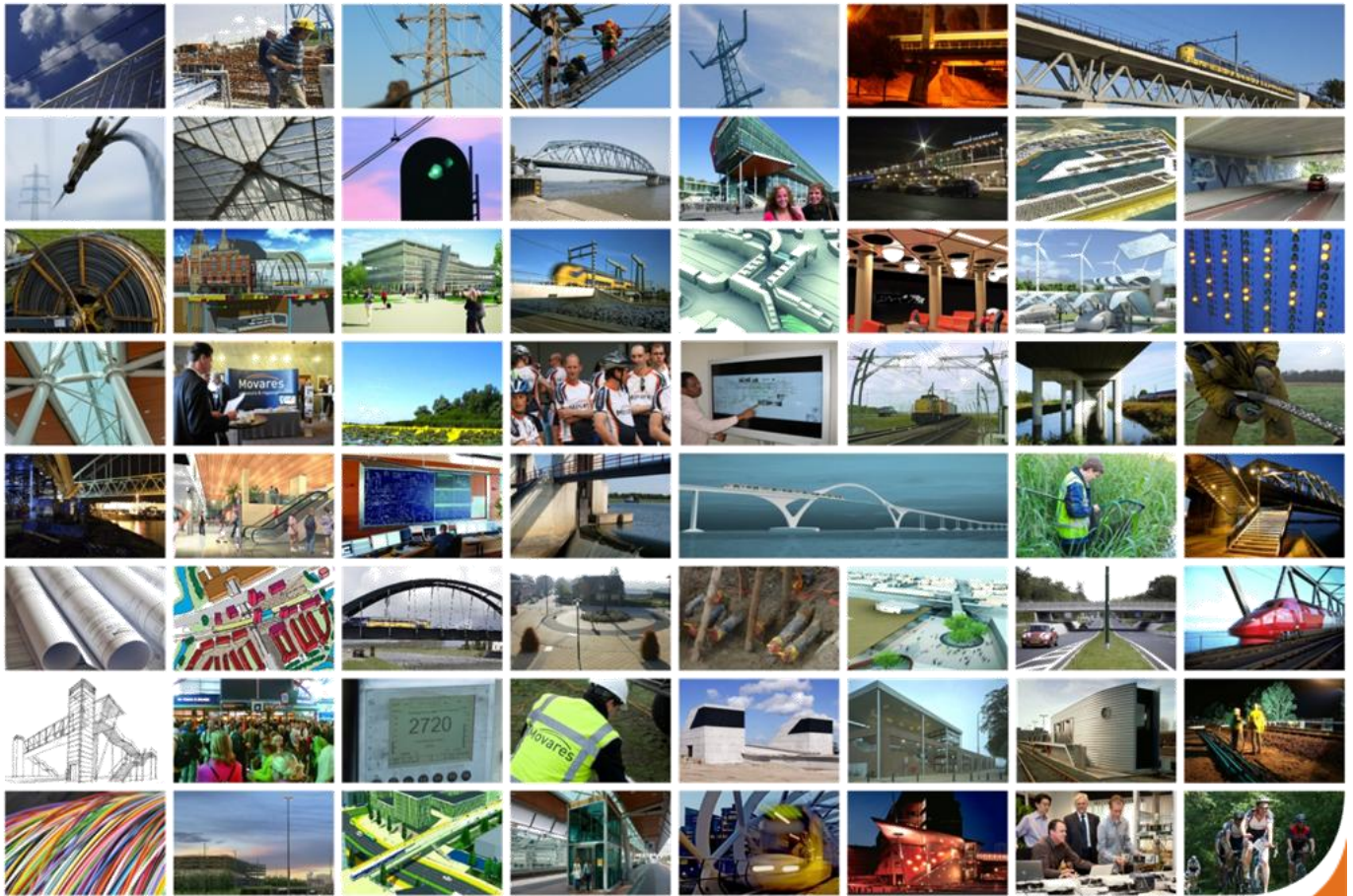




D79-PBO-KA-1600135

19 september 2016- Versie 2.0

Autorisatieblad

Ede OV-knoop

Trillingsonderzoek t.b.v. bestemmingsplan

	Naam	Paraaf	Datum
Opgesteld door	ir. P.M. Boon		26-08-2016
Gecontroleerd door	dr. ir. H.G. Stuit		29-08-2016
Vrijgegeven door	ir. P.M. Boon		19-09-2016

Samenvatting

Ede maakt zich klaar voor een groeiend aantal reizigers, bezoekers en inwoners. Met de komst van het Programma Hoogfrequent Spoor rijden en stoppen er in de toekomst meer treinen op Ede-Wageningen. Om de toename van het aantal treinen en reizigers mogelijk te maken, vernieuwt ProRail samen met de gemeente Ede en de NS het station en stationsgebied van station Ede-Wageningen. De wijzigingen in de sporenlay-out en het spoorgebruik kunnen leiden tot een toename van de trillingen in gebouwen in de omgeving. In het kader van de wijziging van het bestemmingsplan is daarom onderzoek uitgevoerd naar trillingen tijdens de bouw- en exploitatiefase, en de effecten daarvan op gebouwen, apparatuur en personen in de omgeving.

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- of 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 het project nergens leidt tot een voelbare toename van de trillingen. Alleen bij een voormalige dienstwoning (Dr. Hartogsweg 5 en 7) is sprake van een mogelijke overschrijding van het beoordelingskader. Op basis van de berekeningen wordt hier zowel in de huidige als in de toekomstige situatie een overschrijding van de trillingsintensiteit (tijdsgemiddelde van de trillingen) verwacht. Het verwijderen van de overweg bij de Sijsselt zal leiden tot een lichte reductie van de trillingen, maar deze wordt teniet gedaan door de toename van het aantal reizigerstreinen.

Voor deze woningen is een onderzoek naar trillingsreducerende maatregelen uitgevoerd. Uit dat onderzoek volgt dat maatregelen aan het spoor of tussen het spoor en de woningen niet doelmatig zullen zijn (te kostbaar of onvoldoende effectief). Ook maatregelen aan de woningen, zoals het onderheien van de woningen, zijn niet doelmatig door de hoge kosten, onvoldoende effectiviteit of doordat maatregelen ruimtetechnisch niet realiseerbaar zijn zonder maandenlange buitendienststellingen van het spoor. Tenslotte geldt nog dat de trillingen in de woningen ruim lager zijn dan de maximaal toelaatbare trillingssterkte ($V_{max} < 3.2$).

Uit het onderzoek naar trillingsschade volgt dat schade aan gebouwen op twee locaties niet kan worden uitgesloten tijdens het intrillen van damwanden voor de perrontunnels: bij twee (nog te bouwen) panden uit het plan *Kop van de Parkweg* en bij de Frisokazerne. Voor deze panden adviseren wij om, zodra de definitieve uitvoeringsmethode bekend is en nog steeds sprake is van mogelijke trillingsschade, trillingsarme bouwmethodes te overwegen. Wanneer dat niet mogelijk is, kan het uitvoeren van een bouwkundige vooropname, monitoring van trillingen tijdens de bouw en eventueel een goede fasering van het werk voorkomen dat schade aan deze gebouwen kan optreden.

Tenslotte is in het onderzoek gekeken naar verstoring van trillingsgevoelige apparatuur. In de omgeving van het project is geen trillingsgevoelige apparatuur aanwezig, zodat verstoring van apparatuur tijdens de realisatie- en exploitatiefase niet wordt verwacht.

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.
Referentiesituatie	Huidige situatie. In dit onderzoek wordt als jaartal 2016 gehanteerd
Plansituatie	Situatie die ontstaat na realisatie van Ede OV-knoop
VibraDyna	Een door Movares ontwikkeld trillingsmodel dat de trillingen van weg- en railverkeer berekent. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van versie 1.5. 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.
OTC	Ondergrondse Trillingsreducerende Constructie of trillingsscherm, een maatregel in de bodem om de trillingen af te laten nemen.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
Begrippenlijst	3
1 Inleiding	6
1.1 Achtergrond van dit rapport	6
1.2 Doel van het onderzoek	6
1.3 Algemeen onderzoekskader	6
1.4 Toegepaste kaders en uitgangspunten	6
1.5 Leeswijzer	6
2 Situatiebeschrijving	7
2.1 Onderzoeksgebied	7
2.2 Referentiesituatie	7
2.2.1. <i>Spoorgebruik</i>	8
2.2.2. <i>Snelheden</i>	8
2.2.3. <i>Treinintensiteiten</i>	8
2.3 Plansituatie (na realisatie project)	8
2.3.1. <i>Nieuwbouwplannen</i>	8
2.3.2. <i>Uitgangspunten</i>	9
2.3.3. <i>Spoorgebruik</i>	9
2.3.4. <i>Taludgeometrie</i>	9
2.3.5. <i>Treinsnelheid</i>	10
2.3.6. <i>Treinintensiteit</i>	10
2.3.7. <i>Cumulatie met overige trillingsbronnen</i>	10
3 Onderzoeksopzet	12
3.1 Onderzoek naar trillingsschade	12
3.2 Onderzoek naar trillingshinder	12
3.3 Onderzoek naar verstoring van apparatuur	13
4 Beoordelingskader trillingen	14
4.1 Beoordeling verstoring van gevoelige apparatuur	14
4.2 Beoordeling trillingshinder	14
4.3 Beoordeling trillingsschade	15
5 Trillingsschade	16
5.1 Inleiding	16
5.2 Schadeberekeningen	16
5.3 Aanbevelingen	18
6 Trillingshinder	19
6.1 Inleiding	19
6.2 Resultaten berekeningen	19
6.2.1. <i>Referentiesituatie</i>	19
6.2.2. <i>Plansituatie</i>	20
6.3 Vergelijking trillingscontouren	21
6.4 Aandachtslocaties	22

6.5	Afweging van maatregelen	24
6.5.1.	<i>Gevolgdde methodiek</i>	24
6.5.2.	<i>Mogelijke maatregelen</i>	25
6.5.3.	<i>Gebiedsbegrenzing</i>	26
6.5.4.	<i>Onderzochte maatregelen</i>	27
6.5.5.	<i>Conclusies</i>	29
7	Conclusies en aanbevelingen	30
	Colofon	31

Bijlage I VibraDyna

Bijlage II	Beoordelingskader
Bijlage III	Wijzigingen in sporenlay-out
Bijlage IV	Resultaten bodemonderzoek en maaiveldmetingen
Bijlage V	Mogelijke maatregelen
Bijlage VI	Resultaten trillingsonderzoek

1 Inleiding

1.1 Achtergrond van dit rapport

Ede maakt zich klaar voor een groeiend aantal reizigers, bezoekers en inwoners. Met de komst van het Programma Hoogfrequent Spoor rijden en stoppen er in de toekomst meer treinen op Ede-Wageningen. Om de toename van het aantal treinen en reizigers mogelijk te maken, vernieuwt ProRail samen met de gemeente Ede en de NS het station en stationsgebied van station Ede-Wageningen.

Het project *Ede OV-knoop* is onderdeel van het project *Ede Spoorzone*, waarbij de ruimere spoorzone rond het station wordt vernieuwd. Hierbij wordt het station vernieuwd en uitgebreid, een groot aantal woningen gebouwd, worden spoorwegovergangen vervangen door onderdoorgangen of viaducten en wordt de sporenlay-out aangepast om het grotere aantal binnenkomende en vertrekkende treinen mogelijk te maken.

De wijzigingen in de sporenlay-out en het spoorgebruik kunnen leiden tot een toename van de trillingen in gebouwen in de omgeving. In het kader van de wijziging van het bestemmingsplan is daarom onderzoek uitgevoerd naar trillingen tijdens de bouw- en exploitatiefase, en de effecten daarvan op gebouwen, apparatuur en personen in de omgeving.

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- of 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 Algemeen onderzoekskader

Het projectgebied betreft het tracédeel tussen de spoorwegovergang bij de Kerkweg (km. 74.43, wordt vervangen door een onderdoorgang) en iets voorbij de spoorwegovergang bij de Sijsselt (km. 76.58) op de spoorlijn Arnhem-Utrecht. Verder behoort een klein deel van de spoorlijn Amersfoort-Ede bij het onderzoeksgebied, namelijk het gedeelte vanaf km. 29.3. Buiten deze zone vinden geen fysieke wijzigingen plaats. Voor het trillingsonderzoek wordt, in verband met mogelijke effecten buiten deze zone, een ruimer onderzoeksgebied gehanteerd.

1.4 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.

1.5 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 trillingsschade en hoofdstuk 6 de beoordeling van trillingshinder.

2 Situatiebeschrijving

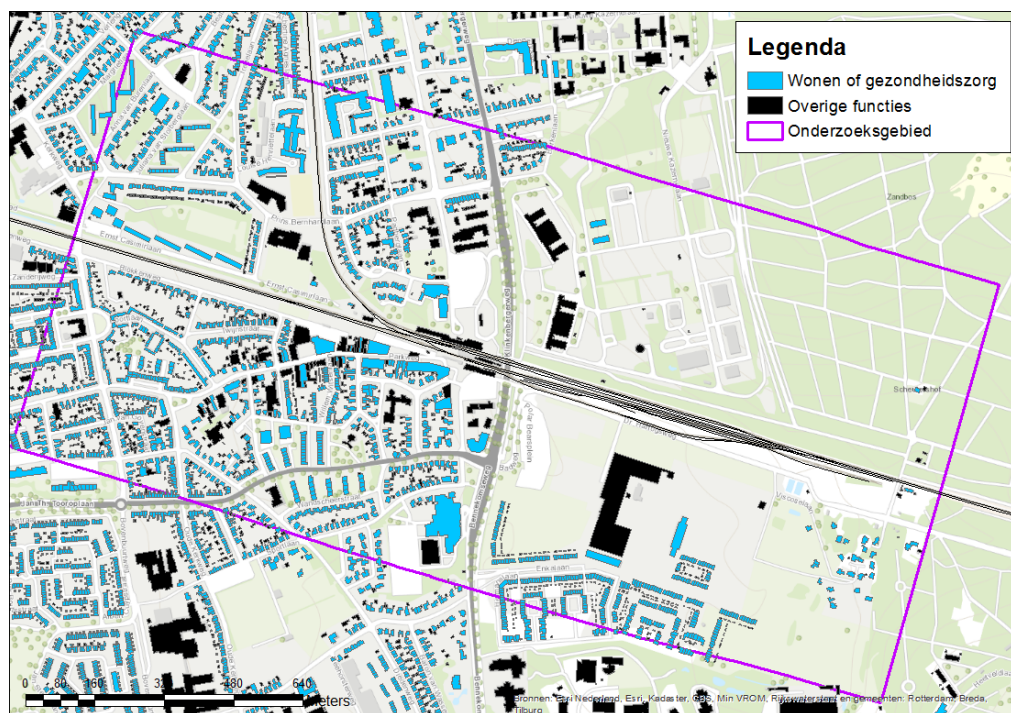
In het trillingsonderzoek wordt onderscheid gemaakt tussen twee situaties:

1. De referentiesituatie conform de Bts, in 2016;
2. De plansituatie, de situatie die ontstaat na realisering van het project *Ede OV-knoop*.

2.1 Onderzoeksgebied

Het tracédeel waarop dit trillingsonderzoek betrekking heeft, is het gebied tussen de spoorwegovergang bij de Kerkweg (km. 74.43, wordt vervangen door een onderdoorgang) en iets voorbij de spoorwegovergang bij de Sijsselt (km. 76.58, wordt vervangen door een fietsviaduct) op de spoorlijn Arnhem-Utrecht. Verder behoort een klein deel van de spoorlijn Amersfoort-Ede bij het onderzoeksgebied, namelijk het gedeelte vanaf km. 29.3. In dit gebied vinden wijzigingen in sporenlay-out en spoorgebruik plaats ten gevolge van het project. Buiten deze zone vinden geen fysieke wijzigingen plaats. Voor het trillingsonderzoek wordt, in verband met mogelijke effecten buiten deze zone, een ruimer onderzoeksgebied gehanteerd.

Het voor dit onderzoek gehanteerde onderzoeksgebied (zone van 500 meter rondom de wijzigingen) en de trillingsgevoelige bestemmingen (functies *wonen* of *gezondheidszorg*) zijn weergegeven in Figuur 2-1.



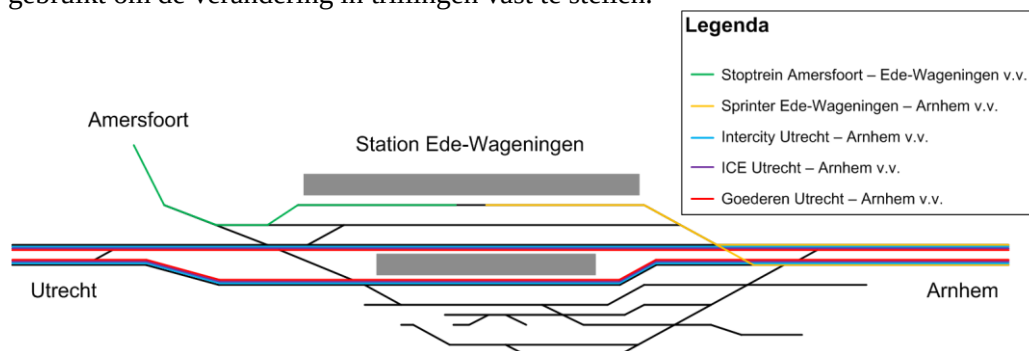
Figuur 2-1 Onderzoeksgebied trillingsonderzoek

2.2 Referentiesituatie

Deze paragraaf bevat een beschrijving van de referentiesituatie. Als referentiesituatie conform het vigerende beleidskader, de Bts, geldt de spoorligging van 2016, vóór aanvang van de werkzaamheden ten behoeve van het project. De beoordeling van trillingshinder vindt plaats ten opzichte van deze situatie. Alle overige gegevens, zoals spoorgebruik en treinintensiteiten, worden ook genomen uit dit referentiejaar.

2.2.1. Spoorgebruik

Het spoorgebruik in de referentiesituatie is weergegeven in Figuur 2-2. De gegevens over het spoorgebruik en de ligging tot de sporen in de referentie- en plansituatie zijn gebruikt om de verandering in trillingen vast te stellen.



Figuur 2-2 Lijnvoeringsschema in referentiesituatie

2.2.2. Snelheden

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

2.2.3. Treinintensiteiten

De treinaantallen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 2-1.

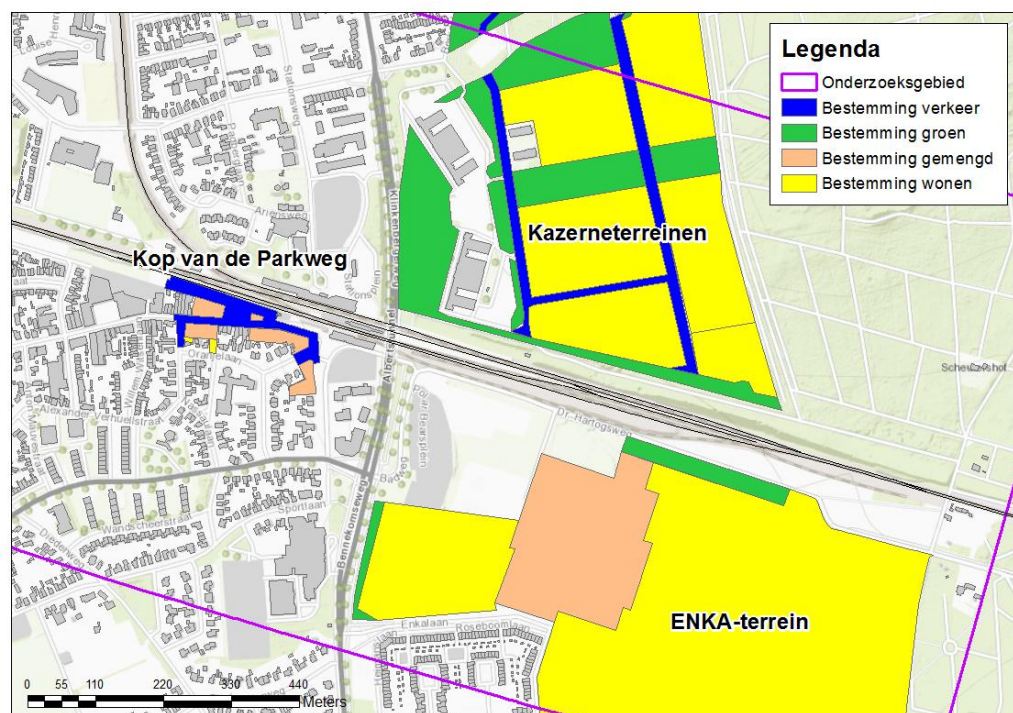
2.3 Plansituatie (na realisatie project)

Deze paragraaf bevat een beschrijving van de plansituatie die ontstaat na realisatie van het project. De belangrijkste wijzigingen zijn veranderingen in spoorligging, spoorgebruik en het verwijderen van een aantal wissels rond het station.

2.3.1. Nieuwbouwplannen

In het onderzoeksgebied vinden een aantal wijzigingen plaats in bebouwing. Zo wordt het station vernieuwd binnen het programma Ede Spoorzone, worden er nieuwe woningen gepland bij de Parkweg (bestemmingsplan *Kop van de Parkweg*), op het voormalige ENKA-terrein (bestemmingsplan *ENKA-terrein*) en op de kazerneterreinen (bestemmingsplan *Kazerneterreinen Ede*), zie Figuur 2-3. Van deze bestemmingsplannen is met name het bestemmingsplan *Kop van de Parkweg* relevant, dit bevindt zich op korte afstand tot het spoor. Het bestemmingsplan *ENKA-terrein* kent woningen op meer dan 60 meter tot het spoor, de minimale afstand tot het spoor bij het bestemmingsplan *Kazerneterreinen Ede* bedraagt 65 meter. Van beide laatste bestemmingsplannen zijn de exacte woonvlakken en gebouwafmetingen nog niet volledig bekend, zodat een gedetailleerde berekening niet kan worden uitgevoerd. Bij woningen met voldoende solide bouw en betonnen vloeren zullen bij beide bestemmingsplannen echter geen overschrijdingen optreden van de grenswaarden, gegeven de bodembouw, maximale bouwhoogte, afstand tot het spoor en het treinverkeer. In het vervolg van dit onderzoek worden deze beide bestemmingsplannen daarom niet nader kwantitatief beschouwd¹.

¹ Om trillingshinder te voorkomen voor beide niet kwantitatief beschouwde bestemmingsplannen, adviseren wij wel om bij de woningen die binnen 100 meter van het spoor worden gebouwd, in het ontwerp rekening te houden met trillingen ten gevolge van het spoor.



Figuur 2-3 Bestemmingsplannen in onderzoeksgebied

Bron: www.ruimtelijkeplannen.nl

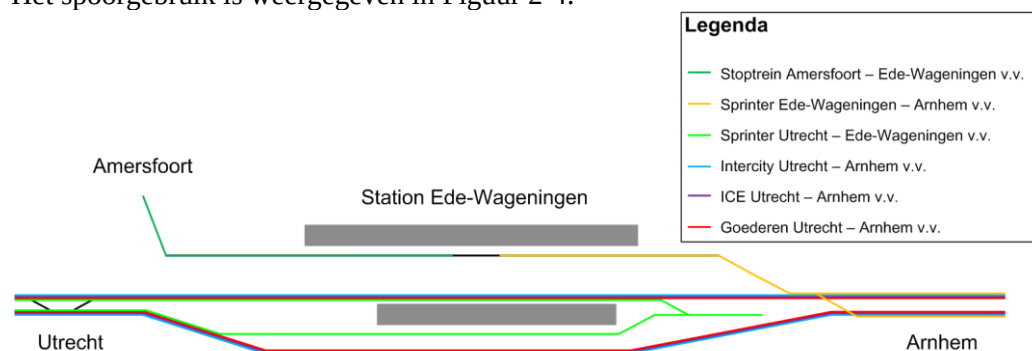
2.3.2. Uitgangspunten

Voor de plansituatie is in het trillingsonderzoek gebruik gemaakt van de tekeningen van het project *Ede OV-knoop*². Ten opzichte van de referentiesituatie zijn in de plansituatie de volgende zaken gewijzigd:

1. Sporenlay-out (en samenhangend ook het spoorgebruik). Het ontwerp voorziet in een reductie van het aantal sporen en de realisatie van een extra perron. Met name het aantal rangeersporen en het aantal wissels neemt af. Een beschrijving van de wijzigingen in de sporenlay-out is opgenomen in Bijlage III;
2. Toename van het aantal reizigerstreinen. Zo komt er een nieuwe sprinterverbinding tussen Utrecht Centraal en Ede-Wageningen, en neemt het aantal intercity's toe.

2.3.3. Spoorgebruik

Het spoorgebruik is weergegeven in Figuur 2-4.



Figuur 2-4 Lijnvoeringsschema in plansituatie

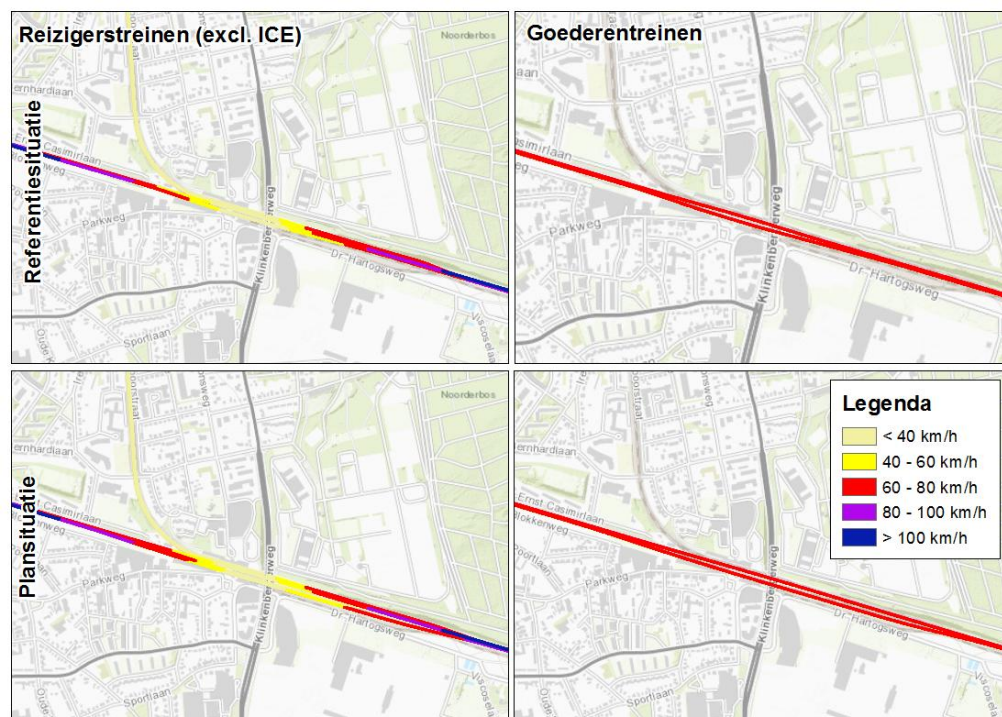
2.3.4. Taludgeometrie

Het project leidt niet tot significante wijzigingen in taludgeometrie. De terreinhoogte is gebaseerd op de hoogtekaarten van het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN2).

² Tekeningen Ede Spoorzone, OV-knoop, Movares, C30-RVL-AU-1400374, 24 november 2014

2.3.5. Treinsnelheid

Het project leidt niet tot wijzigingen in rijnsnelheid, zie Figuur 2-5.



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

2.3.6. Treinintensiteit

De treinintensiteiten in de referentie- en plansituatie zijn weergegeven in Tabel 2-1. In deze tabel staat *Ref* voor referentiesituatie en *Plan* voor plansituatie. De treinaantallen zijn etmaalgemiddelden, afgeleid van jaarprognoses, en gebaseerd op de PHS prognose voor de plansituatie. Vooral het aantal intercity's neemt sterk toe, daarnaast is er een extra sprinterverbinding tussen Utrecht en Ede-Wageningen.

Tabel 2-1 Treinaantallen per uur per richting

Treintype en verbinding	Dag (7:00 – 19:00)		Avond (19:00 – 23:00)		Nacht (23:00 – 7:00)	
	Ref	Plan	Ref	Plan	Ref	Plan
Intercity Utrecht – Arnhem v.v.	3.50	6.00	3.00	6.00	0.53	1.93
ICE Utrecht – Arnhem v.v.	0.64	1.00	0.79	1.00	0.32	0.32
Sprinter Utrecht – Ede-Wageningen v.v.	-.--	3.00	-.--	3.00	-.--	0.96
Sprinter Ede-Wageningen Arnhem v.v.	1.61	2.00	1.07	2.00	0.48	0.64
Stoptrein Amersfoort – Ede-Wageningen v.v.	1.92	1.99	1.94	2.00	0.76	0.80
Goederen Utrecht – Arnhem v.v.	0.10	0.07	0.05	0.08	0.04	0.05

2.3.7. 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. In de

praktijk worden alleen die trillingsbronnen beschouwd die parallel aan het spoor lopen;

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 onderzoeksgebied worden alle wegen parallel aan het spoor (en op korte afstand van het spoor) slechts incidenteel door vrachtverkeer bereden, zodat niet wordt voldaan aan beide condities. Er zal daarom geen significante cumulatie optreden.

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 onderzoeksgebied is schade aan gebouwen tijdens de exploitatiefase zeer onwaarschijnlijk. De verwachte trillingen bij gebouwen zijn ruim lager dan de grenswaarden uit de SBR A-richtlijn.

Ten behoeve van het onderzoek naar trillingsschade tijdens de bouwfase zijn met behulp van de CUR166-rekenregels contouren getrokken rond bouwwerkzaamheden die aanleiding kunnen geven tot trillingsschade. Met behulp van deze contouren is geanalyseerd waar schade aan bebouwing mogelijk is. Voor de gebouwen die binnen deze afstanden vallen, wordt geadviseerd om een vooropname uit te voeren. Het onderzoek naar trillingsschade wordt beschreven in hoofdstuk 5.

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 onderzoeksgebied. Met dit model kan voor elke woning een uitspraak worden gedaan over de kans op het wel of niet overschrijden van de streefwaarden uit de Bts na realisatie van het project.

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

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.

Met het model worden voor alle gebouwen in het onderzoeksgebied in de 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 6.

3.3 Onderzoek naar versterking 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, worden gevisiteerd om vast te stellen of er sprake is van gevoelige apparatuur.

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 alle drie de aspecten van trillingen beschouwd. De gehanteerde beoordelingsmethodiek voor zowel verstoring van gevoelige apparatuur, trillingshinder als voor trillingsschade wordt in dit hoofdstuk nader toegelicht.

4.1 Beoordeling verstoring van gevoelige apparatuur

In het kader van dit onderzoek is 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.

4.2 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 het bestemmingsplan maatregelen dient te bevatten ter mitigatie van de trillinghinder die zal ontstaan als gevolg van de aanleg of wijziging van een spoorweg;
2. Een introductie van een kosteneffectiviteitscriterium. In dit kosteneffectiviteitscriterium wordt uitsluitend gegeven of bepaalde maatregelen, gezien de kosten, effectiviteit, milieu- en maatschappelijke impact en de mate van trillingshinder voldoende kosteneffectief zijn. In het bestemmingsplan wordt een richtbedrag van € 47.000 per woning met overschrijdingen genoemd⁴. Voor kantoren wordt een bedrag van € 500 per werkplek aangehouden⁵;
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 grootheid $V_{max,stat}$ 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 Acoustics⁶;
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

⁴ 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

⁵ Hiervoor is het richtbedrag voor woningen gecorrigeerd voor bezettingsgraad, verblijfsduur, en verschillen tussen dag en nacht.

⁶ Koopman, A., LA.131001a.M04

in de plan- en referentiesituatie⁷. Bij metingen met een hoge R -waarde wordt deze Q -waarde gecorrigeerd voor de lagere reproduceerbaarheid.

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

4.3 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 van de SBR A-richtlijn is een omschrijving opgenomen in Bijlage II.

⁷ Voor nieuwbouwplannen bestaat er geen referentiesituatie, hier wordt beoordeeld op de Bts voor nieuwe situaties, zie ook Bijlage II.

5 Trillingsschade

5.1 Inleiding

Schade door trillingen ten gevolge van treinverkeer komt in de praktijk niet vaak voor in Nederland. Uit de modelberekeningen die zijn uitgevoerd in het voorliggende onderzoek blijkt dat de trillingssterktes in alle gebouwen in het onderzoeksgebied lager zijn dan de grenswaarden uit de SBR A-richtlijn.

Tijdens de realisatiefase van *Ede OV-knoop* 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 heiwerkzaamheden.

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

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

1. Het realiseren van perrontunnels bij het station. Deze tunnels worden schuivend ingebracht en op staal gefundeerd, voor het aanbrengen zijn echter wel damwanden nodig;
2. Het heien van de palen t.b.v. de kolommen voor de perronoverkappingen. Het inbrengen van deze palen kan leiden tot trillingsschade aan de omgeving;
3. Het realiseren van de parkeergarage, waarbij damwanden of CSM-wanden (diepwandmethode) worden aangebracht. Bij het aanbrengen van damwanden is trillingsschade aan gebouwen in de omgeving mogelijk, CSM-wanden worden trillingsarm aangebracht.

Voor alle werkzaamheden geldt dat momenteel nog sprake is van een Voorlopig Ontwerp (VO), de uitvoeringsmethode staat nog niet vast.

5.2 Schadeberekeningen

Voor de werkzaamheden is uitgegaan van het VO van het station, de uitgangspunten voor de berekeningen zijn weergegeven in Tabel 5-1.

Tabel 5-1 Objecten en werkzaamheden

Object	Type werkzaamheden
Perrontunnels	Damwanden, AZ26-700N, 8 m lang
Kolommen perronoverkappingen	Palen, 300 x 300 mm, 8 m lang.
Parkeergarage	Damwanden, AZ26-700N, 8 m lang

De trillingscontouren zijn berekend op basis van de CUR166-richtlijn, met de uitgangspunten zoals weergegeven in Tabel 5-2. Het meest gelijkende bodemprofiel uit de CUR166 is dat van de Maasvlakte, dit kent ook een sterk zandige bodemopbouw.

Tabel 5-2 Uitgangspunten conform CUR166

Type werkzaamheden	Uitgangspunten
Intrillen damwanden	Bodemprofiel Maasvlakte (o.b.v. sonderingen in Bijlage IV) Hoogfrequent trillen Type AZ26-700N, 8 m lang Slagkracht blok F = 1150 kN Bodemdamping $\alpha = 0.01 \text{ m}^{-1}$ $V_0 = 6.7 \text{ mm/s}$ $C_{vel} = 0.007 \text{ mm/s kN}^{-1}$ Betrouwbaarheid model = 95%
Palen	Bodemprofiel Maasvlakte (o.b.v. sonderingen in Bijlage IV) Heien Type betonnen paal, 300 x 300 mm, 8 m lang Slagkracht blok F = 1150 kN Bodemdamping $\alpha = 0.01 \text{ m}^{-1}$ $V_0 = 0.106 \text{ mm/s Nm}^{-1/2}$ Betrouwbaarheid model = 95%

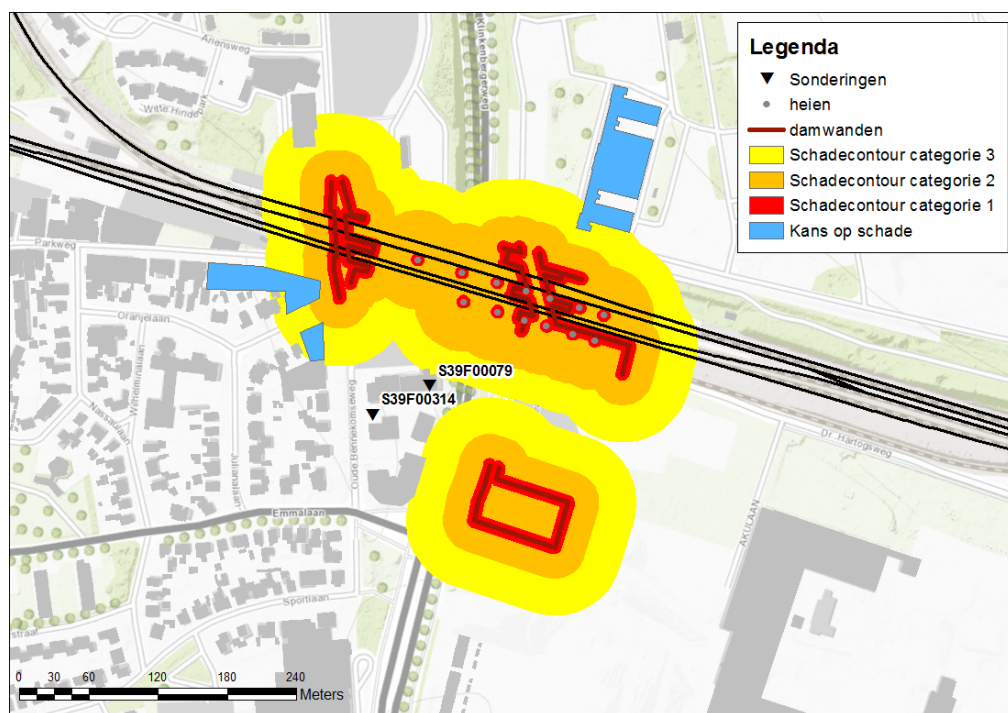
Op basis van bovenstaande uitgangspunten resulteren de volgende contourafstanden voor gebouwen, zie Tabel 5-3.

Tabel 5-3 Contourafstanden waarbinnen schade niet kan worden uitgesloten

Type gebouw	Intrillen damwanden	Heien palen
Categorie 1 (monumentaal)	59 m	69 m
Categorie 2 (metselwerk)	27 m	43 m
Categorie 3 (stalen draagconstructies)	6 m	6 m

De contourafstanden en panden waar schade niet kan worden uitgesloten op basis van de huidige (conservatieve) berekeningen, zijn weergegeven in Figuur 5-1. Panden van voor 1920 zijn hier beschouwd als panden van categorie 3 (monumentaal). Bij de volgende panden kan een overschrijding niet worden uitgesloten:

- Nieuwbouw in het plan *Kop van de Parkweg* (twee panden). Afhankelijk van het moment van bouwen (fasering plan *Kop van de Parkweg* i.r.t. realisatie perrontunnel) is hier een kleine kans op trillingsschade ten gevolge van het intrillen van damwanden voor de westelijke perrontunnel. Wanneer de woningen eerder gebouwd zijn, adviseren wij om in de fasering van het intrillen van de damwanden te starten vanaf het noorden en de trillingen aan de gevels van de gebouwen te monitoren. Zo kan tijdig worden ingegrepen als de trillingen hoger dreigen te worden dan de grenswaarden. Eventueel kan overwogen worden om het meest zuidelijke gedeelte van de damwand trillingsarm aan te brengen, of voor te boren;
- Frisokazerne, Nieuwe Kazernelaan 2 (monumentaal pand uit 1904). Hier kan schade niet worden uitgesloten ten gevolge van het intrillen van damwanden voor de oostelijke perrontunnel. Voor dit gebouw adviseren wij, wanneer de definitieve uitvoeringsmethode is gekozen en damwanden worden ingetrild, een vooropname uit te voeren en de trillingen te monitoren tijdens het intrillen van de damwanden. Eventueel kan overwogen worden om het meest noordelijke gedeelte van de damwand trillingsarm aan te brengen, of voor te boren.



Figuur 5-1 Schadecontouren en panden met kans op schade

5.3 Aanbevelingen

Voor locaties waar een kans op trillingsschade niet is uit te sluiten, adviseren wij nader onderzoek. Zodra een verdere detaillering van het station en de parkeergarage heeft plaatsgevonden en de exacte afmetingen van de te gebruiken palen en de realisatiemethode bekend zijn, kunnen de contouren meer exact worden ingeschat. Voor panden met een kans op schade adviseren wij een bouwkundige vooropname uit te voeren en trillingen tijdens de bouwwerkzaamheden te monitoren.

6 Trillingshinder

6.1 Inleiding

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

1. Treinverkeer: spoorligging, spoorgebruik, treintypes, rijsnelheden, 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.

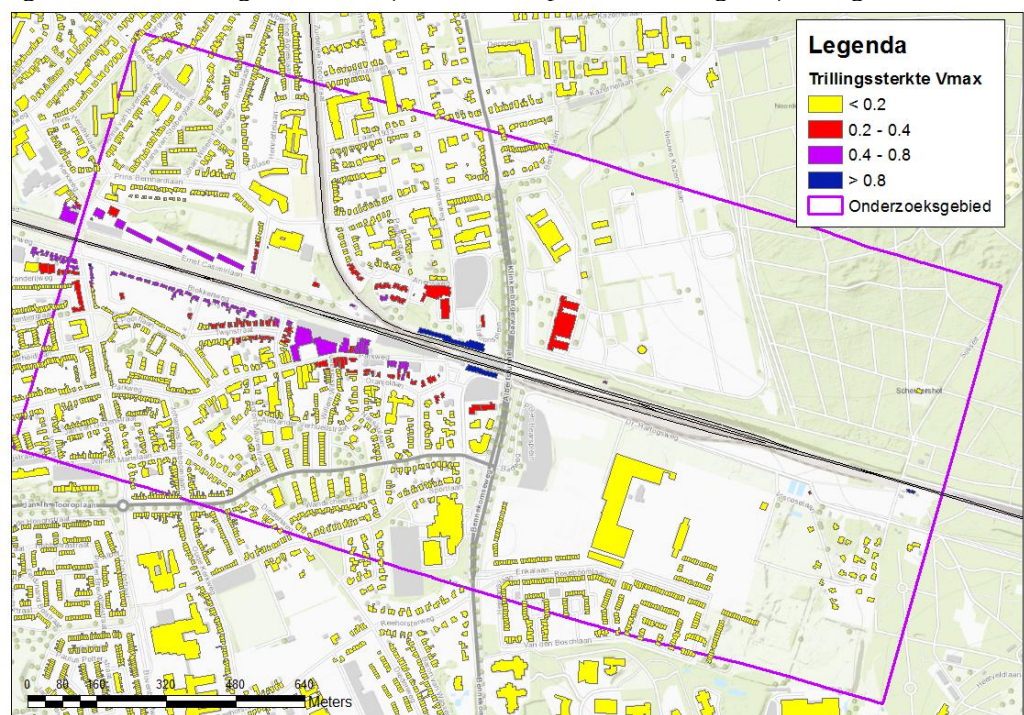
De berekening is frequentieafhankelijk uitgevoerd, hiermee wordt een zo nauwkeurig mogelijke predictie verkregen. Uit eerdere onderzoeken blijkt dat het model VibraDyna een betrouwbaarheid van 95 procent heeft, wat gebruikelijk is bij trillingsonderzoeken, zie Bijlage I. Dit betekent dat maximaal 5 procent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

6.2 Resultaten berekeningen

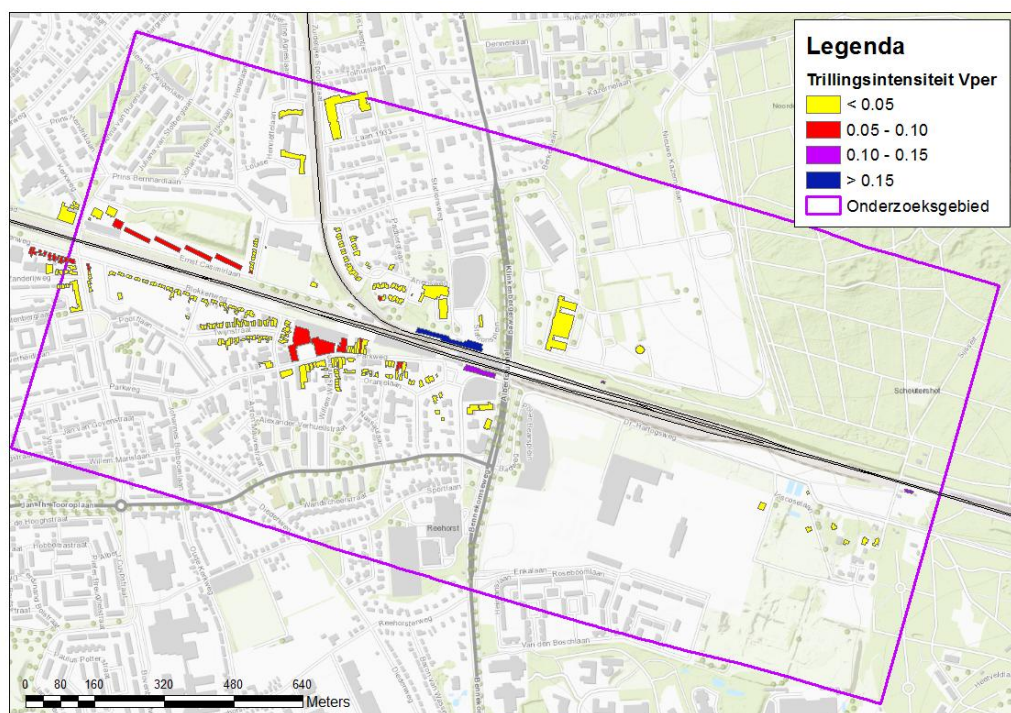
Met behulp van VibraDyna zijn voor alle gebouwen binnen 500 meter van de sporen de trillingssterkte V_{max} en de trillingsintensiteit V_{per} bepaald. De figuren zijn groter weergegeven in Bijlage VI.

6.2.1. Referentiesituatie

De trillingssterkte (95 procent bovengrens) in de referentiesituatie is weergegeven in Figuur 6-1, de trillingsintensiteit (eveneens 95 procent bovengrens) in Figuur 6-2.



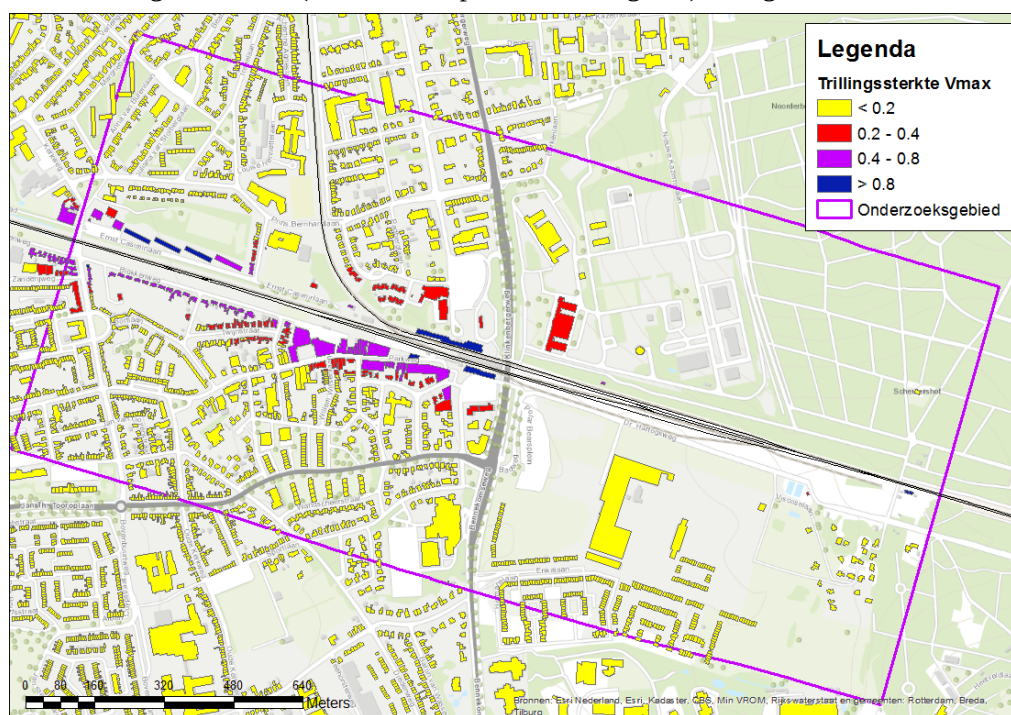
Figuur 6-1 Trillingssterkte in gebouwen in referentiesituatie (95 procent bovengrens)



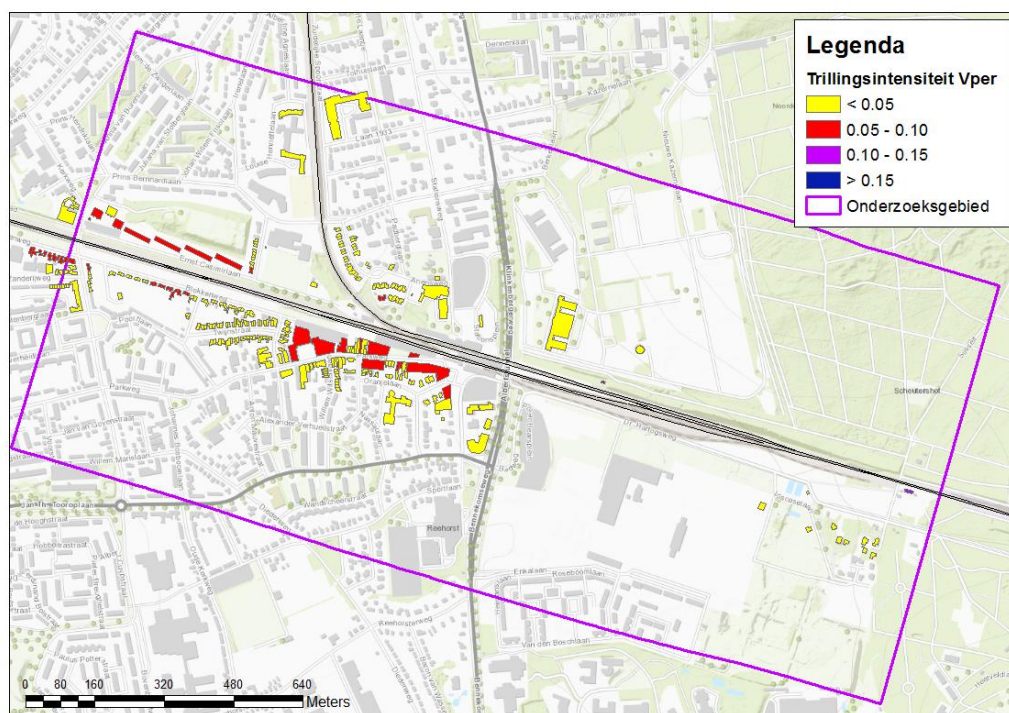
Figuur 6-2 Trillingsintensiteit in gebouwen in referentiesituatie (95 procent bovengrens)

6.2.2. Plansituatie

De trillingssterkte (95 procent bovengrens) in de plansituatie is weergegeven in Figuur 6-3, de trillingsintensiteit (eveneens 95 procent bovengrens) in Figuur 6-4.



Figuur 6-3 Trillingssterkte in gebouwen in plansituatie (95 procent bovengrens)

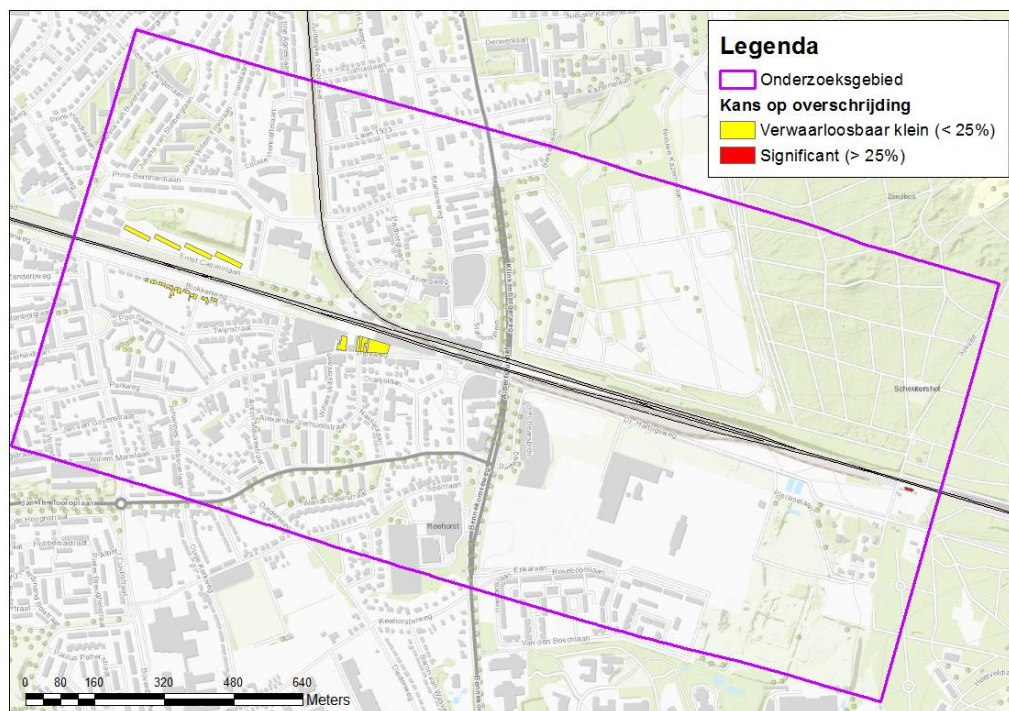


Figuur 6-4 Trillingsintensiteit in gebouwen in plansituatie (95 procent bovengrens)

De trillingsintensiteit V_{per} is in vrijwel alle gebouwen lager dan de grenswaarde. Alleen in de voormalige dienstwoning (Dr. Hartogsweg 5 en 7) die dicht op het spoor staat is de trillingsintensiteit V_{per} in de plansituatie mogelijk hoger dan de grenswaarde ($V_{per} > 0.1$). Dit zijn de paar gearceerde woningen in Figuur 6-4, helemaal rechts in het onderzoeksgebied.

6.3 Vergelijking trillingscontouren

Voor de inventarisatie van aandachtslocaties worden de waarden van V_{max} in de referentie- en plansituatie en de waarde van V_{per} in de plansituatie voor elk gebouw beoordeeld op de Bts. Het resultaat van de beoordeling is weergegeven in Figuur 6-5. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen gebouwen met een verwaarloosbaar kleine kans op een overschrijding (geel gearceerd), en gebouwen waar een redelijke tot grote kans is op een overschrijding (rood gearceerd). Gebouwen met een afname van de trillingen of met gelijkblijvende trillingshinder zijn niet gearceerd.



Figuur 6-5 Beoordeling van trillingshinder

6.4 Aandachtslocaties

Uit de berekeningen van de trillingen kunnen onderstaande conclusies worden getrokken:

- Bij een voormalige dienstwoning (Dr. Hartogsweg 5 en 7) die dicht op het spoor staat is de trillingsintensiteit V_{per} hoger dan de grenswaarde ($V_{per} > 0.1$). Ook in het nieuw te bouwen station is er (afhankelijk van de constructie, het gebouw is niet weergegeven op de kaarten) een overschrijding van de grenswaarde voor de trillingsintensiteit mogelijk. Dit komt doordat deze gebouwen dicht op het spoor liggen, waarbij hoge trillingen optreden. Bij de voormalige dienstwoning neemt de trillingssterkte V_{max} waarschijnlijk af door het verwijderen van de overweg (Sijsselt), maar deze afname in trillingssterkte wordt gecompenseerd door een toename van het aantal reizigerstreinen, zodat de trillingsintensiteit V_{per} gelijk blijft;
- Bij enkele bestaande woningen aan de Parkweg en bij daar geplande nieuwbouw⁸ neemt de trillingssterkte naar verwachting met 10 tot 15 procent toe ($Q = 1.10$ tot 1.15) door het dichterbij komen van het spoor Utrecht – Arnhem. De kans⁹ dat Q hier groter is dan 1.30 of V_{per} hoger dan 0.1 is kleiner dan 10 procent, en daarmee is de kans op een overschrijding verwaarloosbaar klein;
- Bij enkele bestaande woningen aan de Blokkenweg neemt de trillingssterkte toe met naar verwachting 7 tot 17 procent ($Q = 1.07$ tot 1.17) door het realiseren van overloopwissels. De kans dat Q hier groter is dan 1.30 of V_{per} hoger dan 0.1 is kleiner dan 20 procent, en daarmee is de kans op een overschrijding klein;

⁸ E.e.a. is wel afhankelijk van de uiteindelijke bouwstijl van de nieuwbouwwoningen. Wij adviseren om tijdens de verdere detaillering van deze plannen wel rekening te houden met trillingen van treinverkeer, gezien de relatief beperkte afstand tot het spoor.

⁹ Deze kans wordt bepaald in het rekenmodel, in deze kans is de R -waarde zoals deze bepaald wordt conform de Bts, verdisconteerd, alsmede onzekerheden met betrekking tot de veranderingen in het projectgebied, zoals de wijzigingen in sporenlay-out.

- Bij de appartementen aan de Ernst Casimirlaan neemt de trillingssterkte toe met naar verwachting 10 tot 20 procent ($Q = 1.10$ tot 1.20) door het realiseren van overloopwissels. De kans dat Q hier groter is dan 1.30 of V_{per} hoger dan 0.1 is kleiner dan 25 procent, en daarmee is de kans op een overschrijding klein.

Het voorliggende onderzoek kent een kans van maximaal 25 procent op een overschrijding voor de meeste gebouwen, uitgezonderd het nieuwe stationsgebouw en de voormalige dienstwoning aan de Dr. Hartogsweg. Deze kans van maximaal 25 procent wordt voor dit onderzoek acceptabel geacht om de volgende redenen:

- 100 procent zekerheid omtrent het wel of niet optreden van een overschrijding kan nooit worden bereikt. Het vergroten van de nauwkeurigheid van het voorliggende onderzoek kan bijvoorbeeld worden bereikt door metingen in woningen uit te voeren, maar ook na het uitvoeren daarvan kan volledige zekerheid niet worden verkregen, zo leert de ervaring bij andere, vergelijkbare projecten¹⁰;
- De wijzigingen in het project zijn relatief beperkt (dat vertaalt zich in een lage kans op een overschrijding). Zo blijft de rijsnelheid en het type treinen gelijk, en komen de treinen voor vrijwel het gehele onderzoeksgebied niet dichterbij te rijden. De spoorvernieuwing in het kerngebied en het verwijderen van wissels zorgt voor een verbetering van de trillingssituatie. Het enige ongunstige effect van het project is dat op enkele posities nieuwe wissels worden gerealiseerd. De ervaring leert echter dat zeker bij nieuwe wissels de trillingen slechts beperkt, en niet voelbaar toenemen op afstanden van meer dan 40 meter, zoals het geval is bij de Ernst Casimirlaan en de Blokkenweg;
- De trillingen zijn in alle gebouwen ruim lager dan de grenswaarde ($V_{max} < 3.2$) waarbij maatregelen *moeten* worden getroffen.

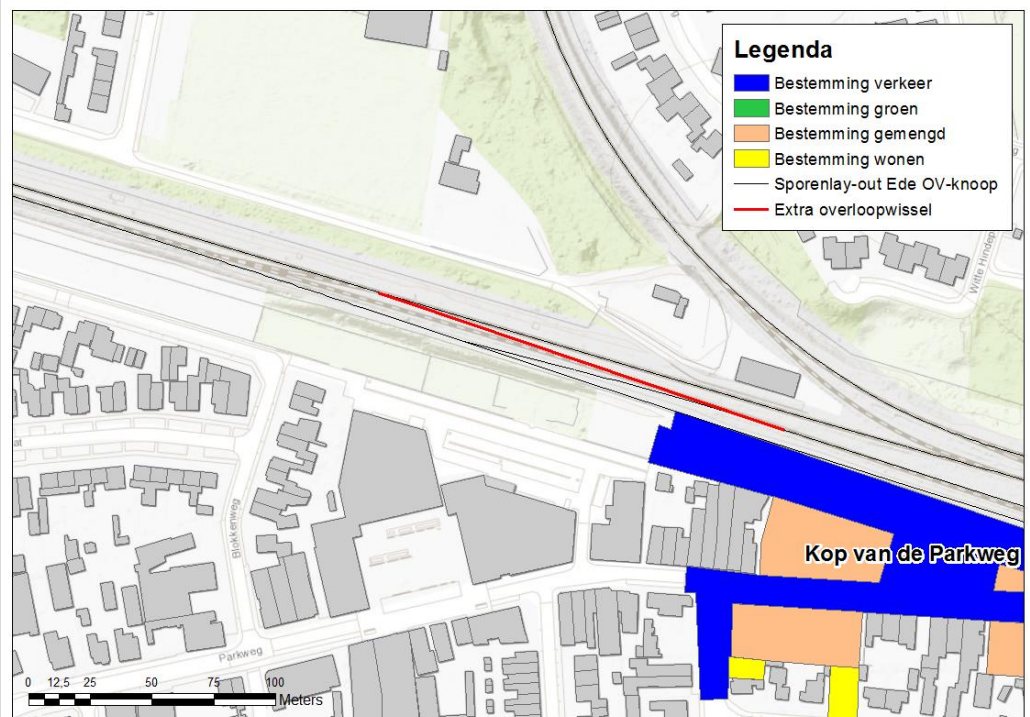
Bovenstaande redenering geldt ook voor locaties met een kleine of verwaarloosbaar kleine kans op een overschrijding, zoals bij de Parkweg.

Als gevolg van ontwerpwijzigingen is een extra overloopwissel toegevoegd na totstandkoming van het trillingsonderzoek t.b.v. het bestemmingsplan. De locatie van dit wissel is weergegeven in Figuur 6-6. Dit extra wissel wordt gebruikt door sprinters vanuit Ede-Wageningen naar Utrecht-Centraal en heeft geen invloed op de resultaten van dit onderzoek, omdat de beoordelingswaarden van V_{max} , V_{per} en Q niet significant wijzigen:

- De waarde van V_{max} wordt bepaald door goederentreinen op de corridor Utrecht – Arnhem, deze rijden niet over dit extra wissel heen. De waarde van V_{max} verandert daarom niet door de realisatie van deze extra wissel. Ook de Q -waarde wijzigt niet;
- De waarde van V_{per} wordt beïnvloed door alle treinen. Voor intercity's en goederentreinen op de corridor Utrecht – Arnhem verandert de trillingssterkte niet, de (langzaam rijdende) sprinters tussen Utrecht en Ede-Wageningen krijgen een hogere trillingssterkte, maar vanwege de lage rijsnelheid en het trillingsarme treintype (SLT), zullen deze trillingen niet bijdragen aan de waarde van V_{per} (alleen trillingssterktes van meer dan 0.10 worden meegenomen in V_{per}).
De treinen op de corridor Arnhem – Utrecht rijden ook over het extra overloopwissel en krijgen een hogere trillingssterkte. Deze treinen rijden echter op een veel grotere afstand tot de bebouwing, waardoor de invloed van het wissel al grotendeels is uitgedempt. De goederentreinen hebben hier wel een trillingssterkte die hoger is dan 0.10 , en deze neemt licht toe, waardoor de waarde van V_{per} ook licht

¹⁰ Het effect van nieuwe wissels en de vernieuwing van het spoor is niet exact op voorhand vast te stellen, zodat er altijd een bepaalde mate van onzekerheid blijft in de berekeningen. Deze onzekerheid kan wel verkleind worden door metingen in woningen uit te voeren. De impact van het uitvoeren van metingen in woningen is echter groot (impact op bewoners door overlast in hun woning), terwijl het uitvoeren van metingen in woningen bij dit onderzoek slechts beperkt informatie toevoegt. Omdat het uitvoeren van metingen voor dit onderzoek maar een beperkte afname in onzekerheid, maar wel overlast voor omwonenden met zich meebrengt, achten wij deze beperkte kans van 25 procent op een voelbare toename van de trillingen acceptabel.

toeneemt ten opzichte van de situatie zoals weergegeven in dit rapport. Omdat het slechts om 1 of 2 goederentreinen per dag gaat, en de waarde van V_{per} in deze woningen onder de grenswaarde ligt, leidt dit niet tot een andere beoordeling van de trillingssituatie, en dus niet tot andere conclusies van dit onderzoek.



Figuur 6-6 Locatie extra overloopwissel

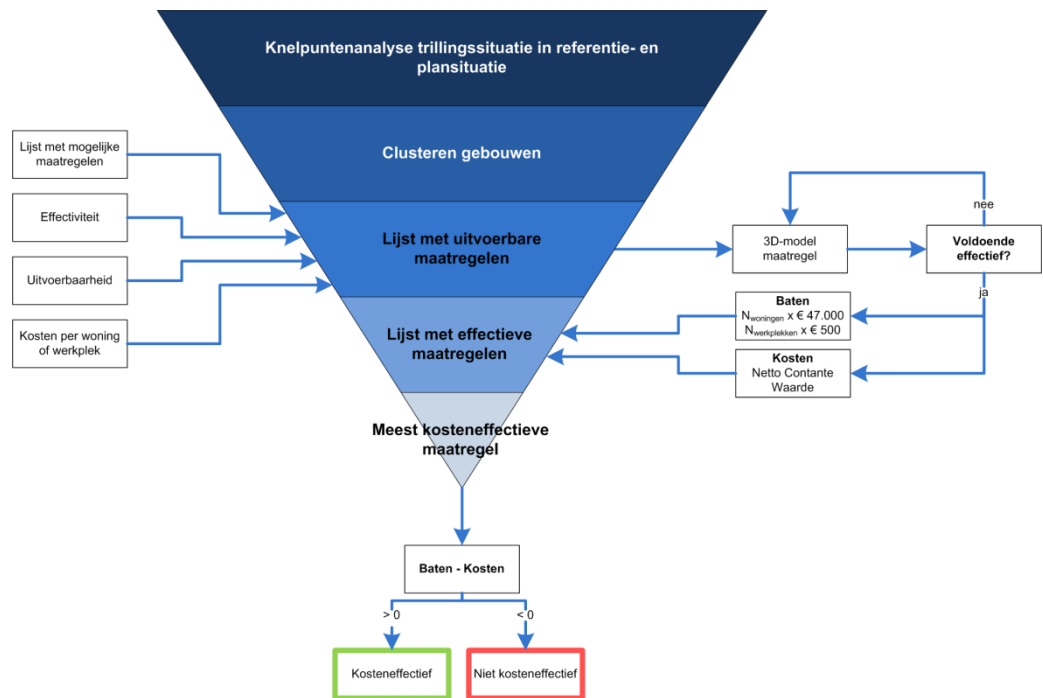
6.5 Afweging van maatregelen

Uit het onderzoek volgt dat een afweging van maatregelen alleen noodzakelijk is nabij het nieuw te bouwen station en bij de voormalige dienstwoning aan de Dr. Hartogsweg (nrs. 5 en 7). Bij de overige locaties is de kans op een overschrijding verwaarloosbaar klein, en is een afweging van maatregelen niet nodig.

Voor het station zijn geen doelmatige maatregelen mogelijk, bovendien gaat het hier om een gebouwen met een bestemming die buiten het beoordelingskader van de Bts valt (gebouwfunctie komt niet voor in de beoordelingstabellen van de Bts).

6.5.1. Gevolgde methodiek

De keuze voor een trillingsmaatregel bij de Dr. Hartogsweg 5 en 7 wordt via een aantal stappen genomen. Deze stappen zijn schematisch weergegeven in Figuur 6-7. Het schema laat zien dat door middel van een getrapte aanpak gezocht wordt naar de meest kosteneffectieve maatregel. Door het volgen van deze aanpak wordt voorkomen dat onnodig veel tijd wordt gestoken in maatregelen die niet effectief zullen zijn.



Figuur 6-7 *Stappenplan voor kosteneffectiviteitsafweging*

De volgende stappen worden genomen:

- Knelpuntenanalyse: het bepalen van V_{per} en V_{max} in de referentie- en plansituatie;
- Clustering van gebouwen: bepalen aantal gebouwen waar een kans op een overschrijding is. Een groep gebouwen waarvoor een aaneengesloten maatregel nodig is, wordt een cluster genoemd;
- Uit het overzicht van mogelijke maatregelen de uitvoerbare maatregelen selecteren. Deze afweging of een maatregel wel of niet mogelijk is (ruimtetechnisch, fysieke obstakels, effectiviteit en kosten) vindt plaats op basis van expert judgement;
- Gedetailleerd doorrekenen van uitvoerbare maatregelen. Van de effectieve maatregelen worden de kosten over de looptijd, in de vorm van een Netto Contante Waarde (NCW) bepaald, alsmede de baten. De baten zijn gedefinieerd als het aantal woningen waarvoor de maatregel voldoende effectief is bij beoordeling op de Bts, maal het richtbedrag van € 47.000 per woning. Voor kantoren wordt een bedrag van € 500 per werkplek gehanteerd. Resultaat van deze stap is een lijst met effectieve maatregelen;
- Uit de lijst met effectieve maatregelen wordt de meest kosteneffectieve maatregel geselecteerd (grootste reductie in aantal gehinderden tegen laagste prijs). Wanneer het saldo (baten minus kosten) positief is, is de maatregel kosteneffectief en wordt deze voorgesteld.

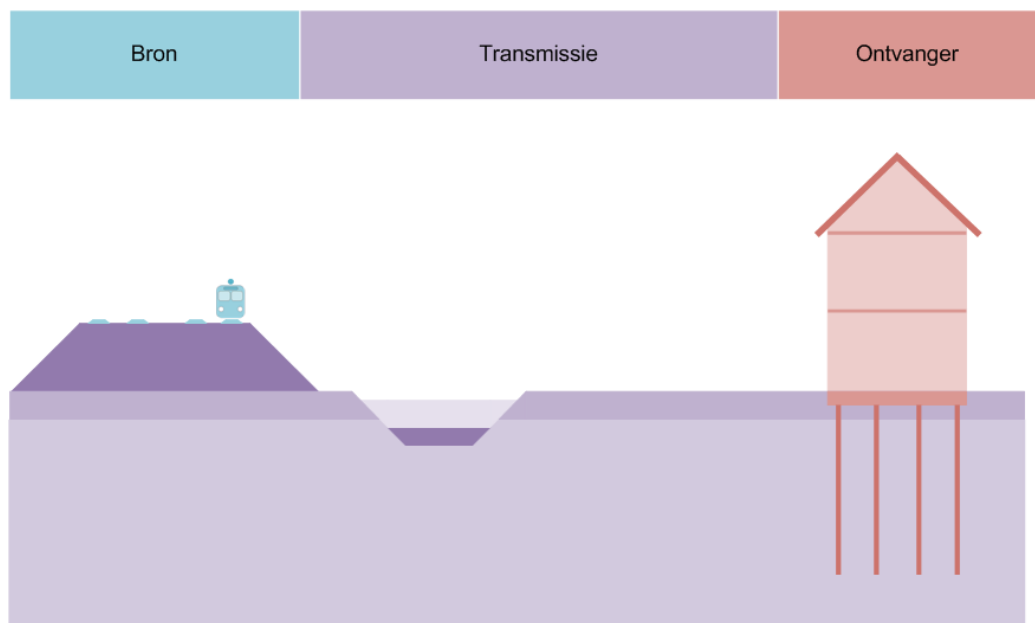
6.5.2. Mogelijke maatregelen

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

1. Bij de bron (treinen¹¹ of spoorconstructie);
2. Tussen de bron en de ontvanger (in de bodem);
3. Bij de ontvanger (gebouw).

¹¹ ProRail noch het ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M) kan spoorwegondernemingen dwingen om ander materieel te rijden of bepaalde vervoerders snelheidsbeperkingen op te leggen. Hoewel deze maatregelen dus effectief kunnen zijn, zijn dit momenteel juridisch gezien geen maatregelen die kunnen worden ingezet.

Deze drie posities zijn schematisch weergegeven in Figuur 6-8.



Figuur 6-8 Schematisch overzicht spoorsysteem

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

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

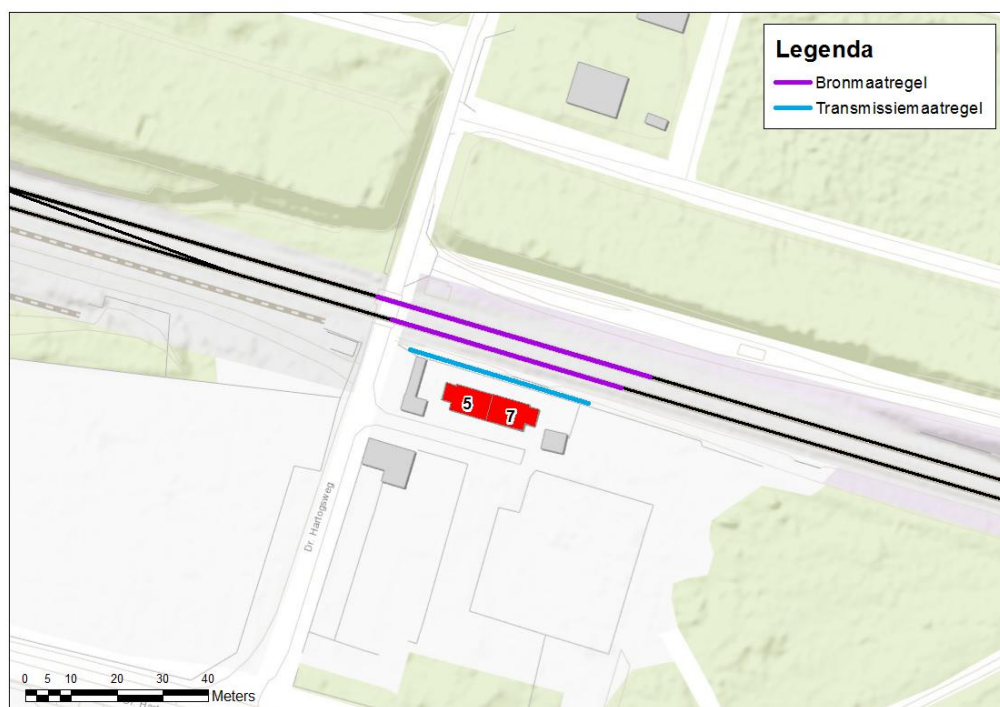
In de praktijk is het reduceren van trillingen ten gevolge van treinverkeer zeer moeilijk, zeker als de trillingen afkomstig zijn van goederentreinen, doordat de trillingen dan zeer lage frequenties hebben. De effectiviteit van een maatregel hangt af van een groot aantal factoren. Maatregelen die op de ene locatie effectief zijn, kunnen op een andere locatie de trillingssterkte niet of veel minder reduceren door verschillen in bijvoorbeeld het trillingsspectrum van de treinen of de bodemopbouw. Het uitvoeren van een maatregelenonderzoek vindt daarom altijd locatiespecifiek plaats.

In het voorliggende onderzoek is door middel van bronnenonderzoek een breed scala aan mogelijke trillingsmaatregelen bepaald¹². De verschillende types maatregelen worden in Bijlage V nader toegelicht.

6.5.3. Gebiedsbegrenzing

Uit de berekeningen blijkt dat er overschrijdingen zijn bij de voormalige dienstwoning aan de Dr. Hartogsweg 5 en 7. In Figuur 6-9 is aangegeven om welke woningen het gaat.

¹² Zie onder meer de maatregelencoatalogus van ProRail, v1.1



Figuur 6-9 Locaties mogelijke overschrijdingen

De trillingssituatie in deze woningen in de referentie- en plansituatie is weergegeven in Tabel 6-1. Overschrijdingen van het beoordelingskader zijn oranje gearceerd. Het project zorgt voor een afname van de trillingssterkte V_{max} , maar wel voor een toename van de R -waarde. De Q -waarde is hierdoor groter dan 1, hoewel de verwachte toename in trillingssterkte (verwachte Q -waarde) dus lager is dan 1. De trillingsintensiteit V_{per} is zowel in de referentie- als de plansituatie hoger dan de grenswaarde (grenswaarde is 0.1).

Tabel 6-1 Trillingen in referentie- en plansituatie op aandachtslocaties

Adres	Referentiesituatie			Plansituatie			
	R-waarde	V_{max}	V_{per}	R-waarde	V_{max}	V_{per}	Q-waarde
Dr. Hartogsweg 5	16	1.26	0.15	17	1.15	0.15	1.12
Dr. Hartogsweg 7	16	1.23	0.15	17	1.15	0.15	1.14

6.5.4. Onderzochte maatregelen

Voor de woningen met een mogelijke overschrijding van het beoordelingskader is een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. In dit onderzoek is gefocust op een aantal maatregelen aan de bron (het spoor) en de transmissie (bodem). Voor de transmissiemaatregelen is een locatie beschouwd, zie ook Figuur 6-9: direct naast het spoor. Maatregelen aan de bron moeten worden toegepast op de sporen die mogelijk voor overschrijdingen zorgen. In dit geval zijn dat beide sporen. De locaties voor maatregelen zijn weergegeven in Figuur 6-9. De benodigde totale lengte voor bronmaatregelen is ongeveer 115 meter, voor maatregelen aan de transmissie ongeveer 45 meter.

Uit de trillingsberekeningen blijkt dat de trillingsintensiteit V_{per} in zowel horizontale als in verticale richting hoger is dan de grenswaarde. De trillingssterkte V_{max} neemt op deze locatie niet toe door het project, en is lager dan de grenswaarde.

De hoge trillingen worden mede veroorzaakt door de spoorwegovergang bij de Sijsselt. Rond spoorwegovergangen treden doorgaans hogere trillingen op door verschillen in de hardheid van de ondergrond, waardoor zettingsverschillen en als gevolg daarvan trillingen ontstaan. De spoorwegovergang wordt vervangen door een fietsviaduct, waarmee de spoorwegovergang vervalt en de trillingen naar verwachting afnemen, maar deze afname wordt teniet gedaan door de toename van het aantal intercity's.

Op basis van deze en meer overwegingen zijn de maatregelen uit Bijlage V in Tabel 6-2 weergegeven, met daarbij een indicatie van de uitvoerbaarheid (realiseerbaarheid en inpasbaarheid), verwachte effectiviteit en de kosten per woning (zie ook de legenda onder de tabel). Maatregelen die geen (--) of onvoldoende (+) effect hebben of negatief scoren op uitvoerbaarheid en/of kosten, worden niet nader onderzocht.

Tabel 6-2 Mogelijke trillingsmaatregelen bij Dr. Hartogsweg 5 en 7

	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw	Nader onderzoeken
Bronmaatregelen				
Railpads	0	--	9 - 23 k€	nee
Under sleeper pads	+	0 +	13 - 29 k€	nee
Ballastmatten	+	0 +	23 - 58 k€	nee
Floating slab track	+	++	1053 - 1455 k€	nee
Slab track	0	--	926 - 1202 k€	nee
Decktrack	0	--	1150 - 1783 k€	nee
Aanpassing dwarsliggers	0	--	12 - 29 k€	nee
Aanpassing spoorligging				nee
Aanpassing aan voertuigen				nee
Transmissiemaatregelen				
OTC	-	++	45 - 563 k€	nee
Beklede OTC	--	++	192 - 900 k€	nee
Sleuf tussen twee damwanden	--	++	79 - 711 k€	nee
Sloot aanleggen	--	+	9 - 135 k€	nee
Aanpassen bodem	-	--	115 - 1.725 k€	nee
Aanpassen spoortalud				nee
Ontvangermaatregelen				
Amoveren	--	++	150 - 300 k€	nee
Verstijven van vloeren en muren	-	+	21 - 85 k€	nee
Inpakken van fundering	-	+	40 - 90 k€	nee
Tuned Mass Damper	0	--	10 - 30 k€	nee
Onderheien woning	0	+	50 - 80 k€	nee

Kleurcode	Omschrijving per categorie		
	Uitvoerbaarheid	Effectiviteit	Kosten per gebouw
--	Niet uitvoerbaar	Niet effectief	Kosten zijn hoger dan richtbedrag
-	Zeer moeilijk uitvoerbaar		
0	Moeilijk uitvoerbaar		Kosten kunnen hoger zijn dan richtbedrag
+	Relatief eenvoudig uitvoerbaar	Onvoldoende effectief	
++	Zeer eenvoudig uitvoerbaar	Voldoende effectief	Kosten zijn lager dan richtbedrag
	Niet van toepassing	Niet van toepassing	

Uit Tabel 6-2 volgt dat er geen doelmatige maatregelen zijn te treffen voor de voormalige dienstwoning, de woningen aan de Dr. Hartogsweg 5 en 7. De enige maatregelen met voldoende effectiviteit (floating slab track, een trillingsscherm of OTC en het amoveren van de woningen) hebben allemaal kosten die (aanzienlijk) hoger zijn dan het richtbedrag voor maatregelen. Maatregelen tussen de woningen en het spoor zijn daarnaast ruimtetechnisch niet realiseerbaar zonder maandenlange buitendienststellingen van het spoor. Deze kosten zijn nog niet meegenomen in de kostenbeschouwing¹³.

6.5.5. Conclusies

Uit het onderzoek naar maatregelen volgt dat er geen doelmatige maatregelen zijn te treffen voor de woningen met mogelijke overschrijdingen.

Gezien de hoge waarde van V_{per} (verwachtingswaarde van V_{per} is 0.15) en het feit dat het om slechts twee woningen gaat, zullen maatregelen aan het spoor of in de transmissie niet doelmatig zijn vanwege de hoge kosten. Maatregelen als onder sleeper pads of ballastmatten (die mogelijk binnen de grenzen van het doelmatigheidsbudget kunnen worden gerealiseerd) hebben onvoldoende effect en zijn daarmee niet doelmatig. Ook maatregelen aan de woningen zijn niet effectief, omdat er sprake is van overschrijdingen in zowel horizontale als verticale richting. Horizontale trillingen zijn zeer lastig te reduceren, alleen het volledig vervangen van de fundatie of het onderheien van de woning is een maatregel met significant horizontaal effect (ca. 20 tot 30 procent reductie). De kosten van een dergelijke maatregel bedragen voor deze woningen meer dan het richtbedrag voor maatregelen, zodat ook deze maatregelen niet doelmatig zullen zijn.

De trillingen in alle panden vallen ruim onder de in de Bts benoemde maximaal toelaatbare trillingssterkte ($V_{max} < 3.2$, boven deze grens moeten maatregelen worden getroffen). In de voormalige dienstwoning is wel sprake van een overschrijding van de grenswaarde voor de trillingsintensiteit V_{per} . Deze overschrijding is er echter ook al in de huidige situatie, en neemt niet toe door het project.

¹³ De kosten zijn totale bouwkosten, incl. BTW toeslagen voor engineering en kosten ProRail, en gebaseerd op prijspeil 2016.

7 Conclusies en aanbevelingen

In voorliggend rapport is een onderzoek uitgevoerd naar trillingshinder en trillingsschade tijdens de realisatie- en exploitatiefase van het project *Ede OV-knoop*.

Uit het onderzoek naar trillingshinder volgt dat het project nergens leidt tot een voelbare toename van de trillingen. Alleen bij een voormalige dienstwoning (Dr. Hartogsweg 5 en 7) is sprake van een mogelijke overschrijding van het beoordelingskader. Op basis van de berekeningen wordt hier zowel in de huidige als in de toekomstige situatie een overschrijding van de trillingsintensiteit (tijdsgemiddelde van de trillingen) verwacht. Het verwijderen van de overweg bij de Sijsselt zal leiden tot een lichte reductie van de trillingen, maar deze wordt teniet gedaan door de toename van het aantal reizigerstreinen.

Voor deze woningen is een onderzoek naar trillingsreducerende maatregelen uitgevoerd. Uit dat onderzoek volgt dat maatregelen aan het spoor of tussen het spoor en de woningen niet doelmatig zullen zijn (te kostbaar of onvoldoende effectief). Ook maatregelen aan de woningen, zoals het onderheien van de woningen, zijn niet doelmatig door de hoge kosten, onvoldoende effectiviteit of doordat maatregelen ruimtetechnisch niet realiseerbaar zijn zonder maandenlange buitendienststellingen van het spoor. Tenslotte geldt nog dat de trillingen in de woningen ruim lager zijn dan de maximaal toelaatbare trillingssterkte ($V_{max} < 3.2$).

Uit het onderzoek naar trillingsschade volgt dat schade aan gebouwen op twee locaties niet kan worden uitgesloten tijdens het intrillen van damwanden voor de perrontunnels: bij twee (nog te bouwen) panden uit het plan *Kop van de Parkweg* en bij de Frisokazerne. Voor deze panden adviseren wij om, zodra de definitieve uitvoeringsmethode bekend is en nog steeds sprake is van mogelijke trillingsschade, trillingsarme bouwmethodes te overwegen. Wanneer dat niet mogelijk is, kan het uitvoeren van een bouwkundige vooropname, monitoring van trillingen tijdens de bouw en eventueel een goede fasering van het werk voorkomen dat schade aan deze gebouwen kan optreden.

Verder is in het onderzoek gekeken naar verstoring van trillingsgevoelige apparatuur. In de omgeving van het project is geen trillingsgevoelige apparatuur aanwezig, zodat verstoring van apparatuur tijdens de realisatie- en exploitatiefase niet wordt verwacht.

Colofon

Opdrachtgever ProRail B.V.
R. Wiemer

Uitgave Movares Nederland B.V.

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

Daalse Kwint G 3.00
Postbus 2855
3500 GW Utrecht

Telefoon 030-2655322

Ondertekenaar ir. P.M. Boon
Adviseur

Projectnummer RM003974

Kenmerk D79-PBO-KA-1600135

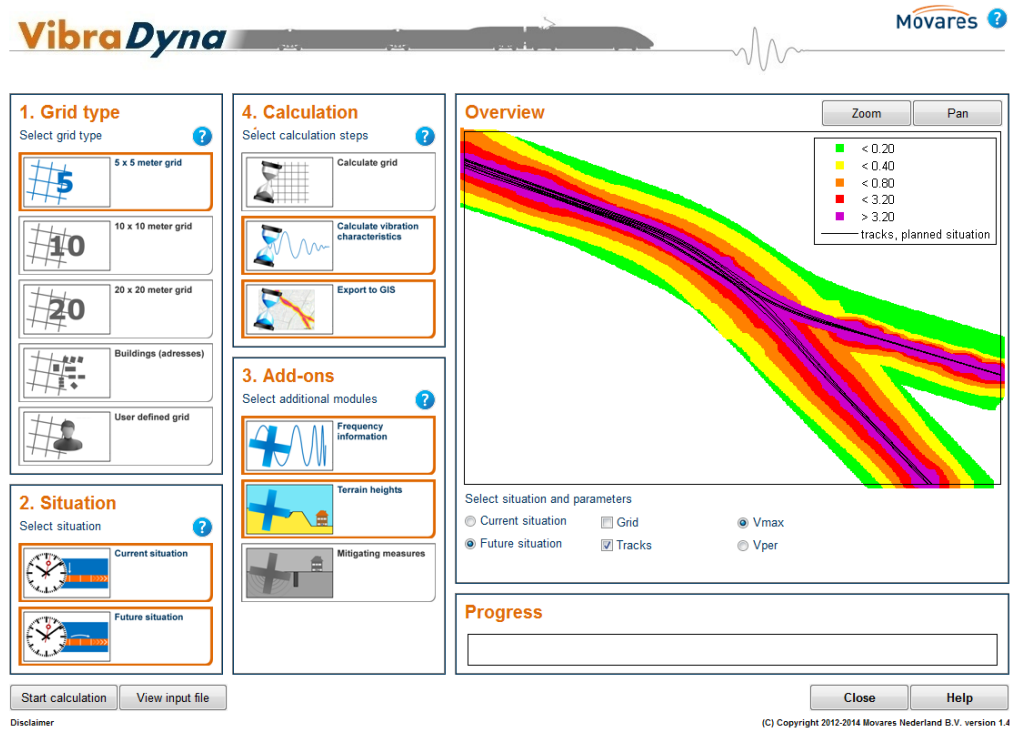
Opgesteld door ir. P.M. Boon

© 2016, 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 onderzoeksgebied.

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:

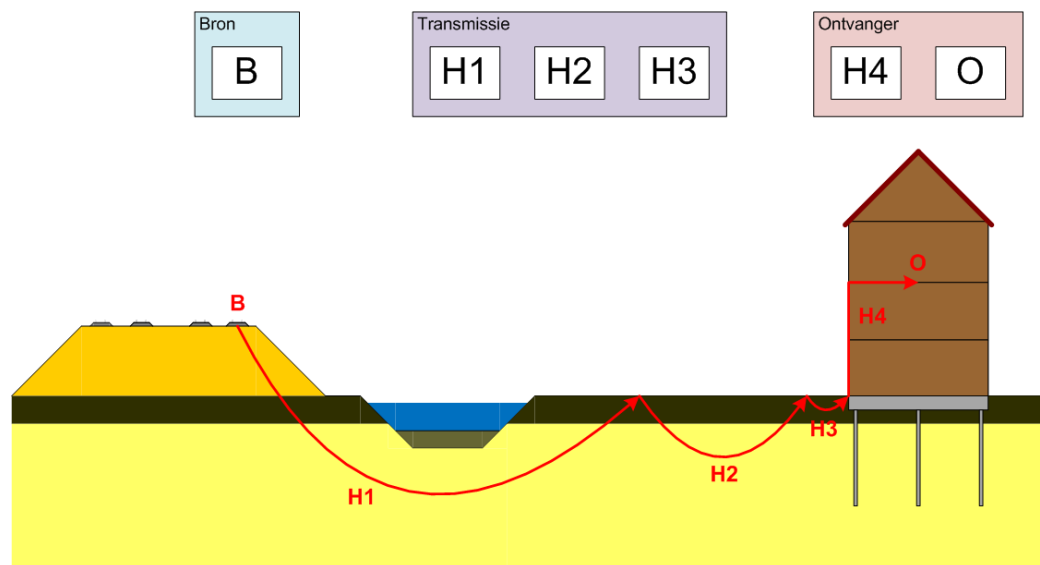
1. Afstand tussen gebouw en spoor;
2. Bodemtype (zand, veen, klei, etc.). Deze gegevens zijn op hoofdlijnen uit archieven beschikbaar;
3. Voertuigtypes;
4. Voertuigsnelheden;
5. Voertuigintensiteiten in dag-, avond- en nachtperiode;
6. Wissels en kunstwerken.

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.

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*¹⁴, *Sporen in Utrecht*¹⁵ en *Doorstroomstation Utrecht*¹⁶;
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.

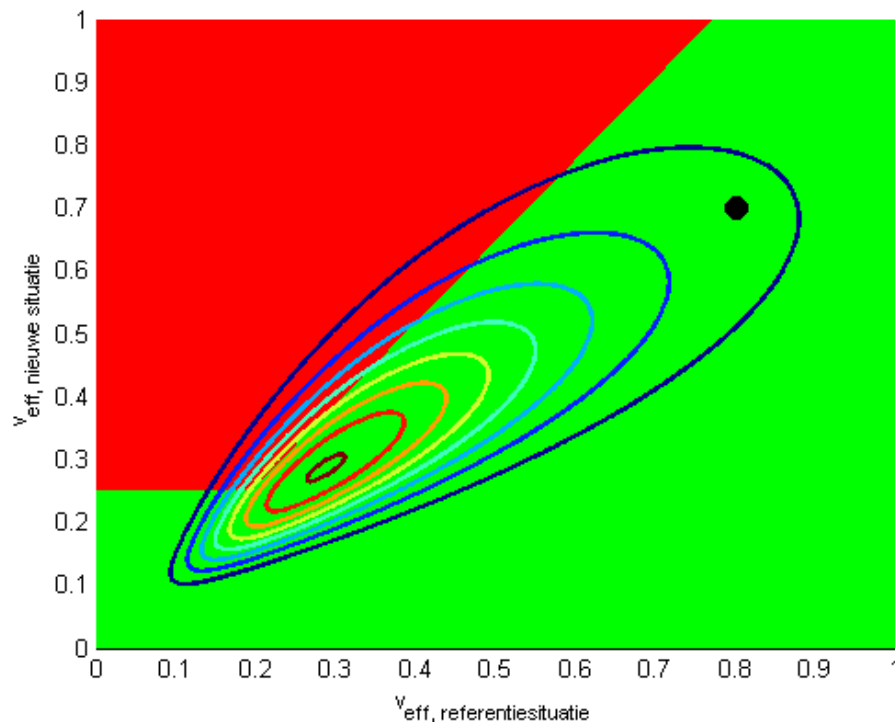
De maximale trillingssterkte en trillingsintensiteit wordt door *VibraDyna* met een betrouwbaarheid van 95 procent bepaald door het model. Bij beoordeling op de Bts speelt vooral de toename in trillingssterkte een belangrijke rol. Om deze toename conservatief genoeg te berekenen, rekent *VibraDyna* met 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.

¹⁴ 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

¹⁵ 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

¹⁶ 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 MKBA¹⁷, 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.

¹⁷ 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} .

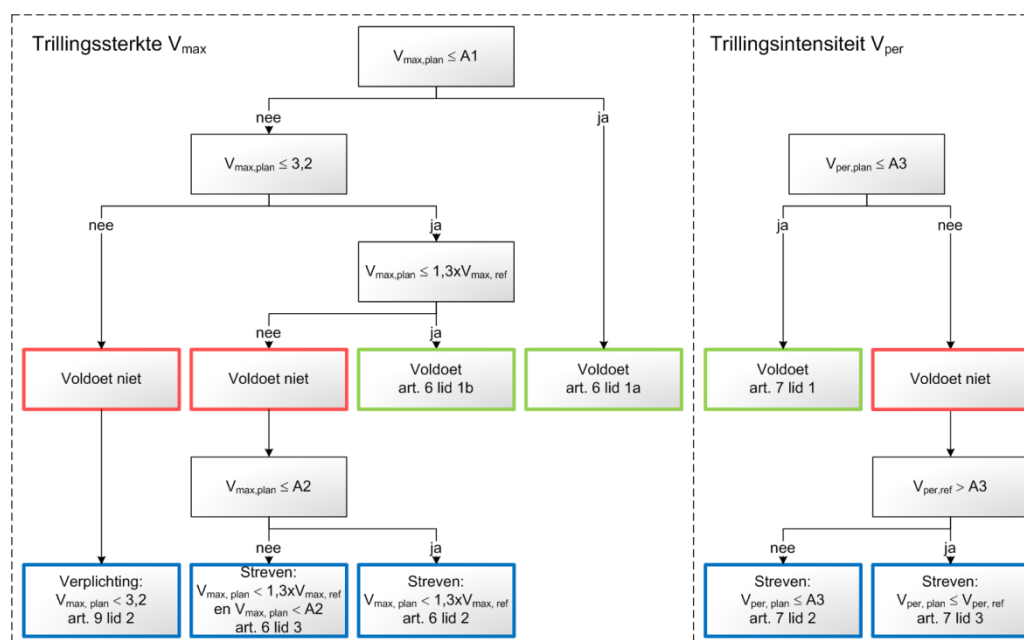
Tabel II - 1 Normstelling bestaande situatie volgens Bts

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 treinverkeer

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

II.3.2 Schade ten gevolge van treinverkeer

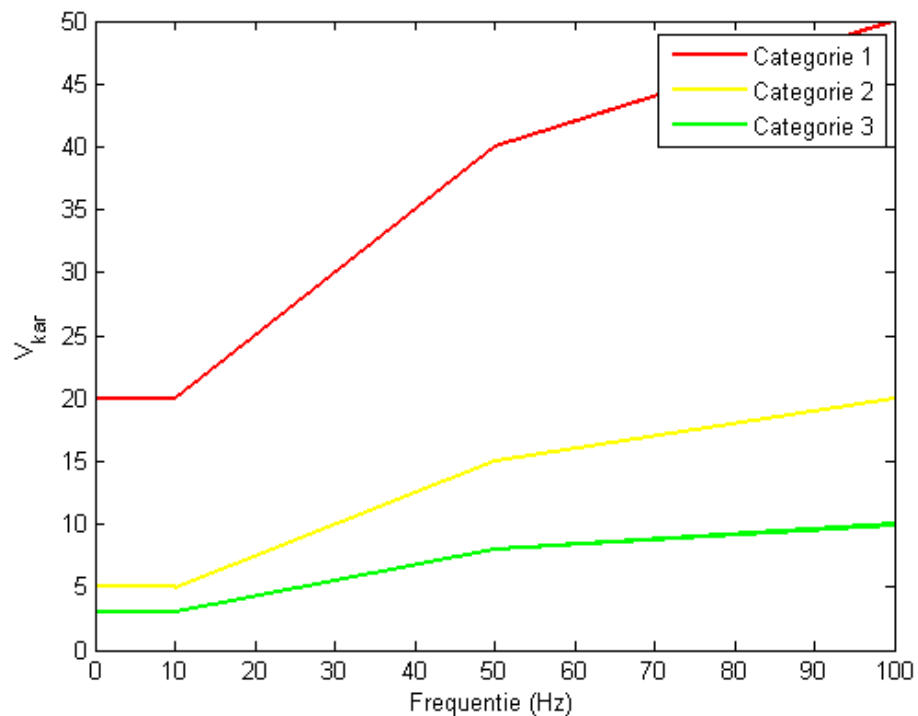
De sterkte van trillingen ten gevolge van treinverkeer zijn voor vrijwel alle gebouwen te gering om schade aan gebouwen te veroorzaken. Op afstanden groter dan 10 meter vanaf de spoorbaan is de trillingssnelheid, gemeten aan de fundering, zonder uitzondering kleiner dan 2 mm/s. Voor de meeste woningen (categorie 2 conform de SBR A-richtlijn) wordt een grenswaarde voor de trillingssnelheid van 5 mm/s aangehouden, voor monumentale panden (zoals Valkenbergweg 2, categorie 3 conform de SBR A-richtlijn) 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 heikwerkzaamheden. 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.

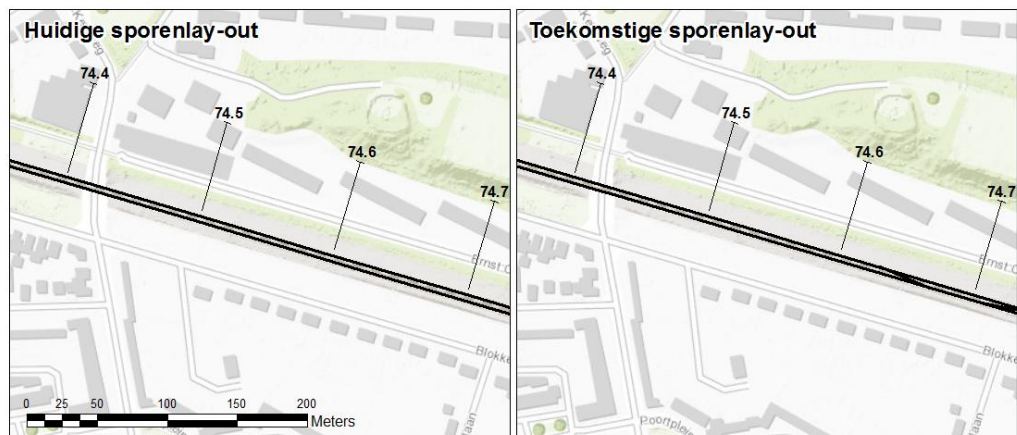
II.3.4 Toetsing

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.

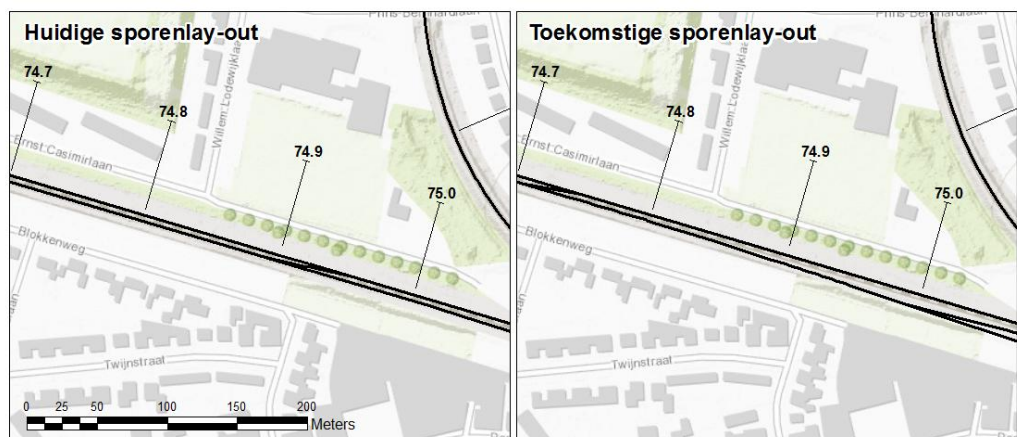
In dit onderzoek wordt aangegeven voor hoeveel gebouwen een overschrijding van de SBR A-richtlijn wordt geprognosticeerd. Deze toetsing vindt alleen plaats in de nabijheid van hei- en trilwerkzaamheden.

Bijlage III Wijzigingen in sporenlay-out

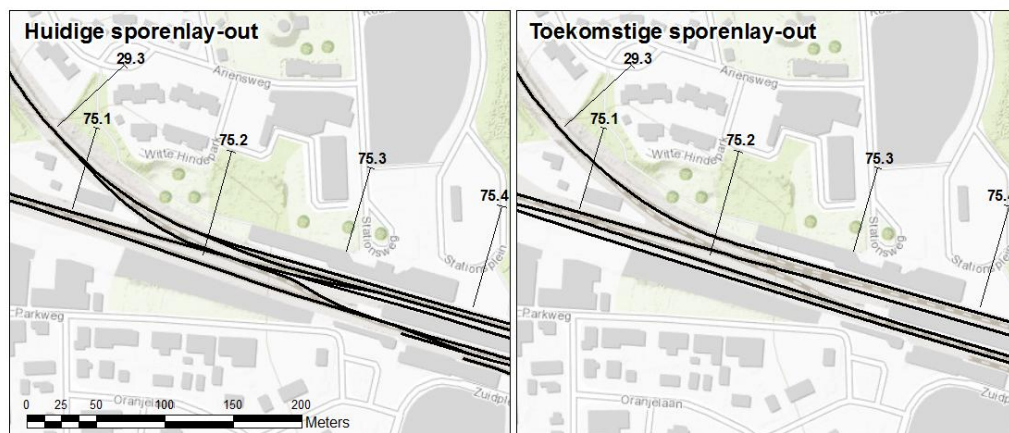
Deze bijlage bevat een weergave van de wijzigingen in sporenlay-out. In de figuren is steeds de huidige (referentiesituatie) en de toekomstige situatie (plansituatie) weergegeven van west naar oost.



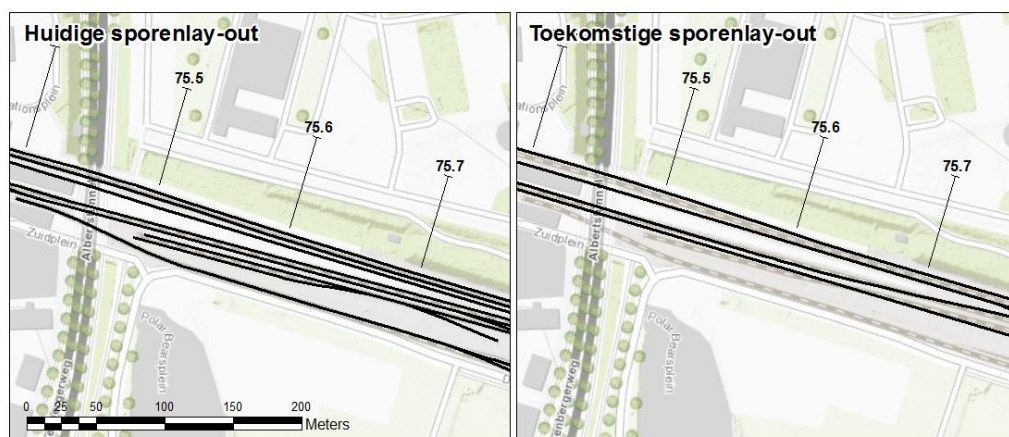
Figuur III - 1 Deel 1, meest westelijke deel onderzoeksgebied. Bij km. 74.6 komt een overloopwissel



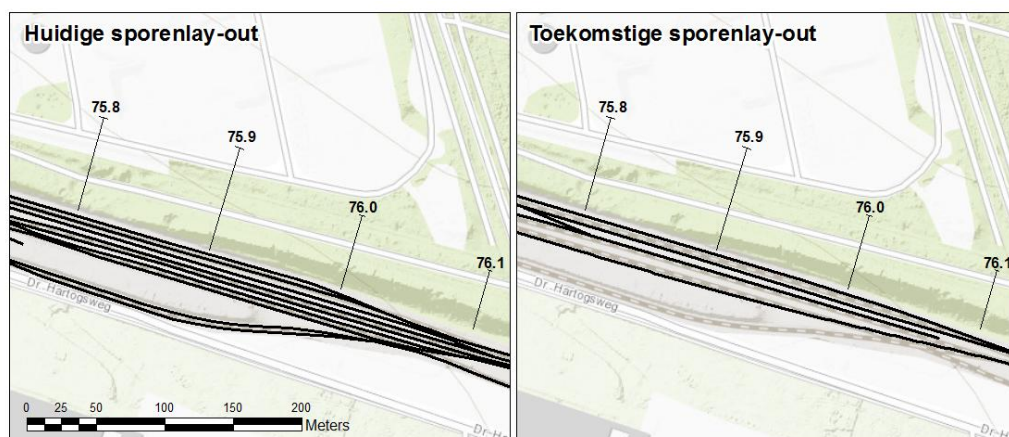
Figuur III - 2 Deel 2, bij km.74.9 verdwijnt een wissel, bij km. 74. 7 komt een nieuw overloopwissel. Verder buigt het spoor iets zuidelijker uit en komt er een wissel met aftakking naar het middenperron bij km. 75.1



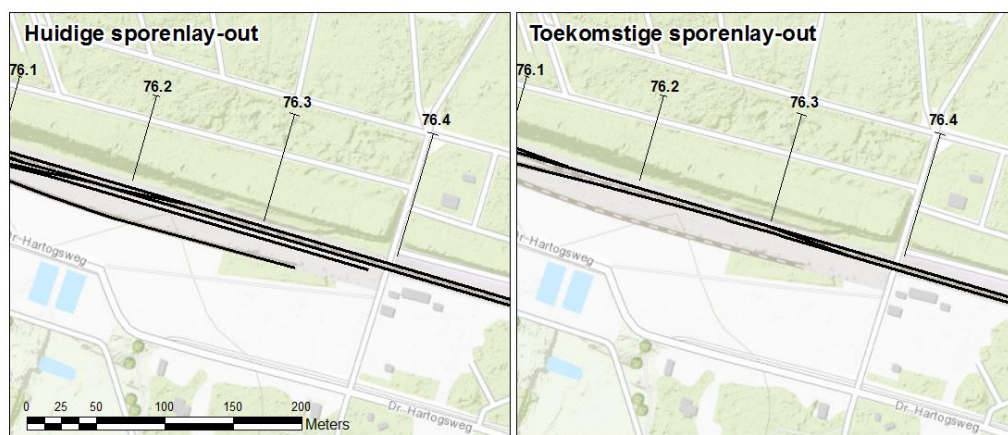
Figuur III - 3 Deel 3, de sporen buigen meer naar het zuiden uit. Intercity's rijden over het meest zuidelijke spoor en stoppen op een nieuw te bouwen perron, sprinters van en naar Utrecht halteren op het middenperron. In dit gebied wordt een groot aantal wissels verwijderd



Figuur III - 4 Deel 4, hier worden de rangeersporen verwijderd en komt het nieuwe stationsgebouw



Figuur III - 5 Deel 5, ook hier worden rangeersporen verwijderd en wordt het aantal wissels gereduceerd



Figuur III - 6 Deel 6, meest oostelijke deel. Wissels en rangeersporen worden verwijderd en de overgang bij de Sijsselt wordt vervangen door een fietsviaduct. Er wordt een nieuw overloopwissel gerealiseerd bij km. 76.3

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.

IV.1 Maaiveldmetingen

Om de locatiespecifieke trillingen te bepalen, zijn maaiveldmetingen uitgevoerd in het onderzoeksgebied. De locaties voor deze maaiveldmetingen zijn geselecteerd op basis van een aantal overwegingen:

- Op basis van expert judgment zijn de locaties waar veranderingen in de trillingen worden verwacht, vastgesteld. Deze locaties bevinden zich met name bij de nieuwe wissels aan de westzijde van het station (Zijdelaan). Op overige locaties veranderen de trillingen niet of nauwelijks ten gevolge van het project;
- Op basis van sonderingen is de variatie in bodemopbouw vastgesteld, zie ook Bijlage IV.2. Uit dit onderzoek volgt dat de bodemopbouw in het onderzoeksgebied vergelijkbaar is;
- 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.

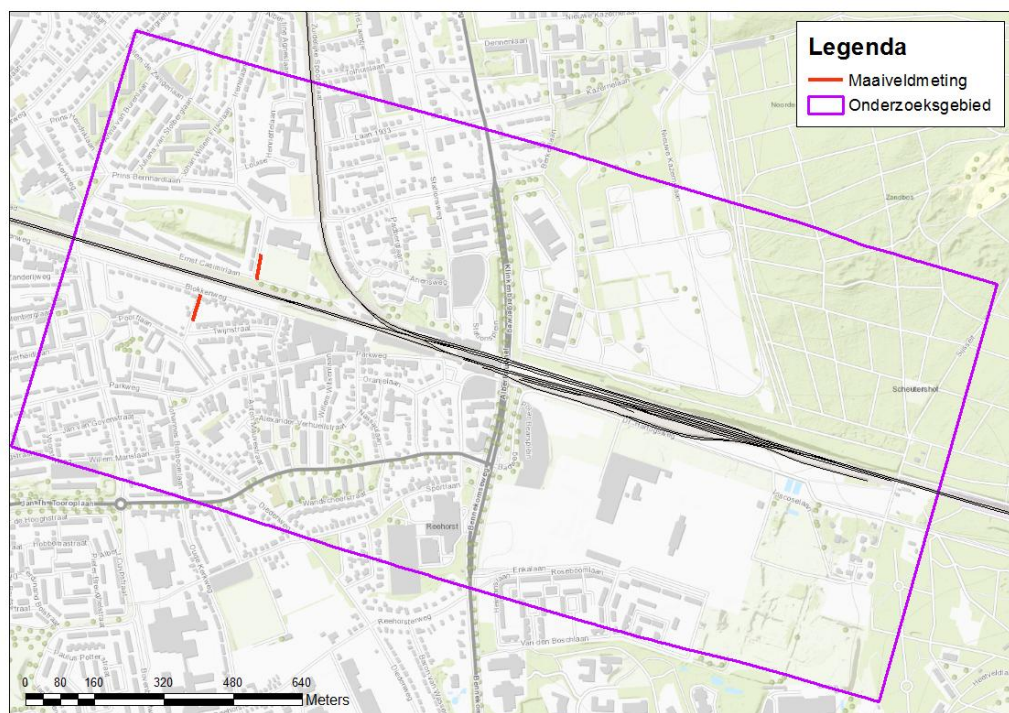
Op basis van bovenstaande overwegingen en de beperkte omvang van het onderzoeksgebied is ervoor gekozen om op twee locaties maaiveldmetingen uit te voeren. Hierbij zijn passerende treinen gemeten, en is gebruik gemaakt van een aantal sensoren op verschillende afstanden tot de sporen.

Door de trillingssignalen als functie van de tijd te transformeren naar het frequentiedomein (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:

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

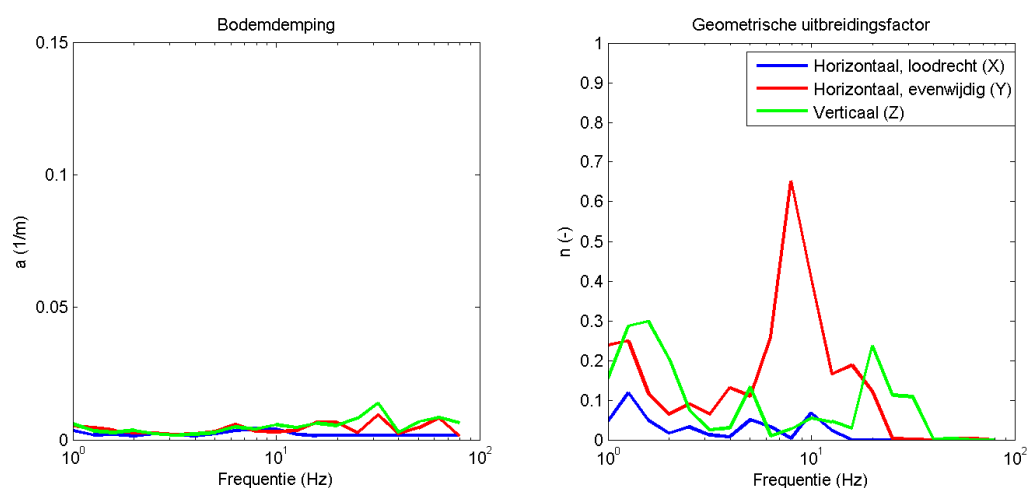
Hierin is $V(r, f)$ de trillingssterkte op een willekeurige afstand r tot de trillingsbron, r_0 een referentieafstand, n een frequentieafhankelijke factor die de geometrische uitbreiding van de trillingen beschrijft en α een frequentieafhankelijke factor die de bodemdemping beschrijft. Met behulp van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

De maaiveldmetingen zijn uitgevoerd op in twee locaties, verdeeld langs het tracé, zie Figuur IV - 1. De metingen zijn verricht op 4 mei 2016. Op beide locaties zijn minimaal tien treinen van het type VIRM (intercity) gemeten op beide sporen.

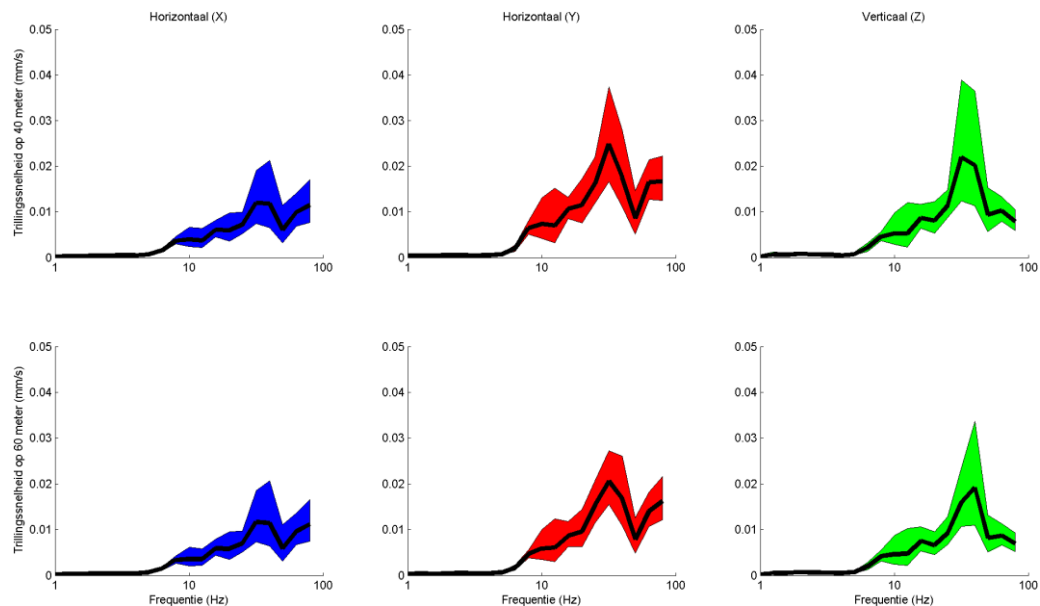


Figuur IV - 1 Locaties maaiveldmetingen

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

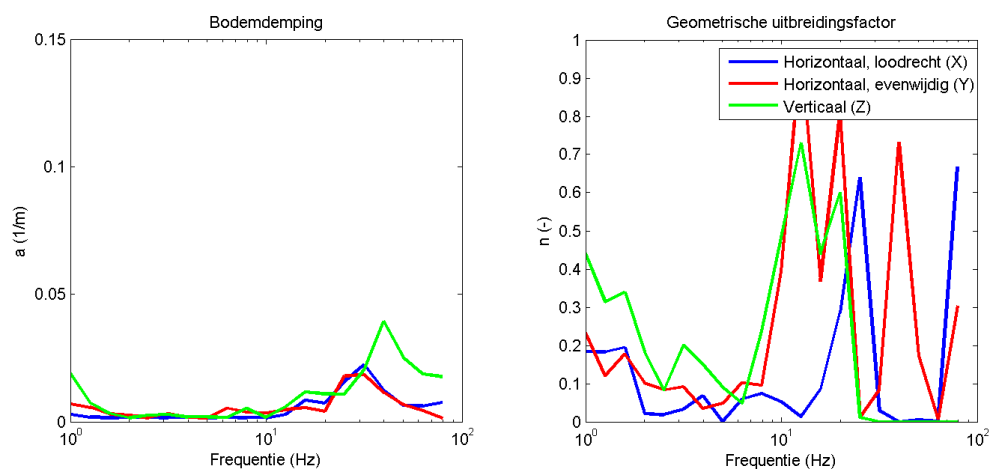


Figuur IV - 2 Dempingsparameter (links) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechts). De meting is verricht aan de Willem Lodewijklaan

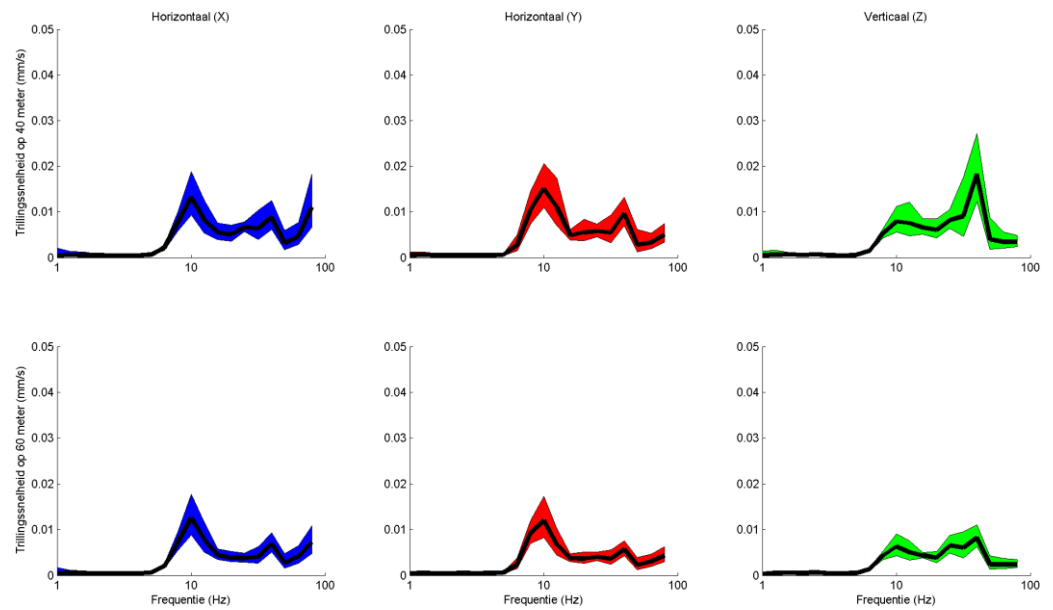


Figuur IV - 3 Trillingsspectra (95 procentinterval) op 40 (boven) en 60 (onder) meter afstand bij de Willem Lodewijklaan

De resultaten bij de Zijdelaan zijn weergegeven in Figuur IV - 4 en Figuur IV - 5. Bij de Willem Lodewijklaan is een lagere demping gemeten dan bij de Zijdelaan, de trillingen zijn daar tot op grotere afstand voelbaar.



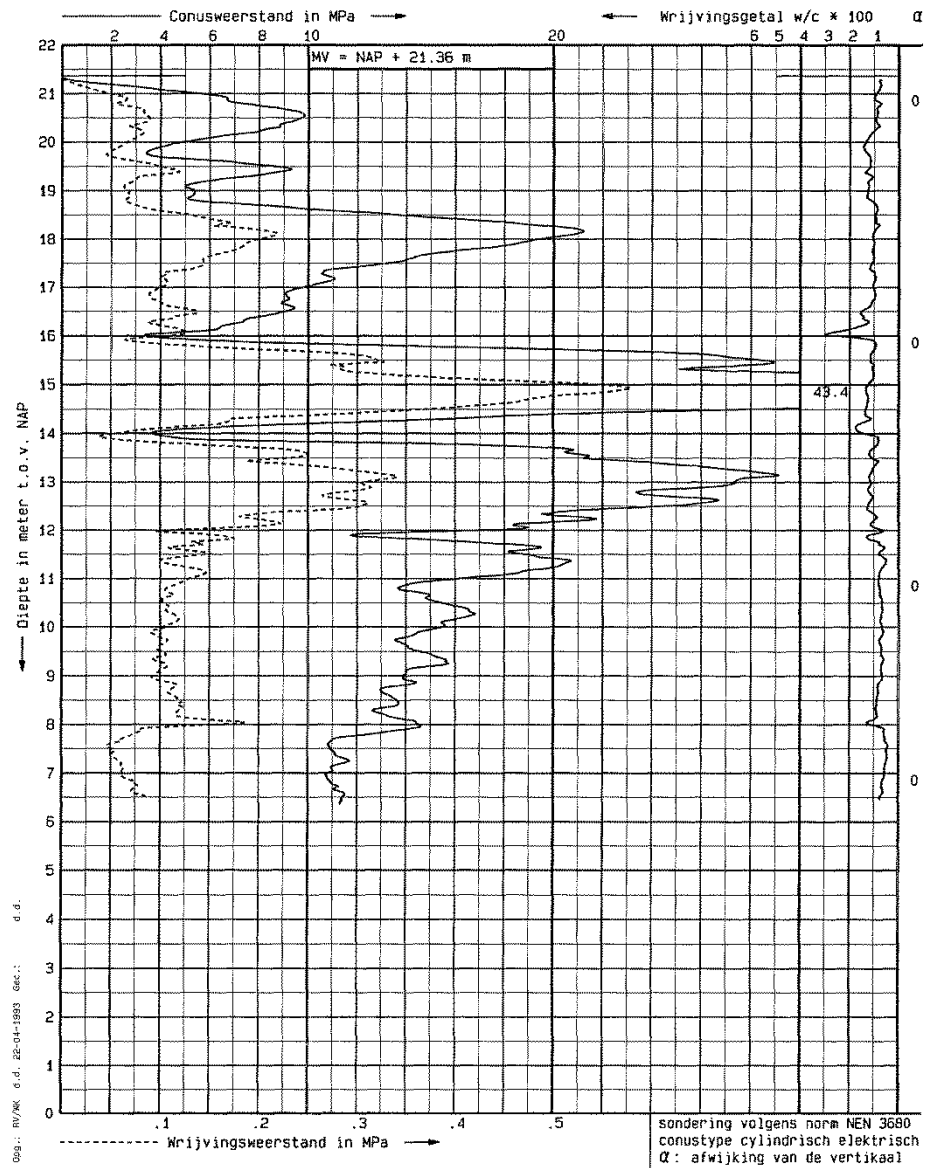
Figuur IV - 4 Dempingsparameter (links) en geometrische uitbreidingsfactor als functie van de frequentie (rechts). De meting is verricht aan de Zijdelaan



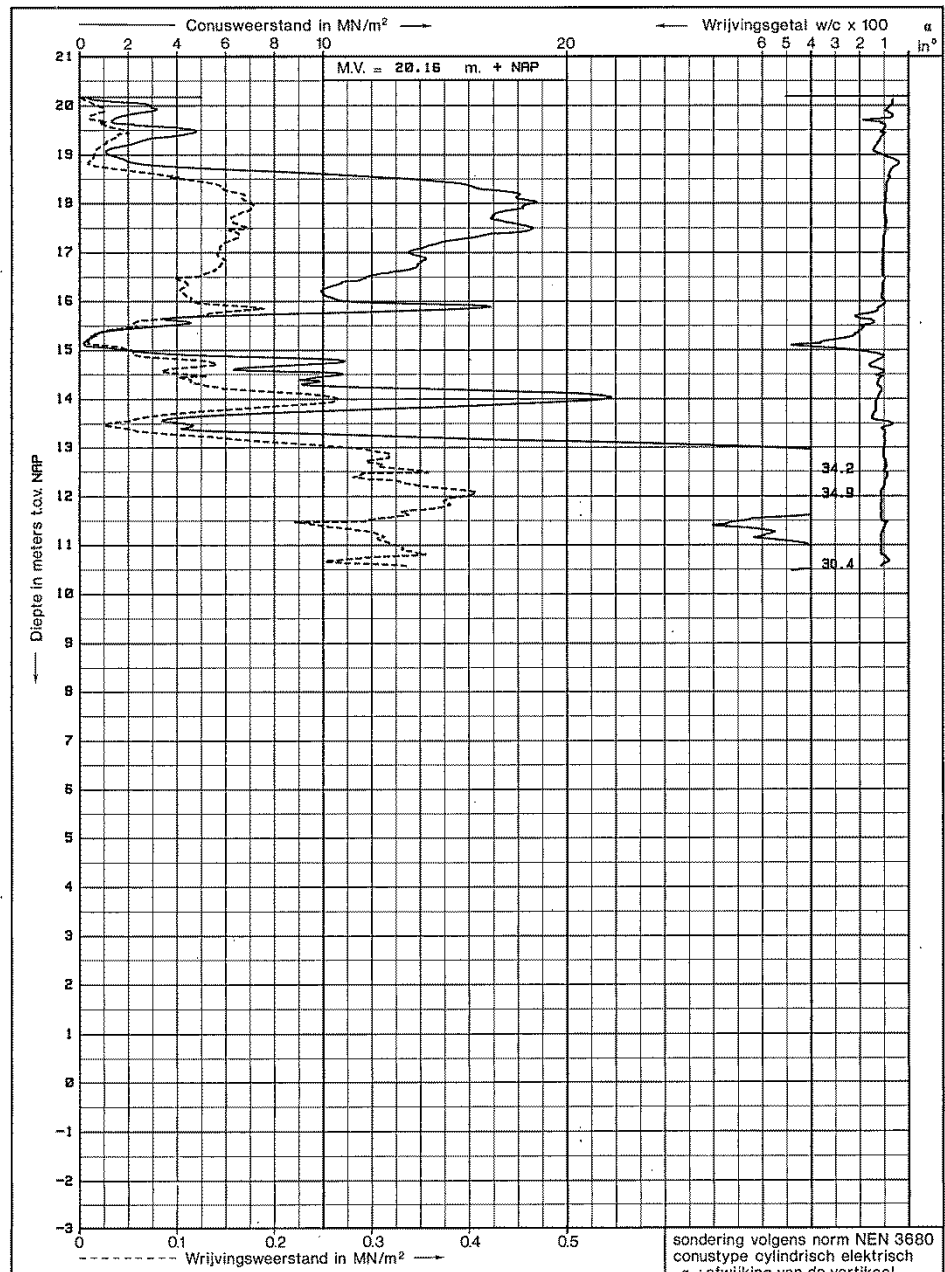
Figuur IV - 5 Trillingsspectra (95 procentsinterval) op 40 (boven) en 60 (onder) meter afstand bij de Zijdelaan

IV.2 Bodemonderzoek

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van sonderingen. De gebruikte sonderingen S39F00079 en S39F00314 zijn weergegeven in Figuur IV - 6 en Figuur IV - 7.



Figuur IV - 6 Gebruikte sondering S39F00079



Figuur IV - 7 Gebruikte sondering S39F00314

Bijlage V Mogelijke maatregelen

Deze bijlage bevat een overzicht met mogelijke maatregelen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen maatregelen aan de trein of het spoor (de bron), maatregelen in de bodem (de transmissie) en maatregelen aan een gebouw (de ontvanger).

V.1 Mogelijke maatregelen aan de bron

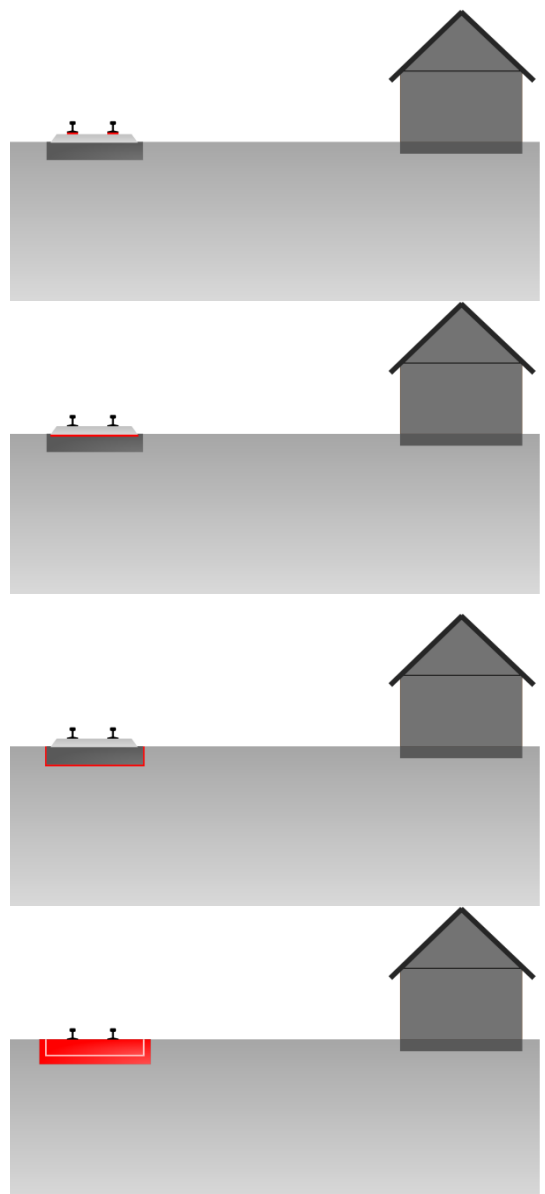
De meest effectieve aanpak is het reduceren van de trillingen bij de bron: de trein of het spoorstelsel. Mogelijke maatregelen zijn:

Railpads, een verende constructie tussen spoorstaaf en dwarsligger, vaak in de vorm van een rubberen plaat. Deze maatregel heeft effect bij frequenties boven de 60 Hz, trillingen daaronder kunnen worden versterkt. Deze maatregel is gezien de gemeten trillingsspectra daarom niet effectief in het huidige onderzoeksgebied.

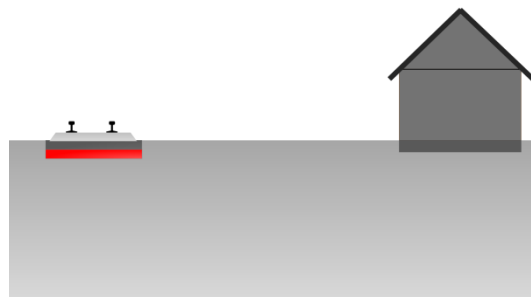
Under sleeper pads, een verende constructie tussen dwarsligger en ballast of betonplaat, vaak in de vorm van een rubberen plaat. Deze maatregel heeft effect bij frequenties boven de 25 tot 60 Hz, trillingen daaronder kunnen worden versterkt. Deze maatregel is gezien de gemeten trillingsspectra daarom niet effectief in het huidige onderzoeksgebied.

Ballastmatten, een verende constructie onder het ballast, vaak in de vorm van een rubberen mat. Deze maatregel heeft effect bij frequenties boven de 20 tot 40 Hz, trillingen daaronder kunnen worden versterkt. Deze maatregel is gezien de gemeten trillingsspectra daarom niet effectief in het huidige onderzoeksgebied.

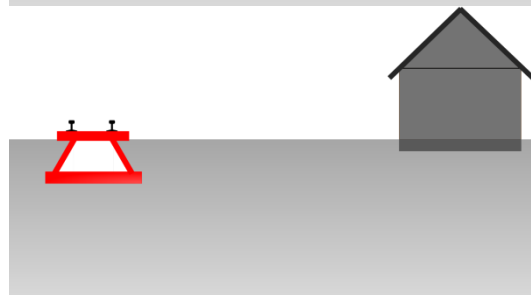
Floating slab track, een verende oplegging van het gehele spoorstelsel. Deze maatregel heeft effect bij frequenties boven de 5 Hz, en kan daardoor voldoende effectief zijn voor goederentreinen. Het effect hangt sterk af van de gekozen constructie (eigenfrequentie en demping).



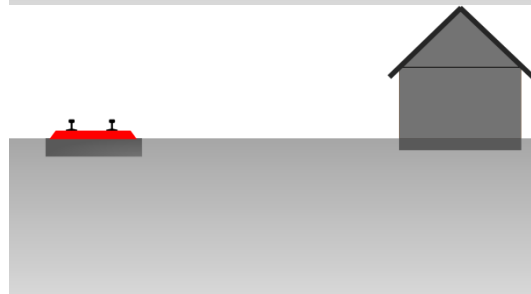
Slab track, een betonplaat onder het ballast. Deze maatregel heeft vaak alleen effect bij lage frequenties en een slappe bodem door de minimalisatie van zettingsverschillen in het spoor. Het effect in het huidige onderzoeksgebied is nihil.



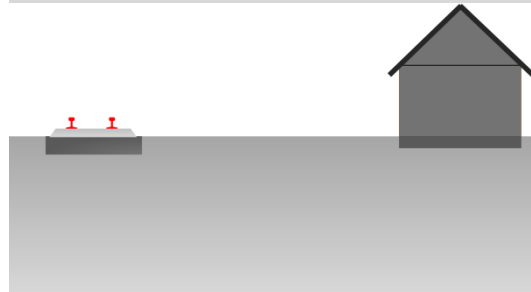
Decktrack, een betonnen constructie onder het spoor. Deze maatregel is vergelijkbaar met een slab track en heeft doorgaans alleen effect bij lage frequenties en een slappe bodem door de minimalisatie van zettingsverschillen in het spoor. Het effect in het huidige onderzoeksgebied is nihil.



Aanpassing dwarsliggers, door de stijfheid of massa van de dwarsliggers aan te passen (grotere dwarsliggers, ander materiaal, holle dwarsliggers, etc.) kunnen de trillingen worden gereduceerd. Deze maatregel heeft effect bij frequenties boven de 8 Hz, maar het effect is beperkt, bovendien leidt deze maatregel tot hogere onderhoudskosten.



Aanpassing spoorligging, bijvoorbeeld door het verplaatsen van wissels en andere oneffenheden in het spoor, zoals de aansluiting tussen aardebaan en kunstwerk. In het huidige ontwerp is hierop al geoptimaliseerd.



Aanpassing aan voertuigen, bijvoorbeeld door het reduceren van de treinsnelheid, beter toezicht op de kwaliteit van het materieel of het aanpassen van de afveerconstructie van treinwagons.¹⁸



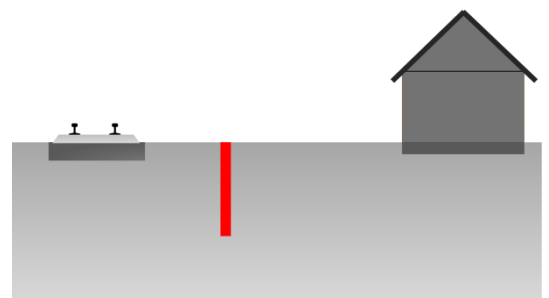
¹⁸ ProRail noch het ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M) kan specifieke spoorwegondernemingen dwingen om ander materieel te rijden of bepaalde vervoerders snelheidsbeperkingen (lager dan de baanvaksnelheid) op te leggen. Hoewel deze maatregelen dus effectief kunnen zijn, zijn dit momenteel juridisch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

V.2 Mogelijke maatregelen aan de transmissie

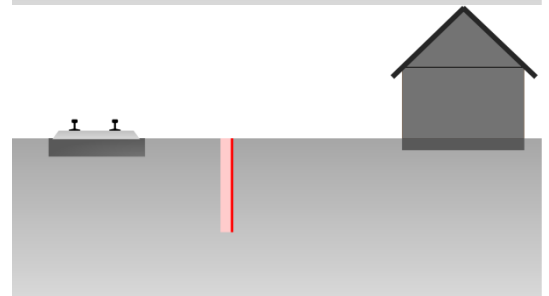
Bij maatregelen aan de transmissie (of de overdracht) kan reductie van trillingshinder worden bereikt door de trillingen te absorberen of te reflecteren. Absorptie van trillingen is praktisch vrijwel niet uitvoerbaar, reflectie van trillingen kan worden bereikt door het introduceren van een fysieke barrière tussen de bron en de ontvanger. Een dergelijke barrière kan worden gerealiseerd met een zeer licht materiaal zoals EPS¹⁹ (of zelfs geen materiaal, zoals bij een sloot), of juist een zeer zwaar en stijf materiaal (zoals beton). Belangrijk is dat er een impedantiesprong wordt gecreëerd. Het ontwerpen van maatregelen aan de transmissie dient daarom altijd locatiespecifiek te worden uitgevoerd, zodat de lokale bodemkarakteristieken worden meegenomen.

Mogelijke transmissiemaatregelen zijn onder meer:

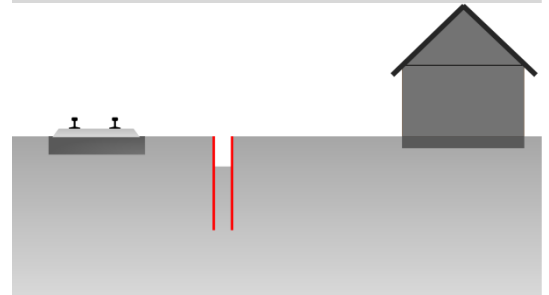
Ondergrondse trillingsreducerende constructie (OTC), bijvoorbeeld van beton of EPS. Een dergelijke constructie kan de trillingen absorberen (bij een zware constructie) of reflecteren, waardoor er een barrière ontstaat tussen bron en ontvanger.



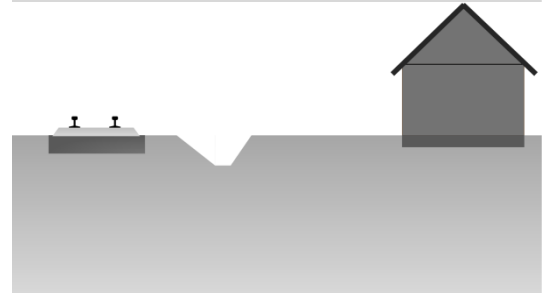
Beklede ondergrondse trillingsreducerende constructie (beklede OTC), waarbij de barrière wordt voorzien van een extra laag slap materiaal, bijvoorbeeld rubber, om een extra impedantiesprong te creëren. Deze maatregel heeft doorgaans meer effect dan een niet-beklede barrière.



Toepassen van een sleuf en damwand(en), bij deze constructie wordt een smalle sloot of EPS-constructie gerealiseerd naast een of tussen twee damwanden. De verschillende materialen zorgen voor impedantiesprongen, waardoor reflectie van de trillingsgolven optreedt.

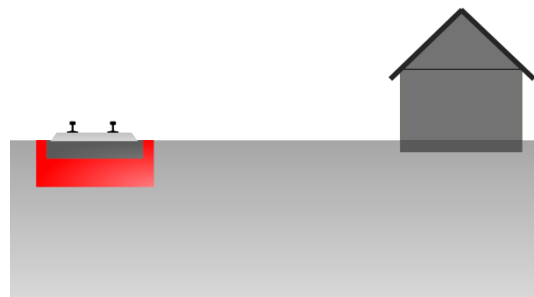


Sloot, hierbij wordt een fysieke onderbreking gecreëerd in het pad van de trillingen tussen bron en ontvanger.

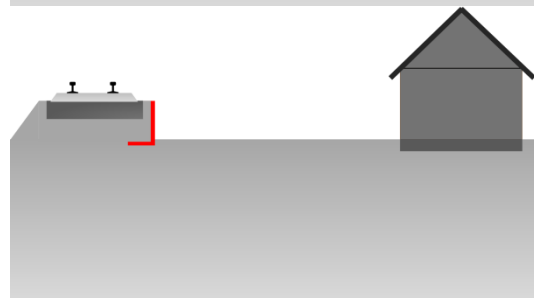


¹⁹ EPS is een kunststof bestaande uit geëxpandeerd polystyreen, en wordt gebruikt voor fundaties en isolatie.

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



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



Voor al deze maatregelen geldt dat het effect voor reizigerstreinen groter is dan voor goederentreinen. Afhankelijk van de lokale bodemopbouw kunnen de maatregelen ook effect hebben voor goederentreinen. Het effect van een maatregel wordt daarom altijd frequentieafhankelijk doorgerekend, om rekening te houden met dit verschil in effect.

V.3 Mogelijke maatregelen aan de ontvanger

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

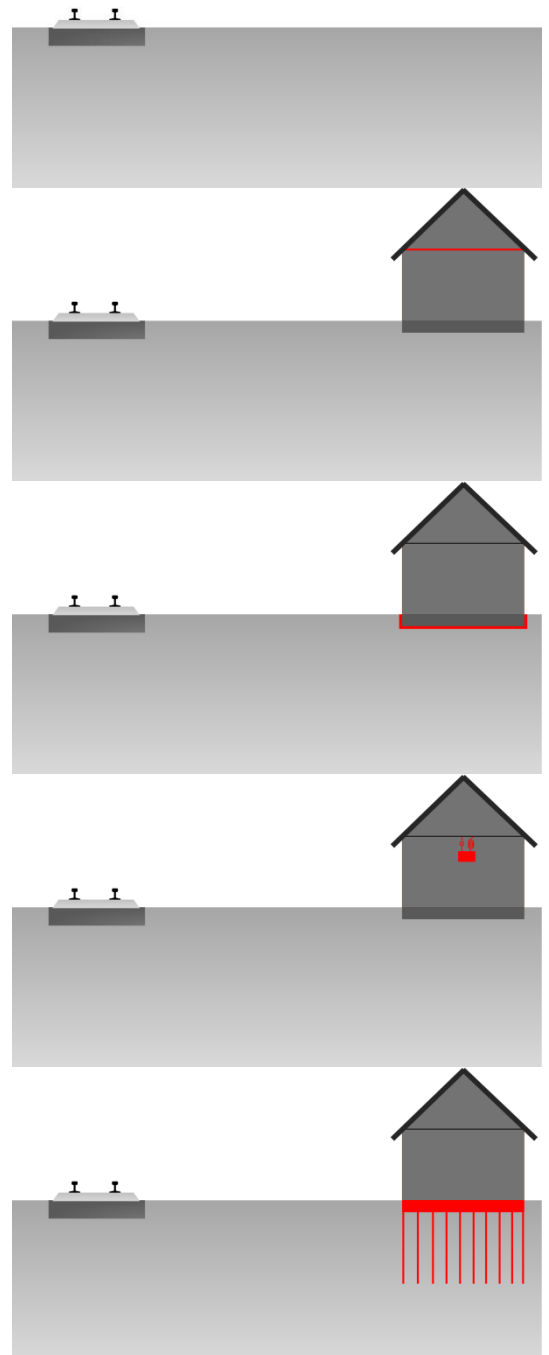
Opkopen, de gebouwen worden opgekocht en de bewoners of gebruikers verhuizen.

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

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

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

Onderheien, hierbij wordt een bestaande woning die op staal is gefundeerd onderheid om te zorgen voor een betere verankering met de ondergrond. Deze maatregel is effectief tegen zowel horizontale als verticale trillingen, maar is erg ingrijpend omdat deze vanuit de woning wordt uitgevoerd.



Bijlage VI Resultaten trillingsonderzoek

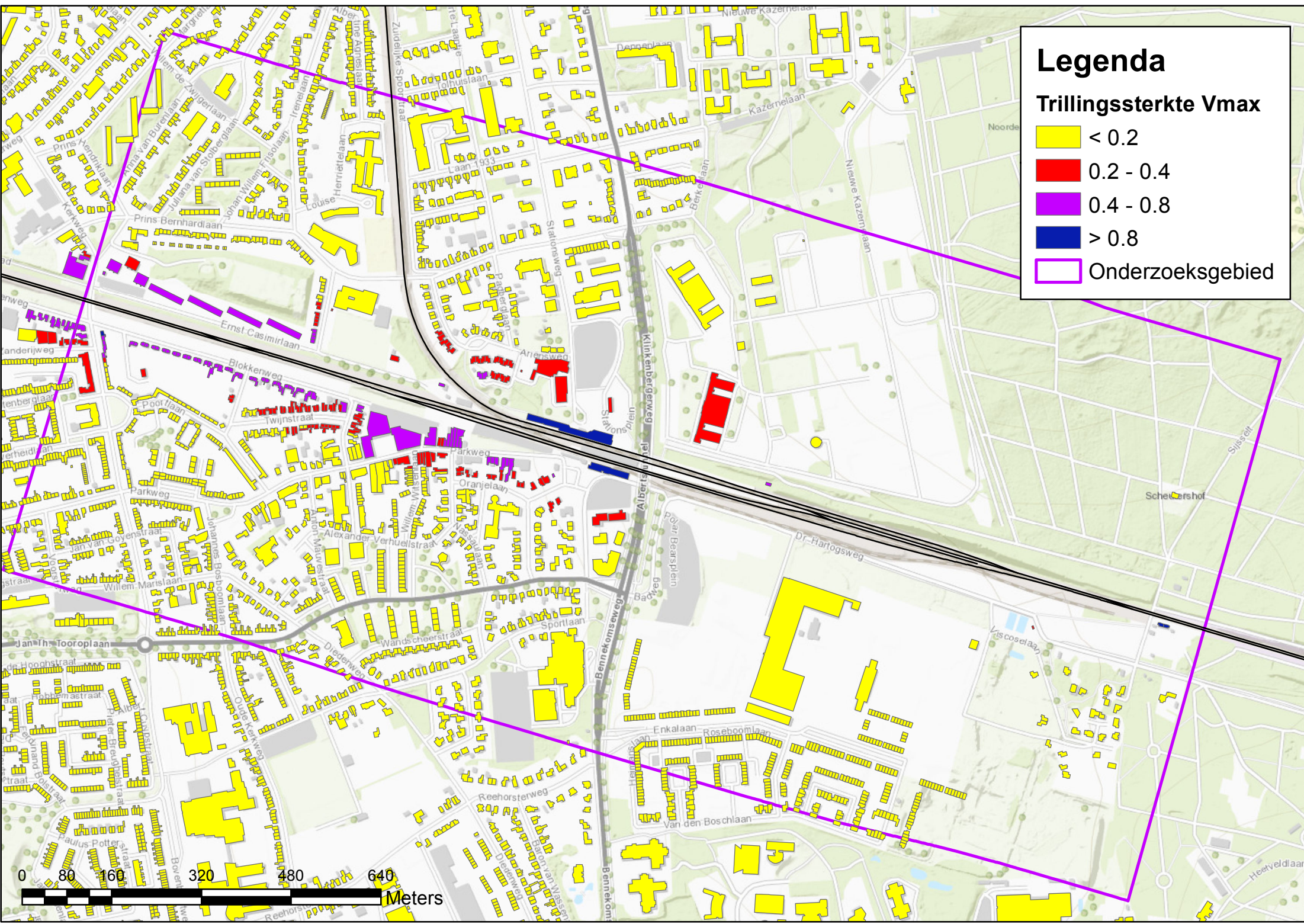
Deze bijlage bevat grootformaten van de figuren uit hoofdstuk 6, in de volgende volgorde:

1. Trillingssterkte V_{max} in de referentiesituatie
2. Trillingsintensiteit V_{per} in de referentiesituatie
3. Trillingssterkte V_{max} in de plansituatie
4. Trillingsintensiteit V_{per} in de plansituatie
5. Beoordeling op de Bts

Legenda

Trillingssterkte Vmax

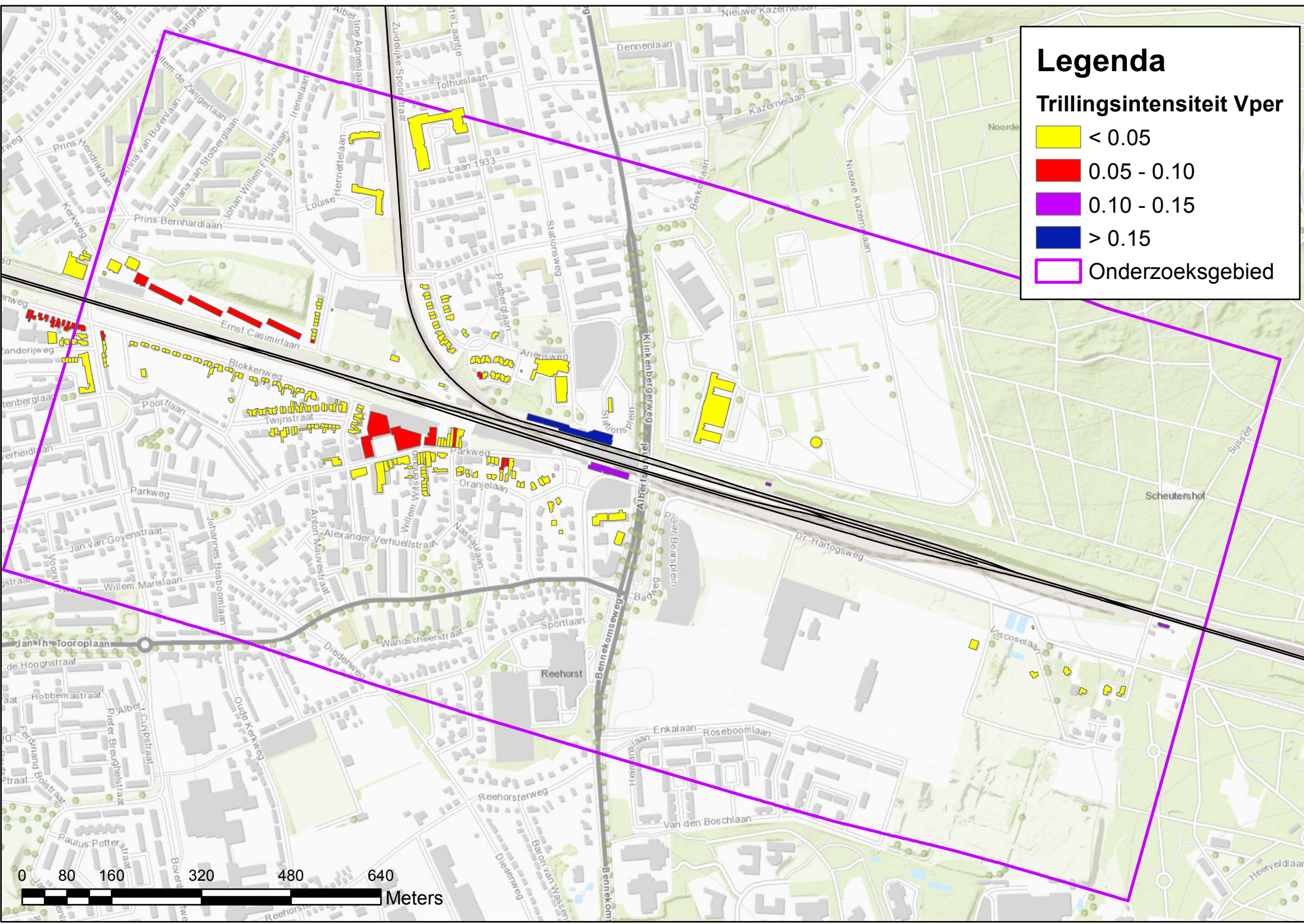
- < 0.2
- 0.2 - 0.4
- 0.4 - 0.8
- > 0.8
- Onderzoeksgebied



Legenda

Trillingsintensiteit Vper

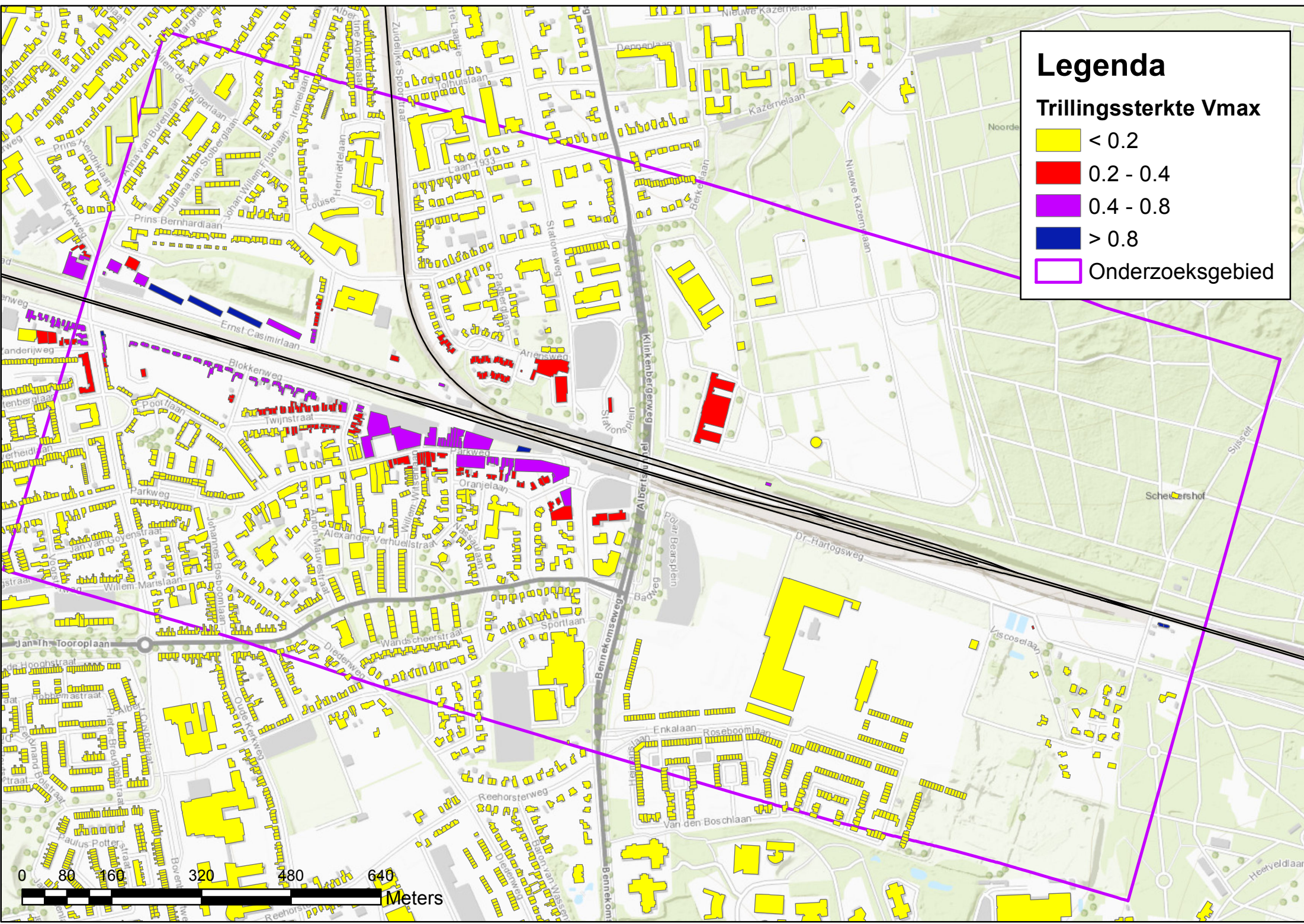
- < 0.05
- 0.05 - 0.10
- 0.10 - 0.15
- > 0.15
- Onderzoeksgebied

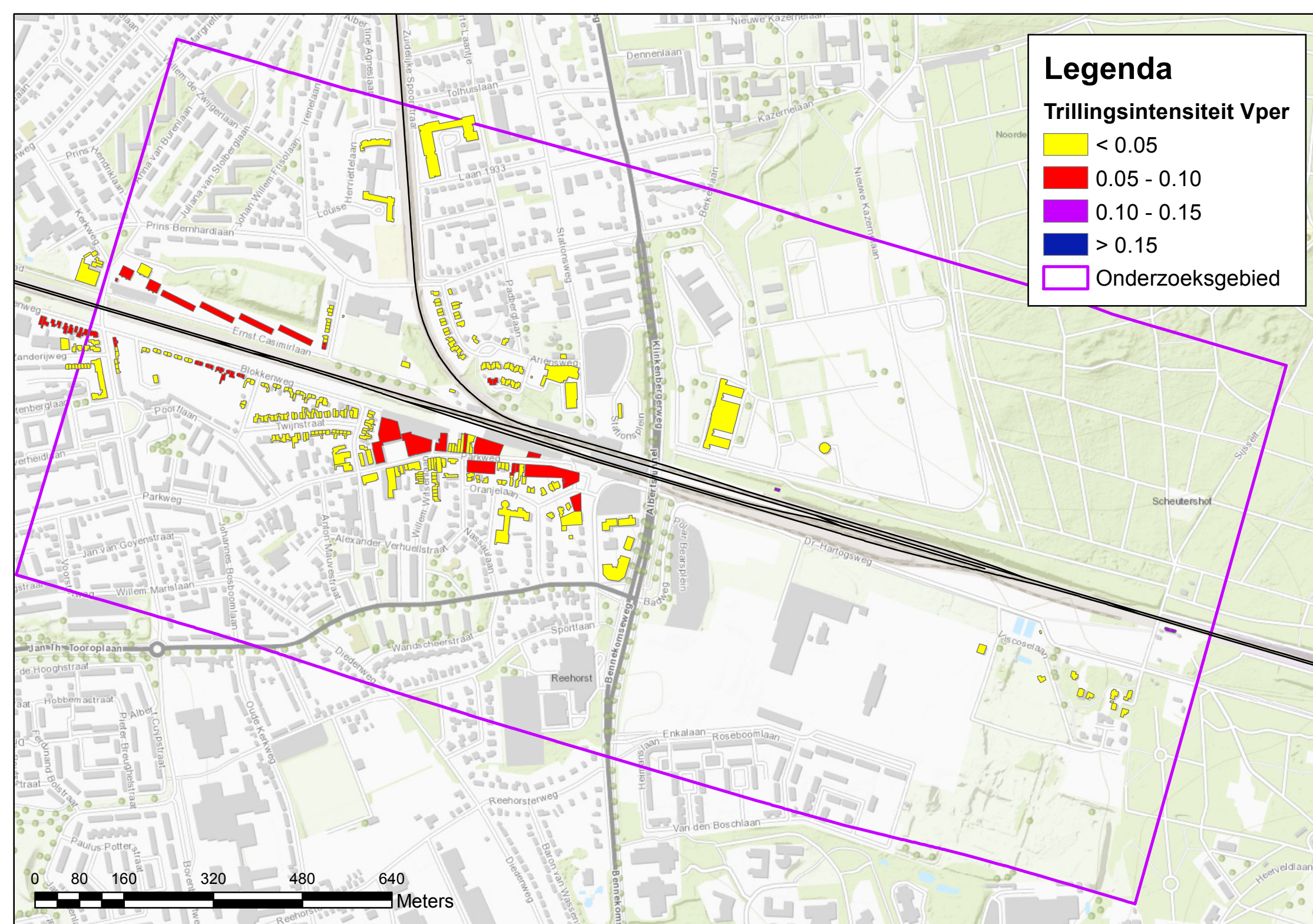


Legenda

Trillingssterkte Vmax

- < 0.2
- 0.2 - 0.4
- 0.4 - 0.8
- > 0.8
- Onderzoeksgebied





Legenda

 Onderzoeksgebied

Kans op overschrijding

 Verwaarloosbaar klein ($< 25\%$)

 Significant ($> 25\%$)

0 80 160 320 480 640 Meters