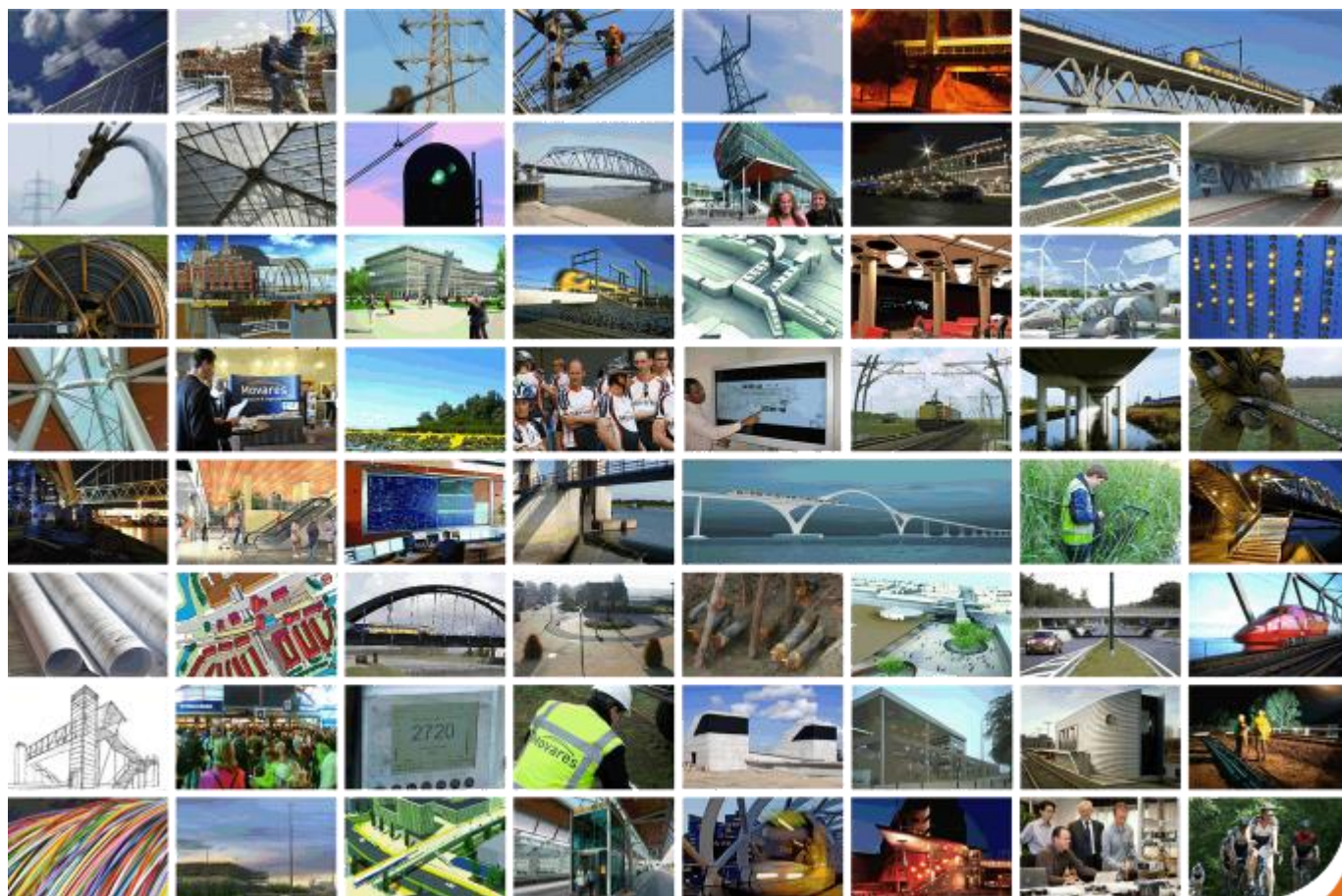


Trillingsonderzoek Westflank-Noord

Trillingshinder in bestemmingsplangebied



2 mei 2013- Versie 0.6

Samenvatting

In het kader van het project CU2030 wordt de stationsomgeving van Utrecht Centraal sterk aangepast. Behalve de bouw van een groot aantal nieuwe gebouwen, worden ook tram- en busroutes verlegd. Dit onderzoek focust zich op het noordwestelijke deel, *Westflank-Noord*. In dit plangebied wordt een deel van de bebouwing gesloopt, en een deel wordt nieuw gerealiseerd. Daarnaast wijzigen rijlijnen en snelheden van bussen, trams en treinen.

Ten behoeve van het bestemmingsplan *Westflank-Noord* is daarom een trillingsonderzoek uitgevoerd. Met behulp van modellen, metingen in gebouwen en op maaiveld, is de trillingssituatie in de gebouwen rond het bestemmingsplangebied vastgesteld in de referentie- en diverse toekomstige situaties.

In dit gebied is ook nieuwe bebouwing gepland, het zogenaamde *Westflank-Noord*. Omdat het ontwerp van deze bebouwing nog niet definitief is vastgesteld, is gerekend met het maximale bouwvlak. In dit onderzoek wordt aangegeven waar wel en niet gebouwd kan worden, om te voldoen aan de richtlijn m.b.t. trillingshinder.

Uit dit onderzoek volgt dat het bestemmingsplan van *Westflank-Noord* niet tot overschrijdingen van de SBR B-richtlijn leidt in de bestaande (en gehandhaafde) bebouwing, de treinen zorgen wel in sommige gebouwen voor mogelijke overschrijdingen van de SBR B-richtlijn. Zowel bij de autonome groeisituatie als bij realisatie van DSSU treden deze mogelijke effecten op. Het valt niet binnen de scope van dit onderzoek om voor de bestaande bebouwing maatregelen te ontwerpen die worden veroorzaakt door (de wijzigingen aan) de sporen. Dit wordt binnen het ProRail-onderzoek naar DSSU uitgevoerd.

Met betrekking tot de nieuw geplande bebouwing volgt uit dit onderzoek dat, bij toekenning van de bestemming *kantoor*, 12 tot 31 procent van het bouwvlak mogelijk niet voldoet aan de richtlijn, afhankelijk van de situatie op het spoor. Bij toekenning van de bestemming *wonen*, voldoet 31 tot 100 procent van het bouwvlak mogelijk niet. Overigens moet hierbij worden opgemerkt dat deze percentages aanzienlijk lager kunnen uitvallen door het ontwerp te optimaliseren voor minimale trillingshinder.

Om de trillingshinder voor de *geplande* bebouwing te mitigeren zijn maatregelen aan de bebouwing in het bouwvlak onderzocht. Er is onderzocht wat het effect is van het afveren van de fundering, het verstijven van vloeren en muren en het inpassen van een trillingsreducerende constructie in de bodem tussen het spoor en de bebouwing. Uit dit onderzoek volgt dat er geen niet oplosbare overschrijdingen zijn van de richtlijnen met betrekking tot *trillingshinder*. Wel dient in het ontwerp rekening te worden gehouden met de inpassing van (een combinatie van) maatregelen, om overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder te voorkomen.

Bij het ontwerp adviseren wij de volgende aanpak:

1. Minimaliseer de vloeroverspanningen, maximaliseer de vloerdikte en gebruik stijve constructiematerialen. Maak een dynamisch rekenmodel van de constructie en reken deze door op dynamisch gedrag en optredende trillingen; Wanneer de trillingen de streefwaarden overschrijden, neem dan de volgende stappen:
2. Overweeg het inpassen van een bij de fundering afgeveerde constructie op 2

Hz, met een dempingsconstante van 0.2;

3. Overweeg eventueel om gebouwen op korte afstand van het spoor van de bestemming *kantoor* te voorzien, in plaats van de bestemming *wonen*;
4. Wanneer maatregelen tussen het spoor en de bebouwing ook na realisatie van de bebouwing nog inpasbaar zijn, adviseren wij dergelijke maatregelen uit te stellen tot na oplevering. Bij een opleveringstoets door middel van trillingsmetingen kan dan blijken of dergelijke kostbare maatregelen nog noodzakelijk zijn.

Inhoudsopgave

Samenvatting	1
Inleiding	5
1.1 Achtergrond van dit rapport	5
1.2 Doel van het onderzoek	5
1.3 Algemeen onderzoekskader	5
1.4 Opzet van het onderzoek	5
1.5 Toegepaste kaders en uitgangspunten	5
2 Situatiebeschrijving	6
2.1 Inleiding	6
2.2 Uitgangspunten	6
2.2.1. Referentiesituatie	6
2.2.2. Plansituatie	6
2.3 Onderzoeksgebied	7
2.4 Referentiesituatie	9
2.5 2015	10
2.6 2018	11
3 Opzet trillingsonderzoek	12
3.1 Stap 1: Metingen	12
3.2 Stap 2: Modelberekeningen	12
3.3 Stap 3: Ontwerpen van maatregelen	12
4 Toetsingskader trillingshinder	13
4.1 Algemeen	13
4.2 Grootheden in de SBR B-richtlijn	13
4.3 Streefwaarden in de SBR B-richtlijn	13
4.3.1. Nieuwe of bestaande situatie	14
4.3.2. Periode gedurende de dag	14
4.3.3. Gebouwfunctie	14
4.4 Toetsing in de SBR B-richtlijn	14
4.5 De Beleidsregel Trillingshinder Spoor	15
4.6 Beoordeling in huidige trillingsonderzoek	16
5 Stap 1 – Metingen	17
5.1 Meetlocaties	17
5.2 Metingen in gebouwen	17
5.2.1. Van Sijpesteijnkade 35	18
5.2.2. Park Plaza Hotel	18
5.2.3. Stads kantoor Utrecht	18
5.2.4. Sijpesteijngebouw	19
5.2.5. Gebruik van metingen	20
5.3 Maaiveldmetingen	20
5.3.1. Valproeven	20
5.3.2. Trampassages	21
5.3.3. Buspassages	22
5.3.4. Treinpassages	23

6	Stap 2 – Modelberekeningen	25
6.1	Inleiding	25
6.2	Opzet trillingsmodel stap 2	25
6.3	Rekenmodule stap 2	25
6.3.1.	<i>Barkanvergelijking</i>	25
6.3.2.	<i>Transmissie</i>	25
6.3.3.	<i>Tertsbandspectra</i>	25
6.3.4.	<i>Relatie tussen tertsbandspectrum en v_{eff}</i>	26
6.3.5.	<i>Berekening</i>	26
6.4	Vergelijking trillingscontouren	26
6.5	Knelpuntslocaties	31
7	Stap 3 – Onderzoek naar maatregelen	32
7.1	Maatregelen tegen trillingshinder	32
7.1.1.	<i>Mogelijke maatregelen aan de bron</i>	32
7.1.2.	<i>Mogelijke maatregelen aan de transmissie</i>	33
7.1.3.	<i>Mogelijke maatregelen aan de ontvanger</i>	34
7.1.4.	<i>Te onderzoeken maatregelen</i>	34
7.2	Maatregelen in de bodem	34
7.2.1.	<i>Holle ruimte</i>	34
7.2.2.	<i>Betonnen trillingsscherm</i>	35
7.3	Maatregelen aan de ontvanger	37
7.3.1.	<i>Afveren van het gebouw</i>	37
7.3.2.	<i>Verstijven van de vloeren</i>	39
7.4	Conclusies en aanbevelingen	40
8	Conclusies en aanbevelingen	42
	Colofon	44
BI.1	Van Sijpesteijnkade 35	ii
BI.2	Park Plaza Hotel	v
BI.3	Stadskantoor Utrecht	viii
BI.4	Sijpesteijngebouw	xii

Bijlage I Gebruikte verkeersintensiteiten

Bijlage II Gegevens metingen

Bijlage III Resultaten VibraDyna

Bijlage IV Effect van mitigerende maatregelen

Inleiding

1.1 Achtergrond van dit rapport

In het kader van het project CU2030 wordt de stationsomgeving van Utrecht Centraal sterk aangepast. Behalve de bouw van een groot aantal nieuwe gebouwen, worden ook tram- en busroutes verlegd. In het plangebied van *Westflank-Noord* wordt daarnaast een deel van de bebouwing gesloopt, en een deel wordt nieuw gerealiseerd. Deze wijzigingen kunnen invloed hebben op de trillingssterkte ten gevolge van passerende trams en bussen in de gebouwen in het plangebied.

1.2 Doel van het onderzoek

Het doel van dit onderzoek is om voor het gehele plangebied van het bestemmingsplan, ten noordwesten van station Utrecht Centraal, een trillingsonderzoek uit te voeren. Dit trillingsonderzoek dient als basis voor het bestemmingsplan. Daarnaast wordt, indien noodzakelijk, aangegeven welke maatregelen kunnen worden genomen in de geplande bebouwing van *Westflank-Noord* om de trillingshinder te verminderen.

1.3 Algemeen onderzoekskader

De grenzen van het onderzoeksgebied zijn aangegeven in het bestemmingsplan. Voor het trillingsonderzoek wordt ook de bebouwing in de onmiddellijke nabijheid van het plangebied onderzocht.

1.4 Opzet van het onderzoek

Ten behoeve van het trillingsonderzoek voor *Westflank-Noord* worden achtereenvolgens de volgende stappen doorlopen:

1. Uitvoeren van metingen:
 - a. Metingen in gebouwen. Hierbij wordt eveneens gebruik gemaakt van metingen die in opdracht van ProRail zijn verricht in het kader van onderzoek ten behoeve van het project DSSU;
 - a. Een meting aan bussen om de trillingssterkte van bussen vast te leggen;
 - b. Een meting aan trams om de trillingssterkte van trams vast te leggen.
2. Het maken van een prognose van de trillingssituatie in het onderzoeksgebied, aan de hand van een trillingsmodel en de uitgevoerde metingen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen een aantal situaties:
 - a. 2015 (wel bussen, nog geen trams):
 - i. Autonome ontwikkeling van het spoor;
 - ii. Realisatie van DSSU;
 - b. 2018 (trams en bussen):
 - i. Autonome ontwikkeling van het spoor;
 - ii. Realisatie van DSSU
3. Voor locaties met overschrijdingen worden maatregelen ontworpen.

De stappen worden nader toegelicht in hoofdstuk 3.

1.5 Toegepaste kaders en uitgangspunten

De SBR richtlijn, deel B, vormt het afwegingskader voor de beoordeling van trillingshinder in het plangebied.

2 Situatiebeschrijving

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de verschillende beschouwde situaties. In het trillingsonderzoek wordt onderscheid gemaakt tussen vijf verschillende situaties:

- De nul- of referentiesituatie, conform de lay-out van het spoor, de bus- en tramlijnen uit 2012. Deze situatie wordt gebruikt om de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn vast te stellen;
- De eind- of plansituatie in 2015, na realisatie van de bebouwing van Westflank-noord, maar voor in gebruikname van de nieuwe tramlijn. De buslijnen zijn dan al wel omgelegd, er wordt gebruik gemaakt van het nieuwe busstation West in plaats van busstation Oost. In 2015 zijn er twee mogelijkheden voor de lay-out van de treinsporen, afhankelijk van de plannen van ProRail:
 - De sporen liggen conform de huidige situatie (*TB Sporen in Utrecht* kent geen wijzigingen aan deze zijde van het station);
 - De sporen liggen conform de geplande lay-out van het project *Doorstroomstation Utrecht* (DSSU).
- De eind- of plansituatie in 2018, waarbij ook de nieuwe tramlijn in gebruik is. In 2018 zijn er twee mogelijkheden voor de lay-out van de treinsporen, afhankelijk van de plannen van ProRail:
 - De sporen liggen conform de huidige situatie (*TB Sporen in Utrecht* kent geen wijzigingen aan deze zijde van het station);
 - De sporen liggen conform de geplande lay-out van het project *Doorstroomstation Utrecht* (DSSU).

In dit hoofdstuk worden de verschillende situaties en uitgangspunten nader toegelicht.

2.2 Uitgangspunten

In deze paragraaf worden de uitgangspunten voor de diverse berekeningen en situatiebeschrijvingen gegeven.

2.2.1. Referentiesituatie

Als uitgangspunt voor de referentiesituatie zijn de rijlijnen, constructies, intensiteiten en voertuigtypes uit 2012 gehanteerd. De meeste metingen zijn ook in 2012 uitgevoerd, de metingen uit 2013 zijn gecorrigeerd voor wijzigingen.

De gehanteerde intensiteiten voor de diverse voertuigtypes in dag-, avond- en nachtsituatie zijn weergegeven in Bijlage I.

De snelheden van de trams en bussen zijn gebaseerd op meetgegevens en de maximale verkeerssnelheden, van treinen zijn deze gebaseerd op de seinplaatsing.

2.2.2. Plansituatie

Voor de toekomstige situaties zijn de documenten in Tabel 2-1 gebruikt.

Tabel 2-1 Gebruikte documenten

Nr.	Document
[1]	DO Uithoflijn, WP1-BNS-320-001, versie 2.0, 13 februari 2013
[2]	<i>Stationsgebied Utrecht – HOV brug West Voorontwerp</i> , StudioSK, versie 3.0, 14 februari 2013
[3]	<i>HOV-viaduct Van Sijpesteijnkade, Ontwerputgangspunten DO</i> , Witteveen+Bos, UT674-1/ebej2/025, concept 01, 21 februari 2013

- [4] | *HOV-viaduct en toeritten Van Sijpesteijnkade, voorontwerp – ontwerpnota*, Witteveen+Bos, UT674-1/marr2/026, definitief 03, 5 maart 2013
- [5] | *VO Van Sijpesteijnkade, ontwerprapportage*, Witteveen+Bos, UT674-1/marr2/028, definitief 02, 5 maart 2013
- [6] | *VO en DO Herinrichting Mineurslaan, Voorontwerp, Deel Leeuwensteijn – Beatrixgeb.*, Witteveen+Bos, UT674.3.1102 en UT674.3.1103, 25 februari 2013

De gehanteerde intensiteiten voor de diverse voertuigtypes in dag-, avond- en nachtsituatie zijn weergegeven in Bijlage I. Deze gegevens zijn afkomstig uit prognoses van ProRail voor *Sporen in Utrecht* (autonome groeisituatie) en *DSSU* voor de treinen, en van de Bestuursregio Utrecht voor trams en bussen.

De snelheden van de trams en bussen zijn niet gewijzigd, van treinen zijn de snelheden gebaseerd op de seinplaatsing.

In het beoordelingskader, de SBR B-richtlijn, wordt onderscheid gemaakt tussen nieuwe en bestaande situaties. Bij bestaande situaties gaat het om bestaande en gehandhaafde bebouwing in een omgeving met bestaande trillingsbronnen. Bij nieuwe situaties gaat het om nieuwe bebouwing of om bestaande bebouwing in een omgeving met nieuwe trillingsbronnen.

In het onderzoeksgebied gaat het om bestaande trillingsbronnen. Alle bestaande bebouwing valt daarom onder bestaande situaties, Westflank-Noord valt onder nieuwe situaties omdat het om nieuwe bebouwing gaat.

2.3 Onderzoeksgebied

Het onderzoeksgebied voor het bestemmingsplan is weergegeven in Figuur 2-1, binnen het rode kader. Binnen dit gebied worden buslijnen aangepast, wordt de tramlijn verplaatst en wordt bebouwing gesloopt en nieuw gebouwd.

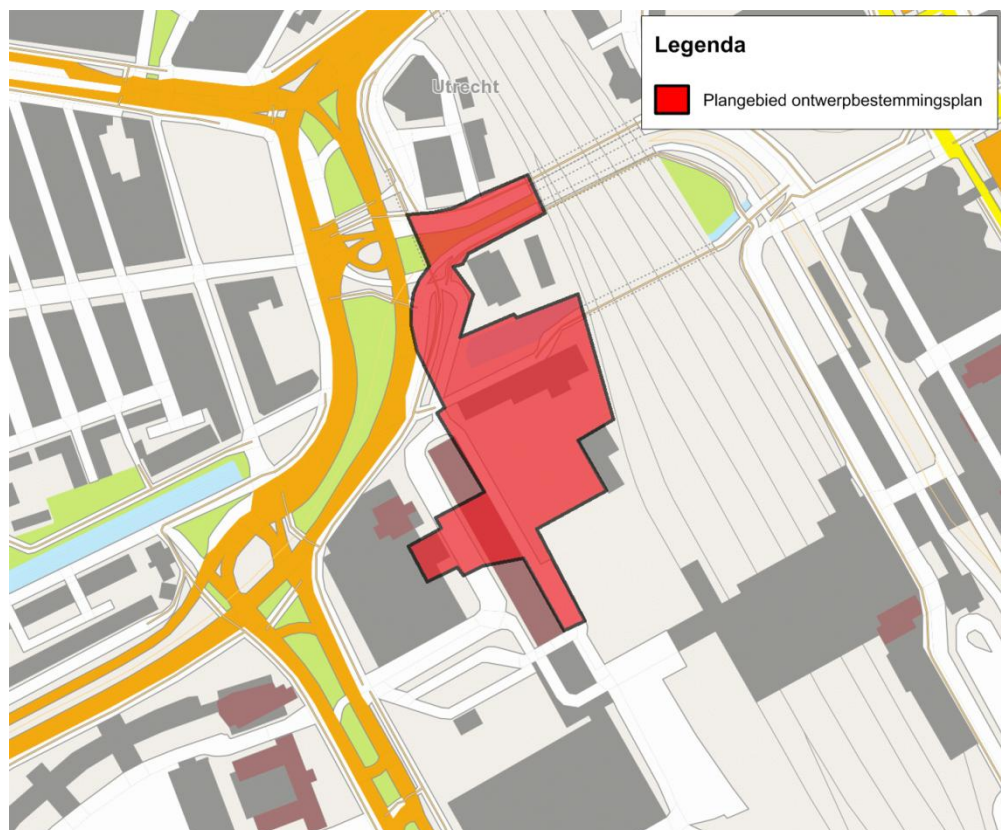
Het onderhavige trillingsonderzoek heeft een tweeledig doel:

1. Het bepalen van de invloed van de wijzigingen van de tram- en buslijnen in het bestemmingsplangebied op de omliggende bebouwing;
2. Het bepalen van de trillingshinder in de toekomstige bebouwing ter plaatse van Westflank-Noord.

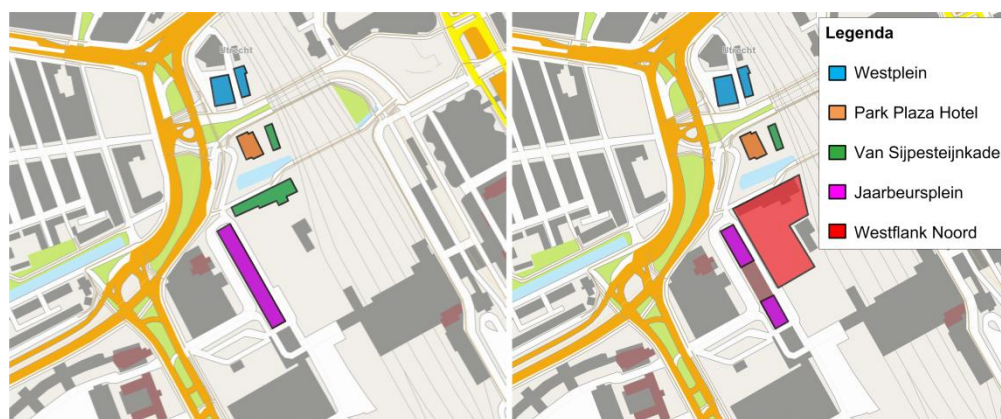
Er ligt geen bestaande bebouwing in het gebied van het bestemmingsplan. Echter, omdat de maatregelen aan de bussen en tramlijnen in het bestemmingsplangebied wel invloed hebben op de trillingssituatie in gebouwen in de nabijheid van dit gebied, dienen deze gebouwen wel te worden beschouwd. Gezien de reikwijdte van de trillingen van trams en bussen en de begrenzing van het bestemmingsplangebied zijn op basis van beide doelen een aantal bebouwingsgroepen geselecteerd waarvoor dit onderzoek wordt uitgevoerd. Deze bebouwingsgroepen in zowel de referentie- als de mogelijke eindsituaties zijn weergegeven in Figuur 2-2.

Omdat de exacte bebouwingsgrenzen van Westflank-Noord nog niet vastliggen, is voor het totale bebouwbare oppervlak gekozen als onderzoeksgebied;

Voor de Van Sijpesteijnkade geldt dat de bestaande bebouwing in de eindsituatie is gesloopt, hiervoor wordt daarom geen beoordeling op de SBR B-richtlijn uitgevoerd.



Figuur 2-1 Onderzoeksgebied trillingsonderzoek



Figuur 2-2 Bebouwing in onderzoeksgebied, referentiesituatie 2012 (links) en plansituatie 2015 en verder (rechts)

2.4 Referentiesituatie

Deze paragraaf bevat een beschrijving van de referentiesituatie in het onderzoeksgebied. Als referentiesituatie is de spoor- en wegligging van 2012 gekozen. De rijlijnen van trams en bussen in de referentiesituatie zijn weergegeven in Figuur 2-3. Alle bussen rond het onderzoeksgebied rijden door de Leidseveertunnel, aan weerszijden van de tramsporen.

De gegevens van het treinverkeer (snelheden, sporenlay-out, etc.) zijn afkomstig uit onderzoek dat is uitgevoerd ten behoeve van DSSU voor ProRail¹.

De snelheden van de trams zijn in de bocht bij het Westplein en in de Leidseveertunnel beperkt tot 30 km/uur. De bussen rijden hier 50 km/uur.

De gebruikte intensiteiten van bussen en trams zijn weergegeven in Bijlage I.



Figuur 2-3 Bus- en tramlijnen in de referentiesituatie

¹ Stuit, dr. ir. H.G. en ir. P.M. Boon, *Trillingsonderzoek t.b.v OTB/MER Doorstroomstation Utrecht Noordzijde (km 2.50 / 31.90 / 2.90) en Zuidzijde (km 5.50/39.25)*, Movares Nederland B.V., Kenmerk D79-PBO-KA-1300481, 1 mei 2013, versie 1.0

Deze paragraaf bevat een beschrijving van de plansituatie in het onderzoeksgebied in 2015.

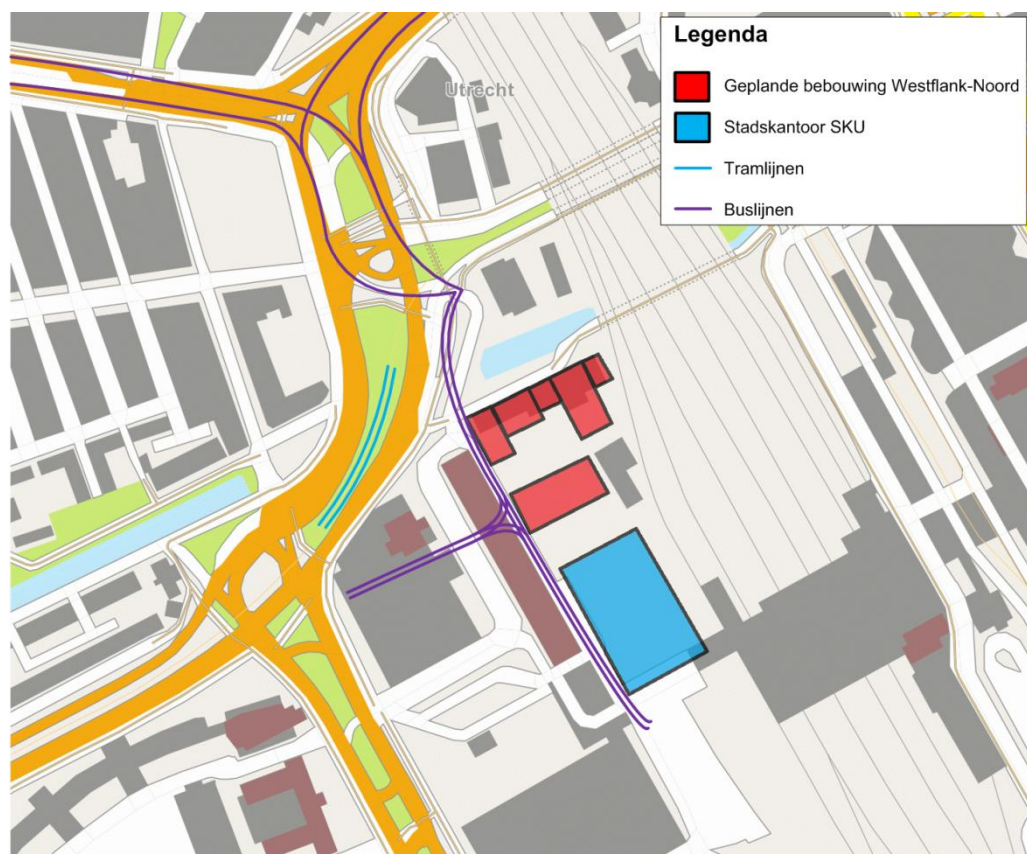
De rijlijnen van trams en bussen in 2015 zijn weergegeven in Figuur 2-4. In 2015 is de Leidseveertunnel afgesloten in verband met het omleggen van de tramsporen. De trams stoppen op de laatste halte aan de westzijde van het station, en gaan niet door de Leidseveertunnel. Het busstation aan de westzijde van het station is dan in gebruik, de bussen rijden over de nieuwe constructie.

De bebouwing aan de Van Sijpesteijkade is gesloopt in verband met de aanleg van de nieuwe tramlijn en Westflank-Noord.

De gegevens van het treinverkeer (snelheden, sporenlay-out, etc.) zijn afkomstig uit onderzoek dat is uitgevoerd ten behoeve van DSSU voor ProRail. In dit rapport zijn zowel de autonome groeisituatie als de situatie na DSSU weergegeven.

De bussen rijden 50 km/uur.

De gebruikte intensiteiten van bussen en trams zijn weergegeven in Bijlage I.



Figuur 2-4 Bus- en tramlijnen in de referentiesituatie

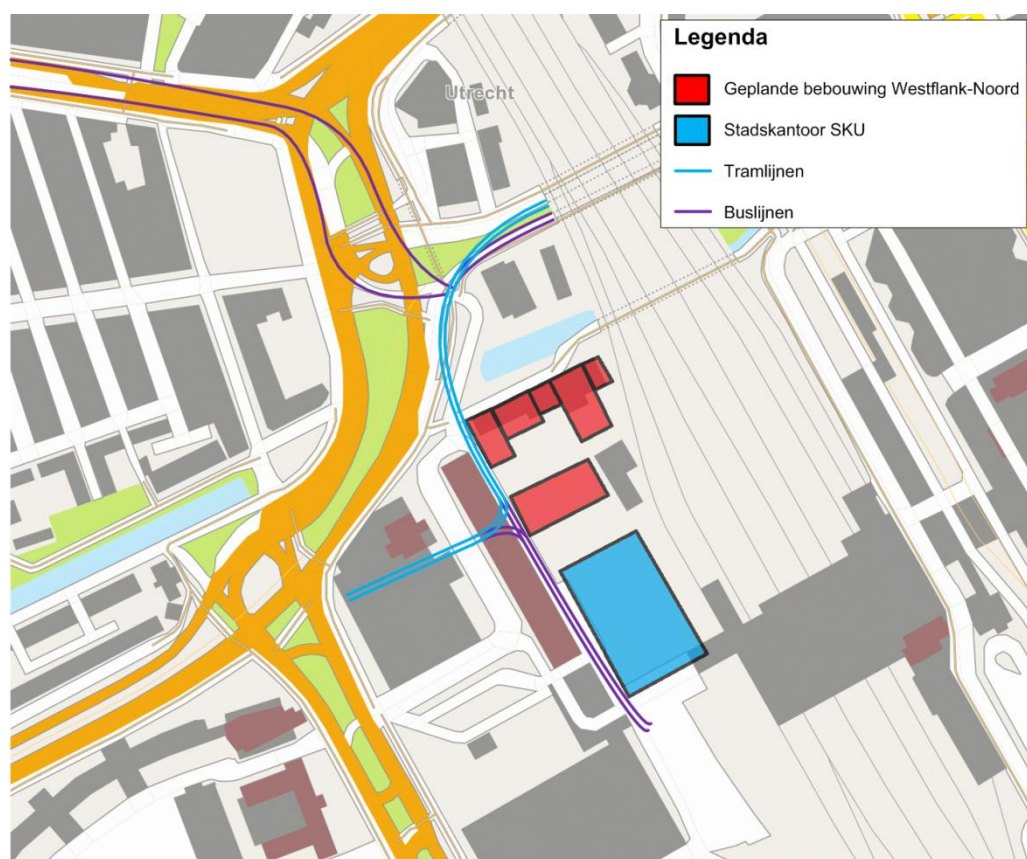
Deze paragraaf bevat een beschrijving van de plansituatie in het onderzoeksgebied in 2018.

De rijlijnen van trams en bussen in 2018 zijn weergegeven in Figuur 2-4. In 2018 is de Leidseveertunnel heropend. De trams rijden nu weer door tot aan de oostzijde van het station. De tramlijnen zijn verlegd in de Leidseveertunnel. De buslijnen zijn eveneens verlegd en rijden ook weer door de Leidseveertunnel.

De gegevens van het treinverkeer (snelheden, sporenlay-out, etc.) zijn afkomstig uit onderzoek dat is uitgevoerd ten behoeve van DSSU voor ProRail. In dit rapport zijn zowel de autonome groeisituatie als de situatie na DSSU weergegeven.

De bussen rijden 50 km/uur.

De gebruikte intensiteiten van bussen en trams zijn weergegeven in Bijlage I.



Figuur 2-5 Bus- en tramlijnen in de referentiesituatie

3 Opzet trillingsonderzoek

Zoals eerder vermeld worden ten behoeve van het trillingsonderzoek verschillende stappen doorlopen. De eerder genoemde stappen worden in dit hoofdstuk nader toegelicht.

3.1 Stap 1: Metingen

Binnen dit onderzoek zijn drie types metingen uitgevoerd. Deze metingen zijn gebruikt als invoer in het trillingsmodel VibraDyna². De volgende metingen zijn gebruikt in dit onderzoek:

1. Metingen in gebouwen, om de resultaten van het trillingsmodel te verfijnen. Binnen het huidige onderzoek is een meting uitgevoerd in het Park Plaza Hotel. In opdracht van ProRail zijn metingen uitgevoerd in de bebouwing aan de Van Sijpesteijnkade, het in aanbouw zijnde Stads Kantoor Utrecht en in het Sijpesteijngebouw aan het Jaarbeursplein. Bij deze metingen wordt met behulp van trillingssensoren de actuele trillingssterkte vastgelegd;
2. Metingen aan buspassages op een representatieve locatie in Utrecht op maaiveldniveau. Er is gekozen voor een locatie met een vergelijkbare baanopbouw als in de toekomstige situatie bij Westflank-Noord;
3. Metingen aan trampassages op maaiveldniveau. Er is gekozen voor een locatie in de Lange Hagelstraat in het onderzoeksgebied. De tramrails ligt daar momenteel op een betonplaat, evenals in de toekomstige situatie.

3.2 Stap 2: Modelberekeningen

Met behulp van de metingen zijn vervolgens modelberekeningen uitgevoerd met behulp van het trillingsmodel VibraDyna. Er wordt, conform hoofdstuk 2, een berekening uitgevoerd voor vijf verschillende situaties:

- a. Referentiesituatie (2012);
- b. 2015 (wel bussen, nog geen trams):
 - i. Autonome ontwikkeling van het spoor;
 - ii. Realisatie van DSSU;
- c. 2018 (trams en bussen):
 - i. Autonome ontwikkeling van het spoor;
 - ii. Realisatie van DSSU

Alle aannames in het model zijn worst-case (conservatief). Uit het model volgt voor elke locatie, en voor elke situatie, een trillingssituatie, die vervolgens beoordeeld wordt op de SBR B-richtlijn.

3.3 Stap 3: Ontwerpen van maatregelen

Voor elke locatie die niet voldoet aan de SBR B-richtlijn worden maatregelen ontworpen en doorgerekend. In deze stap wordt met behulp van modelberekeningen met behulp van Geovib³ voor locaties met overschrijdingen een aantal mitigerende maatregelen doorgerekend. Resultaat van deze stap is een advies met betrekking tot de te nemen maatregelen, gezien de kosten, inpassing en effectiviteit van de maatregelen. In hoofdstuk 5 (stap 1), hoofdstuk 6 (stap 2) en hoofdstuk 7 (stap 3) worden de bovenbeschreven stappen doorlopen.

² VibraDyna is een door Movares ontwikkeld trillingsmodel dat de trillingen van weg- en railverkeer berekent. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van versie 1.0.

³ Geovib is een 3D eindige elementenmodel dat de voortplanting van trillingen door de bodem berekent. Het model is heel geschikt om verschillende varianten van bijvoorbeeld de taludgeometrie door te rekenen, of om de invloed van trillingsmaatregelen te onderzoeken. Geovib is in het verleden ontwikkeld door Movares.

4 Toetsingskader trillingshinder

4.1 Algemeen

Treinverkeer kan aanleiding geven tot trillingen in gebouwen. Deze trillingen kunnen leiden tot schade of hinder. De Duitse DIN 4150-2 (1999) norm beschrijft criteria voor het meten en beoordelen van trillingen. De Nederlandse SBR richtlijn (2002) 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.

In dit onderzoek wordt alleen getoetst op deel B, hinder aan personen in gebouwen. Gevoelige apparatuur is niet aanwezig in het onderzochte gebouw (deel C), en toetsing op schade wordt alleen uitgevoerd indien de resultaten uit dit onderzoek daar aanleiding toe geven.

4.2 Grootheden in de SBR B-richtlijn

Conform de SBR B-richtlijn moeten twee grootheden worden gemeten:

1. De effectieve trillingssnelheid V_{max} , een dimensieloze indicatie van de maximaal ervaren trillingssterkte. Deze grootheid wordt bepaald als voortschrijdend gemiddelde per 30 seconden, zie par. 9.2 en 9.3 van de SBR B-richtlijn. Vervolgens wordt per 30 seconden de maximale waarde van dit voortschrijdend gemiddelde genomen.
Van al deze maximale waarden per 30 seconden wordt de maximale waarde bepaald, de $v_{eff, max}$. Vervolgens wordt, op basis van de vijftien hoogst gemeten waarden een statistische berekening uitgevoerd met als resultaat de trillingssterkte die niet wordt overschreden door 95 procent van de passerende treinen, de $v_{eff, max, stat}$.
De maximale waarde van $v_{eff, max}$ en $v_{eff, max, stat}$ is gelijk aan V_{max} , de te toetsen maximale trillingssterkte.
2. De trillingsintensiteit V_{per} , een dimensieloze indicatie van het tijdsgemiddelde van de trillingen. Deze grootheid 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 V_{per} . Het kwadratisch gemiddelde wordt vervolgens gecorrigeerd voor de tijd waarin de trillingssnelheden boven de 0.1 uitkomen, zie ook par. 9.8 van de SBR B-richtlijn.

4.3 Streefwaarden in de SBR B-richtlijn

De SBR B-richtlijn kent drie types streefwaarden:

1. A1, de onderste streefwaarde voor de trillingssterkte V_{max} ;
2. A2, de bovenste streefwaarde voor de trillingssterkte V_{max} ;
3. A3, de streefwaarde voor de trillingssterkte V_{per} .

De waarden van deze streefwaarden zijn afhankelijk van een aantal criteria:

1. Nieuwe of bestaande situatie;
2. Periode gedurende de dag;

3. Gebouwfunctie.

De verschillende criteria worden hieronder toegelicht.

4.3.1. Nieuwe of bestaande situatie

In de SBR B-richtlijn wordt onderscheid gemaakt tussen nieuwe en bestaande situaties, waarbij de richtlijnen voor nieuwe situaties strenger zijn dan voor bestaande situaties. Gezien de aanwezigheid van bestaande trillingsbronnen geldt voor de bebouwing die gehandhaafd blijft in het onderzoeksgebied een toetsing op bestaande situaties. Voor de geplande, nieuwe bebouwing geldt een toetsing op de strengere, nieuwe situatie, zie ook par. 10.3 van de SBR B-richtlijn.

4.3.2. Periode gedurende de dag

De SBR B-richtlijn maakt daarnaast onderscheid tussen dag, avond en nacht. Hierbij geldt dat de streefwaarden van de trillingssterktes gedurende de nacht lager zijn dan die gedurende de dag en avond. De SBR B-richtlijn kent de volgende periodes: dag (7.00 – 19.00 uur), avond (19.00 – 23.00 uur) en nacht (23.00 – 7.00 uur). De streefwaarden voor dag en avond zijn aan elkaar gelijk.

4.3.3. Gebouwfunctie

Als derde criterium wordt onderscheid gemaakt naar de functie van een gebouw. De SBR B-richtlijn kent de gebouwfuncties *Gezondheidszorg*, *Wonen*, *Kantoor*, *Bijeenkomsten* en *Kritische werkruimte*. Bij elke gebouwfunctie horen andere toegestane trillingssterktes. De huidige onderzoekslocatie heeft gebouwfunctie *Wonen*. Op basis van deze drie criteria zijn de streefwaarden voor A1, A2 en A3 weergegeven in Tabel 4-1 voor bestaande, en in Tabel 4-2 voor nieuwe situaties.

Tabel 4-1 Streefwaarden bestaande situatie volgens SBR B-richtlijn

Gebouwfunctie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Gezondheidszorg	0.2 ¹⁾	0.8	0.1	0.2	0.4	0.1
Wonen	0.2	0.8	0.1	0.2	0.4	0.1
Kantoor	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15
Bijeenkomsten	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15
Kritische werkruimte	0.1	0.1	---	0.1	0.1	---

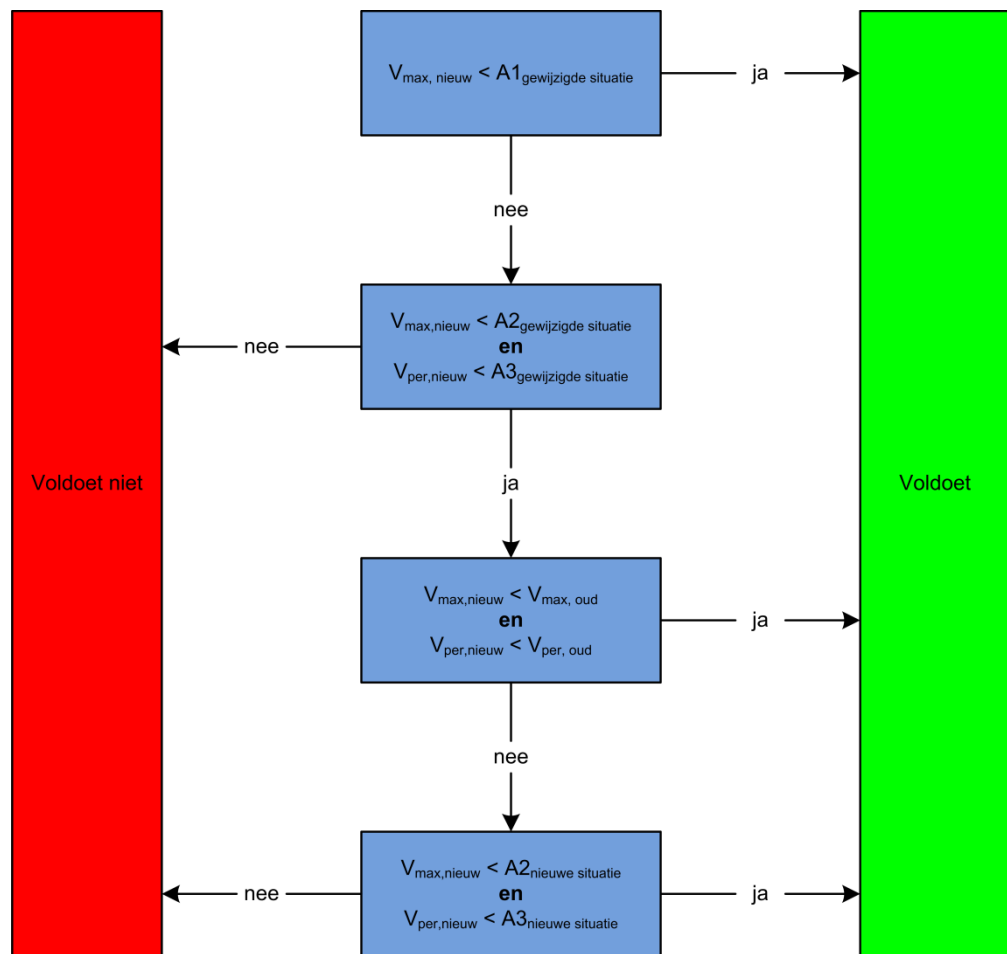
¹⁾ Een streefwaarde van 0.1 betekent een waarde kleiner dan 0.15

Tabel 4-2 Streefwaarden nieuwe situatie volgens SBR B-richtlijn

Gebouwfunctie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Gezondheidszorg	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
Wonen	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
Kantoor	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
Bijeenkomsten	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
Kritische werkruimte	0.1	0.1	---	0.1	0.1	---

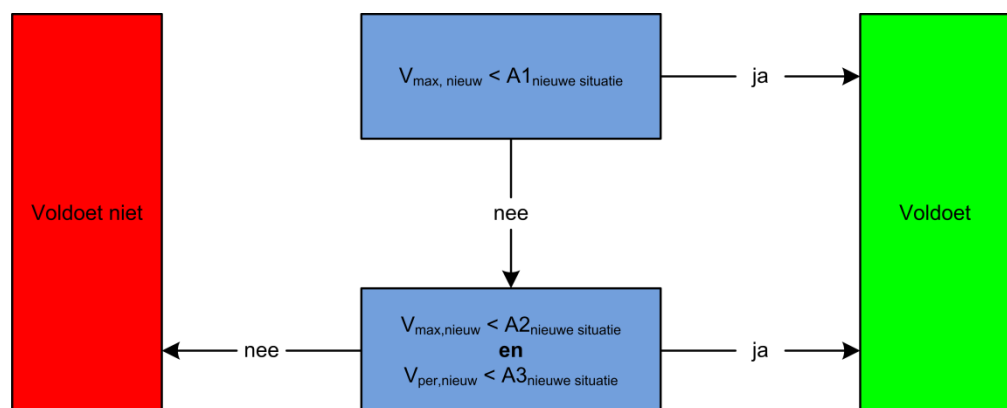
4.4 Toetsing in de SBR B-richtlijn

Om te beoordelen of een bestaande situatie voldoet, dient het schema in Figuur 4-1 te worden doorlopen. Bij metingen aan verkeer worden gewoonlijk de streefwaarden voor de nacht gehanteerd, omdat deze strenger zijn dan die van de dag. Deze keuze is gerechtvaardigd omdat het verkeer 's nachts doorgaans vergelijkbare maximale trillingssnelheden geeft als het verkeer overdag.



Figuur 4-1 Stroomschema toetsing bestaande situatie in SBR B-richtlijn

Om te beoordelen of een nieuwe situatie voldoet, dient het schema in Figuur 4-2 te worden doorlopen.



Figuur 4-2 Stroomschema toetsing nieuwe situatie in SBR B-richtlijn

4.5 De Beleidsregel Trillingshinder Spoor

Tot op heden zijn richtlijnen voor trillingshinder nog niet vastgelegd in wetgeving, zoals dat bijvoorbeeld voor geluidhinder wel het geval is. Vooruitlopend op toekomstige wetgeving heeft het ministerie van Infrastructuur en Milieu een *Beleidsregel Trillingshinder Spoor* (BTS) opgesteld, dat een wijziging van en

aanvulling op de SBR B-richtlijn is.

De BTS kent een andere bepaling van V_{max} en de verschillende streefwaarden, en is niet van toepassing op dit onderzoek. Voor de projecten *Sporen in Utrecht* en *DSSU* maakt ProRail wel gebruik van de BTS, zodat de toetsing in die projecten andere resultaten kan opleveren voor dezelfde gebouwen als het onderhavige onderzoek.

4.6 Beoordeling in huidige trillingsonderzoek

Beoordeling vindt in het huidige trillingsonderzoek op de volgende manier plaats:

1. De gemeten trillingssituatie wordt getoetst aan het schema in Figuur 4-1 of Figuur 4-2, afhankelijk van de vraag of het om nieuwe of bestaande bebouwing gaat. Hierbij worden voor toetsing op de SBR B-richtlijn de streefwaarden corresponderend met de gebouwfunctie uit Tabel 4-1 gekozen.
2. Wanneer een bepaalde locatie niet voldoet worden mitigerende maatregelen voorgesteld en afgewogen op doelmatigheid;

In dit onderzoek wordt alleen op de SBR B-richtlijn beoordeeld.

5 Stap 1 – Metingen

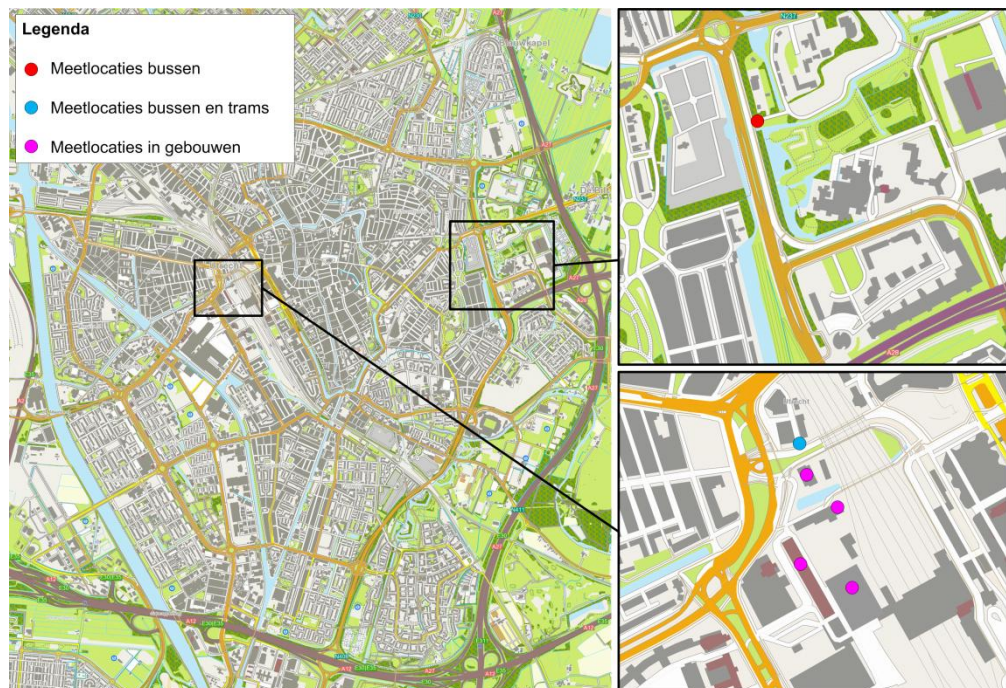
In de eerste stap van het trillingsonderzoek zijn verschillende metingen verricht. In dit hoofdstuk worden de metingen en resultaten nader toegelicht.

5.1 Meetlocaties

Er zijn twee types metingen in dit onderzoek gebruikt:

1. Metingen in gebouwen (uitgevoerd binnen dit onderzoek en binnen ProRail-onderzoek naar DSSU).
2. Metingen aan trams, bussen en treinen op maaiveld. De metingen aan de trams en bussen zijn uitgevoerd binnen dit onderzoek, de metingen aan de treinen binnen onderzoek van ProRail. Ook de bodemeigenschappen in het onderzoeksgebied zijn binnen ProRail-onderzoek vastgesteld.

Beide types metingen zijn gebruikt om de modelresultaten te verfijnen en nauwkeuriger te maken. De meetlocaties zijn weergegeven in Figuur 5-1.



Figuur 5-1 Overzicht meetlocaties

5.2 Metingen in gebouwen

Binnen dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van metingen op de volgende locaties:

1. Van Sijpesteijnkade 35 (woning wordt gesloopt);
2. Sijpesteijngebouw (Jaarbeursplein);
3. Stads kantoor Utrecht (in aanbouw);
4. Park Plaza Hotel.

Deze metingen worden in de volgende subparagrafen kort toegelicht, overige meetgegevens zijn te vinden in Bijlage II.

5.2.1. *Van Sijpesteijnkade 35*

Van Sijpesteijnkade 35 heeft als bestemming *wonen*, zie Figuur 5-2. In de plansituatie is dit gebouw gesloopt, zodat het niet mee wordt genomen in de beoordeling.



Figuur 5-2 *Voorgevel Van Sijpesteijnkade 35 (links)*

Het trillingssignaal van de trams en bussen is verwaarloosbaar op deze locatie, treinen zorgen voor de grootste trillingssterktes, zie ook Bijlage II.

5.2.2. *Park Plaza Hotel*

Het Park Plaza Hotel heeft als bestemming *wonen*, zie Figuur 5-3. Dit gebouw valt buiten het bestemmingsplangebied, maar behoort wel tot dit onderzoek omdat het op korte afstand van de gewijzigde tram- en buslijnen ligt.



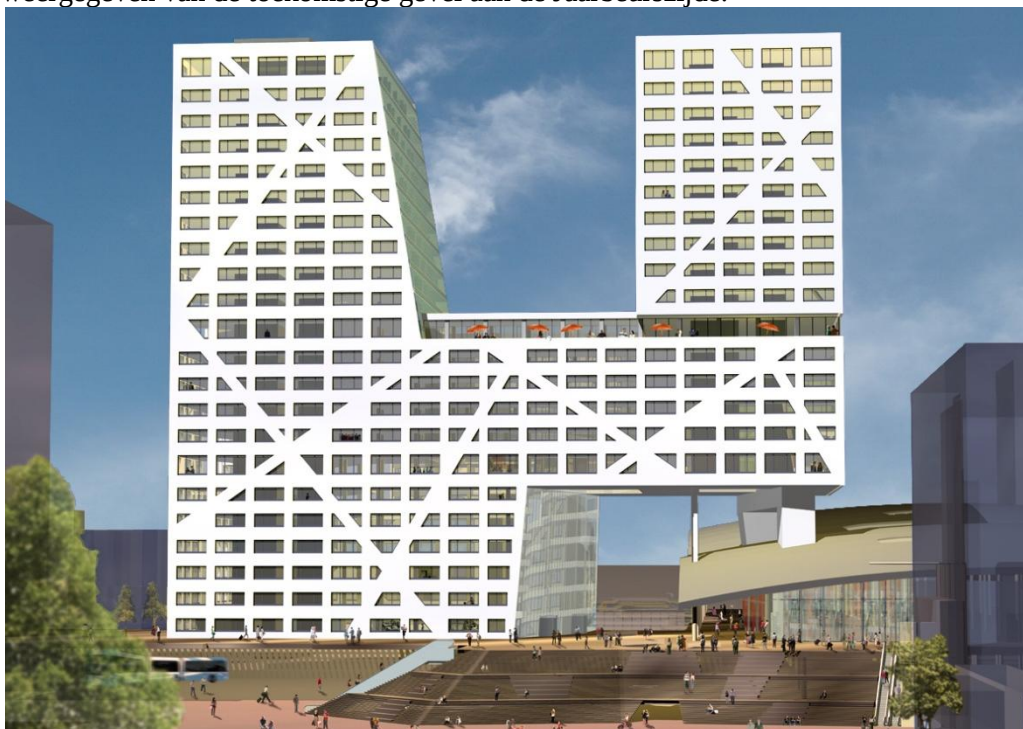
Figuur 5-3 *Voorgevel Park Plaza Hotel*

Aan de spoorzijde van het gebouw hebben treinen en bussen vergelijkbare trillingssterktes, aan de Westpleinzijde van het gebouw hebben bussen hogere trillingssterktes. De trillingssterktes van de bussen zijn hoger dan die van de trams.

5.2.3. *Stadskantoor Utrecht*

Het in aanbouw zijnde Stadskantoor Utrecht heeft als bestemming *kantoor*. Het gebouw valt buiten het onderzoeksgebied, maar is gebruikt in de modellen omdat het een vergelijkbare bouwhoogte en bouwstijl (stalen skelet met betonvloeren) heeft als

de geplande bebouwing van Westflank-Noord. In Figuur 5-4 is een impressie weergegeven van de toekomstige gevel aan de Jaarbeurszijde.



Figuur 5-4 Gevel Stadskantoor Utrecht

Bron: NS Stations

Het trillingssignaal van passagierstreinen, trams en bussen is verwaarloosbaar op deze locatie, goederentreinen zorgen voor de grootste trillingssterktes, zie ook Bijlage II.

5.2.4. Sijpesteijengebouw

Het Sijpesteijengebouw (Jaarbeursplein 19) heeft als bestemming *kantoor*, zie Figuur 5-5. Dit gebouw valt buiten het bestemmingsplangebied, maar behoort wel tot dit onderzoek omdat het op korte afstand van de gewijzigde tram- en buslijnen ligt.



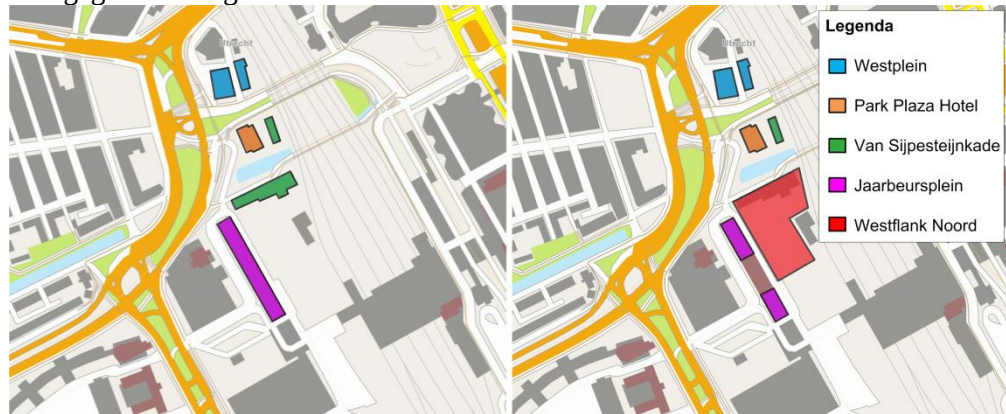
Figuur 5-5 Voorgevel Sijpesteijengebouw (midden)

Het trillingssignaal van passagierstreinen, trams en bussen is verwaarloosbaar op deze

locatie, goederentreinen zorgen voor de grootste trillingssterktes, zie ook Bijlage II.

5.2.5. Gebruik van metingen

De metingen in de gebouwen worden gebruikt om de resultaten van het stap 2-model te verfijnen. De bebouwingsvlakken in de referentie- en plansituatie zijn nogmaals weergegeven in Figuur 5-6.



Figuur 5-6 *Bebouwing in onderzoeksgebied, referentiesituatie 2012 (links) en plansituatie 2015 en later (rechts)*

De metingen zijn als volgt gebruikt in dit onderzoek:

1. De meting aan de Van Sijpesteijnkade wordt gebruikt om de resultaten voor de Van Sijpesteijnkade en de resultaten voor woningen in gebied Westplein te corrigeren. De bebouwing aan het Westplein en de Lange Hagelstraat heeft vergelijkbare kenmerken (bouwjaar, bouwhoogte en gevelstijl) als de bebouwing aan de Van Sijpesteijnkade;
2. De metingen in het Van Sijpesteijngebouw wordt gebruikt om de resultaten voor de kantoren aan het Jaarbeursplein te corrigeren. Deze kantoren hebben vergelijkbare bouwhoogte, bouwjaar en gevelstijl;
3. De metingen in het Stadskantoor wordt gebruikt om de resultaten voor het geplande bouwgebied van Westflank-Noord te bepalen. Bouwhoogte, bouwstijl en bouwjaar zijn vergelijkbaar, bij beide wordt gebruik gemaakt van een stalen geraamte met betonnen vloeren;
4. De metingen in het Park Plaza hotel worden gebruikt om de resultaten voor het hotel en het bijgelegen gebouw te corrigeren.

5.3 Maaiveldmetingen

Er zijn verschillende types maaiveldmetingen uitgevoerd:

1. Valproefmetingen om de demping van de bodem te bepalen. Deze zijn uitgevoerd in het kader van ProRail-onderzoek;
2. Maaiveldmetingen aan treinpassages. Deze zijn uitgevoerd in het kader van ProRail-onderzoek;
3. Maaiveldmetingen aan trampassages, uitgevoerd binnen het huidige onderzoek;
4. Maaiveldmetingen aan buspassages, uitgevoerd binnen het huidige onderzoek.

Deze metingen worden hieronder kort toegelicht.

5.3.1. Valproeven

Bij de valproeven is er gebruik gemaakt van een kunstmatige gecontroleerde bron die de bodem in trilling brengt. Trillingsopnemers registreerden de resulterende bodemtrillingen. Door de trillingsopnemers in een rij op de bodem te plaatsen, kunnen de loopsnelheden van de verschillende typen trillingsgolven (druk golf en schuif golf)

bepaald worden. De schuifgolf is de dominante trillingsgolf.

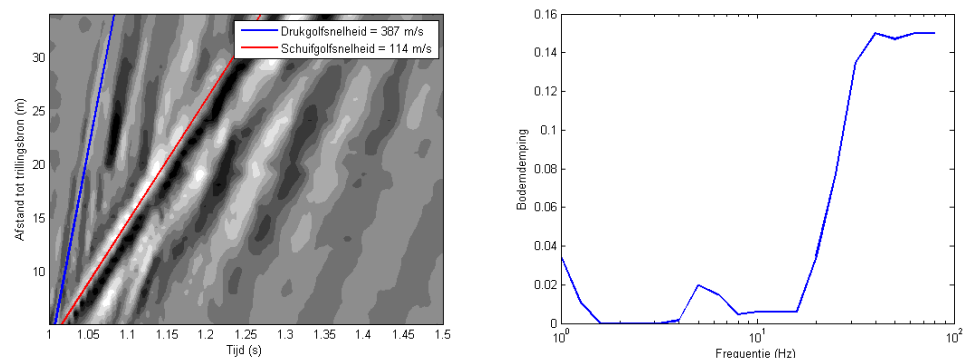
Als kunstmatige trillingsbron is gebruik gemaakt van een kleine heistelling met een valgewicht van 600 kg, zie Figuur 5-7. Het valgewicht valt binnen een stalen buis naar beneden op een staalplaat, waarbij de buis dient als geleiding van het valgewicht. De staalplaat is 1.25m x 1.25m en dient om de belasting van het valgewicht te spreiden op de bodem. De valhoogte bedroeg 0.5 of 1.0 meter.



Figuur 5-7 Opstelling valgewicht (links) en voetplaat en geleidingsbuis (rechts)

Door de afstand tussen trillingsbron en trillingsopnemers te variëren kan op elke willekeurige afstand tot de trillingsbron de trillingssterkte worden bepaald als functie van de afstand. Met behulp van deze gegevens kan (frequentieafhankelijk) de bodemdemping worden vastgesteld.

De resultaten van de valproefmeting aan het Westplein zijn weergegeven in Figuur 5-8. De gegevens zijn gebruikt in het gehanteerde trillingsmodel.



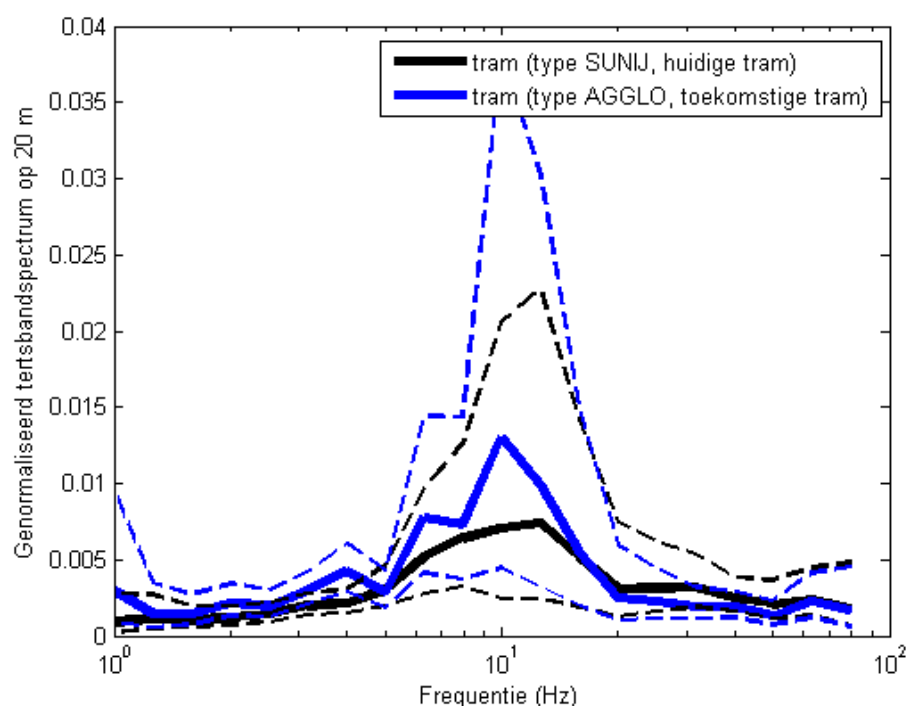
Figuur 5-8 Golfpatronen (links) en dempingsparameter als functie van de frequentie (rechts)

5.3.2. Trampassages

Binnen het huidige onderzoek zijn maaiveldmetingen uitgevoerd naar de passages van trams. Deze metingen zijn uitgevoerd in het onderzoeksgebied, aan de Lange Hagelstraat. Zowel in de huidige als de toekomstige situatie ligt de trambaan daar op beton. In de toekomstige situatie ligt de trambaan in het gehele onderzoeksgebied op

beton, zodat deze metingen als voldoende representatief beschouwd kan worden voor de trampassages in het onderzoeksgebied.

Door per trampassage het tertsbandspectrum van de trillingen en de bijbehorende snelheid te registreren, is per locatie een gemiddeld tertsbandspectrum vastgesteld, genormaliseerd voor snelheid. Het in het rekenmodel gebruikte spectrum is weergegeven in Figuur 5-9 voor zowel de huidige trams (SUNIJ) als de toekomstige trams (AGGLO-materieel). De eigenschappen van de AGGLO-trams zijn bepaald met behulp van een modelberekening, gebaseerd op de metingen aan de SUNIJ-trams en de verschillen in trameigenschappen⁴.



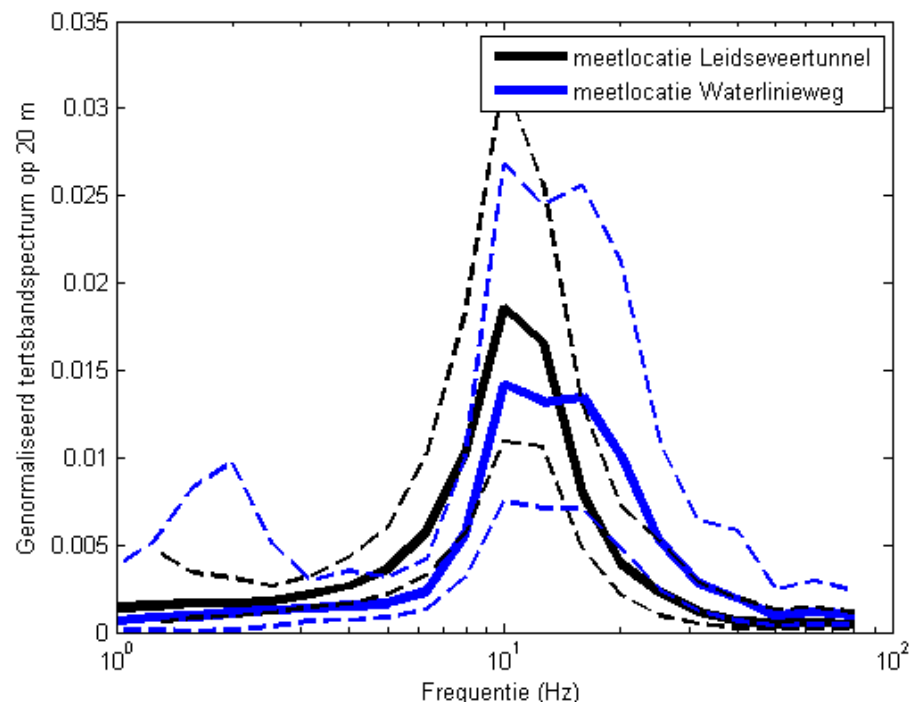
Figuur 5-9 Voor snelheid genormaliseerde tertsbandspectra voor trams

5.3.3. Buspassages

Daarnaast zijn maaiveldmetingen uitgevoerd naar de passages van bussen. Deze metingen zijn uitgevoerd in het onderzoeksgebied, aan de Lange Hagelstraat, en buiten het onderzoeksgebied, langs de Waterlinieweg. De metingen buiten het onderzoeksgebied zijn uitgevoerd omdat de bussen bij de Lange Hagelstraat niet over beton rijden. Bij de Waterlinieweg ligt wel een betonnen busbaan. Voor de verschillen in bodemeigenschappen tussen beide locaties is gecorrigeerd.

Door per buspassage het tertsbandspectrum van de trillingen en de bijbehorende snelheid te registreren, is per locatie een gemiddeld tertsbandspectrum vastgesteld, genormaliseerd voor snelheid, zie Figuur 5-10.

⁴ Berekening is uitgevoerd met behulp van het Spoormodel, een door Movares ontwikkeld model om de trillingen van voertuigsystemen te beschrijven. Door zowel de SUNIJ als de AGGLO trams in dit model te berekenen, kan de verhouding tussen beide trams worden bepaald. De metingen zijn met deze verhouding gecorrigeerd.

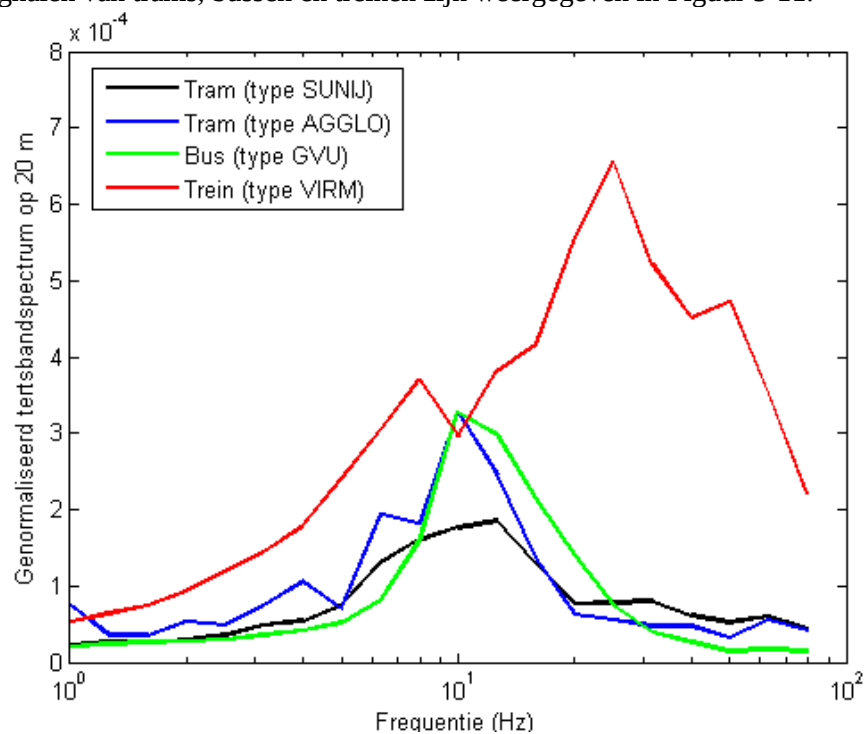


Figuur 5-10 Voor snelheid genormaliseerde tertsbandspectra voor bussen

5.3.4. Treinpassages

In het kader van het ProRail-onderzoek zijn maaiveldmetingen uitgevoerd aan passerende treinen. Door per treinpassage het tertsbandspectrum van de trillingen en de bijbehorende snelheid te registreren, is per locatie een gemiddeld tertsbandspectrum vastgesteld, genormaliseerd voor snelheid.

De signalen van trams, bussen en treinen zijn weergegeven in Figuur 5-11.



Figuur 5-11 Voor snelheid genormaliseerde tertsbandspectra voor treintype VIRM

De toekomstige AGGLO-trams hebben vergelijkbare trillingsspectra als de bussen in de huidige situatie. Treinen hebben aanzienlijk hogere trillingssterktes, zeker gezien het feit dat bijvoorbeeld goederentreinen nog veel hogere waarden in het spectra hebben.

6 Stap 2 – Modelberekeningen

6.1 Inleiding

In de tweede stap van het trillingsonderzoek wordt voor de verschillende situaties de trillingssterkte bepaald in het gehele onderzoeksgebied.

De bodemeigenschappen en trillingssignalen van trams, bussen en treinen zijn bepaald uit valproeven respectievelijk maaiveldmetingen. Deze metingen zijn deels uitgevoerd in opdracht van ProRail in het kader van het project DSSU, en deels binnen het huidige onderzoek, zie hoofdstuk 5. Deze resultaten zijn als input gebruikt voor VibraDyna.

6.2 Opzet trillingsmodel stap 2

Voor de modelberekeningen wordt gebruik gemaakt van VibraDyna. Dit model bepaalt de trillingshinder op basis van de geografische ligging van bron en ontvanger. In het model worden grofweg de volgende stappen onderscheiden:

1. Geografische posities van rijlijnen, oneffenheden (zoals wissels, voegovergangen van kunstwerken en drempels) worden bepaald;
2. Alle gegevens worden ingeladen in het rekenmodel. VibraDyna geeft als resultaat per roosterpunt een trillingssterkte (V_{max}) en een trillingsintensiteit (V_{per});
3. De trillingscontouren van de verschillende toekomstige situaties worden met de referentiesituatie vergeleken om overschrijdingen van de grenswaarden in de SBR B-richtlijn te constateren.

6.3 Rekenmodule stap 2 6.3.1. Barkanvergelijking

Het rekenmodel 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.

De Barkanvergelijking is per onderzoekslocatie bepaald met behulp van valproefmetingen. Hierbij wordt een groot aantal trillingssensoren op verschillende afstanden van de trillingsbron geplaatst. Vervolgens wordt de Barkanvergelijking gefit door de resultaten. Uit deze vergelijking worden de bodemeigenschappen van de onderzoekslocatie bepaald.

6.3.2. Transmissie

In de overdracht van trillingen van bron naar ontvanger wordt een aantal stappen onderscheiden. Een voorbeeld van een dwarsdoorsnede van een gebied langs het spoor is weergegeven in Figuur 6-1.

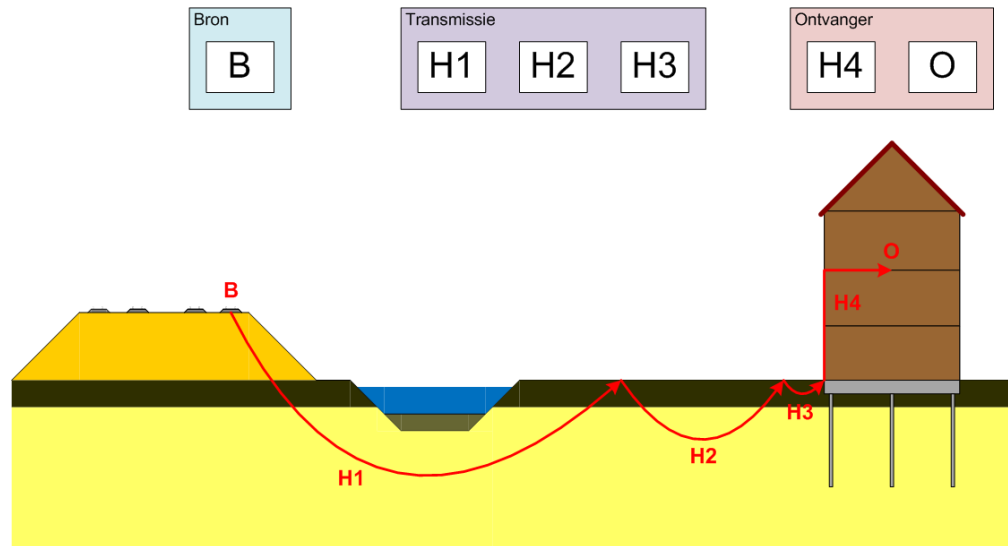
Er wordt onderscheid gemaakt tussen de bron, de transmissie (of overdracht) en de ontvanger. Elk van deze drie onderdelen heeft zijn eigen karakteristieke parameters, die in de volgende subparagrafen nader worden toegelicht.

6.3.3. Tertsbandspectra

In VibraDyna is in dit onderzoek gebruik gemaakt van de meest nauwkeurige trillingsbepaling die het model kent, namelijk met behulp van zogenaamde tertsbandspectra van trillingssignalen. Uit een groot aantal onderzoeken blijkt dat de tertsbandspectra van verkeer, mits genormaliseerd voor snelheid, per voertuigtype weinig variatie kennen. De beperkte variatie die er is wordt veroorzaakt door de wielonrondheid en aslast.

Ook een groot aantal andere invloeden is frequentieafhankelijk. Te denken valt aan de invloed van wissels en drempels, geometriewijzigingen of de demping van de bodem.

Door deze invloeden frequentieafhankelijk in het model in te voeren, wordt de nauwkeurigheid van het trillingsmodel vergroot.



Figuur 6-1 Transmissie van trillingen

6.3.4. Relatie tussen tertsbandspectrum en v_{eff}

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

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

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

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

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

6.3.5. Berekening

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

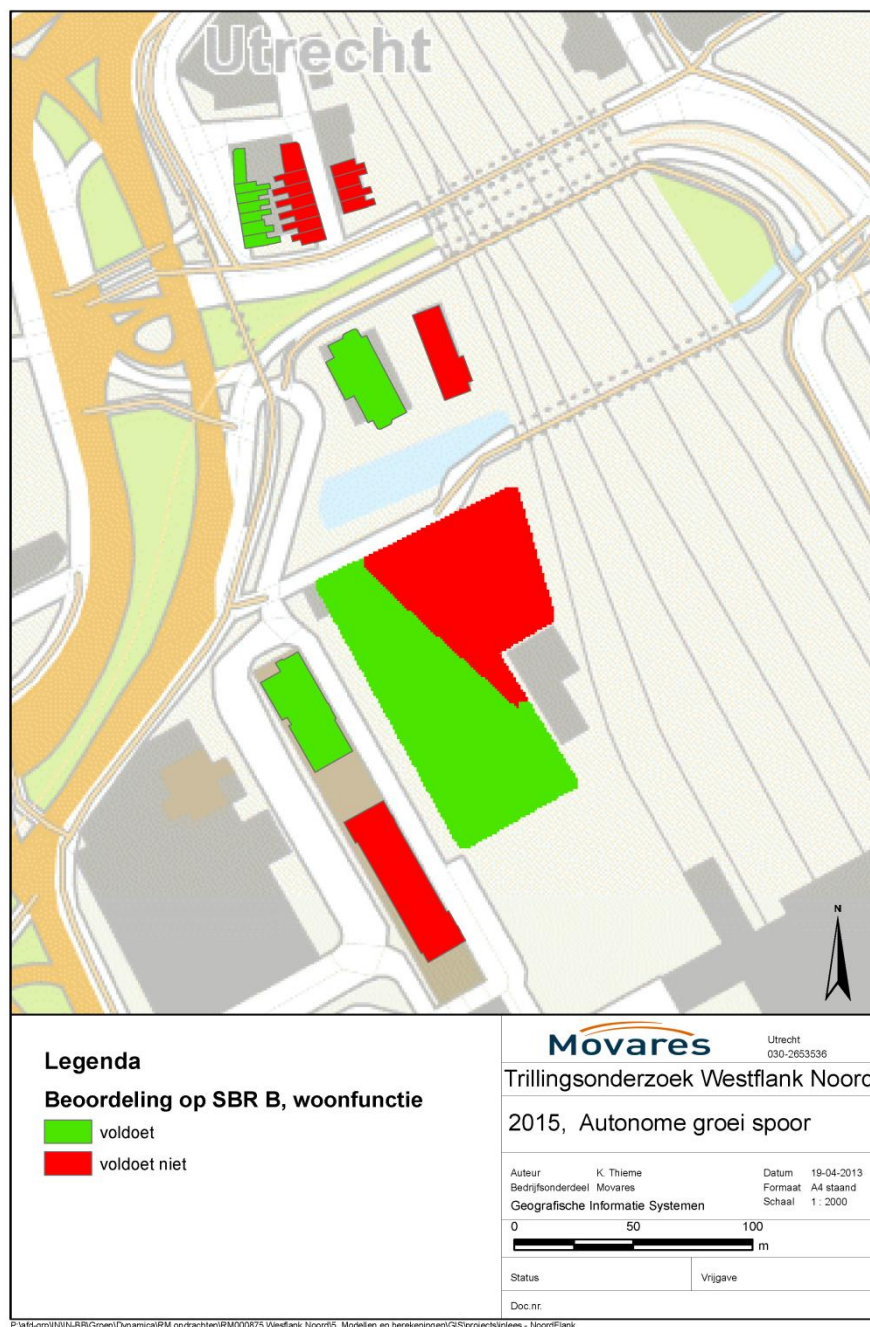
De trillingsintensiteit V_{per} wordt op analoge wijze als in stap 1 berekend.

6.4 Vergelijking trillingscontouren

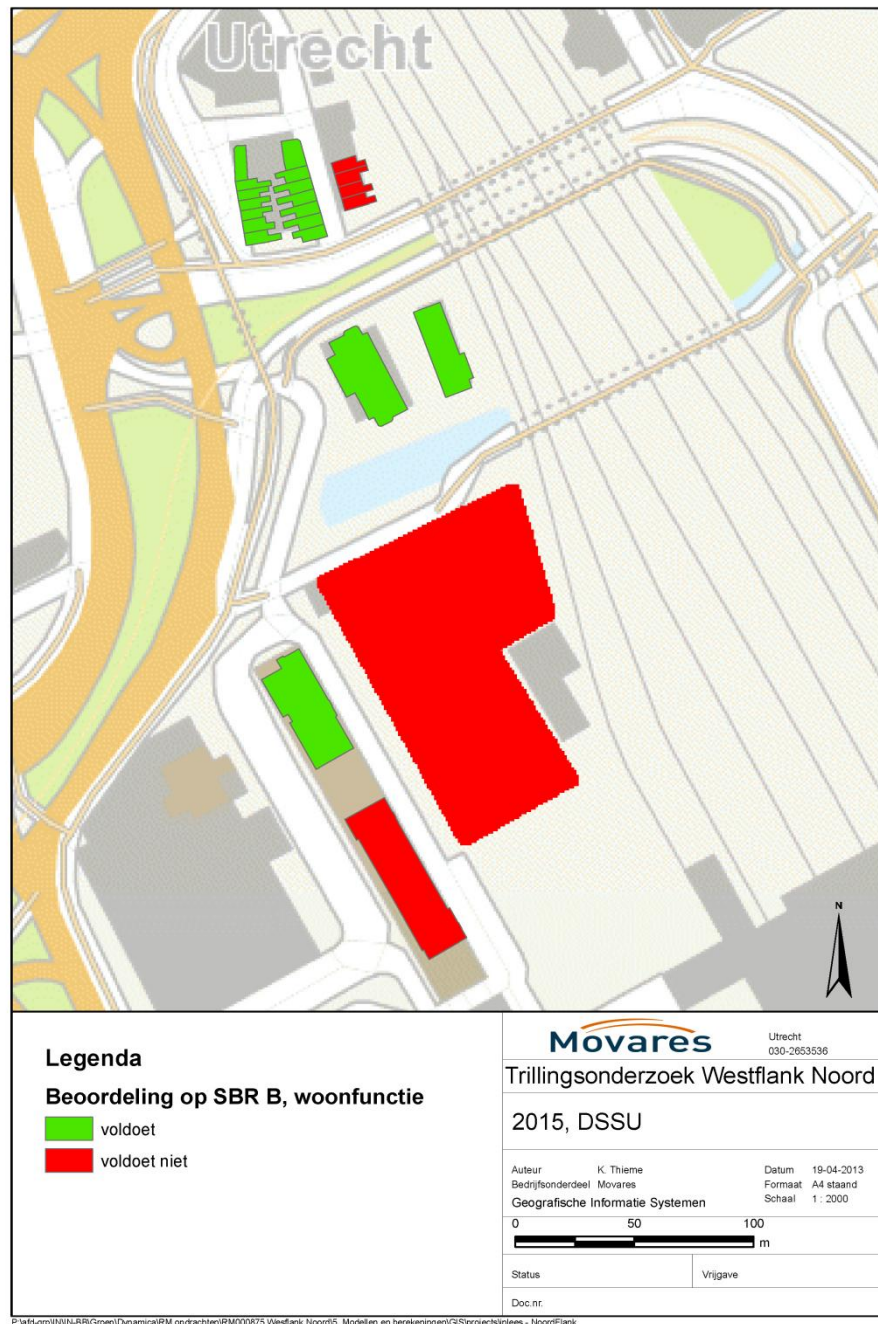
Met behulp van VibraDyna zijn voor alle gebouwen binnen 200 meter van de sporen en voor het rekenrooster de trillingssterkte V_{max} , bepaald conform de SBR B-richtlijn, en de trillingsintensiteit V_{per} , bepaald. Deze contouren zijn voor de verschillende situaties weergegeven in Bijlage III. Voor de inventarisatie van knelpuntlocaties in de

diverse plansituaties, worden de waarden van V_{max} in de plansituatie vergeleken met de waarden van V_{max} in de referentiesituatie en getoetst aan de SBR B-richtlijn. Dezelfde procedure wordt gevolgd voor V_{per} .

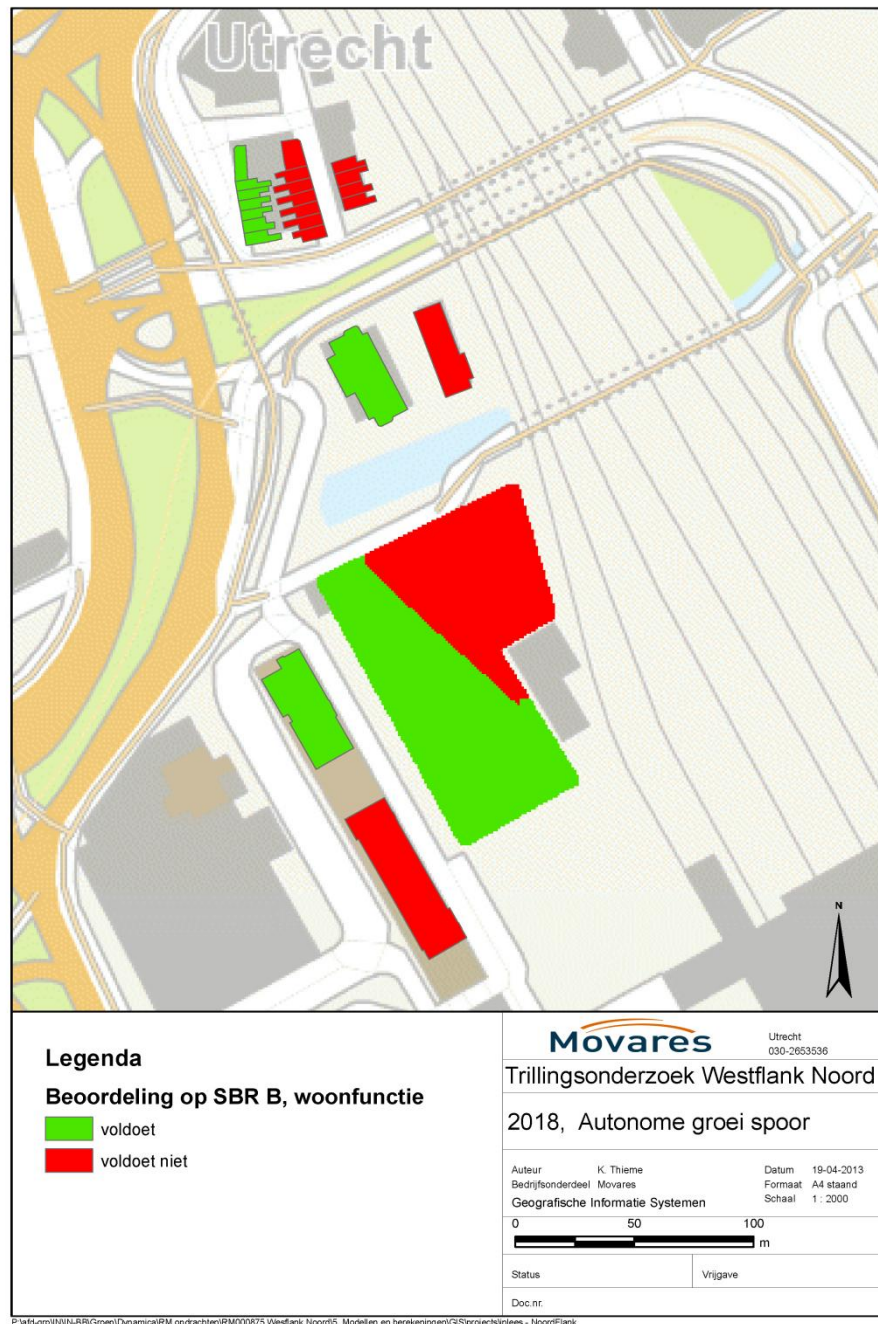
Het resultaat van deze toetsing is weergegeven in Figuur 6-2 voor 2015, autonome groei van het spoor, in Figuur 6-3 voor 2015, na realisatie van DSSU, in Figuur 6-4 voor 2018, autonome groei van het spoor en in Figuur 6-5 voor 2018, na realisatie van DSSU. Voor Westflank-Noord is de bestemming *wonen* weergegeven.



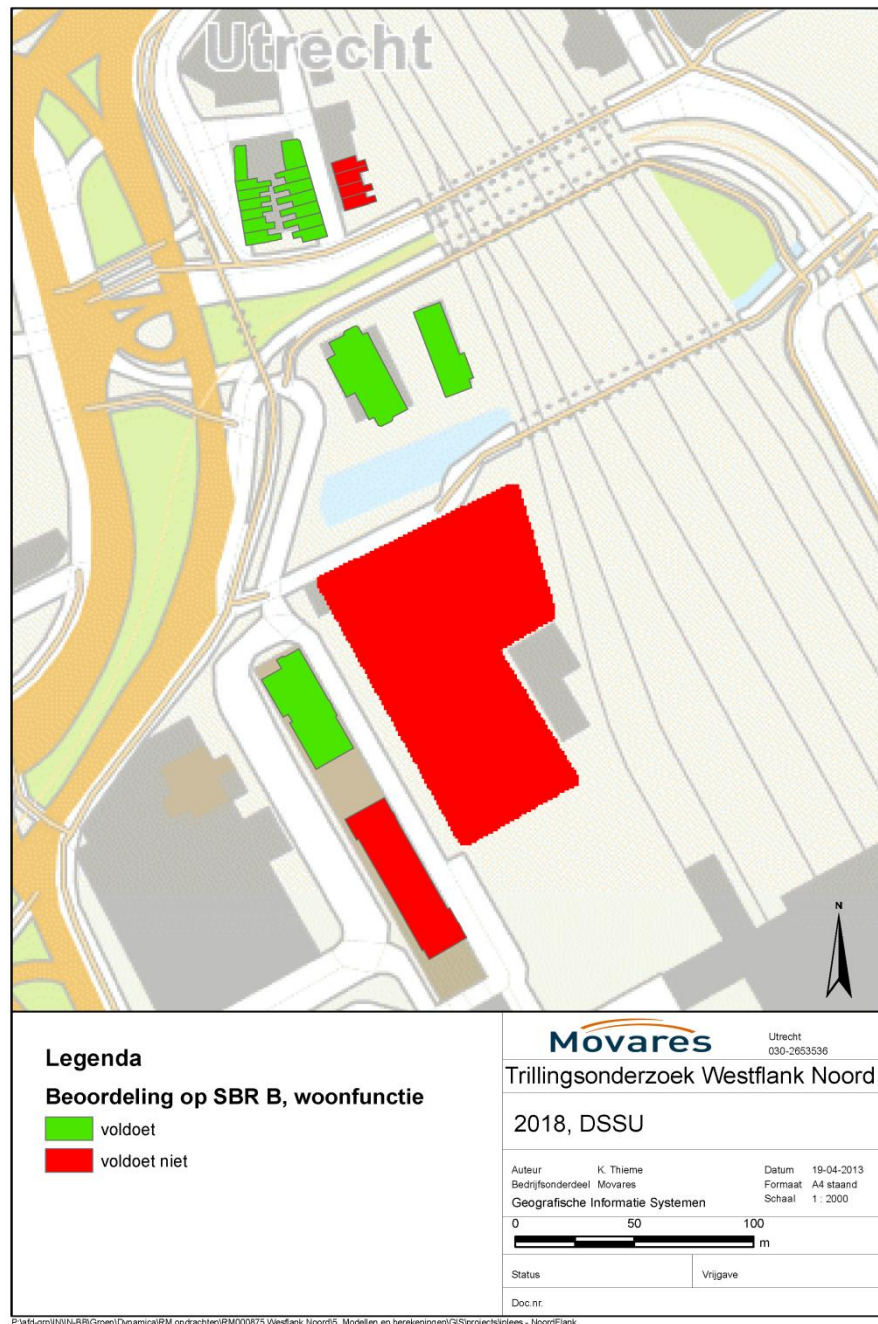
Figuur 6-2 Beoordeling, 2015, autonome groeisituatie



Figuur 6-3 Beoordeling, 2015, na DSSU



Figuur 6-4 Beoordeling, 2018, autonome groeisituatie



Figuur 6-5 Beoordeling, 2018, na DSSU

De in Figuur 6-2 tot en met Figuur 6-5 weergegeven waarden zijn samengevat weergegeven in Tabel 6-1.

Tabel 6-1 *Samenvatting resultaten*

Locatie	2015		2018	
	Autonome groei	DSSU	Autonome groei	DSSU
Van Sijpesteijnkade				
Westplein				
Westflank-Noord				
Park Plaza Hotel				
Jaarbeursplein				

Het bestemmingsplan van Westflank-Noord (verlegging routes bussen en trams) leidt niet tot overschrijdingen van de SBR B-richtlijn in de bestaande (en gehandhaafde) bebouwing, de treinen zorgen wel in sommige gebouwen voor mogelijke overschrijdingen van de SBR B-richtlijn. Zowel bij de autonome groeisituatie als bij realisatie van DSSU treden deze mogelijke effecten op.

Het valt niet binnen de scope van dit onderzoek om voor de bestaande bebouwing maatregelen te ontwerpen die worden veroorzaakt door (de wijzigingen aan) de sporen. Dit wordt binnen het ProRail-onderzoek naar DSSU uitgevoerd.

Omdat een deel van het onderzoeksgebied voor de bebouwing van Westflank-Noord niet voldoet aan de SBR B-richtlijn, worden voor dit gedeelte wel maatregelen ontworpen om de trillingshinder te verminderen. Ten aanzien van de verantwoordelijkheid voor het nemen van maatregelen geldt het volgende:

1. De bouwer van Westflank-Noord dient rekening te houden met op dat moment aanwezige trillingsbronnen of al in bestemmingsplannen vastgestelde toekomstige trillingsbronnen.
In dit geval geldt dat bij de bouw van Westflank-Noord rekening dient te worden gehouden met de trillingen van trams en bussen, plus die van de autonome groei van het spoor;
2. Indien het bestemmingsplan van Westflank-Noord eerder wordt vastgesteld dan het tracébesluit van DSSU, dan dienen maatregelen om de overschrijdingen ten gevolge van DSSU te mitigeren, genomen te worden binnen het ProRail-project DSSU. Wanneer het tracébesluit van DSSU eerder wordt vastgesteld dan het bestemmingsplan, dan dienen maatregelen ter mitigatie van de trillingshinder genomen te worden bij de bouw van Westflank-Noord.

Op dit moment zijn de tijdspaden van beide plannen nog onvoldoende duidelijk om een uitspraak te kunnen doen over welke partij maatregelen dient te nemen ter mitigatie van de effecten van DSSU. Daarom wordt in dit onderzoek ook gekeken naar het mitigeren van de effecten van DSSU. Het mitigeren van de effecten van de autonome groeisituatie valt hoe dan ook onder de verantwoordelijkheid van de bouwer van Westflank-Noord. Dit onderzoek naar maatregelen is beschreven in hoofdstuk 7.

7 Stap 3 – Onderzoek naar maatregelen

Een deel van het onderzoeksgebied voor de bebouwing van Westflank-Noord voldoet niet aan de SBR B-richtlijn. Voor dit gebied is een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. In dit hoofdstuk worden deze maatregelen nader toegelicht.

De trams en bussen zorgen niet voor een overschrijding van de SBR B-richtlijn, zodat het nemen van maatregelen zich binnen dit onderzoek focust op het verminderen van de trillingshinder ten gevolge van het treinverkeer.

In dit hoofdstuk wordt eerst een korte uiteenzetting gegeven van de mogelijke maatregelen, vervolgens wordt het selectieproces van de maatregelen toegelicht.

7.1 Maatregelen tegen trillingshinder

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

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

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

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

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

7.1.1. Mogelijke maatregelen aan de bron

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

- A.1. Een mogelijke bronmaatregel is de aanpassing van het spoorstaafprofiel (stijver profiel). De invloed van deze maatregel is echter beperkt;
- A.2. Raildempers. Raildempers dempen de trillingen van de spoorstaaf, dit leidt tot een lager geluidsniveau. Raildempers zijn echter niet effectief in het frequentiegebied van 1-80 Hz, het gebied dat van belang is voor trillingen. De invloed van deze maatregel is daarom beperkt;

B.3. Dwarsliggermatten. Dwarsliggermatten kunnen op 2 verschillende wijzen bijdragen aan een lager trillingsniveau:

1. Door de elasticiteit van de dwarsliggermat fungeert het spoor als een systeem dat bepaalde frequenties uit het trillingssignaal reduceert. Bij lage frequenties kan echter ook versterking van het trillingsniveau optreden, wat deze maatregel minder effectief maakt voor trillingen van goederentreinen. Goederentreinen hebben vooral laagfrequente trillingssignalen;
2. De belasting van de trein wordt over meer dwarsliggers verdeeld op de ballast, waardoor de kwaliteit van de ballast minder snel afneemt, en daarmee de kwaliteit van het spoor. Een goede spoorligging heeft een positief effect op het trillingsniveau;

B.4. Ballastmatten. Door de elasticiteit van de ballastmat fungeert het spoor als een systeem dat bepaalde frequenties uit het trillingssignaal reduceert. Bij lage frequenties kan echter ook versterking van het trillingsniveau optreden, wat deze maatregel minder effectief maakt voor trillingen van goederentreinen;

B.5. Floating Slab Track. Deze spoorconstructie bestaat uit een afgeveerde betonplaat waar het spoor op gemonteerd is. Met een Floating Slab Track kunnen, vergeleken bij ballastmatten of dwarsliggermatten, ook lagere frequenties worden gereduceerd. Goederentreinen genereren echter vaak ook trillingen in het frequentiegebied waar de Floating Slab Track trillingen versterkt, wat deze maatregel minder effectief maakt voor trillingen van goederentreinen;

In dit onderzoek zijn geen bronmaatregelen onderzocht, vooral omdat de hoge trillingssterktes van meerdere sporen afkomstig zijn. Daarom dienen bronmaatregelen ook aan meerdere sporen te worden genomen, wat de kosten sterk opdrijft. Bovendien is het effect van de bronmaatregelen te beperkt om de trillingssterktes voldoende te reduceren.

7.1.2. Mogelijke maatregelen aan de transmissie

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

- T.1. Een holle ruimte in de bodem, ingeklemd door damwanden. Deze holle ruimte fungeert als trillingsscherm. Hierbij zijn diverse afmetingen mogelijk. Deze constructie dient te worden afgeschermd om erin vallen te voorkomen;
- T.2. Betonnen trillingsscherm (Ondergrondse Trillingsreducerende Constructie, OTC) aanleggen;
- T.3. Beklede keerwand aanleggen. Een beklede diepwand is een trillingsscherm dat aan minimaal één zijde bekleed is met zacht materiaal om een maximale demping van de trillingen te bereiken;
- T.4. Zettingsvrije plaat onder het spoor. Het toepassen van een zettingsvrije plaat onder de sporen kan voor een reductie van trillingen zorgen door de hogere stijfheid van de zettingsvrije plaat, vergeleken met een aardebaan. Vanwege het verhoogde talud kan zo'n zettingsvrije plaat de trillingssterkte echter ook verhogen;

7.1.3. Mogelijke maatregelen aan de ontvanger

De laatste categorie maatregelen zijn maatregelen aan de ontvanger, aan het gebouw. De volgende maatregelen zijn mogelijk:

- O.1. Afveren van het gebouw. Door het toepassen van damping onder het gebouw is de trillingssterkte te reduceren. Deze methode is alleen haalbaar vanaf ongeveer 2 Hz, frequenties daaronder worden juist versterkt.
- O.2. Verstijven van de constructie. Omdat de hoge trillingssnelheden vooral in verticale richting optreden, kan het aanpassen van de vloeroverspanningen en/of de vloerdiktes in het definitieve ontwerp de trillingssterkte voldoende reduceren.

7.1.4. Te onderzoeken maatregelen

Gezien de overwegingen in de voorgaande paragrafen worden de maatregelen T.1 (holle ruimte), T.2 (trillingsscherm), O.1 (afveren) en O.2 (verstijven) nader onderzocht. Maatregel T.3 is niet onderzocht, omdat deze aanzienlijk duurder is en moeilijker uit te voeren dan maatregelen T.1 en T.2.

7.2 Maatregelen in de bodem

Er zijn twee types maatregelen aan de transmissie nader onderzocht, een holle ruimte, ingeklemd tussen twee damwanden, en een betonnen trillingsscherm. Van beide types maatregelen zijn meerdere varianten onderzocht, in de volgende subparagrafen worden deze maatregelen nader toegelicht.

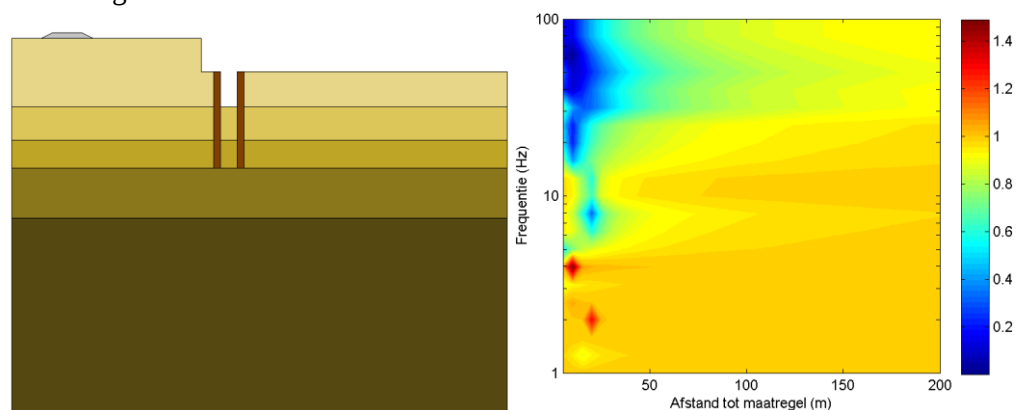
7.2.1. Holle ruimte

Een holle ruimte in de bodem wordt gecreëerd door het plaatsen van twee damwanden op korte afstand van elkaar, en het vervolgens verwijderen van de tussengelegen grond. Er zijn twee verschillende afmetingen van een dergelijke holle ruimte onderzocht, zie Tabel 7-1.

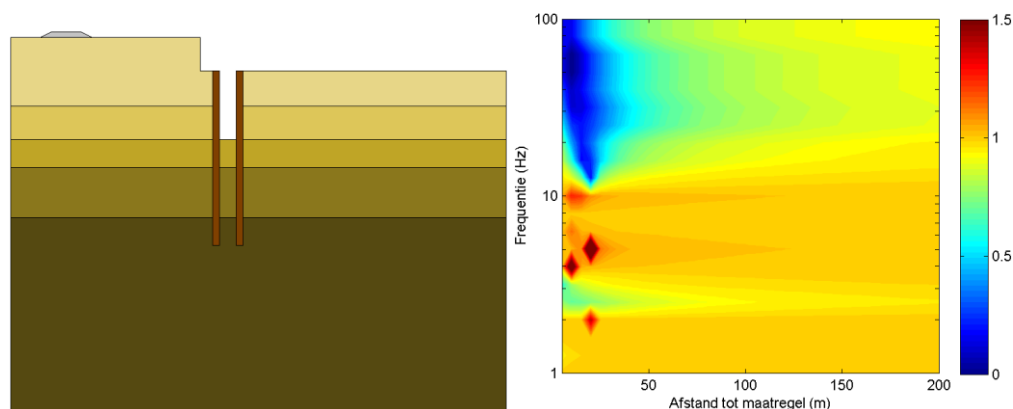
Tabel 7-1 Onderzochte types holle ruimtes

	Maatregel 1	Maatregel 2
Diepte damwand	8.7 m	15.7 m
Type damwand	AZ 36	AZ 50
Diepte holle ruimte	3.2 m	6.2 m
Breedte holle ruimte	1.5 m	1.5 m

De maatregelen zijn onderzocht met behulp van Geovib. Voorbeelden van de modellen en de damping als functie van de afstand tot de maatregel zijn weergegeven in Figuur 7-1 en Figuur 7-2.



Figuur 7-1 Model van maatregel 1 (links) en damping als functie van de afstand tot de maatregel (rechts)



Figuur 7-2 Model van maatregel 2 (links) en demping als functie van de afstand tot de maatregel (rechts)

Frequenties onder de 6 Hz worden door maatregel 1 versterkt, boven de 6 Hz worden de trillingen, afhankelijk van de afstand tot de maatregel, gedempt. Bij maatregel 2 worden trillingen pas bij 10 Hz gedempt, de demping boven de 10 Hz is echter wel sterker dan bij maatregel 1.

Bijlage II bevat de resultaten van deze maatregelen, waarvan een samenvatting is weergegeven in Tabel 7-2. Zonder maatregel voldoet 988 m² (12%, bij bestemming *kantoor*) resp. 3191 m² (40%, bij bestemming *wonen*) niet in de autonome groeisituatie. Na realisatie van DSSU voldoet 2465 m² (31%, bij bestemming *kantoor*) resp. het volledige bouwvlak van 8067 m² (100%, bij bestemming *wonen*) niet.

Tabel 7-2 Aantal m2 dat niet voldoet per maatregel

Maatregel	m ² overschrijding, woning (%)		m ² overschrijding, kantoor (%)	
	Autonoom	DSSU	Autonoom	DSSU
Geen	3191 (40%)	8067 (100%)	988 (12%)	2465 (31%)
1	2715 (34%)	8067 (100%)	758 (9%)	1789 (22%)
2	3118 (39%)	8067 (100%)	823 (10%)	2399 (30%)

Maatregel 2 heeft, ondanks de grotere diepte, minder effect dan maatregel 1. Beide maatregelen hebben slechts een beperkt effect.

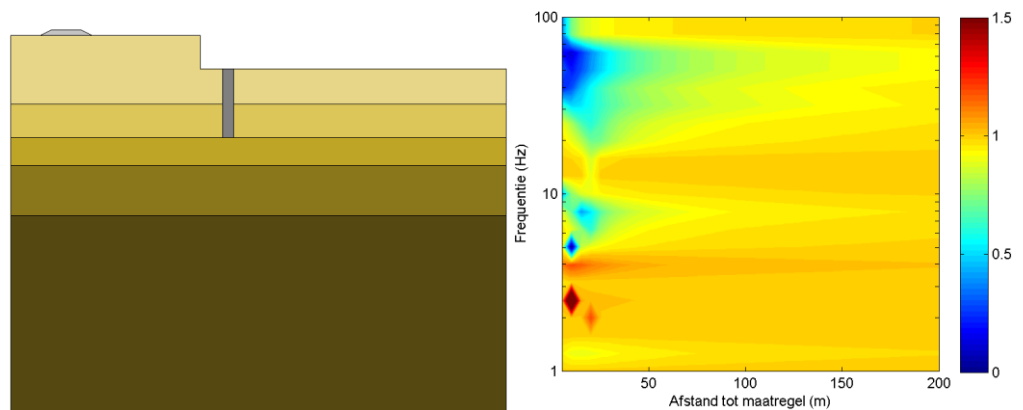
7.2.2. Betonnen trillingsscherm

Een betonnen trillingsscherm of OTC in de bodem wordt gecreëerd door het graven van een sleuf en het volstorten met beton. Er zijn drie verschillende afmetingen van een dergelijke OTC onderzocht, zie Tabel 7-3.

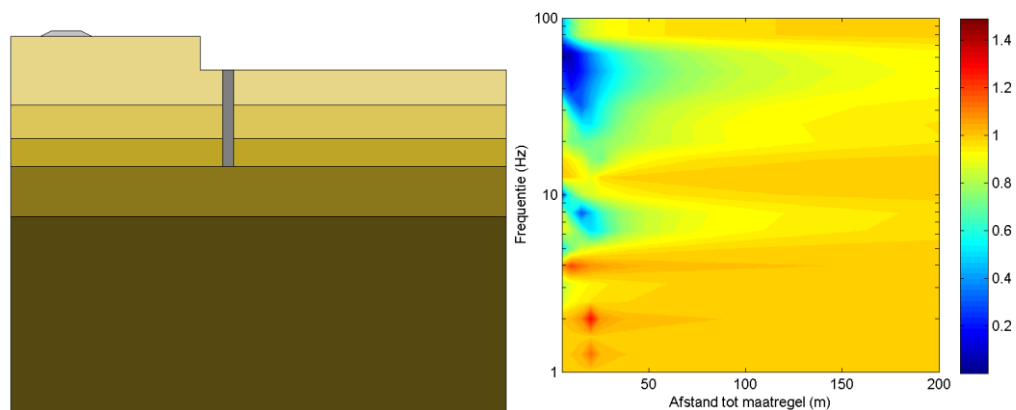
Tabel 7-3 Onderzochte types OTC

	Maatregel 3	Maatregel 4	Maatregel 5
Breedte	1.0 m	1.0 m	1.0 m
Diepte	6.2 m	8.7 m	13.2 m

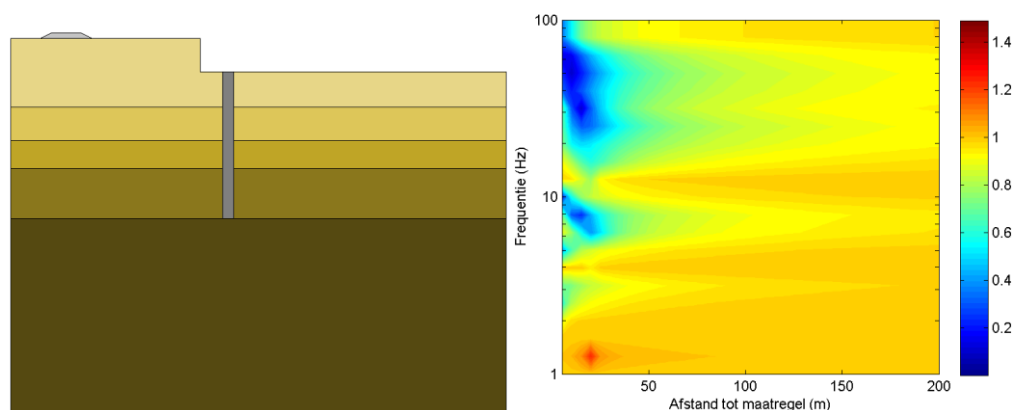
De maatregelen zijn onderzocht met behulp van Geovib. Voorbeelden van de modellen en de demping als functie van de afstand tot de maatregel zijn weergegeven in Figuur 7-3, Figuur 7-4 en Figuur 7-5. De demping is de factor waarmee het trillingssignaal zonder maatregelen mee wordt vermenigvuldigd om het signaal met maatregelen te krijgen.



Figuur 7-3 Model van maatregel 3 (links) en demping als functie van de afstand tot de maatregel (rechts)



Figuur 7-4 Model van maatregel 4 (links) en demping als functie van de afstand tot de maatregel (rechts)



Figuur 7-5 Model van maatregel 5 (links) en demping als functie van de afstand tot de maatregel (rechts)

Boven de 5 Hz worden de trillingen gedempt, andere frequenties worden juist versterkt. Ook is zichtbaar dat de demping toeneemt bij een grotere diepte van de wand.

Bijlage II bevat de resultaten van deze maatregelen, waarvan een samenvatting is weergegeven in Tabel 7-4.

Tabel 7-4 Aantal m² dat niet voldoet per maatregel

Maatregel	m ² overschrijding, woning (%)		m ² overschrijding, kantoor (%)	
	Autonoom	DSSU	Autonoom	DSSU
Geen	3191 (40%)	8067 (100%)	988 (12%)	2465 (31%)
3	2811 (34%)	8067 (100%)	905 (11%)	1972 (24%)
4	2613 (32%)	8067 (100%)	826 (10%)	1613 (20%)
5	2415 (30%)	8067 (100%)	733 (9%)	1399 (17%)

Hoe dieper de wand, hoer meer effect deze heeft. Omdat maatregelen in de bodem vooral effect hebben op korte afstand van de wand, is het effect op het aantal vierkante meters met een overschrijding beperkt.

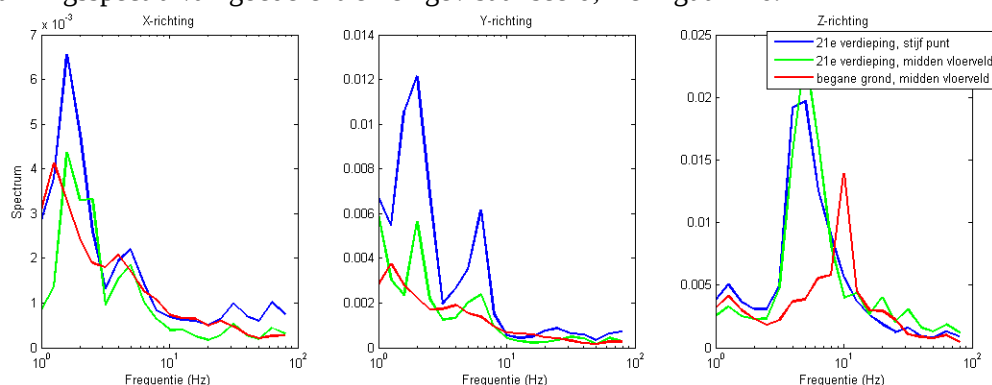
7.3 Maatregelen aan de ontvanger

Er zijn twee types maatregelen aan de ontvanger nader onderzocht, het afveren van het gebouw en het verstijven van de vloeren. Omdat het definitieve ontwerp van het gebouw nog niet bekend is, kunnen hier nog geen gedetailleerde maatregelen worden ontworpen. Aan de hand van de meetresultaten uit het Stads Kantoor Utrecht (vergelijkbare bouwstijl en bouwhoogte) wordt daarom aangegeven waar bij het definitieve ontwerp van het gebouw rekening mee moet worden gehouden.

7.3.1. Afveren van het gebouw

Afveren van het gebouw kan door middel van aanpassingen van de fundering. Bij gebouwen in een omgeving met veel trillingshinder wordt dit al regelmatig toegepast. Het reduceren van frequenties onder de 2 Hz is echter onmogelijk. Gezien de afmetingen van de geplande bebouwing zullen de eigenfrequenties waarschijnlijk hoger liggen.

Uit de metingen in het Stads Kantoor, dat een vergelijkbare bouw (betonnen vloeren, stalen spanten, vergelijkbare hoogte), bouwjaar en ondergrond heeft, zijn de trillingsspectra van goederentreinen gevisualiseerd, zie Figuur 7-6.

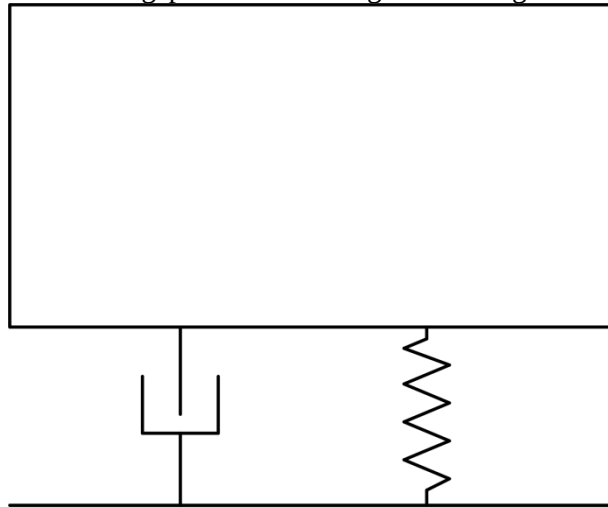


Figuur 7-6 Spectra goederentreinen in Stads Kantoor Utrecht

De horizontale trillingen (X- en Y-richting) zijn, gezien de rigide bouw, erg laag. De verticale trillingen zijn wel van belang. Op de 21^e verdieping ligt de piekfrequentie tussen de 4 en 6 Hz, deze frequenties dienen te worden gereduceerd.

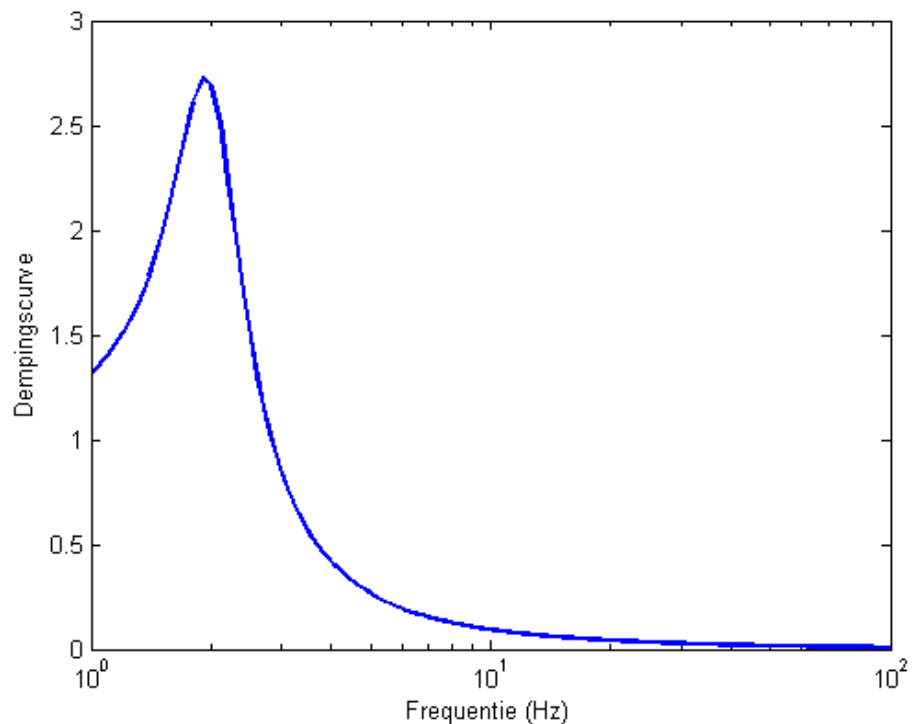
Het reduceren vindt plaats door middel van het plaatsen van afveringsmechanismen onder het gebouw. Hiervoor zijn diverse mogelijkheden, bij het definitieve ontwerp dient dit te worden uitgewerkt. Het principe van een dergelijk systeem is weergegeven in Figuur 7-7. Aan de hand van de massa van het gebouw en de gewenste reductie,

kunnen de eigenschappen van het dempingsmateriaal onder de fundering zodanig worden aangepast dat de trillingen worden gereduceerd.



Figuur 7-7 Principe van een gedempte fundering (blok stelt gebouw voor)

Omdat de piekfrequentie van de trillingssignalen laag is, met name van goederentreinen, dient de eigenfrequentie van het dempingssysteem voldoende laag te zijn (onder de 3 Hz). Omdat lage eigenfrequenties moeilijk realiseerbaar zijn, is gekozen voor een eigenfrequentierange voor het dempingssysteem tussen de 2 en 2.5 Hz. De demping varieert tussen de 0.05 en 0.2 in dit onderzoek, andere waarden zullen niet leiden tot voldoende demping of zijn vrijwel niet inpasbaar. Een voorbeeld van de dempingscurve (eigenfrequentie van 2 Hz, demping van 0.2) is weergegeven in Figuur 7-8.



Figuur 7-8 Dempingscurve (eigenfrequentie = 2 Hz, demping = 0.2)

Bijlage II bevat de resultaten van deze maatregel, waarvan een samenvatting is weergegeven in Tabel 7-5.

Tabel 7-5 Aantal m2 dat niet voldoet per maatregel

Maatregel	f ₀ (Hz)	ξ	m ² overschrijding, woning (%)		m ² overschrijding, kantoor (%)	
			Autonoom	DSSU	Autonoom	DSSU
Geen			3191 (40%)	8067 (100%)	988 (12%)	2465 (31%)
6	2	0.05	1498 (19%)	6865 (85%)	467 (6%)	1018 (13%)
7	2	0.10	818 (10%)	1851 (23%)	231 (3%)	531 (7%)
8	2	0.15	645 (8%)	1396 (17%)	177 (2%)	384 (5%)
9	2	0.20	584 (7%)	1283 (16%)	163 (2%)	329 (4%)
10	2.5	0.10	1376 (17%)	3888 (48%)	428 (5%)	981 (12%)
11	2.5	0.15	1056 (13%)	2571 (32%)	312 (4%)	745 (9%)
12	2.5	0.20	927 (11%)	2259 (28%)	267 (3%)	640 (8%)

Maatregel 9 heeft het meeste effect, het bouwoppervlak waar mogelijk niet wordt voldaan aan de SBR B-richtlijn neemt af van 12% tot 2% in de autonome groeisituatie, en van 31% tot 4% bij realisatie van DSSU bij bestemming *kantoor*. Bij bestemming *wonen* neemt het oppervlak wat mogelijk niet voldoet af van 40% tot 7% in de autonome groeisituatie en van 100% tot 16% bij realisatie van DSSU.

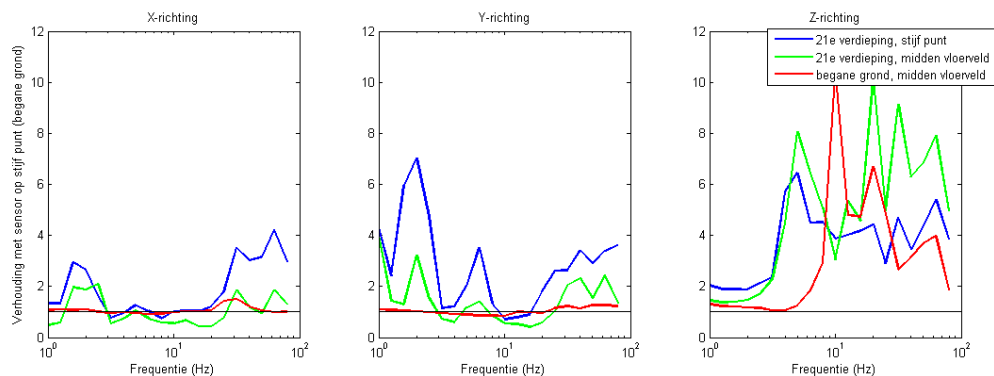
Bij maatregel 6 worden de trillingen van de bussen mogelijk licht versterkt, waardoor een smalle strook van 1 meter breed aan de zuidwestzijde van het bouwvlak niet langer voldoet, zie ook Bijlage IV.

7.3.2. Verstijven van de vloeren

Omdat het definitieve ontwerp van de bebouwing nog niet is gemaakt, is het ook nog mogelijk om de eigenschappen van de vloeren aan te passen. Bij de meting van het Stadskantoor zijn de eigenschappen van het gebouw eveneens gemeten, de versterking van de trillingssterktes als functie van de frequentie is weergegeven in Figuur 7-9.

In X-richting (loodrecht op het spoor en de lange richting van het gebouw) worden vooral de frequenties tussen 1.5 en 2 Hz en boven de 25 Hz opgeslingerd. In Y-richting (parallel aan het spoor en loodrecht op de korte richting van het gebouw) zijn dezelfde opslingerfrequenties zichtbaar, maar daarnaast ook tussen de 7 en 8 Hz een piek. Het gebouw is aanzienlijk slapper in deze richting. De trillingen in horizontale richting zijn echter dermate laag dat deze richtingen ook in Westflank-Noord bij een voldoende rigide bouw geen overschrijdingen zullen opleveren.

In Z-richting (verticaal) worden frequenties opgeslingerd boven de 3 Hz, beneden pas boven de 8 Hz. Door het verhogen van de eigenfrequentie van de vloeren wordt het zogenaamde opslingergebied naar hogere frequenties verschoven. Een groot deel van de verticale opslingering wordt echter veroorzaakt doordat het gehele gebouw verticaal trilt. Bij vergelijking tussen het stijve punt en het punt midden op de vloer op de 21^e verdieping, valt op dat beide frequenties een hoge opslingering hebben boven de 3 Hz. Het effect van de vloeren is dus beperkt.



Figuur 7-9 *Gebouweigenschappen als functie van de frequentie*

Ten opzichte van het Stads kantoor zal de geplande bebouwing van Westflank-Noord als volgt afwijken:

1. Door de geringere dimensies neemt de massa van het gebouw af, waardoor de verticale eigenfrequentie van het gebouw lager wordt. Dit zorgt voor een verschuiving van het opslingergebied naar lagere frequenties;
2. Door de kleinere dimensies zijn de vloeroverspanningen in Westflank-Noord ook kleiner. Dit effect vergroot de eigenfrequenties van de vloeren.

Beide effecten hebben een tegengestelde werking, zonder definitief ontwerp is het onmogelijk om een uitspraak te doen over het totale effect, omdat dat sterk afhangt van het ontwerp.

Het aanpassen van de vloeren heeft, zoals aangegeven, slechts een beperkt effect op het verminderen van de trillingssterkte. Bij het definitieve ontwerp kunnen de frequenties van de vloeren als volgt worden verhoogd:

1. Gebruiken van kleinere vloeroverspanningen;
2. Dikkere betonvloeren gebruiken;
3. Stijver materiaal gebruiken.

7.4 Conclusies en aanbevelingen

Ten behoeve van het bestemmingsplan kan gesteld worden dat er geen niet oplosbare overschrijdingen zijn van de richtlijnen met betrekking tot *trillingshinder*. Wel dient in het ontwerp rekening te worden gehouden met de inpassing van (een combinatie van) maatregelen, om overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder te voorkomen.

Bij het ontwerp adviseren wij de volgende aanpak:

1. Minimaliseer de vloeroverspanningen, maximaliseer de vloerdikte en gebruik stijve constructiematerialen. Maak een dynamisch rekenmodel van de constructie en reken deze door op dynamisch gedrag en optredende trillingen;

Wanneer de trillingen de streefwaarden overschrijden, neem dan de volgende stappen:

2. Overweeg het inpassen van een bij de fundering afgeleverde constructie op 2 Hz, met een dempingsconstante van 0.2;
3. Overweeg eventueel om gebouwen op korte afstand van het spoor van de bestemming *kantoor* te voorzien, in plaats van de bestemming *wonen*;
4. Wanneer maatregelen tussen het spoor en de bebouwing ook na realisatie van de bebouwing nog inpasbaar zijn, adviseren wij dergelijke maatregelen uit te stellen tot na oplevering. Bij een opleveringstoets door middel van trillingsmetingen kan dan blijken of dergelijke kostbare maatregelen nog

noodzakelijk zijn.

8 Conclusies en aanbevelingen

In het voorliggende trillingsonderzoek is de trillingssituatie bepaald voor de referentie- en diverse toekomstige situaties in het onderzoeksgebied *Westflank-Noord*. Middels een uitgebreid trillingsonderzoek met behulp van modellen, metingen in gebouwen en op maaiveld, is de trillingssterkte in de gebouwen rond het bestemmingsplangebied vastgesteld.

In dit gebied is ook nieuwe bebouwing gepland, het zogenaamde *Westflank-Noord*. Omdat het ontwerp van de bebouwing nog niet definitief is vastgesteld, is gerekend met het maximale bouwvlak. In dit onderzoek wordt aangegeven waar wel en niet gebouwd kan worden, om te voldoen aan de richtlijn m.b.t. trillingshinder.

Uit dit onderzoek volgt dat het bestemmingsplan van *Westflank-Noord* niet tot overschrijdingen van de SBR B-richtlijn leidt in de bestaande (en gehandhaafde) bebouwing, de treinen zorgen wel in sommige gebouwen voor mogelijke overschrijdingen van de SBR B-richtlijn. Zowel bij de autonome groeisituatie als bij realisatie van DSSU treden deze mogelijke effecten op. Het valt niet binnen de scope van dit onderzoek om voor de bestaande bebouwing maatregelen te ontwerpen die worden veroorzaakt door (de wijzigingen aan) de sporen. Dit wordt binnen het ProRail-onderzoek naar DSSU uitgevoerd.

Met betrekking tot de nieuw geplande bebouwing volgt uit dit onderzoek dat, bij toekenning van de bestemming *kantoor*, 12 tot 31 procent van het bouwvlak mogelijk niet voldoet aan de richtlijn, afhankelijk van de situatie op het spoor. Bij toekenning van de bestemming *wonen*, voldoet 31 tot 100 procent van het bouwvlak mogelijk niet. Overigens moet hierbij worden opgemerkt dat deze percentages aanzienlijk lager kunnen uitvallen door het ontwerp te optimaliseren voor minimale trillingshinder.

Om de trillingshinder voor de *geplande* bebouwing te mitigeren zijn maatregelen aan de bebouwing in het bouwvlak onderzocht. Er is onderzocht wat het effect is van het afveren van de fundering, het verstijven van vloeren en muren en het inpassen van een trillingsreducerende constructie in de bodem tussen het spoor en de bebouwing. Uit dit onderzoek volgt dat er geen niet oplosbare overschrijdingen zijn van de richtlijnen met betrekking tot *trillingshinder*. Wel dient in het ontwerp rekening te worden gehouden met de inpassing van (een combinatie van) maatregelen, om overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder te voorkomen.

Bij het ontwerp adviseren wij de volgende aanpak:

1. Minimaliseer de vloeroverspanningen, maximaliseer de vloerdikte en gebruik stijve constructiematerialen. Maak een dynamisch rekenmodel van de constructie en reken deze door op dynamisch gedrag en optredende trillingen; Wanneer de trillingen de streefwaarden overschrijden, neem dan de volgende stappen:
2. Overweeg het inpassen van een bij de fundering afgeveerde constructie op 2 Hz, met een dempingsconstante van 0.2;
3. Overweeg eventueel om gebouwen op korte afstand van het spoor van de bestemming *kantoor* te voorzien, in plaats van de bestemming *wonen*;
4. Wanneer maatregelen tussen het spoor en de bebouwing ook na realisatie van de bebouwing nog inpasbaar zijn, adviseren wij dergelijke maatregelen uit te stellen tot na oplevering. Bij een opleveringstoets door middel van

trillingsmetingen kan dan blijken of dergelijke kostbare maatregelen nog noodzakelijk zijn.

Colofon

Opdrachtgever BRO

Uitgave Movares Nederland B.V.

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

Daalse Kwint G 3.00
Postbus 2855
3500 GW Utrecht

Telefoon 030-2655322

Ondertekenaar ir. P.M. Boon
Adviseur

Projectnummer RM000875

Opgesteld door ir. P.M. Boon

© 2013, Movares Nederland B.V.

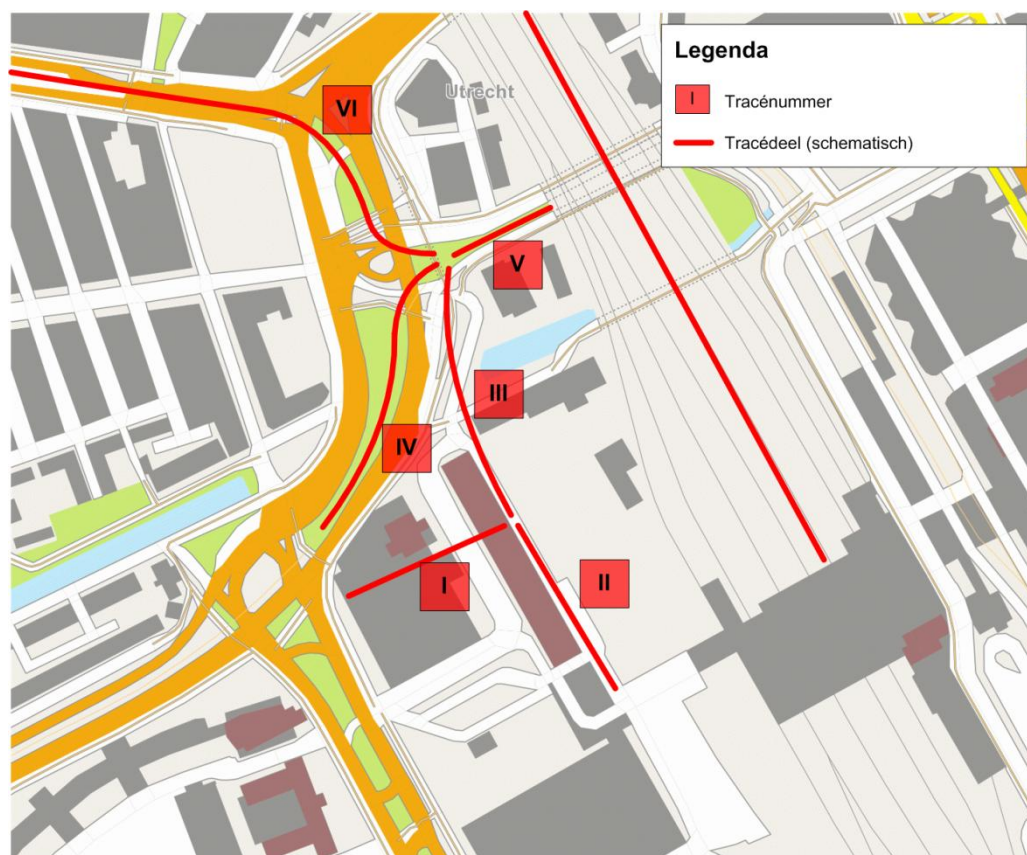
Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming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

Bijlage I Gebruikte verkeersintensiteiten

De in dit onderzoek gebruikte verkeersintensiteiten zijn weergegeven in Tabel I-1, zie voor de aanduiding van de tracédelen Figuur I-1.

Tabel I-1 Verkeersintensiteiten in de diverse situaties, beide richtingen samen

	Huidig			2015						2018					
				Autonoom			DSSU			Autonoom			DSSU		
	D	A	N	D	A	N	D	A	N	D	A	N	D	A	N
Reizigerstreinen	931	253	228	931	253	228	1260	291	166	931	253	228	1260	291	166
Goederentreinen	3.13	3.63	2.03	15.1	6.12	5.20	15.1	6.12	5.20	15.1	6.12	5.20	15.1	6.12	5.20
Trams I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	206	37	25	206	37	25
Trams III	-	-	-	-	-	-	-	-	-	206	37	25	206	37	25
Trams IV	206	37	25	206	37	25	206	37	25	-	-	-	-	-	-
Trams V	206	37	25	-	-	-	-	-	-	206	37	25	206	37	25
Bussen I	-	-	-	668	187	103	668	187	103	668	187	103	668	187	103
Bussen II	-	-	-	3323	803	465	3323	803	465	1481	336	196	1481	336	196
Bussen III	-	-	-	2655	616	263	2655	616	263	813	149	93	813	149	93
Bussen IV	1554	261	169	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bussen V	2084	373	237	-	-	-	-	-	-	1842	467	269	1842	467	269
Bussen VI	530	112	68	2655	616	362	2655	616	362	813	149	93	813	149	93



Figuur I-1 Tracédelen met aanduiding

Bijlage II Gegevens metingen

Conform de eisen in de SBR B-richtlijn, hoofdstuk 11, bevat deze bijlage de gegevens van de metingen.

BI.1 Van Sijpesteijnkade 35

Van Sijpesteijnkade 35 heeft als bestemming *wonen*, zie Figuur BI-1. In de plansituatie is dit gebouw gesloopt. In dit gebouw is een meting uitgevoerd conform de SBR B-richtlijn. Er zijn twee meetpunten geplaatst, zie ook Figuur BI-2:

1. Een driedimensionale trillingssensor (9) op een stijf punt op de begane grond;
2. Een driedimensionale trillingssensor (8) in het midden van het vloerveld van een kamer aan de spoorzijde van de woning, op de tweede verdieping.

Er is gebruik gemaakt van een meetcomputer met 6 aangesloten meetkanalen en een webcam om de treinen te registreren. De meting heeft onbemand plaatsgevonden. De treinen zijn met behulp van de webcam, de trillingssignalen en gegevens over de passagetijden gedetecteerd.



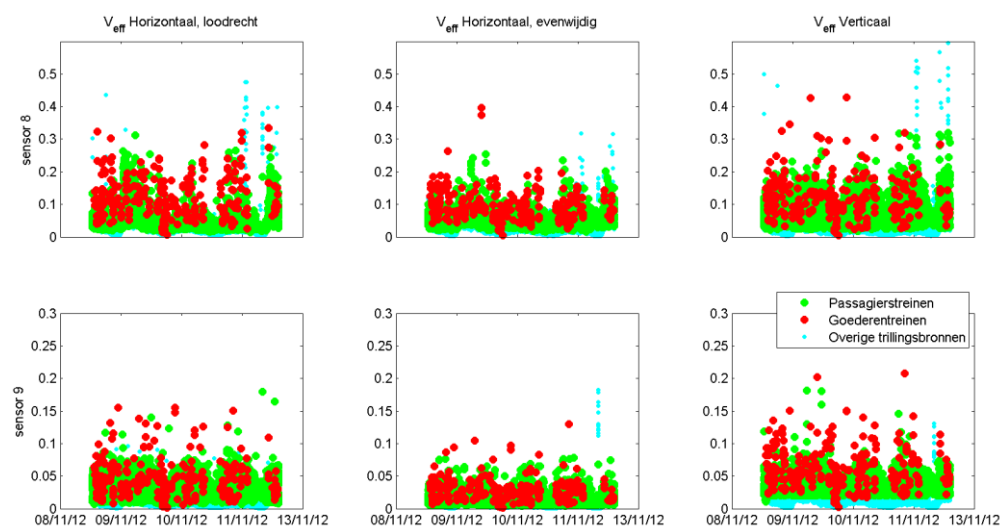
Figuur BI-1 Voorgevel Van Sijpesteijnkade 35 (links)

De resultaten van de metingen zijn weergegeven in Figuur BI-3. Goederentreinen en passagierstreinen zijn afzonderlijk aangegeven. Goederentreinen geven gemiddeld iets hogere trillingssterktes dan passagierstreinen, hoewel een deel van de passagierstreinen op zeer korte afstand van deze woning passeert.

De resultaten van de metingen zijn weergegeven in Tabel BI-1. Hierbij is ook het statistisch maximum, bepaald volgens de SBR B-richtlijn (par. 9.6), aangegeven. H1 is horizontaal, loodrecht op het spoor, H2 is horizontaal, parallel aan het spoor en V is verticaal. Ook de trillingsintensiteit is weergegeven. De toetswaarde is de maximaal toegestane waarde van V_{per} resp. V_{max} in de plansituatie.



Figuur BI-2 Opstelling sensoren Van Sijpesteijnkade 35



Figuur BI-3 Resultaten metingen Van Sijpesteijnkade 35

Tabel BI-1 Meetresultaten Van Sijpesteijnkade 35

	8			9		
	H1	H2	V	H1	H2	V
<i>V_{per}, dag</i>	0.05	0.03	0.05	0.01	0.00	0.01
<i>V_{per}, avond</i>	0.03	0.02	0.05	0.01	0.00	0.01
<i>V_{per}, nacht</i>	0.02	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01
<i>V_{max}, gemeten</i>	0.33	0.40	0.43	0.18	0.13	0.21
<i>V_{max}, stat</i>	0.34	0.39	0.41	0.17	0.12	0.21
Toetswaarde V_{per}	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Toetswaarde V_{max}	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41

In Tabel BI-2 zijn de overige relevante gegevens van de metingen te vinden.

Tabel BI-2 *Gegevens meting Van Sijpesteijnkade 35*

1	Uitvoerende organisatie	<i>Movares Nederland B.V.</i> <i>Daalseplein 101</i> <i>3511 SX Utrecht</i>
	Verantwoordelijke persoon	<i>Ir. P.M. Boon</i> <i>e-mail: pieter.boon@movares.nl</i> <i>tel.: 06-10039454</i>
2	Meting uitgevoerd door	<i>ir. W.N. Oskam</i>
3	Tijdsperiode meting	<i>8-11-2012 tot 12-11-2012</i>
4	Type trillingsbron	<i>Treinen</i>
5	Gebouwomschrijving	<i>Drielaags, geschakeld gebouw met bestemming wonen.</i> <i>Opgebouwd uit metselwerk.</i>
6	Locatie metingen	<i>Zie plattegrond in hoofdstuk 5</i>
7	Geotechnische gegevens	<i>Niet gebruikt in dit onderzoek</i>
8	Meetposities	<i>Zie plattegrond in hoofdstuk 5</i>
9	Gebruikte meetopnemers	<i>Twee 3D-geofoons</i>
	Gebruikte registratieapparatuur	<i>Webcam gekoppeld aan meetcomputer</i>
	Gebruikte verwerkingsapparatuur	<i>Dewe-101 meetcomputer met 6 aangesloten kanalen</i>
10	Overzicht meetwaarden	<i>Zie figuren in hoofdstuk 5</i>
11	Motivatie classificatie gebouw	<i>Zie hoofdstuk 5</i>
12	Overige relevante omstandigheden	<i>Zie hoofdstuk 5</i>

Het Park Plaza Hotel heeft als bestemming *wonen*, zie Figuur BI-4. In dit gebouw is een meting uitgevoerd conform de SBR B-richtlijn. Er zijn vier meetpunten geplaatst, zie ook Figuur BI-5:

1. Een driedimensionale trillingssensor (5) op een stijf punt op de 7^e verdieping, in een kamer aan de Westpleinzijde van het hotel;
2. Een driedimensionale trillingssensor (6) in het midden van deze kamer;
3. Een driedimensionale trillingssensor (10) op de 7^e verdieping, in een kamer aan de spoorzijde van het hotel;
4. Een driedimensionale trillingssensor (12) in dezelfde kamer

Er is gebruik gemaakt van twee meetcomputers met elk 6 aangesloten meetkanalen en een webcam om de treinen, trams en bussen te registreren. De meting heeft onbemand plaatsgevonden. De treinen, trams en bussen zijn met behulp van de webcams, de trillingssignalen en gegevens over de passagetijden gedetecteerd.



Figuur BI-4 Voorgevel Park Plaza Hotel

De resultaten van de metingen zijn weergegeven in BI-6. Door de slechte staat van het wegdek hebben bussen in verticale richting vergelijkbare trillingssterktes als de treinen. Trams hebben aanzienlijk lagere trillingssterktes.

Opvallend is verder het grote verschil in trillingssterkte tussen treinen aan de spoorzijde van het gebouw en aan de Westpleinzijde in verticale richting.



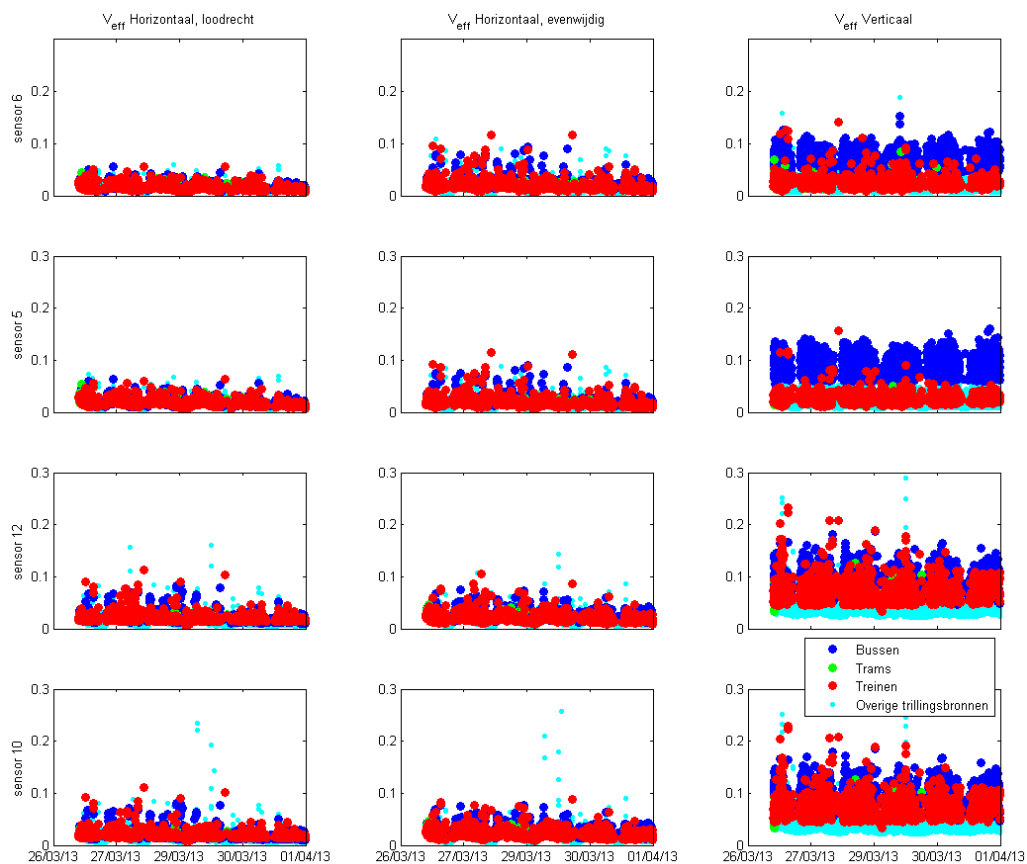
Figuur BI-5 Opstelling sensoren Park Plaza Hotel

De resultaten van de metingen zijn weergegeven in Tabel BI-3. Hierbij is ook het statistisch maximum, bepaald volgens de SBR B-richtlijn (par. 9.6), aangegeven. H1 is horizontaal, loodrecht op het spoor, H2 is horizontaal, parallel aan het spoor en V is verticaal. Ook de trillingsintensiteit is weergegeven. De toetswaarde is de maximaal toegestane waarde van V_{per} resp. V_{max} in de plansituatie.

Tabel BI-3 Meetresultaten Park Plaza Hotel

	5			6			10			12		
	H1	H2	V	H1	H2	V	H1	H2	V	H1	H2	V
<i>V_{per}, dag</i>	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03
<i>V_{per}, avond</i>	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03
<i>V_{per}, nacht</i>	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
<i>V_{max}, gemeten</i>	0.06	0.12	0.16	0.06	0.12	0.15	0.11	0.09	0.23	0.11	0.11	0.23
<i>V_{max}, stat</i>	0.07	0.11	0.16	0.06	0.11	0.15	0.11	0.09	0.23	0.11	0.10	0.23
Toetswaarde V_{per}	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Toetswaarde V_{max}	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

In Tabel BI-4 zijn de overige relevante gegevens van de metingen te vinden.



Figuur BI-6 Resultaten metingen Park Plaza Hotel

Tabel BI-4 Gegevens meting Park Plaza Hotel

1	Uitvoerende organisatie	Movares Nederland B.V. Daalseplein 101 3511 SX Utrecht
	Verantwoordelijke persoon	Ir. P.M. Boon e-mail: pieter.boon@movares.nl tel.: 06-10039454
2	Meting uitgevoerd door	ir. P. Bouwma
3	Tijdsperiode meting	26-3-2012 tot 2-4-2012
4	Type trillingsbron	Treinen, trams en bussen
5	Gebouwomschrijving	Middelhoogbouw met bestemming wonen. Opgebouwd uit beton en staal.
6	Locatie metingen	Zie plattegrond in hoofdstuk 5
7	Geotechnische gegevens	Niet gebruikt in dit onderzoek
8	Meetposities	Zie plattegrond in hoofdstuk 5
9	Gebruikte meetopnemers	Vier 3D-gefoons
	Gebruikte registratieapparatuur	Webcams gekoppeld aan meetcomputers
	Gebruikte verwerkingsapparatuur	2 Dewe-101 meetcomputers met elk 6 aangesloten kanalen
10	Overzicht meetwaarden	Zie figuren in hoofdstuk 5
11	Motivatie classificatie gebouw	Zie hoofdstuk 5
12	Overige relevante omstandigheden	Zie hoofdstuk 5

Het in aanbouw zijnde Stads kantoor Utrecht heeft als bestemming *kantoor*. Het gebouw valt buiten het onderzoeksgebied, maar is gebruikt omdat het een vergelijkbare bouwhoogte en bouwstijl (stalen skelet met betonvloeren) heeft als de geplande bebouwing van Westflank-Noord. Een impressie van de uiteindelijke gevel, gezien vanaf de Jaarbeurszijde, is weergegeven in Figuur BI-6. In dit gebouw is een meting uitgevoerd conform de SBR B-richtlijn. Er zijn vier meetpunten geplaatst, zie ook Figuur BI-8:

1. Een driedimensionale trillingssensor (5) in het midden van het vloerveld op de begane grond;
2. Een driedimensionale trillingssensor (6) op een stijf punt op de begane grond;
3. Een driedimensionale trillingssensor (8) in het midden van het vloerveld op de 21^e verdieping in de noordelijke toren (links in Figuur 5-4);
4. Een driedimensionale trillingssensor (9) op een stijf punt op de 21^e verdieping in de noordelijke toren.

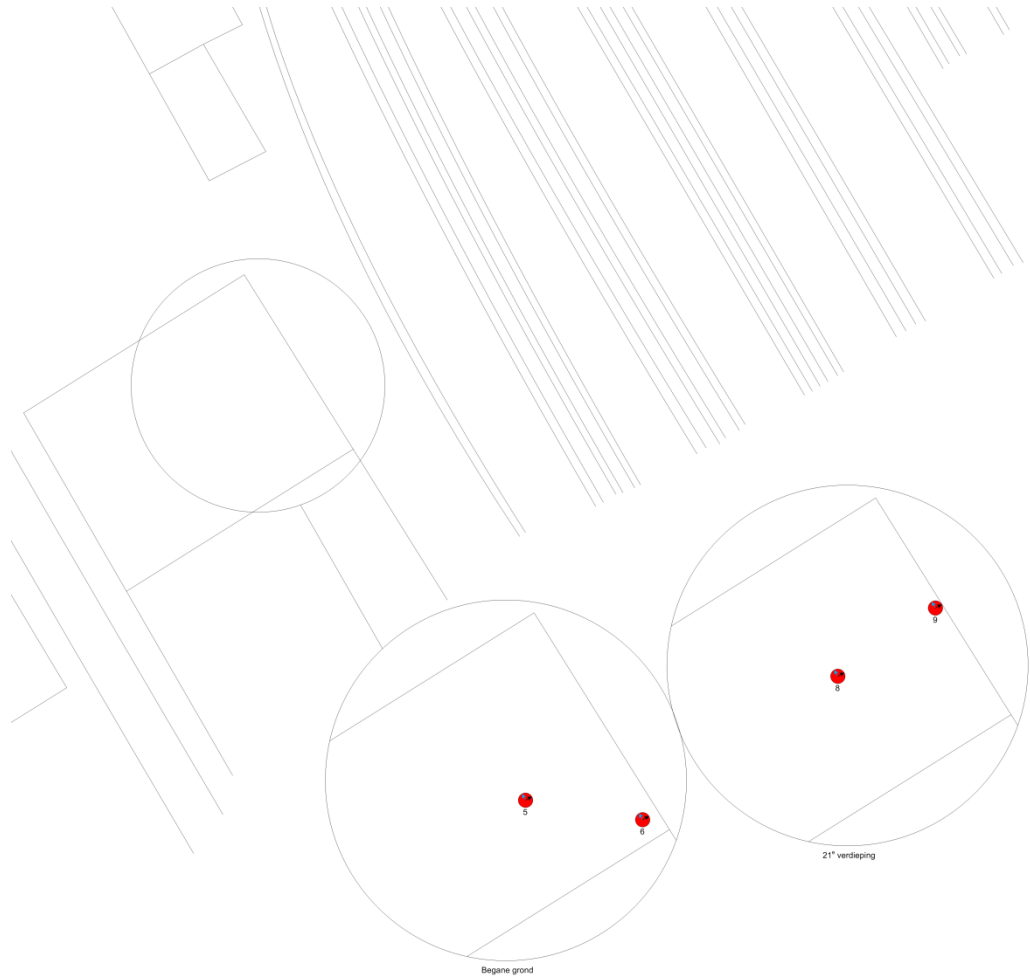
Er is daarnaast gebruik gemaakt van twee meetcomputers met elk 6 aangesloten meetkanalen en een webcam om de treinen te registreren.

De meting heeft onbemand plaatsgevonden. De treinen zijn met behulp van de webcam, de trillingssignalen en gegevens over de passagetijden gedetecteerd.



Figuur BI-7 Gevel Stads kantoor Utrecht

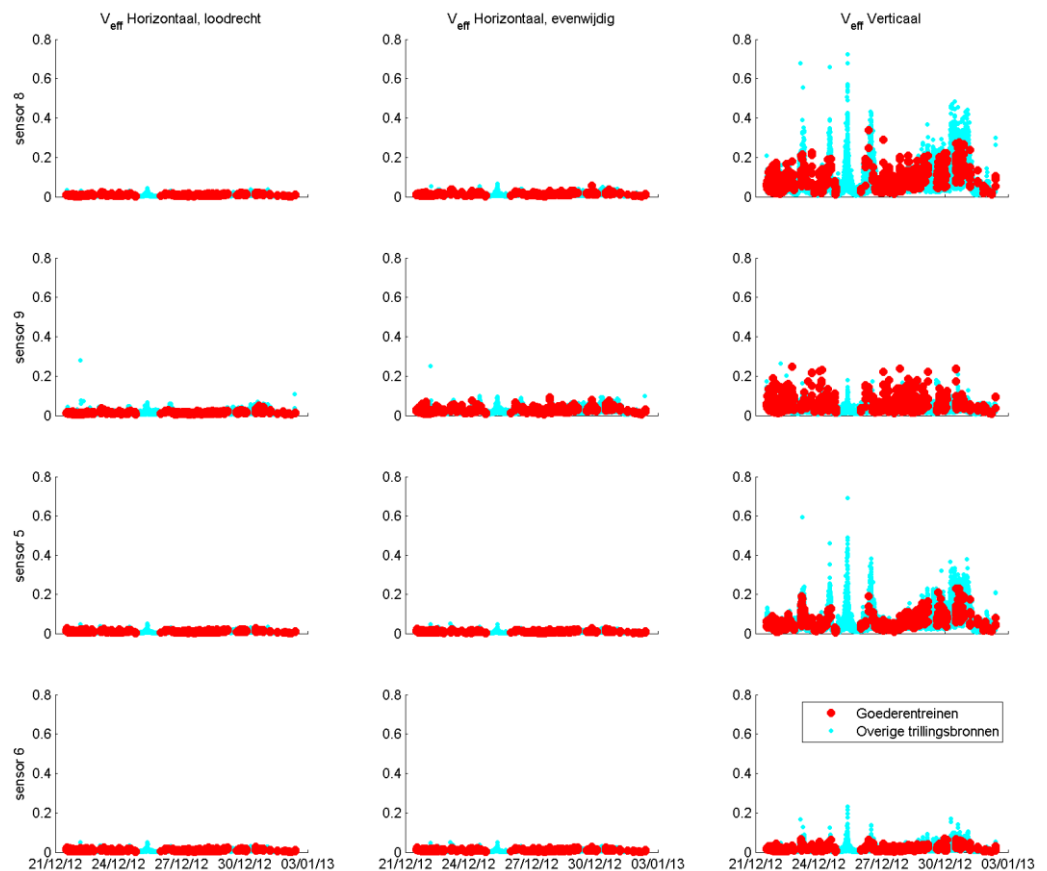
Bron: NS Stations



Figuur BI-8 *Opstelling sensoren Stadskantoor Utrecht*

De resultaten van de metingen zijn weergegeven in BI-9. In beide horizontale richtingen worden nauwelijks trillingen gemeten. De grootte van het gebouw en de rigide constructie zorgen ervoor dat de trillingen vrijwel niet waarneembaar zijn. Door de grote vloeroppervlakken en de bouwhoogte (90 m) zijn in verticale richting wel trillingen waarneembaar.

Tijdens de metingen was alleen de ruwbouw van het Stadskantoor gereed. Door het latere plaatsen van de inrichting en beglazing van het gebouw neemt de massa toe, en daarmee de eigenfrequentie van de vloeren. Deze verschuiving zal echter marginaal zijn, gezien de massa van het gebouw op het moment van meten en de massa in de eindsituatie. Daarom zal deze verschuiving nauwelijks tot geen invloed hebben op de trillingssterkte.



Figuur BI-9 Resultaten metingen Stadskantoor Utrecht

De resultaten van de metingen zijn weergegeven in Tabel BI-5. Hierbij is ook het statistisch maximum, bepaald volgens de SBR B-richtlijn (par. 9.6), aangegeven. H1 is horizontaal, loodrecht op het spoor, H2 is horizontaal, parallel aan het spoor en V is verticaal. Ook de trillingsintensiteit is weergegeven. De toetswaarde is de maximaal toegestane waarde van V_{per} resp. V_{max} in de plansituatie.

Tabel BI-5 Meetresultaten Stadskantoor Utrecht

	8			9			5			6		
	H1	H2	V	H1	H2	V	H1	H2	V	H1	H2	V
$V_{per, dag}$	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
$V_{per, avond}$	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
$V_{per, nacht}$	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$V_{max, gemeten}$	0.02	0.06	0.34	0.05	0.09	0.25	0.03	0.03	0.23	0.03	0.03	0.07
$V_{max, stat}$	0.02	0.05	0.32	0.05	0.09	0.26	0.03	0.02	0.23	0.03	0.03	0.07
Toetswaarde V_{per}	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Toetswaarde V_{max}	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

In Tabel BI-6 zijn de overige relevante gegevens van de metingen te vinden.

Tabel BI-6 *Gegevens meting Stadskantoor Utrecht*

1	Uitvoerende organisatie	<i>Movares Nederland B.V. Daalseplein 101 3511 SX Utrecht</i>
	Verantwoordelijke persoon	<i>Ir. P.M. Boon e-mail: pieter.boon@movares.nl tel.: 06-10039454</i>
2	Meting uitgevoerd door	<i>ir. W.N. Oskam</i>
3	Tijdsperiode meting	<i>21-12-2012 tot 2-1-2013</i>
4	Type trillingsbron	<i>Treinen</i>
5	Gebouwomschrijving	<i>Hoogbouw, in aanbouw, met bestemming kantoor. Opgebouwd uit beton en staal.</i>
6	Locatie metingen	<i>Zie plattegrond in hoofdstuk 5</i>
7	Geotechnische gegevens	<i>Niet gebruikt in dit onderzoek</i>
8	Meetposities	<i>Zie plattegrond in hoofdstuk 5</i>
9	Gebruikte meetopnemers	<i>Vier 3D-geofoons</i>
	Gebruikte registratieapparatuur	<i>Webcam gekoppeld aan meetcomputer</i>
	Gebruikte verwerkingsapparatuur	<i>2 Dewe-101 meetcomputers met elk 6 aangesloten kanalen</i>
10	Overzicht meetwaarden	<i>Zie figuren in hoofdstuk 5</i>
11	Motivatatie classificatie gebouw	<i>Zie hoofdstuk 5</i>
12	Overige relevante omstandigheden	<i>Zie hoofdstuk 5</i>

BI.4 Sijpesteijngebouw

Het Sijpesteijngebouw (Jaarbeursplein 19) heeft als bestemming *kantoor*, zie Figuur BI-10. In dit gebouw is een meting uitgevoerd conform de SBR B-richtlijn. Er zijn twee meetpunten geplaatst, zie ook Figuur BI-11:

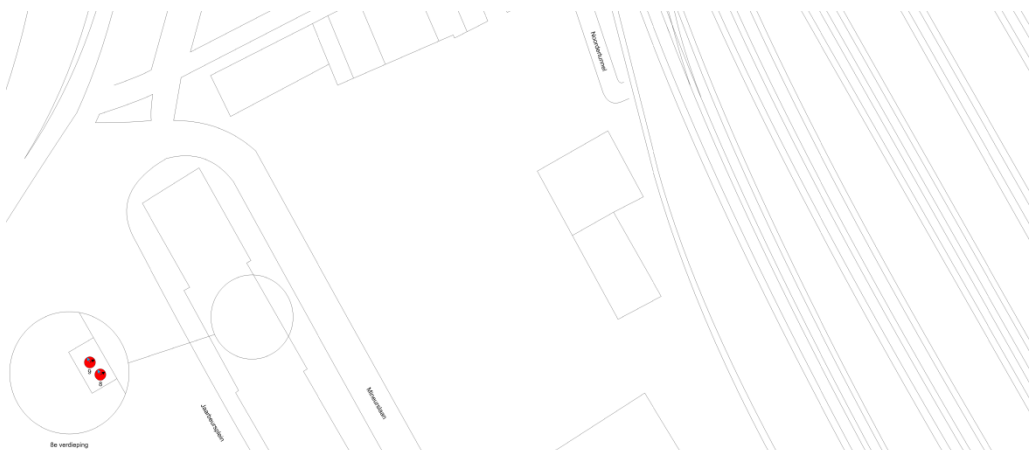
1. Een driedimensionale trillingssensor (8) op een stijf punt op de 8^e verdieping, in een kamer aan de spoorzijde;
2. Een driedimensionale trillingssensor (9) in het midden van het vloerveld in dezelfde kamer.

Er is daarnaast gebruik gemaakt van een meetcomputer met 6 aangesloten meetkanalen en een webcam om de treinen te registreren.

De meting heeft onbemand plaatsgevonden. De treinen zijn met behulp van de webcam, de trillingssignalen en gegevens over de passagetijden gedetecteerd.



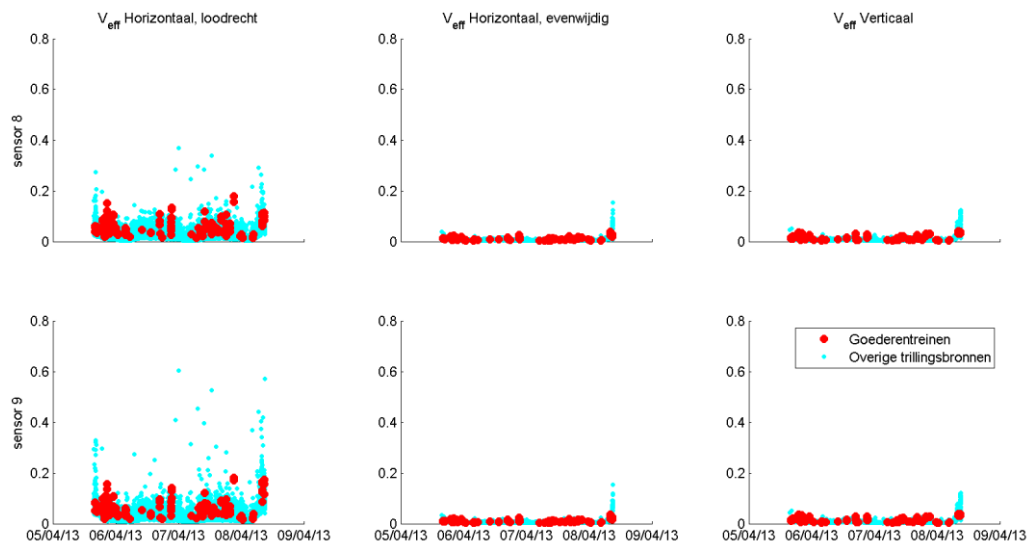
Figuur BI-10 Voorgevel Sijpesteijngebouw (midden)



Figuur BI-11 Opstelling sensoren Sijpesteijngebouw

De resultaten van de metingen zijn weergegeven in Figuur BI-12. Er worden vooral in horizontale richting, loodrecht op het spoor (dwars op de lengterichting van het

gebouw) waarneembare trillingen geregistreerd. In de overige richtingen zijn de trillingen verwaarloosbaar.



Figuur BI-12 Resultaten metingen Sijpesteijngebouw

De resultaten van de metingen zijn weergegeven in Tabel BI-7. Hierbij is ook het statistisch maximum, bepaald volgens de SBR B-richtlijn (par. 9.6), aangegeven. H1 is horizontaal, loodrecht op het spoor, H2 is horizontaal, parallel aan het spoor en V is verticaal. Ook de trillingsintensiteit is weergegeven. De toetswaarde is de maximaal toegestane waarde van V_{per} resp. V_{max} in de plansituatie.

Tabel BI-7 Meetresultaten Sijpesteijngebouw

	8			9		
	H1	H2	V	H1	H2	V
<i>V_{per}, dag</i>	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
<i>V_{per}, avond</i>	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
<i>V_{per}, nacht</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>V_{max}, gemeten</i>	0.18	0.04	0.04	0.18	0.04	0.04
<i>V_{max}, stat</i>	0.17	0.04	0.04	0.19	0.03	0.04
Toetswaarde V_{per}	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Toetswaarde V_{max}	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

In Tabel BI-8 zijn de overige relevante gegevens van de metingen te vinden.

Tabel BI-8 *Gegevens meting Sijpesteijngedouw*

1	Uitvoerende organisatie	<i>Movares Nederland B.V. Daalseplein 101 3511 SX Utrecht</i>
	Verantwoordelijke persoon	<i>Ir. P.M. Boon e-mail: pieter.boon@movares.nl tel.: 06-10039454</i>
2	Meting uitgevoerd door	<i>ir. P. Bouwma</i>
3	Tijdsperiode meting	<i>5-4-2013 tot 8-4-2013</i>
4	Type trillingsbron	<i>Treinen</i>
5	Gebouwomschrijving	<i>Hoogbouw met bestemming kantoor. Opgebouwd uit beton en staal</i>
6	Locatie metingen	<i>Zie plattegrond in hoofdstuk 5</i>
7	Geotechnische gegevens	<i>Niet gebruikt in dit onderzoek</i>
8	Meetposities	<i>Zie plattegrond in hoofdstuk 5</i>
9	Gebruikte meetopnemers	<i>Twee 3D-geofoons</i>
	Gebruikte registratieapparatuur	<i>Webcam gekoppeld aan meetcomputer</i>
	Gebruikte verwerkingsapparatuur	<i>Dewe-101 meetcomputer met 6 aangesloten kanalen</i>
10	Overzicht meetwaarden	<i>Zie figuren in hoofdstuk 5</i>
11	Motivatie classificatie gebouw	<i>Zie hoofdstuk 5</i>
12	Overige relevante omstandigheden	<i>Zie hoofdstuk 5</i>

Bijlage III Resultaten VibraDyna

Bijlage IV Effect van mitigerende maatregelen

In dit onderzoek zijn een aantal maatregelen onderzocht. De resultaten daarvan zijn opgenomen in deze bijlage. De onderzochte maatregelen zijn weergegeven in Tabel IV-1.

Tabel IV-1 *Overzicht maatregelen*

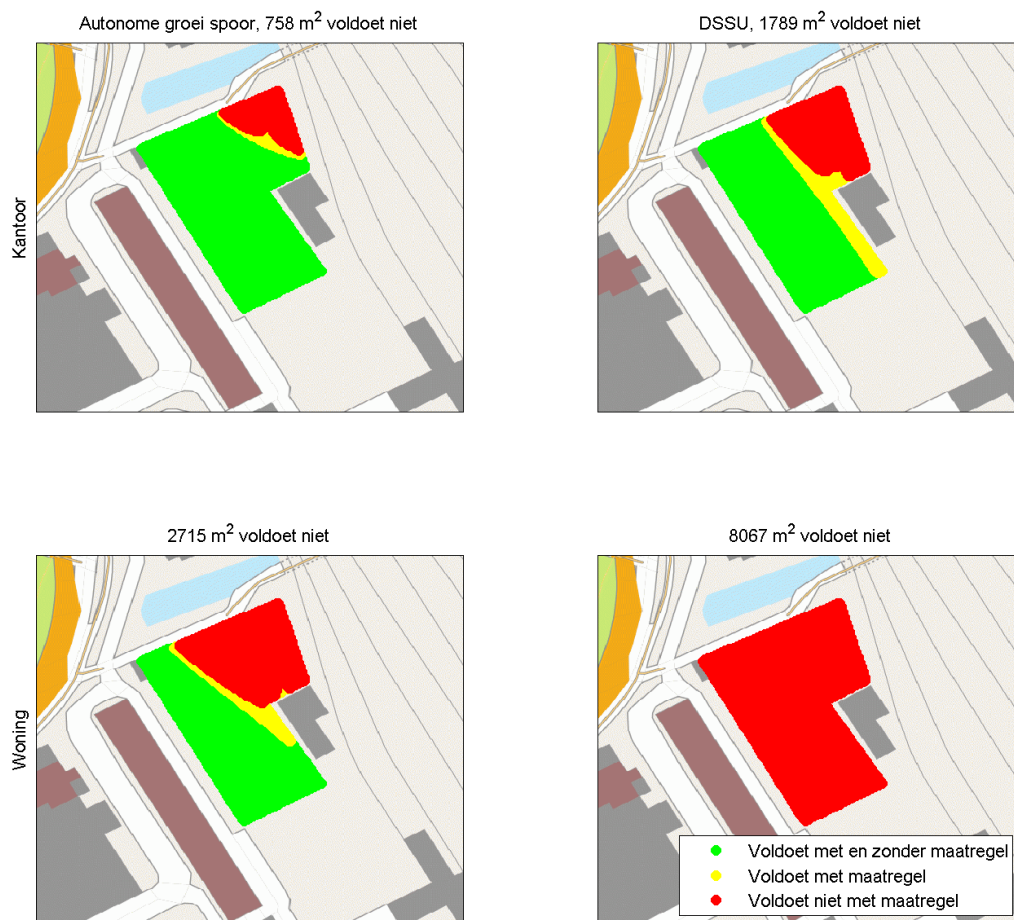
Maatregel	Omschrijving
1	Sleuf (3.2 m diep) met damwanden (AZ36, 8,7 m diep)
2	Sleuf (6.2 m diep) met damwanden (AZ50, 15.7 m diep)
3	Betonnen trillingsschermb (6.2 m diep)
4	Betonnen trillingsschermb (8.7 m diep)
5	Betonnen trillingsschermb (13.2 m diep)
6	Afgeveerde constructie, eigenfrequentie 2 Hz, dempingsconstante 0.05
7	Afgeveerde constructie, eigenfrequentie 2 Hz, dempingsconstante 0.10
8	Afgeveerde constructie, eigenfrequentie 2 Hz, dempingsconstante 0.15
9	Afgeveerde constructie, eigenfrequentie 2 Hz, dempingsconstante 0.20
10	Afgeveerde constructie, eigenfrequentie 2.5 Hz, dempingsconstante 0.10
11	Afgeveerde constructie, eigenfrequentie 2.5 Hz, dempingsconstante 0.15
12	Afgeveerde constructie, eigenfrequentie 2.5 Hz, dempingsconstante 0.20

Voor elke maatregel is een figuur opgenomen met daarin het bouwvlak. In de figuren is aangegeven welk gedeelte wel en niet voldoet bij een bepaalde maatregel.

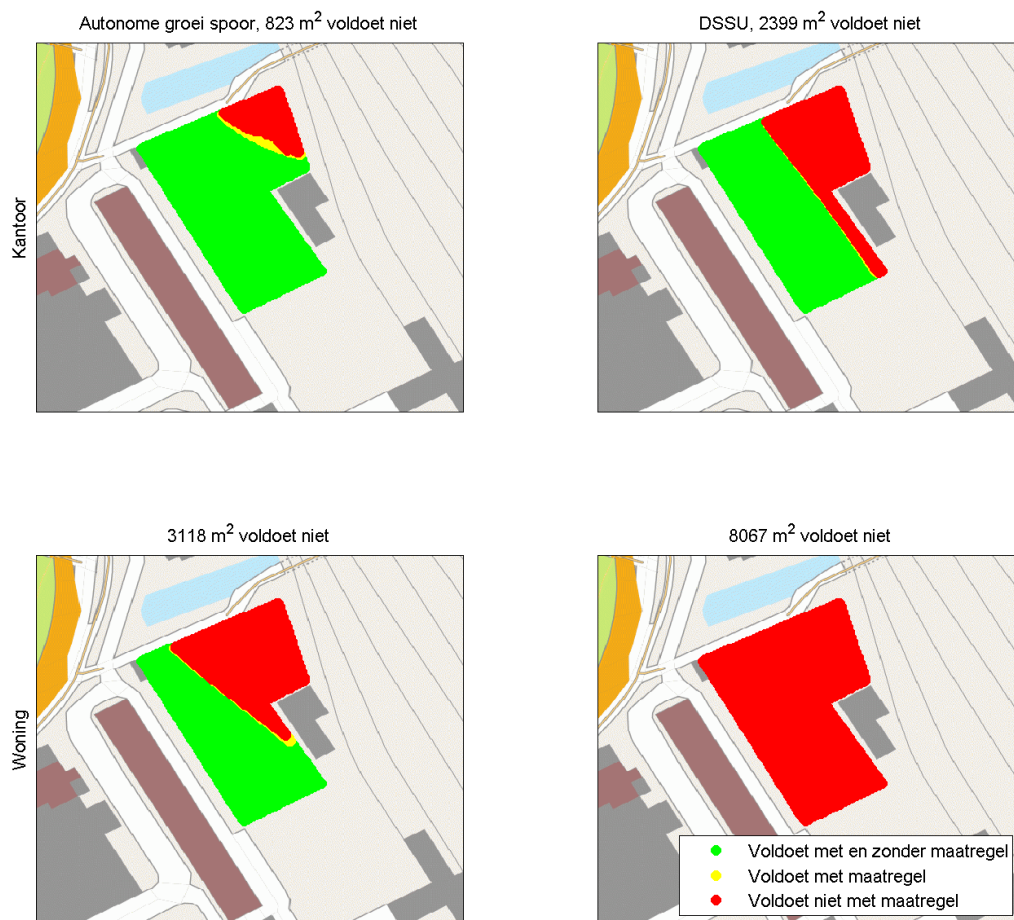
Omdat de overschrijdingen zonder maatregelen het gevolg zijn van het spoorverkeer, worden veranderingen in het overige verkeer (trams en bussen) niet getoond. Per maatregel zijn daarom de volgende kaarten getoond:

1. Bestemming *wonen*:
 - a. Autonome groeisituatie;
 - b. DSSU;
2. Bestemming *kantoor*:
 - a. Autonome groeisituatie;
 - b. DSSU.

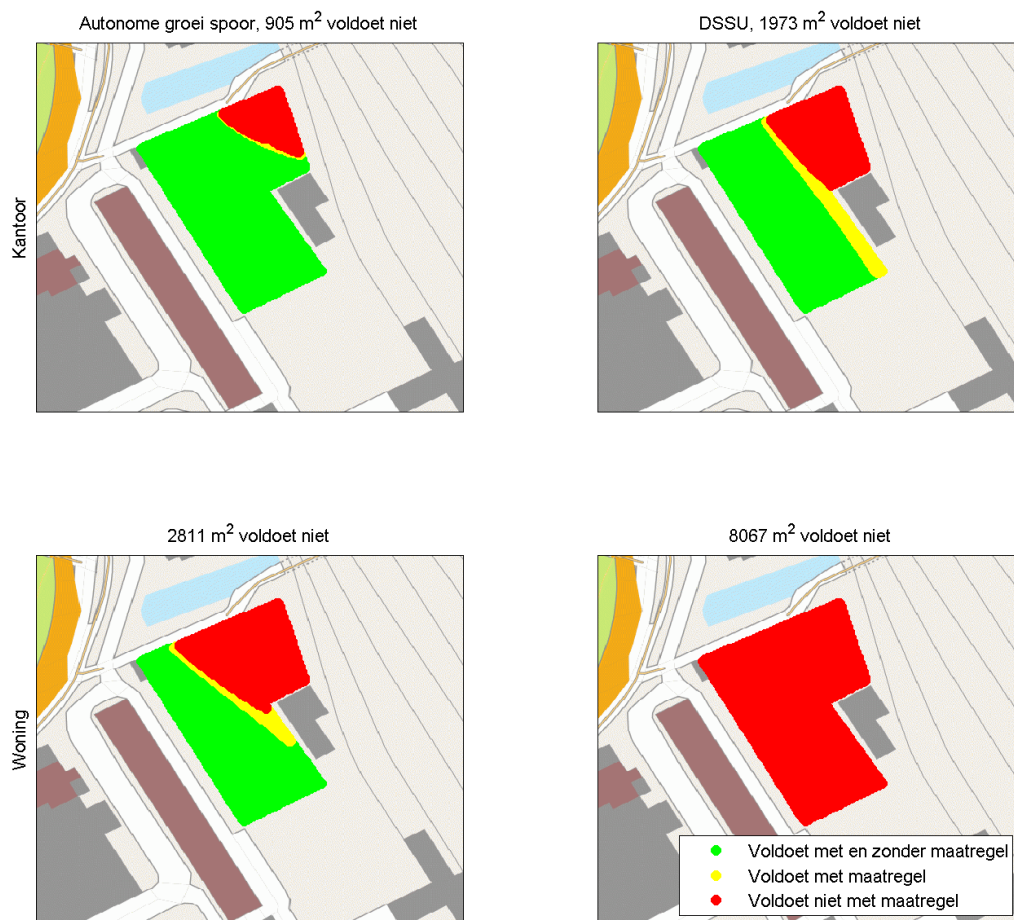
De getoonde figuren zijn voor 2018. Per figuur is eveneens aangegeven hoeveel vierkante meter van het bouwvlak niet voldoet na het nemen van de maatregel.



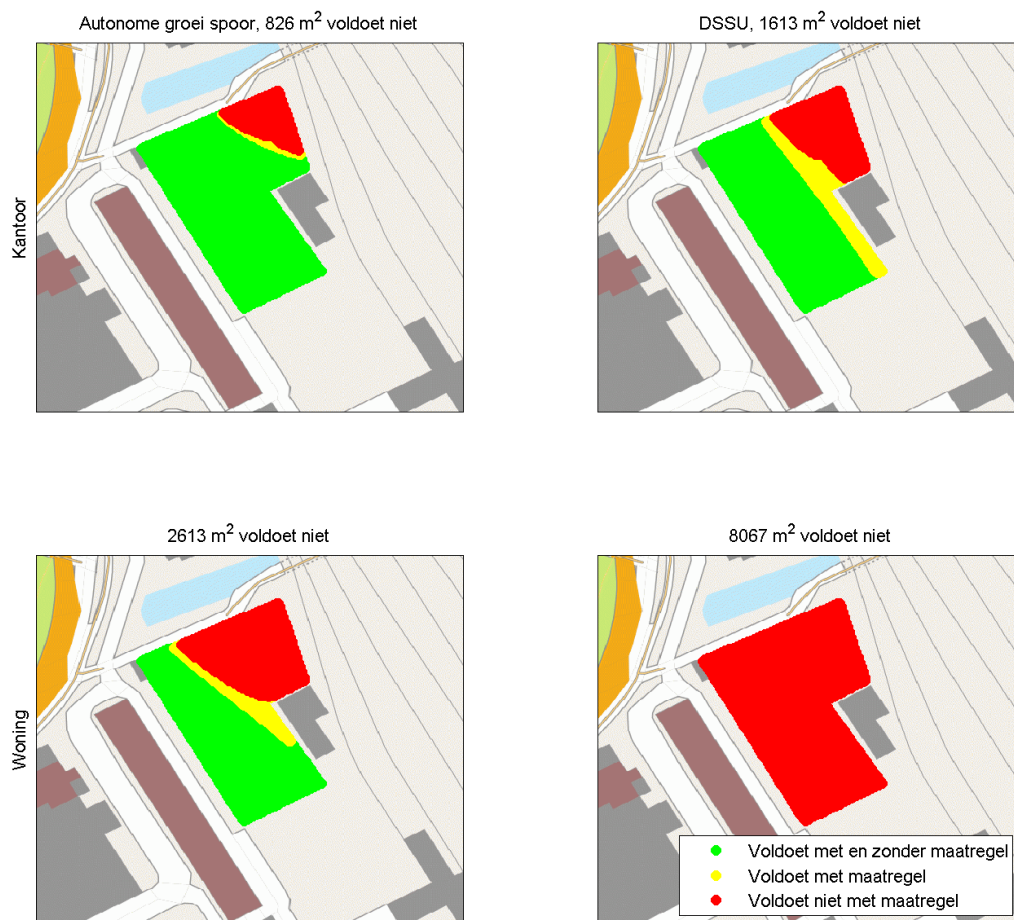
Figuur IV-1 Resultaten met maatregel 1 voor (links) autonome groei van het spoor en (rechts) DSSU, boven met bestemming kantoor en onder met bestemming wonen.



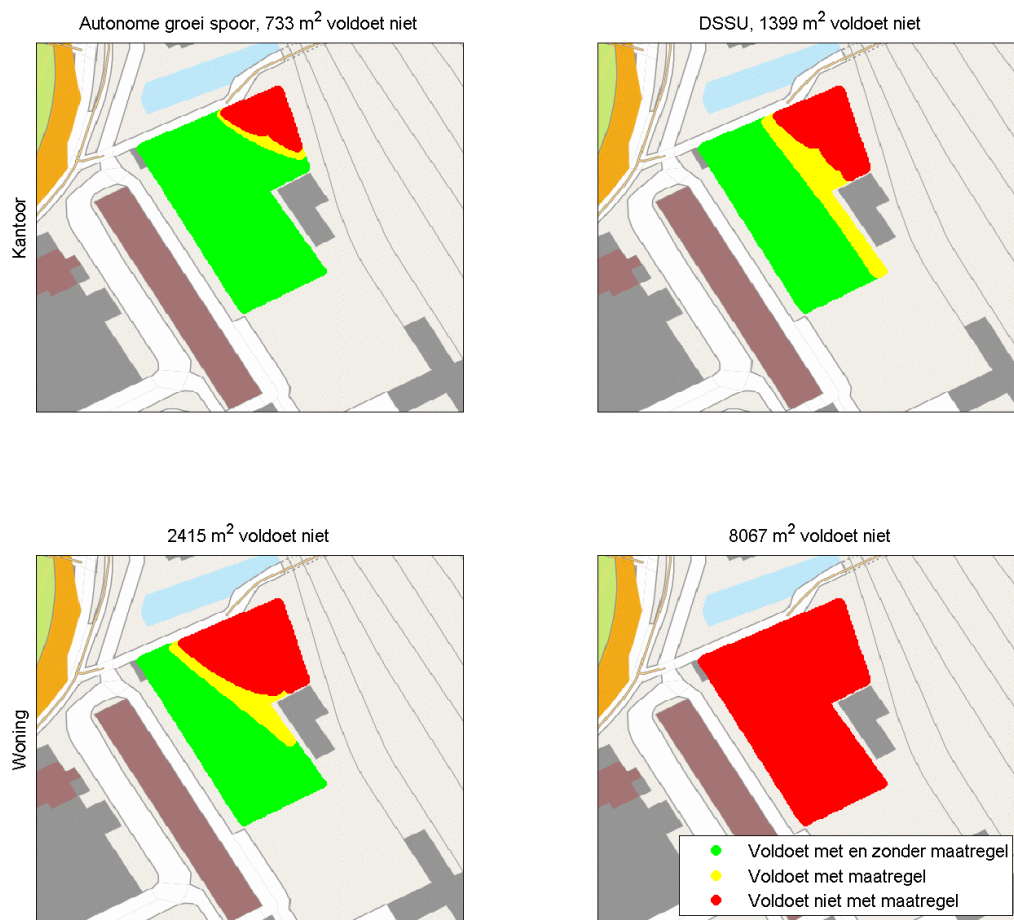
Figuur IV-2 Resultaten met maatregel 2 voor (links) autonome groei van het spoor en (rechts) DSSU, boven met bestemming kantoor en onder met bestemming wonen.



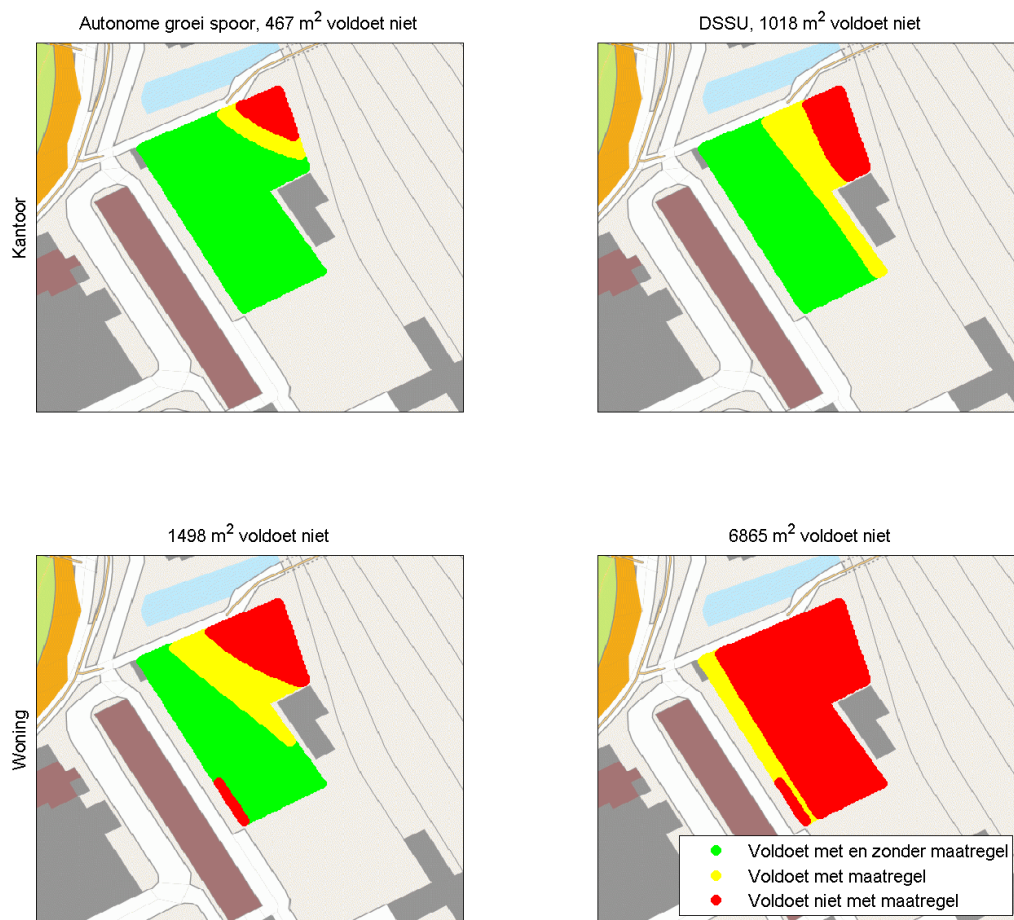
Figuur IV-3 Resultaten met maatregel 3 voor (links) autonome groei van het spoor en (rechts) DSSU, boven met bestemming kantoor en onder met bestemming wonen.



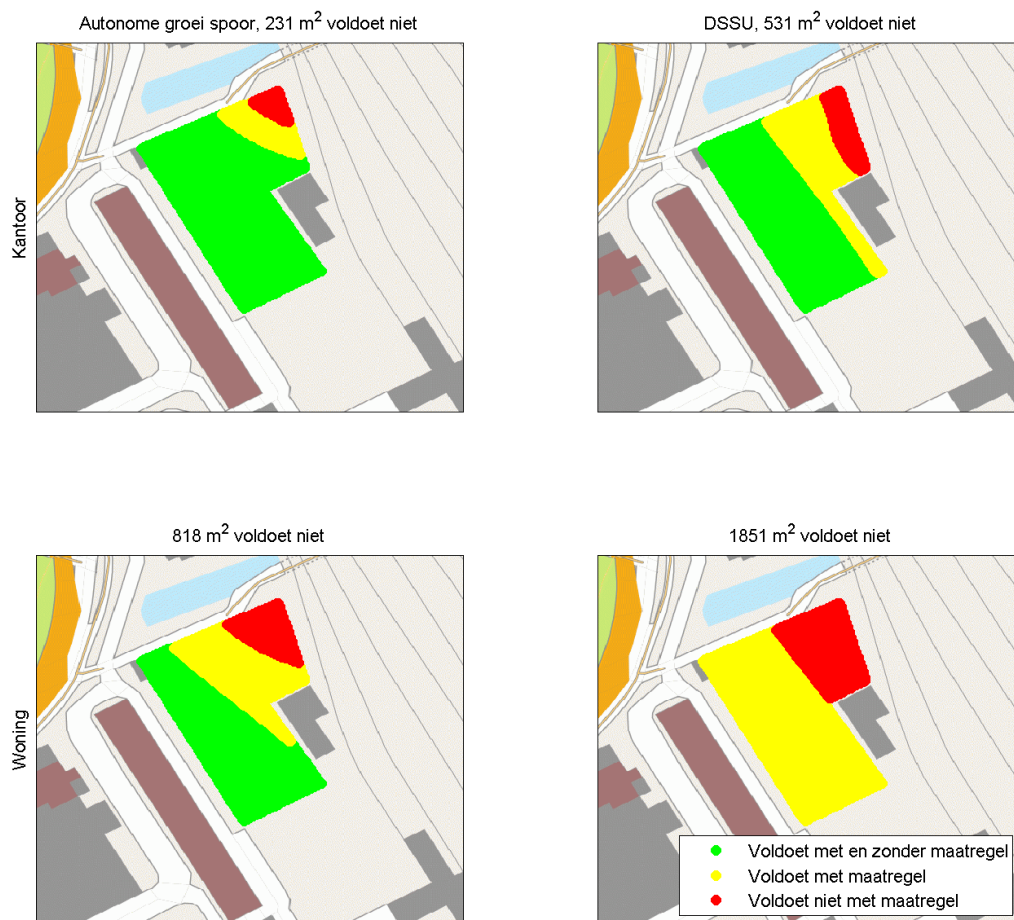
Figuur IV-4 Resultaten met maatregel 4 voor (links) autonome groei van het spoor en (rechts) DSSU, boven met bestemming kantoor en onder met bestemming wonen.



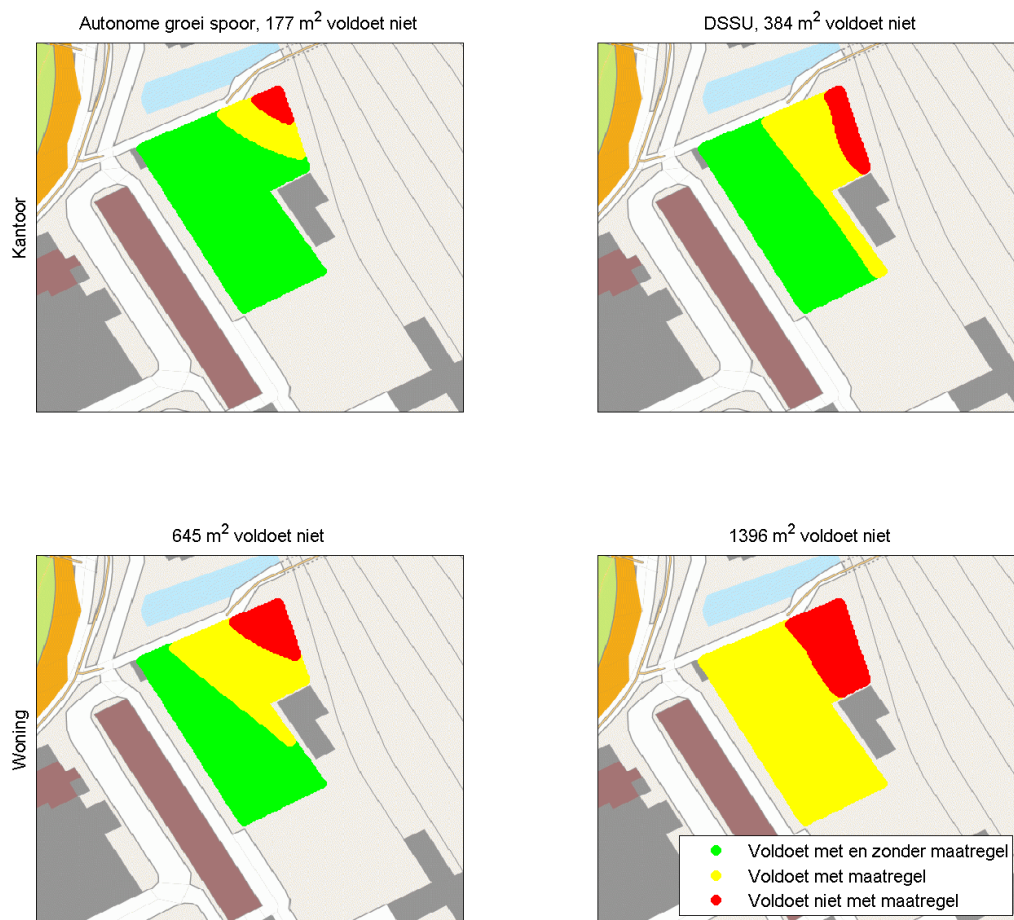
Figuur IV-5 Resultaten met maatregel 5 voor (links) autonome groei van het spoor en (rechts) DSSU, boven met bestemming kantoor en onder met bestemming wonen.



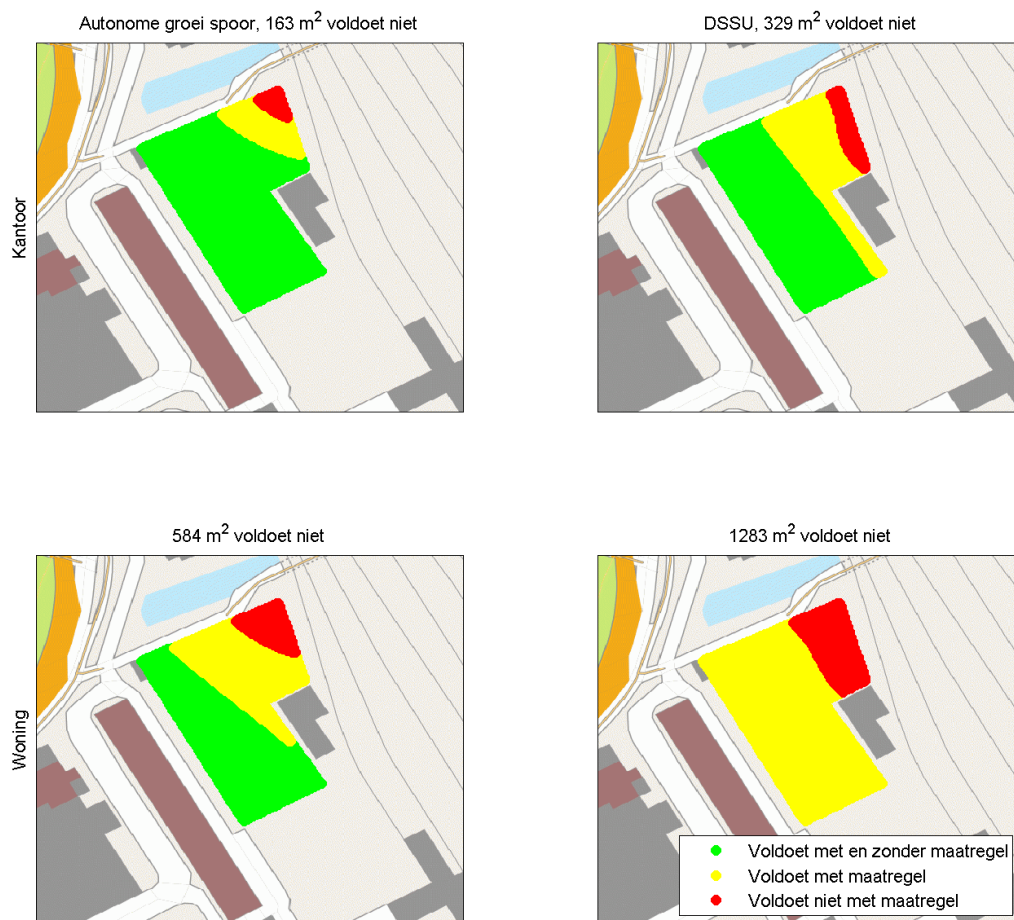
Figuur IV-6 Resultaten met maatregel 6 voor (links) autonome groei van het spoor en (rechts) DSSU, boven met bestemming kantoor en onder met bestemming wonen.



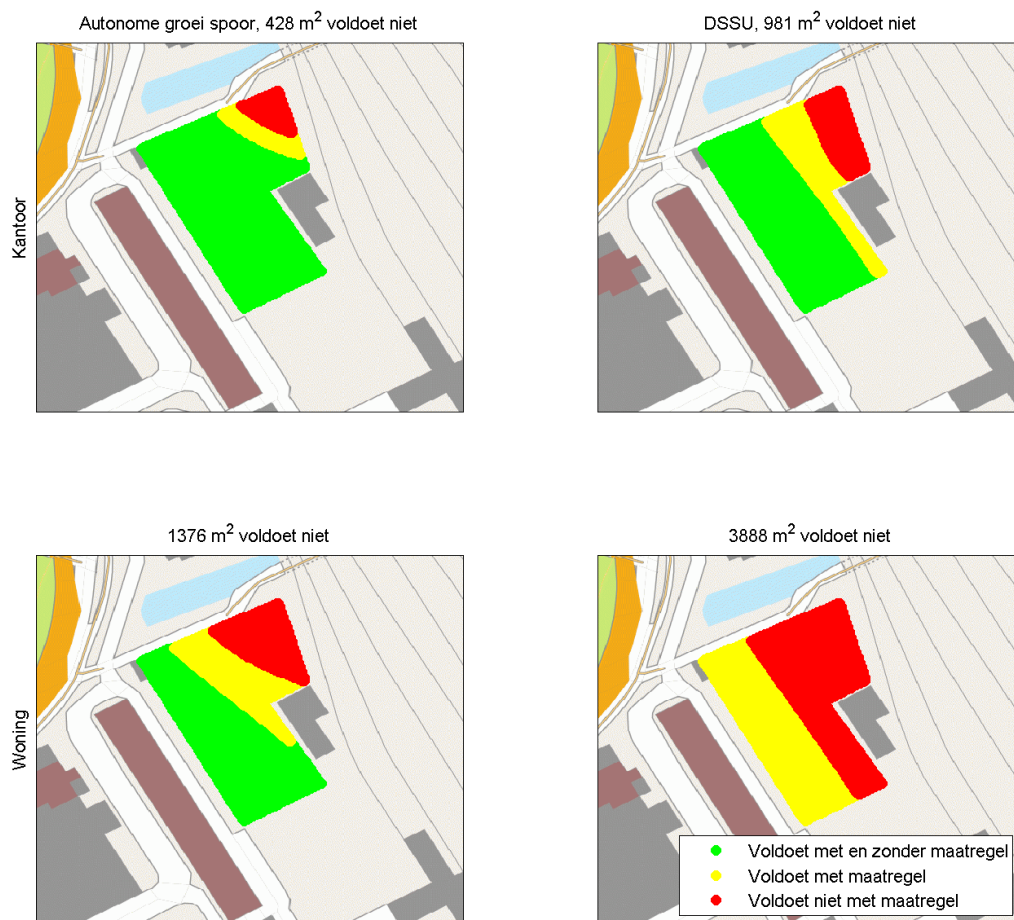
Figuur IV-7 Resultaten met maatregel 7 voor (links) autonome groei van het spoor en (rechts) DSSU, boven met bestemming kantoor en onder met bestemming wonen.



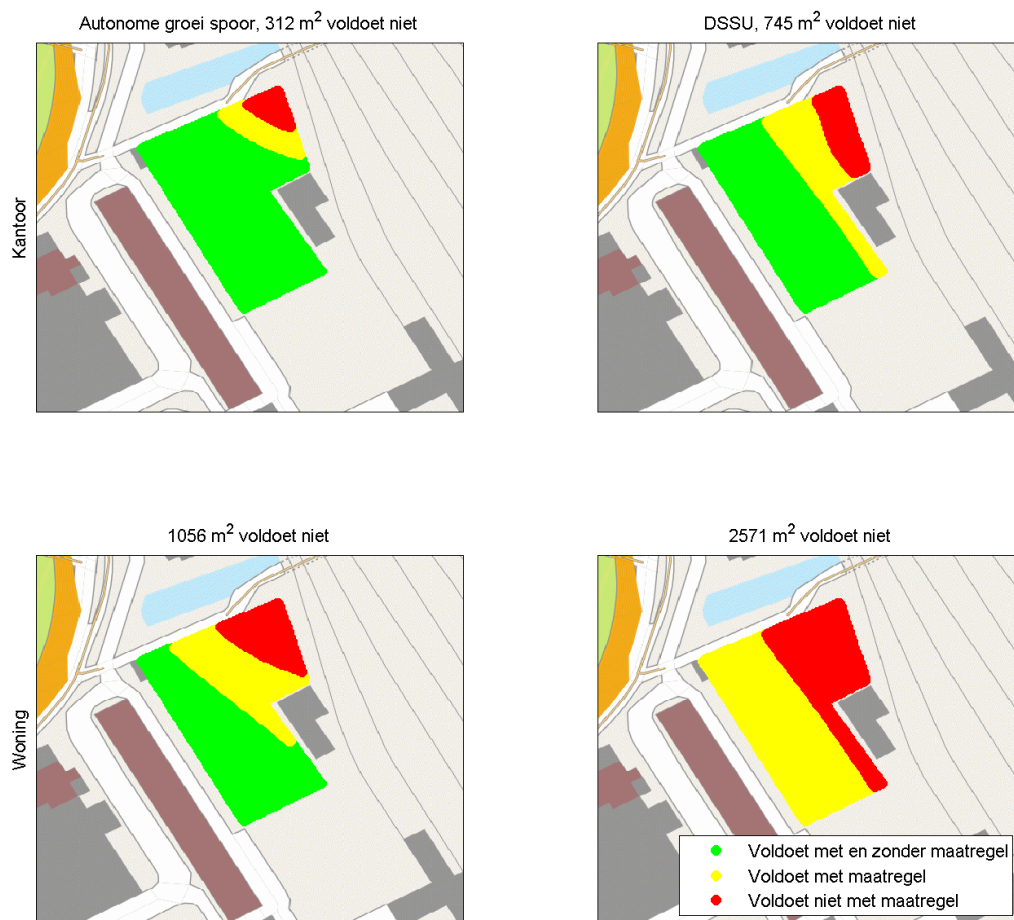
Figuur IV-8 Resultaten met maatregel 8 voor (links) autonome groei van het spoor en (rechts) DSSU, boven met bestemming kantoor en onder met bestemming wonen.



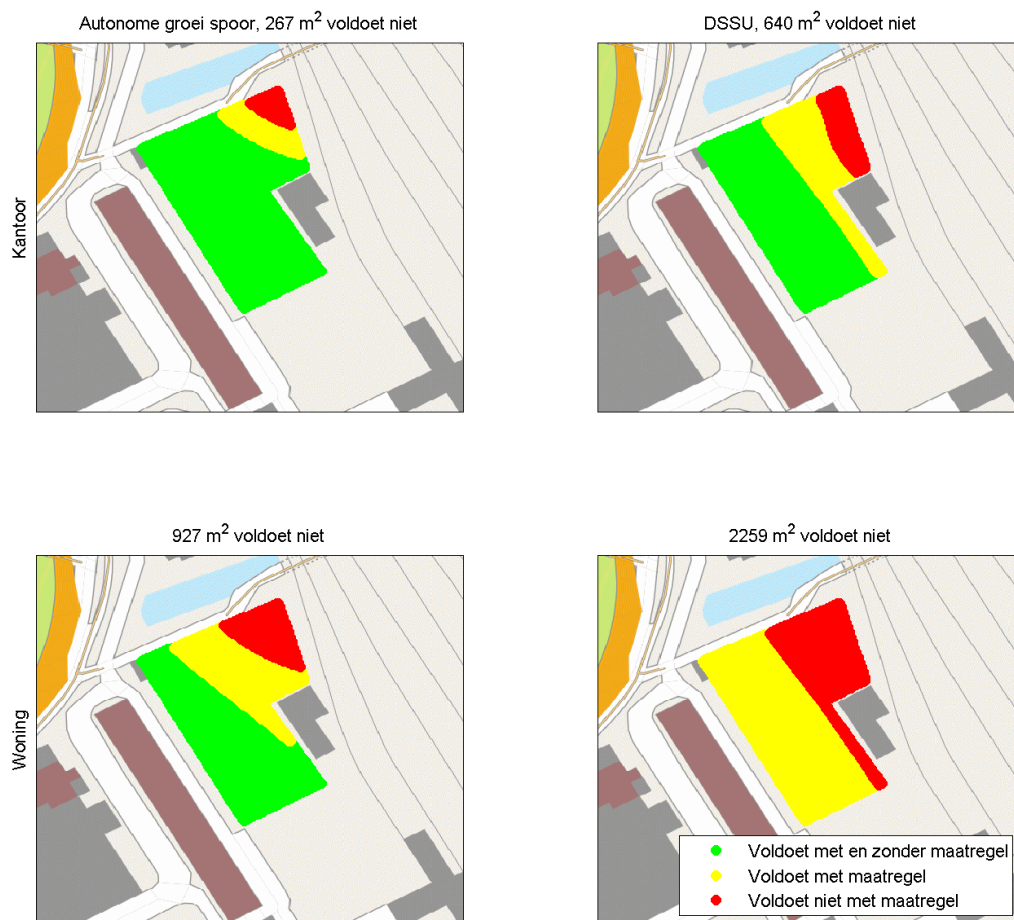
Figuur IV-9 Resultaten met maatregel 9 voor (links) autonome groei van het spoor en (rechts) DSSU, boven met bestemming kantoor en onder met bestemming wonen.



Figuur IV-10 Resultaten met maatregel 10 voor (links) autonome groei van het spoor en (rechts) DSSU, boven met bestemming kantoor en onder met bestemming wonen.



Figuur IV-11 Resultaten met maatregel 11 voor (links) autonome groei van het spoor en (rechts) DSSU, boven met bestemming kantoor en onder met bestemming wonen.



Figuur IV-12 Resultaten met maatregel 12 voor (links) autonome groei van het spoor en (rechts) DSSU, boven met bestemming kantoor en onder met bestemming wonen.