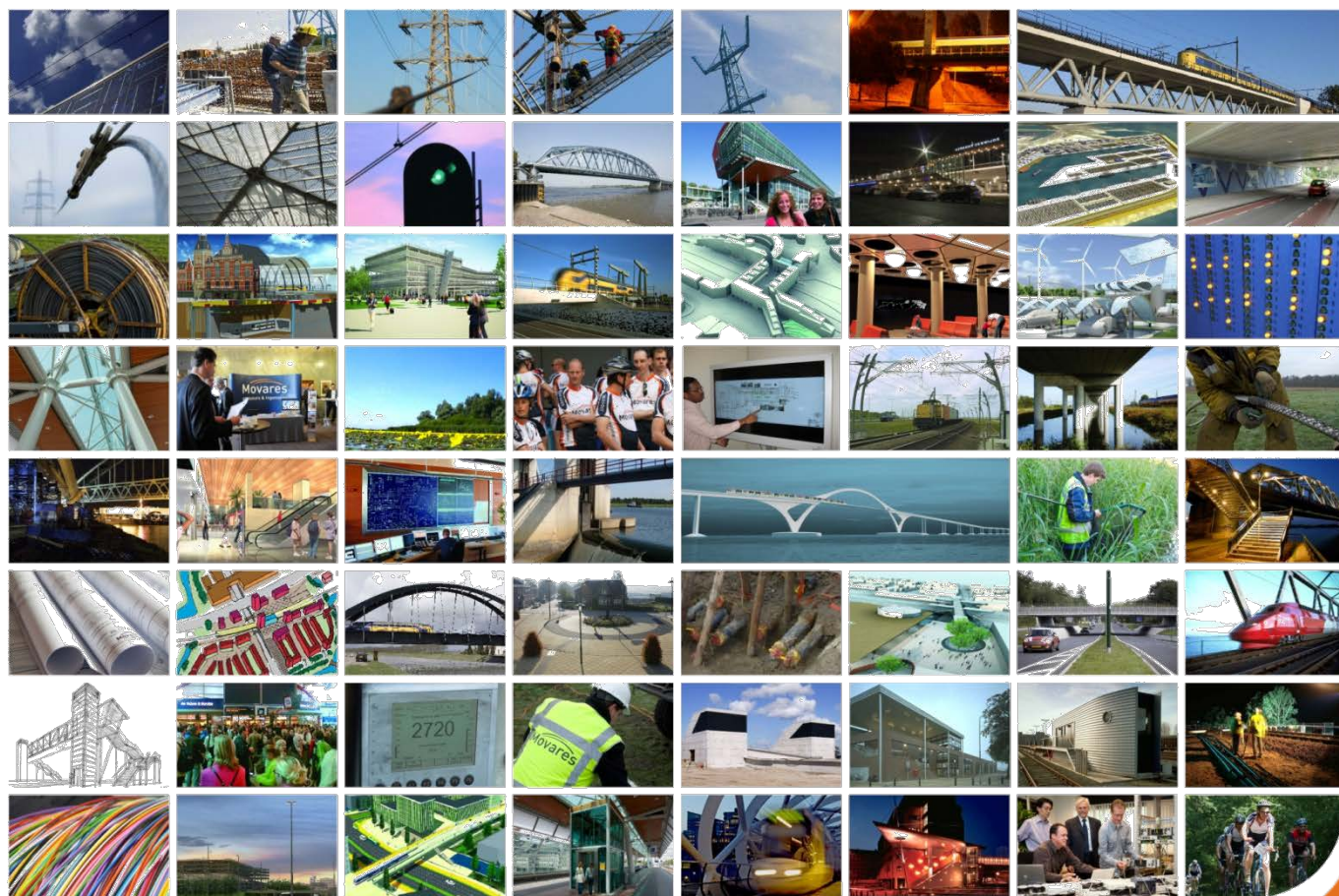


Aanpassing spoorbrug over de A1 bij Muiderberg

Effect trillingen



Behorende bij het Ontwerp-Tracébesluit wegbreiding Schiphol-
Amsterdam-Almere (2014)

16 mei 2014- Versie 3.0



Aanpassing spoorbrug over de A1 bij Muiderberg

Effect trillingen

Autorisatieblad

Aanpassing spoorbrug over de A1 bij Muiderberg

Effect trillingen

	Naam	Paraaf	Datum
Opgesteld door	Wybo Gardien		
Controle door	Pieter Boon		
Vrijgave door	Herke Stuit		

Samenvatting

Rijkswaterstaat past in het project SAA (*Schiphol Amsterdam Almere*) de snelweg A1 aan bij Muiderberg. Er komen extra rijstroken bij, en daarvoor wordt de weg verbreed. Een gevolg hiervan is dat ook de spoorbrug over de A1 bij Muiderberg moet worden aangepast. De nieuwe brug heeft een grotere overspanning, en een andere constructie dan het huidige spoorviaduct, wat mogelijk gevolgen heeft voor de trillingen in de omgeving ten gevolge van treinverkeer over de brug.

In het voorliggende trillingsonderzoek is de trillingssituatie bepaald voor de referentiesituatie (2009) en plansituatie (in het jaar 2020) van het project SAA. Middels een uitgebreid trillingsonderzoek in een zone van 200 meter rondom de sporen is de trillingssterkte in gebouwen vastgesteld. De beoordeling vindt plaats aan de hand van de Beleidsregel Trillinghinder Spoor (BTS)¹ en de SBR-B richtlijn.

Ten behoeve van het onderzoek zijn metingen uitgevoerd in woningen om het huidige trillingsniveau vast te leggen. Daarnaast zijn metingen uitgevoerd op maaiveld om het trillingseffect van het huidige spoorviaduct te bepalen ten opzichte van spoor op een aardebaan. Voor het effect van de nieuwe brug ten opzichte van het spoorviaduct is een modelberekening uitgevoerd met *spoormodel*.

Uit het onderzoek blijkt dat de spoorbrug een effect heeft op het trillingsniveau in woningen die in de omgeving van de spoorbrug liggen. In de woning De Goog 4, ten zuidwesten van het westelijk landhoofd, treedt in de plansituatie een overschrijding op van de volgens de SBR-B richtlijn en de BTS geldende streefwaarden. Deze overschrijding wordt voornamelijk veroorzaakt door dat er in de referentiesituatie geen goederentreinen, en in de plansituatie wel. Verder is er een toename van het trillingsniveau te verwachten door treinverkeer over de nieuwe spoorbrug. Vanwege de overschrijding dienen voor deze woning trillingsreducerende maatregelen te worden beschouwd. Een mogelijke te beschouwen maatregel om de toename van de nieuwe spoorbrug teniet te doen, is het verstijven van de vloeren in de woning.

In de woningen bij Hakkelaarsbrug, ten noorden en noordoosten van het oostelijk landhoofd, wordt in de plansituatie geen overschrijding van de SBR-B en BTS streefwaarden verwacht. Voor deze woningen hoeven geen trillingsreducerende maatregelen te worden beschouwd.

¹ Beoordelingsrichtlijn voor trillinghinder bij spoorprojecten, opgesteld door het ministerie van Infrastructuur en Milieu

Inhoudsopgave

Samenvatting	1
Begrippenlijst	33
1 Inleiding	4
1.1 Achtergrond van dit rapport	4
1.2 Doel van het onderzoek	4
1.3 Algemeen onderzoekskader	4
1.4 Toegepaste kaders en uitgangspunten	4
1.5 Opzet van het onderzoek	4
2 Situatiebeschrijving	5
2.1 Onderzoeksgebied	5
2.2 Referentiesituatie	5
2.2.1. <i>Uitgangspunten</i>	6
2.2.2. <i>Huidig Spoorviaduct</i>	6
2.2.3. <i>Spoorgebruik</i>	6
2.2.4. <i>Snelheden</i>	7
2.3 Plansituatie	7
2.3.1. <i>Uitgangspunten</i>	7
2.3.2. <i>Spoorbrug plansituatie</i>	7
2.3.3. <i>Geometrische wijzigingen</i>	8
2.3.4. <i>Spoorgebruik</i>	8
2.3.5. <i>Snelheden</i>	8
2.3.6. <i>Cumulatie met overige trillingsbronnen</i>	9
2.3.7. <i>Wijziging in treinintensiteit</i>	9
3 Opzet trillingsonderzoek	12
3.1 Stap 1: Inventarisatie van trillingsgevoelige locaties	12
3.2 Stap 2: Indicatieve trillingsmeting en empirische prognose	12
3.2.1. <i>Stap 3: Nauwkeurige trillingsprognoses in woningen</i>	12
3.2.2. <i>Stap 4: Ontwerpen van maatregelen en afwegen van varianten</i>	13
4 Beoordelingskader trillingshinder	14
5 Trillingsmetingen	15
5.1 Woningmeting De Goog 4	15
5.2 Woningmeting Hakkelaarsbrug 6	16
5.3 Maaiveldmetingen	18
6 Prognose	21
6.1 Prognose referentiesituatie	21
6.2 Prognose plansituatie	21
6.2.1. <i>Bijdrage landhoofd</i>	21
6.2.2. <i>Spoorbrug ten opzichte van spoorviaduct</i>	21
6.2.3. <i>Invloed afstandverschil</i>	22
6.2.4. <i>Correctie meetdataset</i>	22
6.2.5. <i>Correctie voor gewijzigde intensiteit</i>	23

6.3	Prognose Hakkelaarsbrug 10	23
7	Resultaten	24
7.1	Deelgebied De Goog	24
7.1.1.	<i>De Goog 4, referentiesituatie</i>	24
7.1.2.	<i>De Goog 4, plansituatie</i>	25
7.1.3.	<i>De Goog 4, plansituatie ten opzichte van situatie tijdens meting</i>	26
7.2	Deelgebied Hakkelaarsbrug	27
7.2.1.	<i>Hakkelaarsbrug 6, referentiesituatie</i>	27
7.2.2.	<i>Hakkelaarsbrug 6, plansituatie</i>	28
7.2.3.	<i>Hakkelaarsbrug 10, referentiesituatie</i>	29
7.2.4.	<i>Hakkelaarsbrug 10, plansituatie</i>	30
7.2.5.	<i>Overige locaties Deelgebied Hakkelaarsbrug</i>	30
8	Conclusies en aanbevelingen	31
8.1	Aanbevelingen	31
	Colofon	34

Bijlage I	Beoordelingskader
Bijlage II	Verwerkingsprocedure trillingsmetingen
Bijlage III	Beschrijving spoormodel
Bijlage IV	Gemeten trillingen

1 Inleiding

- 1.1 Achtergrond van dit rapport
Rijkswaterstaat past in het project SAA (*Schiphol Amsterdam Almere*) de snelweg A1 aan bij Muiderberg. Er komen extra rijstroken bij, en daarvoor wordt de weg verbreed. Een gevolg hiervan is dat ook de spoorbrug over de A1 bij Muiderberg moet worden aangepast. De nieuwe brug heeft een grotere overspanning, en een andere constructie dan het huidige spoorviaduct, wat mogelijk gevolgen heeft voor de trillingen in de omgeving ten gevolge van treinverkeer over de brug.
- 1.2 Doel van het onderzoek
Het doel van dit onderzoek is om in de omgeving van de spoorbrug Muiderberg de trillingseffecten van de nieuwe spoorbrug in kaart te brengen. Dit trillingsonderzoek dient als onderbouwing voor het tracébesluit van SAA .
- 1.3 Algemeen onderzoekskader
Het onderzoeksgebied voor het trillingsonderzoek betreft de zone waarbinnen trillingseffecten optreden door de nieuwe spoorbrug Muiderberg. Dit is een gebied top op een afstand van maximaal 200 meter van de nieuwe spoorbrug. De spoorbrug loopt van km 3.92 tot km 4.18 (lijncode 135).
- 1.4 Toegepaste kaders en uitgangspunten
De Beleidsregel Trillinghinder Spoor (BTS) en het bijbehorende memo van Level Acoustics² vormen het kader voor de afweging van trillingshinder in het trillingsonderzoek ten behoeve van de spoorbrug Muiderberg. Daarnaast zal ook getoetst worden aan de hand van de SBR-B richtlijn.
- 1.5 Opzet van het onderzoek
In eerste instantie is geïnventariseerd in welke woningen de trillingen mogelijk worden beïnvloed door de aanleg van de nieuwe spoorbrug. Binnen een afstand van 150 meter van de spoorbrug bevinden zich 2 woningen. Daarnaast bevinden zich in een zone van 150 tot 200 meter nog 14 andere woningen. Dit trillingsonderzoek richt zich op alle woningen in een zone tot 200 meter van de brug. Met metingen is nauwkeurige informatie verzameld op enkele representatieve locaties. Deze informatie is gebruikt om het trillingsniveau in de overige woningen binnen 200 meter te voorspellen.
- De trillingsniveaus worden conform de BTS beoordeeld ten opzichte van de referentiesituatie. De referentiesituatie is hier conform het TB SAA 2011 het jaar 2009. Uitgangspunt is dat de trillingen die in de huidige situatie worden gemeten overeenkomen met de trillingen in het jaar 2009.

² A. Koopman, LA.131001a.M04, 26 februari 2014

2 Situatiebeschrijving

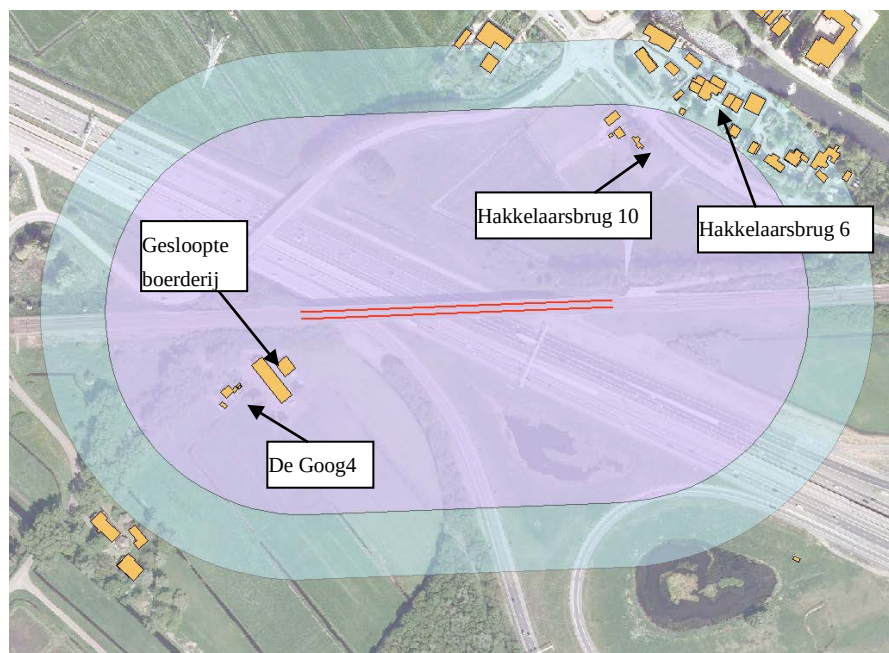
In het trillingsonderzoek wordt onderscheid gemaakt tussen twee situaties:

1. De referentiesituatie conform de BTS, in 2009;
2. De plansituatie in het jaar 2020 (OV-SAAL middellange termijn (MLT))

2.1 Onderzoeksgebied

Het onderzoeksgebied voor het trillingsonderzoek betreft de zone waarbinnen trillingseffecten optreden door de nieuwe spoorbrug Muiderberg. Dit is een gebied tot op een afstand van maximaal 200 meter van de nieuwe spoorbrug. De spoorbrug loopt van km 3.92 tot km 4.18 (lijncode 135), zie Figuur 2-1. Het onderzoeksgebied is opgedeeld in 2 deelgebieden:

- Deelgebied De Goog. Dit is de omgeving ten zuidwesten van het westelijk landhoofd. De Goog 4 is de enige woning in dit gebied. Voorheen bevond zich in dit gebied nog dicht bij het landhoofd een boerderij, die inmiddels geamoveerd is;
- Deelgebied Hakkelaarsbrug. Dit is de omgeving ten noorden en noordoosten van het oostelijk landhoofd waarin zich 15 woningen bevinden, waarvan Hakkelaarsbrug 10 het dichtst bij de spoorbrug ligt. In Hakkelaarsbrug 6 is een trillingsmeting uitgevoerd.



Figuur 2-1 Onderzoeksgebied trillingsonderzoek met zones van 150 en 200 meters

2.2 Referentiesituatie

Als referentiesituatie conform het huidige beleidskader (de BTS) geldt de spoorligging voor aanvang van de werkzaamheden aan de spoorbrug in het jaar 2009. Voor de beoordeling van trillingshinder wordt aan deze situatie gerefereerd. Alle overige gegevens zoals spoorgebruik en treinintensiteiten, worden eveneens genomen uit dit referentiejaar.

2.2.1. Uitgangspunten

Voor de beschrijving van de referentiesituatie is gebruik gemaakt van de in Tabel 2-1 weergegeven documenten.

Tabel 2-1 Gebruikte documenten voor referentiesituatie

[1]	Flevolijn, Viadukt over Rijksweg 1, Wapening Zuidelijke kokerligger, 421/135/K4,000/591/47, Bestek No 5122, NV Nederlandse Spoorwegen, 29-10-1983
[2]	Bestek nr. 5122 NS 1982 Revisie 171, Bestek en Voorwaarden voor het maken van een viaduct bestaande uit twee enkelsporige kokerliggers met bijbehorende onderbouw over rijksweg 1 (A'dam – Amersfoort) in de toekomstige Flevolijn bij km 4.000 nabij buurtschap Hakkelaarsbrug (gemeente Muiden)
[3]	Viaduct over RW1 Tracé en plaatverdeling spoor Wsp-LIs v.v. 135/4.000//410700, mei 1985
[4]	SPC00013, Productspecificatie Kurkrubber materiaal FC 6 (10 mm dik), versie 001, 20 april 2000

2.2.2. Huidig Spoorviaduct

Het spoorviaduct in de huidige situatie bestaat uit 2 statisch onbepaalde kokerliggers met een dek lengte van 183 meter en 3 tussensteunpunten tussen de landhoofden. Dit komt er op neer dat het viaduct bestaat uit 2 holle betonnen balken zonder onderbrekingen bij de tussensteunpunten. Op beide kokerliggers ligt een bovenbouwconstructie bestaande uit een directe spoorstaafbevestiging.

Het spoorviaduct in de referentiesituatie komt overeen met het huidige spoorviaduct.

Viaductconstructie

De eigenschappen van de viaductconstructie zijn bepaald aan de hand van het bestek en tekeningen van het viaduct. Dit leidt tot de volgende eigenschappen

E-modulus	$35 \cdot 10^9$	N/m ²
Dichtheid	2500	kg/m ³
Poisson verhouding	0.2	-
Verticaal traagheidsmoment doorsnede kokerligger	6.16	m ⁴
Oppervlak doorsnede koker ligger	7.764	m ²
Lengte overspanningen	40, 46.5, 50, 44	m

Spoorconstructie

Voor de directe spoorstaafbevestiging is uitgegaan van de volgende eigenschappen. De eigenschappen zijn gegeven voor 2 spoorstaven samen omdat dit overeenkomt met de modelinvoer van *spoormodel*.

Type spoorstaaf	54-E-1 (UIC 54)	
Veerconstante beddingsplaatje (2x)	$1 \cdot 10^9$	N/m
Dempingsconstante beddingsplaatje (2x)	$1 \cdot 10^6$	Ns/m
Massa rughellingplaat (2x)	18.4	kg
Veerconstante onderlegplaat (2x)	$1.42 \cdot 10^8$	N/m
Dempingsconstante onderlegplaat (2x)	$1.42 \cdot 10^5$	Ns/m

2.2.3. Spoorgebruik

Het betreft een 2-sporig baanvak. De treinen rijden hier rechts, wat betekent dat treinen in de richting van Almere op het zuidelijke spoor rijden, en treinen komend vanuit

Almere over het noordelijke spoor. Het treinverkeer bestaat uit sprinters (voornamelijk SLT) en intercity's (voornamelijk VIRM).

2.2.4. Snelheden

Het uitgangspunt voor de treinsnelheden is dat deze in de referentiesituatie en plansituatie overeenkomen met de treinsnelheden tijdens de trillingsmeting.

2.3 Plansituatie

Deze paragraaf bevat een beschrijving van de plansituatie bij de nieuwe spoorbrug Muiderberg, na realisatie van SAA en OV-SAAL in het jaar 2020. In de plansituatie is het spoorviaduct vervangen door een dubbelsporige stalen spoorbrug met een overspanning van 255 meter. De spoorbrug heeft een betonnen dek met daarop ballastspoor op een ballastmat.

2.3.1. Uitgangspunten

Voor de beschrijving van de plansituatie is gebruik gemaakt van de in Tabel 2-2 weergegeven documenten

Tabel 2-2 Gebruikte documenten voor plansituatie

- | | |
|-----|---|
| [1] | Rapport SAAONE-OCF-BER-300005-1.0 DO Hoofdberekening BGT Stijfheid, dynamica, vermoeiing K050 [K050-DO-B-004].pdf |
| [2] | Rapport SAAONE-OCF-BER-300003-1.0 DO Rekenmodellen 3d-SCIA hoofddraagconstructie en hoofdligger [K050-DO-B-002].pdf |
| [3] | SPC00061, Ballastmatten ter verhoging van de elasticiteit van het spoor, versie 001, 15 november 2000 |
| [4] | OV SAAL, MAATREGELEN KORTE TERMIJN, TRAJECT WEESP – LELYSTAD ONDERZOEK TRILLINGSHINDER, PRORAIL SPOORONTWIKKELING, Arcadis, 11 maart 2011, 075294496:B, D01021.000043 |

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

1. Het spoorviaduct wordt vervangen door een spoorbrug;
2. De treinintensiteit gaat omhoog (in de loop van de jaren 2011-2020)
3. Er gaan goederentreinen over de spoorlijn Muiderberg – Almere – Lelystad rijden.

2.3.2. Spoorbrug plansituatie

In de plansituatie is het spoorviaduct vervangen door een dubbelsporige staal-betonnen spoorbrug met een overspanning van 255 meter. De spoorbrug heeft een betonnen dek met daarop ballastspoor op een ballastmat.

Brugconstructie

De eigenschappen van de brugconstructie zijn bepaald aan de hand van de rapportages met de beschrijving van dynamica berekeningen en rekenmodellen. De buigstijfheid is herleid uit de 1^e verticale eigenfrequentie van de brug (0.99 Hz), de massa van de brug en de lengte van de overspanning (255 m).

E-modulus	210*10 ⁹	N/m ²
Dichtheid	7850	kg/m ³
Poisson verhouding	0.3	-
Verticaal traagheidsmoment doorsnede kokerligger	323	m ⁴

Oppervlak doorsnede brug (als ligger beschouwd)	4.67	m ²
Lengte overspanningen	255	M

Spoorconstructie

Voor de bovenbouwconstructie is uitgegaan van de volgende eigenschappen. De eigenschappen zijn gegeven voor 2 spoorstaven samen omdat dit overeenkomt met de modelinvoer van *spoormodel*.

Type spoorstaaf	54-E-1 (UIC 54)	
Veerconstante beddingsplaatje (2x)	1*10 ⁹	N/m
Dempingsconstante beddingsplaatje (2x)	1*10 ⁶	Ns/m
Massa dwarsligger	250	kg
Veerconstante dwarsligger in ballast	1.80*10 ⁸	N/m
Dempingsconstante dwarsligger in ballast	8.20*10 ⁴	Ns/m
E-modulus Ballast	6.0*10 ⁸	N/m ²
Dichtheid Ballast	1800	kg/m ³
Verticaal traagheidsmoment ballast	3.125*10 ⁻²	m ⁴
Oppervlak doorsnede ballast	1.5	m ²
Beddingsconstante ballastmat per strekkende meter	1.74*10 ⁸	N/m/m
Dempingsconstante ballastmat per strekkende meter	1.74*10 ⁵	Ns/m

2.3.3. Geometrische wijzigingen

De aanstoting van het landhoofd vindt bij de nieuwe brug op een andere locatie plaats dan bij het bestaande spoorviaduct. De volgende afstanden zijn aangehouden voor de afstanden ten opzichte van de woningen De Goog 4, Hakkelaarsbrug 6 en Hakkelaarsbrug 10:

Tabel 2-3 Geometrische wijzigingen plansituatie ten opzichte van bestaande situatie (referentie)

	Zuidelijk spoor		Noordelijk spoor	
	Doorgaand spoor	Landhoofd	Doorgaand spoor	Landhoofd
De Goog 4, referentie	49	89	53	84
De Goog 4, plansituatie	49	72	53	77
Hakkelaarsbrug 6, ref	157	190	152	192
Hakkelaarsbrug 6, plan	157	174	152	170
Hakkelaarsbrug 10, ref	121	133	116	133
Hakkelaarsbrug 10, plan	121	123	116	118

2.3.4. Spoorgebruik

Het spoorgebruik blijft in de plansituatie gelijk aan de referentiesituatie. Dit betekent dat er zowel in de referentiesituatie als in de situatie met OV-SAAL sprake is van een dubbelsporig baanvak, waarbij de treinen richting Almere rijden over het zuidelijke spoor, en de treinen richting Muiderberg over het noordelijke spoor.

2.3.5. Snelheden

De treinsnelheid voor reizigerstreinen blijft in de plansituatie gelijk aan de gemeten situatie.

2.3.6. Cumulatie met overige trillingsbronnen

De cumulatie van de trillingen van treinverkeer met andere trillingsbronnen kan leiden tot hogere trillingen dan wanneer de verschillende trillingsbronnen afzonderlijk worden bekeken. In het onderzoeksgebied kan cumulatie optreden met zwaar wegverkeer, zoals bussen en vrachtverkeer. In de praktijk treedt cumulatie op wanneer aan onderstaande twee condities wordt voldaan:

1. Beide trillingsbronnen hebben vergelijkbare trillingssterktes. Dit betekent doorgaans dat de afstand tot beide trillingsbronnen vergelijkbaar moet zijn.;
2. Beide trillingsbronnen treden gelijktijdig op. In de praktijk betekent dit dat op het moment van een treinpassage ook een ander voertuig langskomt wat vergelijkbare trillingen veroorzaakt. Dit zal alleen optreden bij drukke vervoerslijnen, zoals bus- en tramlijnen en intensief door vrachtverkeer gebruikte wegen.

In het onderzoeksgebied kunnen de wegen Naardervaart en De Goog leiden tot een verhoogd trillingsniveau. Vanwege de beperkte intensiteit van de maatgevende goederentreinen over de spoorlijn, en de beperkte intensiteit van vrachtverkeer op deze wegen, is de kans op een verhoogd trillingsniveau door cumulatie zeer klein, en niet meegenomen in de berekeningen.

2.3.7. Wijziging in treinintensiteit

In de referentiesituatie rijden er in beide richtingen 10 reizigerstreinen per uur. In de plansituatie worden het totaal 12 reizigerstreinen per uur. In tegenstelling tot de gemeten situatie en de plansituatie, rijden er in de referentiesituatie geen goederentreinen. De gehanteerde intensiteiten zijn ontleend aan het trillingsonderzoek voor OV-SAAL³. De intensiteiten ten tijde van de trillingsmetingen zijn ontleend aan de NS vertrekstaten van 2014.

Tabel 2-4 Intensiteiten in de referentiesituatie (2009)

Periode	Stoptreinen/ uur	Intercity's/ uur	Goederentreinen/ uur	Richting
Dag- en avondperiode (7.00 uur – 23.00 uur)	4	6	0	Muiderberg - Almere
Dag- en avondperiode (7.00 uur – 23.00 uur)	4	6	0	Almere – Muiderberg
Nachtperiode (23.00 uur – 7.00 uur)	2	2	0	Muiderberg - Almere
Nachtperiode (23.00 uur – 7.00 uur)	2	2	0	Almere – Muiderberg

Tabel 2-5 Intensiteiten in de plansituatie

Periode	Stoptreinen/ uur	Intercity's/ uur	Goederentreinen/ uur	Richting
Dag- en avondperiode (7.00 uur – 23.00 uur)	4	8	1	Muiderberg - Almere
Dag- en avondperiode (7.00 uur – 23.00 uur)	4	8	1	Almere - Muiderberg

³ OV SAAL, MAATREGELEN KORTE TERMIJN, TRAJECT WEESP – LELYSTAD ONDERZOEK TRILLINGSHINDER, PRORAIL SPOORONTWIKKELING, Arcadis, 11 maart 2011, 075294496:B, D01021.000043
D79-WGA-KA-1400003 / Proj.nr. IN191396 / vrijgegeven / Versie 3.0 / 16 mei 2014

Nachtperiode (23.00 uur – 7.00 uur)	2	3	1	Muiderberg - Almere
Nachtperiode (23.00 uur – 7.00 uur)	2	3	1	Almere - Muiderberg

Tabel 2-6 Intensiteiten tijdens de trillingsmetingen

Periode	Stoptreinen/ uur	Intercity's/ uur	Goederentreinen/ uur	Richting
Dag- en avondperiode (7.00 uur – 23.00 uur)	6	4	0	Muiderberg - Almere
Dag- en avondperiode (7.00 uur – 23.00 uur)	6	4	0	Almere – Muiderberg
Nachtperiode (23.00 uur – 7.00 uur)	2	1	0.1	Muiderberg - Almere
Nachtperiode (23.00 uur – 7.00 uur)	2	1	0.1	Almere – Muiderberg

3 Opzet trillingsonderzoek

In dit hoofdstuk wordt de gevolgde aanpak voor het onderzoek naar trillingshinder tijdens de exploitatiefase nader toegelicht. 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 in een achtereenvolgens doorlopen:

1. Stap 1: inventarisatie van locaties waar mogelijk trillingshinder kan optreden;
2. Stap 2: verfijning van het onderzoek door het toevoegen van metingen en locatiespecifieke gegevens in VibraDyna;
3. Stap 3: trillingsmetingen en nauwkeurige trillingsprognoses voor mogelijke knelpuntlocaties;
4. Stap 4: ontwerpen van trillingsmaatregelen en afweging van varianten op doelmatigheid.

Bovengenoemde vier stappen worden in de volgende subparagrafen nader toegelicht. In dit geval bestaat stap 1 uit een inventarisatie van woningen binnen 200 meter van de nieuwe spoorbrug. Vanwege de beperkte omvang van het gebied, en het beperkte aantal woningen waar een risico op trillingshinder is, is daarna direct overgegaan naar stap 3. Dit rapport behandelt stap 3 van het trillingsonderzoek.

3.1 Stap 1: Inventarisatie van trillingsgevoelige locaties

Rondom de nieuwe spoorbrug zijn alle gebouwen binnen een afstand van 150 meter en 200 meter in kaartgebracht. Op grotere afstand tot het spoor is geen significante toename in trillingshinder te verwachten of zijn de trillingssterktes lager dan welke volgens de BTS toelaatbaar zijn.

Dicht naast de spoorbrug ligt een woning aan De Goog 4. Binnen de 150 m van de spoorbrug ligt daarnaast nog Hakkelaarsbrug 10. De woning aan De Goog 5 is geamoveerd. Tussen de 150 en 200 m liggen nog 14 woningen.

Gebouwen binnen een afstand van 150 meter komen in aanmerking voor nader onderzoek. Als uit het nader onderzoek blijkt dat er tot op 150 kans is op overschrijdingen, dan worden ook de woningen tot op een afstand van 200 meter nader beschouwd.

3.2 Stap 2: Indicatieve trillingsmeting en empirische prognose

Op de locaties uit het stap 1-onderzoek waar (een toename van) trillingshinder niet valt uit te sluiten, is nader onderzoek verricht, bestaande uit trillingsmetingen op maaiveld. In dit geval is deze stap overgeslagen, en vanwege het beperkte aantal woningen direct overgegaan naar stap 3.

3.2.1. Stap 3: Nauwkeurige trillingsprognoses in woningen

In stap 3 worden alleen die locaties beschouwd waar op basis van de resultaten van de voorgaande stappen (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 de spoorbrug wordt met behulp van modellen bepaald.

Het resultaat van stap 3 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.

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

Voor elke locatie die op basis van de resultaten uit stap 3 niet voldoet aan de BTS worden maatregelen ontworpen en doorgerekend.

In stap 4 hoeven geen aanvullende trillingsmetingen te worden uitgevoerd, tenzij de trillingsmetingen die uitgevoerd zijn in stap 3 onvoldoende informatie bieden voor het ontwerp of het bepalen van de effectiviteit van maatregelen. Vervolgens worden de kosten van de maatregelen geëvalueerd. Aan de hand van kosten, effectiviteit, inpassing en impact op het milieu en de omgeving kunnen de maatregelen worden afgewogen en, bij voldoende doelmatigheid, worden toegepast.

4 Beoordelingskader trillingshinder

Treinverkeer, maar ook bouwwerkzaamheden en wegverkeer, kunnen aanleiding geven tot trillingen in gebouwen. Deze trillingen kunnen leiden tot hinder of schade.

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. Bij uitspraken van 2 oktober 2013 heeft de Afdeling Bestuursrechtspraak van de Raad van State de tracébesluiten *Sporen in Arnhem 2012* en *Sporen in Utrecht 2012 deeltracé Utrecht Centraal – Houten* opnieuw vernietigd vanwege het onderwerp trillingshinder. Naar het oordeel van de Afdeling mist de BTS noodzakelijke elementen om als beoordelingskader te kunnen dienen. Naar aanleiding van deze uitspraak is de BTS op een aantal punten gewijzigd en aangevuld om tegemoet te komen aan de kritiepunten.

De nieuwe BTS 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 doelmatigheidscriterium. In dit doelmatigheidscriterium wordt uitsluitend gegeven of bepaalde maatregelen, gezien de kosten, effectiviteit, milieu- en maatschappelijke impact en de mate van trillingshinder voldoende doelmatig zijn;
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 Acoustics⁴ en in Bijlage II;
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 referentiesituatie. Bij metingen met een hoge *R*-waarde wordt deze *Q*-waarde gecorrigeerd voor de lagere reproduceerbaarheid.

In dit onderzoek wordt trillingshinder beoordeeld op de BTS. Een nadere omschrijving van het beoordelingskader van zowel de SBR-B richtlijn als de BTS is te vinden in Bijlage I.

⁴ LA.131001a.M04, 26 februari 2014

5 Trillingsmetingen

Ten behoeve van het trillingsonderzoek zijn de volgende trillingsmetingen uitgevoerd:

- Woningmeting in De Goog 4, gedurende 1 week;
- Woningmeting in Hakkelaarsbrug 6, gedurende 1 week
- Maaiveldmetingen bij zuidzijde westelijk landhoofd spoorviaduct, km 3.94 (landhoofd) en km 3.78 (aardebaan)

De woning aan De Goog 4 is voor een meting geselecteerd omdat dit de enige woning is binnen een afstand van 200 meter van het westelijk landhoofd. De woning Hakkelaarsbrug 6 is geselecteerd als representatieve woning bij het oostelijk landhoofd. Er zijn enkele woningen die dichterbij liggen, maar om de volgende redenen is daar niet gemeten:

- o Hakkelaarsbrug 4: Deze woning is in 1998 gebouwd en heeft stenen muren en een betonvloer, met naar verwachting een lager te verwachten trillingsniveau
- o Hakkelaarsbrug 3: Deze woning is volledig van hout op een betonnen vloer. De muren en vloeren zijn van hout. Vanwege de bijzonder constructie niet geschikt als woning voor de metingen.
- o Hakkelaarsbrug 10: Deze woning heeft slechts één bouwlaag en een betonnen vloer en daarom niet representatief voor de woningen in de omgeving.

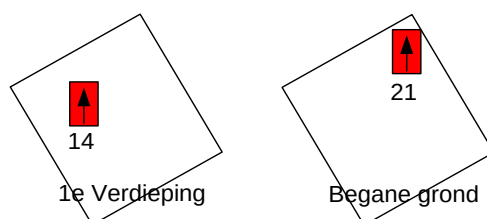
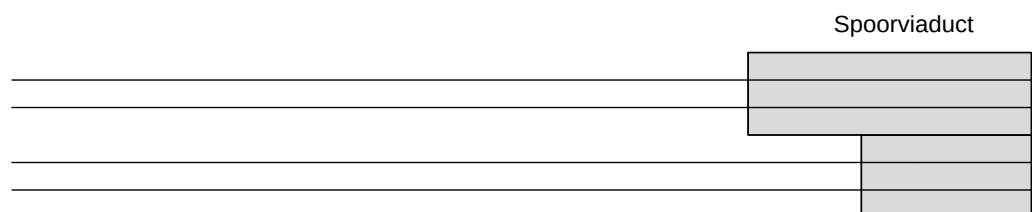
De x, y en z richting zijn in alle metingen als volgt gedefinieerd:

- x. Horizontaal loodrecht op spoorlijn
- y. Horizontaal evenwijdig aan spoorlijn
- z. Verticaal

5.1 Woningmeting De Goog 4

Het pand de Goog 4 is een vrijstaande woning. In deze woning zijn gedurende 1 week (van 4 tot 11 maart 2014) continu de trillingen gemeten. Er is op 2 meetpunten gemeten:

- Op de begane grond in de hoek van de woning op een stijf punt van de constructie (Sensor 21)
- Op de 1^e verdieping op het midden van een vloerveld (Sensor 14)



Figuur 5-1 Situatieschets bij De Goog 4

De gemeten trillingssterktes staan in Tabel 5-1 en in Bijlage IV. De tabel bevat zowel de Vmax-waarde bepaald conform de SBR-B richtlijn als de Vmax-waarde bepaald conform de BTS. Er treedt in beide gevallen een beperkte overschrijding van de SBR-B streefwaarde in de nacht op voor de verticale richting van de sensor op de 1^e verdieping. Dit zijn de rode waarden in de tabel. De hoogste niveaus van treinverkeer werden veroorzaakt door goederentreinen in de nacht. De Vper-waarden zijn steeds zeer laag (0.00 of 0.01). Dit oorzaak van deze lage Vper-waarden is dat alleen trillingsniveaus van minimaal 0.10 meetellen voor de Vper-waarde. In bijlage IV is te zien dat trillingsniveaus boven 0.10 van treinverkeer maar beperkt optreden.

Verstoringen, voornamelijk afkomstig van langsrijdende dumpers en van voetstappen zijn verwijderd uit de dataset om een “schone” dataset te verkrijgen met uitsluitend trillingen van treinpassages. In Bijlage II staat welke methoden hiervoor zijn gebruikt. De methode is erop gericht om in ieder geval de trillingswaarden van de treinpassages in de dataset te behouden, zodat het resultaat nooit meer zou kunnen zijn dan de gepresenteerde waarden.

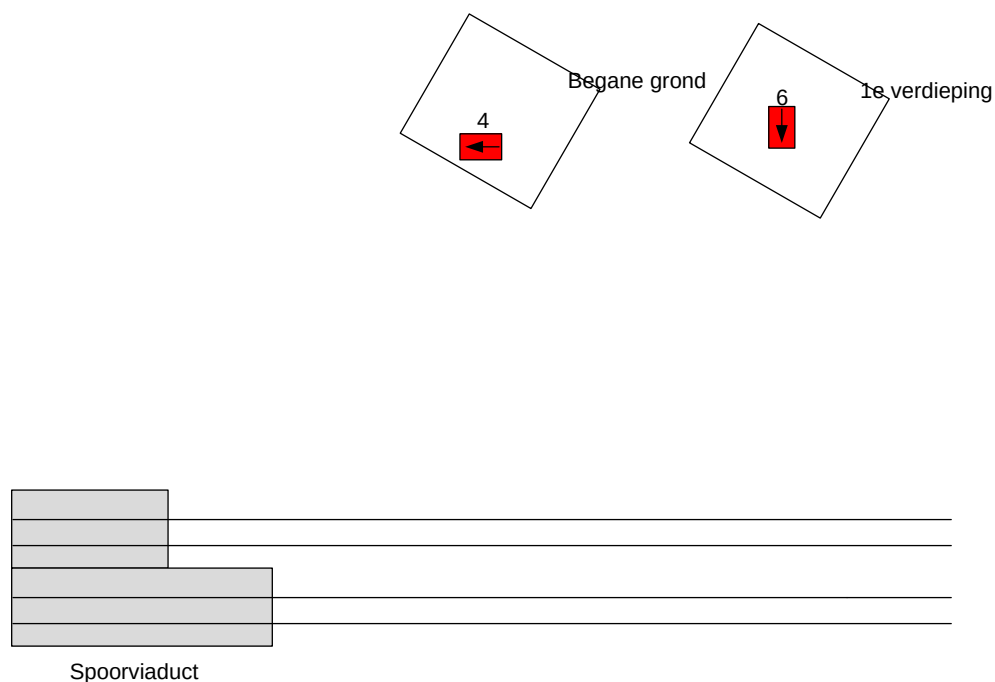
Tabel 5-1 Gemeten trillingssterktes in De Goog 4

Sensor	14-z	14-y	14-x	21-z	21-y	21-x
Vmax, SBR-B, dag en avond	0.19	0.13	0.16	0.14	0.08	0.09
Streefwaarde SBR-B, dag en avond	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Vmax, SBR-B, nacht	0.25	0.11	0.15	0.13	0.06	0.08
Streefwaarde SBR-B, nacht	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Vmax, BTS	0.24	0.13	0.15	0.14	0.08	0.09
R-waarde BTS	19	16	19	14	10	9
Toetswaarde Vmax, BTS	0.29	0.15	0.18	0.16	0.08	0.09
Streefwaarde BTS	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Vper, dag	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vper, avond	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vper, nacht	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Streefwaarde SBR-B, dag, avond, nacht	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

5.2 Woningmeting Hakkelaarsbrug 6

Het pand Hakkelaarsbrug 6 is een vrijstaande woning op circa 170 meter van de toekomstige nieuwe spoorbrug. In deze woning zijn gedurende 1 week (van 4 tot 11 maart 2014) continu de trillingen gemeten op de volgende plaatsen:

- Op de begane grond in de hoek van de woning op een stijf punt van de constructie (Sensor 4)
- Op de 1^e verdieping op het midden van een vloerveld (Sensor 9)



Figuur 5-2 Situatieschets bij Hakkelaarsbrug 6

De gemeten trillingssterktes staan in Tabel 5-2 en in Bijlage IV. De tabel bevat zowel de V_{max} -waarde bepaald conform de SBR-B richtlijn als de V_{max} -waarde bepaald conform de BTS. Omdat alleen trillingsniveaus van minimaal 0.10 meetellen voor de V_{per} -waarde, de waarde V_{max} kleiner is dan 0.10, is de V_{per} -waarde steeds 0.00. Verstoringen, voornamelijk afkomstig van vrachtwagens en van voetstappen zijn zo uit de dataset verwijderd om een schone dataset met alleen trillingen van treinpassages te krijgen. In bijlage II staat welke methoden hierbij zijn gebruikt. De hoogste niveaus van treinverkeer werden veroorzaakt door goederentreinen, maar waren ruimschoots lager dan de streefwaarde.

Tabel 5-2 Gemeten trillingssterktes in Hakkelaarsbrug 6

Sensor	9-z	9-y	9-x	4-z	4-y	4-x
Vmax, SBR-B, dag en avond	0.09	0.09	0.08	0.07	0.05	0.03
Streefwaarde SBR-B, dag en avond	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Vmax, SBR-B, nacht	0.09	0.05	0.08	0.07	0.04	0.03
Streefwaarde SBR-B, nacht	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Vmax, BTS	0.08	0.08	0.09	0.07	0.05	0.03
R-waarde BTS	17	15	21	20	22	10
Toetswaarde Vmax, BTS	0.09	0.09	0.11	0.08	0.06	0.03
Streefwaarde BTS	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Vper, dag	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vper, avond	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vper, nacht	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Streefwaarde SBR-B, dag, avond, nacht	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

5.3 Maaiveldmetingen

Het doel van de maaiveldmetingen was om de trillingsbijdrage van het huidige landhoofd ten opzichte van de aardebaan vast te stellen. Er is op 2 punten langs de baan gemeten met 5 sensoren:

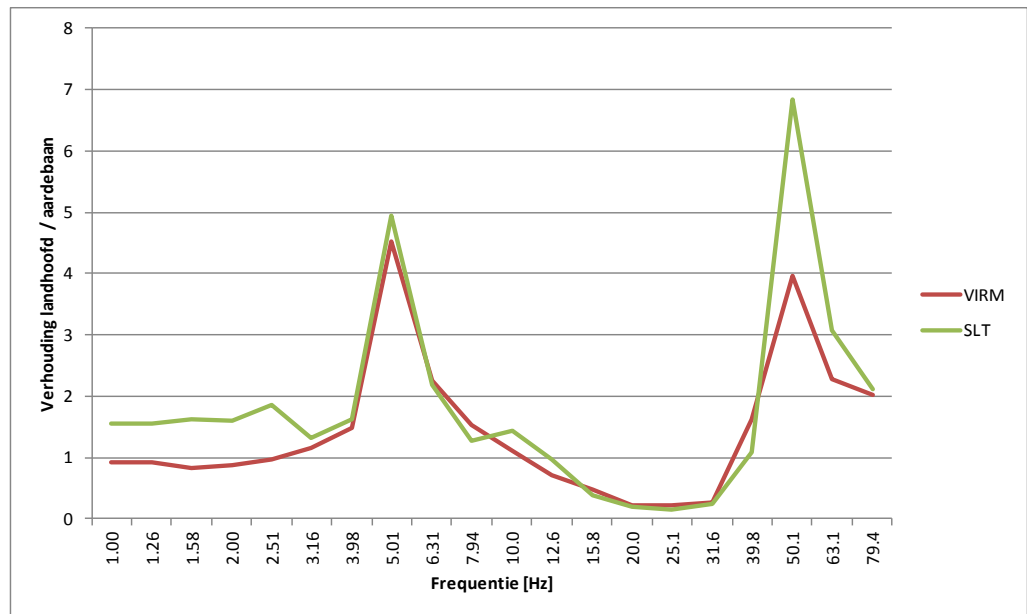
- km 3.78: meting aardebaan, met sensoren op 20, 30, 40, 50 en 60 meter uit het hart van het 1^e spoor
- km 3.94: meting landhoofd, met sensoren op 24, 44, 54, 64 en 74 meter uit het hart van het 1^e spoor

Op beide maaiveldlocaties is gedurende circa 3 uur gemeten. In die periode zijn op beide locaties 40 treinen gepasseerd. De treinen waren het type VIRM en SLT.



Figuur 5-3 Situatie maaiveldmeting bij landhoofd en bij aardebaan

Op basis van de meetresultaten van de 5 sensoren, is per locatie de gemiddelde trillingssterkte van VIRM treinen en SLT treinen op 20 meter afstand van het spoor bepaald. Het resultaat hiervan staat in Figuur 2-1. Beide treintypen vertonen een grote gelijkenis voor het frequentiegebied dat het meest van belang is bij treinverkeer op enige afstand van het spoor (ca. 3-30 Hz). De versterking bij 5 Hz wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het dynamisch gedrag van het huidige spoorviaduct. In het gemeten trillingssignaal was de 5 Hz component duidelijk zichtbaar op het moment dat treinen over het viaduct reden. Daarnaast is er een duidelijke versterking bij 50 Hz te zien. Mogelijk hangt deze samen met de frequentie waarmee de assen van de treinen veren op de directe spoorstaafbevestiging op het viaduct. Doorgaans leveren frequenties van 50 Hz geen significante bijdrage aan het trillingsniveau in woningen op enige afstand van het spoor.



Figuur 5-4 Verhouding trillingssterkte landhoofd/aardebaan op 20 meter afstand van spoor

6 Prognose

Bij de toetsing van een gewijzigde situatie conform de SBR-B richtlijn en de BTS, wordt een plansituatie vergeleken met een referentiesituatie. Beide situaties wijken af van de situatie ten tijde van de trillingsmetingen. De trillingsprognose is daarom uitgevoerd voor 2 situaties:

- De referentiesituatie, waarin er nog geen goederentreinen reden;
- De toekomstige situatie inclusief de effecten van de nieuwe spoorbrug en het gewijzigd treinverkeer overeenkomstig het project OV-SAAL

In de volgende paragrafen staat de aanpak van de trillingsprognose voor de referentiesituatie en de plansituatie beschreven. De aanpak komt overeen met de aanpak die gehanteerd wordt voor tracébesluiten van spooruitbreidingsprojecten van ProRail.

6.1 Prognose referentiesituatie

Het verschil tussen de referentiesituatie en de bemeten situatie is dat er in de bemeten situatie goederentreinen reden, en in de referentiesituatie niet. De prognose voor de referentiesituatie blijft daardoor beperkt tot de meetresultaten van de reizigerstreinen.

6.2 Prognose plansituatie

Voor de prognose van de plansituatie zijn de volgende stappen doorlopen:

- Bepaling van de verhouding (spectraal in tertsbanden) tussen bijdrage van het bestaande landhoofd en de aardebaan op 20 meter van spoor op basis van de uitgevoerde maaiveldmetingen;
- Bepaling van de verhouding (spectraal in tertsbandspectrum) tussen de aanstoting van het landhoofd door nieuwe spoorbrug en het bestaande spoorviaduct aan de hand van *spoormodel* berekeningen;
- Bepaling van de invloed van het afstandverschil (spectraal in tertsbanden) tussen het nieuwe landhoofd en het bestaande landhoofd;
- Correctie van de gehele meetdataset met bovenstaande spectrale verhoudingen. Dit leidt tot een dataset voor een fictieve meting in de toekomstige situatie met de spoorbrug Muiderberg, met dezelfde treinpassages als tijdens de trillingsmeting in de woningen;
- Correctie van de dataset met de fictieve meting van de toekomstige situatie voor de gewijzigde treinintensiteiten van OV-SAAL.

In de volgende paragrafen wordt nader ingegaan op bovenstaande stappen van de prognose voor de plansituatie.

6.2.1. Bijdrage landhoofd

De bijdrage van het landhoofd ten opzichte van de aardebaan is bepaald aan de hand van de maaiveldmetingen die in hoofdstuk 4 staan beschreven. Uit de maaiveldmeting blijkt dat voor het relevante frequentiegebied van ca. 3-30 Hz de verhouding voor verschillende treintypen weinig verschilt. Voor de prognose is per tertsband het maximum aangehouden van SLT en VIRM treinen zoals die staan afgebeeld in Figuur 5-4 in het frequentiegebied van 1 tot 80 Hz.

6.2.2. Spoorbrug ten opzichte van spoorviaduct

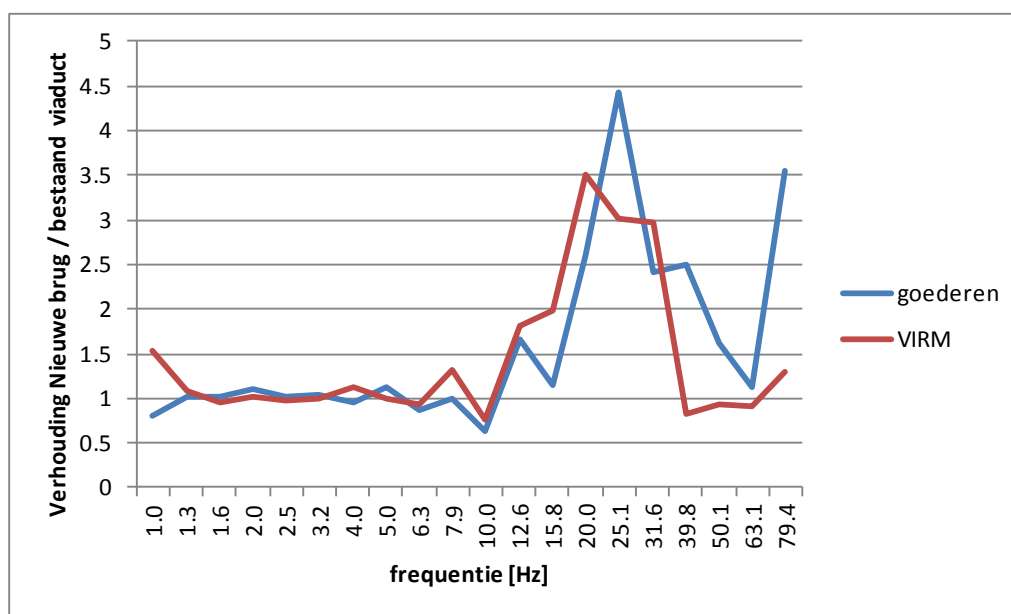
De verhouding tussen de landhoofd aanstoting van de nieuwe brug en het bestaande viaduct is bepaald met het programma *spoormodel*. In bijlage III staat een beschrijving van *spoormodel* met schematische weergaven van de modellen voor de bestaande

situatie en de plansituatie. De gehanteerde eigenschappen van het viaduct en de spoorbrug staan in de paragrafen 2.2.2 en 2.3.2.

De volgende berekeningen zijn voor beide modellen uitgevoerd:

- Een beladen goederentrein (ertstrein) met 80 km/uur
- Een VIRM met 130 km/uur

Het spoormodel genereert ter plaatse van de ondersteuning van de brug of het viaduct bij het landhoofd een krachtsignaal als functie van de tijd. Van dit krachtsignaal wordt een tertsbandspectrum bepaald. Vervolgens wordt het tertsbandspectrum van de plansituatie gedeeld door het tertsbandspectrum van de bestaande situatie.



Figuur 6-1 Verhouding aanstoting landhoofd door nieuwe brug ten opzichte van bestaand viaduct

6.2.3. Invloed afstandverschil

De aanstoting van het landhoofd vindt bij de nieuwe brug op een andere locatie plaats dan bij het bestaande spoorviaduct. De gehanteerde afstanden staan in Tabel 2-3. Op basis van uitgevoerde sonderingen DKM106 en DKM110 nabij het spoorviaduct is een overeenkomende bodem gezocht waar Movares eerder een valproef heeft uitgevoerd. De bodem bij de Pelikaanstraat in Utrecht kwam overeen, met een zandbodem, en enkele dunne slappe lagen in de bovenste meters.

- Voor het trillingseffect van de wijziging in spoorafstanden tot het doorgaand spoor op de aardebaan zijn de dempingsparameters en geometrische uitbreidingsparameters van de bodem bij de Pelikaanstraat gehanteerd.
- Voor het trillingseffect van de wijziging in afstanden tot de aanstotingspunten op het landhoofd zijn de dempingsparameters van de bodem bij de Pelikaanstraat gehanteerd. Voor de geometrische uitbreiding is het landhoofd beschouwd als een puntbron die oppervlaktegolven in de bodem genereert.

6.2.4. Correctie meetdataset

De meetdataset is getransformeerd naar frequentiedomein. Vervolgens wordt een

trillingsniveau op een referentieafstand van 20 meter bepaald. De relatie tussen het gemeten trillingsniveau en het referentieniveau op 20 meter is:

$$V_{\text{gemeten}} = \sqrt{V_{0,20m}^2 + (\text{toeslag}_{\text{ref}} * V_{0,20m})^2}$$

Hierin is de toeslagfactor frequentieafhankelijk en gebaseerd op de verhoudingen die een de voorgaande paragrafen staan beschreven. Nadat het referentieniveau op 20 meter is vastgesteld, kan een prognose worden uitgevoerd voor de plansituatie met:

$$V_{\text{plan}} = \sqrt{V_{0,20m}^2 + (\text{toeslag}_{\text{plan}} * V_{0,20m})^2}$$

6.2.5. Correctie voor gewijzigde intensiteit

De intensiteitswijzigingen uit paragraaf 2.3.7 worden toegepast op de dataset. Vervolgens wordt de Vmax en Vper-waarden zowel bepaald volgens de SBR-B methode als voor de BTS methode.

6.3 Prognose Hakkelaarsbrug 10

In Hakkelaarsbrug 10 is geen trillingsmeting uitgevoerd. De prognose voor Hakkelaarsbrug 10 is daarom gebaseerd op de prognoses bij De Goog 4 en Hakkelaarsbrug 6. De woning aan de Goog 4 ligt dicht bij het spoor en het landhoofd dan Hakkelaarsbrug 10, en de woning aan de Hakkelaarsbrug 6 ligt juist verder van het spoor en het landhoofd. Het trillingsniveau in Hakkelaarsbrug 10 wordt bepaald door lineaire interpolatie van de niveaus van De Goog 4 en Hakkelaarsbrug 6. Voor de afstanden wordt de afstand tot het landhoofd aangehouden. Dit is een worst case benadering om de volgende redenen:

- De afname van trillingen met de afstand verloopt in de regel niet lineair, maar volgens de Barkanvergelijking. Bij lineaire interpolatie ligt het niveau tussen 2 punten hoger dan bij de Barkanvergelijking;
- Het totale trillingsniveau bestaat uit een bijdrage van de baan en een bijdrage van het landhoofd. Voor de interpolatie zijn alleen de afstanden tot het landhoofd aangehouden. Als de afstanden tot de baan waren aangehouden voor de interpolatie, dan zou dat tot een lager trillingsniveau leiden;
- De woningen aan de Goog 4 en de Hakkelaarsbrug 6 zijn woningen met een verdieping. De woning Hakkelaarsbrug 10 heeft geen verdieping, wat normaal gesproken tot een lager maximaal trillingsniveau in de woning leidt.
- De woningen aan de Goog 4 en de Hakkelaarsbrug 6 hebben houten vloeren. Houten vloeren leiden in het algemeen tot hogere trillingsniveaus dan andere vloertypen. De woning Hakkelaarsbrug heeft geen houten vloer.

7 Resultaten

7.1 Deelgebied De Goog

7.1.1. De Goog 4, referentiesituatie

In de volgende paragrafen staan de resultaten voor het deelgebied De Goog

Tabel 7-1 bevat de resultaten voor de referentiesituatie. In de referentiesituatie blijven alle trillingsniveaus onder de streefwaarden, zowel bij een beoordeling volgens de SBR-B als bij een beoordeling conform de BTS.

Tabel 7-1 Trillingsniveaus De Goog 4, referentiesituatie

Sensor	14-z	14-y	14-x	21-z	21-y	21-x
Vmax, SBR-B, dag en avond	0.12	0.08	0.10	0.09	0.08	0.09
Streefwaarde SBR-B, dag en avond	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Vmax, SBR-B, nacht	0.1	0.07	0.06	0.09	0.05	0.05
Streefwaarde SBR-B, nacht	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Vmax, BTS	0.11	0.07	0.09	0.09	0.07	0.08
R-waarde BTS	4	2	9	4	7	11
Toetswaarde Vmax, BTS	0.11	0.07	0.09	0.09	0.07	0.09
Streefwaarde BTS	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Vper, dag	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vper, avond	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vper, nacht	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Streefwaarde SBR-B, dag, avond, nacht	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

7.1.2. De Goog 4, plansituatie

De trillingsniveaus voor de plansituatie staan in Tabel 7-2. Zowel de beoordeling conform de SBR-B richtlijn als de beoordeling volgens de BTS leidt tot een overschrijding van de streefwaarde voor kanaal 14-z. Dit betreft verticale richting op de 1^e verdieping. Ook de streefwaarde voor Q van de BTS (de toename ten opzichte van de referentiesituatie) wordt ruim overschreden. De voornaamste reden hiervoor is dat er in de plansituatie goederentreinen rijden en in de referentiesituatie niet.

Tabel 7-2 Trillingsniveau De Goog 4, plansituatie

Sensor	14-z	14-y	14-x	21-z	21-y	21-x
Vmax, SBR-B, dag en avond	0.22	0.14	0.18	0.16	0.09	0.11
Streefwaarde SBR-B, dag en avond	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Vmax, SBR-B, nacht	0.31	0.13	0.17	0.15	0.07	0.09
Streefwaarde SBR-B, nacht	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Vmax, BTS	0.29	0.15	0.17	0.16	0.09	0.10
R-waarde BTS	19	16	19	17	10	10
Toetswaarde Vmax, BTS	0.34	0.17	0.20	0.19	0.10	0.10
Streefwaarde BTS	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Q-waarde BTS	3.11					
Toetswaarde Q BTS	3.71					
Streefwaarde Q BTS	1.3					
Vper, dag	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Vper, avond	0.03	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00
Vper, nacht	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Streefwaarde SBR-B, dag, avond, nacht	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

7.1.3. De Goog 4, plansituatie ten opzichte van situatie tijdens meting

De overschrijding die in de plansituatie optreedt, wordt voornamelijk veroorzaakt doordat er in de plansituatie goederentreinen rijden en in de referentiesituatie niet. Het gebruik van goederentreinen op de lijn Muiderberg – Almere – Lelystad staat echter los van de wijziging van de spoorbrug over de A1 die is voorzien in het project Schiphol – Amsterdam – Almere van Rijkswaterstaat. Ook de effecten van enkel de wijziging van de spoorbrug is getoetst. Daarbij is de plansituatie vergeleken met de situatie ten tijde van de metingen. Tijdens de metingen reden er ook goederentreinen. Het resultaat hiervan staat in Tabel 7-3. Ook hier treedt een overschrijding van de streefwaarde voor Q van de BTS op voor sensor 14-z. Dit betekent dat ten gevolge van de spoorbrug het trillingsniveau voelbaar toeneemt. De berekende relatieve toename tussen de $V_{\max, \text{BTS}}$ en de plansituatie ten opzichte $V_{\max, \text{BTS}}$ in de meetsituatie is weliswaar kleiner dan 30 %, maar door de hoge R-waarde is conform de BTS een correctie nodig waardoor de toetswaarde Q groter wordt dan 1.3 (toename van meer dan 30%). De hoge R-waarde (reproduceerbaarheidswaarde) is een gevolg van de relatief grote spreiding in de trillingsniveaus van de zwaarste passages gedurende de meting van een week.

Tabel 7-3 Trillingsniveau De Goog 4, plansituatie, met meetsituatie als referentie

Sensor	14-z	14-y	14-x	21-z	21-y	21-x
Vmax, SBR-B, dag en avond	0.22	0.14	0.18	0.16	0.09	0.11
Streefwaarde SBR-B, dag en avond	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Vmax, SBR-B, nacht	0.31	0.13	0.17	0.15	0.07	0.09
Streefwaarde SBR-B, nacht	0.25	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Vmax, BTS	0.29	0.15	0.17	0.16	0.09	0.10
R-waarde BTS	19	16	19	17	10	10
Toetswaarde Vmax, BTS	0.34	0.17	0.20	0.19	0.10	0.10
Streefwaarde BTS	0.29	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Q-waarde BTS	1.21					
Toetswaarde Q BTS	1.53					
Streefwaarde Q BTS	1.3					
Vper, dag	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Vper, avond	0.03	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00
Vper, nacht	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Streefwaarde SBR-B, dag, avond, nacht	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

7.1.4. Overige locaties
Deelgebied De
Goog

Binnen de invloedsszone van 150 tot 200 meter tot de nieuwe spoorbrug liggen geen andere woningen.

7.2 Deelgebied
Hakkelaarsbrug

De resultaten voor het deelgebied Hakkelaarsbrug staan beschreven in de volgende paragrafen. Het deelgebied Hakkelaarsbrug staat beschreven in paragraaf 2.1.

7.2.1. Hakkelaarsbrug 6,
referentiesituatie

De trillingsniveaus voor de referentiesituatie staan in Tabel 7-4. In de referentiesituatie reden er geen goederentreinen. De trillingsniveaus zijn daardoor ruim onder de streefwaarden.

Tabel 7-4 Trillingsniveau Hakkelaarsbrug 6, referentiesituatie

Sensor	9-z	9-y	9-x	4-z	4-y	4-x
Vmax, SBR-B, dag en avond	0.03	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02
Streefwaarde SBR-B, dag en avond	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Vmax, SBR-B, nacht	0.03	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02
Streefwaarde SBR-B, nacht	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Vmax, BTS	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02
R-waarde BTS	2	3	2	3	2	3
Toetswaarde Vmax, BTS	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02
Streefwaarde BTS	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Vper, dag	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vper, avond	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vper, nacht	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Streefwaarde SBR-B, dag, avond, nacht	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

7.2.2. *Hakkelaarsbrug 6, plansituatie*

De trillingsniveaus voor de plansituatie staan in Tabel 7-5. In de plansituatie zijn de trillingsniveaus ongeveer een factor 2 lager dan de streefwaarden, zowel bij beoordeling conform de SBR-B als bij beoordeling conform de BTS.

Tabel 7-5 Trillingsniveau Hakkelaarsbrug 6, plansituatie

Sensor	9-z	9-y	9-x	4-z	4-y	4-x
Vmax, SBR-B, dag en avond	0.10	0.10	0.09	0.08	0.06	0.04
Streefwaarde SBR-B, dag en avond	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Vmax, SBR-B, nacht	0.1	0.07	0.09	0.08	0.05	0.04
Streefwaarde SBR-B, nacht	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Vmax, BTS	0.10	0.09	0.09	0.09	0.06	0.04
R-waarde BTS	19	16	20	22	24	14
Toetswaarde Vmax, BTS	0.12	0.10	0.11	0.11	0.07	0.05
Streefwaarde BTS	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Vper, dag	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vper, avond	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vper, nacht	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Streefwaarde SBR-B, dag, avond, nacht	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

7.2.3. *Hakkelaarsbrug 10, referentiesituatie*

De trillingsniveaus voor de referentiesituatie staan in Tabel 7-6. In de referentiesituatie reden er geen goederentreinen. De trillingsniveaus zijn daardoor ruim onder de streefwaarden.

Tabel 7-6 Trillingsniveau Hakkelaarsbrug 10, referentiesituatie o.b.v. Hakkelaarsbrug 6 en De Goog 4

Sensor	14-z	14-y	14-x	21-z	21-y	21-x
Vmax, SBR-B, dag en avond	0.08	0.06	0.07	0.06	0.05	0.06
Streefwaarde SBR-B, dag en avond	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Vmax, SBR-B, nacht	0.07	0.05	0.05	0.06	0.04	0.04
Streefwaarde SBR-B, nacht	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Vmax, BTS	0.08	0.06	0.07	0.06	0.05	0.05
R-waarde BTS	4	3	9	4	7	11
Toetswaarde Vmax, BTS	0.08	0.06	0.07	0.06	0.05	0.06
Streefwaarde BTS	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Vper, dag	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vper, avond	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vper, nacht	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Streefwaarde SBR-B, dag, avond, nacht	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

7.2.4. Hakkelaarsbrug 10, plansituatie

De trillingsniveaus voor de plansituatie staan in Tabel 7-7. In de plansituatie voldoen de trillingsniveaus nog juist aan de streefwaarden, zowel bij beoordeling conform de SBR-B als bij beoordeling conform de BTS. Het trillingsniveau Vmax wordt afgerond op 1 decimaal voordat het getoetst wordt aan de streefwaarden. Naar verwachting zal het trillingsniveau in Hakkelaarsbrug echter lager zijn, omdat er gebruik is gemaakt van lineaire interpolatie tussen De Goog 4 en Hakkelaarsbrug 10 zoals aangegeven in paragraaf 6.3. Deze aanpak geeft een overschatting van de trillingsniveau's.

Tabel 7-7 Trillingsniveau Hakkelaarsbrug 10, plansituatie, o.b.v. Hakkelaarsbrug 6 en De Goog 4

Sensor	14-z	14-y	14-x	21-z	21-y	21-x
Vmax, SBR-B, dag en avond	0.16	0.12	0.14	0.12	0.08	0.08
Streefwaarde SBR-B, dag en avond	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Vmax, SBR-B, nacht	0.21	0.10	0.13	0.12	0.06	0.07
Streefwaarde SBR-B, nacht	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Vmax, BTS	0.20	0.12	0.13	0.13	0.08	0.07
R-waarde BTS	19	16	20	22	24	14
Toetswaarde Vmax, BTS	0.24	0.14	0.16	0.15	0.09	0.08
Streefwaarde BTS	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Vper, dag	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Vper, avond	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Vper, nacht	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Streefwaarde SBR-B, dag, avond, nacht	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

7.2.5. Overige locaties Deelgebied Hakkelaarsbrug

De overige woningen in de omgeving bevinden zich allen op een grotere afstand of een vergelijkbare afstand als Hakkelaarsbrug 10. Op basis van worst case aannamen voldoet het trillingsniveau in Hakkelaarsbrug 10 nog aan de SBR-B en BTS streefwaarden. In de overige woningen, die allen op een grotere afstand liggen dan Hakkelaarsbrug 10, zal het trillingsniveau lager zijn, en zijn geen overschrijdingen van de streefwaarden te verwachten van de SBR-B of BTS.

8 Conclusies en aanbevelingen

Uit het trillingsonderzoek naar de trillingseffecten van de aanpassing van de spoorbrug Muiderberg volgen onderstaande conclusies:

- Deelgebied De Goog
 - o Woning De Goog 4

Het trillingniveau overschrijdt in de plansituatie de streefwaarden, zowel bij een beoordeling conform de SBR-B richtlijn als bij een beoordeling conform de BTS. De overschrijding treedt op, op de 1^e verdieping van de woning in de verticale trillingsrichting;

 - De voornaamste reden van de overschrijding in de plansituatie is dat er in de plansituatie goederentreinen rijden die er in de referentiesituatie nog niet reden;
 - Als alleen naar het trillingseffect van de aanpassing van de spoorbrug wordt gekeken, dan treedt er nog steeds een overschrijding op, doordat de conform de BTS berekende toename meer dan 30% bedraagt;
 - Uit de trillingsprognose volgt voor de plansituatie een toename van minder dan 30% ten opzichte van de meetsituatie. Vanwege het beperkte aantal goederentreinen gedurende de weekmeting is de toename nog conform de BTS gecorrigeerd, wat leidt tot de toename van meer dan 30%.
 - o Overige woningen

Binnen de invloedszone van 150 tot 200 meter tot de nieuwe spoorbrug liggen geen andere woningen.
- Deelgebied Hakkelaarsbrug
 - o Woning Hakkelaarsbrug 6

Het trillingsniveau blijft in de plansituatie ruim beneden de streefwaarden, zowel bij een beoordeling conform de SBR-B richtlijn als bij een beoordeling conform de BTS.
 - o Woning Hakkelaarsbrug 10

Het trillingsniveau voldoet in de plansituatie aan de streefwaarden, zowel bij een beoordeling conform de SBR-B richtlijn als bij een beoordeling conform de BTS.
 - o Overige woningen

De overige woningen in de omgeving bevinden zich allen op een grotere afstand of een vergelijkbare afstand als Hakkelaarsbrug 10. In de overige woningen zijn geen overschrijdingen van de streefwaarden te verwachten.

8.1 Aanbevelingen

Op locaties waar overschrijdingen optreden dienen maatregelen te worden beschouwd en afgewogen. De overschrijdingen van de SBR-B en BTS streefwaarden blijft beperkt tot de woning De Goog 4. Het hoogste trillingsniveau treedt hier op in de verticale richting op de verdiepingsvloer. De vloer versterkt trillingen in verticale richting ten opzichte van trillingen op funderingsniveau. Een mogelijke maatregel is het verstijven van de vloeren van de woning. De trillingsversterking van de vloer wordt hiermee beperkt.

Maatregelen aan de bron (brug of landhoofd) of maatregelen in het transmissiepad tussen de bron liggen in deze situatie niet voor de hand omdat het hier om slechts één enkele woning gaat. Maatregelen aan de woning zijn dan kosteneffectiever.

Begrippenlijst

BTS (2012)	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
BTS 2014	Wijzigingen op de BTS 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 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 2009 gehanteerd
Plansituatie	Situatie die ontstaat in het planjaar 2020 na realisatie van het project Schiphol-Amsterdam-Almere
Vmax, SBR-B	Maximale trillingssterkte bepaald over de beoordelingsperiode, bepaald conform de SBR-B richtlijn
Vmax, BTS	Maximale trillingssterkte bepaald over de beoordelingsperiode, bepaald conform de BTS
R-waarde BTS	Reproduceerbaarheid bepaald conform BTS 2014 en Level memo LA.131001a M04
Toetswaarde Vmax, BTS	Waarde Vmax gecorrigeerd voor reproduceerbaarheidswaarde R
Streefwaarde BTS	Streefwaarde waar de <i>Toetswaarde Vmax, BTS</i> mee wordt vergeleken
Q-waarde BTS	Waarde die de verhouding aangeeft van Vmax, BTS tussen de plansituatie en de referentiesituatie
Streefwaarde Q BTS	Streefwaarde waar de <i>Q-waarde BTS</i> mee wordt vergeleken
Vper,dag	Trillingsintensiteit bepaald over de dagperiode (7.00 tot 19.00 uur)
Vper, avond	Trillingsintensiteit bepaald over de avondperiode (19.00 tot 23.00 uur)
Vper, nacht	Trillingsintensiteit bepaald over de nachtperiode (23.00 tot 7.00 uur)

Colofon

Opdrachtgever Rijkswaterstaat West Nederland Noord
Frank Elbers

Toekanweg 7
Postbus 3119
2001 DC Haarlem

Telefoon 06 29076161

Uitgave Movares Nederland B.V.

Daalse Kwint
Postbus 2855
3500 GW Utrecht

Telefoon 030 265 3661

Projectnummer IN191396

Opgesteld door Wybo Gardien

© 2014, Movares Nederland B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeelvoudigd, 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 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 wordt gebruik gemaakt van de SBR-B richtlijn en de BTS. In de volgende paragrafen staan de SBR-B richtlijn en de BTS beschreven.

SBR richtlijn deel B

De grenswaarden voor trillingen t.a.v. hinder voor personen in gebouwen volgens SBR richtlijn deel B (Hinder voor personen in gebouwen, meet- en beoordelingsrichtlijn, augustus 2002, ISBN 90-5367-080-7) worden vastgesteld op basis van drie beoordelingscriteria namelijk:

1. De gebouwfunctie.
2. Type trillingsbron
3. De omstandigheden waaronder trillingen kunnen voorkomen, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen de volgende situaties:
 - nieuwe, bestaande of gewijzigde situaties;
 - de locatie van de ontvanger in relatie tot de omgeving.
 - tijdstip waarop de trillingen voorkomen

In de onderstaande paragrafen worden deze criteria toegelicht.

Gebouwfunctie

In de richtlijn wordt onderscheid gemaakt tussen 5 verschillende gebouwfuncties:

1. gezondheidszorg;
2. wonen (daaronder begrepen woningen, woongebouwen, woonwagens, logiesverblijven en logiesgebouwen);
3. kantoor en onderwijs;
4. bijeenkomst (zoals bioscopen, aula's schouwburgen, kerken);
5. kritische werkruimten (bepaalde ruimten in laboratoria, operatiekamers of studiezalen).

Voor de verschillende gebouwfuncties zijn verschillende grenswaarden gedefinieerd.

Type trillingsbron

1. *Continu voorkomende trillingen, gedurende lange tijd*, door bijvoorbeeld machines, waaronder ook machines die niet permanent in werking zijn of machines die een korte werkcyclus kennen en een langere rustperiode zoals het kort trillen van een vorm of mal. Uitgesloten zijn trillingen door weg- en railverkeer;
2. *Herhaald voorkomende trillingen, gedurende lange tijd* door weg- en railverkeer waaronder ook heftrucks bulldozers, kranen op rails en dergelijke;
3. *Continue of herhaald voorkomende trillingen gedurende een aaneengesloten tijdsduur, korter dan 3 maanden*, door bouw- of sloopwerkzaamheden;
4. *Incidenteel voorkomende, kortdurende trillingen*, door bijvoorbeeld explosies.

Omstandigheden

In de richtlijn wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende omstandigheden waaronder trillingen kunnen voorkomen. Bij verschillende omstandigheden worden ook verschillende trillingssterktes toegelaten. Er wordt in de richtlijn rekening gehouden met:

1. nieuwe, bestaande of gewijzigde situaties;
2. de locatie van de ontvanger in relatie tot de omgeving.
3. tijdstip en duur waarop de trillingen voorkomen

Bij weg- en railverkeer: nieuwe, bestaande of gewijzigde situatie

Voor weg- en railverkeer kan onderscheid worden gemaakt tussen de volgende situaties:

1. bestaande situatie (bestaande bron en een bestaande ontvanger, er is sprake van een zekere mate van gewenning);
2. nieuwe situatie (nieuwe bron of een nieuwe ontvanger);
3. gewijzigde situatie (wijziging van een bestaande *bron*).

Locatie van de ontvanger in relatie tot de omgeving

Voor gebouwen op een industrie terrein is het mogelijk op basis van een gemotiveerde afweging hogere trillingssterkten toe te laten. Dit kan bijvoorbeeld in de volgende situaties:

1. Als de sterkte van de achtergrondtrillingen al hoger is dan de streefwaarden, en de trillingssterkte van de te beoordelen trillingsbron lager is dan de achtergrondtrillingen;
2. Indien de gebouwen zich in een gebied bevinden waarvoor in het bestemmingsplan, een Nota Industrielawaai of Gemeentelijke Geluidnota is vastgelegd dat deze gebouwen een lagere bestemmingsgraad genieten.

Tijdstip en duur waarop trillingen voorkomen

Voor de aan te houden streefwaarden wordt onderscheid gemaakt in 3 beoordelingsperioden:

1. Dag van 07.00 tot 19.00 uur;
2. Avond van 19.00 tot 23.00 uur;
3. Nacht van 23.00 tot 07.00 uur.

Wanneer de trillingen gedurende een korte periode plaatsvinden, bijvoorbeeld tijdens sloopwerkzaamheden, kan in overleg met de omwonende hogere waarden worden toegelaten.

Toetsing

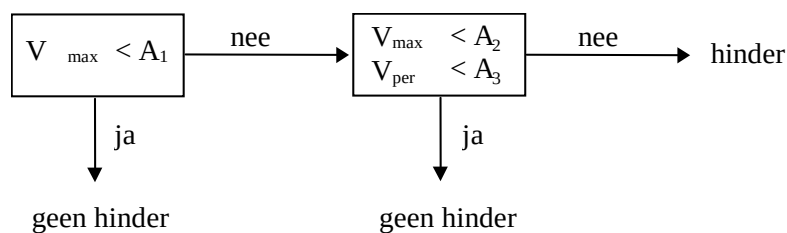
Bij een trillingsmeting t.a.v. hinder worden de volgende waarden gemeten:

- V_{max} maximale trillingssterkte
(voortschrijdende effectieve waarde van de trillingssnelheid, dimensieloos)
- V_{per} de trillingssterkte over de beoordelingsperiode
(kwadratisch gemiddelde van maximale effectieve waarde per interval van 30 seconden)

De waarden V_{max} en V_{per} worden getoetst aan de volgende streefwaarden:

- A_1 de onderste streefwaarde voor toetsing van de waarde $V_{eff,max}$;
 A_2 de bovenste streefwaarde voor toetsing van de waarde $V_{eff,max}$;
 A_3 de streefwaarde voor toetsing van de waarde V_{per} .

De streefwaarden worden volgens onderstaand schema geïnterpreteerd.



Streefwaarden

Hier volgen voor verschillende gebouwfuncties, omstandigheden en perioden de toetsingswaarden A_1 , A_2 en A_3 waaraan de waarden $V_{eff,max}$ en V_{per} worden getoetst.

Beoordeling continue trillingen bij nieuwe en bestaande situaties: machines en Herhaald voorkomende trillingen bij nieuwe situaties: weg- en railverkeer

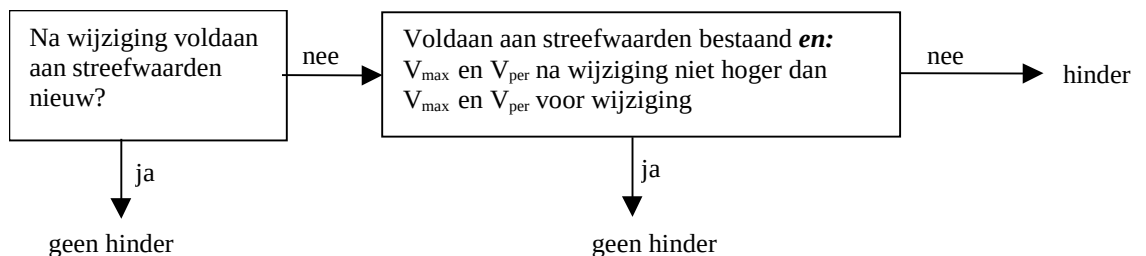
gebouwfunctie	dag en avond			nacht		
	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
1. Gezondheidszorg	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
2. Wonen	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
3. Kantoor	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
4. Bijeenkomsten	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
5. Kritische werkruimte	0.1	0.1	- - -	0.1	0.1	- - -

Beoordeling herhaald voorkomende trillingen bij bestaande situaties: weg-en railverkeer

gebouwfunctie	dag en avond			nacht		
	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
1. Gezondheidszorg	0.2	0.8	0.1	0.2	0.4	0.1
2. Wonen	0.2	0.8	0.1	0.2	0.4	0.1
3. Kantoor	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15
4. Bijeenkomsten	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15
5. Kritische werkruimte	0.1	0.1	- - -	0.1	0.1	- - -

Gewijzigde situaties, weg- en railverkeer

Bij een gewijzigde situatie wordt in eerste instantie getoetst aan de streefwaarden voor nieuwe situaties. Indien hieraan niet wordt voldaan mag er worden getoetst aan de streefwaarden voor bestaande situaties mits de trillingssterkte na de wijziging niet hoger is dan voor de wijziging. In onderstaand schema is geïllustreerd hoe de richtlijn werkt in het geval van een gewijzigde situatie.



Ondergronds railverkeer

Bij ondergronds railverkeer wordt er getoetst aan de streefwaarden voor weg- en railverkeer bij nieuwe situaties.

Trillingen bij bouw- of sloopwerkzaamheden over korte perioden gedurende de dagperiode

Bij trillingen over kortere perioden kunnen uitsluiten gedurende de dagperiode tijdelijk hogere waarden worden toegelaten. Hiervoor worden de volgende waarden aangehouden:

duur activiteiten	dag en avond		
	A ₁	A ₂	A ₃
1 dag	0.8	6.0	0.4
2 dagen	0.72	6.0	0.38
3 dagen	0.64	6.0	0.36
4 dagen	0.56	6.0	0.34
5 dagen	0.48	6.0	0.32
6-26 dagen	0.4	6.0	0.3
27-78 dagen	0.3	6.0	0.2

Gebouwen in industriële gebieden

Mits goed gemotiveerd kunnen voor gebouwen in industriële gebieden hogere waarden worden toegelaten. De waarden voor bestaande en nieuwe situaties kunnen dan worden vermenigvuldigd met een factor 1.8. De waarden van gebouwfunctie “kritische werkruimte” mag echter niet verhoogd worden.

Incidenteel voorkomende kortdurende trillingen in de dagperiode

Bij incidenteel voorkomende trillingen mag uitsluitend in de dagperiode de maximale trillingssterkte $V_{eff,max}$ niet meer dan 8 bedragen. Bewoners en gebruikers dienen te worden geïnformeerd. Bovendien moet er rekening worden gehouden met mogelijke schade aan bouwwerken.

Voorbeeld

Voor bijvoorbeeld een woning aan een spoorlijn wordt bij een nieuwe situatie op de volgende wijze getoetst:

gemeten V_{max} in woning:	gemiddeld aantal keer per uur	V_{per}	$A1^* = 0.1$ $V_{max} < A_1$	$A2^* = 0.4$ $V_{max} < A_2$	$A3^* = 0.05$ $V_{per} < A_3$	overschrijding
0.08	10	0	ja	n.v.t.	n.v.t.	nee
0.15	10	0.043	nee	ja	ja	nee
0.2	10	0.058	nee	ja	nee	Ja
0.5	10	0.144	nee	nee	n.v.t.	ja

BTS (Beleidsregel Trillingshinder Spoor)

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. De thans vigerende BTS is op 24 maart 2014 in de Staatscourant gepubliceerd. Deze beleidsregel is gebruikt voor het onderzoek uit dit rapport. De belangrijkste wijzigingen ten opzichte van de eerdere BTS komen tot uiting in:

- Een nadere invulling van het doelmatigheidscriterium, gebaseerd op een MKBA⁵, 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 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 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.

⁵ MKBA = Maatschappelijke Kosten Baten Analyse

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 I-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 I-1 Normstelling bestaande situatie volgens BTS

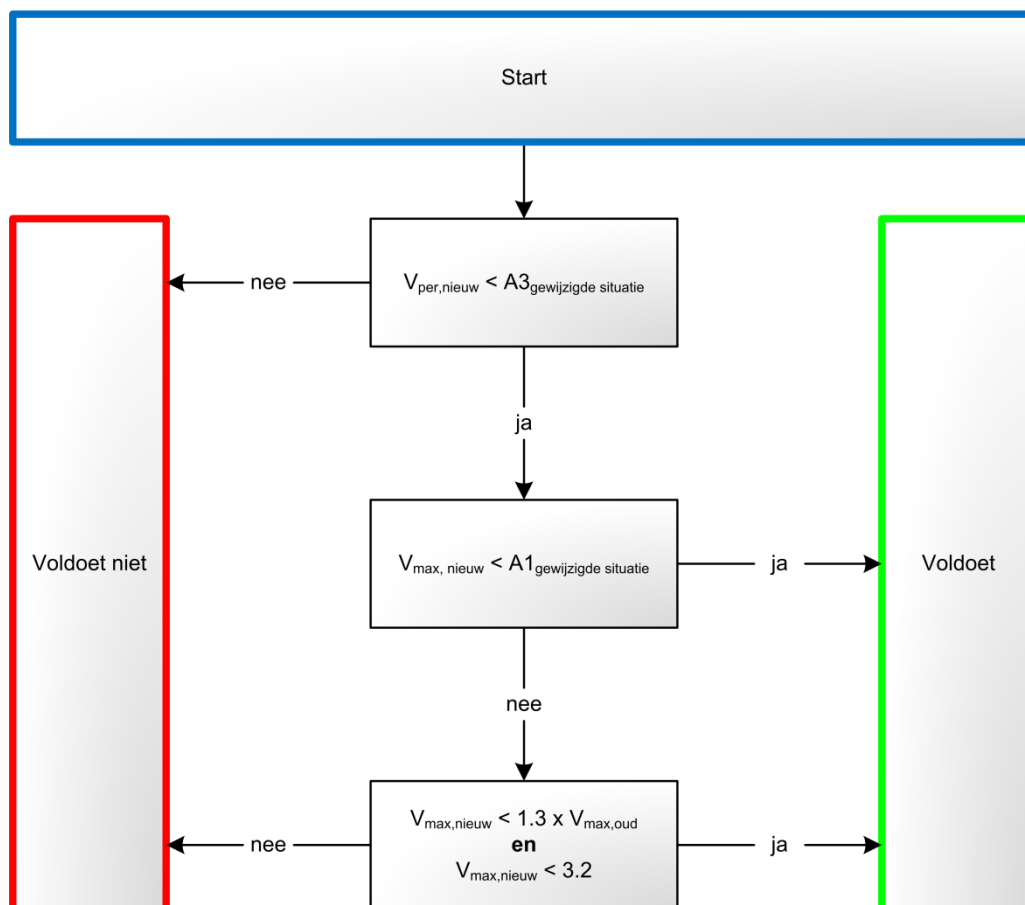
Gebouwfunctie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Gezondheidszorg en wonen	0.2	0.8	0.1	0.2	0.4	0.1
Onderwijs, kantoor en bijeenkomsten	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15
Kritische ruimte	0.1	0.1	---	0.1	0.1	---

Beoordeling van trillingssituatie

Voor het beoordelen of een bepaalde locatie voldoet aan de BTS voor bestaande situaties moet het schema in Figuur I-1 worden doorlopen.

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 I-1 Stroomschema interpretatie toetsingswaarden A1 en A3 voor gewijzigde situaties (BTS)

Beoordeling in huidige onderzoek

In het onderzoek naar trillingshinder tijdens de exploitatiefase wordt op de BTS en SBR-B richtlijn beoordeeld.

Bijlage II 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:

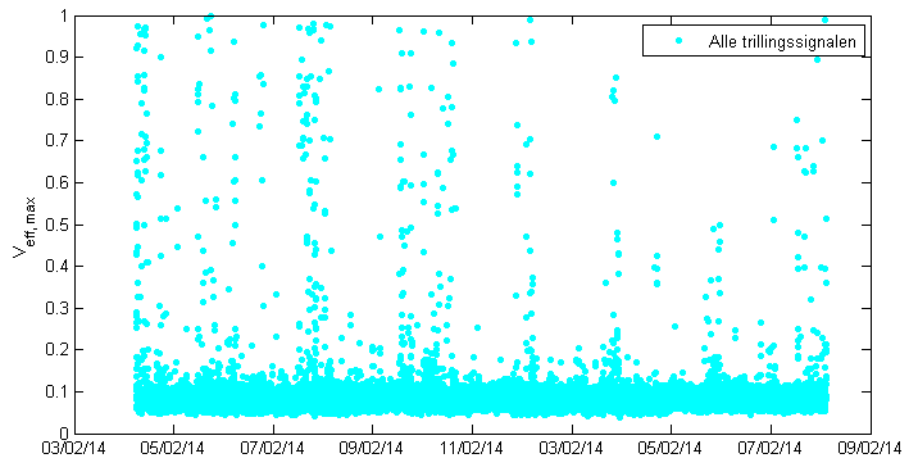
1. Stap 1: met behulp van videobeelden zijn de treinen gemarkeerd.
2. Stap 2: bij de meting wordt gebruik gemaakt van meerdere sensoren. Met behulp van spectraalanalyse⁶ worden de trillingssignalen van beide sensoren op elkaar te delen kunnen lokale fenomenen (bijvoorbeeld voetstappen in de ene ruimte) 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 IV zijn deze trillingsbronnen eveneens weergegeven.

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

⁶ 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 willekeurig voorbeeld uit een meting van Movares van een dergelijk resultaat is weergegeven in Figuur II-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 II-1 Willekeurig voorbeeld meetdata, $V_{eff,max}$ per 30 seconden

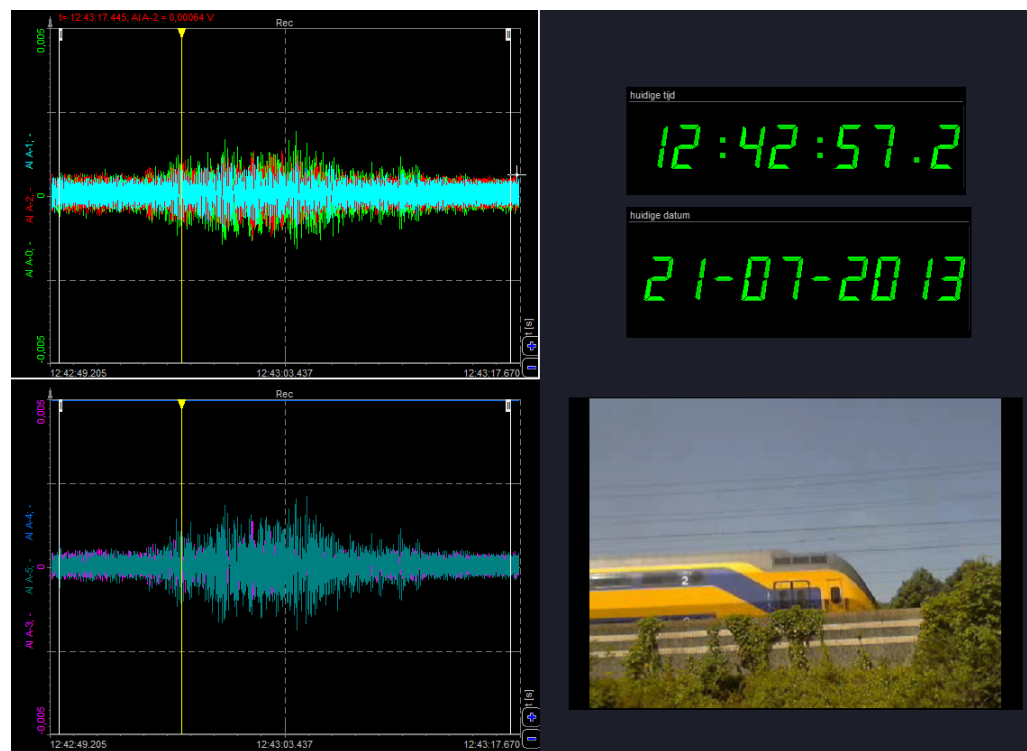
Stap 1 – Toekennen van treinpassages aan 30-seconde periodes

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. Met behulp van de videobeelden worden de gepasseerde treinen meegenomen in de analyse.

Een voorbeeld wordt hieronder toegelicht.

Voorbeeldsituatie

Op de meetlocaties vindt aanvullend geautomatiseerde verificatie plaats op basis van beeldverwerking van de videobeelden, zie Figuur II-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.

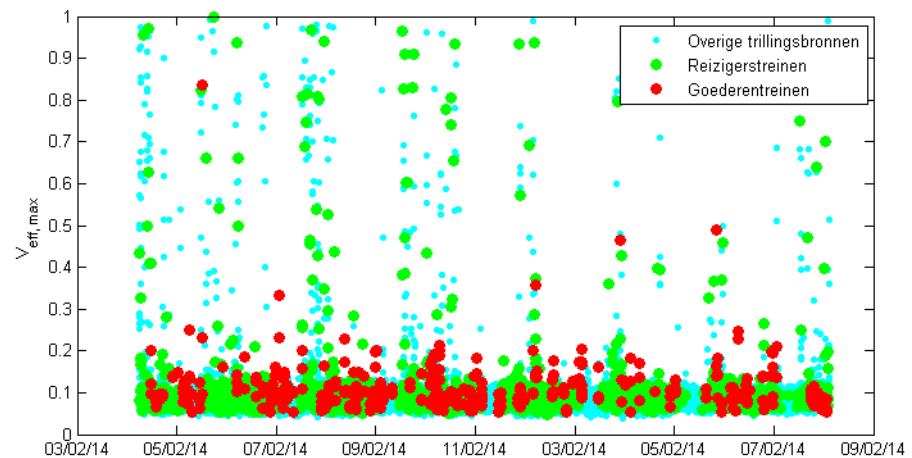


Figuur II-3 Videobeelden en trillingssignalen

Op deze manier wordt gegarandeerd dat alle gepasseerde treinen ook daadwerkelijk worden gemarkeerd als zijnde een trein.

Het resultaat van deze stap is weergegeven in Figuur II-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

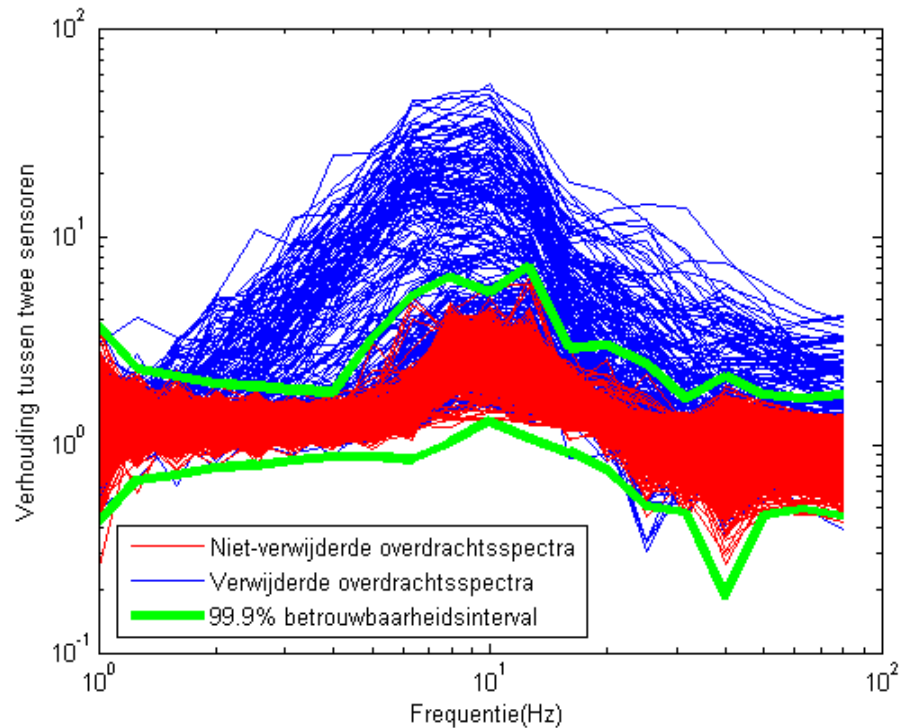
verwijderen.



Figuur II-4 Meetdata met gemarkeerde treinpassages

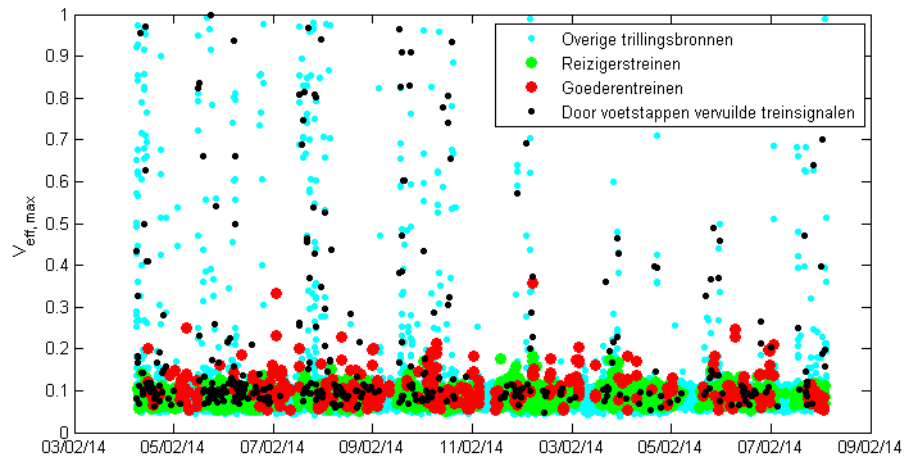
Stap 2 – Uitfilteren van interne verstoringen, zoals voetstappen

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 II-5. De selectiecriteria worden vastgesteld op basis van de spreiding in overdrachten en geverifieerd in de videobeelden.



Figuur II-5 Spectraalanalyse in stap 2

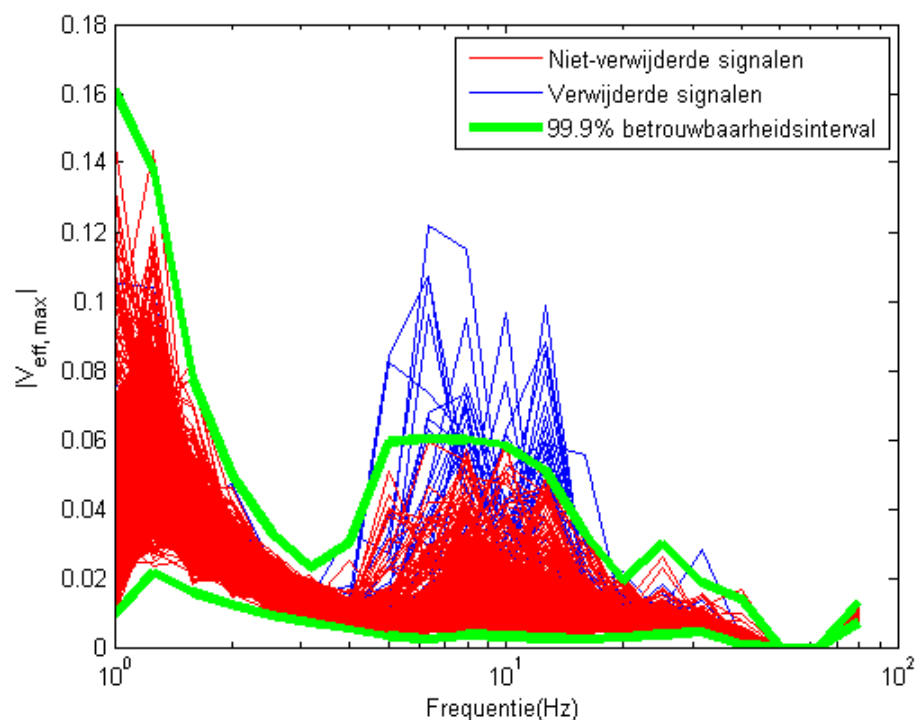
Het resultaat van deze stap is weergegeven in Figuur II-6.



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

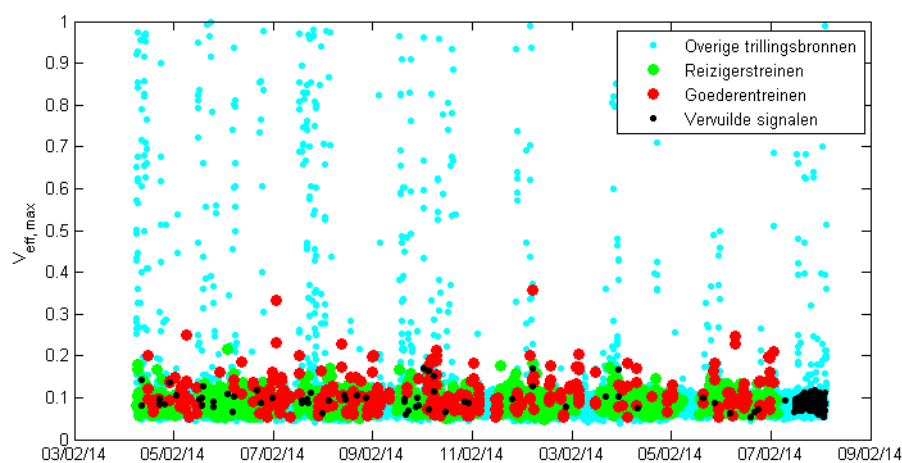
Stap 3 – Uitfilteren van externe verstoringen

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 II-7. De selectiecriteria worden vastgesteld op basis van de spreiding in signalen en geverifieerd met behulp van de videobeelden.



Figuur II-7 Spectraalanalyse in stap 3

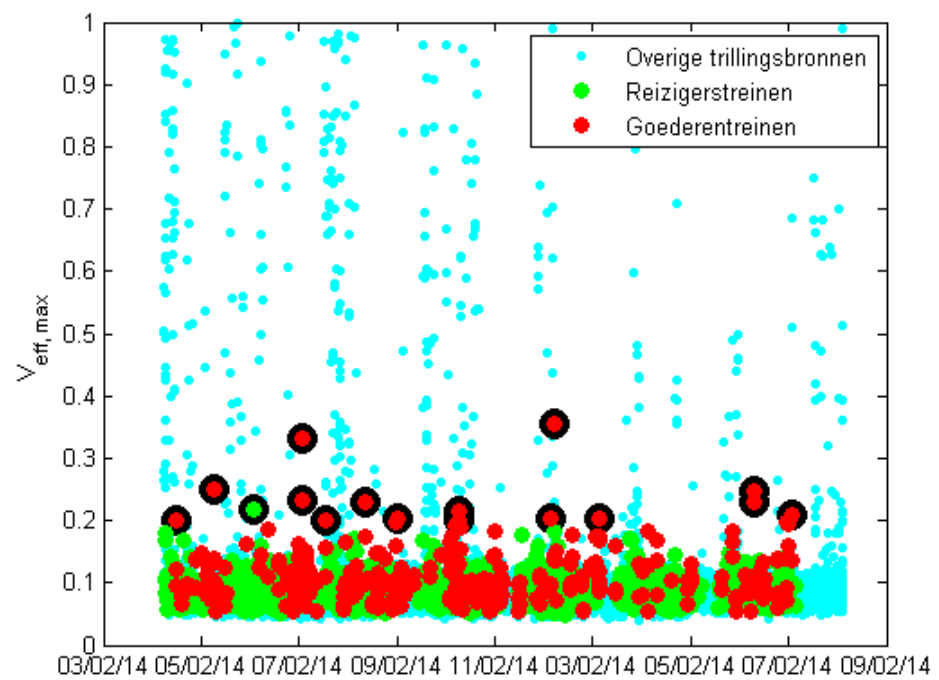
Het resultaat van deze stap is weergegeven in Figuur II-8.



Figuur II-8 Meetdata met gemarkeerde treinpassages en externe trillingsbronnen

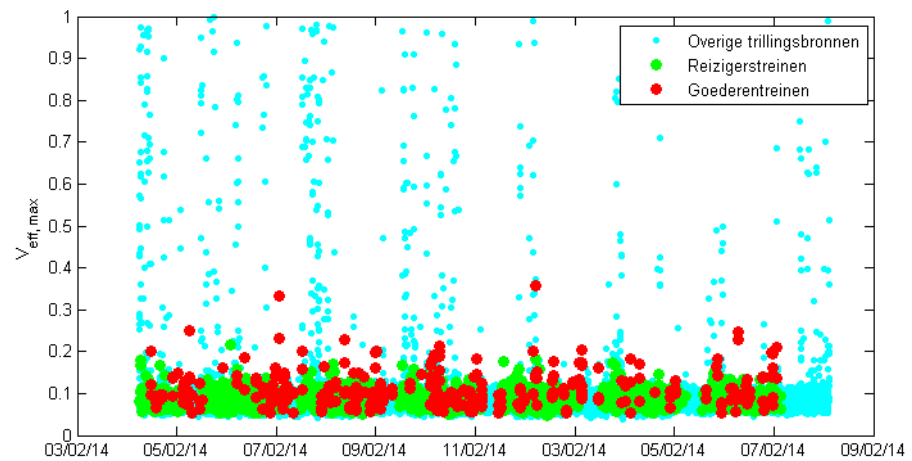
Stap 4 – Controle van hoogste waarden

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 II-9.



Figuur II-9 *Te controleren treinsignalen in stap 4*

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



Figuur II-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

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

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 dag, 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 dag.

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:

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

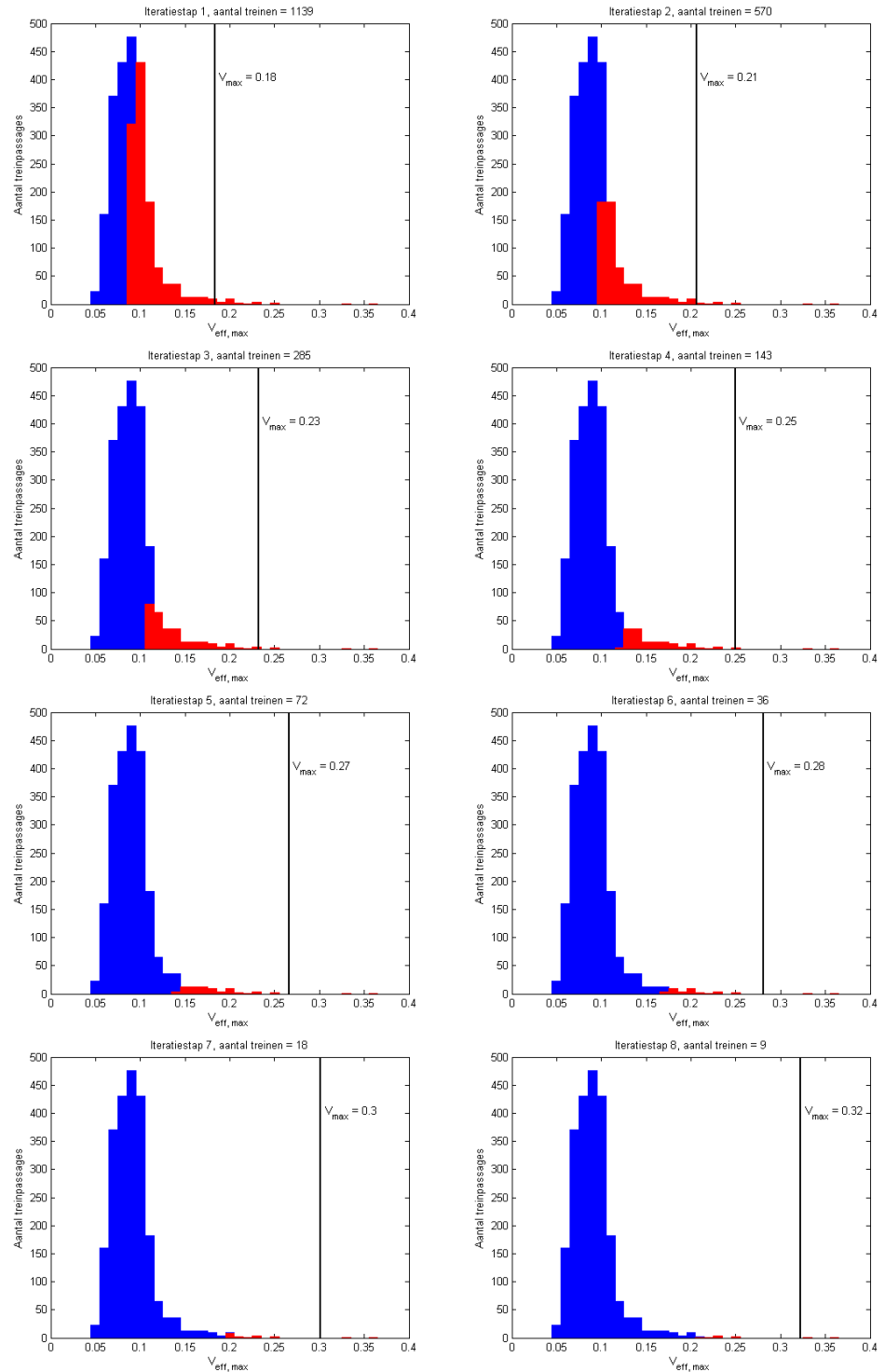
Hierbij wordt de $V_{max, BTS}$ zonder eventuele correctiefactor gebruikt. De onzekerheid in de toename Q wordt bepaald volgens de formule:

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

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 II-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 II-1.



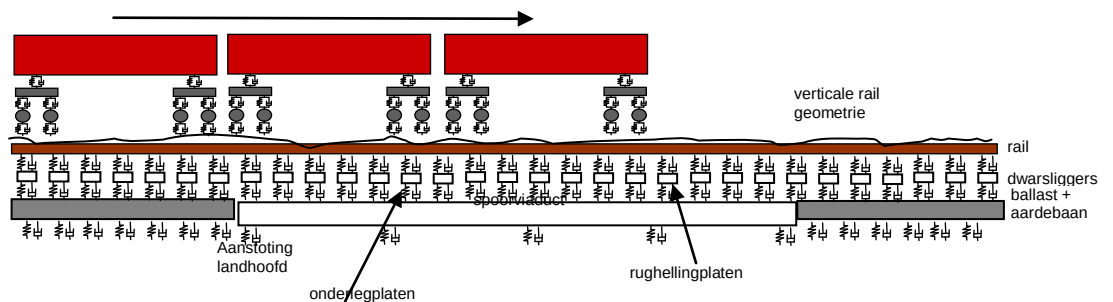
Figuur II-11 Resultaten voor de acht iteratiestappen

Tabel II-1 *Resultaten van de acht iteratiestappen*

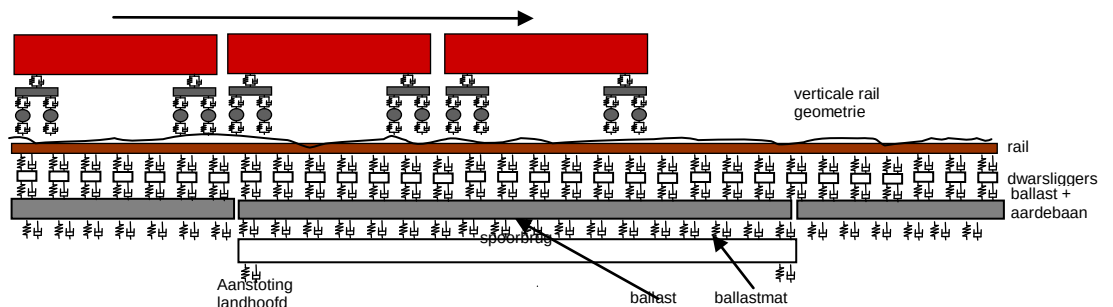
Iteratiestap	$V_{\max, \text{BTS}}$	R	topX%	#topX%	σ	μ	β
1	0.18	2.44	50	1139	0.177	-2.25	3.14
2	0.21	3.51	25.0	570	0.191	-2.14	2.93
3	0.23	4.94	12.5	285	0.203	-2.02	2.72
4	0.25	6.09	6.28	143	0.192	-1.87	2.49
5	0.27	7.31	3.16	72	0.178	-1.73	2.25
6	0.28	8.62	1.58	36	0.165	-1.60	1.99
7	0.30	11.2	0.79	18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

Bijlage III Beschrijving spoormodel

Om het dynamisch gedrag te kunnen analyseren van een trein die met een bepaalde snelheid over een spoorbaan rijdt, is door Movares het simulatieprogramma *Spoormodel* ontwikkeld. Het programma is geschreven in Pascal en gebaseerd op een tweedimensionaal model van een trein, de spoorconstructie en het baanlichaam. Schematische weergaven van de modellen voor de bestaande situatie en de plansituatie is te zien in Figuur III-1 en Figuur III-2.



Figuur III-1 Schematische weergave spoormodel huidige spoorviaduct



Figuur III-2 Schematische weergave spoormodel toekomstige spoorbrug

Met *Spoormodel* kunnen verschillende aspecten van het dynamisch gedrag worden onderzocht. Aan de hand van een aantal parameters zoals de rijdsnelheid van de tram of de grootte van spooronregelmatigheden berekent *Spoormodel* de belastingen, verplaatsingen, snelheden en versnellingen van de verschillende delen van de trein en de spoorbaan in voor de *verticale richting*.

Toepassingsgebied

Het doel van *Spoormodel* is het analyseren van het dynamisch gedrag van een rijdende trein en een spoorbaan ten behoeve van onderzoek naar trillingen in de omgeving van de spoorbaan of de bepaling van de dynamische eigenschappen van spoorconstructies en baanlichamen.

Spoormodel berekent de verplaatsingen, snelheden, versnellingen en belastingen van het baanlichaam, de spoorconstructie en de verschillende delen van de trein als functie van de tijd, uitsluitend voor de verticale richting. De verschillende mogelijkheden van het programma worden hieronder nader toegelicht.

Type trein

Spoormodel kan berekeningen uitvoeren voor een groot aantal verschillende typen treinen, variërend van een Thalys tot een tram. De trein of tram kan naar believen worden samengesteld uit verschillende soorten rijtuigen, wagons en locomotieven. De trein kan op twee manieren worden gemodelleerd:

1. middels een bewegend aslasten stelsel;
2. middels een massa – veersysteem.

Ad 1:

De trein wordt gemodelleerd middels een bewegend aslasten stelsel bij berekeningen die dienen ter controle van simulaties van het dynamisch gedrag van spoorconstructies of baanlichamen met eindige elementen programma's als ANSYS of LS-DYNA. Bij dergelijke simulaties wordt de trein eveneens gemodelleerd middels een bewegend aslasten stelsel. Naast de belasting door een aslasten stelsel heeft Spoormodel nog de mogelijkheid het spoor te belasten met een statische last, een pulslast of een harmonisch variërende last.

Ad 2:

De trein wordt gemodelleerd middels een massa - veer systeem als het dynamisch gedrag van de trein en de interactie tussen de trein het spoorbaan bepalend zijn voor de dynamische belasting van het spoor. Dit kan het geval zijn indien er sprake is van grote onregelmatigheden in het contact tussen de trein en het spoor door een onregelmatige ligging van het spoor of door slijtage van de spoorstaven en treinwielen. Spoormodel heeft de mogelijkheid om berekeningen uit te voeren waarbij de wielen van de trein door slijtage niet geheel rond zijn.

Spoorconstructie

Spoormodel kan worden toegepast bij de ontwikkeling van nieuwe spoorconstructies. Globaal gezien kunnen twee soorten spoorconstructies worden gemodelleerd:

1. spoorconstructies voor discreet ondersteund spoor;
2. spoorconstructies voor continu ondersteund spoor.

Afhankelijk van het toepassingsgebied van de spoorconstructie en de condities waaronder de spoorconstructie wordt bereden, kan worden onderzocht wat invloed van de verschillende constructieparameters is op de grootte van de contactkrachten tussen de trein en het spoor. Om de gevolgen van onregelmatigheden in de ligging van het spoor of verschijnselen als golfslijtage te kunnen onderzoeken, kan op de bovenzijde van het spoor een reliëf met een bepaald verloop worden aangebracht. Op deze manier kan worden bepaald tot welke snelheden een spoorconstructie nog veilig kan worden bereden. Daarnaast kan door variatie van constructieparameters het dynamisch gedrag van spoorconstructie worden geoptimaliseerd met betrekking tot de levensduur.

Baanlichaam

Het baanlichaam kan worden opgebouwd uit meerdere lagen, waarbij aan elke laag andere mechanische eigenschappen worden toegekend. Dit maakt het mogelijk om zeer uiteenlopende baanconcepten te onderzoeken. Naast traditioneel ballastspoor kunnen ook baanconcepten als bijvoorbeeld Deck Track worden gemodelleerd. Door de opbouw van het baanlichaam uit verschillende lagen is het tevens mogelijk om een deel van de ondergrond van de baan te modelleren. Dit kan bijvoorbeeld van belang zijn indien de mechanische eigenschappen van de ondergrond bij hoge rijksnelheden van de trein aanleiding kunnen geven tot boeggolfproblemen.

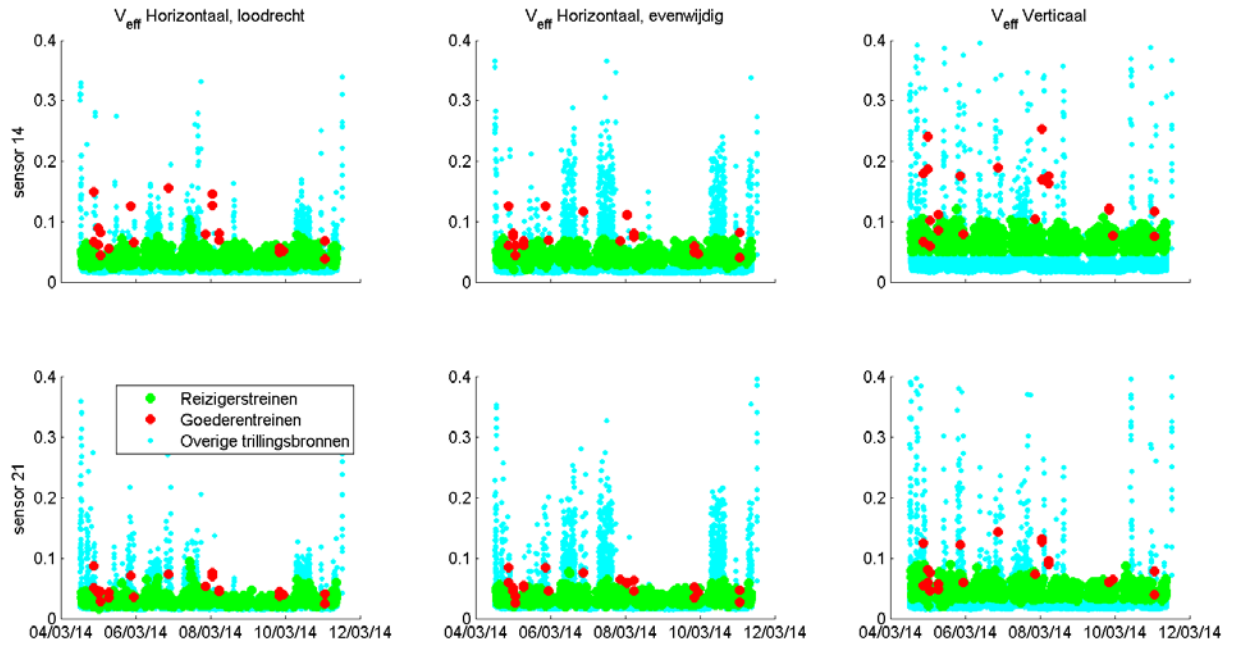
Beperkingen

Doordat Spoormodel werkt op basis van een twee dimensionaal model van de trein en de spoorbaan, worden de verplaatsingen, snelheden en versnellingen alleen voor de verticale richting berekend. Het is dus niet mogelijk om bewegingen om de lengte as en in de richting loodrecht op het spoor te simuleren.

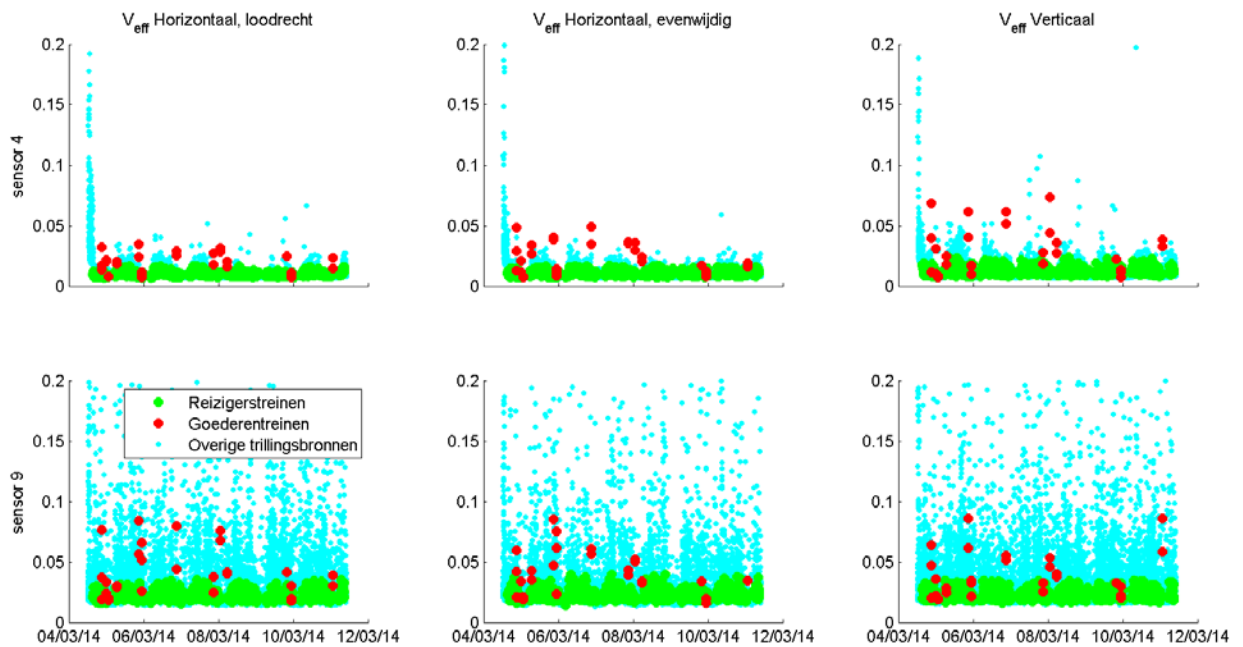
Validatie

Spoormodel is 15 jaar in gebruik bij Movares, en gedurende die periode regelmatig ingezet voor uiteenlopende projecten. De resultaten die met behulp van Spoormodel zijn verkregen zijn regelmatig vergeleken met meetresultaten en daar waar nodig is het model getuned.

Bijlage IV Gemeten trillingen



Figuur IV-1 Gemeten trillingen De Goog 4



Figuur IV-2 Gemeten trillingen Hakkelaarsbrug 6