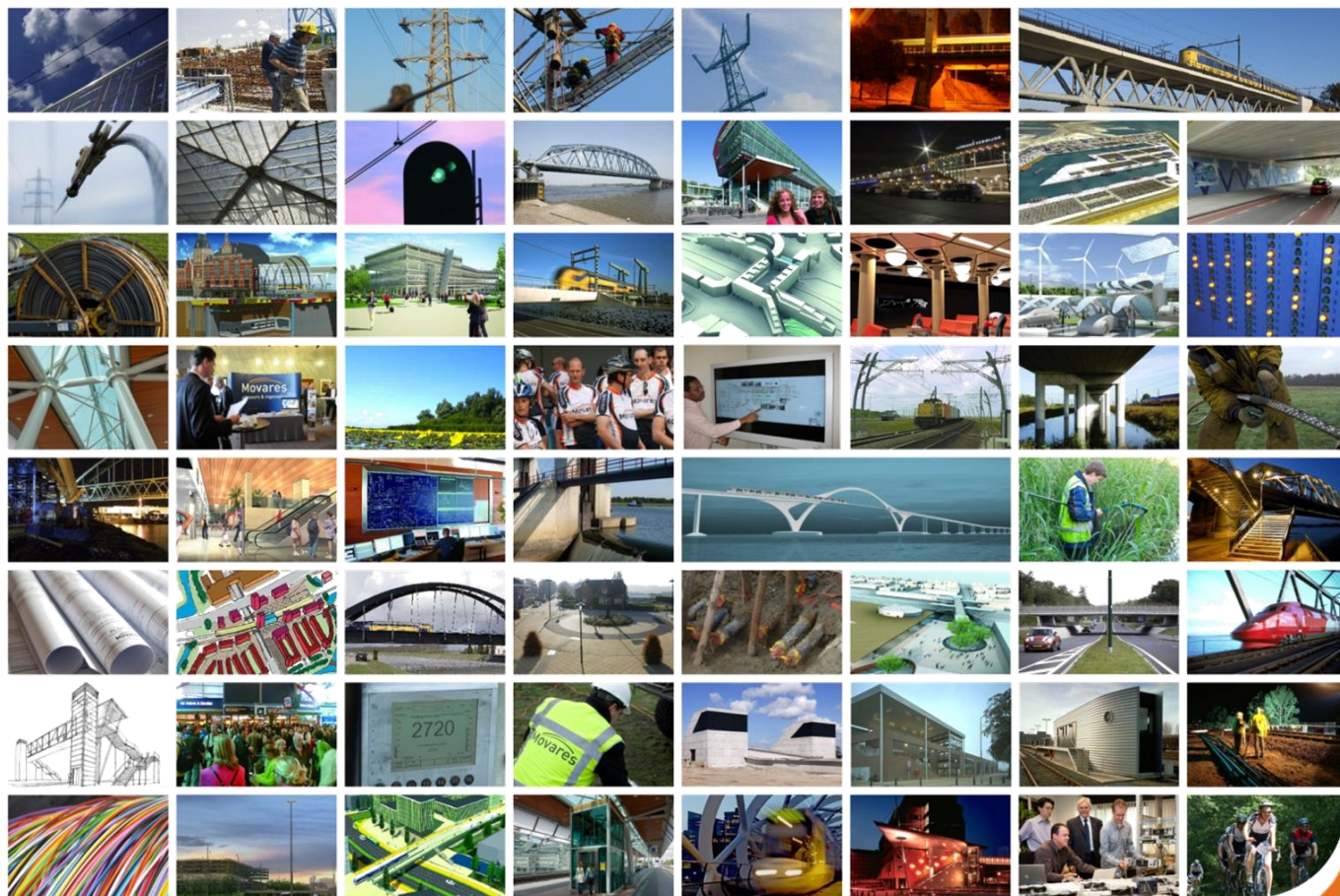




D79-GBA-KA-1700011

1 maart 2018- Versie 2.0

Autorisatieblad

Bestemmingsplan onderdoorgang Contactweg

Onderzoek trillingen

	Naam	Akkoord	Datum
Opgesteld door	Bastiaens, G	✓	1-03-2018
Gecontroleerd door	Boon, PM	✓	1-03-2018
Vrijgegeven door	Poel, J van der	✓	1-03-2018

Op dit autorisatieblad ontbreken de handtekeningen wegens de digitale verwerking van ons vrijgaveproces. Dit rapport is aantoonbaar vrijgegeven.

Versie historie

Versie	Naam	Datum	Korte toelichting
1.0	Bastiaens, G	30-11-2017	Eerste versie
2.0	Bastiaens, G	01-03-2018	Reviewcommentaar verwerkt, prognose trillingsschade onderdoorgang Contactweg toegevoegd

Samenvatting

De verkeersafwikkeling bij de overweg Kabelweg is momenteel verre van optimaal en veroorzaakt onder andere filevorming op de A10. Uit verkeersonderzoek blijkt dat dit knelpunt bij meer treinverkeer in kader van PHS vanaf 2020 verder zal toenemen met een nog grotere terugslag op de op- en afritten van de A10 en het onderliggende wegennet. De komende decennia speelt daarbij ook de ontwikkeling van Sloterdijk I en Haven-Stad in het gebied ten oosten en westen van de A10. Een onderdoorgang bij de Contacweg biedt een robuuste en toekomstvast oplossing voor deze doorstromingsproblematiek op het onderliggende wegen- en fietsnetwerk, de A10 en de Coentunnel. De aanleg van een derde spoor zorgt er daarnaast voor dat het emplacement Westhaven bereikbaar blijft. Het derde spoor wordt gerealiseerd tussen de kruising met de A10 en de Transformatorweg aansluiting (over een lengte van ongeveer 740 meter) waarmee invulling gegeven wordt aan de gevraagde functionaliteiten van een aan te leggen opstel terrein voor reizigerstreinen in de nabijheid van het reeds aanwezige goederenemplacement.

Doel van dit onderzoek is om ten behoeve van het bestemmingsplan vast te stellen of er sprake is van een toename van de trillingen tijdens de exploitatie- en bouwphase, en of dat leidt tot schade of hinder aan gebouwen, apparatuur of personen. Wanneer dat het geval is, worden maatregelen afgewogen om de (toename in) hinder te mitigeren.

Uit het onderzoek naar trillingshinder volgt dat:

- De V_{max} neemt beperkt toe door een lichte toename van de rijnsnelheid van goederentreinen en het dichterbij gelegen derde spoor.
- De V_{per} verandert niet significant door het in gebruik nemen van de sporen door reizigerstreinen.
- Er zijn geen overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder, de Bts. Het project leidt niet tot voelbare toenames in trillingshinder, en de trillingssterkte V_{max} en trillingsintensiteit V_{per} blijven onder de grenswaarden.

Het is daarom niet noodzakelijk om mitigerende maatregelen voor trillingshinder te overwegen voor dit project.

Uit het onderzoek naar trillingsschade volgt dat er bij een aantal gebouwen kans op schade is voor de gebruikte uitgangspunten. Daarom wordt geadviseerd zodra de detaillering is afgerond gedetailleerde schadeprognoses met behulp van 3D eindige elementenmodellen te maken. Als vervolgens blijkt dat er nog steeds gebouwen zijn met kans op schade, kan er gekozen worden voor trillingsarme bouwmethodes of het monitoren van de trillingen tijdens de bouw.

Verder is in het onderzoek gekeken naar verstoring van trillingsgevoelige apparatuur. Op dit moment is er geen sprake van bedrijven met gevoelige apparatuur in het onderzoeksgebied. De trillingen wijzigen slechts beperkt door de voorgenomen wijzigingen binnen dit bestemmingsplan, zodat eventuele toekomstige vestiging van bedrijven met gevoelige apparatuur door deze bestemmingsplanwijziging niet minder mogelijk wordt gemaakt.

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.
Huidige situatie	Huidige situatie. In dit onderzoek wordt als jaartal 2018 gehanteerd, de meest recente nalevingsgegevens zijn namelijk afkomstig van dit jaartal.
Referentiesituatie	Huidige situatie plus autonome ontwikkelingen tot het jaar 2030
Plansituatie	Situatie die ontstaat na realisatie van het project, in het planjaar 2030.
VibraDyna	Een door Movares ontwikkeld trillingsmodel dat de trillingen van weg- en railverkeer berekent. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van versie 1.8. Dit model is in het verleden al uitvoerig geverifieerd, zie ook Bijlage I.
$V_{\max}$	Maximaal optredende trillingssterkte gedurende de meetperiode, bepaald conform de Bts. De trillingssterkte neemt niet toe bij een groter aantal treinen.
V_{per}	Trillingsintensiteit gedurende de dagperiode (7:00 tot 19:00), avondperiode (19:00 tot 23:00) of nachtperiode (23:00 tot 7:00). De trillingsintensiteit is te vergelijken met het tijdsgemiddelde van de trillingen, waarbij hoge trillingssterktes zwaarder meetellen dan lagere trillingssterktes. De trillingsintensiteit neemt toe bij een groter aantal treinen.
Q	Verhouding tussen de trillingssterkte in de plansituatie en de referentiesituatie.

Inhoudsopgave

Samenvatting	1
Begrippenlijst	2
1 Inleiding	5
1.1 Achtergrond van dit rapport	5
1.2 Doel van het onderzoek	5
1.3 Toegepaste kaders en uitgangspunten	5
1.4 Leeswijzer	5
2 Situatiebeschrijving	6
2.1 Studiegebied	6
2.2 Huidige situatie	6
2.2.1. <i>Treinsnelheden</i>	7
2.3 Plansituatie (na realisatie project)	7
2.3.1. <i>Uitgangspunten</i>	7
2.3.2. <i>Terreingeometrie</i>	7
2.3.3. <i>Treinsnelheden</i>	8
2.3.4. <i>Treinintensiteit</i>	8
2.3.5. <i>Wijzigingen in bebouwing</i>	8
2.3.6. <i>Cumulatie met overige trillingsbronnen</i>	9
3 Onderzoeksopzet	10
3.1 Onderzoek naar trillingsschade	10
3.2 Onderzoek naar trillingshinder	10
3.3 Onderzoek naar verstoring van apparatuur	11
4 Beoordelingskader trillingen	12
4.1 Beoordeling trillingshinder	12
4.2 Beoordeling trillingsschade	13
5 Trillingshinder	14
5.1 Inleiding	14
5.2 Resultaten berekeningen	14
5.2.1. <i>Resultaten huidige situatie</i>	14
5.2.2. <i>Resultaten plansituatie</i>	15
5.3 Vergelijking trillingscontouren	16
5.4 Aandachtlocaties	17
6 Trillingsschade	18
6.1 Inleiding	18
6.2 Uitgangspunten	18
6.3 Modelleren	18
6.4 Resultaten	19
7 Verstoring van gevoelige apparatuur	21
8 Conclusies en aanbevelingen	22

Bijlage I	VibraDyna
Bijlage II	Beoordelingskader
Bijlage III	Wijzigingen in sporenlay-out
Bijlage IV	Resultaten bodemonderzoek en maaiveldmetingen
Bijlage V	Naverwerkingsprocedure Vmax
Bijlage VI	Resultaten trillingsonderzoek

1 Inleiding

1.1 Achtergrond van dit rapport

De verkeersafwikkeling bij de overweg Kabelweg is momenteel verre van optimaal en veroorzaakt onder andere filevorming op de A10. Uit verkeersonderzoek blijkt dat dit knelpunt bij meer treinverkeer in kader van PHS vanaf 2020 verder zal toenemen met een nog grotere terugslag op de op- en afritten van de A10 en het onderliggende wegennet. De komende decennia speelt daarbij ook de ontwikkeling van Sloterdijk I en Haven-Stad in het gebied ten oosten en westen van de A10. Een onderdoorgang bij de Contacweg biedt een robuuste en toekomstvaste oplossing voor deze doorstromingsproblematiek op het onderliggende wegen- en fietsnetwerk, de A10 en de Coentunnel. De aanleg van een derde spoor zorgt er daarnaast voor dat het emplacement Westhaven bereikbaar blijft. Het derde spoor wordt gerealiseerd tussen de kruising met de A10 en de Transformatorweg aansluiting (over een lengte van ongeveer 740 meter) waarmee invulling gegeven wordt aan de gevraagde functionaliteiten van een aan te leggen opstelterrein voor reizigerstreinen in de nabijheid van het reeds aanwezige goederenemplacement.

1.2 Doel van het onderzoek

Doel van dit onderzoek is om ten behoeve van het bestemmingsplan vast te stellen of er sprake is van een toename van de trillingen tijdens de exploitatie- en bouwphase, en of dat leidt tot schade of hinder aan gebouwen, apparatuur of personen. Wanneer dat het geval is, worden maatregelen afgewogen om de (toename in) hinder te mitigeren.

1.3 Toegepaste kaders en uitgangspunten

De SBR-richtlijn (deel A – trillingsschade aan gebouwen en deel C – verstoring van gevoelige apparatuur) vormen samen met de Bts (trillingshinder) het beoordelingskader in dit onderzoek. De gemeente Amsterdam heeft zelf geen aanvullende kaders voor trillingen.

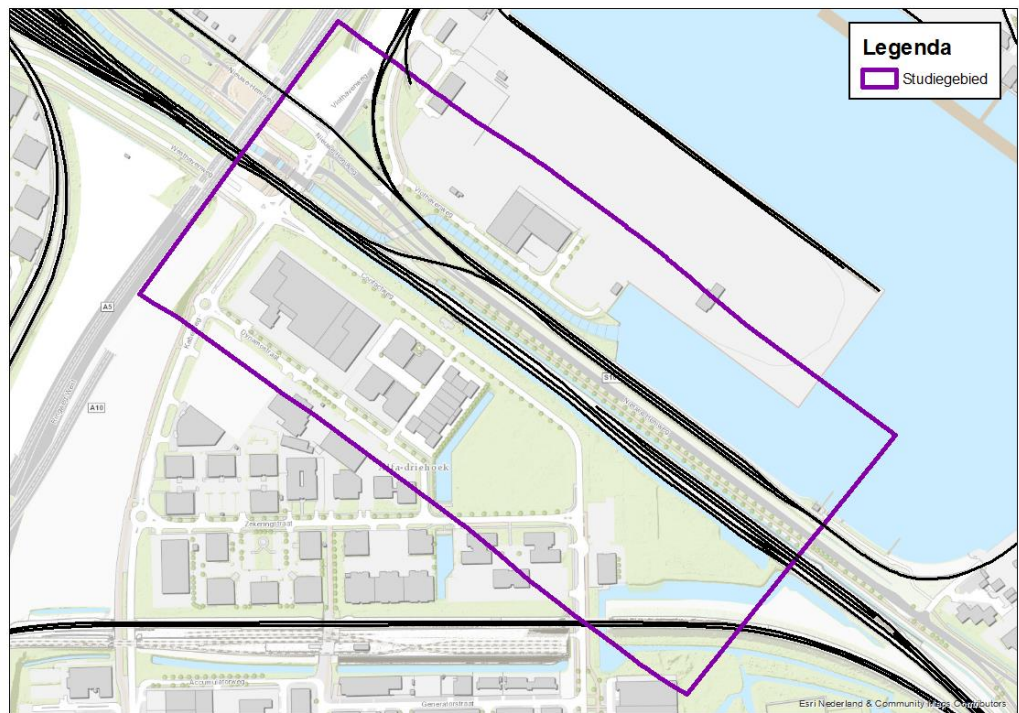
1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is een situatiebeschrijving opgenomen, hoofdstuk 3 bevat een beschrijving van de onderzoeksaanpak, hoofdstuk 4 het beoordelingskader, hoofdstuk 5 de beoordeling van trillingshinder, hoofdstuk 6 schade ten gevolge van bouwwerkzaamheden en hoofdstuk 7 de conclusie.

2 Situatiebeschrijving

2.1 Studiegebied

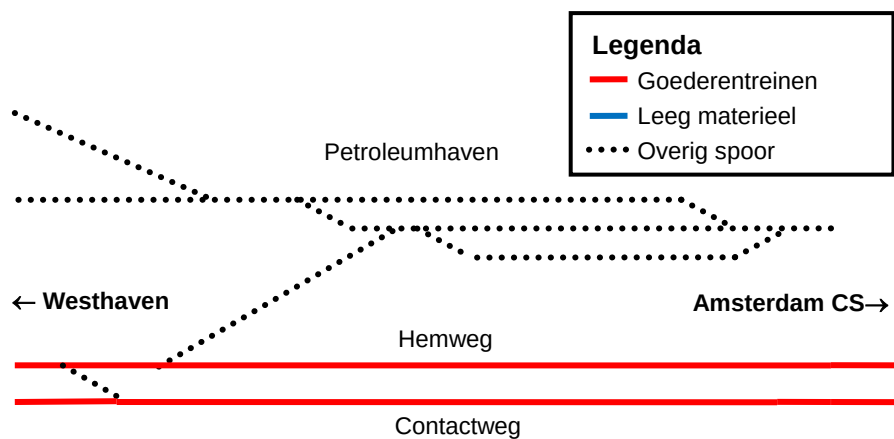
Het tracédeel waarop dit trillingsonderzoek betrekking heeft, is het gebied tussen de aftakking van het nieuw aan te leggen derde spoor en de kruising met de snelweg A10. Het voor dit onderzoek gehanteerde studiegebied is weergegeven in Figuur 2-1.



Figuur 2-1 Studiegebied trillingsonderzoek

2.2 Huidige situatie

In deze paragraaf is een beschrijving van de huidige situatie opgenomen. De gegevens van het treinverkeer zijn gebaseerd op gegevens uit 2017, deze gegevens zijn ook representatief voor 2018. Voor de overige gegevens is 2018 als referentiejaar gehanteerd. In deze situatie is het project nog niet gerealiseerd. Het spoorgebruik in de huidige situatie is weergegeven in Figuur 2-2.



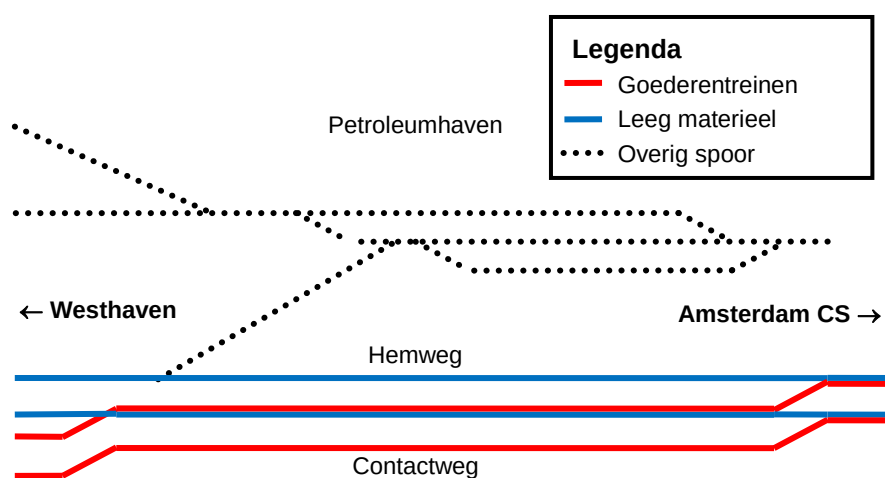
Figuur 2-2 Lijnvoeringsschema in huidige situatie

2.2.1. Treinsnelheden

In de huidige situatie rijden over het beschouwde tracé alleen maar goederentreinen van en naar het opstelterrein Westhaven. Deze goederentreinen rijden hier maximaal 40 km/h in de huidige situatie (maximale snelheid o.b.v. seinplaatsing). De gebruikte snelheidsprofielen zijn gebaseerd op de seinposities. De in dit onderzoek gehanteerde maximale snelheden van reizigers- en goederentreinen zijn weergegeven in Figuur 2-4.

2.3 Plansituatie (na realisatie project)

Deze paragraaf bevat een beschrijving van de plansituatie die ontstaat na realisatie van het project. De belangrijkste wijzigingen zijn de bouw van een extra spoor en wissels en veranderingen in spoorgebruik. Verder maakt het bestemmingsplan de realisatie van een onderdoorgang mogelijk. Het spoorgebruik in de plansituatie is weergegeven in Figuur 2-3. Te zien is dat er een derde spoor met bijbehorende wissels bijkomt.



Figuur 2-3 Lijnvoeringsschema in plansituatie

2.3.1. Uitgangspunten

Voor de plansituatie is in het trillingsonderzoek gebruik gemaakt van de tekeningen *Verkeersontwerp: onderdoorgang Kabelweg*¹. Ten opzichte van de referentiesituatie zijn in de plansituatie de volgende zaken gewijzigd:

1. Sporenlay-out (en samenhangend ook het spoorgebruik). Het project voorziet in de aanleg van een derde spoor en extra wissels in het projectgebied. Hierdoor komen de goederentreinen dicht bij de bebouwing ten westen van het spoor. Om dit mogelijk te maken worden twee bestaande opstellen gesloopt.
2. Bouw van de onderdoorgang Contactweg.
3. Lichte toename van de maximale rijdsnelheid van goederentreinen.
4. Wijziging in het aantal goederentreinen.
5. In gebruik name van het opstelterrein Westhaven voor reizigerstreinen, waardoor het spoor door reizigerstreinen bereden gaat worden. Dit opstelterrein wordt gerealiseerd naast het bestaande goederenopstelterrein.

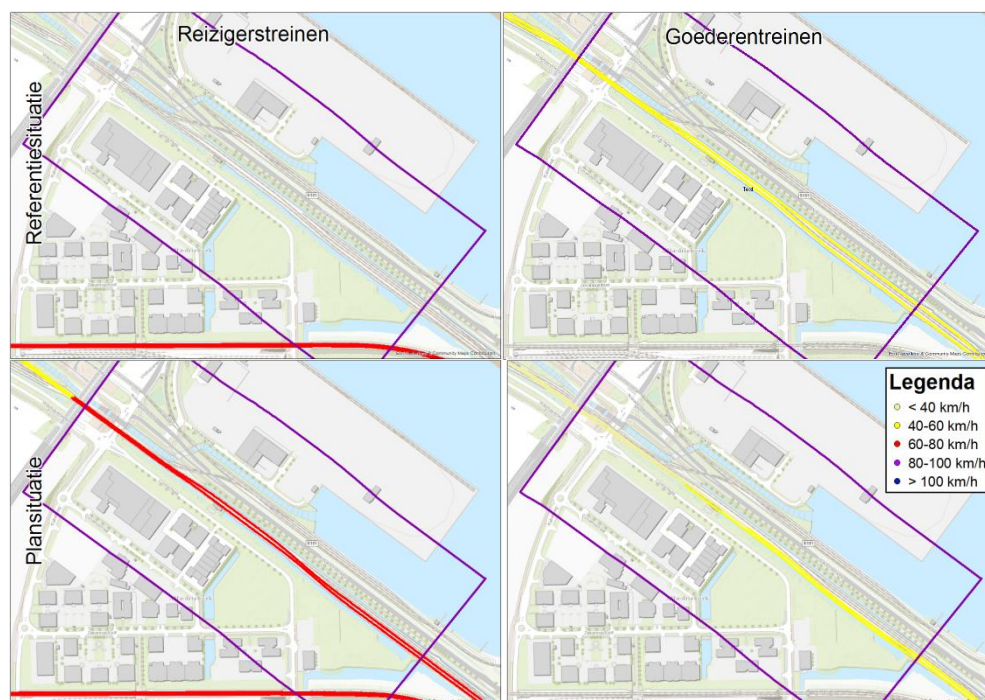
2.3.2. Terreingeometrie

Aanleg van de onderdoorgang Contactweg zorgt voor een wijziging in de taludgeometrie. Verder zijn op enkele locaties gewijzigde waterpartijen voorzien. De terreinhoogte is gebaseerd op de hoogtekaarten van het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN2). Wijzigingen zijn gebaseerd op de tekeningen van het spoor- en wegontwerp.

¹ Verkeersontwerp: onderdoorgang Kabelweg: Variant "J", Gemeente Amsterdam Ruimte en Duurzaamheid, fim-RD-KBW-J-V17-3

2.3.3. Treinsnelheden

Voor de snelheidsprofielen zijn de maximaal te hanteren snelheden gebruikt, deze zijn bepaald aan de hand van de seinplaatsing en de aanzet- en remcurves van de diverse treintypes. In de referentiesituatie rijden er geen reizigerstreinen. Verder blijft de snelheid van de goederentreinen ongeveer gelijk, zoals te zien is in Figuur 2-4.



Figuur 2-4 Maximale snelheden voor reizigers- (links) en goederentreinen (rechts) in de huidige en referentie- (boven) en plansituatie (onder)

2.3.4. Treinintensiteit

De treinintensiteiten in 2018 en 2030 zijn weergegeven in Tabel 2-1². De treinaantallen zijn etmaalgemiddelden, afgeleid van jaarprognoses, en gebaseerd op de prognose voor de plansituatie. Het project leidt tot een afname van het aantal goederentreinen. In de huidige situatie passeren er geen reizigerstreinen, terwijl dit wel het geval is in de plansituatie. Het totaal aantal passerende treinen zal toenemen.

Tabel 2-1 Treinaantallen per uur per richting

Treintype	Dag (7:00 – 19:00)		Avond (19:00 – 23:00)		Nacht (23:00 – 7:00)	
	2018	2030	2018	2030	2018	2030
Reizigerstreinen	-	1.66	-	5.00	-	5.56
Goederen treinen	0.30	0.23	0.40	0.25	0.22	0.15

2.3.5. Wijzigingen in bebouwing

In het onderzoek zijn alle vastgestelde bestemmingsplannen in het studiegebied meegenomen.

Voor het gebied ten zuiden van de spoorlijn geldt het bestemmingsplan *Alfadriehoek*. Volgens dit plan is het gebied bestemd voor bedrijven, inclusief kantoren. Ten noorden

² De intensiteiten zijn weergegeven in treinaantallen, omdat trillingen per event (per treinpassage) worden beoordeeld. Dit wijkt af van bijvoorbeeld geluidsonderzoeken, waar het aantal treinen in andere eenheden (bakaantallen) is weergegeven.

van de spoorlijn geldt het bestemmingsplan *Petroleumhaven*. Ook dit gebied is bestemd voor bedrijven, inclusief kantoren.

Om met eventuele toekomstige bebouwing rekening te houden is op dit moment braakliggend land in het projectgebied ook aangeduid als bebouwd, conform de van toepassing zijnde bestemmingsplannen. Daarbij zijn aannames gedaan ten aanzien van de hoogte van de bebouwing waarbij rekening is gehouden met de hoogte van omliggende gebouwen en de binnen het bestemmingsplan geldende eisen. Hierbij is uitgegaan van de maximale planologische invulling.

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 studiegebied kan cumulatie optreden met zwaar wegverkeer, zoals 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, maar ook dat het type trillingsbron vergelijkbaar moet zijn. De trillingsspectra van vrachtwagens hebben andere karakteristieken dan treinen, zodat er gewoonlijk geen sprake zal zijn van significante versterking van de trillingen bij gelijktijdige passage;
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 buslijnen en intensief door vrachtverkeer gebruikte wegen.

In het studiegebied bevinden zich een aantal wegen die bereden worden door vrachtverkeer. Dit zijn asfaltwegen en trillingen veroorzaakt door verkeer op zulke wegen zijn niet vergelijkbaar met trillingen veroorzaakt door treinen. Daarmee wordt niet voldaan de eerste conditie en is er geen sprake van cumulatie. Ook de realisatie van de onderdoorgang leidt niet tot cumulatie van trillingen.

3 Onderzoeksopzet

Dit trillingsonderzoek bestaat uit drie onderdelen:

- Onderzoek naar trillingsschade tijdens de realisatie- en exploitatiefase. Voor de realisatiefase wordt voor gebouwen in de nabijheid van bouwwerkzaamheden een beoordeling uitgevoerd op de SBR A-richtlijn. De kans op trillingsschade tijdens de exploitatiefase wordt eveneens beoordeeld op de SBR A-richtlijn.
- Onderzoek naar trillingshinder tijdens de exploitatiefase ten behoeve van het bestemmingsplan. 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 verstoring van (trillings)gevoelige apparatuur tijdens de realisatie- en exploitatiefase. Voor beide fases wordt een analyse uitgevoerd naar de kans op verstoring van apparatuur in gebouwen in de nabijheid van het spoor (zone van minder dan 200 meter, daarbuiten zullen lokale trillingen van wegverkeer voor hogere trillingen zorgen).

In de volgende paragrafen wordt de gevolgde aanpak nader toegelicht.

3.1 Onderzoek naar trillingsschade

Gezien de hoogte van de trillingssnelheden van het treinverkeer in het studiegebied is schade aan gebouwen tijdens de exploitatiefase onwaarschijnlijk. De verwachte trillingen bij gebouwen zijn ruim lager dan de grenswaarden uit de SBR A-richtlijn.

Tijdens de bouwwerkzaamheden ten behoeve van de onderdoorgang Contactweg is trillingsschade niet op voorhand uit te sluiten. Tijdens de bouw worden namelijk werkzaamheden verricht die trillingen veroorzaken. Zo worden heipalen ingebracht en bouwkuipen aangelegd met behulp van damwanden. Daarom is een nadere analyse uitgevoerd met behulp van een rekenmodel, gebaseerd op de CUR166-richtlijn, 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.

Het onderzoek naar schade door bouwwerkzaamheden is omschreven in hoofdstuk 6.

3.2 Onderzoek naar trillingshinder

Ten behoeve van het onderzoek naar trillingshinder is een onderzoek uitgevoerd met behulp van het rekenmodel *VibraDyna*³ op basis van metingen in het studiegebied. Met dit model kan voor elk gebouw een uitspraak worden gedaan over de kans op het wel of niet overschrijden van de streefwaarden uit de Bts na realisatie van het project. Een beschrijving van het rekenmodel *VibraDyna* is opgenomen in Bijlage I, de gebruikte meetdata waarmee bijvoorbeeld de uitdamping van de trillingen met de afstand zijn bepaald, zijn opgenomen in Bijlage IV.

Om een goede predictie te maken van de trillingssituatie, heeft 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 studiegebied de trillingssituatie in beeld gebracht

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 1.5.

op basis van locatiespecifieke metingen in het onderzoeksgebied. Het model wordt toegepast op een zone van 200 meter aan weerszijden van 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 studiegebied in de huidige, referentie- en plansituatie de trillingssterkte V_{max} en de trillingsintensiteit V_{per} bepaald. Door de rekenresultaten in de referentie- en plansituatie te beoordelen op de Bts, wordt zichtbaar voor welke locaties er een kans is op overschrijden van het beoordelingskader.

Voor locaties die op basis van de rekenresultaten niet voldoet aan de Bts worden maatregelen afgewogen op doelmatigheid.

Het onderzoek naar trillingshinder is beschreven in hoofdstuk 5.

3.3 Onderzoek naar verstoring van apparatuur

Aan de hand van gegevens van de Kamer van Koophandel en van bedrijven is een onderzoek uitgevoerd naar de aanwezigheid van trillingsgevoelige apparatuur in de nabijheid van het spoor. Bedrijven waar, op basis van de gegevens van de Kamer van Koophandel of de eigen website, gevoelige apparatuur wordt verwacht, en waarvan op basis van de website en plattegronden niet kan worden vastgesteld welke apparatuur aanwezig is, worden gevisiteerd om vast te stellen of er sprake is van gevoelige apparatuur.

Op basis van gegevens van de Kamer van Koophandel zijn alle bedrijven in een zone van 200 meter rond het spoor in het studiegebied geanalyseerd, buiten deze zone zijn andere omgevingstrillingen hoger dan de trillingen van het treinverkeer. Uit de uitgevoerde analyse blijkt dat er geen sprake is van bedrijven met gevoelige apparatuur⁴ binnen het studiegebied. De vestiging van bedrijven met gevoelige apparatuur is echter planologisch niet onmogelijk binnen het gebied, in de analyse is daarom wel gekeken naar een kans op verstoring van gevoelige apparatuur. Het onderzoek naar verstoring van gevoelige apparatuur is beschreven in hoofdstuk 7.

⁴ Voorbeelden van gevoelige apparatuur zijn medische apparatuur (zoals MRI- en CT-scanners), elektronenmicroscopen e.d. Vaak bevindt dergelijke apparatuur zich bij medische of universitaire onderzoekscentra en enkele hightechcentra, of bedrijven die als toeleverancier hiervoor fungeren.

4 Beoordelingskader trillingen

Treinverkeer, maar ook bouwwerkzaamheden en wegverkeer, kunnen aanleiding geven tot trillingen in gebouwen. Deze trillingen kunnen leiden tot verstoring van gevoelige apparatuur, hinder of schade. In dit trillingsonderzoek worden alleen de aspecten gevoelige apparatuur en hinder door trillingen beschouwd. De gehanteerde beoordelingsmethodiek voor zowel verstoring van gevoelige apparatuur, trillingshinder als 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. De minister van Infrastructuur en Milieu heeft 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 maatregelen dienen te worden afgewogen ter mitigatie van de trillinghinder die zal ontstaan als gevolg van de aanleg of wijziging van een spoorweg.
2. Een globale omschrijving ten aanzien van het afwegen van maatregelen. In deze afweging dient uitsluitend te worden gegeven of bepaalde maatregelen, gezien de kosten, effectiviteit, milieu- en maatschappelijke impact en de mate van trillingshinder voldoende kosteneffectief zijn. Doorgaans wordt een richtbedrag van € 47.000 per woning met overschrijdingen genoemd⁵. Voor kantoren wordt een bedrag van € 500 per werkplek aangehouden⁶.
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 Acoustics en toegelicht in Bijlage V⁷.
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 huidige situatie⁸. Bij metingen met een hoge *R*-waarde wordt deze *Q*-waarde gecorrigeerd voor de lagere reproduceerbaarheid.

⁵ Dit bedrag is gebaseerd op een Maatschappelijke Kosten Baten Analyse (MKBA), een methodiek om de maatschappelijk gezien acceptabele kosten van een maatregel te bepalen. Deze MKBA is uitgevoerd door Witteveen+Bos, Royal Haskoning DHV en TNO, zie Tuijgrok, dr. ir. E.C.M., e.a., *Doelmatigheidstoetsing Trillingsreducerende Maatregelen Spoor*, Witteveen+Bos, juni 2013, projectcode ut702-1-1

⁶ Hiervoor is het richtbedrag voor woningen gecorrigeerd voor bezettingsgraad, verblijfsduur, en verschillen tussen dag en nacht.

⁷ Koopman, A., LA.131001a.M04

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

Een andere belangrijke wijziging is het ontkoppelen van de beoordeling van de trillingssterkte V_{max} en de trillingsintensiteit V_{per} . Ongeacht de wijzigingen in trillingssterkte mag de trillingsintensiteit V_{per} niet toenemen boven de grenswaarde.

Trillingshinder van het spoorverkeer wordt in dit onderzoek beoordeeld op de Bts, deze richtlijn sluit het meest aan bij de meest recente inzichten op het gebied van trillingshinder en bij de bestaande jurisprudentie⁹. Een nadere omschrijving van het beoordelingskader is te vinden in Bijlage II.

De trillingshinder van wegverkeer wordt doorgaans beoordeeld op de SBR B-richtlijn. In het studiegebied leiden de wegen echter niet tot significante trillingen, er is daarom geen nadere analyse naar de trillingen van het wegverkeer uitgevoerd.

4.2 Beoordeling trillingsschade

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 in dit onderzoek is deze richtlijn gehanteerd. Van de SBR A-richtlijn is een omschrijving opgenomen in Bijlage II.

⁹ De Bts en de onderliggende methodes zijn ontwikkeld in de afgelopen jaren, en daarmee gebaseerd op nieuwere inzichten dan de SBR B-richtlijn. Sinds 2012 wordt de Bts toegepast bij spoorprojecten, en deze heeft sindsdien al veelvuldig voorgelegen bij de Raad van State ter beoordeling. In deze beoordelingen door de Raad van State is het gebruik van de Bts niet ter discussie gesteld door de Raad. Zie bijv. uitspraak 201307986/2/R6

5 Trillingshinder

5.1 Inleiding

In het onderzoek naar trillingshinder is de trillingssituatie in gebouwen bepaald met een modelberekening in VibraDyna aan de hand van een maaiveldmeting in het studiegebied, zie Bijlage IV. Er is een aantal factoren dat de trillingssterkte in een gebouw beïnvloedt. In het onderzoek worden de volgende gegevens meegenomen:

1. Treinverkeer: spoorligging, spoorgebruik, treintypes, rijnsnelheden, treinaantallen, type bovenbouwconstructie en oneffenheden in het spoor (wissels, kunstwerken);
2. Bodem: eigenschappen van de bodem, zoals de terreingeometrie en de bodemdamping, bepaald op basis van maaiveldmetingen;
3. Gebouwen: eigenschappen van de bebouwing, zoals bouwjaar, bouwhoogte, bouwstijl en afmetingen.

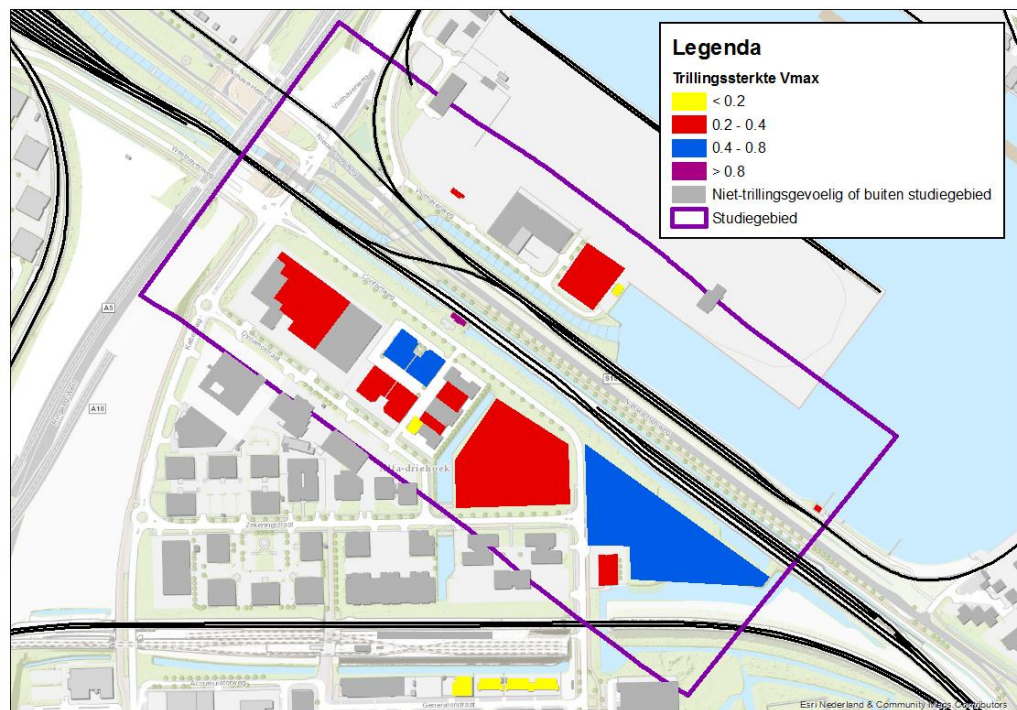
De berekening is frequentieafhankelijk uitgevoerd, hiermee wordt een zo nauwkeurig mogelijke predictie verkregen. Uit eerdere onderzoeken blijkt dat het model VibraDyna een betrouwbaarheid van 95 procent heeft, wat gebruikelijk is bij trillingsonderzoeken, zie Bijlage I. Dit betekent dat maximaal 5 procent van de gebouwen een hogere trillingssterkte of trillingsintensiteit kent dan het model aangeeft.

5.2 Resultaten berekeningen

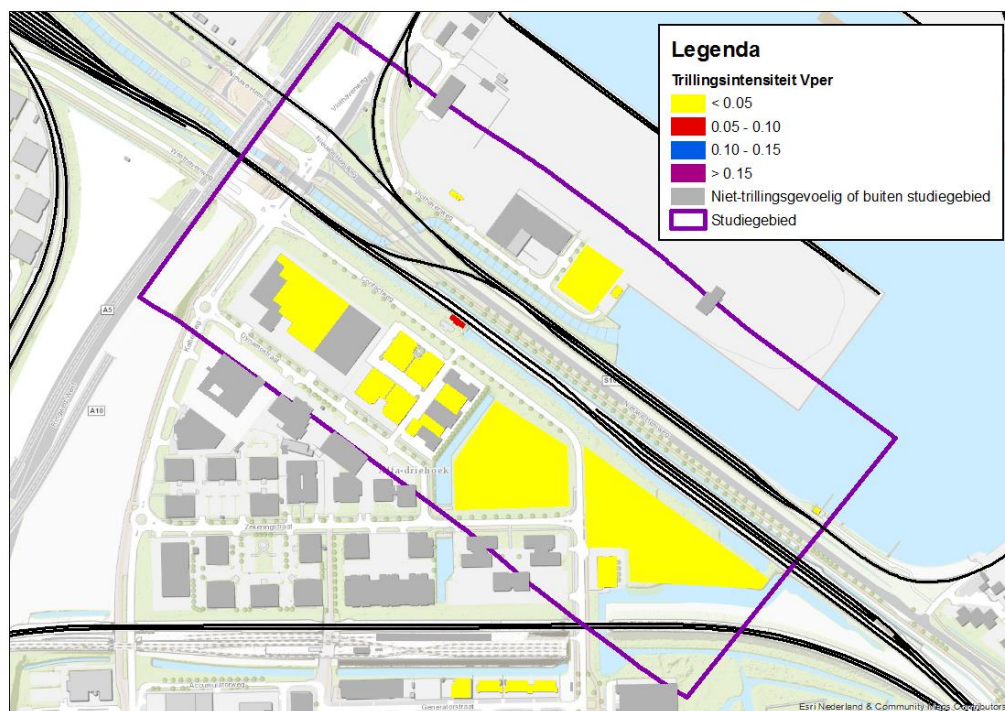
Met behulp van VibraDyna zijn voor alle gebouwen binnen 200 meter van de sporen de trillingssterkte V_{max} en de trillingsintensiteit V_{per} bepaald. Detailkaarten zijn opgenomen in Bijlage VI.

5.2.1. Resultaten huidige situatie

De trillingssterkte (95 procent bovengrens) in de huidige situatie is weergegeven in Figuur 5-1 voor alle gebouwen die binnen het beoordelingskader, de Bts vallen. De trillingsintensiteit (eveneens 95 procent bovengrens) is weergegeven in Figuur 5-2.



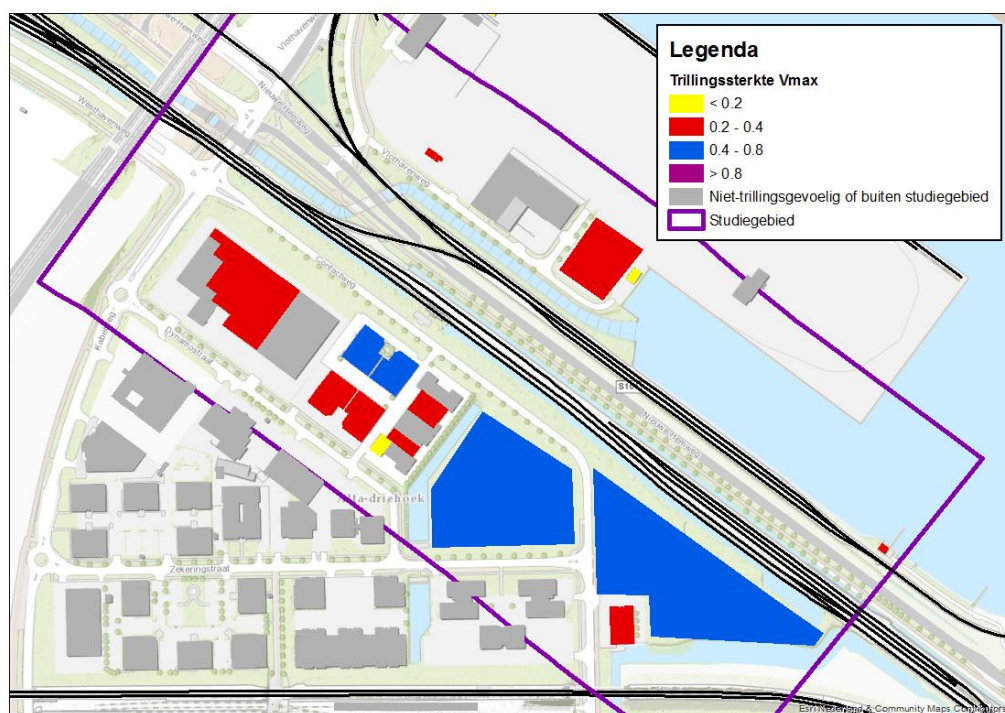
Figuur 5-1 Trillingssterkte V_{max} in huidige situatie (95 procent bovengrens)



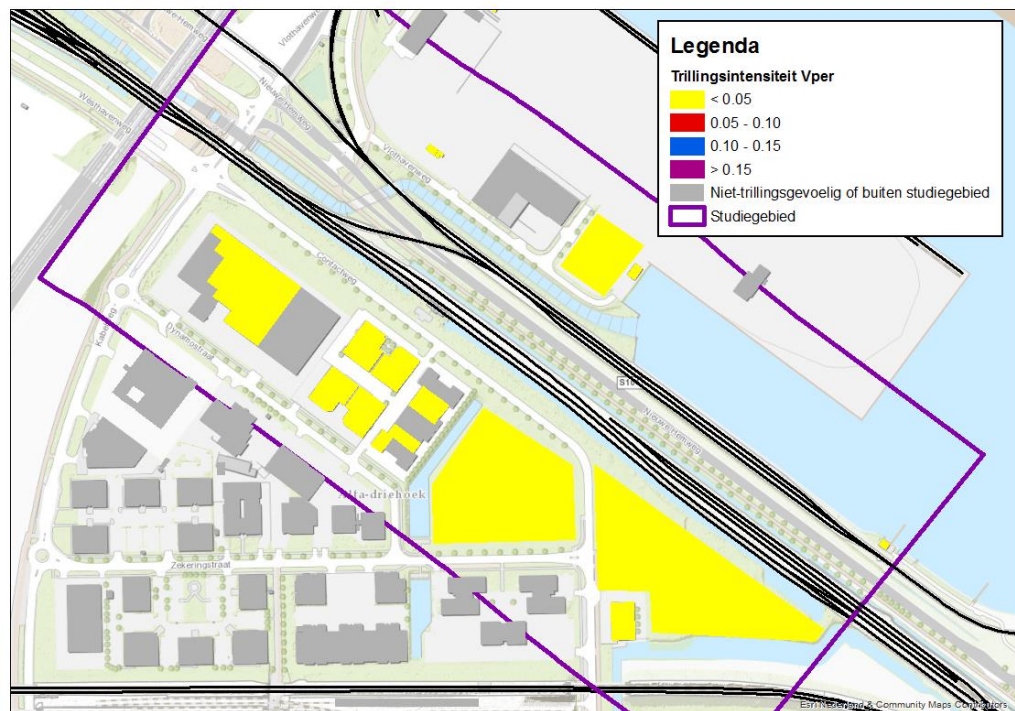
Figuur 5-2 Trillingsintensiteit V_{per} in huidige situatie (95 procent bovengrens)

5.2.2. Resultaten plansituatie

De trillingssterkte (95 procent bovengrens) in de plansituatie is weergegeven in Figuur 5-3, de trillingsintensiteit (eveneens 95 procent bovengrens) in Figuur 5-4.



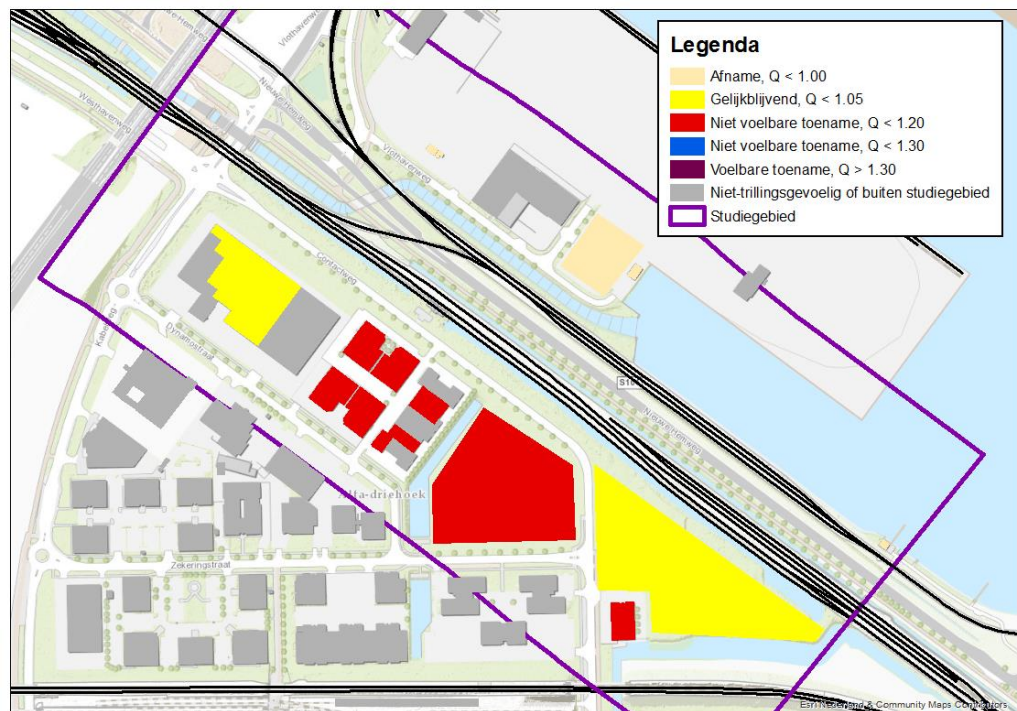
Figuur 5-3 Trillingssterkte V_{max} in plansituatie (95 procent bovengrens)



Figuur 5-4 Trillingsintensiteit V_{per} in plansituatie (95 procent bovengrens)

5.3 Vergelijking trillingscontouren

Voor de inventarisatie van aandachtslocaties worden de waarden van V_{max} in de huidige en plansituatie en de waarde van V_{per} in de plansituatie voor elk gebouw getoetst aan de Bts. Hiervoor wordt onder meer gekeken naar de toename in trillingssterkte, Q . De verwachtingswaarde van de toename Q is weergegeven in Figuur 5-5. Overal wordt een afname van de trillingen verwacht.



Figuur 5-5 Verwachte toename van de trillingssterkte, Q

5.4 Aandachtlocaties

Uit de berekeningen volgt dat:

- De trillingen van goederentreinen zijn hoger dan die van reizigerstreinen, ook na realisatie van het project. Omdat de maximumsnelheid van de goederentreinen slechts beperkt toeneemt, neemt de V_{max} beperkt toe. Ook in combinatie met het dichterbij komen van sporen en in gebruik nemen van extra wissels ontstaan er geen overschrijdingen van het beoordelingskader, de Bts.
- De V_{per} verandert niet significant door het in gebruik nemen van de sporen door reizigerstreinen. De waarden blijven ruim onder de streefwaarden uit de Bts, en door de lage rijsnelheid van de reizigerstreinen en de relatief grote afstand zijn de trillingen van reizigerstreinen in de bebouwing laag.

Op basis van bovenstaande afwegingen is het niet noodzakelijk om mitigerende maatregelen voor trillingshinder te overwegen voor dit project.

6 Trillingsschade

6.1 Inleiding

Tijdens de realisatie van de onderdoorgang Contactweg worden op diverse locaties bouwwerkzaamheden uitgevoerd. Bij een deel van deze werkzaamheden is een kans op trillingsschade aan omliggende gebouwen niet uit te sluiten. Deze trillingsschade kan optreden door bijvoorbeeld het intrillen van damwanden of heiwerkzaamheden. Daarom is een nadere analyse uitgevoerd met behulp van een rekenmodel, gebaseerd op de CUR166-richtlijn, 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 bouwkundige staat van gebouwen vast te stellen, zodat na de werkzaamheden een causaal verband kan worden gelegd tussen de eventueel opgetreden schade en de uitgevoerde werkzaamheden.

Omdat er nog geen gedetailleerd ontwerp beschikbaar is van de diverse kunstwerken, is in het onderzoek naar schade een conservatieve aanname gedaan over de werkzaamheden en afmetingen van de objecten. Bij verdere detaillering kan een nauwkeuriger beschouwing worden gehouden. In het huidige ontwerp is naar verwachting sprake van werkzaamheden met kans op schade op een aantal locaties:

1. Het realiseren van de bouwkuip Nieuwe Hemweg waarbij damwanden geplaatst worden.
2. Het realiseren van de bouwkuip Contactweg waarbij damwanden geplaatst worden.
3. Het aanbrengen van funderingspalen en damwanden onder de spoorbaan.

6.2 Uitgangspunten

In de berekeningen is op basis van een quickscan een aantal uitgangspunten gehanteerd, deze zijn weergegeven in Tabel 6-1. Deze uitgangspunten zijn gebaseerd op de indicatieve afmetingen van de onderdoorgang, gebaseerd op de uitgangspuntennotitie van de onderdoorgang.

Tabel 6-1 *Uitgangspunten modelberekeningen*

Model	Omschrijving	Werkzaamheden
M.1	Damwand Contactweg	Intrillen damwand, AZ26-700N, 16.2 m lang
M.2	Damwand Nieuwe Hemweg	Intrillen damwand, AZ26-700N, 16.8 m lang
M.3	Damwand onder spoorbaan	Intrillen damwand, AZ32-750, 21 m lang
M.4	Heipalen onder spoorvaan	Heien palen, 400x400mm, 20 m lang

In de berekeningen is een veiligheidsfactor van 2.0 toegepast op de trillingssnelheden. Uit eerdere analyse van de trillingssignalen blijkt dat de trillingen ten gevolge 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.

6.3 Modelleren

De contourafstanden rond de werkzaamheden zijn berekend met behulp van een op de CUR166-richtlijn gebaseerd prognosemodel, aangevuld met praktijkervaringen uit eerdere projecten. De opbouw van de bodem is gebaseerd op sonderingen uit het onderzoeksgebied, zie Bijlage IV.

De contourafstanden voor categorie 1- en 2-gebouwen voor de verschillende werkzaamheden zijn weergegeven in Tabel 6-2.

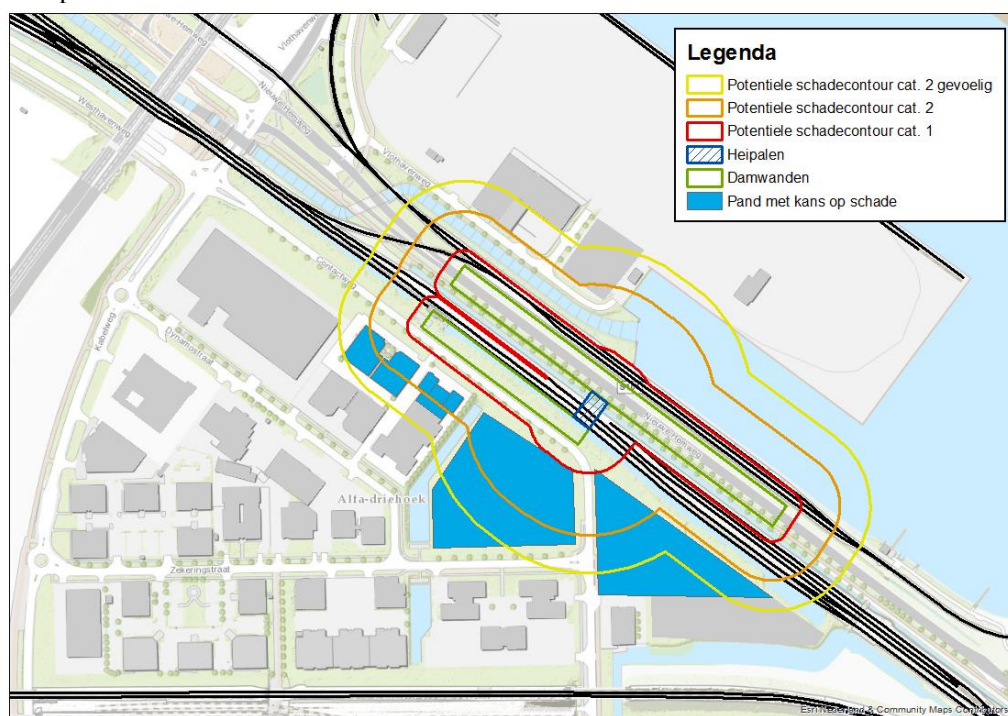
Tabel 6-2 Contourafstanden mogelijke bouwschade

Werkzaamheden	Toegestane afstand (m)		
	Categorie 1	Categorie 2	Categorie 2 gevoelig
Damwand Contactweg	14	51	81
Damwand Nieuwe Hemweg	15	53	83
Damwand onder spoorbaan	44	105	142
Heipalen onder spoorvaan	14	50	68

De contourafstanden zijn vervolgens geprojecteerd rond de werkzaamheden, zie Figuur 6-1. Binnen de aangegeven afstanden tot de werkzaamheden is trillingsschade ten gevolge van de bouwwerkzaamheden niet uit te sluiten.

Kans op trillingsschade treedt op bij de volgende werkzaamheden:

1. Het aanbrengen van de damwanden voor de bouwkuip Contactweg.
2. Het aanbrengen van de heipalen en de damwanden voor de bouwkuip onder de spoorbaan.



Figuur 6-1 Schadecontouren en panden met kans op schade

Voor bouwwerkzaamheden met een kans op schade adviseren wij om in het vervolgtraject, bij de detaillering van de werkzaamheden, aandacht te besteden aan het aspect trillingsschade tijdens realisatie. Dat kan op de volgende manieren:

1. Objecten lichter funderen of verder bij bebouwing vandaan realiseren. Zodra de detaillering van de objecten afgerond is, adviseren wij om een gedetailleerde schadeprognose te maken met behulp van 3D eindige elementenmodellen.
2. Als daaruit blijkt dat er nog steeds panden met kans op schade zijn, adviseren wij

om te kiezen voor een trillingsarme bouwmethode of, indien dat niet mogelijk is, bouwkundige vooropnames in de omliggende panden uit te voeren en de trillingen te monitoren tijdens de werkzaamheden. Bij overschrijdingen van de grenswaarden van de SBR A-richtlijn dienen de werkzaamheden te worden stilgelegd, zodat gekeken kan worden naar eventuele maatregelen (trillingsarme bouwmethode of afscherming van werkzaamheden of trillingsgevoelige objecten).

7 Verstoring van gevoelige apparatuur

Uit het inventariserend bureauonderzoek op basis van gegevens van de Kamer van Koophandel en gedetailleerde informatie van websites van bedrijven, blijkt dat er in het onderzoeksgebied in de huidige situatie geen sprake is van bedrijven met apparatuur die extra gevoelig is voor trillingen. De vestiging van bedrijven met gevoelige apparatuur is echter planologisch niet onmogelijk binnen het gebied.

Uit de rekenresultaten voor het onderzoek naar trillingshinder (hoofdstuk 5) blijkt dat de trillingen in het onderzoeksgebied slechts beperkt toenemen. Er ontstaat daarmee geen sterk gewijzigde situatie ten opzichte van de huidige situatie. De eventuele vestiging van bedrijven met gevoelige apparatuur is daarmee in de toekomst niet minder mogelijk gemaakt dan in de huidige situatie. Er ontstaat daarom geen onacceptabele situatie.

8 Conclusies en aanbevelingen

In voorliggend rapport is een onderzoek uitgevoerd naar trillingshinder en trillingsschade tijdens de realisatie- en exploitatiefase van het derde spoor bij Amsterdam Westhaven en de realisatie van de onderdoorgang Contactweg.

Uit het onderzoek naar trillingshinder volgt dat er geen overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder, de Bts zijn. Het project leidt tot een beperkte toename van de trillingssterkte V_{max} doordat de rijksnelheid van goederentreinen toeneemt en doordat deze treinen dichterbij komen te rijden (op het nieuwe derde spoor). De V_{max} blijft onder de grenswaarde. De trillingsintensiteit V_{per} blijft onder de grenswaarden en neemt niet significant toe, ondanks de extra reizigerstreinen. De reizigerstreinen rijden ver weg en met een lage snelheid, de trillingen van deze treinen zijn naar verwachting niet voelbaar in de omliggende panden. Het is daarom niet noodzakelijk om mitigerende maatregelen voor trillingshinder te overwegen voor dit project.

Uit het onderzoek naar trillingsschade volgt dat bij een aantal gebouwen trillingsschade als gevolg van bouwwerkzaamheden tijdens de realisatie van de onderdoorgang Contactweg niet op voorhand is uit te sluiten. Daarom wordt geadviseerd om, zodra de detaillering van de onderdoorgang is afgerond, gedetailleerde schadeprognoses met behulp van 3D eindige elementenmodellen te maken. Als vervolgens blijkt dat er nog steeds gebouwen zijn met een kans op schade, dan kan er gekozen worden voor trillingsarme bouwmethodes of het monitoren van de trillingen tijdens de bouw.

Verder is in het onderzoek gekeken naar verstoring van trillingsgevoelige apparatuur. Op dit moment is er geen sprake van bedrijven met gevoelige apparatuur in het onderzoeksgebied. De trillingen wijzigen slechts beperkt door de voorgenomen wijzigingen binnen dit bestemmingsplan, zodat eventuele toekomstige vestiging van bedrijven met gevoelige apparatuur door deze bestemmingsplanwijziging niet minder mogelijk wordt gemaakt.

Colofon

Opdrachtgever ProRail B.V.

Uitgave Movares Nederland B.V.

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

Daalseplein 100
Postbus 2855
3500 GW Utrecht

Telefoon 06-57670922

Ondertekenaar J. van der Poel, MSc
Sr. Projectleider

Projectnummer RM005096

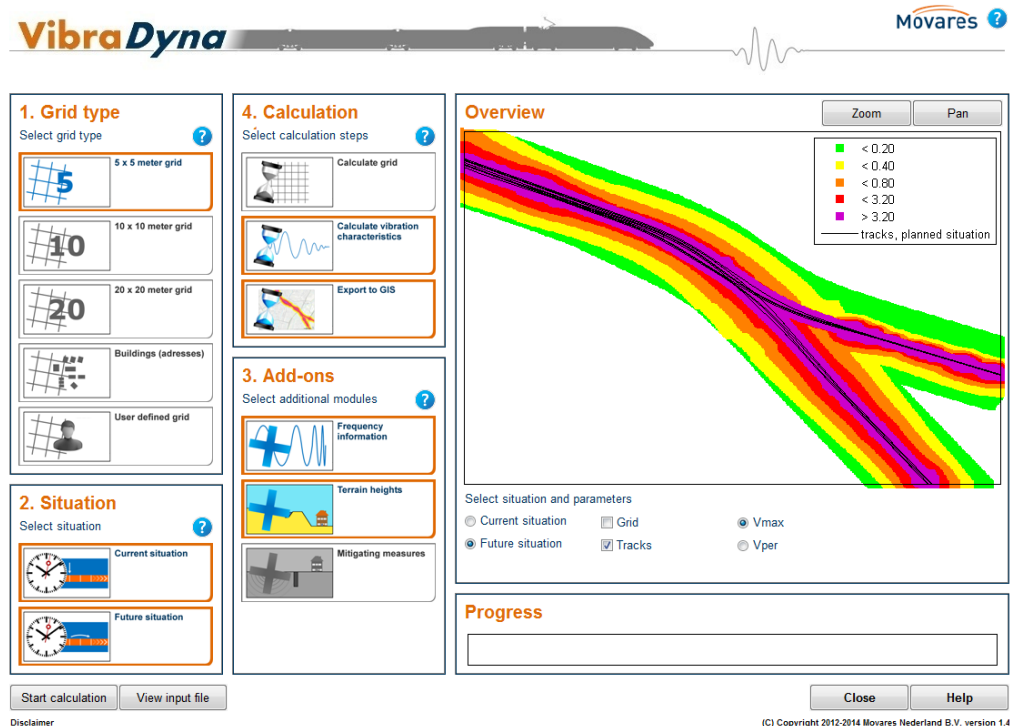
Kenmerk D79-GBA-KA-1700011

© 2017, 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 een nauwkeurige, frequentieafhankelijke berekening op basis van metingen in VibraDyna. VibraDyna kent ook de mogelijkheid om een snelle, globale berekening uit te voeren met een lagere nauwkeurigheid. Deze berekening kan dan gebruikt worden om te bepalen waar metingen ten behoeve van een nauwkeuriger model noodzakelijk zijn. Dit globale model is niet gebruikt in het voorliggende onderzoek gezien het relatief beperkte studiegebied.

Beide types modellen worden hieronder nader toegelicht:

1. Een snelle, globale berekening op basis van expert judgment voor stap 1 van het trillingsonderzoek;
2. Een nauwkeurige berekening op basis van metingen. Dit type onderzoek is gebruikt in de tweede stap van het trillingsonderzoek.

Beide types modellen worden hieronder nader toegelicht.

I.1 Globale berekening op basis van expert judgment

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).

1.1.1 In- en uitvoer

Gebruikers kunnen de volgende parameters variëren:

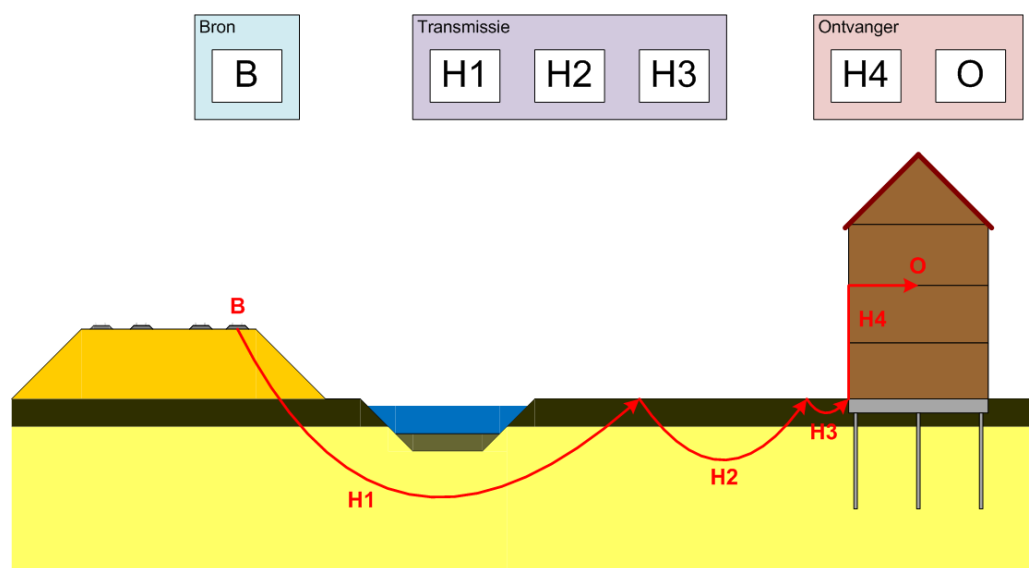
1. Afstand tussen gebouw en spoor;
2. Bodemtype (zand, veen, klei, etc.). Deze gegevens zijn op hoofdlijnen uit archieven beschikbaar;
3. Voertuigtypes;
4. Voertuigsnellheden;
5. Voertuigintensiteiten in dag-, avond- en nachtperiode;
6. Wissels en kunstwerken.

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.

1.1.2 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 wordt 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.

1.1.3 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.

1.1.4 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.

1.2 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 aandachtslocaties 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.

1.2.1 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. VibraDyna bevat een database met honderden metingen. Uit deze database kiest het rekenmodel op basis van de gebouweigenschappen (bouwjaar, afmetingen, bouwstijl) bijvoorbeeld de meest passende trillingsoverdracht. Ook de verhouding tussen de gemeten trillingen van reizigerstreinen (zie Bijlage IV) en bijvoorbeeld die van goederentreinen is afkomstig uit deze database.

1.2.2 Relatie tussen tertsbandspectrum en v_{eff}

De trillingssterkte v_{eff} is een gewogen voortschrijdend gemiddelde, dat gecorrigeerd is voor frequenties. Deze grootheid wordt gebruikt om de trillingssterkte V_{max} te bepalen, die vervolgens getoetst wordt 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 plaatsvindt op basis van de trillingssterkte V_{max} , die wordt bepaald uit de gehele verzameling van gemeten v_{eff} -waarden voor alle treinen.

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.

1.2.3 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.

1.3 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) 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*¹⁰, *Sporen in Utrecht*¹¹ en *Doorstroomstation Utrecht*¹²;
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.

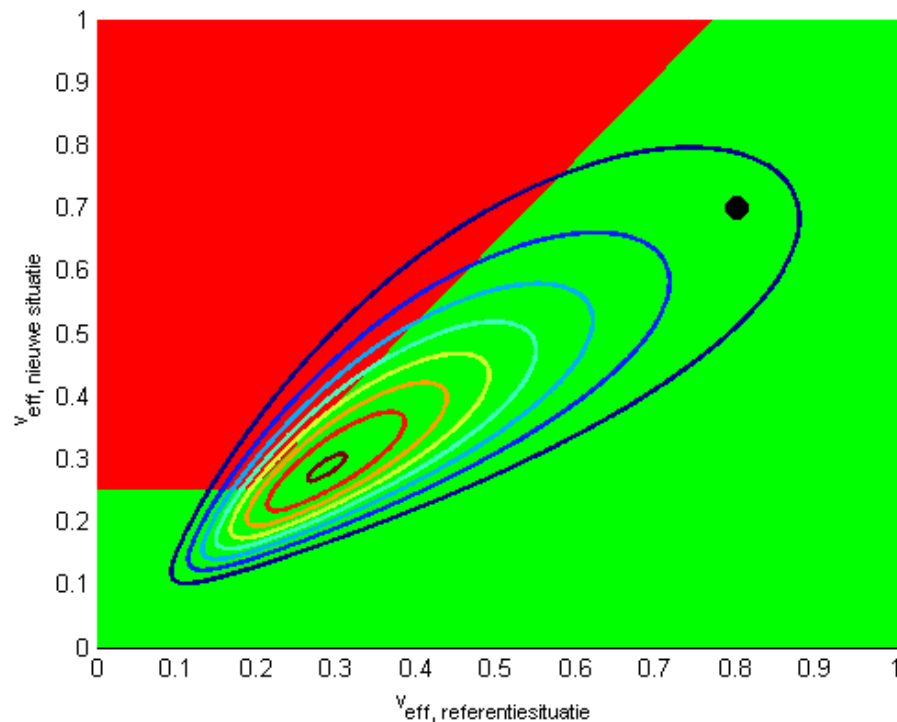
De maximale trillingssterkte en trillingsintensiteit wordt door *VibraDyna* met een betrouwbaarheid van 95 procent bepaald door het model. Bij beoordeling op de Bts speelt vooral de toename in trillingssterkte een belangrijke rol. Om deze toename conservatief genoeg te berekenen, rekent *VibraDyna* met 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 van de maximale trillingssterkte in de referentie- en plansituatie, kunnen kansdichtheidscontouren worden getrokken zoals in Figuur I-3. De zwarte punt geeft in dit geval de trillingssterkte in de referentie- en plansituatie weer.

¹⁰ Boon, ir. P.M., *Sporen in Arnhem, Trillingsonderzoek t.b.v. Tracébesluit*, Movares Nederland B.V., D79-PBO-KA1400006, 31 maart 2014, versie 1.0

¹¹ Boon, ir. P.M., *Sporen in Utrecht, Trillingsonderzoek t.b.v. Tracébesluit*, Movares Nederland B.V., D79-PBO-KA1400005, 31 maart 2014, versie 1.0

¹² Boon, ir. P.M., *Doorstroomstation Utrecht (DSSU), Trillingsonderzoek*, Movares Nederland B.V., OND-ET-CON-TR-RAP-100, 4 juni 2015, versie 3.0



Figuur I-3 Voorbeeld trillingssterkte 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-3, kan een kans worden toegekend aan of een woning voldoet in de plansituatie. Voor de in Figuur I-3 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 waarschijnlijk echter aanzienlijk lager dan de trillingssterkte 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).

Bijlage II Beoordelingskader

II.1 Algemeen

Treinverkeer, maar ook bouwwerkzaamheden en wegverkeer, kunnen leiden tot trillingen in gebouwen. Deze trillingen kunnen resulteren in hinder en/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.

Voor het onderzoek naar trillingshinder wordt gebruik gemaakt van de Bts, voor het onderzoek naar trillingsschade wordt de SBR A-richtlijn gebruikt. De SBR C-richtlijn geeft aan dat de beoordeling van verstoring van apparatuur op apparaatniveau dient plaats te vinden. In het kader van dit onderzoek is daarom een analyse uitgevoerd om vast te stellen of er mogelijk sprake is van verstoring van gevoelige apparatuur. Hiervoor is bepaald of er bedrijven aanwezig zijn die gebruik maken van gevoelige apparatuur in de nabijheid van het spoor. Uit een analyse blijkt dat dit niet het geval is. Een verdere, meer gedetailleerde beoordeling op de SBR C-richtlijn is daarom niet uitgevoerd.

In de volgende paragrafen staan deze de beoordelingskaders voor trillingshinder en trillingsschade achtereenvolgens beschreven.

II.2 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 MKBA¹³, uitgevoerd door Witteveen+Bos, RoyalHaskoningDHV 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 $V_{max, Bts}$. Deze waarde wordt gebruikt voor toetsing aan de streefwaarden.

V_{per} is een weergave 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.

II.2.1 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 onderwijs of bijeenkomsten*. Bij elke gebouwfunctie horen andere toegestane trillingssterktes, zie Tabel II - 1 voor de normstelling voor bestaande situaties.

¹³ 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

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} .

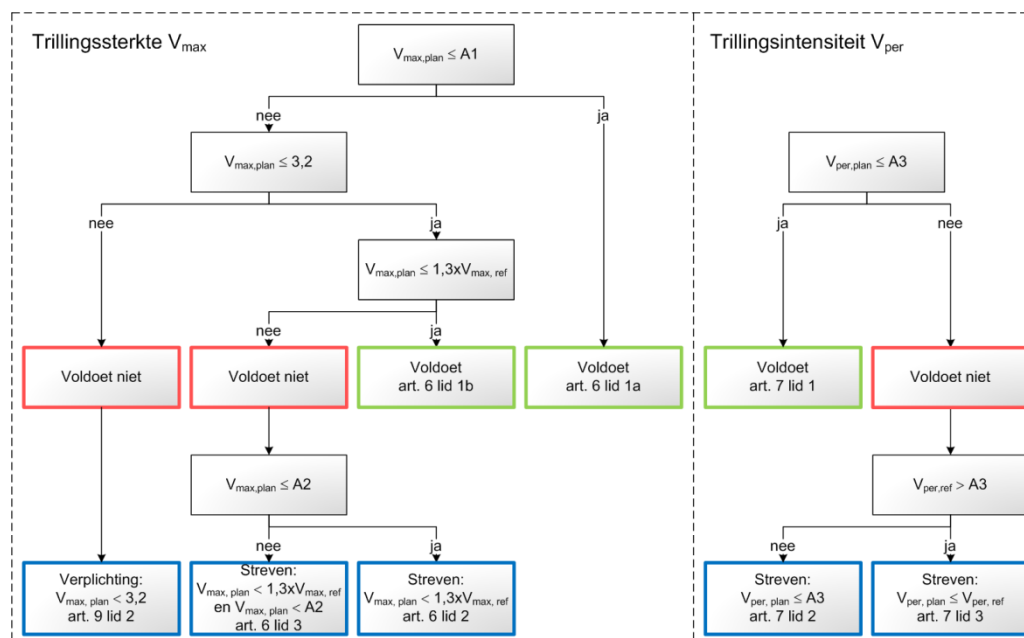
Tabel II - 1 Normstelling bestaande situatie volgens Bts

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	-.--

II.2.2 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

II.3 SBR richtlijn deel A – beoordelingskader trillingsschade

II.3.1 Schade als gevolg van bouwwerkzaamheden

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.

II.3.2 Schade ten gevolge van treinverkeer

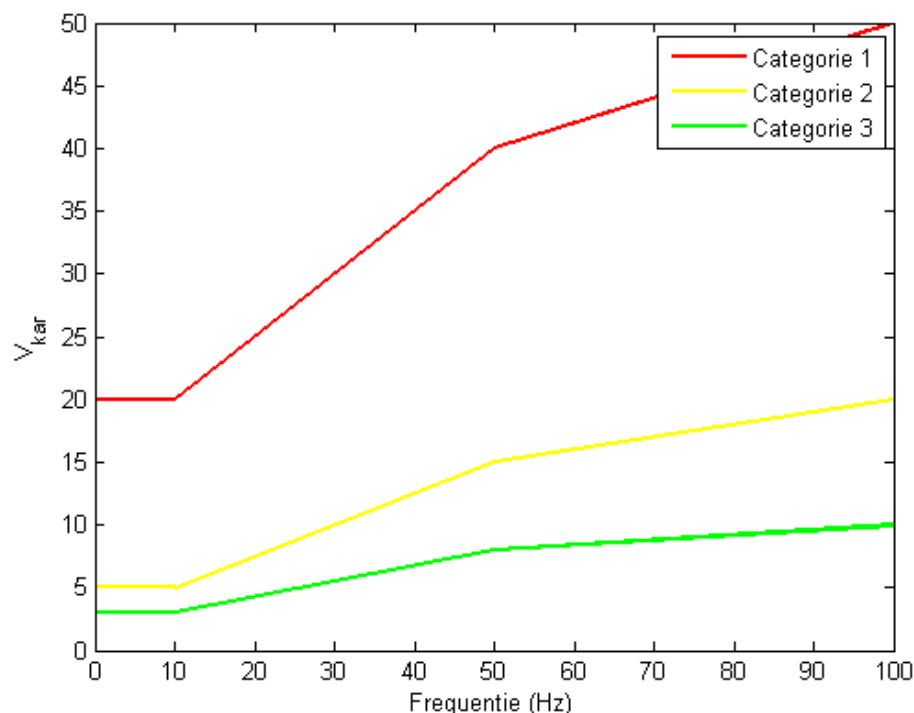
De sterkte van trillingen ten gevolge van treinverkeer zijn voor vrijwel alle gebouwen te gering om schade aan gebouwen te veroorzaken. Op afstanden groter dan 10 meter vanaf de spoorbaan is de trillingssnelheid, gemeten aan de fundering, zonder uitzondering kleiner dan 2 mm/s. Voor de meeste woningen (categorie 2 conform de SBR A-richtlijn) wordt een grenswaarde voor de trillingssnelheid van 5 mm/s aangehouden, voor monumentale panden geldt een strengere grenswaarde van 3 mm/s. Onder deze grens is de kans op schade kleiner dan 1 procent. Uit de metingen blijkt dat dergelijke trillingssterktes niet optreden, schade ten gevolge van treinverkeer in de exploitatiefase is daarmee zeer onwaarschijnlijk.

II.3.3 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 heilwerkzaamheden. 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 hoofdassen 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.

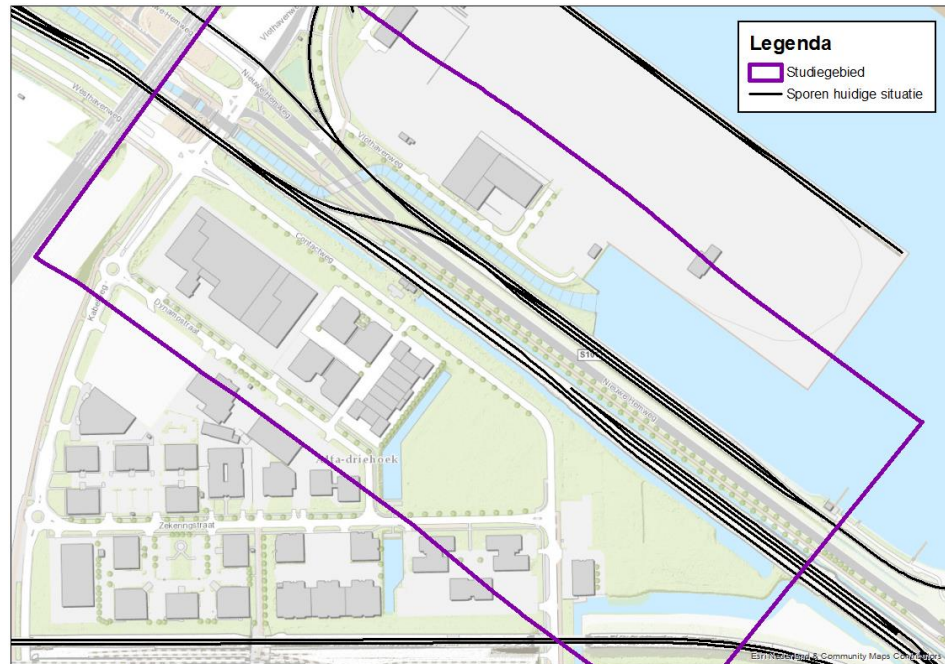
II.3.4 Toetsing

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.

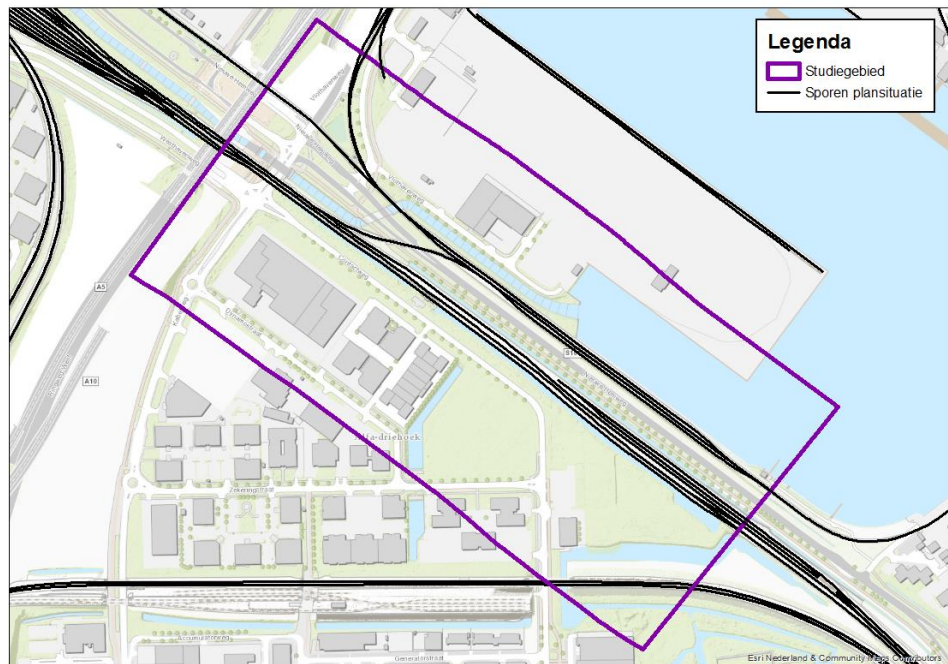
In dit onderzoek wordt aangegeven voor hoeveel gebouwen een overschrijding van de SBR A-richtlijn wordt geprognoseerd. Deze toetsing vindt alleen plaats in de nabijheid van hei- en trilwerkzaamheden.

Bijlage III Wijzigingen in sporenlay-out

Deze bijlage bevat een weergave van de wijzigingen in sporenlay-out. In Figuur III - 1 is de huidige sporenlay-out te zien, de toekomstige lay-out is te zien in Figuur III - 2.



Figuur III - 1 Sporenlay-out huidige situatie



Figuur III - 2 Sporenlay-out plansituatie

Bijlage IV Resultaten bodemonderzoek en maaiveldmetingen

Voor de beoordeling van trillingshinder zijn metingen uitgevoerd aan treinpassages. Verder is gebruik gemaakt van bodemonderzoek om de lokale bodemopbouw vast te stellen. In deze bijlage worden de resultaten van dit onderzoek weergegeven. De resultaten van de onderzoeken zijn gebruikt in de modelberekeningen, zie Bijlage I.

IV.1 Maaiveldmetingen

Om de locatiespecifieke trillingen te bepalen, is een maaiveldmeting uitgevoerd in het studiegebied. De locatie voor deze maaiveldmeting is geselecteerd op basis van een aantal overwegingen:

- Op basis van sonderingen is de variatie in bodemopbouw vastgesteld. Uit dit onderzoek volgt dat de bodemopbouw in het studiegebied vergelijkbaar is. Representatieve sonderingen voor het gebied zijn weergegeven in Bijlage IV.2;
- Om de trillingen goed vast te kunnen stellen worden maaiveldmetingen bij voorkeur uitgevoerd op locaties waar sprake is van doorgaand spoor (zonder wissels, de invloed van wissels wordt afzonderlijk bepaald), en waarbij sprake is van voldoende ruimte om een lange meetraai, haaks op het spoor te plaatsen, zonder veel invloed van omgevingstrillingen.

Op basis van bovenstaande overwegingen en de beperkte omvang van het studiegebied is ervoor gekozen om op één locatie een maaiveldmeting uit te voeren. Hierbij zijn passerende treinen gemeten, en is gebruik gemaakt van een aantal sensoren op verschillende afstanden tot de sporen.

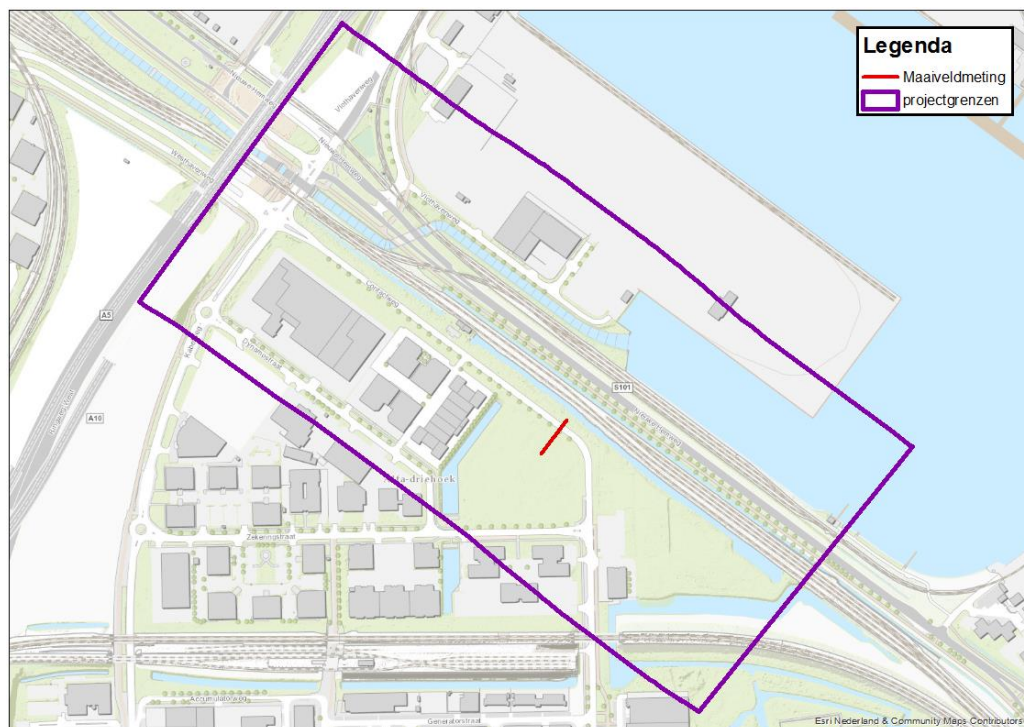
De metingen zijn verricht aan goederentreinen, de trillingen van de reizigerstreinen zijn bepaald aan de hand van de trillingsspectra van deze goederentreinen en de verhouding in trillingsspectrum tussen reizigers- en goederentreinen op dit bodemtype uit de database van *VibraDyna*. Deze database is gebaseerd op metingen in heel Nederland, de verrekening van goederen- naar reizigerstreinen is gevalideerd bij meerdere projecten, zie Bijlage I.

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:

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

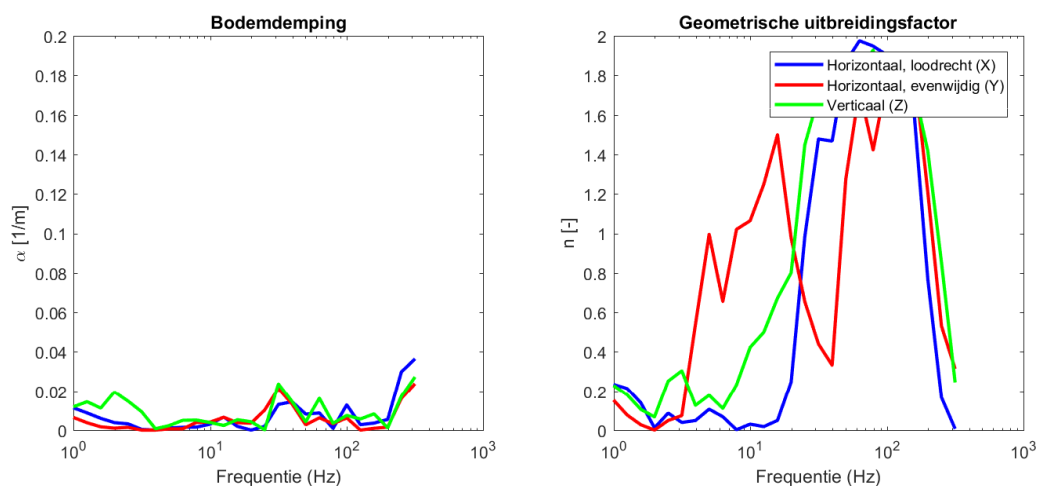
Hierin is $V(r, f)$ de trillingssterkte op een willekeurige afstand r tot de trillingsbron, r_0 een referentieafstand, n een frequentieafhankelijke factor die de geometrische uitbreiding van de trillingen beschrijft en α een frequentieafhankelijke factor die de bodemdemping beschrijft. Met behulp van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

De maaiveldmeting is uitgevoerd op één locatie langs het tracé, zie Figuur IV - 1. De metingen zijn verricht op 10 november 2017.

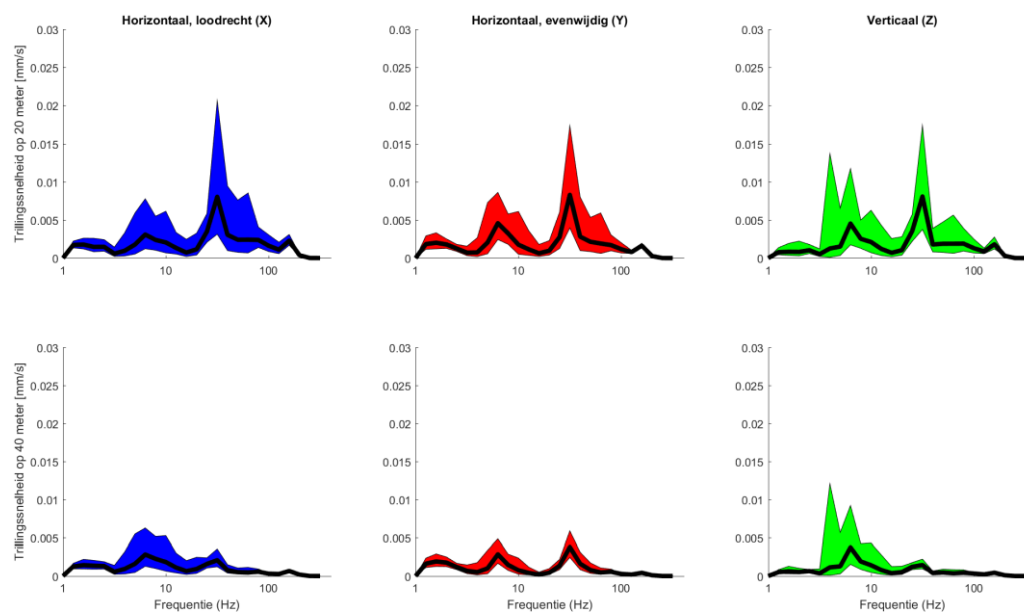


Figuur IV - 1 Locatie maaiveldmeting

Resultaat van de maaiveldmeting is een dempingsconstante, een geometrische uitbreidingsfactor en een trillingsspectrum op verschillende afstanden tot het spoor. De resultaten bij de Contactweg zijn weergegeven in Figuur IV - 2 en Figuur IV - 3.



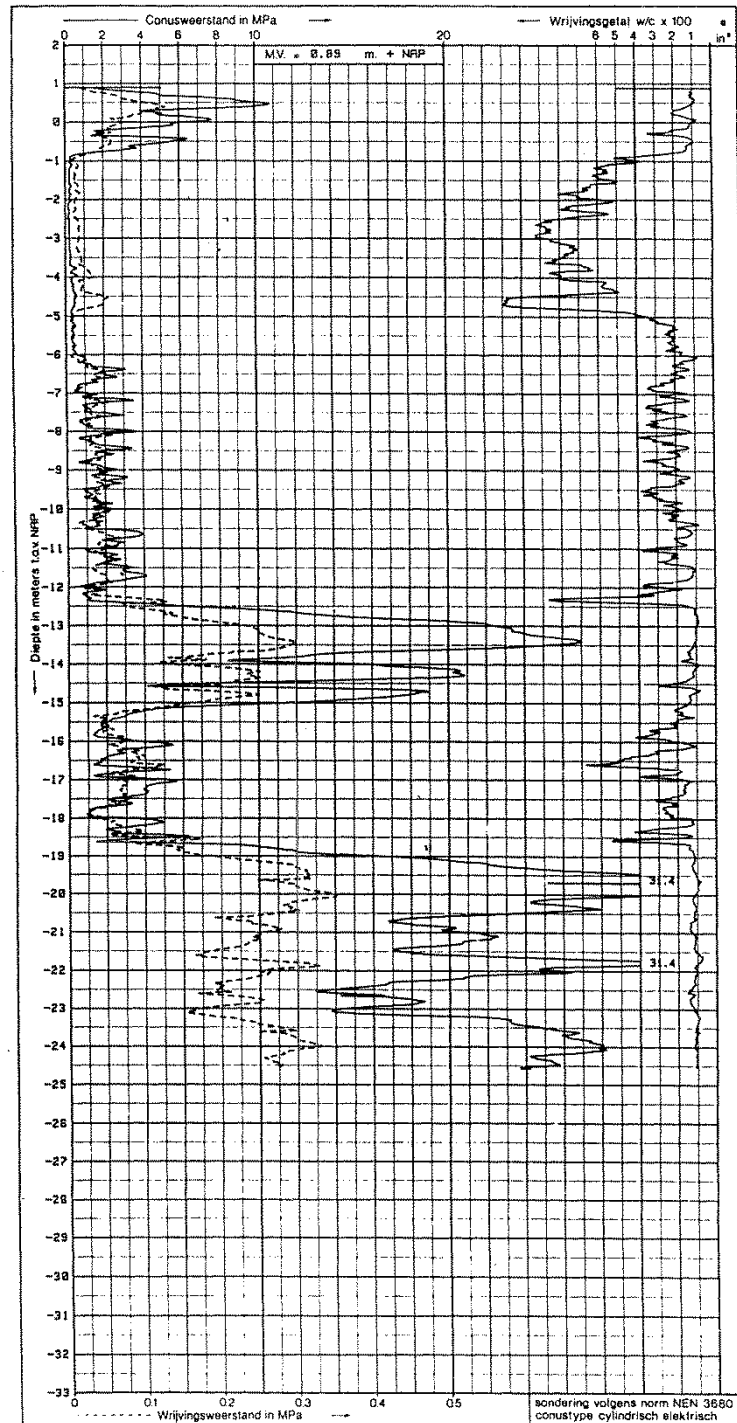
Figuur IV - 2 Dempingsparameter (links) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechts). De meting is verricht aan de Contactweg



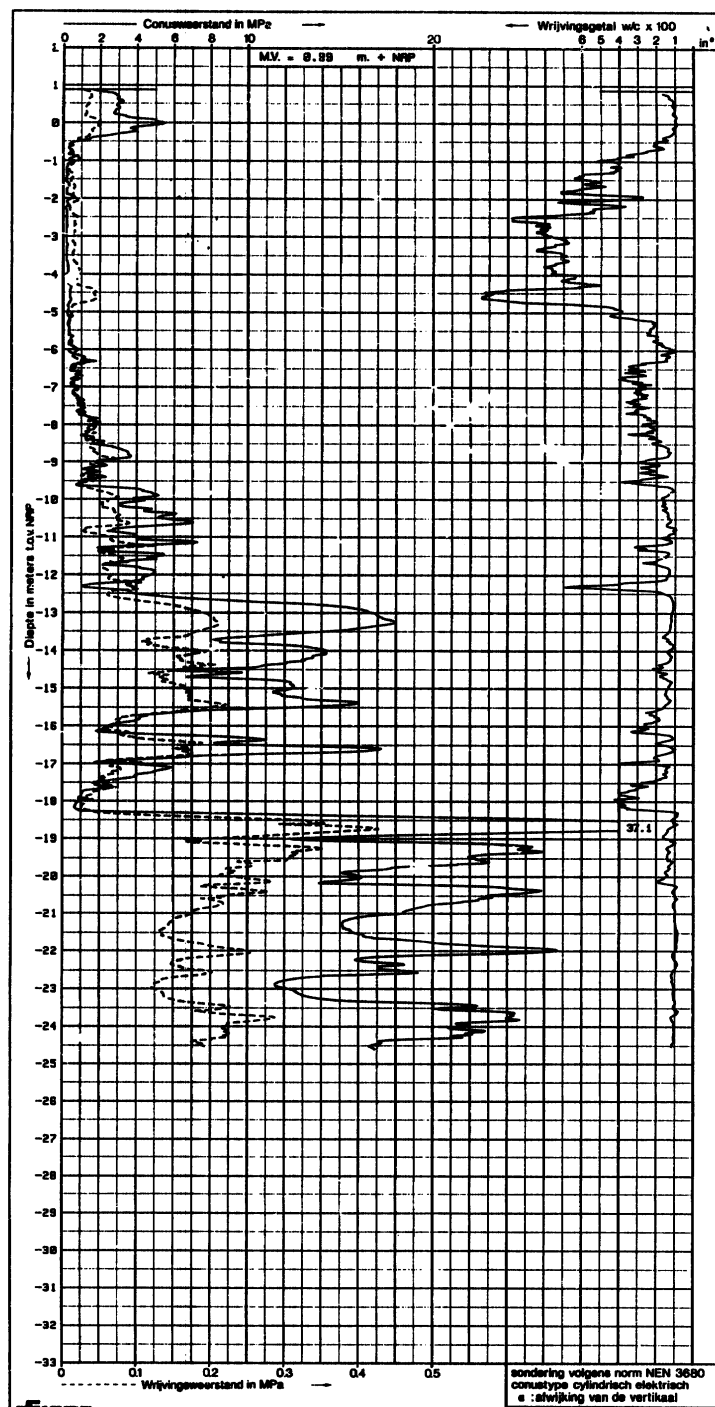
Figuur IV - 3 Trillingsspectra (95 procentsinterval) op 20 (boven) en 40 (onder) meter afstand

IV.2 Bodemonderzoek

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van sonderingen. Er is weinig variatie tussen de sonderingen, zie Figuur IV - 4 en Figuur IV - 5. Te zien is dat er in het gebied sprake is van een slappe bodem met klei- en veenlagen.



Figuur IV - 4 Gebruikte sondering S25B01451



Figuur IV - 5 Gebruikte sondering S25B01399

Bijlage V Naverwerkingsprocedure Vmax

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 naverwerkingsprocedure gestart:

1. Er wordt vastgesteld op grond van hoeveel meetdagen de verzameling $V_{eff, max, i}$ – waarden tot stand is gekomen. Deze parameter wordt *#meetdagen* genoemd;
2. Alle gebeurtenissen met een $V_{eff, max, i}$ groter dan 0.02 op de fundering worden geselecteerd. Indien geen funderingspunt is gekozen, dan wordt gekozen voor een meetpunt op de laagst beschikbare verdieping waarbij $V_{eff, max, i}$ groter dient te zijn 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 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:

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

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 grenswaarde van 1.3 gehanteerd. Q wordt als volgt bepaald:

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

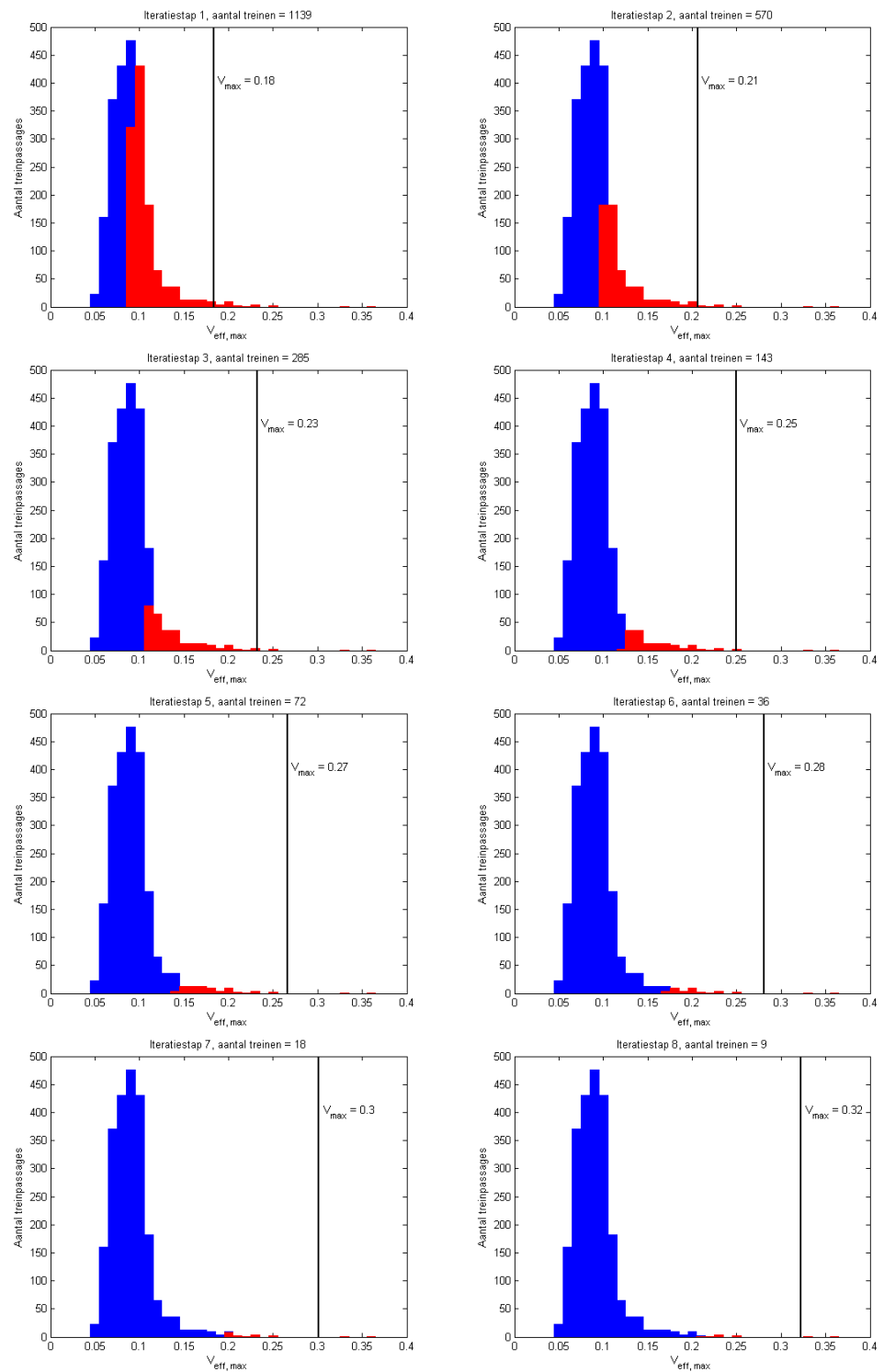
Hierbij wordt de $V_{max, Bts}$ zonder eventuele correctiefactor gebruikt. De onzekerheid in de toename Q wordt bepaald volgens de formule:

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

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 V - 1 per iteratiestap. In blauw zijn alle treinen weergegeven, in rood de in de bepaling van $V_{max, Bts}$ meegenomen treinen. De resultaten per iteratiestap zijn opgenomen in Tabel V - 1.



Figuur V - 1 Resultaten voor de acht iteratiestappen

Tabel V - 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 VI Resultaten trillingsonderzoek

Deze bijlage bevat grootformaten van de figuren uit hoofdstuk 6, in de volgende volgorde:

1. Trillingssterkte V_{max} in de huidige situatie
2. Trillingsintensiteit V_{per} in de huidige situatie
3. Trillingssterkte V_{max} in de plansituatie
4. Trillingsintensiteit V_{per} in de plansituatie
5. Toename van de trillingen Q

Legenda

Trillingssterkte Vmax

< 0.2

0.2 - 0.4

0.4 - 0.8

> 0.8

Niet-trillingsgevoelig of buiten studiegebied

Studiegebied

Legenda

Trillingsintensiteit Vper

< 0.05

0.05 - 0.10

0.10 - 0.15

> 0.15

Niet-trillingsgevoelig of buiten studiegebied

Studiegebied

Legenda

Trillingssterkte Vmax

< 0.2

0.2 - 0.4

0.4 - 0.8

> 0.8

Niet-trillingsgevoelig of buiten studiegebied

Studiegebied

Legenda

Trillingsintensiteit Vper

< 0.05

0.05 - 0.10

0.10 - 0.15

> 0.15

Niet-trillingsgevoelig of buiten studiegebied

Studiegebied

Legenda

- Afname, $Q < 1.00$
- Gelijkblijvend, $Q < 1.05$
- Niet voelbare toename, $Q < 1.20$
- Niet voelbare toename, $Q < 1.30$
- Voelbare toename, $Q > 1.30$
- Niet-trillingsgevoelig of buiten studiegebied
- Studiegebied