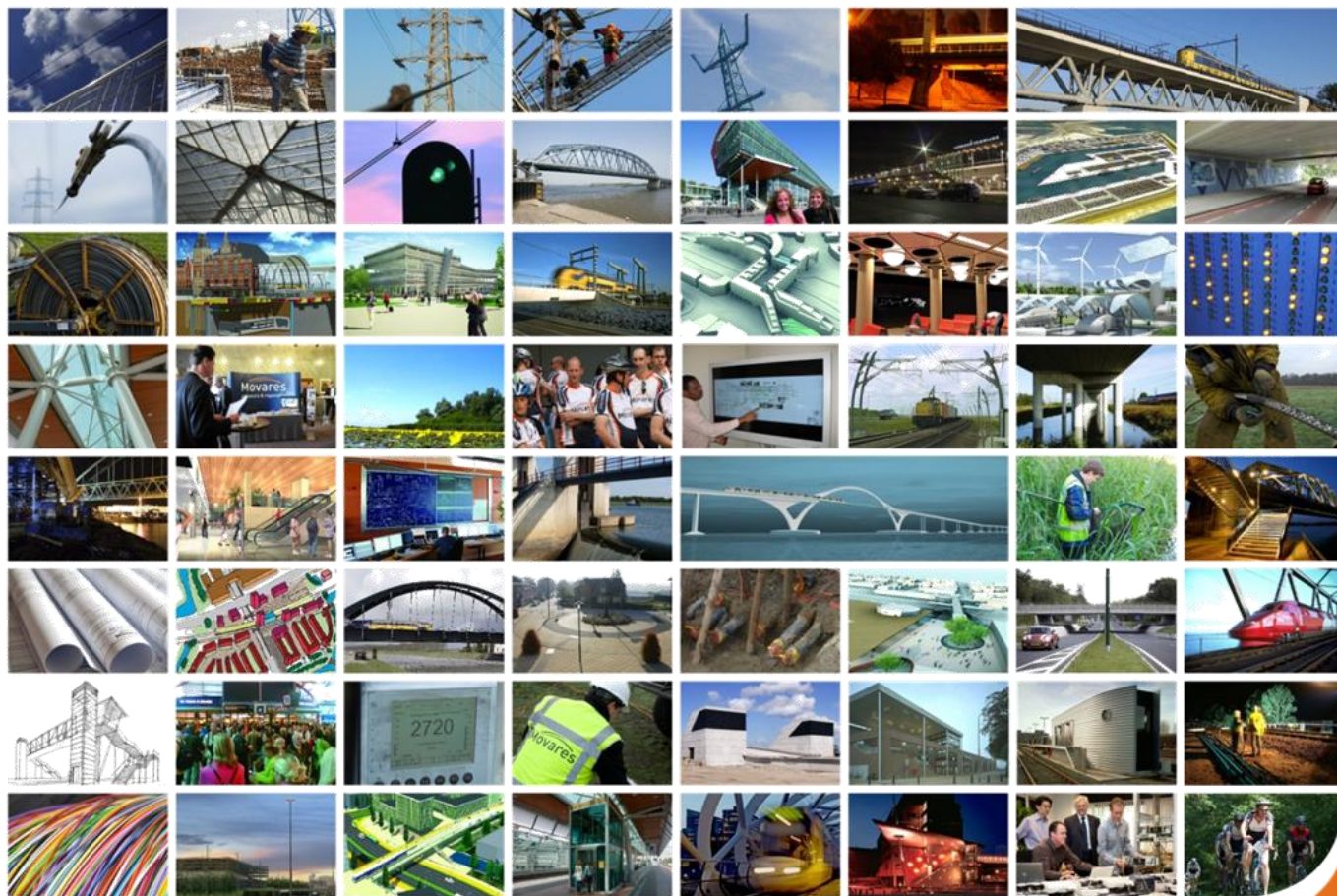




D79-PBO-KA-1500007

2 februari 2015- Versie 0.2

Autorisatieblad

Bestemmingsplan Noordgebouw

Onderzoek naar trillingshinder

	Naam	Datum
Opgesteld door	ir. P.M. Boon	30-01-2015
Controle door	dr. ir. H.G. Stuit	02-02-2015
Vrijgave door		

Samenvatting

In het kader van CU2030 wordt de stationsomgeving van Utrecht Centraal sterk aangepast. Behalve de bouw van een groot aantal nieuwe gebouwen, worden ook tram- en busroutes verlegd. Een van de gebouwen die nieuw wordt gerealiseerd, is het Noordgebouw dat aan de noordoostzijde van station Utrecht Centraal zal worden gerealiseerd. Dit gebouw bevindt zich in de onmiddellijke nabijheid van het spoor, terwijl de trams en bussen in de eindsituatie ook op korte afstand van het pand passeren. Gezien de afstand tot het spoor en de tramlijn kan er sprake zijn van trillingshinder in het nieuwe gebouw in de eindsituatie.

Ten behoeve van het bestemmingsplan *Noordgebouw* is daarom een trillingsonderzoek uitgevoerd. Met behulp van modellen, metingen in gebouwen en op maaiveld, is de verwachte trillingssterkte in de toekomstige bebouwing in het bestemmingsplangebied vastgesteld.

In het voorliggende trillingsonderzoek is de trillingssituatie bepaald voor het bestemmingsplangebied van het *Noordgebouw*. Middels een uitgebreid trillingsonderzoek met behulp van modellen, metingen in gebouwen en op maaiveld, is de verwachte trillingssterkte in de toekomstige bebouwing in het bestemmingsplangebied vastgesteld.

Uit dit onderzoek volgt dat er alleen in verticale richting overschrijdingen worden verwacht van de SBR B-richtlijn. Verder volgt dat een eigenfrequentie van rond de 10 Hz voor de vloeren ongunstig is, omdat dan vooral de trillingen van bussen en trams worden versterkt. Een lagere eigenfrequentie is ongunstig voor de goederentreinen. Pas bij frequenties van minimaal 15 Hz zijn er geen overschrijdingen meer van de SBR B-richtlijn. Bij gebouwen met de afmetingen van het Noordgebouw zijn dergelijke vrij hoge eigenfrequenties van de vloeren niet-standaard. Ook wanneer het gebouw alleen als kantoor wordt bestemd, dus zonder woningen, worden nog overschrijdingen van het beoordelingskader verwacht. De overschrijding van de trillingsintensiteit wordt vooral veroorzaakt door de passage van bussen en trams.

Op basis van het 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. Maak een dynamisch 3D eindige elementen model van het Noordgebouw, inclusief het gedeelte op de tafelconstructie over de buurtsporen van Utrecht Centraal, en de constructie van de trambaan. Reken dit model door op dynamisch gedrag en optredende trillingen, uitgaande van de gegevens zoals gepresenteerd in het voorliggende onderzoek;

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

2. Minimaliseer de vloeroverspanningen, maximaliseer de vloerdikte en gebruik stijve constructiematerialen (m.a.w., maak de eigenfrequentie van de vloeren

zo hoog mogelijk, maar in ieder geval minimaal 15 Hz);

3. Onderzoek in hoeverre het mogelijk is om de voegovergangen in het kunstwerk te optimaliseren voor trillingen. Omdat het kunstwerk buiten het bestemmingsplangebied valt, dient hiervoor in overleg te worden getreden met de opdrachtgever van het kunstwerk. Eventueel kunnen hierbij ook maatregelen zoals railpads voor de trambaan ter sprake komen;

Inhoudsopgave

Samenvatting	1
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	6
2 Situatiebeschrijving	7
2.1 Inleiding	7
2.2 Uitgangspunten	7
2.2.1. Referentiesituatie	7
2.2.2. Plansituatie	8
2.3 Onderzoeksgebied	9
3 Opzet trillingsonderzoek	11
3.1 Stap 1: Metingen	11
3.2 Stap 2: Modelberekeningen	11
3.3 Stap 3: Ontwerpen van maatregelen	12
4 Beoordelingskader trillingshinder	13
4.1 Algemeen	13
4.2 Grootheden	13
4.3 Streefwaarden	13
4.3.1. Nieuwe of bestaande situatie	13
4.3.2. Periode gedurende de dag	14
4.3.3. Gebouwfunctie	14
4.4 Beoordeling in huidige onderzoek	15
4.5 Beoordeling in huidige trillingsonderzoek	16
5 Stap 1 – Metingen	17
5.1 Meetlocaties	17
5.2 Metingen in gebouwen	17
5.3 Maaiveldmetingen	18
5.3.1. Valproeven	18
5.3.2. Trampassages	19
5.3.3. Buspassages	21
5.3.4. Treinpassages	22
6 Stap 2 – Modelberekeningen	24
6.1 Inleiding	24
6.2 Opzet trillingsmodel stap 2	24
6.3 Vergelijking trillingscontouren	25
6.4 Analyse	29
7 Stap 3 – Onderzoek naar maatregelen	30
7.1 Methodiek	30

7.2	Mogelijke maatregelen	31
7.2.1.	<i>Mogelijke maatregelen aan de bron</i>	32
7.2.2.	<i>Mogelijke maatregelen aan de transmissie</i>	33
7.2.3.	<i>Mogelijke maatregelen aan de ontvanger</i>	35
7.3	Locaties voor maatregelen	36
7.4	Te beschouwen maatregelen	36
7.5	Nader gedetailleerde maatregelen	37
7.5.1.	<i>Afveren van het gebouw</i>	37
7.5.2.	<i>Verstijven van de vloeren</i>	38
7.5.3.	<i>Aanpassen spoorligging</i>	38
7.6	Conclusies en aanbevelingen	39
8	Conclusies en aanbevelingen	40
	Colofon	41

Bijlage I VibraDyna

Bijlage II Gegevens metingen

1 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. Een van de gebouwen die nieuw wordt gerealiseerd, is het Noordgebouw dat aan de noordoostzijde van station Utrecht Centraal zal worden gerealiseerd. Dit gebouw bevindt zich in de onmiddellijke nabijheid van het spoor, terwijl de trams en bussen in de eindsituatie ook op korte afstand van het pand passeren. Gezien de afstand tot het spoor en de tramlijn kan er sprake zijn van trillingshinder in het nieuwe gebouw in de eindsituatie.

1.2 Doel van het onderzoek

Het doel van dit onderzoek is om ten behoeve van het bestemmingsplan van het Noordgebouw een trillingsonderzoek uit te voeren voor het gehele bouwvlak van de geplande bebouwing. Daarnaast wordt, indien noodzakelijk, aangegeven welke maatregelen kunnen worden genomen om de trillingshinder te verminderen.

1.3 Algemeen onderzoekskader

De grenzen van het onderzoeksgebied zijn aangegeven in het bestemmingsplan. Het Noordgebouw wordt deels boven de zogenaamde ‘buurtsporen’ gerealiseerd, en deels tussen het spoor en Hoog Catharijne in.

1.4 Opzet van het onderzoek

Ten behoeve van het trillingsonderzoek worden de volgende stappen doorlopen:

1. Uitvoeren van metingen:
 - a. Metingen op maaiveld op de geplande bouwlocatie gedurende een dag. Door parallel metingen uit te voeren in een gebouw in de onmiddellijke nabijheid van de onderzoekslocatie, kan deze meting verder worden aangevuld tot een lengte van een week om een betrouwbaarder beeld te creëren van de passerende goederentreinen;
 - a. Een meting aan trams om de trillingssterkte van trams vast te leggen. Deze meting wordt uitgevoerd aan het huidige SUNIJ-materieel op de huidige tramlijn, bij een constructie die zo goed mogelijk vergelijkbaar is met de geplande trambaanconstructie bij het Noordgebouw. Voor de verschillen in constructie wordt gecorrigeerd. Met behulp van een modelberekening wordt gecorrigeerd voor het nieuwe type trams, wat in de eindsituatie langs het Noordgebouw rijdt;
 - b. Een meting aan bussen om de trillingssterkte van bussen vast te leggen. Deze meting wordt uitgevoerd aan buspassages op een zo goed mogelijk vergelijkbare constructie als de toekomstige constructie ter plaatse van het Noordgebouw. Voor de verschillen in constructie wordt gecorrigeerd;
2. Het maken van een prognose van de trillingssituatie, aan de hand van een trillingsmodel en de uitgevoerde metingen. Er wordt gerekend met het planjaar 2020, en onderscheid gemaakt tussen twee situaties:
 - a. Autonome ontwikkeling van het spoor;
 - b. Realisatie van DSSU;
3. In het geval van 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 dit onderzoek.

2 Situatiebeschrijving

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de situatie rond het bestemmingsplangebied beschreven. Er wordt onderscheid gemaakt tussen twee situaties, omdat er ook wijzigingen in het spoor plaatsvinden:

- De referentiesituatie in 2020, waarbij de sporenlay-out niet wijzigt ten opzichte van de situatie op het moment van de metingen in 2015. Hierbij komen sporenlay-out en spoorgebruik overeen met de situatie van het TB *Sporen in Utrecht 2014*;
- De plansituatie in 2020, waarbij de sporenlay-out wijzigt ten gevolge van het project *Doorstroomstation Utrecht* (DSSU).

In beide situaties wordt de bestaande tramlijn doorgetrokken vanaf de Sijpesteijnzijde van station Utrecht Centraal, door de Leidseveertunnel, over de Leidsche Rijn en de Noordertunnel naar de oostzijde van station Utrecht Centraal. Deze tramlijn gaat op een kunstwerk vlak langs het Noordgebouw. Ook de bussen maken gebruik van dit kunstwerk.

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 situaties gegeven.

2.2.1. Referentiesituatie

Als uitgangspunt voor de referentiesituatie zijn de in Tabel 2-1 weergegeven documenten gebruikt.

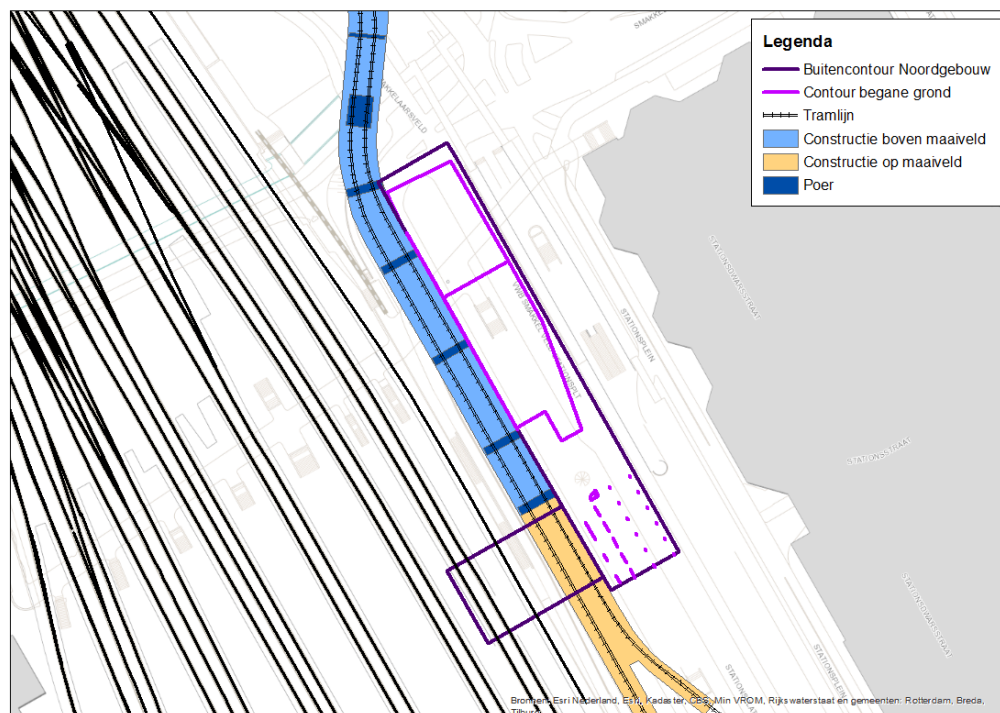
Tabel 2-1 Gebruikte documenten

Nr.	Document
[1]	HOV Baan Stationsplein Oost, Utrecht - Leidsche Rijn, Plattegrond as 1 t/m 4, Royal Haskoning DHV, 14 februari 2014, kenmerk 9X5706-3321-057
[2]	HOV Baan Stationsplein Oost, Utrecht - Leidsche Rijn, Langsdoorsneden over Westelijk spoor, Royal Haskoning DHV, 14 februari 2014, kenmerk 9X5706-3321-063
[3]	Tekeningen Noordgebouw, HFB en RHDHV
[4]	Tekeningen VleuGel/RSS, Movares, GP121410A28BNS-260001-0102 21, 7 juni 2007 (toegevoegd aan het tracébesluit)
[5]	Dwarsprofielen definitief ontwerp SIU, Movares, 6 oktober 2009

De gehanteerde intensiteiten voor de trams en bussen zijn conform het bestemmingsplan *Uithoflijn*, voor de treinen conform het tracébesluit *Sporen in Utrecht*.

De snelheden van de trams en bussen zijn gebaseerd op meetgegevens en de maximale verkeerssnelheden, van treinen zijn deze gebaseerd op de seinplaatsing. Trams rijden ter plaatse van het Noordgebouw niet harder dan 40 km/h, bussen niet harder dan 50 km/h.

Een overzicht van deze situatie is weergegeven in Figuur 2-1.



Figuur 2-1 Situatie rond Noordgebouw, sporenlay-out conform TB Sporen in Utrecht

2.2.2. Plansituatie

Voor de toekomstige situaties zijn in aanvulling op Tabel 2-1 de in Tabel 2-2 weergegeven tekeningen gebruikt.

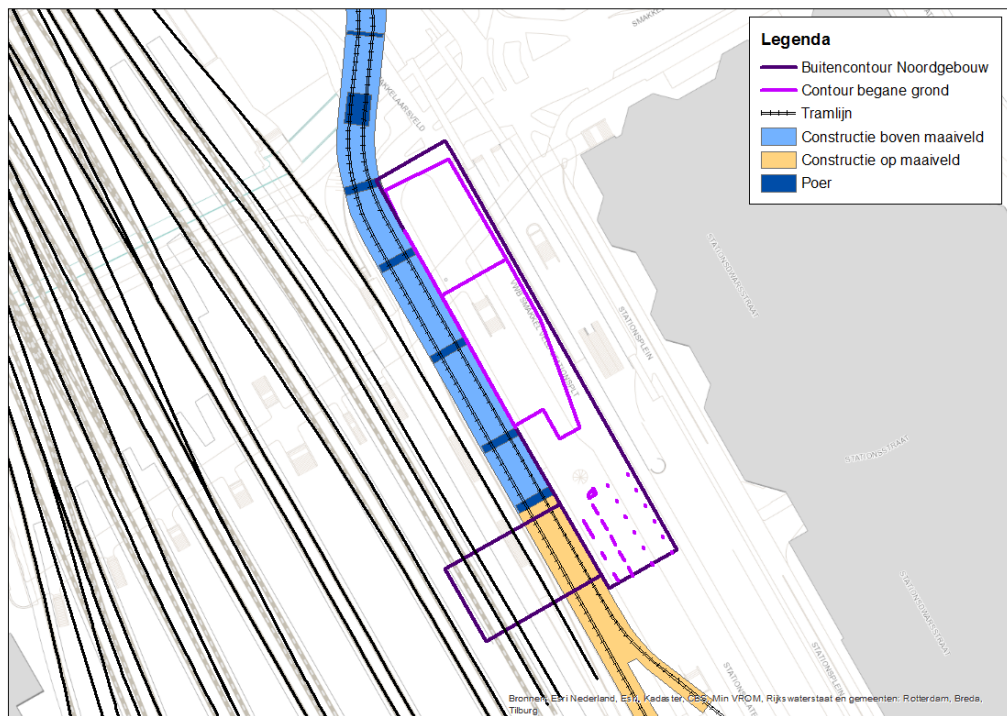
Tabel 2-2 Gebruikte documenten

Nr.	Document
[1]	Tekeningen Definitief Ontwerp DSSU, Movares, DO-ET-BS-00-ST-17 tot en met DO-ET-BS-00-ST-27, DO-ET-BS-00-ST-55 en DO-ET-BS-00-ST-75, 12 februari 2014
[2]	Dwarsprofielen definitief ontwerp DSSU, Movares, 6 oktober 2009

De gehanteerde intensiteiten voor de trams en bussen zijn conform het bestemmingsplan *Uithoflijn*, voor de treinen conform het ontwerptractébesluit *Doorstroomstation Utrecht*.

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

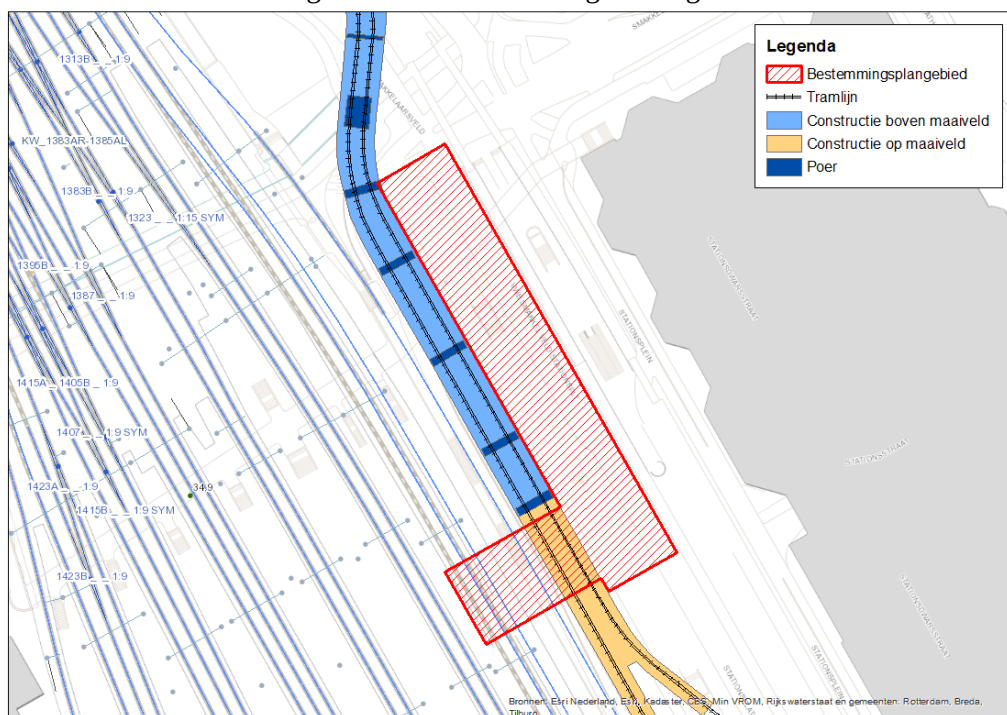
Een overzicht van deze situatie is weergegeven in Figuur 2-2. De belangrijkste wijzigingen ten opzichte van de referentiesituatie zijn het verwijderen van een groot aantal wissels rond Utrecht Centraal, en de hogere snelheid van goederentreinen.



Figuur 2-2 Situatie rond Noordgebouw, sporenlay-out conform (O)TB Doorstroomstation Utrecht

2.3 Onderzoeksgebied

Het onderzoeksgebied voor het bestemmingsplan is weergegeven in Figuur 2-3 binnen het rode kader. Binnen dit gebied wordt het Noordgebouw gerealiseerd.



Figuur 2-3 Bestemmingsplangebied

Het onderhavige trillingsonderzoek heeft als doel om te bepalen wat de trillingshinder is in het toekomstige Noordgebouw. Er ligt geen bestaande bebouwing in het gebied van het bestemmingsplan.

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, daarnaast is gebruik gemaakt van metingen die in opdracht van ProRail in panden rond het spoor zijn uitgevoerd. Deze metingen zijn gebruikt als invoer in het trillingsmodel *VibraDyna*¹. De volgende metingen zijn gebruikt in dit onderzoek:

1. Metingen op maaiveld op de geplande bouwlocatie gedurende een dag. Door parallel metingen uit te voeren in een gebouw in de onmiddellijke nabijheid van de onderzoekslocatie, kan deze meting verder worden aangevuld tot een lengte van een week om een betrouwbaarder beeld te creëren van de passerende goederentreinen;
2. Een meting aan trams op een representatieve locatie in Utrecht om de trillingssterkte van trams vast te leggen. De metingen zijn uitgevoerd bij de Leidseveertunnel, op het moment dat deze nog in exploitatie was. De meting is uitgevoerd aan het huidige SUNIJ-materieel op de huidige tramlijn, bij een baanopbouw die vergelijkbaar is met de geplande baanopbouw ter plaatse van het Noordgebouw. Middels een modelberekening wordt gecorrigeerd voor het nieuwe type trams, wat in de toekomst gebruik maakt van de trambaan;
3. Een meting aan bussen om de trillingssterkte van bussen vast te leggen. Deze meting wordt uitgevoerd aan buspassages bij een vergelijkbare baanopbouw als de toekomstige baanopbouw ter plaatse van het Noordgebouw. Er is gebruik gemaakt van metingen op twee locaties, bij de Waterlinieweg (slappere bodem dan ter plaatse van het Noordgebouw) en bij de Leidseveertunnel (vergelijkbare bodem als Noordgebouw). Bij beide locaties ligt de busbaan op een betonplaat;
4. Metingen in het pand Daalseplein 101, een kantoorpand in de nabijheid van het Noordgebouw. In dit pand is gedurende een periode van enkele maanden een meting uitgevoerd. Door deze meting te combineren met de maaiveldmeting ter plaatse van het Noordgebouw kan de invloed van goederentreinen over langere tijd worden vastgesteld.

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 twee verschillende situaties:

1. Referentiesituatie in 2020, met een autonome ontwikkeling van het spoor conform het vastgestelde tracébesluit *Sporen in Utrecht*;
2. Situatie in 2020 na realisatie van het project *Doorstroomstation Utrecht* (DSSU, project is in ontwerp-tracébesluitfase);

Uit het model volgt voor zowel maaiveld, de fundering als midden vloerveld een berekening van de trillingssterkte en trillingsintensiteit, die vervolgens beoordeeld wordt op de SBR B-richtlijn.

¹ *VibraDyna* is een door Movares ontwikkeld trillingsmodel dat de trillingen van weg- en railverkeer berekent. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van versie 1.4.

3.3 Stap 3: Ontwerpen van maatregelen

Voor dat deel van het plangebied dat niet voldoet aan de SBR B-richtlijn, worden maatregelen ontworpen en doorgerekend. In deze stap wordt met behulp van modelberekeningen met behulp van Geovib² 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 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 Beoordelingskader trillingshinder

4.1 Algemeen

Trein-, tram- en busverkeer kan aanleiding geven tot trillingen in gebouwen. Deze trillingen kunnen leiden tot hinder voor omwonenden. De Duitse DIN 4150-2 (1999) norm beschrijft criteria voor het meten en beoordelen van trillingen. De Nederlandse SBR-richtlijn (2002) is hierop gebaseerd. Deze 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 de geplande bebouwing (deel C), en toetsing op schade wordt alleen uitgevoerd indien de resultaten uit dit onderzoek daar aanleiding toe geven. Voor de bouwfase geldt dat voldaan dient te worden aan tabel 5 van de SBR B-richtlijn, conform art. 8.4 van het Bouwbesluit 2012.

4.2 Grootheden

Conform de SBR B-richtlijn worden twee grootheden bepaald:

1. De trillingssterkte V_{max} . Dit is een dimensieloze indicatie van de maximaal ervaren trillingen gedurende de meetperiode, de zogenaamde pieksterkte van de trillingen. Deze grootheid wordt bepaald per 30 seconden, zie par. 9.2 en 9.3 van de SBR B-richtlijn. 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_{max} . Deze trillingssterkte is beoordeeld op de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn;
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 $v_{eff, max}$ per 30 seconden indien deze boven de drempelwaarde van 0.1 uitkomt. Trillingssnelheden onder de 0.1 zijn niet of 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

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 trillingsintensiteit V_{per} .

De hoogte van de streefwaarden is afhankelijk van een aantal criteria:

1. Of er sprake is van een 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. Het Noordgebouw is een nieuw gebouw, zodat beoordeeld dient te worden op de streefwaarden voor een 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 strenger 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.

Bij metingen aan treinverkeer worden gewoonlijk de streefwaarden voor de nacht gehanteerd, omdat deze strenger zijn dan die van de dag. Deze keuze is gerechtvaardigd omdat het treinverkeer 's nachts doorgaans vergelijkbare trillingen geeft als het treinverkeer overdag. Tram- en busverkeer vindt hoofdzakelijk in de dag- en avondperiode plaats.

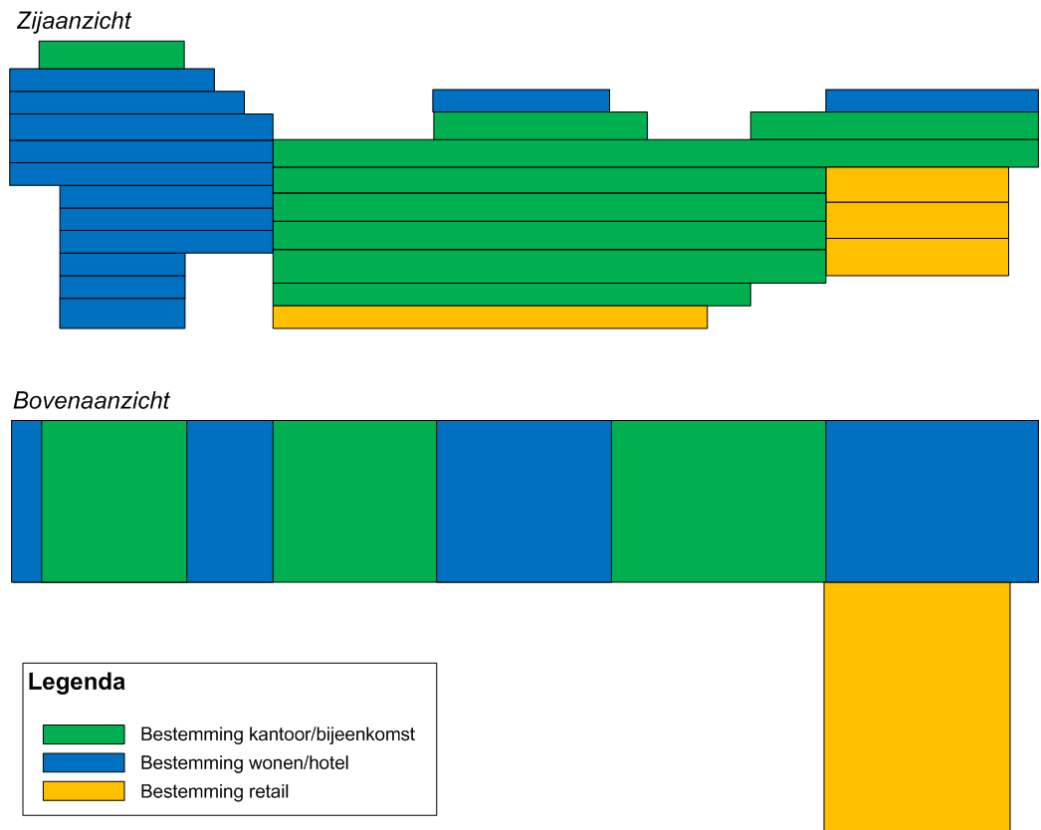
4.3.3. Gebouwfunctie

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. Op basis van deze drie criteria zijn de streefwaarden voor A1, A2 en A3 weergegeven in Tabel 4-1 voor nieuwe situaties. De gebouwfuncties die van toepassing zijn bij het Noordgebouw zijn *wonen* en *kantoor*. Het gedeelte van het gebouw dat op de 'tafelconstructie' boven de Buurtsporen van Utrecht Centraal wordt gerealiseerd, heeft de bestemming *retail*. Conform de SBR B-richtlijn is dat geen trillingsgevoelige bestemming. Dit gebouwdeel wordt daarom buiten beschouwing gelaten in het trillingsonderzoek, zie ook .

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

Gebouwfunctie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Gezondheidszorg	0.1 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	---

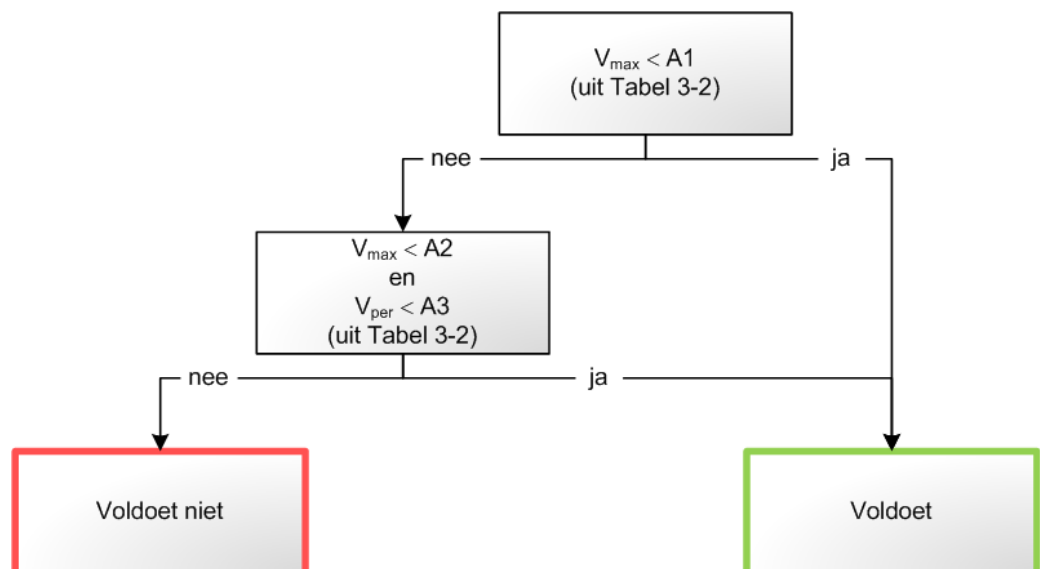
¹⁾ Een streefwaarde van 0.1 betekent een waarde kleiner dan 0.15



Figuur 4-1 Bestemmingen in geplande Noordgebouw

4.4 Beoordeling in huidige onderzoek

Om te beoordelen of een situatie voldoet, dient het schema in Figuur 4-2 te worden doorlopen. Een locatie voldoet aan het beoordelingskader wanneer de trillingssterkte lager is dan A1. Een tweede mogelijkheid om te voldoen is als de trillingssterkte lager is dan A2 en de trillingsintensiteit lager is dan A3.



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

4.5 Beoordeling in huidige trillingsonderzoek

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

1. De berekende trillingssituatie wordt beoordeeld op basis van het schema in Figuur 4-2;
2. Wanneer een bepaalde locatie niet voldoet worden mitigerende maatregelen voorgesteld en afgewogen op doelmatigheid.

5 Stap 1 – Metingen

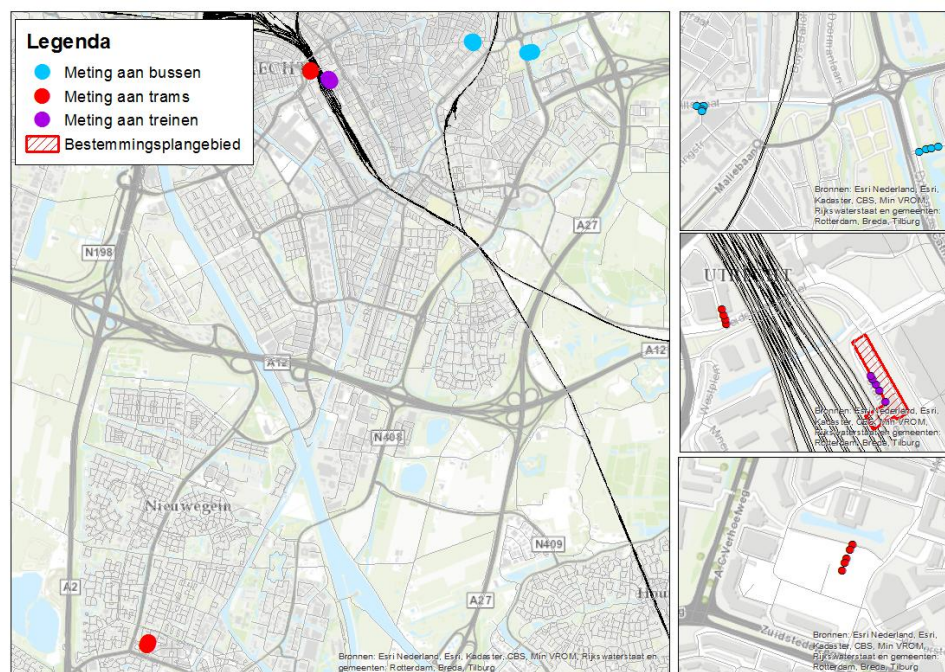
In de eerste stap van het trillingsonderzoek zijn verschillende metingen verricht. In dit hoofdstuk worden de metingen en resultaten nader toegelicht.

5.1 Meetlocaties

Er zijn twee types metingen in dit onderzoek gebruikt:

1. Metingen in gebouwen (uitgevoerd binnen ProRail-onderzoek naar DSSU).
2. Metingen aan trams, bussen en treinen op maaiveld. Deze metingen aan de trams en bussen zijn uitgevoerd binnen dit onderzoek en binnen eerder onderzoek.

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



Figuur 5-1 Overzicht meetlocaties

5.2 Metingen in gebouwen

Binnen dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van een langeduurmeting op de locatie Daalseplein 101. Deze meting wordt hieronder kort toegelicht, overige meetgegevens zijn te vinden in Bijlage II.

Dit gebouw heeft de bestemming *kantoor*, zie Figuur 5-2. Het betreft een betonnen gebouw dat dichtbij het spoor is geplaatst. Deze meting wordt alleen gebruikt om de maaiveldmeting van de treinen aan te vullen met gegevens over een groot aantal goederentreinen, trams en bussen veroorzaken geen significante trillingen op deze locatie.



Figuur 5-2 Gevel Daalseplein 101 (links) en sporenlay-out ten tijde van de metingen (rechts)

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

Ter verificatie zijn in Bijlage III daarnaast de vanuit metingen berekende trillingssterkte en trillingsintensiteit weergegeven voor een groot aantal gebouwen in het stationsgebied van Utrecht Centraal. De gebouwen zijn geen van alle een op een vergelijkbaar met het geplande Noordgebouw, maar geven wel een indicatie van de trillingssterkte en trillingsintensiteit in bestaande gebouwen.

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 ter plaatse van het bestemmingsplangebied;
3. Maaiveldmetingen aan trampassages, uitgevoerd binnen het huidige onderzoek en binnen eerdere onderzoeken;
4. Maaiveldmetingen aan buspassages, uitgevoerd binnen het huidige onderzoek en binnen eerdere onderzoeken.

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 schuifgolf) bepaald worden. De schuifgolf is de dominante trillingsgolf.

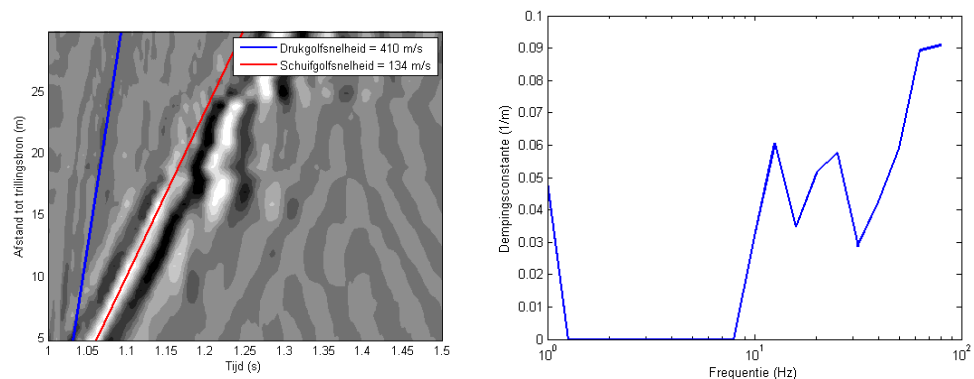
Als kunstmatige trillingsbron is gebruik gemaakt van een kleine heistelling met een valgewicht van 600 kg, zie Figuur 5-3. Het valgewicht valt binnen een stalen buis naar beneden op een staalplaat, waarbij de buis dient als geleiding van het valgewicht. De staalplaat is 1.25m x 1.25m en dient om de belasting van het valgewicht te spreiden op de bodem. De valhoogte bedroeg 0.5 of 1.0 meter.



Figuur 5-3 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 die het meest dichtbij de huidige locatie is uitgevoerd, ter plaatse van de Wolfstraat, zijn weergegeven in Figuur 5-4. Deze gegevens zijn gebruikt in VibraDyna.



Figuur 5-4 Golfsnelheden (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 op twee locaties waar de tram op een betonplaat reed, een constructie die zo goed mogelijk vergelijkbaar is met de constructie ter plaatse van het Noordgebouw. Voor verschillen in de constructie wordt gecorrigeerd.

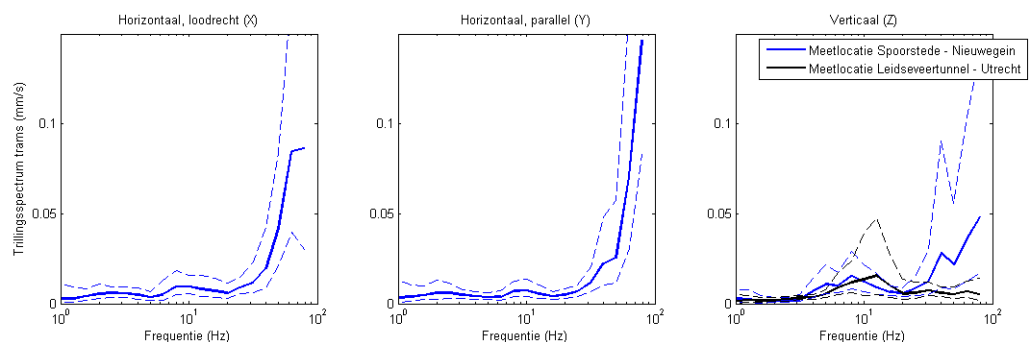
De metingen zijn uitgevoerd op de volgende twee locaties:

- Spoorstede in Nieuwegein. De rijnsnelheid van de trams bedraagt hier maximaal 40 km/h, vergelijkbaar aan de rijnsnelheid bij het Noordgebouw. De bodem is wel slapper op deze locatie, zodat de trillingen sneller zijn uitgedempt. In het rekenmodel wordt gecorrigeerd voor verschillen in spoorconstructie en

bodemopbouw;

- Lange Hagelstraat in Utrecht. Deze locatie bevindt zich bij de Leidseveertunnel, in de nabijheid van het bestemmingsplangebied. In het rekenmodel wordt gecorrigeerd voor verschillen in spoorconstructie.

Door per trampassage het tertsbandspectrum van de trillingen en de bijbehorende snelheid te registreren, is per locatie een gemiddeld tertsbandspectrum vastgesteld. Het in het rekenmodel gebruikte spectrum is weergegeven in Figuur 5-5 voor de huidige trams op beide meetlocaties. Vooral hoogfrequent is er een verschil zichtbaar tussen beide meetlocaties, dit komt vooral door de andere eigenfrequentie van de betonplaat bij de Leidseveertunnel en verschillen in bodemopbouw.



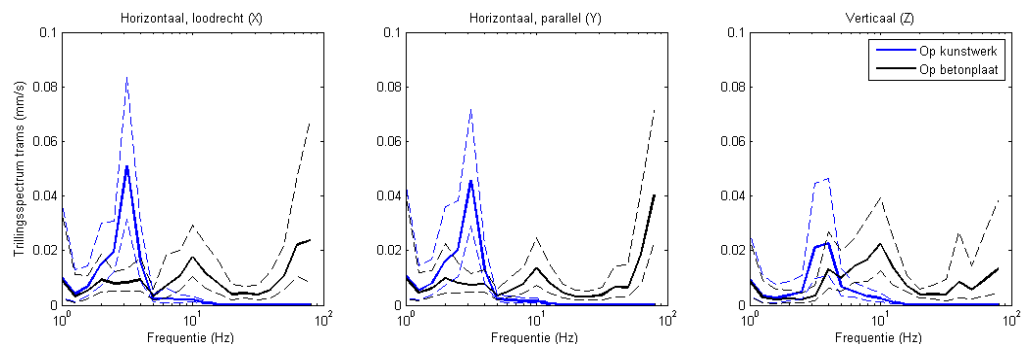
Figuur 5-5 Tertsbandspectra voor trams op 5 meter vanaf hart rijlijn (gemiddelde (doorgetrokken lijn) en 95 procent betrouwbaarheidsinterval (gestippelde lijnen))

Om de meetresultaten te kunnen gebruiken wordt zowel voor spoorconstructie, bodemverschillen (alleen de metingen in Nieuwegein) en tramtype gecorrigeerd. De correctiefactoren zijn als volgt bepaald:

- De correctiefactor voor de bodem is bepaald op basis van de maaiveldmetingen bij zowel het Noordgebouw als in Nieuwegein;
- De correctie voor tramtype is bepaald met behulp van een modelberekening, gebaseerd op de metingen aan de SUNIJ-trams en de verschillen in trameigenschappen³;
- De correctie voor spoorconstructie is bepaald op basis van de dynamische eigenschappen van de spoorconstructies in Nieuwegein, bij de Leidseveertunnel en bij het Noordgebouw in de toekomstige situatie. De eigenfrequenties van de constructies zijn bepaald aan de hand van tekeningen en de uitgevoerde metingen.

De trillingssignalen van de trams op het kunstwerk bij het Noordgebouw en op de betonplaat zijn weergegeven in Figuur 5-6. De verschillen tussen beide constructies zijn duidelijk zichtbaar. Door de vrij lage eigenfrequentie van de bruggdelen van het kunstwerk is er een piek rond 3 tot 5 Hz zichtbaar voor de trams op het kunstwerk, op de betonplaat zijn, door de hogere eigenfrequentie van de constructie, juist de hogerfrequente trillingen hoger.

³ 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.



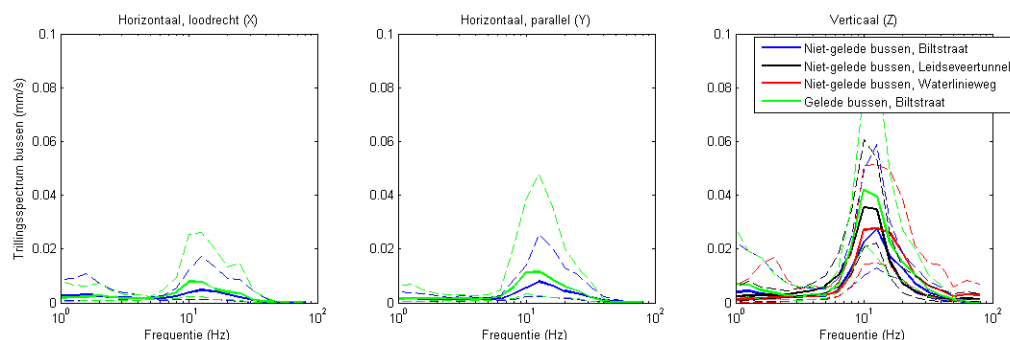
Figuur 5-6 Tertsbandspectra voor trams bij Noordgebouw op 5 meter vanaf hart rijlijn (gemiddelde (doorgetrokken lijn) en 95 procent betrouwbaarheidsinterval (gestippelde lijnen))

5.3.3. Buspassages

Naast de metingen aan trampassages zijn ook maaiveldmetingen uitgevoerd naar de passages van bussen. Deze metingen zijn uitgevoerd op drie locaties:

- Waterlinieweg in Utrecht. De bodem is op deze locatie slapper dan bij het Noordgebouw, zodat de trillingen sneller zijn uitgedempt. In het rekenmodel wordt gecorrigeerd voor verschillen in de constructie en bodemopbouw;
- Lange Hagelstraat in Utrecht. Deze locatie bevindt zich bij de Leidseveertunnel, in de nabijheid van het bestemmingsplangebied. In het rekenmodel wordt gecorrigeerd voor verschillen in spoorconstructie, de bodemopbouw is op beide locaties vergelijkbaar;
- Biltstraat in Utrecht. Ook hier is de bodem wat slapper dan in het bestemmingsplangebied van het Noordgebouw. In het rekenmodel wordt gecorrigeerd voor verschillen in de constructie en bodemopbouw.

Door per buspassage het tertsbandspectrum van de trillingen en de bijbehorende snelheid te registreren, is per locatie een gemiddeld tertsbandspectrum vastgesteld, zie Figuur 5-7.

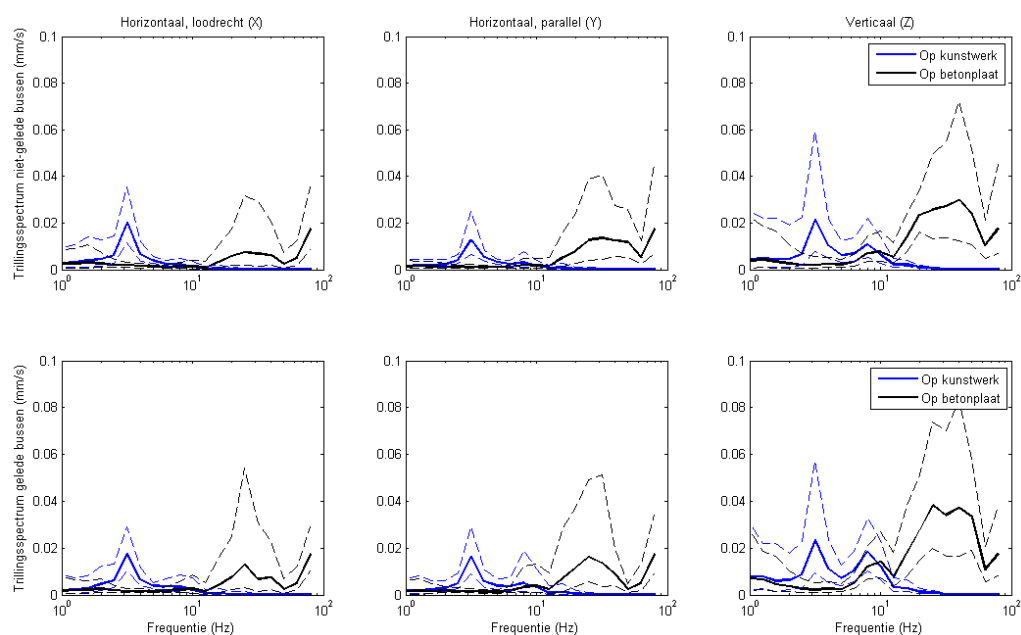


Figuur 5-7 Tertsbandspectra voor bussen op 5 meter vanaf hart rijlijn (gemiddelde (doorgetrokken lijn) en 95 procent betrouwbaarheidsinterval (gestippelde lijnen))

Om de meetresultaten te kunnen gebruiken wordt gecorrigeerd voor de constructieverschillen tussen de busbanen bij de Biltstraat, Lange Hagelstraat en Waterlinieweg ten opzichte van het kunstwerk en de betonplaat bij het Noordgebouw. De eigenfrequenties van de constructies zijn bepaald aan de hand van tekeningen en de uitgevoerde metingen.

In de berekeningen is uitgegaan van een voegovergang zonder trillingsreducerende eigenschappen ter plaatse van de poeren in het dek van het kunstwerk. Dit is een worst-case uitgangspunt, bij een goede voegconstructie kunnen aanzienlijk lagere trillingssterktes worden behaald.

De trillingssignalen van de bussen op het kunstwerk bij het Noordgebouw en op de betonplaat zijn weergegeven in Figuur 5-6. De verschillen tussen beide constructies zijn duidelijk zichtbaar. Door de vrij lage eigenfrequentie van de bruggdelen van het kunstwerk is er een piek rond 3 tot 5 Hz zichtbaar voor de bussen op het kunstwerk, en in verticale richting daarnaast rond de 8 Hz. Deze piek wordt vooral door de voegconstructie veroorzaakt. Op de betonplaat zijn vooral de hogere frequenties van het trillingsspectrum zichtbaar, door de hogere eigenfrequentie van deze betonplaat.



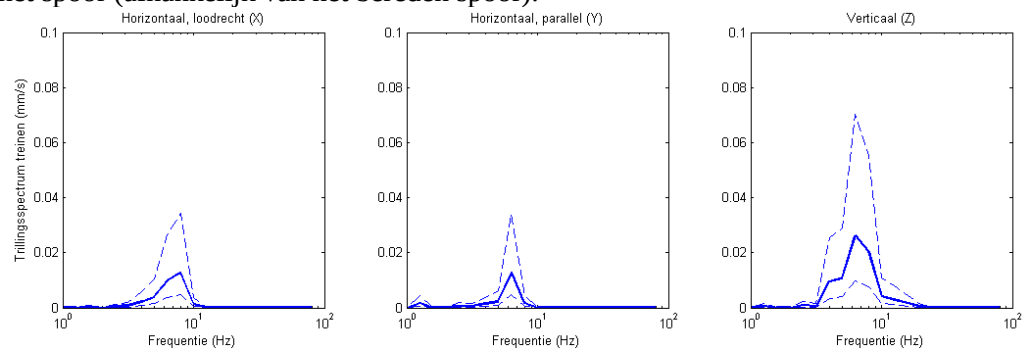
Figuur 5-8 Tertsbandspectra voor bussen bij Noordgebouw op 5 meter vanaf hart rijlijn (gemiddelde (doorgetrokken lijn) en 95 procent betrouwbaarheidsinterval (gestippelde lijnen))

5.3.4. Treinpassages

Er zijn maaiveldmetingen uitgevoerd gedurende een weekend aan treinpassages in het bestemmingsplangebied, op maaiveld. De trillingen van reizigerstreinen zijn niet meetbaar op deze locatie door de grote afstand tot het spoor en de lage snelheid van de treinen, omdat deze stoppen op station Utrecht Centraal. In het gedeelte van het Noordgebouw dat zich boven de reizigerssporen bevindt zullen de trillingen van reizigerstreinen wel meetbaar zijn, maar dit gebouwdeel heeft de bestemming *retail*, dit is geen trillingsgevoelige fundering en wordt daarom buiten beschouwing gelaten.

Gedurende het weekend zijn alle goederentreinpassage het tertsbandspectrum van de trillingen en de bijbehorende snelheid te registreren, is een gemiddeld tertsbandspectrum vastgesteld. Vervolgens is met behulp van de langeduurmeting bij Daalseplein 101 de bandbreedte voor de trillingsspectra voor de goederentreinen vastgesteld. De spectra zijn weergegeven in Figuur 5-9. In afwijking van de andere spectra (die allemaal op 5 meter afstand zijn weergegeven), zijn deze trillingsspectra

weergegeven ter plaatse van het Noordgebouw, dus op ongeveer 70 tot 90 meter van het spoor (afhankelijk van het bereden spoor).



Figuur 5-9 Tertsbandspectra voor goederentreinen op maaiveld ter plaatse van het Noordgebouw (gemiddelde (doorgetrokken lijn) en 95 procent betrouwbaarheidsinterval (gestippelde lijnen))

6 Stap 2 – Modelberekeningen

6.1 Inleiding

In de tweede stap van het trillingsonderzoek wordt voor de verschillende situaties de trillingssterkte bepaald in het bestemmingsplangebied. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het rekenmodel *VibraDyna*, zie Bijlage I en de metingen zoals beschreven in het voorgaande hoofdstuk 5.

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}) voor zowel maaiveld, fundering als midden vloerveld;
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.

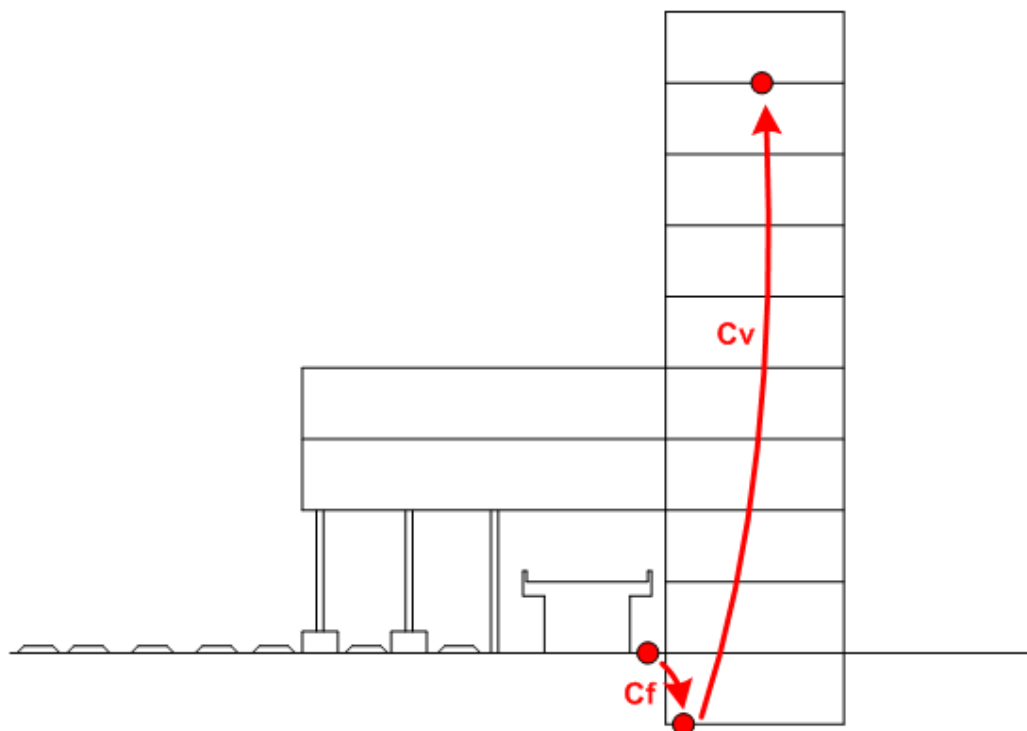
In het huidige onderzoek spelen een aantal onzekerheden een rol die de uitkomst van dit onderzoek beïnvloeden. Grofweg kan gesteld worden dat twee parameters de onzekerheid van de uitkomst beïnvloeden:

- De constructie van het kunstwerk waarop de trams en bussen rijden voor, onder meer de voegovergangen tussen de kunstwerkdelen en de overdracht van de poeren naar de fundering van het gebouw zijn onzeker. Door de korte afstand tussen gebouw en fundatie kan alleen met een gedetailleerd eindige elementen model de werkelijke overdracht worden vastgesteld. In de huidige berekeningen is hier conservatief gerekend;
- De constructie van het Noordgebouw. In Figuur 6-1 is een schematische doorsnede van het Noordgebouw weergegeven (niet op schaal, niet-realistisch). De trillingen op maaiveld worden via de fundering van het Noordgebouw (pijl C_f) doorgegeven naar het midden van de vloer van de verdiepingen (pijl C_v). Doorgaans geldt dat hoe hoger in het gebouw, hoe groter de trillingen zijn.

De overdracht C_f is voor grote gebouwen redelijk vergelijkbaar, en is voor dit onderzoek gebaseerd op diverse metingen in grote gebouwen en de richtlijnen van het voormalige ministerie van VROM⁴. De trillingen worden verzwakt bij de overgang van maaiveld naar fundering.

De overdracht C_v is gebouwspecifiek en kan voor het huidige gebouw alleen vastgesteld worden met behulp van eindige elementen berekeningen. Voor de horizontale overdracht is aan de hand van metingen in vergelijkbare gebouwen een meest waarschijnlijke overdracht vastgesteld, de verticale overdracht is sterk afhankelijk van het type vloeren, de vloeroverspanning, de vloerdikte en het gebruikte materiaal. Gezien de afmetingen van het gebouw is een eigenfrequentie van de vloer van rond de 5 Hz te verwachten, wanneer niet gekozen wordt voor tussensteunpunten. In de berekeningen is dit als uitgangspunt gekozen.

⁴ Staalduinen, ir. P.C. van en ir. P.H. Waarts, *Rekenmodel voor de bepaling van trillingssterkte*, VROM, mei 1995



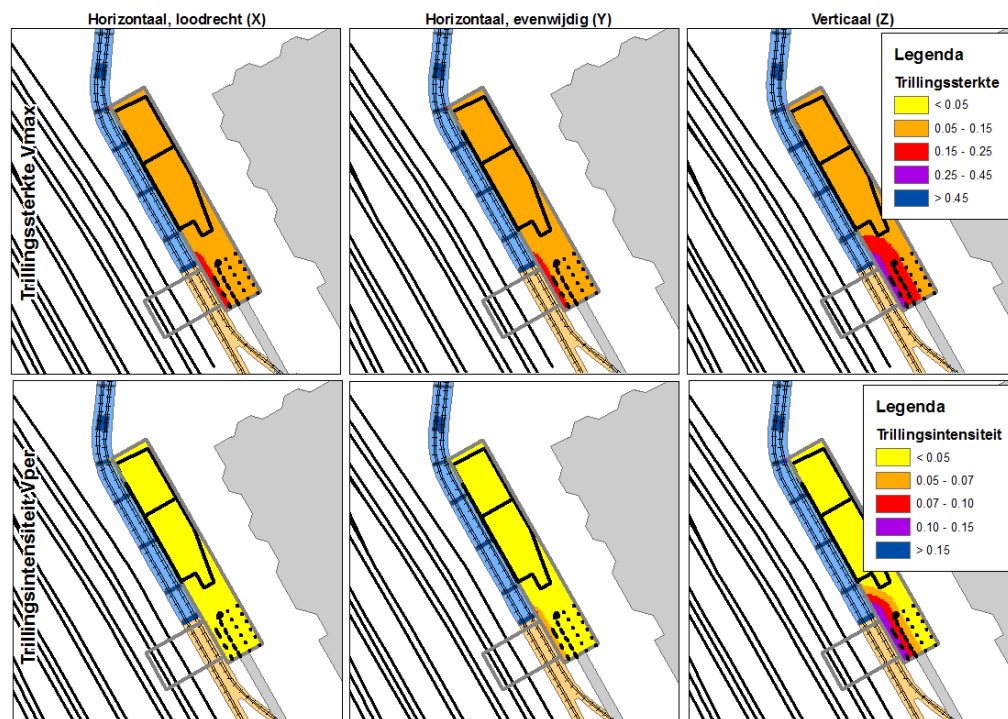
Figuur 6-1 Overdracht van trillingen tussen maaiveld en midden vloerveld

Met behulp van VibraDyna is voor alle posities op maaiveld, de fundering en op de hoogste verdieping de trillingssterkte V_{max} , bepaald conform de SBR B-richtlijn, en de trillingsintensiteit V_{per} , bepaald. In Figuur 6-2 tot en met Figuur 6-7 is de trillingssterkte en de trillingsintensiteit op maaiveld, midden vloerveld en op de fundering weergegeven voor de situatie in 2020 conform het vastgestelde tracébesluit *Sporen in Utrecht* en conform het ontwerp-tracébesluit *Doorstroomstation Utrecht*.

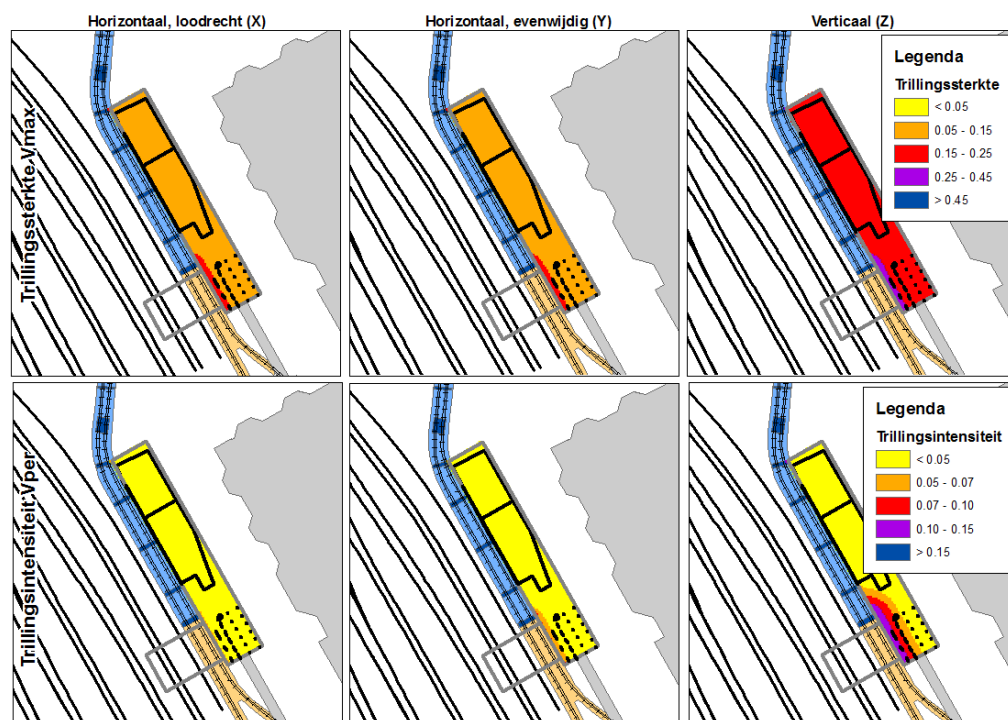
In Tabel 6-1 is aangegeven wanneer (bij welke maximale trillingssterkte V_{max} en trillingsintensiteit V_{per}) wordt voldaan aan de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn.

Tabel 6-1 Streefwaarden en kleurcodering bij voldoen aan SBR B-richtlijn

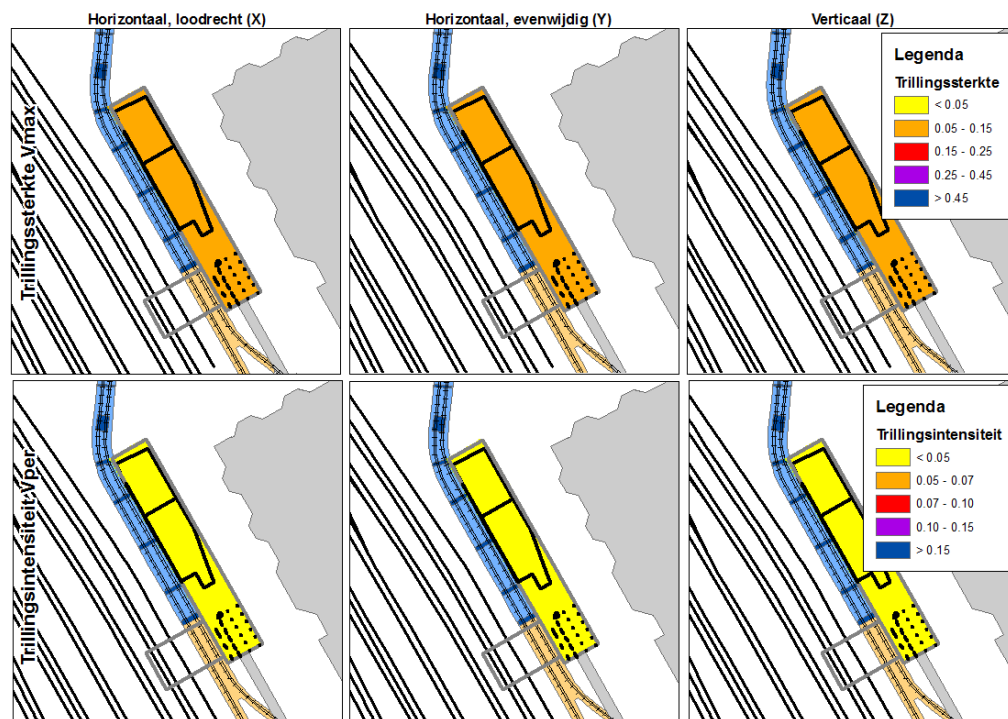
Gebouwfunctie	V_{max}	V_{per}
Wonen	0.2	0.05
Kantoor	0.6	0.07



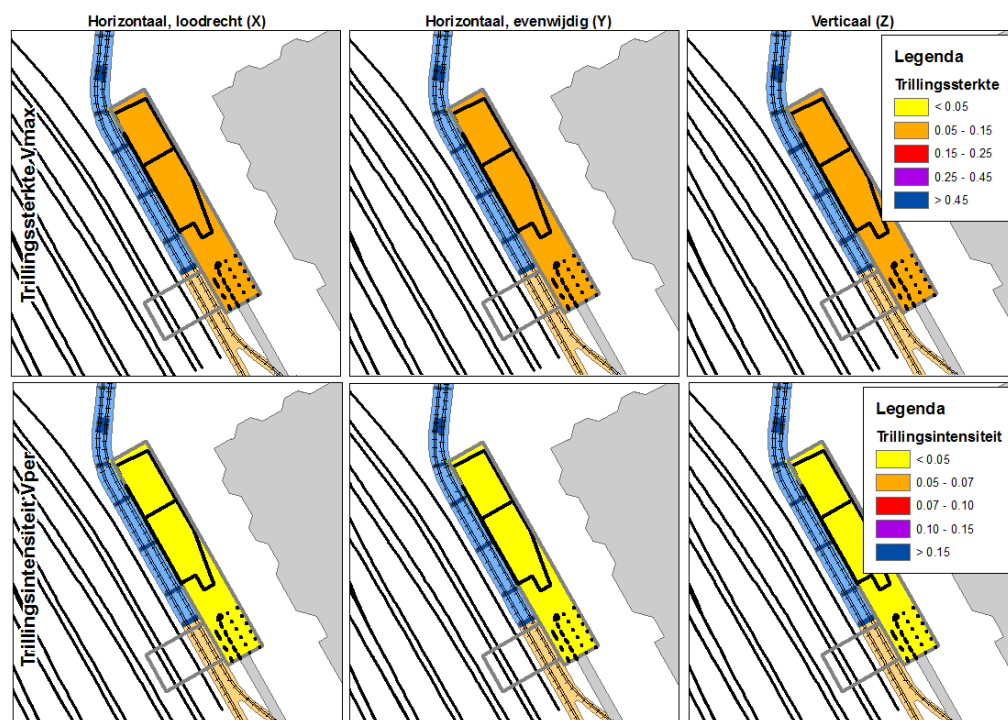
Figuur 6-2 Trillingssituatie op maaiveld in 2020, conform tracébesluit Sporen in Utrecht



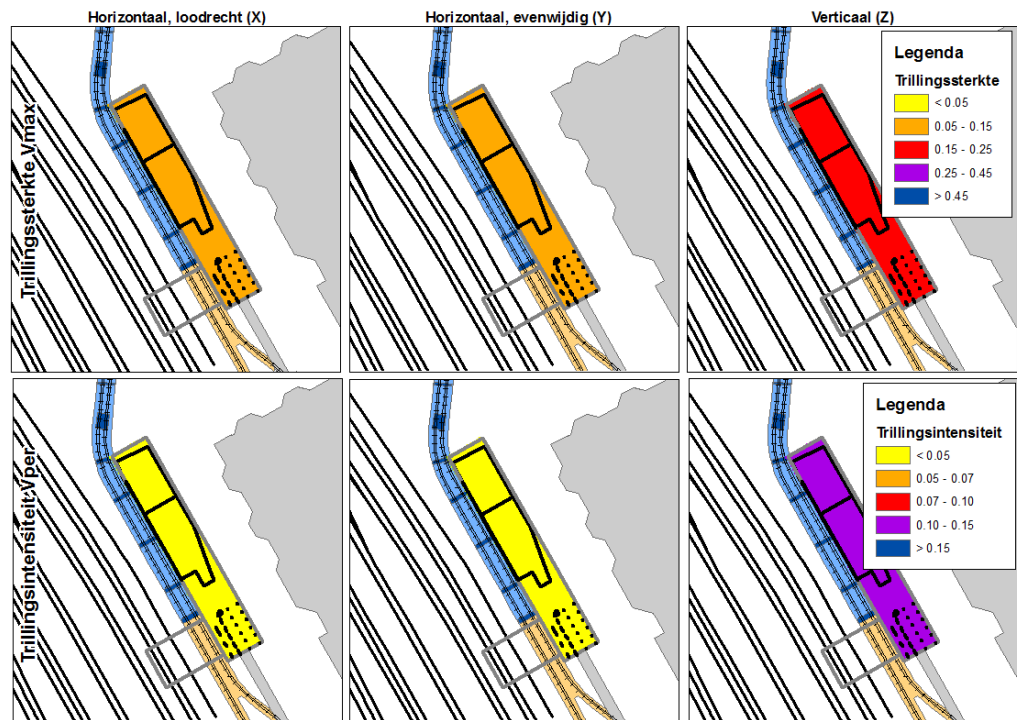
Figuur 6-3 Trillingssituatie op maaiveld in 2020, conform ontwerp-tracébesluit Doorstroomstation Utrecht



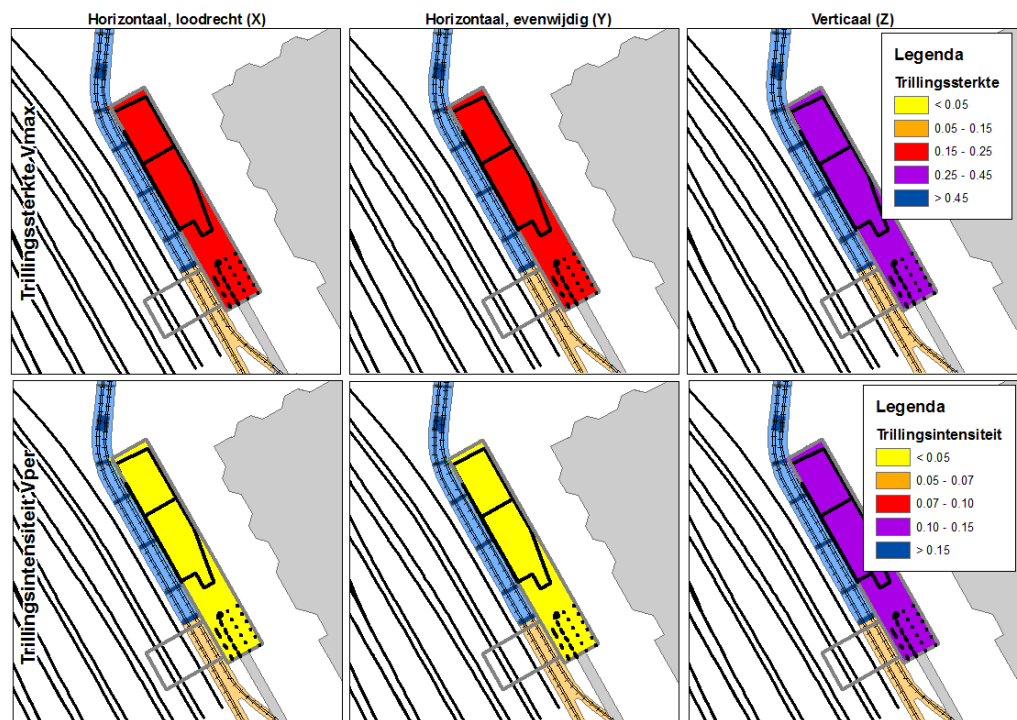
Figuur 6-4 Trillingssituatie op funderingsniveau in 2020, conform tracébesluit Sporen in Utrecht



Figuur 6-5 Trillingssituatie op funderingsniveau in 2020, conform ontwerp-tracébesluit Doorstroomstation Utrecht



Figuur 6-6 Trillingssituatie op vloerniveau in 2020, conform tracébesluit Sporen in Utrecht



Figuur 6-7 Trillingssituatie op vloerniveau in 2020, conform ontwerp-tracébesluit Doorstroomstation Utrecht

De conclusies van het onderzoek zijn weergegeven in Tabel 6-2. Overschrijdingen van de SBR B-richtlijn voor de gebouwfunctie *wonen* zijn oranje gearceerd.

Tabel 6-2 Samenvatting resultaten trillingsonderzoek bij gebouwfunctie *wonen*

Situatie	Trillingssterkte $V_{\max}$		Trillingsintensiteit V_{per}	
	Fundering	Vloer	Fundering	Vloer
2020 – Sporen in Utrecht	0.10	0.23	0.02	0.13
2020 – Doorstroomstation Utrecht	0.12	0.34	0.02	0.12

Uit het onderzoek volgt dat er alleen in verticale richting overschrijdingen worden verwacht van de SBR B-richtlijn. De hoogste trillingssterktes worden veroorzaakt door goederentreinen, de hoge trillingsintensiteit is te wijten aan de trams, maar met name aan de bussen.

Ook bij beoordeling voor gebouwfunctie *kantoor* worden overschrijdingen verwacht. De trillingsintensiteit V_{per} is naar verwachting hoger dan de streefwaarde van 0.07. De overschrijding van de trillingsintensiteit wordt vooral veroorzaakt door de passage van bussen en trams.

Op basis van het trillingsonderzoek wordt het volgende geadviseerd:

1. De voegovergangen in het kunstwerk dragen in belangrijke mate bij aan de verwachte trillingen in het Noordgebouw. Het optimaliseren van deze voegen kan de trillingssituatie in het Noordgebouw sterk verbeteren. Dit kunstwerk valt echter buiten het bestemmingsplangebied. Mogelijk is hier nog wel een optimalisatie mogelijk in overleg met de aannemer die het kunstwerk realiseert;
2. Gezien de zeer korte afstand tussen de geplande gecombineerde tram- en busbaan en het Noordgebouw, wordt geadviseerd om met behulp van een Eindige Elementen Model nader onderzoek te doen naar hoe de trillingen van de tram- en busbaan worden overgedragen van het kunstwerk naar het gebouw. Op dergelijke korte afstanden kunnen de trillingen zich sterk afwijkend gedragen van een normaal patroon. Om trillingsproblematiek na realisatie te voorkomen, dient de exacte overdracht tussen kunstwerk en Noordgebouw te worden vastgesteld;

Wanneer na nader onderzoek nog steeds een overschrijding van het beoordelingskader wordt verwacht, dienen maatregelen te worden afgewogen. Een omschrijving van de mogelijke maatregelen is weergegeven in hoofdstuk 7.

7 Stap 3 – Onderzoek naar maatregelen

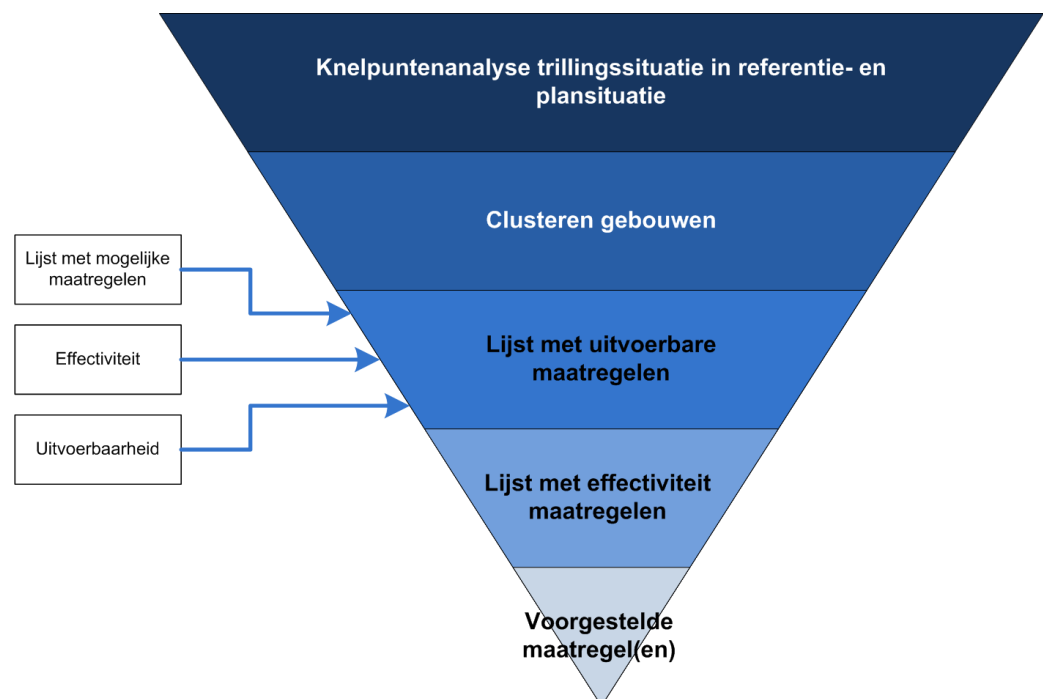
Op basis van de resultaten van het trillingsonderzoek zijn overschrijdingen van de SBR B-richtlijn niet uit te sluiten in het bestemmingsplangebied. Daarom wordt een indicatief maatregelenonderzoek uitgevoerd. In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de mogelijke maatregelen, alsmede een advies voor vervolgonderzoek naar maatregelen.

Uit het trillingsonderzoek volgt dat zowel trams, bussen als goederentreinen voor overschrijdingen van het beoordelingskader, de SBR B-richtlijn, kunnen zorgen.

In dit hoofdstuk wordt eerst een korte uiteenzetting gegeven van de mogelijke maatregelen, vervolgens wordt het selectieproces van de maatregelen toegelicht. Voor locaties waar de hinder ten gevolge van trillingen of laagfrequent geluid significant toeneemt, worden maatregelen afgewogen.

7.1 Methodiek

De keuze voor een bepaalde trillingsmaatregel bestaat uit een aantal stappen. Deze stappen zijn schematisch weergegeven in Figuur 7-1.



Figuur 7-1 Stappenplan voor maatregelenonderzoek

De volgende stappen worden genomen in een maatregelenonderzoek:

1. Knelpuntenanalyse: het bepalen van de situatie per gebouw ten aanzien van trillingen en laagfrequent geluid. Hiervoor wordt de trillingssterkte V_{max} en de trillingsintensiteit V_{per} bepaald in de toekomstige situatie. Deze stap is beschreven in hoofdstuk 6;
2. Clustering van gebouwen: deze stap wordt in dit onderzoek overgeslagen, omdat het maar om een gebouw gaat;
3. Overzicht van voorhanden maatregelen uitkiezen. Afwegen of een maatregel

wel of niet mogelijk is (ruimtetechnisch, fysieke obstakels en effectiviteit) op basis van expert judgment. Resultaat is een lijst met uitvoerbare maatregelen;

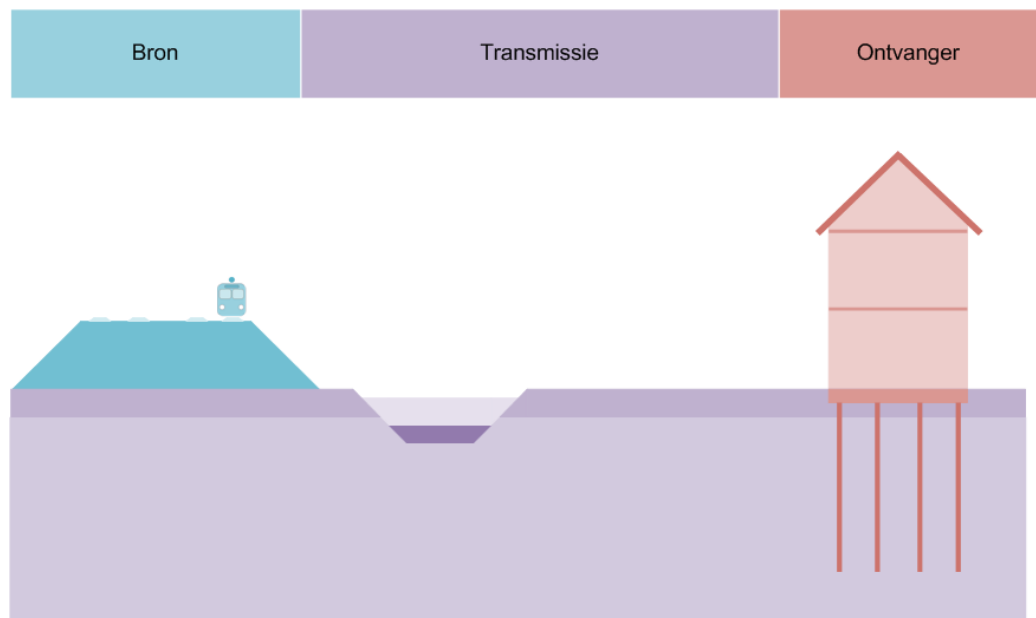
4. Doorrekenen van uitvoerbare maatregelen. Per maatregel wordt het aantal gehinderden bepaald in de plansituatie met maatregel. Resultaat is een lijst met daarin de uitvoerbare maatregelen en de bijbehorende effectiviteit;
5. Uit de lijst met effectieve maatregelen wordt aangegeven welke maatregel(en), op basis van de inpasbaarheid, het effect op de omgeving en de effectiviteit ten aanzien van hinderreductie, in de variantenafweging worden opgenomen.

7.2 Mogelijke maatregelen

Trillingen ten gevolge van trein-, tram- en busverkeer kunnen op drie posities worden gereduceerd:

1. Bij de bron (voertuigen of (spoor)constructie);
2. Tussen de bron en de ontvanger (in de bodem);
3. Bij de ontvanger (gebouw).

Deze drie posities zijn schematisch weergegeven in Figuur 7-2.



Figuur 7-2 Schematisch overzicht spoorsysteem (hier getoond voor treinen)

Bij het zoeken naar mogelijkheden voor het reduceren van de trillingen dient de beschouwing van mogelijke reductieopties bij voorkeur in de hieronder opgenomen volgorde te worden uitgevoerd:

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

In de praktijk is het reduceren van trillingen zeer moeilijk. De effectiviteit van een

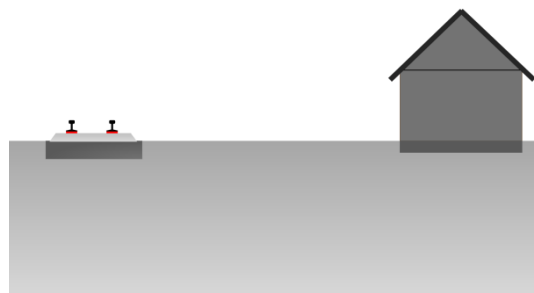
maatregel hangt af van een groot aantal factoren. Maatregelen die op de ene locatie effectief zijn, kunnen op een andere locatie de trillingssterkte niet of veel minder reduceren. Het uitvoeren van een maatregelenonderzoek dient daarom altijd locatiespecifiek plaats te vinden.

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

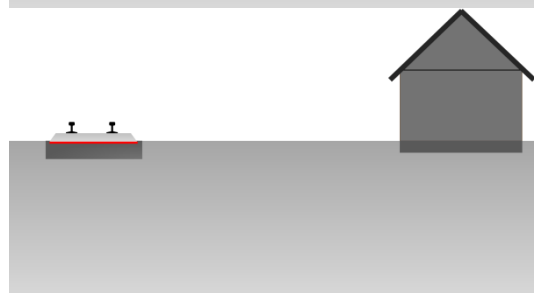
7.2.1. *Mogelijke maatregelen aan de bron*

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

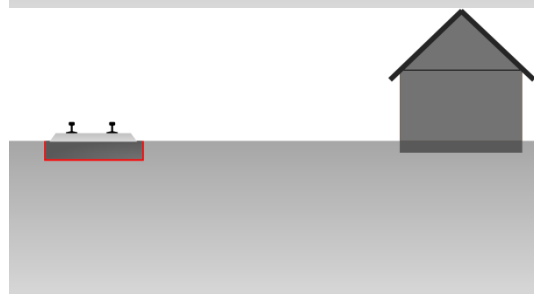
Railpads, een verende constructie tussen spoorstaaf en dwarsligger. Deze maatregel heeft pas effect bij frequenties boven de 40 Hz en is daardoor vooral bij de tram- en busbaan op de betonplaat effectief, op het kunstwerk en voor de treinen is het reducerend effect beperkt.



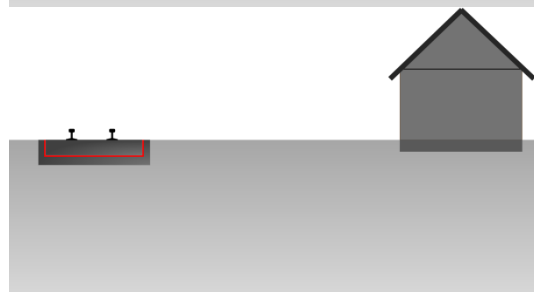
Under sleeper pads, een verende constructie tussen dwarsligger en ballast of betonplaat. Deze maatregel heeft effect bij frequenties boven de 25 Hz, hiervoor geldt hetzelfde als bij railpads, namelijk een beperkte effectiviteit op het kunstwerk en voor de treinen.



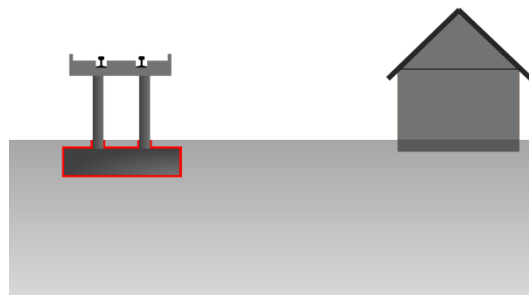
Ballastmatten, een verende constructie onder het ballast. Deze maatregel heeft effect bij frequenties boven de 20 Hz. Ook hier geldt de te beperkte effectiviteit bij lage frequenties als een nadeel.



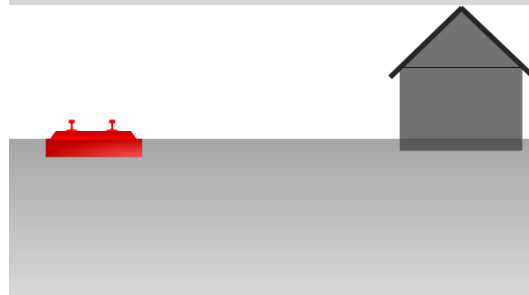
Floating slab track, een verende oplegging van het gehele spoorstelsel. Deze maatregel heeft effect bij frequenties boven de 5 Hz, en wordt regelmatig toegepast in binnen- en buitenland om de trillingen van tram- en metroverkeer te reduceren. Het effect op de reductie van de trillingen van goederentreinen is beperkt.



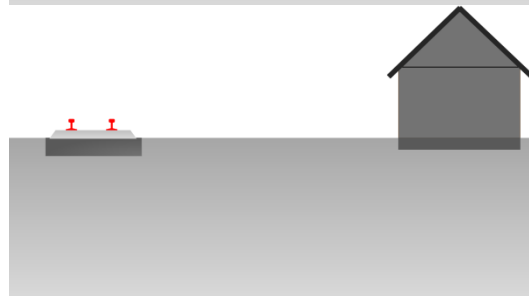
Inpakken kunstwerk, hierbij wordt de betonplaat of worden de poeren van het kunstwerk ingepakt met een isolerend materiaal. Ook bij de oplegblokken van het kunstwerk kan een trillingsdempend materiaal. Ook voor deze maatregel geldt dat deze vooral effectief is boven de 10 Hz.



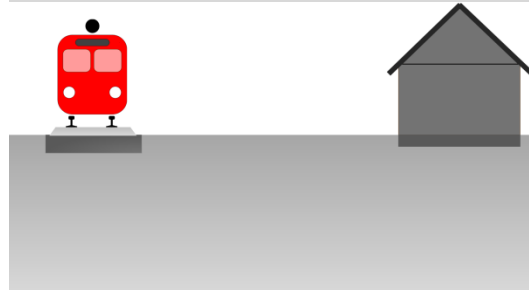
Aanpassing spoorconstructie, door de stijfheid of massa van de dwarsliggers of de betonnen plaat aan te passen (grotere stijfheid, grotere massa etc.) kunnen de trillingen worden gereduceerd. Deze maatregelen hebben effect bij frequenties boven de 8 Hz.



Aanpassing spoorligging, bijvoorbeeld door het verplaatsen van wissels of het optimaliseren van de voegconstructie in het kunstwerk. Gezien de grote afstand tot de wissels in de treinsporen is het effect van deze wissels beperkt. Het optimaliseren van de voegconstructie in het kunstwerk kan de trillingssituatie wel aanzienlijk verbeteren.



Aanpassing aan voertuigen, bijvoorbeeld door het reduceren van de snelheid of beter toezicht op de kwaliteit van het materieel.

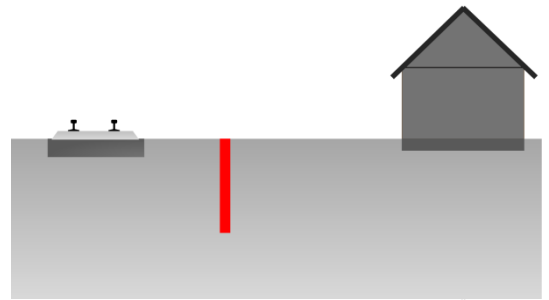


7.2.2. Mogelijke maatregelen aan de transmissie

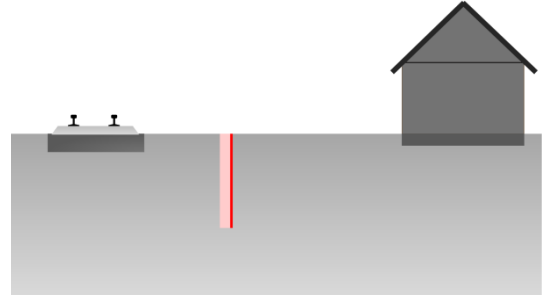
Bij maatregelen aan de transmissie of de overdracht kan reductie van trillingshinder worden bereikt door de trillingen te absorberen of te reflecteren. Absorptie van trillingen is praktisch vrijwel niet uitvoerbaar, reflectie van trillingen kan worden bereikt door het introduceren van een fysieke barrière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

Mogelijke transmissiemaatregelen zijn onder meer:

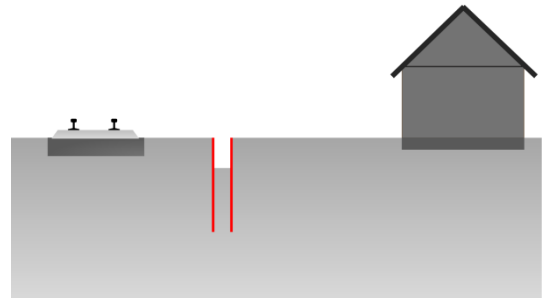
Ondergrondse trillingsreducerende constructie (OTC), bijvoorbeeld van beton of EPS. Een dergelijke constructie kan de trillingen absorberen (bij een zware constructie) en reflecteren, waardoor er een barrière ontstaat tussen bron en ontvanger. Niet inpasbaar voor tram- en busverkeer op deze locatie.



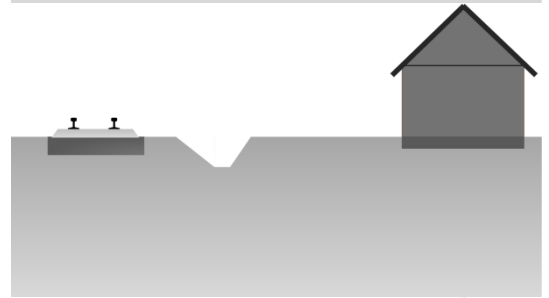
Beklede ondergrondse trillingsreducerende constructie (beklede OTC), waarbij de barrière wordt voorzien van een extra laag slap materiaal, bijvoorbeeld rubber, om een extra impedantiesprong te creëren. Deze maatregel heeft doorgaans meer effect dan een niet-beklede barrière. Niet inpasbaar voor tram-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



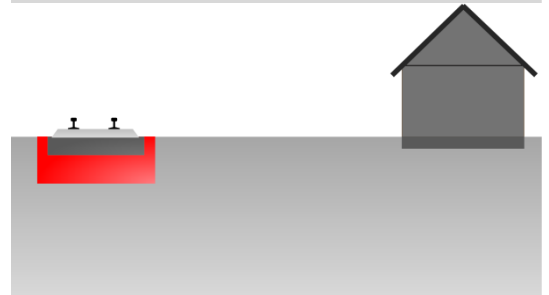
Toepassen van een sleuf tussen twee damwanden, bij deze constructie wordt een smalle sloot gerealiseerd tussen twee damwanden. De verschillende materialen zorgen voor impedantiesprongen, waardoor reflectie van de trillinggolven optreedt. Niet inpasbaar voor tram- en busverkeer op deze locatie.



Sloot, hierbij wordt een fysieke onderbreking gecreëerd in het pad van de trillingen tussen bron en ontvanger. Niet inpasbaar voor tram- en busverkeer op deze locatie.



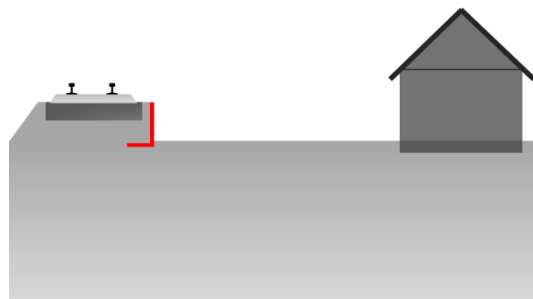
Aanpassen van de bodem onder het spoor, bijvoorbeeld door het toepassen van grondverbetering of het realiseren van een zettingsvrije plaat (onderheide betonnen plaat). Niet inpasbaar voor tram- en busverkeer op deze locatie.



7.2.3. *Mogelijke maatregelen aan de ontvanger*

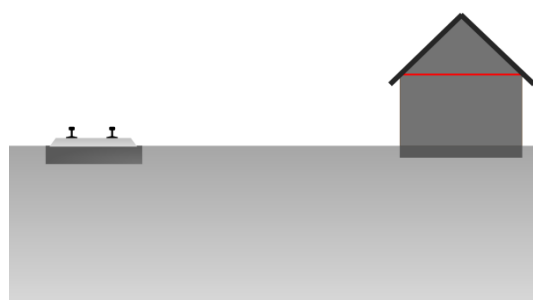
Aanpassen van het spoortalud,

bijvoorbeeld door het realiseren van een betonnen L-wand of het toepassen van geogrids. Metro's op een verhoogd talud geven doorgaans minder trillingen dan voertuigen die op maaiveld rijden. Niet inpasbaar voor tram- en busverkeer op deze locatie.

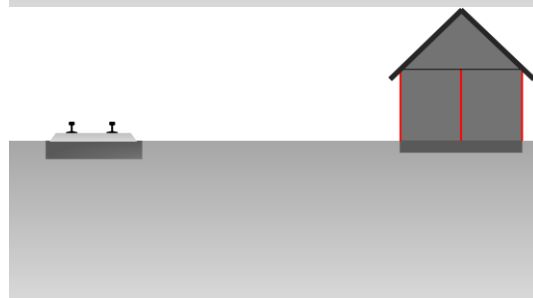


De laatste categorie maatregelen zijn maatregelen aan de ontvanger, aan de bebouwing. De volgende maatregelen zijn mogelijk:

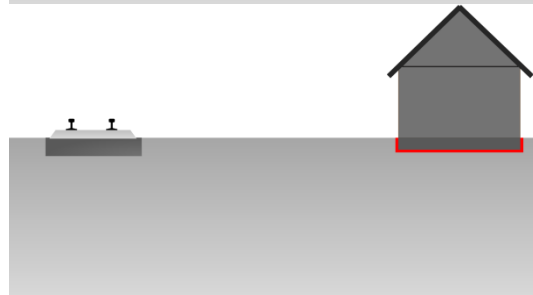
Optimalisatie van vloeren, waarbij de vloeren worden geoptimaliseerd op basis van de verwachte trillingen. Uit het onderzoek blijkt dat een eigenfrequentie van de vloer van meer dan 15 Hz dient te worden gerealiseerd.



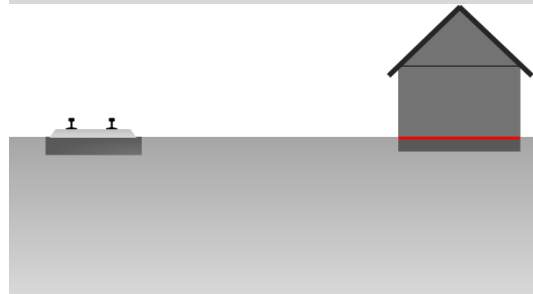
Verstijven van muren, hierbij worden niet-constructieve binnenmuren vervangen door constructieve binnenmuren (bijv. van metselwerk of een rigide stalen frame, verbonden aan de hoofddraagconstructie), of worden buitenmuren verstevigd. Doel is om de horizontale eigenfrequentie van een gebouw te verhogen.



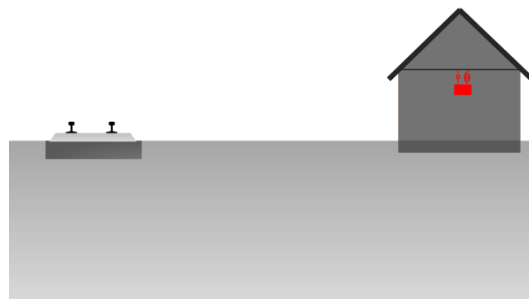
Inpakken van de fundering, vooral bij gebouwen die op staal zijn gefundeerd. Hierbij wordt de fundering ingepakt in een dempend materiaal, bijvoorbeeld rubber. Deze maatregel heeft vooral effect bij hogere frequenties.



Afveren van gebouw, vooral bij nieuwe gebouwen. Hierbij wordt het gebouw gescheiden van de fundering door een verenpakket. Deze is zeer effectief, en heeft al effect voor lage frequenties (vanaf ca. 4 Hz).



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



7.3 Locaties voor maatregelen

Uit het onderzoek blijkt dat er alleen in verticale richting overschrijdingen van het beoordelingskader worden verwacht. De hoogste trillingssterktes worden veroorzaakt door goederentreinen. De trams en met name de bussen daarentegen zorgen voor een hoge trillingsintensiteit, doordat er een groot aantal bussen passeert. Hieruit volgt dat vooral gebouwmaatregelen effectief zullen zijn, omdat zowel bron- als transmissie maatregelen voor zowel de goederentreinen als de trams en bussen effect dienen te hebben.

Bij bronmaatregelen dienen deze te worden genomen aan alle doorgaande treinsporen (om de trillingen van goederentreinen te reduceren) en aan de gehele gecombineerde tram- en busbaan bij het Noordgebouw, dus zowel op de betonplaat als op het kunstwerk.

Transmissie maatregelen zijn niet inpasbaar door de beperkte ruimte tussen het Noordgebouw en het kunstwerk. Transmissie maatregelen tussen het kunstwerk en de treinsporen leiden niet tot voldoende reductie van de trillingen van trams en bussen en zijn daarom onvoldoende effectief. Eventueel kunnen deze in een later stadium, wanneer de eigenschappen van de bebouwing meer vast staan, nog wel in overweging worden genomen.

7.4 Te beschouwen maatregelen

Bij het zoeken naar maatregelen wordt een zoekvolgorde aangehouden: eerst wordt gekeken naar maatregelen aan de bebouwing, omdat deze in het bestemmingsplan stadium doorgaans het meest kosteneffectief zijn te realiseren, en vervolgens naar bronmaatregelen. Zoals aangegeven zijn transmissie maatregelen voor de trams en bussen niet realiseerbaar op deze locatie. Bij het beschouwen van de maatregelen binnen een categorie (bron-, transmissie- of ontvangermaatregelen) hebben goedkopere maatregelen de voorkeur boven duurdere maatregelen.

Bij beschouwing van de trillingsspectra in de bebouwing blijkt dat de meeste trillingen zich in het frequentiegebied van 5 tot 15 Hz bevinden. Op basis daarvan kan een aantal maatregelen als niet-effectief worden omschreven om de trillingshinder te reduceren.

Op basis van deze overwegingen, waarbij de kosten van maatregelen zijn meegenomen, is een prioriteitsvolgorde opgesteld voor het zoeken naar mitigerende maatregelen. Hiervoor zijn de in paragraaf 7.2 genoemde maatregelen nogmaals weergegeven in Tabel 7-1 en gescoord op uitvoerbaarheid en effectiviteit. Op basis van deze parameters en de kosten van de maatregel, is vervolgens een onderzoeksprioriteit toegekend. Een maatregel met lagere kosten heeft hierbij een hogere prioriteit dan een maatregel met lagere kosten.

Tabel 7-1 Overzicht met maatregelen en prioriteitstoekenning

	Uitvoerbaarheid		Effectiviteit		Prioriteit
	Treinen	Trams/bussen	Treinen	Trams/bussen	
Bronmaatregelen					
Railpads	0	+	0	+	4
Under sleeper pads	0		0		
Ballastmatten	0		0		
Floating slab track	-	0	+	+	7
Inpakken kunstwerk		+		+	5
Aanpassing spoorconstructie	-	+	0	+	6
Aanpassing spoorligging	-	+	0	+	3
Snelheidsaanpassing	-	-	+	0	
Transmissiemaatregelen					
OTC	0	-	+	+	8
Beklede OTC	0	-	+	+	10
Sleuf tussen twee damwanden	0	-	+	+	9
Sloot aanleggen	-	-	0	+	
Aanpassen bodem	-		0		
Aanpassen spoortalud					
Ontvangermaatregelen					
Optimalisatie van vloeren	+	+	+	+	2
Verstijven van muren	+	+	0	0	
Inpakken van fundering	+	+	0	0	
Afveren gebouw	+	+	+	+	1
Tuned Mass Damper	+	+	-	-	

Op basis van de resultaten van het trillingsonderzoek is de trillingshinder in het bestemmingsplangebied naar alle waarschijnlijkheid oplosbaar met maatregelen aan de bebouwing. In het voorliggende onderzoek worden daarom alleen maatregelen aan de bebouwing nader beschouwd (nummers 1 en 2 uit Tabel 7-1), alsmede de optimalisatie van de voegovergang in het kunstwerk (nummer 3). In de volgende paragraaf is per maatregel een korte omschrijving van de maatregel opgenomen, alsmede het effect van de maatregel.

7.5 Nader gedetailleerde maatregelen

Deze paragraaf bevat een omschrijving van de nader onderzochte maatregelen, alsmede een indicatie van het effect. De aangehouden volgorde in de volgende subparagrafen is conform de prioriteringsvolgorde uit Tabel 7-1.

7.5.1. Afveren van het gebouw

Bij nieuwe gebouwen is het mogelijk om het gebouw af te veren door middel van aanpassingen aan de fundering. Hierbij wordt de fundering losgekoppeld van de rest van het gebouw, door de toepassing van een verende tussenlaag die kan worden afgeveerd op de gewenste frequentie. Bij gebouwen in een omgeving met veel trillingshinder wordt dit al regelmatig toegepast. Reductie is mogelijk voor frequenties boven de 4 Hz. Hoe lager de afveerfrequentie, hoe groter de effectiviteit van een maatregel doorgaans is. In dit onderzoek wordt daarom een afveerconstructie met de laagst mogelijke eigenfrequentie, van 2 Hz, gebruikt om een indicatie van het effect van het afveren van het gebouw te geven.

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. 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.

Het resultaat van deze maatregel is weergegeven in Tabel 7-2. Zowel de trillingssterkte als de trillingsintensiteit in de situatie met en zonder maatregel is weergegeven. Duidelijk zichtbaar is dat de trillingssterkte (vooral in horizontale richting) toeneemt door deze maatregel, maar de trillingsintensiteit neemt af. Dit komt doordat de maatregel de trillingen van goederentreinen versterkt, terwijl die van de trams en bussen (die de grootste bijdrage leveren aan de trillingsintensiteit) afnemen.

Tabel 7-2 Effect van een afgeveerd gebouw

Eigenfrequentie vloer	Trillingssterkte $V_{\max}$		Trillingsintensiteit V_{per}	
	Referentie	Maatregel	Referentie	Maatregel
2020 – Sporen in Utrecht	0.23	0.26	0.13	0.07
2020 – Doorstroomstation Utrecht	0.34	0.39	0.12	0.07

7.5.2. Verstijven van de vloeren

Omdat er nog geen definitief ontwerp van de constructie is gemaakt, is het ook nog mogelijk om de eigenschappen van de vloeren aan te passen. Op basis van de gebouwafmetingen is in dit onderzoek gerekend met een eigenfrequentie van de vloer van 5 Hz. Als maatregel zijn ook eigenfrequenties van 10 en 15 Hz van de vloeren doorgerekend. Het resultaat van deze maatregelen is weergegeven in Tabel 7-3.

Tabel 7-3 Effect van hogere eigenfrequenties van de vloeren

Eigenfrequentie vloer	Trillingssterkte $V_{\max}$			Trillingsintensiteit V_{per}		
	Referentie	10 Hz	15 Hz	Referentie	10 Hz	15 Hz
2020 – Sporen in Utrecht	0.23	0.44	0.15	0.13	0.22	0.05
2020 – Doorstroomstation Utrecht	0.34	0.44	0.15	0.12	0.22	0.02

Bij deze maatregel valt op dat het verhogen van de eigenfrequentie naar 10 Hz een negatief effect heeft (trillingssterkte en trillingsintensiteit wordt hoger), dit komt vooral doordat de trillingen van de trams en bussen dan meer worden opgeslingerd. Wanneer de eigenfrequentie wordt verhoogd naar 15 Hz, dan zijn er geen overschrijdingen meer van het beoordelingskader. Dergelijke hoge eigenfrequenties voor de vloeren zijn echter lastig realiseerbaar voor gebouwen met de afmetingen van het geplande Noordgebouw. De eigenfrequentie van de vloeren kan worden verhoogd door gebruik te maken van kleine vloeroverspanningen (extra tussensteunpunten gebruiken), het gebruiken van betonvloeren met een hoger traagheidsmoment (grotere dikte, andere doorsnede) of het gebruiken van een stijver materiaal in de vloer.

7.5.3. Aanpassen spoorligging

De derde maatregel die nader beschouwd is, is het optimaliseren van de voegovergang in de kunstwerken. In het huidige onderzoek is conservatief gerekend met een onaangepaste voegovergang. Wanneer deze wordt geoptimaliseerd vanuit trillingsperspectief, nemen de trillingen van de bussen sterk af.

Het resultaat van deze maatregel is weergegeven in Tabel 7-4. Zowel de trillingssterkte als de trillingsintensiteit in de situatie met en zonder maatregel is weergegeven. De trillingssterkte verandert niet door deze maatregel, omdat de hoogste trillingssterkte nog steeds van de goederentreinen afkomstig is. De trillingsintensiteit neemt echter wel fors af en voldoet aan de streefwaarden van de SBR B-richtlijn.

Tabel 7-4 Effect van een geoptimaliseerde voegovergang in het kunstwerk

Eigenfrequentie vloer	Trillingssterkte $V_{\max}$		Trillingsintensiteit V_{per}	
	Referentie	Maatregel	Referentie	Maatregel
2020 – Sporen in Utrecht	0.23	0.23	0.13	0.05
2020 – Doorstroomstation Utrecht	0.34	0.34	0.12	0.05

7.6 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. Maak een dynamisch 3D eindige elementen model van het Noordgebouw, inclusief het gedeelte op de tafelconstructie over de buurtsporen van Utrecht Centraal, en de constructie van de trambaan. Reken dit model door op dynamisch gedrag en optredende trillingen, uitgaande van de gegevens zoals gepresenteerd in het voorliggende onderzoek;

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

2. Minimaliseer de vloeroverspanningen, maximaliseer de vloerdikte en gebruik stijve constructiematerialen (m.a.w., maak de eigenfrequentie van de vloeren zo hoog mogelijk, maar in ieder geval minimaal 15 Hz);
3. Onderzoek in hoeverre het mogelijk is om de voegovergangen in het kunstwerk te optimaliseren voor trillingen. Omdat het kunstwerk buiten het bestemmingsplangebied valt, dient hiervoor in overleg te worden getreden met de opdrachtgever van het kunstwerk. Eventueel kunnen hierbij ook maatregelen zoals railpads voor de trambaan ter sprake komen.

8 Conclusies en aanbevelingen

In het voorliggende trillingsonderzoek is de trillingssituatie bepaald voor het bestemmingsplangebied van het *Noordgebouw*. Middels een uitgebreid trillingsonderzoek met behulp van modellen, metingen in gebouwen en op maaiveld, is de verwachte trillingssterkte in de toekomstige bebouwing in het bestemmingsplangebied vastgesteld.

Uit dit onderzoek volgt dat er alleen in verticale richting overschrijdingen worden verwacht van de SBR B-richtlijn. Verder volgt dat een eigenfrequentie van rond de 10 Hz voor de vloeren ongunstig is, omdat dan vooral de trillingen van bussen en trams worden versterkt. Een lagere eigenfrequentie is ongunstig voor de goederentreinen. Pas bij frequenties van minimaal 15 Hz zijn er geen overschrijdingen meer van de SBR B-richtlijn. Bij gebouwen met de afmetingen van het Noordgebouw zijn dergelijke vrij hoge eigenfrequenties van de vloeren niet-standaard.

Ook wanneer het gebouw alleen als kantoor wordt bestemd, dus zonder woningen, worden nog overschrijdingen van het beoordelingskader verwacht. De overschrijding van de trillingsintensiteit wordt vooral veroorzaakt door de passage van bussen en trams.

Op basis van het 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. Maak een dynamisch 3D eindige elementen model van het Noordgebouw, inclusief het gedeelte op de tafelconstructie over de buurtsporen van Utrecht Centraal, en de constructie van de trambaan. Reken dit model door op dynamisch gedrag en optredende trillingen, uitgaande van de gegevens zoals gepresenteerd in het voorliggende onderzoek;

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

2. Minimaliseer de vloeroverspanningen, maximaliseer de vloerdikte en gebruik stijve constructiematerialen (m.a.w., maak de eigenfrequentie van de vloeren zo hoog mogelijk, maar in ieder geval minimaal 15 Hz);
3. Onderzoek in hoeverre het mogelijk is om de voegovergangen in het kunstwerk te optimaliseren voor trillingen. Omdat het kunstwerk buiten het bestemmingsplangebied valt, dient hiervoor in overleg te worden getreden met de opdrachtgever van het kunstwerk. Eventueel kunnen hierbij ook maatregelen zoals railpads voor de trambaan ter sprake komen;

Colofon

Opdrachtgever Dura Vermeer Vastgoed BV
W.H. Algra

Uitgave Movares Nederland B.V.

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

Daalseplein 100
Postbus 2855
3500 GW Utrecht

Telefoon 06 10 03 94 54

Ondertekenaar ir. P.M. Boon
Adviseur

Projectnummer RM002426

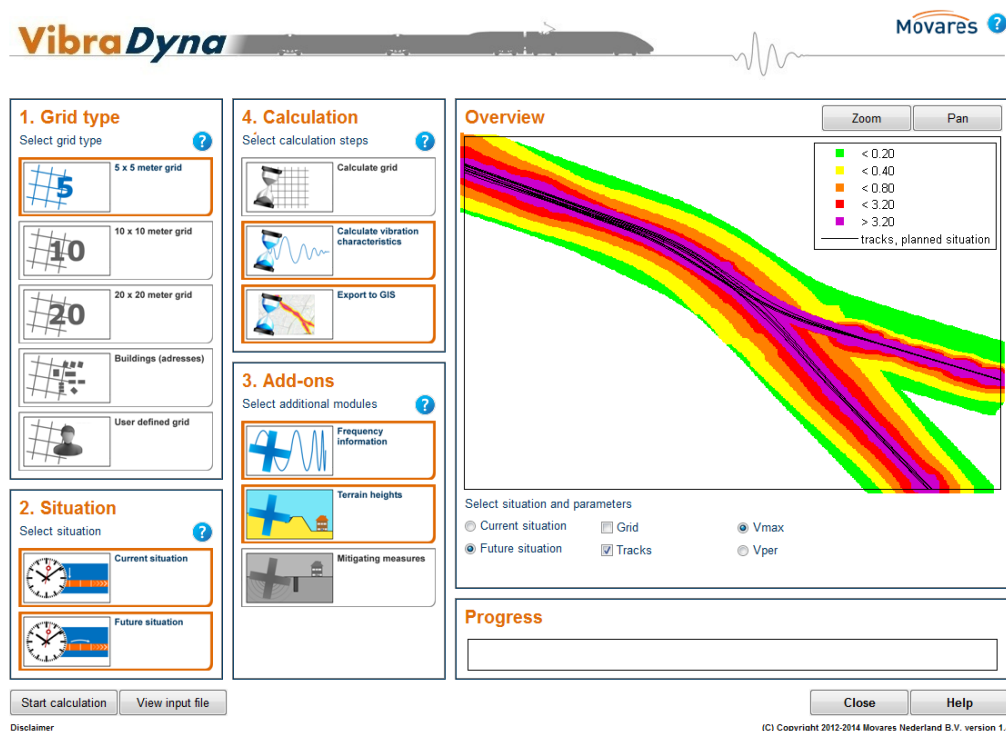
Opgesteld door ir. P.M. Boon

© 2015, Movares Nederland B.V.

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

Bijlage I VibraDyna

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



Figuur I-1 VibraDyna

In het huidige onderzoek is gebruik gemaakt van een nauwkeurige, frequentieafhankelijke berekening in VibraDyna. Deze wordt hieronder nader toegelicht.

In- en uitvoer

Gebruikers kunnen de volgende parameters variëren:

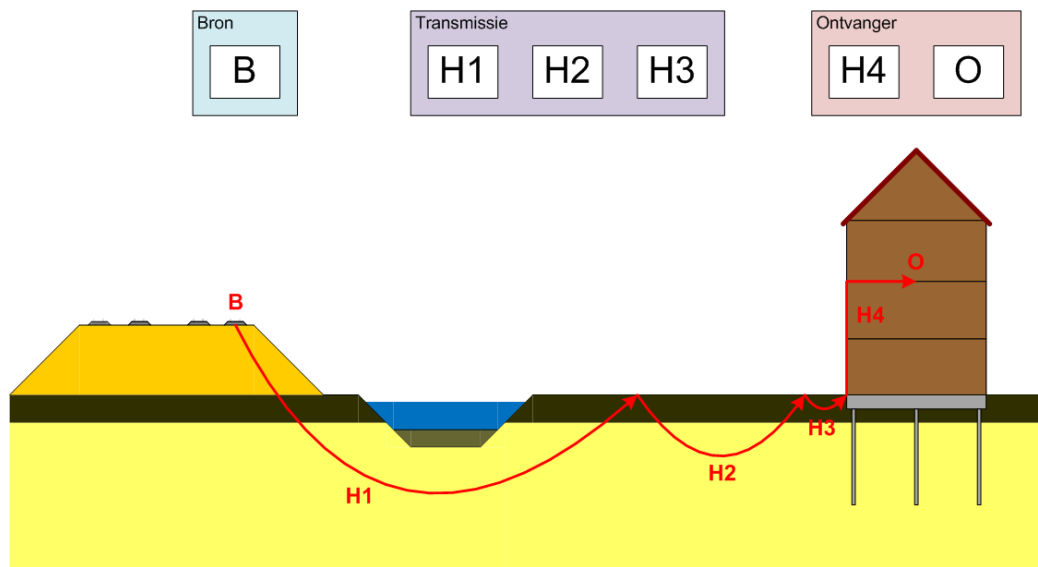
1. Afstand van gebouw tot het spoor;
2. Bodemtype (zand, veen, klei, etc.). Deze gegevens zijn op hoofdlijnen uit archieven beschikbaar;
3. Voertuigtypes;
4. Voertuigsnelheden;
5. Voertuigintensiteiten in dag-, avond- en nachtperiode;
6. Wissels en kunstwerken.

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

Bron, transmissie en ontvanger

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

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



Figuur I-2 Transmissie van trillingen

Frequentieafhankelijkheid

In het nauwkeurige model wordt gerekend met zogenaamde tertsbandspectra van trillingssignalen van treinen. Uit een groot aantal onderzoeken blijkt dat de tertsbandspectra van treinen, mits genormaliseerd voor snelheid, per treintype weinig variatie kennen. De beperkte variatie die er is wordt vooral veroorzaakt door de wielruwheid en aslast.

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

Relatie tussen tertsbandspectrum en v_{eff}

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

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

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

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

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

Berekening

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

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

Betrouwbaarheid

In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van trillingsmodellen, aangevuld met metingen. Het gebruik van trillingsmodellen heeft een aantal voordelen ten opzichte van het uitvoeren van metingen in gebouwen:

- Het maakt het mogelijk om sneller een goede prognose te geven van de trillingssterkte;
- Het maakt het mogelijk om een groter aantal verschillende locaties te beschouwen. Het uitvoeren van metingen op een groot aantal locaties is zowel tijdrovend als kostbaar en kan bij het gebruik van een trillingsmodel achterwege blijven;
- Het maakt het mogelijk om een prognose te geven voor nog niet gerealiseerde panden, zoals in dit geval het Noordgebouw.

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

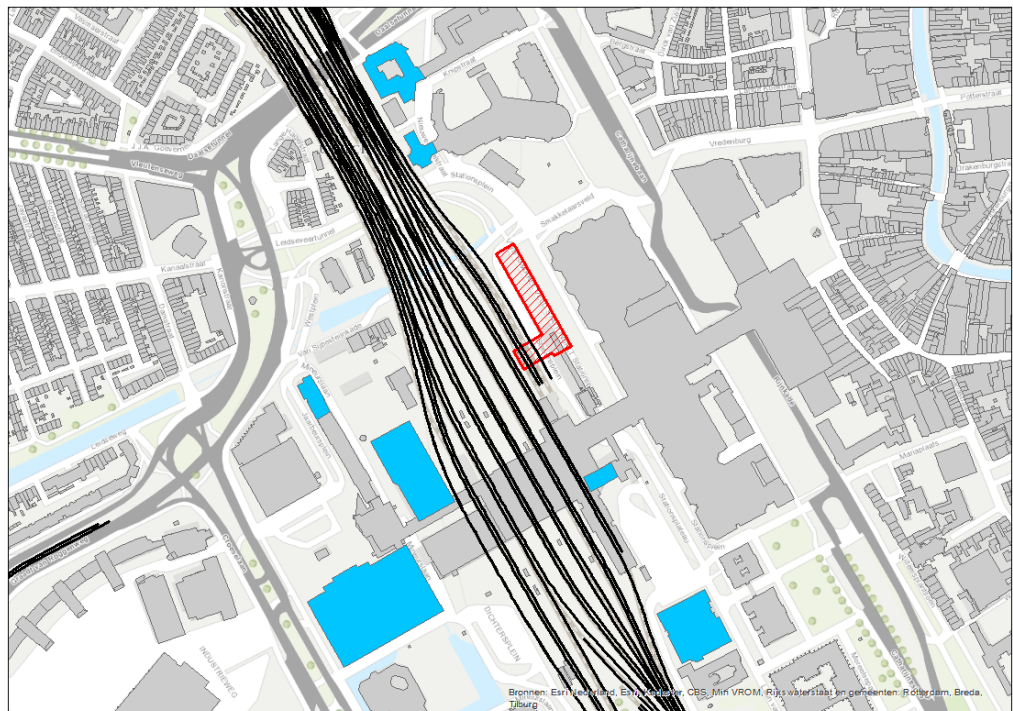
1. Modelparameters zijn bepaald op basis van een groot aantal metingen in een groot aantal gebouwen door het gehele land, over langere tijd. De beoordeling van de trillingssterkte vindt plaats op basis van een bovengrens die statistisch wordt bepaald. Hierdoor is het percentage gebouwen waar in werkelijkheid een hogere trillingssterkte wordt gemeten, zeer klein. Bij het nauwkeurige model is

het mogelijk om gebouweigenschappen toe te voegen, zodat de invloed van sterk afwijkende bebouwing sterk wordt gereduceerd;

2. Het model is uitvoerig geverifieerd in eerdere onderzoeken met behulp van metingen in gebouwen. Uit deze verificatiemetingen volgt dat het gebruikte model een hoge betrouwbaarheid heeft, zie onder meer de trillingsonderzoeken ten behoeve van de tracébesluiten *Sporen in Arnhem* [1] en *Sporen in Utrecht* [2];
3. De maximale trillingssterkte en trillingsintensiteit wordt door VibraDyna met een betrouwbaarheid van 95 procent bepaald. Hierdoor is de kans op een hogere trillingssterkte in werkelijkheid zeer klein. Ook de SBR B-richtlijn werkt met een trillingssterkte met een betrouwbaarheid van 95 procent.

Bijlage II Gegevens metingen

Conform de eisen in de SBR B-richtlijn, hoofdstuk 11, bevat deze bijlage de gegevens van de metingen in gebouwen die gebruikt zijn in dit trillingsonderzoek. In dit onderzoek zijn metingen in gebouwen, uitgevoerd in opdracht van ProRail, gebruikt ter verificatie en om de betrouwbaarheid van het onderzoek te vergroten. De gebruikte meetlocaties zijn blauw gearceerd in Figuur II - 1. Het bestemmingsplangebied is rood gearceerd.



Figuur II - 1 Gebruikte meetlocaties

Daalseplein 101

Bij het voorliggende onderzoek is gebruik gemaakt van een meting in het kantoorpand Daalseplein 101. Dit gebouw bevindt zich nabij het bestemmingsplangebied. Deze meting is gebruikt om een betrouwbaardere waarde te krijgen voor de maximale trillingssterkte. De gegevens van de meting in dit gebouw zijn opgenomen in Tabel II - 1.

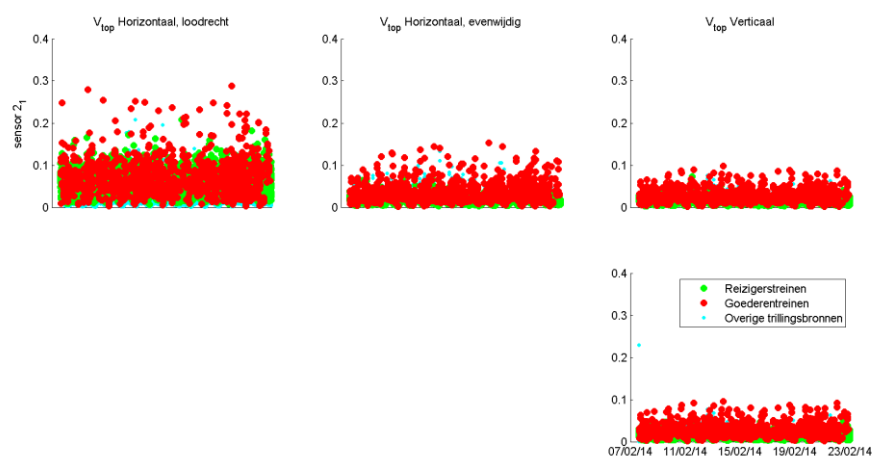
Tabel II - 1 Gegevens meting Daalseplein 101

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>28 januari 2014 10:20 tot 28 januari 2015 11:00 (meting loopt steeds door)</i>
4	Type trillingsbron	<i>Treinen.</i>
5	Gebouwomschrijving	<i>Kantoorgebouw, vijfde verdieping. Opgebouwd uit metselwerk.</i>
6	Locatie metingen	<i>Zie plattegrond in Figuur II - 2</i>
7	Geotechnische gegevens	<i>Zie Figuur II - 4</i>
8	Meetposities	<i>Zie plattegrond in Figuur II - 2</i>
9	Gebruikte meetopnemers	<i>Een 3D-geofoon en een 1D-geofoon</i>
	Gebruikte registratieapparatuur	<i>Webcam gekoppeld aan meetcomputer</i>
	Gebruikte verwerkingsapparatuur	<i>DS-net meetcomputer met 4 aangesloten kanalen</i>
10	Overzicht meetwaarden	<i>Zie Figuur II - 3 voor een deel van de meetwaarden</i>
11	Motivatatie classificatie gebouw	<i>Zie hoofdstuk 4</i>
12	Overige relevante omstandigheden	<i>Zie hoofdstuk 4</i>

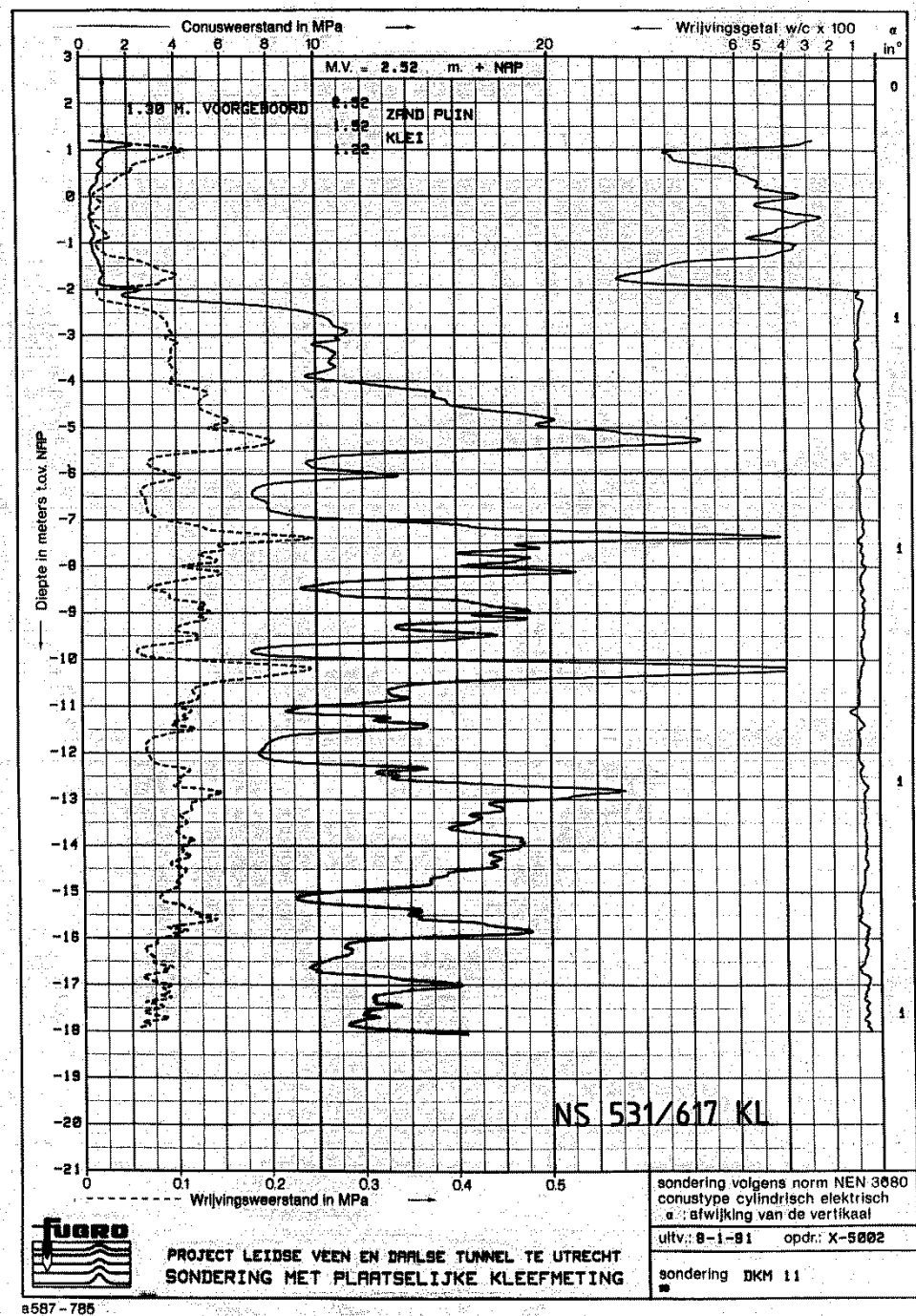
Een overzicht van de gebruikte sensorposities is weergegeven in Figuur II - 2, de meetresultaten zijn weergegeven in Figuur II - 3 en de bodemopbouw in Figuur II - 4.



Figuur II - 2 Opstelling sensoren Daalseplein 101



Figuur II - 3 Meetresultaten Daalseplein 101



Figuur II - 4 Grondopbouw in omgeving Daalseplein 101

Overige meetlocaties

Ter indicatie (en ter vergelijking) worden de trillingssterktes in een aantal panden in het stationsgebied van Utrecht Centraal weergegeven voor de eindsituatie van *DSSU*, zie Tabel II - 2. Alle gebouwen zijn gebouwen met een hoogte van minimaal 5 verdiepingen en hebben betonnen vloeren. Per gebouw is aangegeven wat de verschillen zijn met de referentielocatie, het Noordgebouw. Uit deze vergelijking volgt dat de geprognosticeerde trillingssterktes voor het Noordgebouw een sterke overeenkomst vertonen met die voor de overige gebouwen in het onderzoeksgebied.

Tabel II - 2 *Trillingsprognoses voor eindsituatie DSSU⁵*

Locatie	Opmerkingen	V _{max}	V _{per}
Daalseplein 101	Lagere bouwhoogte, dicht bij het spoor	0.49	0.06
Leidseveer 10	Lagere bouwhoogte, dicht bij het spoor	0.36	0.02
Jaarbeursplein 22	Vergelijkbaar	0.29	0.02
Stadskantoor	Hogere bouwhoogte, dicht bij het spoor	0.49	0.04
Beatrixgebouw	Verder van het spoor	0.23	0.01
Katreinetoren	Dicht bij het spoor	0.35	0.02
Laan van Puntenburg 100	Hogere bouwhoogte, dicht bij het spoor	0.32	0.02
Noordgebouw		0.34	0.12

⁵ Gebaseerd op Boon, ir. P.M., *Trillingsonderzoek DSSU, Meetresultaten en predicties in gebouwen*, Movares Nederland B.V., kenmerk D79-PBO-KA1400102