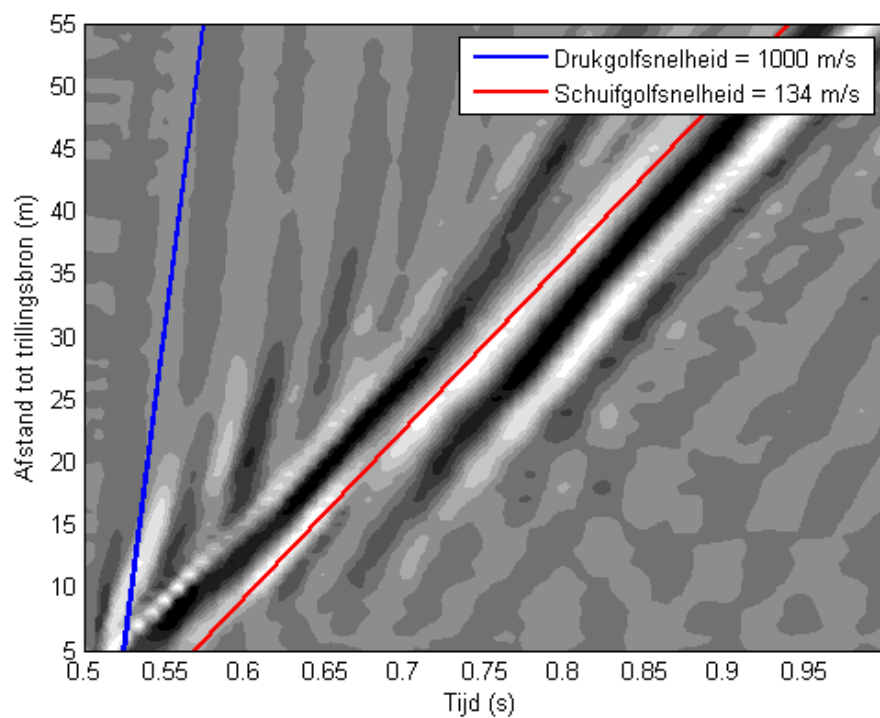
Figuur III-18 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 9. De meting is verricht aan de Nieuwe Houtenseweg



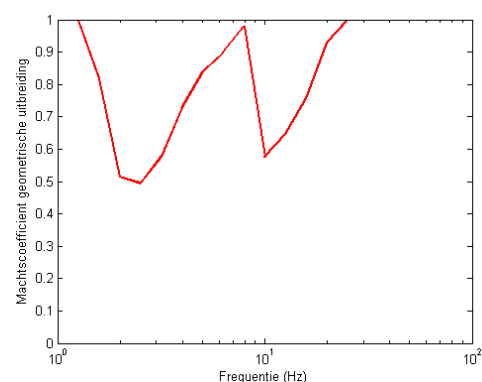
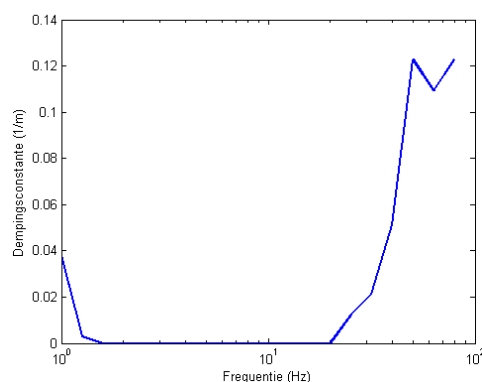
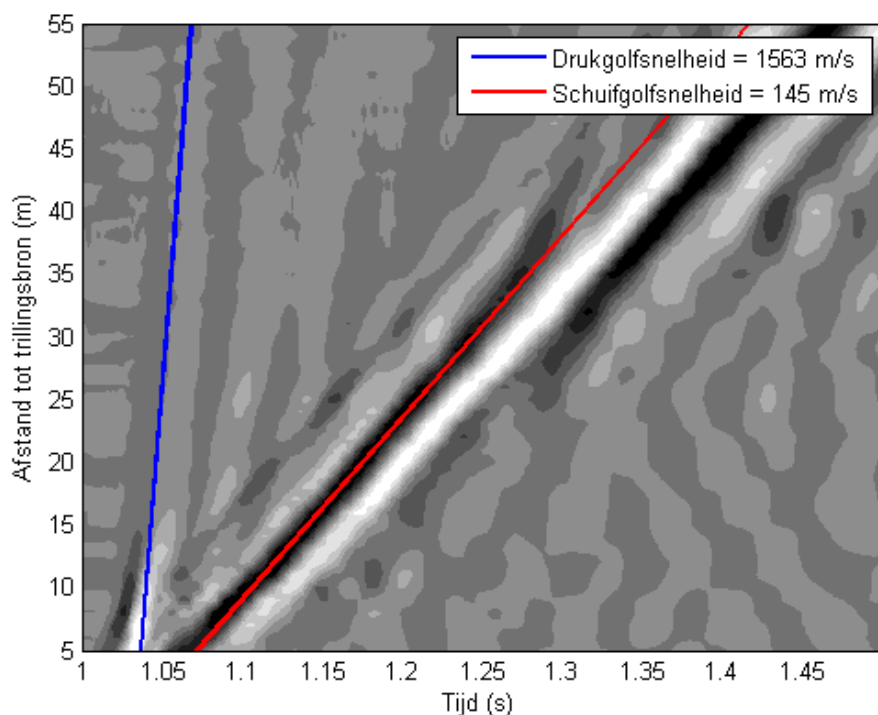
Figuur III-19 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 7. De meting is verricht aan Tussen de rails



Figuur III-20 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 10. De meting is verricht aan het Houtensepad



Figuur III-21 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 15. De meting is verricht aan de Pelikaanstraat

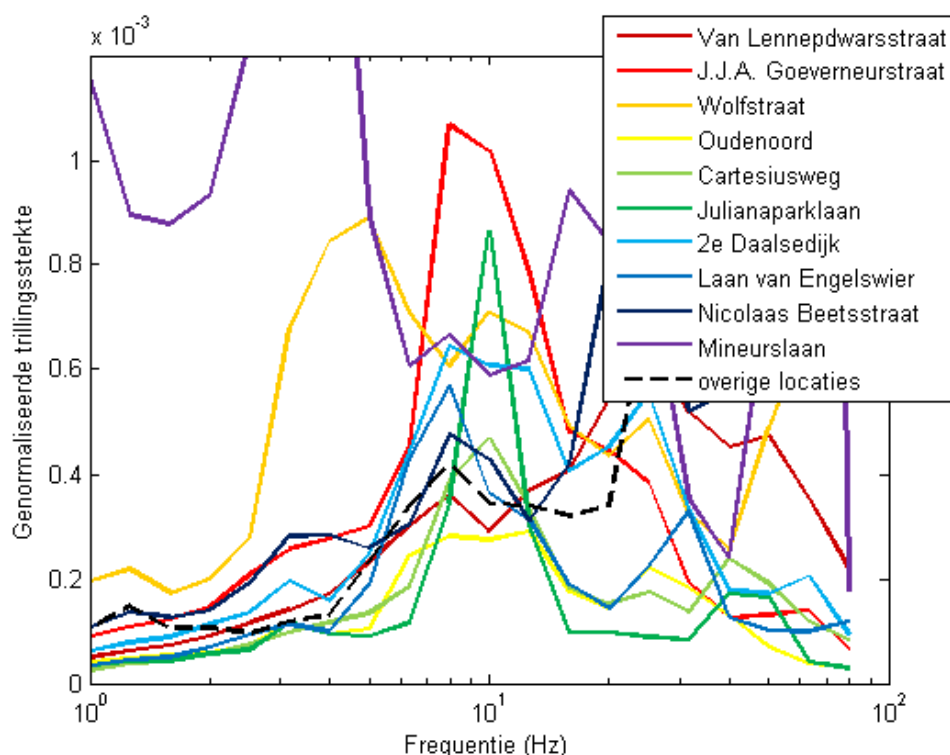


Figuur III-22 Golfpatronen (boven), dempingsparameter (linksonder) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechtsonder) in gebied 16. De meting is verricht aan de Vaartsestraat

De schuifgolfsnelheid, die bepalend is voor de dominante trillingsgolf, verschilt nauwelijks langs het tracé en varieert tussen de 115 en 150 m/s. Bij de locatie Houtensepad is de schuifgolfsnelheid aanzienlijk lager, dit komt door de slappe kleilaag die hier is aangebracht bovenop de zandlagen van de oorspronkelijke bodem. Ook bij de locatie Hendrik Tollensstraat wijkt deze snelheid sterk af, de valproef is hier echter anders uitgevoerd (Kruisvaart tussen valproeflocatie en meetsensoren in). Ook hieruit volgt dat de bodem in Utrecht sterk uniform is. De compressiegolf varieert wel sterk, dat heeft te maken met variaties in de toplaag (asfalt of andere verharding versus een zachte toplaag van grond of zand).

Maaiveldmetingen

Op een aantal locaties zijn, naast de valproefmetingen, maaiveldmetingen uitgevoerd aan passerende treinen. Hiervoor is gebruik gemaakt van een aantal sensoren op verschillende afstanden tot de sporen. Door per treinpassage het tertsbandspectrum van de trillingen en de bijbehorende snelheid te registreren, is per locatie een gemiddeld tertsbandspectrum vastgesteld, genormaliseerd voor snelheid. Voor alle overige locaties wordt gebruik gemaakt van een gemiddeld signaal uit een aantal maaiveldmetingen, uitgevoerd op een aantal locaties. Deze elf signalen zijn weergegeven in Figuur II-23.



Figuur III-23 Voor snelheid genormaliseerde tertsbandspectra voor treintype VIRM

Een aantal locaties vertoont sterk afwijkende spectra, het gaat met name om de locaties Wolfstraat en Mineurslaan. Op deze locaties liggen veel wissels die de signalen verstoren. Er is een grote overeenkomst tussen de tertsbandspectra, op enkele locaties worden wel hogere waarden gemeten rond de piekfrequentie van 10 Hz (bijv. bij de Van Lennepdwarsstraat).

Bijlage IV Verwerkingsprocedure trillingsmetingen

Ten behoeve van de derde stap van het trillingsonderzoek zijn metingen uitgevoerd op een aantal locaties. Deze metingen zijn onbemand uitgevoerd met behulp van een meetcomputer die continu (gedurende minimaal een week) de trillingssignalen meet. Aan deze meetcomputer is een webcam gekoppeld die de treinen registreert. Om een dataset met trillingen van treinverkeer te genereren wordt de volgende procedure doorlopen om te garanderen dat alle door treinen veroorzaakte trillingen in beschouwing worden genomen en dat niet-spoorgerelateerde trillingen buiten beschouwing worden gelaten:

1. Stap 1: met behulp van gegevens over de passagetijden²² en videobeelden zijn de treinen gemarkeerd. De lijst met passagetijden is gebruikt om te verifiëren dat alle passerende treinen (ook in de nacht) ook daadwerkelijk zijn gemarkeerd: het aantal treinen in de database komt overeen met het aantal gemarkeerde treinen.
2. Stap 2: bij de meting wordt gebruik gemaakt van meerdere sensoren. Met behulp van spectraalanalyse²³ worden de trillingssignalen van beide sensoren op elkaar te delen kunnen lokale fenomenen (bijvoorbeeld voetstappen in de ene ruimte) worden uitgefilterd. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de videobeelden om te verifiëren of de uitgefilterde signalen daadwerkelijk vervuild zijn met voetstappen;
3. Stap 3: met behulp van spectraalanalyse worden afwijkende trillingssignalen nader geanalyseerd. Signalen met een sterk afwijkend frequentiespectrum zijn vaak vervuild met werkzaamheden buiten of passerend vrachtverkeer. Omdat deze trillingen niet te wijten zijn aan passerende treinen, worden deze trillingen apart gemarkeerd als zijnde achtergrondtrillingen;
4. Stap 4: de hoogste waarden uit de dataset worden nogmaals gecontroleerd of het niet-vervulde treinsignalen zijn of niet. Elke trein wordt gemarkeerd met de bijbehorende spoorafstand. Alle niet spoorgerelateerde trillingsbronnen worden apart gemarkeerd. In de datasets in Bijlage III zijn deze trillingsbronnen eveneens weergegeven.

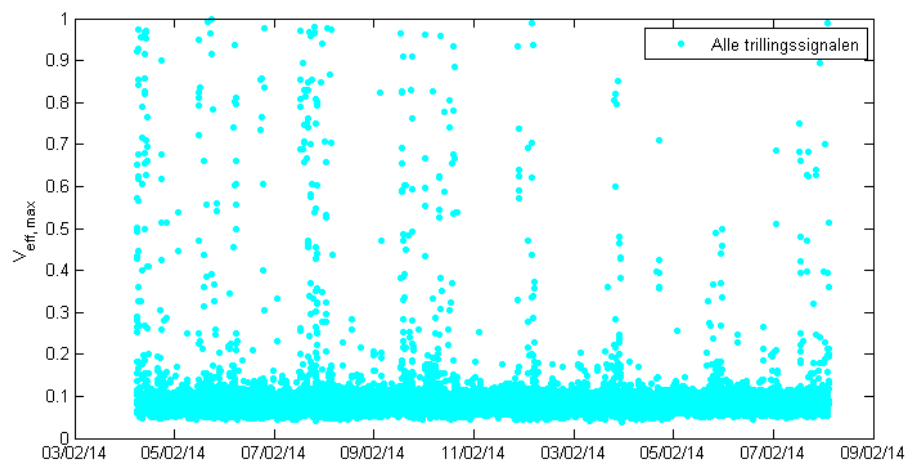
Deze stappen worden met behulp van een voorbeeldsituatie nader toegelicht in deze bijlage.

²² Deze passagetijden zijn opgevraagd bij ProRail

²³ Spectraalanalyse is het onderzoeken van het frequentiespectrum van een trillingssignaal. Hierbij wordt naar de verschillende frequenties gekeken.

Verwerking van ruwe meetdata

Na het uitvoeren van de meting wordt de ruwe data geconverteerd naar $V_{eff,max}$ -waarden per 30 seconden, conform de procedure in de SBR B-richtlijn. Per meetlocatie is deze bewerkte meetdata eventueel opvraagbaar. Een voorbeeld van een dergelijk resultaat is weergegeven in Figuur IV-1. Elk punt stelt een 30-secondeperiode voor. In de resultaten is duidelijk zichtbaar dat er periodieke verstoringen optreden, die met een dag-nacht ritme terugkeren.



Figuur IV-1 Meetdata, $V_{eff,max}$ per 30 seconden

Stap 1 – Toekennen van treinpassages aan 30-seconde periodes

In de eerste stap van de verwerkingsprocedure wordt gekeken of binnen een bepaalde 30-secondeperiode een trein passeert, en zo ja, om welk type trein het gaat en over welk spoor deze trein rijdt. Deze eerste selectie vindt bij voorkeur plaats met behulp van gegevens over de passagetijden van alle treinen, en wordt eventueel geverifieerd met behulp van de videobeelden. Door deze dubbele procedure wordt gegarandeerd dat alle gepasseerde treinen worden meegenomen in de analyse.

Een voorbeeld wordt hieronder toegelicht.

Voorbeeldsituatie

De gegevens per treinpassage geven voor verschillende zogenaamde ‘dienstregelpunten’ de passagetijd van elke gepasseerde trein aan. Per passage en per dienstregelpunt zijn het unieke treinnummer, de vervoerder, het treintype, de rijrichting en het type trein opgenomen. Met deze gegevens kan een inschatting worden gegeven van de passagetijd van elke trein op de meetlocatie.

In deze voorbeeldsituatie zijn er passagegegevens van een trein met treinnummer 104 van vervoerder NSR (NS Reizigers) op de passagepunten *Ut* en *Utoa*, zie Figuur IV-2. De locaties van deze passagepunten zijn bekend, de meetlocatie ligt ongeveer halverwege tussen deze punten in. Verder is de richting van de trein en het type trein (*IC*) aangegeven. Op basis van de passagetijden en de locatie is de verwachting dat deze trein tussen 12:42:30 en 12:43:15 passeert.

ProRail

PAB Detailtreinactiviteiten

Dag	Vervoerder	Treinnummer	Rijrichting	Rijvolgorde	Dienstregelpunt	Activiteit	Plantijd	Rijkskarakteristiek
							Uitvoering	Uitvoering
24-02-2014	NSR	104	VB	540	Ut	V	21-jul-2013 12:42:00	IC
24-02-2014	NSR	104	VB	550	Utoa	D	21-jul-2013 12:43:58	IC
24-02-2014	NSR	105	NB	180	Utoa	D	21-jul-2013 12:44:26	ICE
24-02-2014	NSR	105	NB	190	Ut	A	21-jul-2013 12:46:43	ICE

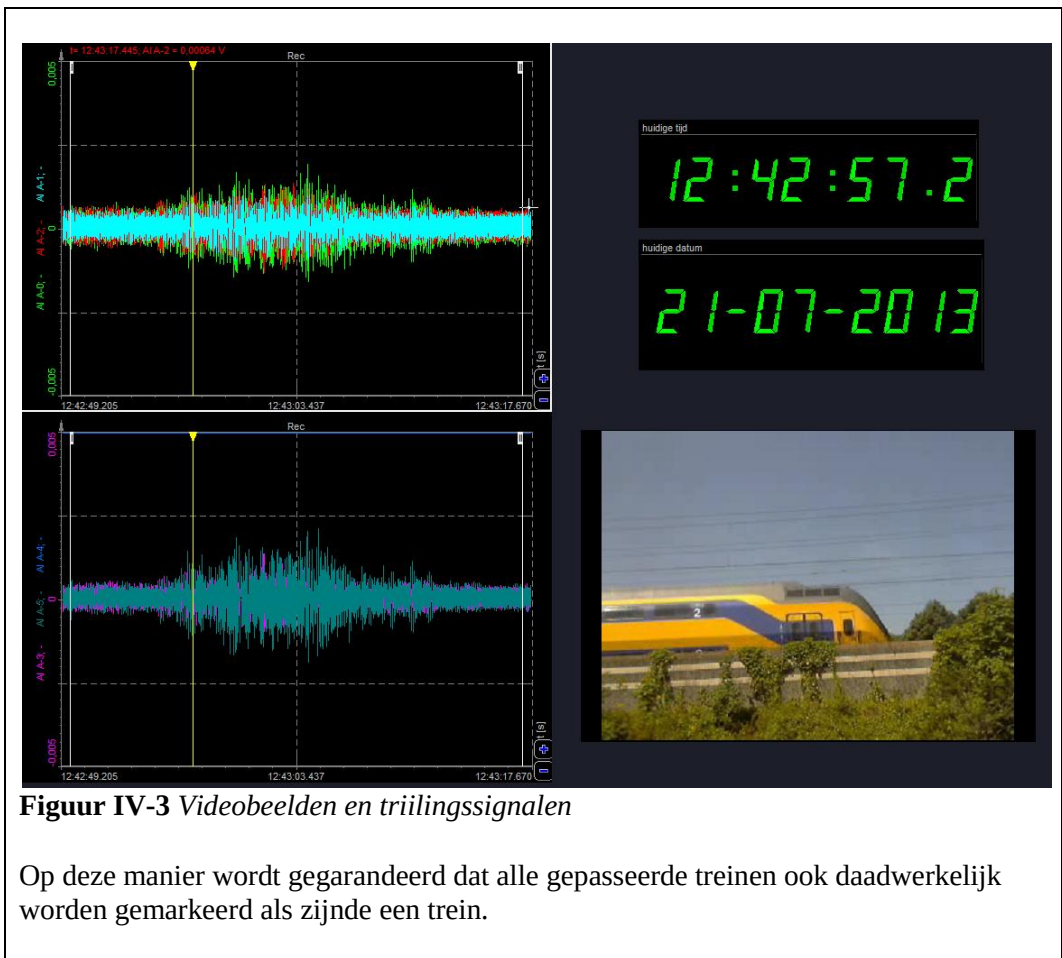
Figuur IV-2 Voorbeeldgegevens treinpassages

Elk type trein heeft verder een karakteristiek trillingsspectrum. Voor de verschillende 30-secondeperiodes waarin de treinpassage kan hebben plaatsgevonden, wordt het karakteristieke trillingsspectrum van de passerende trein vergeleken met het trillingsspectrum van die 30-secondeperiode. Middels een gewogen²⁴ kleinste kwadratenmethode²⁵ wordt bepaald welke periode van 30 seconden het best passend is, deze periode wordt gemarkeerd als zijnde de treinpassage.

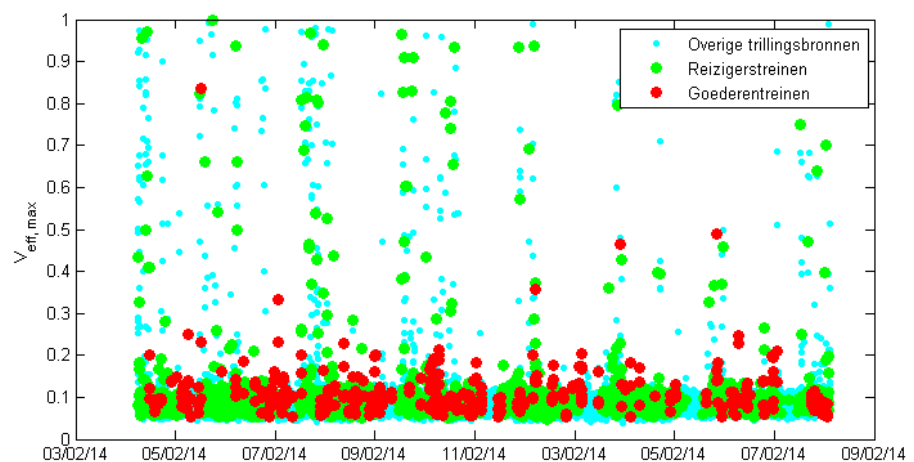
Op een deel van de locaties vindt aanvullend geautomatiseerde verificatie plaats op basis van beeldverwerking van de videobeelden, zie Figuur IV-3. Hierbij worden opeenvolgende videobeelden geautomatiseerd met elkaar vergeleken om te bepalen of er een trein passeert, en zo ja, in welke richting en met welke rijsnelheid.

²⁴ Gewogen voor trillingssterkte, zodat sterkere trillingssignalen zwaarder worden meegenomen dan minder sterke trillingssignalen

²⁵ Kleinste kwadratenmethode is een rekenmethode om een verdeling punten te vergelijken met bijvoorbeeld een berekende waarde. De methode geeft aan welke punten het dichtst bij de berekende waarde liggen.

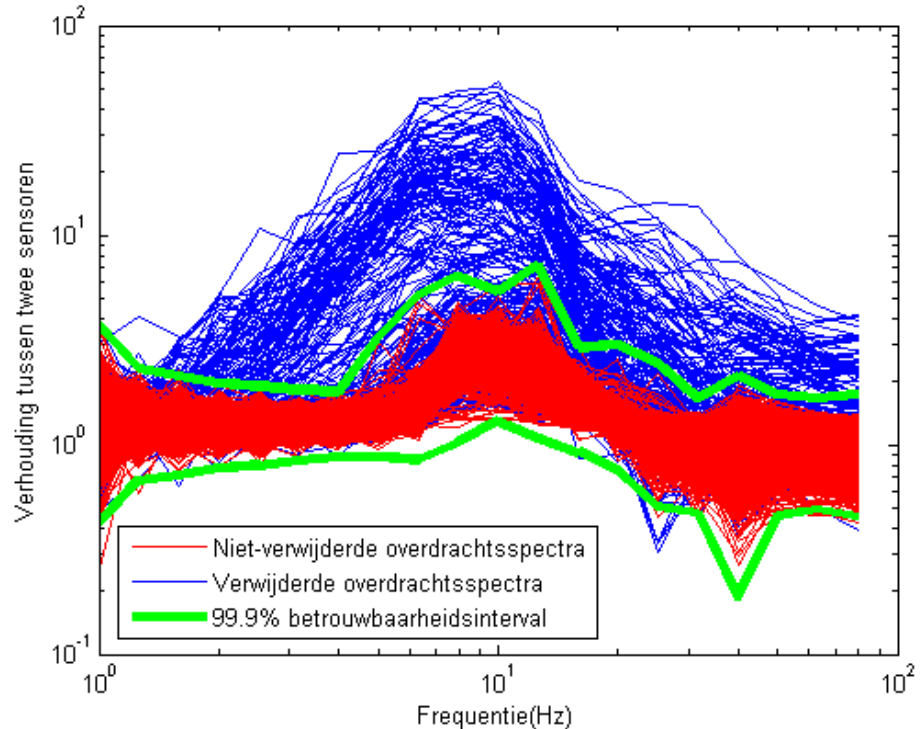


Het resultaat van deze stap is weergegeven in Figuur IV-4. De blauwe stippen zijn zeker geen treinen, de overige, als trein gemarkeerde, stippen zijn mogelijk treinen maar kunnen ook vervuild zijn. Daarom worden vervolgstappen ondernomen om deze vervuilde signalen te verwijderen.



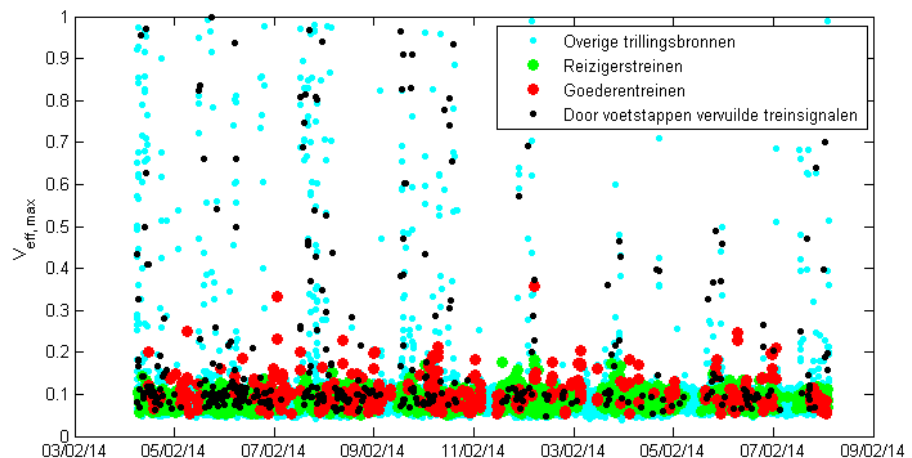
Stap 2 – Uitfilteren van interne verstoringen, zoals voetstappen

Omdat gebruik wordt gemaakt van meerdere sensoren, kunnen de trillingsspectra van de verschillende sensoren op elkaar worden gedeeld. Hierdoor worden lokaal optredende trillingen, zoals voetstappen, inzichtelijk gemaakt. Deze voetstappen vertonen immers alleen een uitslag op een van beide sensoren. Een voorbeeld van deze selectie op trillingsspectra is weergegeven in Figuur IV-5. De selectiecriteria worden vastgesteld op basis van de spreiding in overdrachten en geverifieerd in de videobeelden.



Figuur IV-5 Spectraalanalyse in stap 2

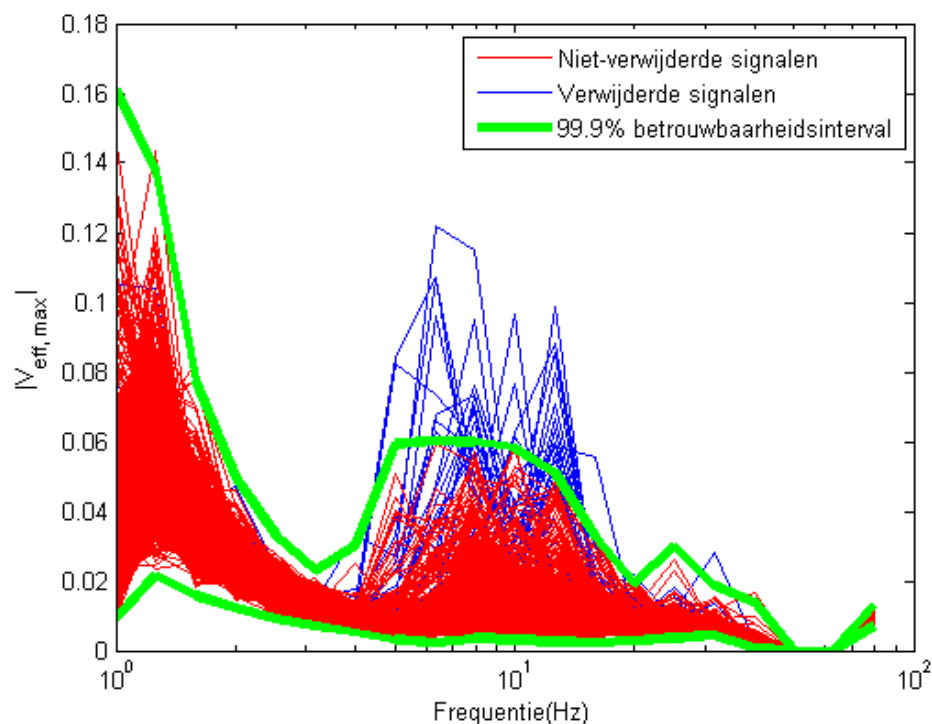
Het resultaat van deze stap is weergegeven in Figuur IV-6.



Figuur IV-6 Meetdata met gemarkeerde treinpassages en uitgefilterde lokale trillingsbronnen

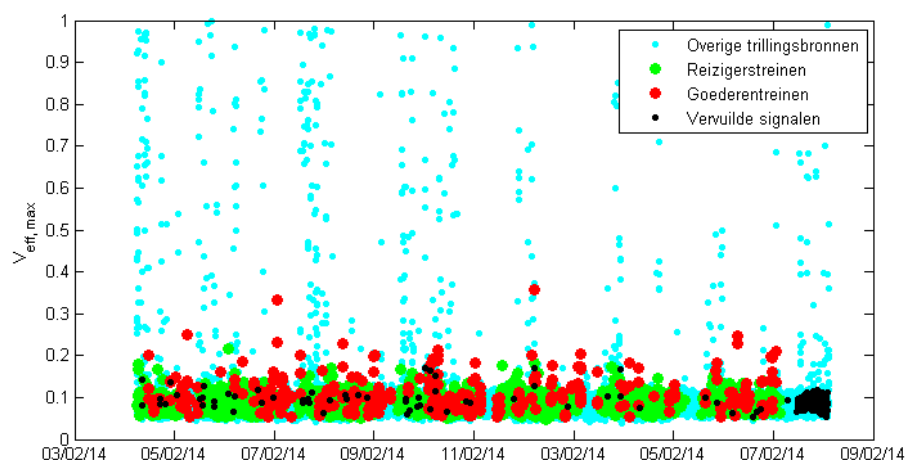
Stap 3 – Uitfilteren van externe verstoringen

Conform het memo van Level Acoustics worden niet-spoor gerelateerde gebeurtenissen, zoals wegverkeer en bouwwerkzaamheden, verwijderd uit de dataset. In het geval van externe verstoringen, zoals de passage van vrachtauto's of het gelijktijdig uitvoeren van werkzaamheden buiten het gebouw, kunnen deze verstoringen worden uitgefilterd met behulp van spectraalanalyse. Deze spectraalanalyse vindt per treintype plaats, zodat duidelijk zichtbaar wordt welke 30-secondeperiodes sterk afwijkende trillingsspectra hebben. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in Figuur IV-7. De selectiecriteria worden vastgesteld op basis van de spreiding in signalen en geverifieerd met behulp van de videobeelden.



Figuur IV-7 Spectraalanalyse in stap 3

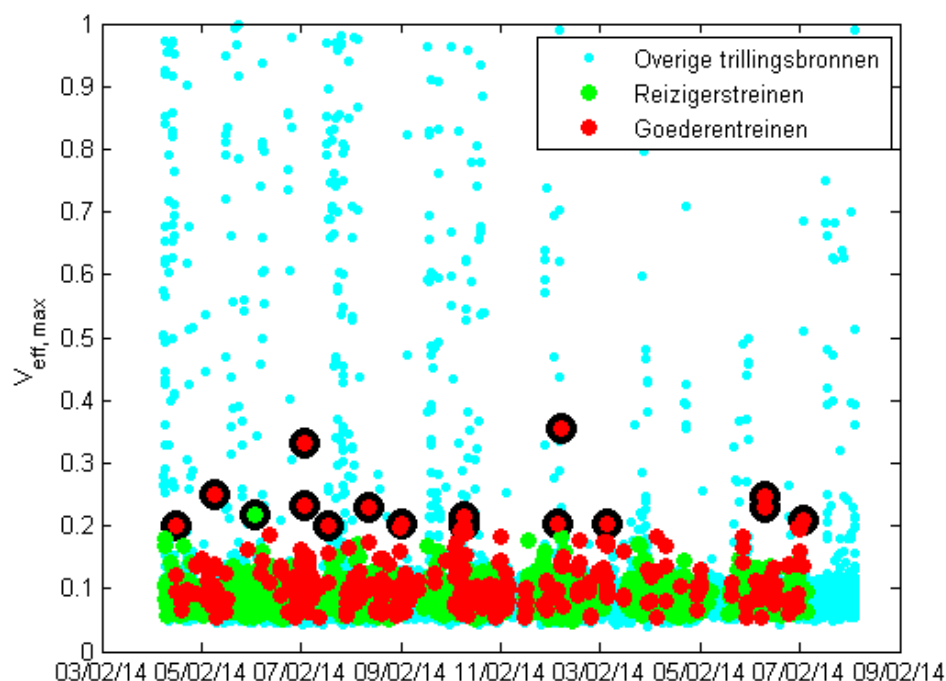
Het resultaat van deze stap is weergegeven in Figuur IV-8.



Figuur IV-8 Meetdata met gemarkeerde treinpassages en externe trillingsbronnen

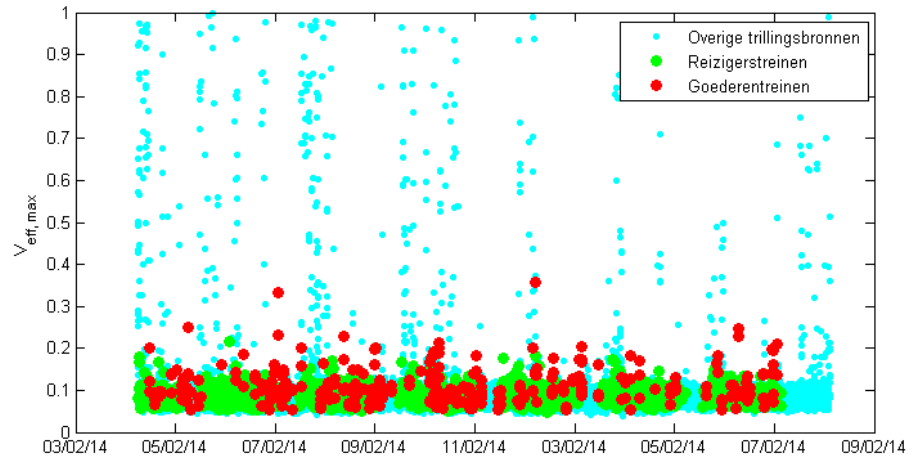
Stap 4 – Controle van hoogste waarden

Als laatste controlestep worden alle hoge trillingssignalen extra gecontroleerd op vervuiling door andere trillingsbronnen. Deze laatste controle vindt volledig handmatig plaats in de meetsoftware. Hierbij worden de trillingssignalen en videobeelden beschouwd op afwijkingen en verstoringen. Een voorbeeldselectie van te controleren trillingssignalen (zwart omcirkelde meetpunten) voor de dataset in dit voorbeeld is weergegeven in Figuur IV-9.



Figuur IV-9 Te controleren treinsignalen in stap 4

Het resultaat van deze stap is weergegeven in Figuur IV-10. Dit is de uiteindelijke dataset waarover de trillingssterkte V_{max} en de trillingsintensiteit V_{per} zullen worden bepaald.



Figuur IV-10 Schone dataset met treinpassages

Naverwerkingsprocedure

De naverwerkingsprocedure zoals die is toegepast in dit trillingsonderzoek is gebaseerd op optie 1 uit het memo LA.131001a.M04 van Level Acoustics, waarbij gedurende minimaal 7 x 24 uur op diverse meetpunten in een gebouw is gemeten en de trillingen van alle meetrichtingen zijn vastgelegd.

Vervolgens wordt de volgende procedure gestart:

1. Er wordt vastgesteld op grond van hoeveel meetdagen de verzameling $V_{eff, max, i}$ – waarden tot stand is gekomen. Deze parameter wordt het aantal meetdagen genoemd, $\#meetdagen$;
2. Alle gebeurtenissen met een $V_{eff, max, i}$ groter dan 0.02 op het funderingspunt worden geselecteerd. Indien geen funderingspunt is gekozen, dan wordt gekozen voor een meetpunt op de laagst beschikbare verdieping met als criterium dat $V_{eff, max, i}$ groter is dan 0.05;
3. Vervolgens wordt een iteratieve procedure gestart:
 - a. Per meetpunt wordt een $top50\%$ bepaald;
 - b. De grootte van deze $top50\%$ wordt vastgesteld, $\#top50\%$;
 - c. Van de $top50\%$ wordt de natuurlijke logaritme genomen:

$$\log(V_{eff, max, i})$$

- d. Vervolgens wordt hierover het gemiddelde μ en de standaarddeviatie σ bepaald:

$$\begin{aligned}\mu &= \text{gemiddelde}(\log(V_{eff, max, i})) \\ \sigma &= \text{standaardafwijking}(\log(V_{eff, max, i}))\end{aligned}$$

- e. De betrouwbaarheidscoëfficiënt β wordt vastgesteld volgens de formule:

$$\beta = t^{-1} \left[1 - \frac{\left(\frac{\#meetdagen}{7} \right)}{\#top50\%}; \#top50\% - 1 \right]$$

- f. Vervolgens wordt $V_{max, BTS}$ per meetpunt en meetrichting bepaald volgens de formule:

$$V_{max, BTS} = e^{\mu + \beta \cdot \sigma}$$

- g. Een volgende iteratiestap wordt ingegaan wanneer

$$\# \{V_{eff, max, i} > V_{max, BTS}\} > \frac{\#meetdagen}{7} \quad \text{en} \quad \#top50\% > 15 \cdot \frac{\#meetdagen}{7}$$

Hierbij geeft het eerste criterium aan hoeveel gebeurtenissen er zijn waarvan de trillingssterkte hoger is dan $V_{max, BTS}$ van dat meetpunt en die meetrichting. Wanneer het aantal gebeurtenissen met een trillingssterkte groter dan $V_{max, BTS}$ groter is dan een keer per week, wordt voldaan aan de eerste eis om nogmaals te itereren. Het tweede criterium geeft aan dat nogmaals geïtereerd moet worden wanneer het aantal waarden in de bepaling van de $V_{max, BTS}$ groter is dan 15 per week.

Wanneer een nieuwe iteratiestap nodig is, dan wordt deze uitgevoerd volgens bovenstaande stappen, waarbij de huidige top50 de basis vormt om een nieuwe top50 te bepalen.

De iteratiestappen worden net zo lang herhaald totdat niet langer aan het criterium wordt voldaan, of wanneer het aantal gebeurtenissen met een trillingssterkte die groter is dan $V_{max, BTS}$ toeneemt. In dat geval worden de resultaten uit de voorlaatste iteratiestap herhaald.

4. Vervolgens wordt de reproduceerbaarheid R per meetpunt en richting bepaald volgens de formule:

$$R = 100\% \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1 + \beta^2) \cdot \sigma^2}{\#topX\%}}$$

5. De toetswaarde voor $V_{max, BTS}$ wordt als volgt bepaald:

$$\begin{aligned} &V_{max, BTS} && \text{als } R \leq 10\% \\ &V_{max, BTS} \cdot \left(1 + \frac{R}{100\%}\right) && \text{als } R > 10\% \end{aligned}$$

6. Te toename van $V_{max, BTS}$ is een verhouding tussen de plan- en referentiesituatie, de zogenaamde Q -waarde. Hiervoor wordt in de BTS een criterium van 1.3 gehanteerd. Een Q kleiner dan 1 duidt op een afname, Q wordt bepaald volgens de formule:

$$Q = \frac{V_{max, BTS, plansituatie}}{V_{max, BTS, referentiesituatie}}$$

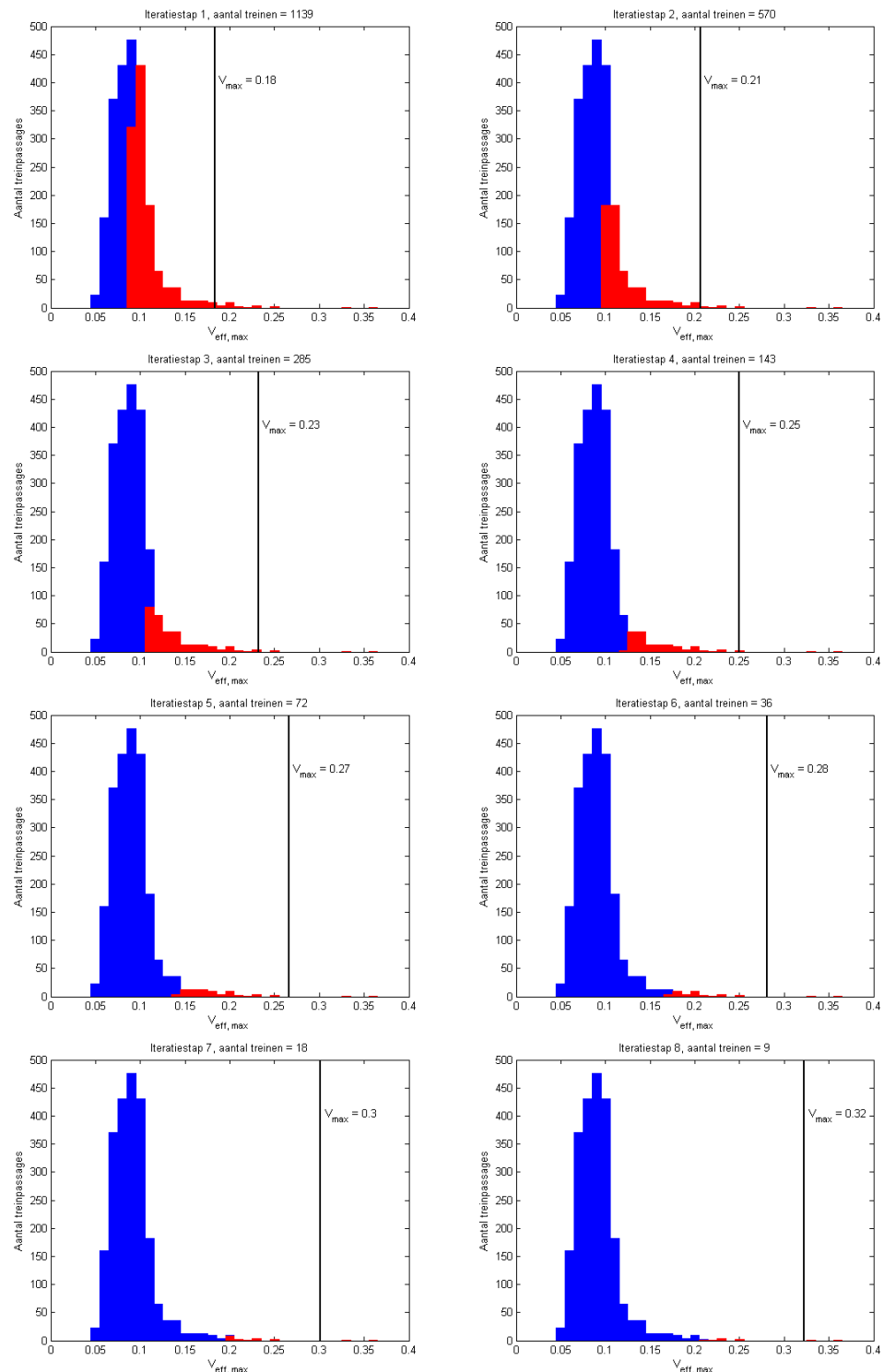
Hierbij wordt de $V_{max, BTS}$ zonder eventuele correctiefactor gebruikt. De onzekerheid in de toename Q wordt bepaald volgens de formule:

$$R_Q = \sqrt{R_{referentiesituatie}^2 + R_{plansituatie}^2}$$

De waarde van Q wordt dan als volgt bepaald:

$$\begin{aligned} &Q && \text{als } R_Q \leq 14\% \\ &Q \cdot \left(1 + \frac{R}{100\%}\right) && \text{als } R_Q > 14\% \end{aligned}$$

Deze naverwerkingsprocedure leidt in de voorbeeldsituatie tot het volgende iteratieschema, zie de histogrammen in Figuur IV-11 per iteratiestap. In blauw zijn alle treinen weergegeven, in rood de voor de bepaling van $V_{max,BTS}$ meegenomen treinen. De resultaten per iteratiestap zijn opgenomen in Tabel IV-1.



Figuur IV-11 Resultaten voor de acht iteratiestappen

Tabel IV-1 Resultaten van de acht iteratiestappen

Iteratiestap	$V_{\max, \text{BTS}}$	R	topX%	#topX%	σ	μ	β
1	0.18	2.44	50	1139	0.177	-2.25	3.14
2	0.21	3.51	25.0	570	0.191	-2.14	2.93
3	0.23	4.94	12.5	285	0.203	-2.02	2.72
4	0.25	6.09	6.28	143	0.192	-1.87	2.49
5	0.27	7.31	3.16	72	0.178	-1.73	2.25
6	0.28	8.62	1.58	36	0.165	-1.60	1.99
7	0.30	11.2	0.79	18	0.171	-1.49	1.67
8	0.32	14.5	0.40	9	0.185	-1.38	1.33

Bijlage V Mogelijke mitigerende maatregelen

In deze bijlage wordt een zo compleet mogelijke opsomming en omschrijving gegeven van mogelijke trillingsmaatregelen.

De effectiviteit van maatregelen tegen trillingshinder hangt af van een groot aantal factoren. Het komt dus voor dat een maatregel die op de ene locatie effectief is, op een andere locatie de trillingssterkte niet of veel minder vermindert. Het ontwerpen van maatregelen tegen trillingshinder wordt bemoeilijkt door de volgende factoren:

1. Maatregelen zijn niet ‘standaard’. Dit heeft o.a. te maken met de heterogeniteit van de bodem. Voor elke situatie dient bepaald te worden welke maatregel effectief is. Een diepwand vlak langs het spoor kan averechts werken, terwijl dezelfde wand dicht bij de woning effectief kan zijn;
2. Het arsenaal aan mogelijke maatregelen is beperkt. Een bronmaatregel als afvering van het spoor is slechts zinvol bij hoogfrequente trillingen. In de zachte bodems in Nederland wordt hinder doorgaans veroorzaakt door laagfrequente trillingen;
3. Aanpassen van vloeren en funderingen is realiseerbaar bij nieuwbouw, niet of zeer moeizaam bij bestaande gebouwen;
4. Bij maatregelen die in de bodem worden genomen is inpasbaarheid een belangrijk criterium, vooral met betrekking tot (ondergrondse) obstakels.

Door middel van bronnenonderzoek, expert interviews en brainstormsessies is een breed scala aan mogelijke trillingsmaatregelen bepaald. Er worden grofweg drie types maatregelen onderscheiden:

1. Maatregelen aan de bron (trein en spoor);
2. Maatregelen aan de transmissie (tussen bron en ontvanger);
3. Maatregelen aan de ontvanger (gebouwen);

Mogelijkheden in deze categorieën worden in de volgende subparagrafen nader toegelicht.

Bronmaatregelen

Goederentreinen geven vrijwel altijd de hoogste trillingssterktes van het treinverkeer. Het nemen van maatregelen aan de bron dient vooral op het dichtst bijgelegen goederenspoor gericht te zijn, dit spoor geeft gewoonlijk de grootste trillingssterktes:

- B.1 Dwarsliggermatten. Door de elasticiteit van de dwarsliggermat worden bepaalde trillingsfrequenties verzwakt. Bij lage frequenties kan echter ook versterking van het trillingsniveau optreden. Deze maatregel is daardoor minder effectief voor trillingen van goederentreinen. Goederentreinen hebben vooral laagfrequente trillingssignalen;
Daarnaast wordt de belasting van de trein over meer dwarsliggers verdeeld, waardoor de kwaliteit van het spoor minder snel afneemt. Een goede kwaliteit van het spoor heeft een positief effect op het trillingsniveau.
- B.2 Ballastmatten. De elasticiteit van de ballastmat reduceert bepaalde frequenties uit het trillingssignaal. Bij lage frequenties kan echter ook versterking van het trillingsniveau optreden, wat deze maatregel vaak minder effectief maakt voor trillingen van goederentreinen.
- B.3 Floating Slab Track is een afgeleverde betonplaat waar het spoor op

gemonteerd is. Met een Floating Slab Track kunnen, vergeleken bij ballastmatten of dwarsliggermatten, ook lagere frequenties worden gereduceerd. Goederentreinen genereren echter vaak ook trillingen in het frequentiegebied waar de Floating Slab Track trillingen versterkt, wat deze maatregel vaak minder effectief maakt voor trillingen van goederentreinen.

- B.4 Slab track. Bij deze maatregel wordt een betonnen plaat onder het spoor aangebracht, waardoor de spoorconstructie stijver is en de trillingen lager. Deze maatregel is vooral effectief tegen hoogfrequente trillingen, wat deze maatregel vaak minder effectief maakt voor trillingen van goederentreinen.
- B.5 Slabtrack met ballastmat. Bij deze spoorconstructie wordt een betonnen plaat onder het spoor aangebracht, met daarbovenop een ballastmat van rubber. De kwaliteit van de spoorligging verbetert hierdoor, waardoor minder trillingen kunnen optreden. Het laagfrequente effect is echter beperkt.
- B.6 Decktrack. Vervangen van de spoorbaan door een holle kokerligger met een hoge stijfheid. Hierdoor neemt de indrukking van de baan af en worden trillingen gereduceerd. Onder meer uitgevoerd in een proefproject bij de Betuweroute.
- B.7 Under sleeper pads. Door het bevestigen van rubberen matten aan de onderzijde van de dwarsliggers, verbetert de ligging van het spoor en nemen de trillingen af. Deze maatregel heeft vooral hoogfrequent effect, tussen de 20 en 40 Hz kunnen trillingen worden versterkt. Laagfrequent is deze maatregel waarschijnlijk beperkt effectief. Uit onderzoeken op verschillende plaatsen blijkt dat Under sleeper pads ook een negatief (versterkend) effect op de trillingshinder kunnen hebben.
- B.8 Laddertrack. Constructie waarbij meerdere dwarsliggers aan elkaar worden vastgemaakt, waardoor de spoorconstructie stijver is en de kwaliteit van de spoorligging beter blijft gedurende langere tijd. Laagfrequent is het effect van deze maatregel beperkt.
- B.9 Frame sleepers. Kleinere variant van laddertrack, en daardoor ook iets goedkoper. Het effect is echter ook minder, doordat de constructie minder stijf is.
- B.10 Wide sleeper track. Bij deze spoorconstructie worden bredere, en dus zwaardere, betonnen dwarsliggers toegepast, waardoor de ligging van het spoor beter blijft en vooral hoogfrequente trillingen worden gereduceerd.
- B.11 Verplaatsen van wissels. De puntstukken van wissels zorgen voor hogere trillingsniveaus dan doorgaand spoor. Het verplaatsen van wissels kan voor een aantal locaties de trillingssterkte reduceren. Het verplaatsen van wissels is niet altijd mogelijk in verband met lijnvoering, opvolgtijden en rijsnelheden.
- B.12 Verbeteren van de aansluiting tussen kunstwerk en aardebaan. Voor een aantal locaties zorgt de aansluiting tussen kunstwerk en aardebaan voor een mogelijke overschrijding. Deze aansluiting kan worden verbeterd door periodiek onderhoud aan het spoor of beheersmaatregelen. Een mogelijke beheersmaatregel is het gebruiken van nastelbare dwarsliggers op de overgang tussen kunstwerk en aardebaan. Deze dwarsliggers kunnen eenvoudig worden bijgesteld wanneer de baan zakt.
- B.13 Snelheidsaanpassing treinen. De treinsnelheid heeft op de meeste locaties een belangrijke invloed op de trillingssterktes van treinen. Het verlagen van de snelheid van treinen heeft vaak een aanzienlijke reductie in trillingssterkte tot gevolg. Aanpassen van de treinsnelheid is echter niet vaak mogelijk vanwege

de opvolgtijden van treinen op het drukke Nederlandse spoorweginet. Spoorbeheerder ProRail kan wettelijk gezien geen differentiatie in treinsnelheid aan vervoerders opleggen, dus dat de ene vervoerder langzamer moet rijden dan de andere vervoerder. Gezien deze overwegingen is deze maatregel niet uitvoerbaar. Deze maatregel wordt daarom niet meegenomen bij het afwegen van maatregelen.

- B.14 Toezicht op kwaliteit materieel. De staat van onderhoud van vooral goederenwagons is een belangrijke parameter bij het ontstaan van trillingen. Door via monitoringsystemen de staat van wagons te monitoren, kunnen treinen met afwijkende trillingskarakteristieken eerder in onderhoud genomen worden. Deze methode wordt nog niet toegepast voor de bewaking van trillingen.

Transmissie maatregelen

Ook voor het transmissiepad van bron naar ontvanger is het mogelijk om maatregelen te nemen om trillingen te reduceren. Over het algemeen geldt dat hoe dichter maatregelen bij de bron of ontvanger worden ingezet in het transmissiepad, hoe effectiever ze zijn. De volgende maatregelen zijn onder meer mogelijk, afhankelijk van de locatie:

- T.1 Een holle ruimte in de bodem, ingeklemd door damwanden. Deze holle ruimte fungeert als trillingsscherm. Hierbij zijn diverse afmetingen mogelijk. Deze constructie dient te worden afgeschermd om erin vallen te voorkomen. Deze maatregel is uitvoerbaar als lichte, middelzware en zware maatregel, afhankelijk van de afmetingen.
- T.2 Betonnen trillingsscherm (Ondergrondse Trillingsreducerende Constructie, OTC) aanleggen. Een dergelijk trillingsscherm kan worden gerealiseerd met behulp van de diepwandmethode²⁶ of met behulp van jet-grouten²⁷. Deze maatregel is uitvoerbaar als lichte, middelzware en zware maatregel, afhankelijk van de afmetingen.
- T.3 Beklede keerwand aanleggen. Een beklede keerwand is een betonnen trillingsscherm dat aan minimaal één zijde bekleed is met zacht materiaal, bijvoorbeeld rubber, om een maximale demping van de trillingen te bereiken. Deze maatregel is uitvoerbaar als lichte, middelzware en zware maatregel, afhankelijk van de afmetingen.
- T.4 Zettingsvrije plaat onder het spoor. Het toepassen van een zettingsvrije plaat onder de sporen kan voor een reductie van trillingen zorgen door de hogere stijfheid van de zettingsvrije plaat, vergeleken met een aardebaan. Op sommige locaties (verhoogd talud) kan een zettingsvrije plaat de trillingssterkte echter verhogen.
- T.5 Aanleggen of verdiepen van spoorsloot of vaart. Een spoorsloot heeft een vergelijkbare werking als een holle ruimte in de bodem, maar heeft als nadeel dat aanzienlijk meer ruimte nodig is. Deze maatregel is uitvoerbaar als lichte en middelzware maatregel, afhankelijk van de afmetingen.
- T.6 Aanpassingen aan het spoortalud. De vorm van het spoortalud heeft invloed op

²⁶ Bij deze methode wordt een in de bodem gegraven sleuf volgestort met beton. Deze methode vereist een vrij grote werkruimte en is daardoor niet overal toepasbaar.

²⁷ Bij deze methode wordt een betonmengsel in de grond geïnjecteerd. Hierbij is het vereiste bouwterrein en de benodigde ruimte voor het aanbrengen kleiner. Door de lagere stijfheid van de trillingswand na realisatie is doorgaans wel een grotere afmeting (diepte en/of breedte) van het trillingsscherm noodzakelijk om dezelfde reductie in trillingssterkte te realiseren als bij een trillingsscherm gerealiseerd met behulp van de diepwandmethode.

de trillingssterkte. Een steil talud of verticale wand kan tot een trillingsreductie leiden ten opzichte van een flauw talud. Deze maatregel is alleen realiseerbaar bij een verhoogde of verlaagde spoorligging.

- T.7 L-wand als grondkerende constructie in het talud. Door het realiseren van een betonnen L-wand als grondkerende constructie in het talud kunnen trillingen fors worden gereduceerd. Deze maatregel is alleen toepasbaar bij een verhoogd talud. Deze maatregel is alleen realiseerbaar bij een verhoogde spoorligging.

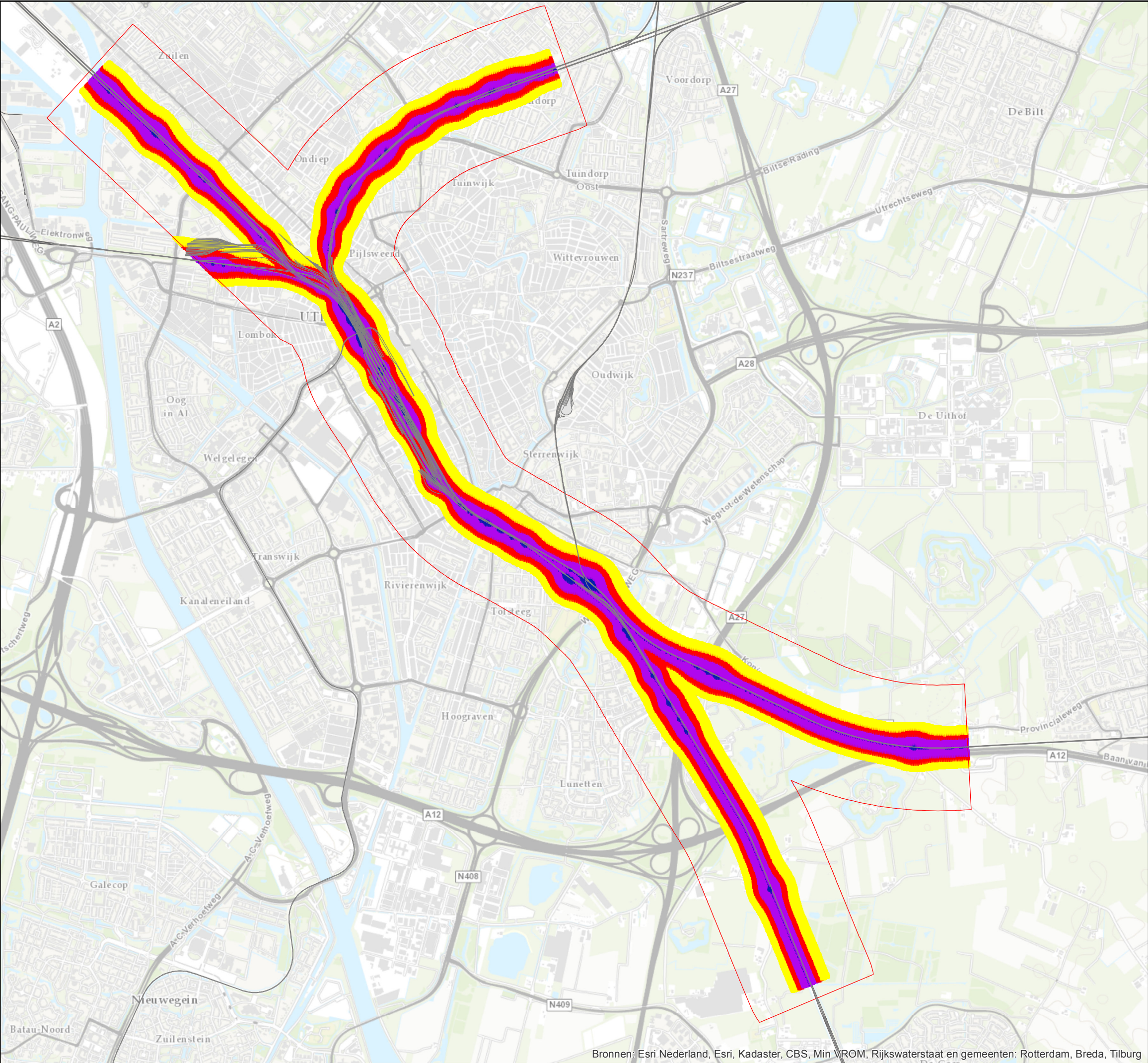
Ontvangermaatregelen

De laatste categorie maatregelen zijn maatregelen aan de ontvanger, aan de gebouwen. Nadeel van deze categorie is dat de meeste opties grote impact hebben op de gebruikers van de gebouwen en vrijwel niet uitvoerbaar zijn voor bestaande gebouwen. De volgende maatregelen zijn mogelijk:

- O.1 Opkopen. De gebouwen worden opgekocht en de bewoners of gebruikers verhuizen. Deze optie is erg kostbaar en heeft een grote impact op bewoners of gebruikers en omwonenden.
- O.2 Verstijven van vloeren en muren. In veel gebouwen worden hoge trillingssterktes veroorzaakt door slappe vloeren en muren. Het verstijven van vloeren en muren is daarom een effectieve maatregel om de trillingssterkte op hoger gelegen verdiepingen te reduceren. Bij houten vloeren kunnen de draagbalken worden verstevigd met behulp van stalen U-profielen, wanneer de fundering dat toelaat kan de houten vloer worden vervangen door een betonnen vloer. Het is niet bij elk type bouw mogelijk om effectieve verstijvingsmaatregelen uit te voeren, bovendien speelt de esthetica ook een rol bij bestaande gebouwen. Deze maatregel is zowel als middelzware (verstijven van de balken) en als zware (betonnen vloer) maatregel uitvoerbaar.
- O.3 Fundering inpakken. Bij gebouwen die op staal zijn gefundeerd, kan de fundering worden ingepakt in een dempend materiaal, zoals rubber. Hierdoor neemt de overdracht van de trillingen van buiten naar binnen af.
- O.4 Tuned Mass Damper (TMD) toepassen. Een TMD is een afgeregeld massa-veersysteem dat trillingen kan uitdempen. Een TMD werkt vooral in situaties waar de trillingen vooral bij een bepaalde frequentie sterk zijn, omdat andere frequenties vaak worden versterkt. In veel gevallen zal een TMD onvoldoende effect hebben bij door treinen veroorzaakte trillingen, omdat deze trillingen een vrij breed frequentiespectrum kennen.

Bijlage VI Resultaten onderzoek naar trillingshinder

Deze bijlage bevat de resultaten van achtereenvolgens de modelberekeningen uit het stap 1- en stap 2-onderzoek en vormt de basis voor de selectie van meetlocaties ten behoeve van het stap 3-onderzoek.



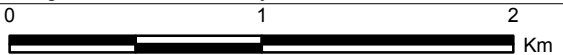
- Legenda**
- Trillingssterkte Vmax**
- < 0.2
 - 0.2 - 0.4
 - 0.4 - 0.8
 - 0.8 - 3.2
 - > 3.2



Movares Utrecht
030-2653536

Trillingsonderzoek DSSU, stap1
Trillingssterkte in referentiesituatie

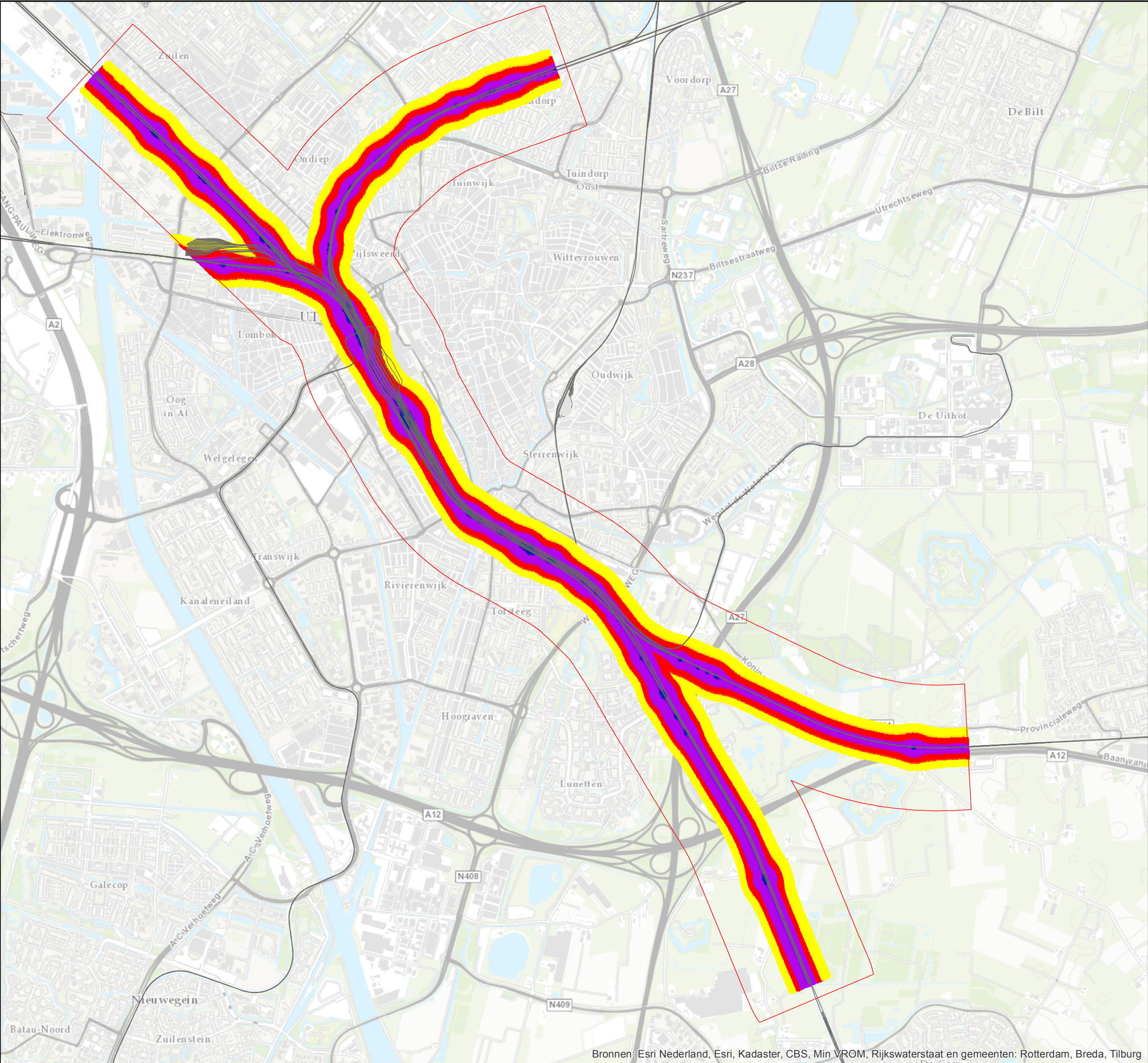
Auteur	K. Thieme	Datum	25-07-2014
Bedrijfsonderdeel	Movares	Formaat	A3 liggend
Geografische Informatie Systemen		Schaal	1 : 30000



Status: Vrijgave

Doc.nr.

Bronnen: Esri Nederland, Esri, Kadaster, CBS, Min VROM, Rijkswaterstaat en gemeenten: Rotterdam, Breda, Tilburg



Legenda

Trillingssterkte Vmax

< 0.2

0.2 - 0.4

0.4 - 0.8

0.8 - 3.2

> 3.2



Movares

Utrecht
030-2653536

Trillingsonderzoek DSSU, stap1

Trillingssterkte in plansituatie

AuteurK. Thieme

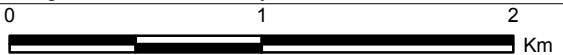
Datum25-07-2014

BedrijfsonderdeelMovares

FormaatA3 liggend

Geografische Informatie Systemen

Schaal1 : 30000

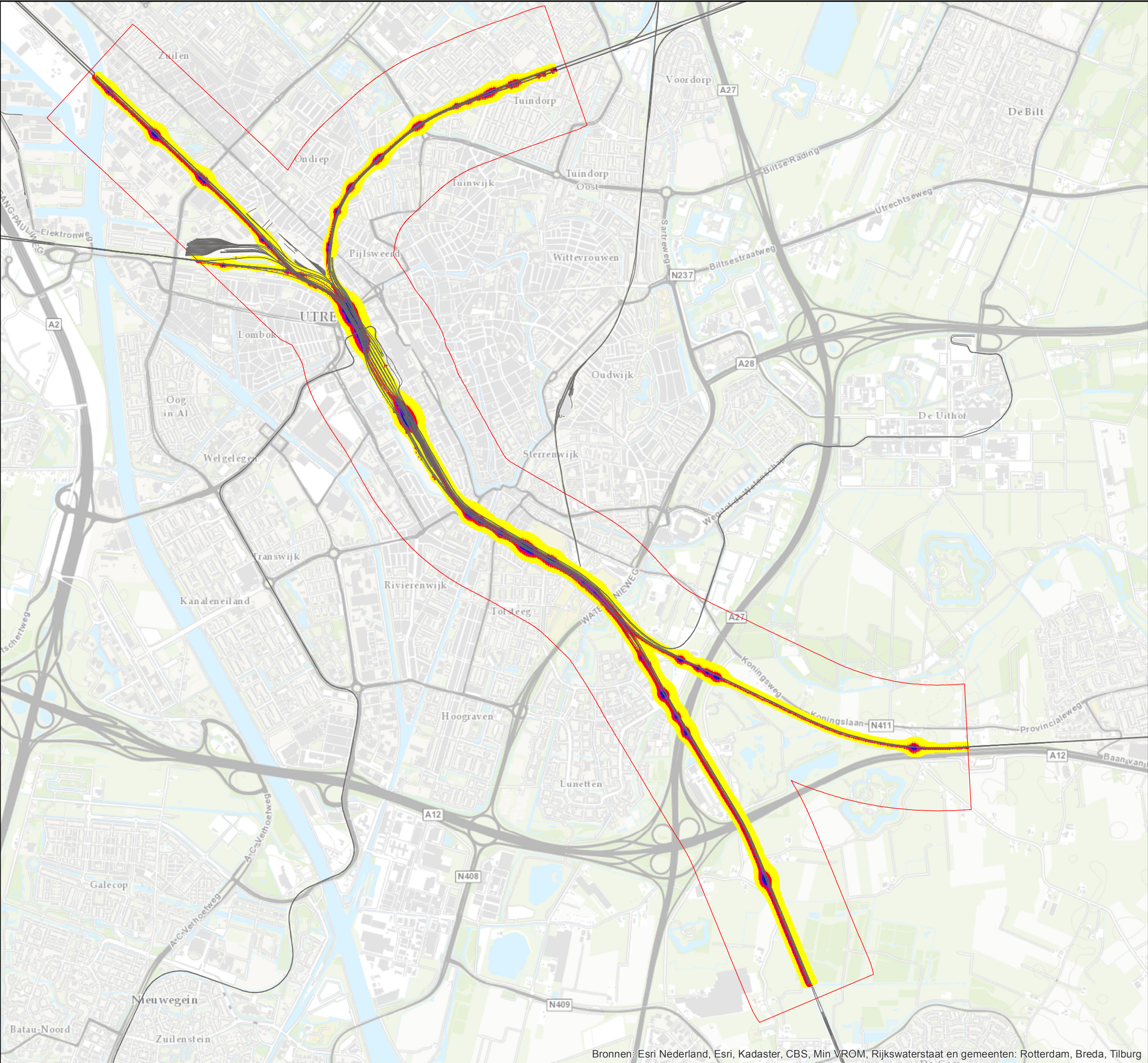


Status

Vrijgave

Doc.nr.

Bronnen: Esri Nederland, Esri, Kadaster, CBS, Min VROM, Rijkswaterstaat en gemeenten: Rotterdam, Breda, Tilburg



Legenda

Trillingsintensiteit

< 0.05

0.05 - 0.10

0.10 - 0.15

0.15 - 0.20

> 0.20



Movares

Utrecht
030-2653536

Trillingsonderzoek DSSU, stap1

Trillingsintensiteit in plansituatie

AuteurK. Thieme

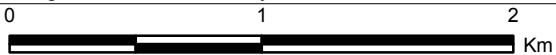
Datum25-07-2014

BedrijfsonderdeelMovares

FormaatA3 liggend

Geografische Informatie Systemen

Schaal1 : 30000

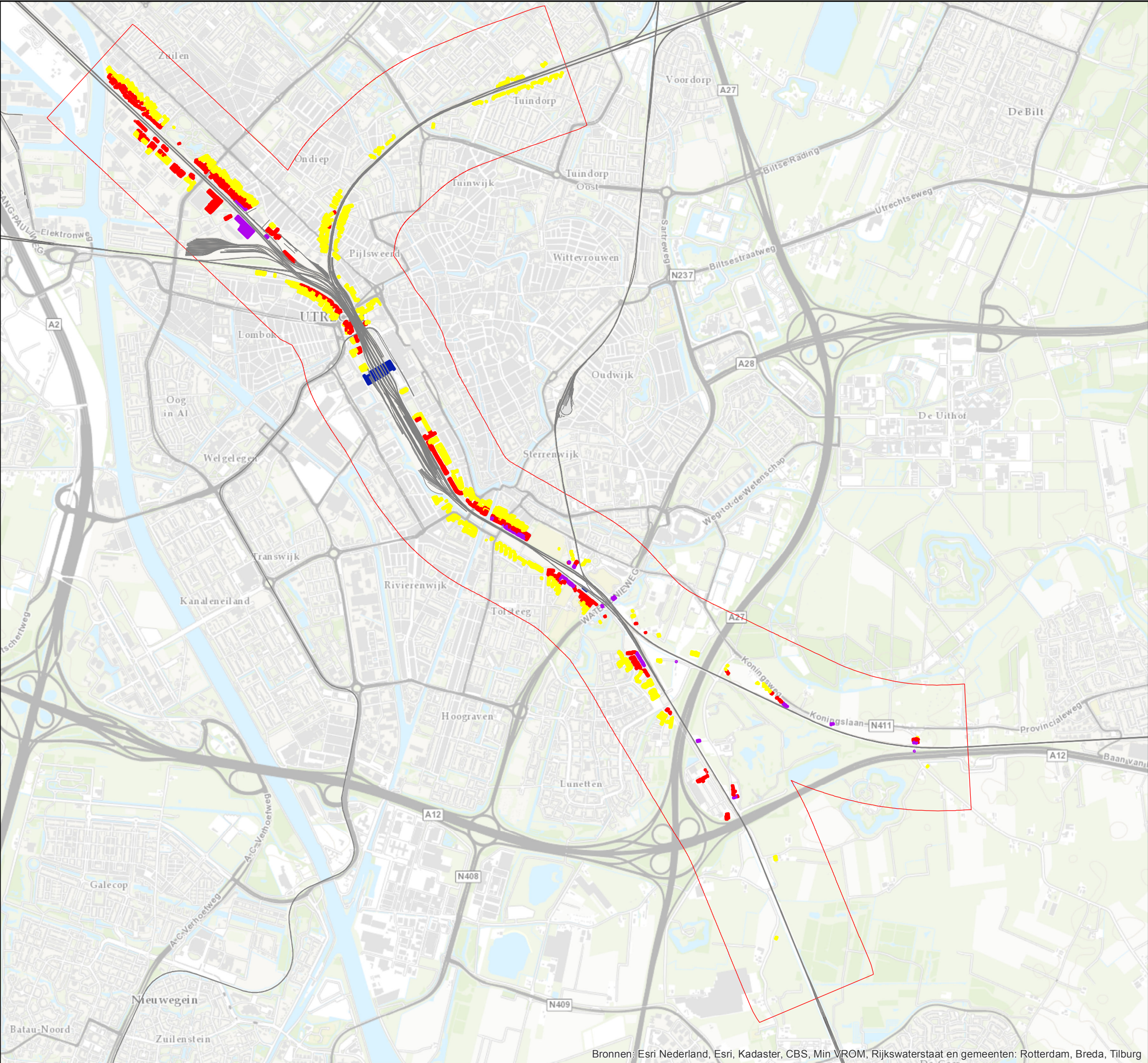


Status

Vrijgave

Doc.nr.

Bronnen: Esri Nederland, Esri, Kadaster, CBS, Min VROM, Rijkswaterstaat en gemeenten: Rotterdam, Breda, Tilburg



Legenda
Trillingssterkte Vmax

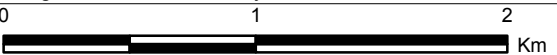
- 0.2 - 0.4
- 0.4 - 0.8
- 0.8 - 3.2
- > 3.20



Movares Utrecht
030-2653536

Trillingsonderzoek DSSU, stap 2
Trillingssterkte in referentiesituatie

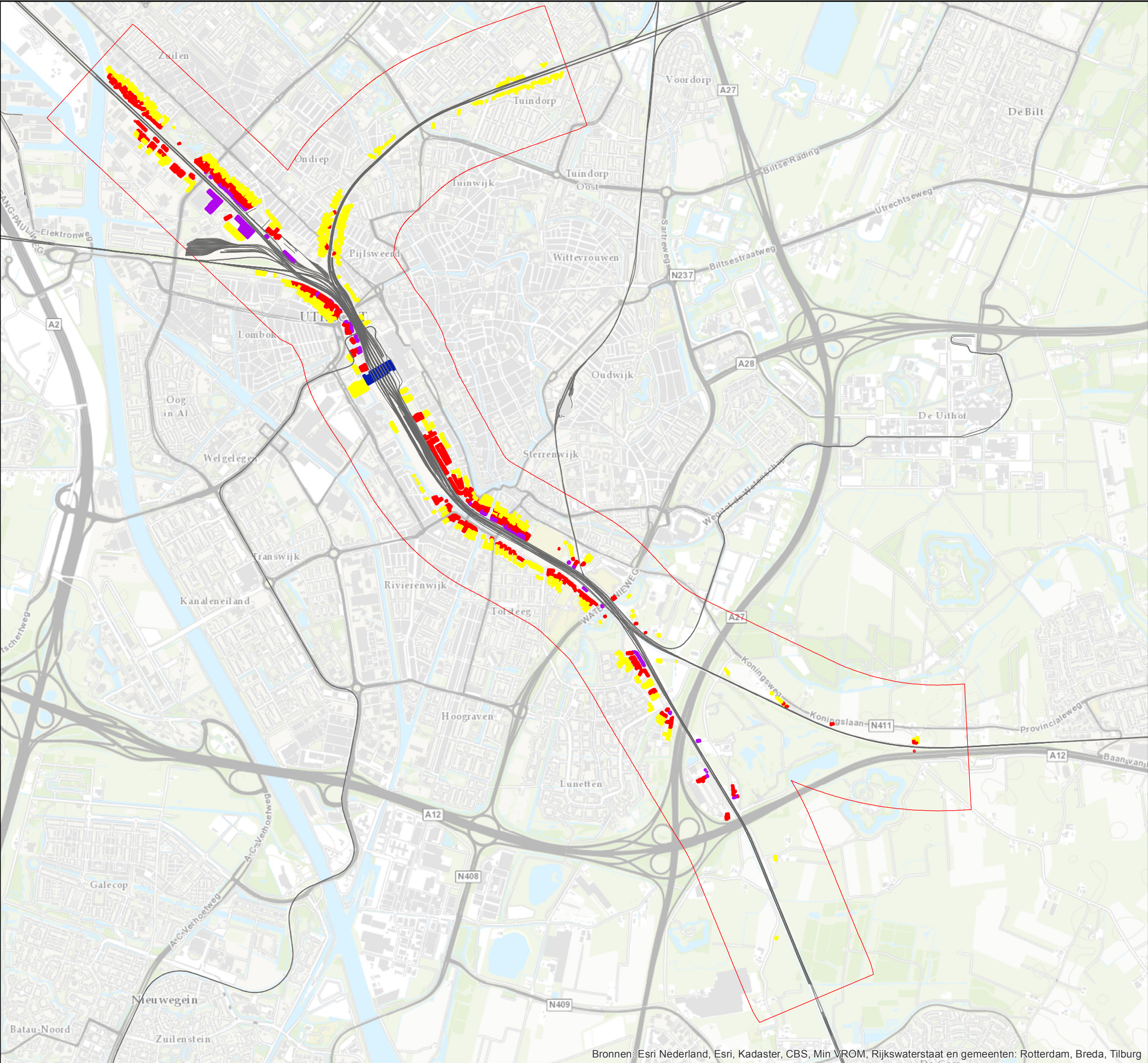
Auteur	K. Thieme	Datum	25-07-2014
Bedrijfsonderdeel	Movares	Formaat	A3 liggend
Geografische Informatie Systemen		Schaal	1 : 30000



Status: Vrijgave

Doc.nr.

Bronnen: Esri Nederland, Esri, Kadaster, CBS, Min VROM, Rijkswaterstaat en gemeenten: Rotterdam, Breda, Tilburg



Legenda
Trillingssterkte Vmax

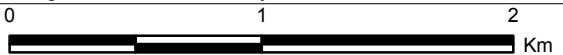
- 0.2 - 0.4
- 0.4 - 0.8
- 0.8 - 3.2
- > 3.2



Movares Utrecht
030-2653536

Trillingsonderzoek DSSU, stap 2
Trillingssterkte in plansituatie

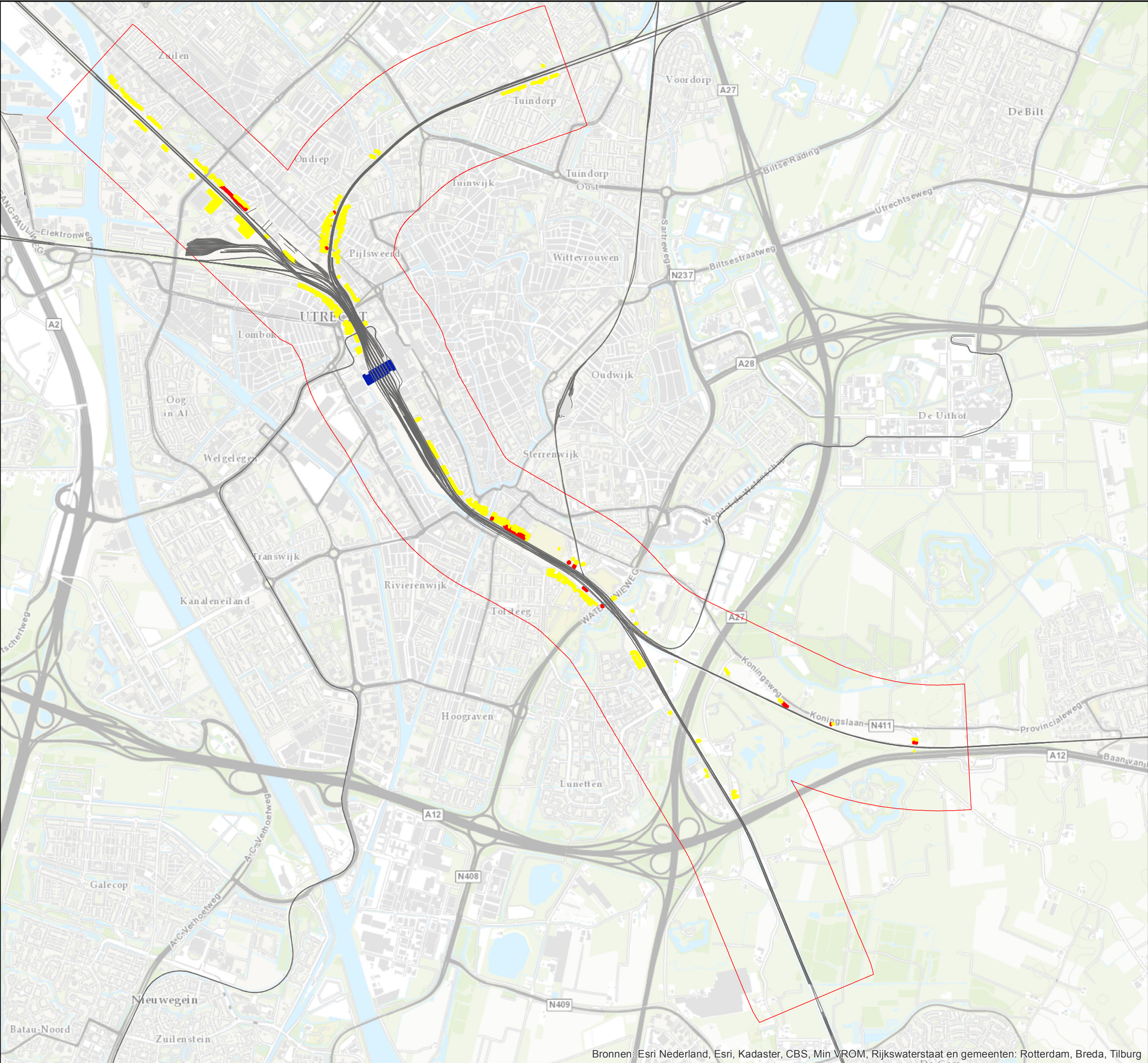
Auteur	K. Thieme	Datum	25-07-2014
Bedrijfsonderdeel	Movares	Formaat	A3 liggend
Geografische Informatie Systemen		Schaal	1 : 30000



Status	Vrijgave
--------	----------

Doc.nr.

Bronnen: Esri Nederland, Esri, Kadaster, CBS, Min VROM, Rijkswaterstaat en gemeenten: Rotterdam, Breda, Tilburg



Legenda
Trillingsintensiteit Vper

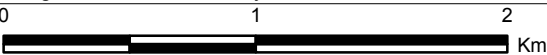
- 0.05 - 0.10
- 0.10 - 0.15
- 0.15 - 0.20
- > 0.20



Movares Utrecht
030-2653536

Trillingsonderzoek DSSU, stap 2
Trillingsintensiteit in plansituatie

Auteur	K. Thieme	Datum	25-07-2014
Bedrijfsonderdeel	Movares	Formaat	A3 liggend
Geografische Informatie Systemen		Schaal	1 : 30000



Status	Vrijgave
--------	----------

Doc.nr.

Bronnen: Esri Nederland, Esri, Kadaster, CBS, Min VROM, Rijkswaterstaat en gemeenten: Rotterdam, Breda, Tilburg