

WAGENWERKPLAATS AMERSFOORT

Trillingsonderzoek t.b.v. herontwikkeling



Colofon

Auteur	T.J. van Swinderen MSc tom@we-boost.nl
Controle en vrijgave	ir. P.M. Boon pieter@we-boost.nl +31 6 10 03 94 54
Projectcode	WBD2004
Versienr	2.0
Datum	28 juli 2020
Status	Vrijgegeven
Opdrachtgever	NS Stations



© We-Boost Data 2020

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 We-Boost.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
1.1	Aanleiding	5
1.2	Doel	5
1.3	Leeswijzer	6
2	Situatie en uitgangspunten	7
2.1	Situatie	7
2.2	Uitgangspunten	8
3	Beoordelingskader en werkwijze	10
3.1	Beoordelingskader	10
3.2	Rekenmethode	14
4	Verwachte trillingen in de woningen	16
4.1	Meetresultaten	16
4.2	Trillingen in geplande nieuwbouw	18
4.3	Maatregelen	22
5	Conclusies en aanbevelingen	28
I	Bijlage geotechnisch bodemonderzoek	30
II	Bijlage toelichting op rekenmodel	32
	Toelichting rekenmodel	32
	Opzet GIS-module rekenmodel	32
	Opzet BEM-modules rekenmodel	35
	Fundering	36
	Draagconstructie	36
	Vloeren	37
	Resultaten	37
III	Bijlage meetresultaten	40
IV	Bijlage kaartmateriaal	45

Managementsamenvatting

NS Vastgoed is bezig met de herontwikkeling van de voormalige Wagenwerkplaats, ten noordwesten van station Amersfoort Centraal. In het gebied komen woningen en voorzieningen, zoals horeca en werklocaties. De voormalige Wagenwerkplaats ligt in een gebied op relatief korte afstand van het spooremlacement ten westen van Amersfoort Centraal, en daarnaast bevindt zich een groot aantal rangeersporen op korte afstand van de geplande bebouwing. Gezien deze ligging is trillingshinder als gevolg van spoorverkeer in het onderzoeksgebied niet op voorhand uit te sluiten. In het kader van de herontwikkeling van het gebied is daarom nader onderzoek gedaan naar trillingen in het plangebied.

De belangrijkste conclusies van het onderzoek zijn:

1. Voor deelgebied West geldt dat momenteel wordt voldaan aan de SBR B-richtlijn. In het meest westelijke bouwblok zijn incidentele overschrijdingen in de toekomst, na intensivering van het goederenvervoer, echter niet volledig uit te sluiten. Het gaat dan om maximaal 2 treinen per week, dus om incidentele overschrijdingen. Uit een afweging van maatregelen volgt dat maatregelen aan het spoor en in de bodem gezien de hoge kosten en beperkte effectiviteit niet doelmatig zijn. Met maatregelen aan de bebouwing kan wel worden voldaan aan het beoordelingskader, maar dit brengt wel aanvullende kosten met zich mee. We adviseren om bij de constructieve uitwerking van het ontwerp van het meest westelijke bouwblok te onderzoeken of het mogelijk is om dit bouwblok minder gevoelig voor trillingen te construeren, door bijvoorbeeld een zwaardere fundering, dikkere vloer of zwaardere (of meer) dwarswanden in het ontwerp op te nemen. Overigens geldt dat ook zonder deze aanpassingen geen onacceptabele situatie ontstaat in het licht van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn, gezien het feit dat het gaat om hooguit incidentele overschrijdingen in de toekomst (maximaal 2 per week).
2. Voor deelgebied Midden geldt dat hier geen trillingsgevoelige bebouwing is gepland.
3. Voor deelgebied Oost geldt dat de trillingen van het treinverkeer voldoen aan de SBR B-richtlijn voor bestemming *kantoor*, maar niet zonder meer voor bestemming *wonen*. Om te voldoen aan het beoordelingskader is grondgebonden laagbouw met bestemming *wonen* m.n. dichtbij het rangeerterrein alleen mogelijk met constructieve optimalisaties van het ontwerp en mogelijk met maatregelen. Voor grotere bouwvolumes (minimaal 5 bouwlagen) geldt dat deze, mits qua trillingen goed ontworpen, naar verwachting wel voldoen aan het beoordelingskader voor *wonen*.

Voor de bebouwing in deelgebied Oost adviseren we om de volgende handvatten mee te nemen in de detaillering van de plannen:

1. Plan vooral grotere gebouwvolumes in de zone dichtbij het spoor, bij voorkeur met een zware fundering (bijv. parkeerkelder)
2. Probeer in de verdere uitwerking van de plannen de gebouwen zo stijf mogelijk te construeren (stijver dan bijv. vanuit constructief oogpunt noodzakelijk is). Daardoor zijn de gebouwen minder gevoelig voor trillingen.

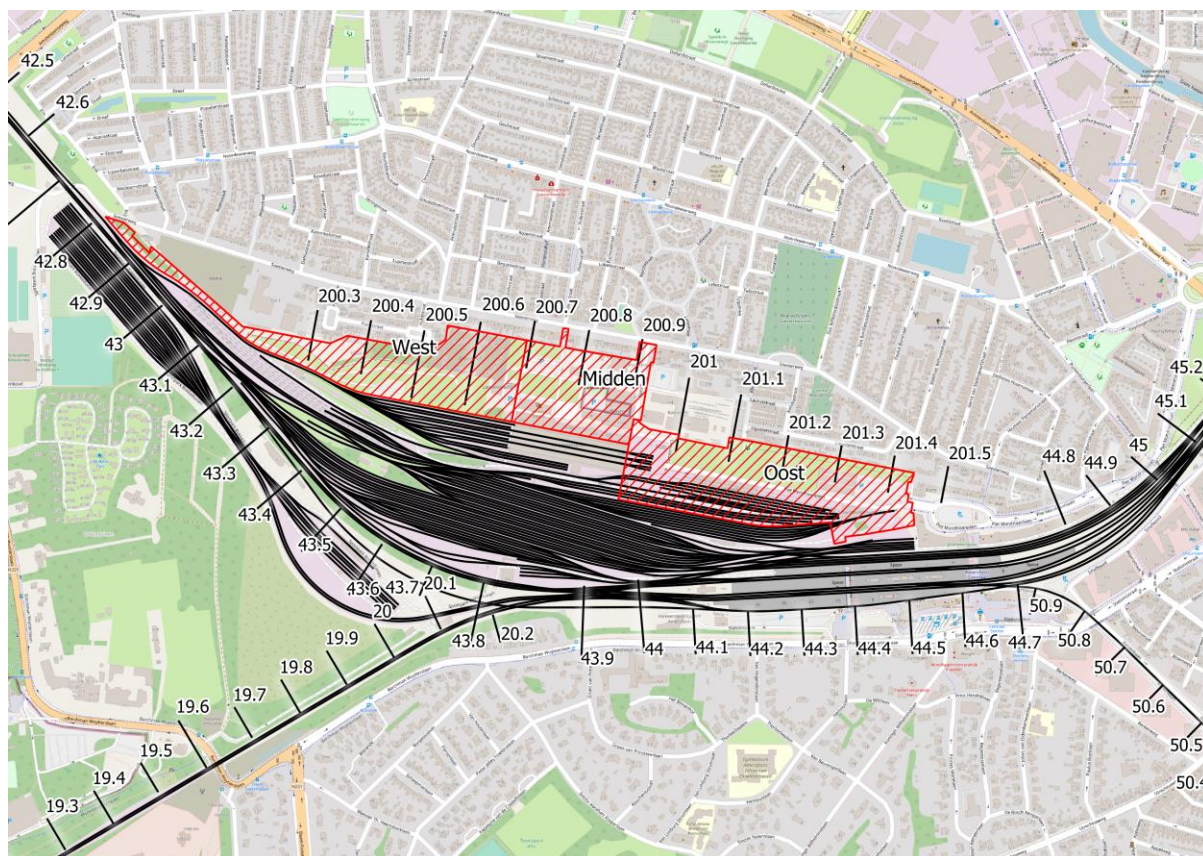
3. Voer tijdens het constructieve uitwerkingsproces een gedetailleerdere toets op trillingen uit op basis van het dan liggende ontwerp. We adviseren om, gezien de vrij forse variatie tussen de twee meetpunten in deelgebied Oost, dan aanvullende metingen uit te voeren in dit deelgebied. Indien uit dit onderzoek blijkt dat de trillingen niet voldoen aan het beoordelingskader, dan kunnen aanvullende maatregelen, zoals het afveren van bebouwing of het verzwaren van de fundering, worden afgewogen op doelmatigheid.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

NS Vastgoed is bezig met de herontwikkeling van de voormalige Wagenwerkplaats, ten noordwesten van station Amersfoort Centraal. In het gebied komen woningen en voorzieningen, zoals horeca en werklocaties. De voormalige Wagenwerkplaats ligt in een gebied op relatief korte afstand van het spooreplacement ten westen van Amersfoort Centraal, en daarnaast bevindt zich een groot aantal rangeersporen op korte afstand van de geplande bebouwing, zie Figuur 1.

Gezien de ligging in de buurt van de spoorlijnen Amersfoort – Amsterdam en Amersfoort – Utrecht is trillingshinder als gevolg van spoorverkeer in (een deel van) het onderzoeksgebied niet op voorhand uit te sluiten. In het kader van de herontwikkeling van het gebied is daarom nader onderzoek gedaan naar trillingen in het plangebied.



Figuur 1 Onderzoeksgebied

1.2 Doel

Doel van het voorliggende onderzoek is tweeledig: voor de al meer gedetailleerd uitgewerkte deelgebieden West en Midden wordt vastgesteld of er sprake zal zijn van trillingshinder in de geplande bebouwing (op basis van metingen en constructieve informatie over de te realiseren bebouwing), en zo ja, met welke maatregelen deze hinder is te voorkomen. Hiervoor maken wij een nauwkeurige predictie van de trillingen in de

geplande bebouwing. Deze trillingen toetsen we aan het van toepassing zijnde beoordelingskader (de SBR B-richtlijn). Als er overschrijdingen van het beoordelingskader worden verwacht, dan geven we aan met welke constructieve aanpassingen of maatregelen wel wordt voldaan aan het beoordelingskader.

Voor het nog niet nader uitgewerkte deelgebied Oost worden handvatten meegegeven voor een ontwikkelkader: welke functies en gebouwtypes zijn waar wel en niet mogelijk als trillingshinder in de gebouwen dient te worden voorkomen? In het onderzoek zal specifiek aandacht worden besteed aan verschillen in gebouwfunctie en gebouweigenschappen.

1.3 Leeswijzer

Wij beschrijven de situatie in het onderzoeksgebied en de uitgangspunten in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 lichten we het beoordelingskader en de gevolgde rekenmethodiek toe.

Met behulp van de uitgangspunten zoals geformuleerd in hoofdstuk 2 berekenen we de trillingen in de bebouwing op basis van de gemeten trillingen en de eigenschappen van de gebouwen. Het resultaat van deze stap wordt in hoofdstuk 4 beschreven. In hoofdstuk 5 geven we de conclusies en aanbevelingen.

De bijlages bevatten technische informatie van het onderzoek, zoals een toelichting op de rekenmethodiek en grondonderzoek van nabijgelegen locaties, maar ook de resultaten van de metingen en kaartmateriaal van de uitgevoerde berekeningen.

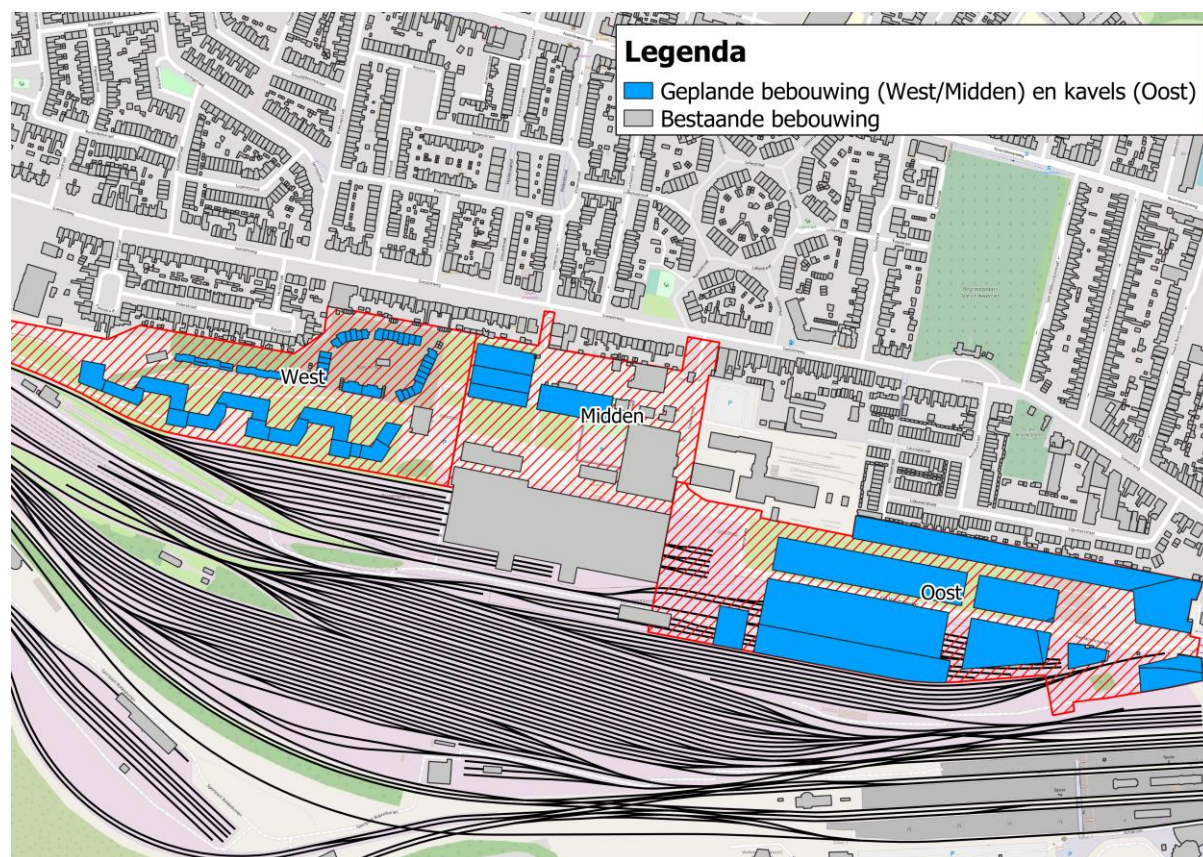
2 Situatie en uitgangspunten

In dit hoofdstuk wordt een toelichting gegeven op de beoogde toekomstige situatie en worden de uitgangspunten van het onderzoek weergegeven.

2.1 Situatie

De planlocatie bestaat uit deels bebouwde percelen, waarop een aantal bouwblokken wordt gerealiseerd, zie Figuur 2:

- Deelgebied West: woningen met 3 tot 8 bouwlagen, deel (Soesterhof) is al gerealiseerd. In totaal zijn 543 woningen gepland in dit deelgebied (o.b.v. maximalisatie West van 4 juni 2020, waarvan 40 in Soesterhof).
- Deelgebied Midden: horeca, cultuur, evenementen, parkeren en werken met maximaal 5 bouwlagen. Groot deel van de bestaande bebouwing blijft gehandhaafd. In dit deelgebied wordt in principe geen trillingsgevoelige bebouwing gerealiseerd (gebouwfuncties vallen buiten het beoordelingskader van de SBR B-richtlijn).
- Deelgebied Oost: meer dan 350 woningen met tot 20 bouwlagen, daarnaast kantoren, horeca, cultuur en parkeren. Hier is sprake van kavels, bebouwing is niet gedetailleerd.



Figuur 2 Bestaande en toekomstige bebouwing

De nieuwbouw bevindt zich op een afstand van zo'n 45 tot 420 meter van het doorgaande spoor, met tussen het spoor en de bebouwing nog een emplacement waar ook sprake is

van incidenteel treinverkeer. De rijsnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. Deze gegevens zijn gebaseerd op gegevens uit het Geluidsregister Spoor, de realisatiegegevens uit 2019 en vertrekstaten van de vervoerders. Rangeerbewegingen zijn hierin niet opgenomen. Volgens de NMCA spoor 2030-2040 (vooruitblik voor goederenvervoer) zal het goederenvervoer toenemen van 14 tot 16 goederentreinen in 2019 naar 29 tot 41 goederentreinen per dag in 2040. Er wordt geen verandering in het aantal reizigerstreinen voorzien.

Tabel 1 Treinen, rijsnelheid en aantal treinen per uur per richting (gemiddeld per werkdag voor reizigerstreinen en per weekdag voor goederentreinen, per richting)

Type trein	Rijsnelheid	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Sprinter Ams	40 – 90 km/h	2.00	2.00	0.88
Sprinter Utr	40 – 60 km/h	2.00	2.00	0.50
Intercity Ams	40 – 90 km/h	4.00	4.00	0.63
Intercity Utr	40 – 60 km/h	6.00	4.75	1.38
Goederentreinen Ams	40 – 80 km/h	0.18	0.20	0.13
Goederentreinen Utr	40 – 50 km/h	0.10	0.21	0.15

Andere trillingsbronnen, zoals lokaal verkeer, zullen niet voor waarneembare trillingen in de woningen zorgen, gezien de lage rijsnelheid en het feit dat het alleen om bestemmingsverkeer gaat.

2.2 Uitgangspunten

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van een aantal uitgangspunten. In het volgende hoofdstuk wordt toegelicht hoe deze uitgangspunten zijn verwerkt in de berekeningen.

2.2.1 Gegevens bebouwing

In het plangebied worden diverse types gebouwen gerealiseerd. Er is geen uitgewerkt ontwerp van de bebouwing, voor deelgebied West is wel een voorbeelduitwerking van de bebouwing. In de berekeningen wordt uitgegaan van de gegevens in het Masterplan (van 19 juni 2019, inclusief aanvulling voor deelgebied West van 4 juni 2020), zie Tabel 2. Het rekenmodel voor de bebouwing is hierop gebaseerd.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing deelgebied West

Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Breedplaatvloer 200 mm met 80 mm cementdekvloer (middenbouw) Kanaalplaatvloer 200 mm met 80 mm cementdekvloer (laagbouw)
Hoogte	3 tot 11 bouwlagen
Lengte vloerveld	5.2 m
Breedte vloerveld	8 tot 12 m
Constructietype	Wanden-vloeren (laagbouw) Wanden-vloeren of tunnelbouw (middenbouw)
Fundering	Op palen
Stijfheid gebouwen	Prefab of in-situ beton (middenbouw) Prefab beton of kalkzandsteen met metselwerk (laagbouw)

Voor deelgebied Oost zijn een aantal varianten doorgerekend, de doorgerekende varianten zijn weergegeven in Tabel 3. Er zijn meerdere constructietypes, bouwhoogtes en vloeroverspanningen doorgerekend om een indicatie te geven van de bandbreedte van de verwachte trillingen.

Tabel 3 Eigenschappen bebouwing deelgebied Oost

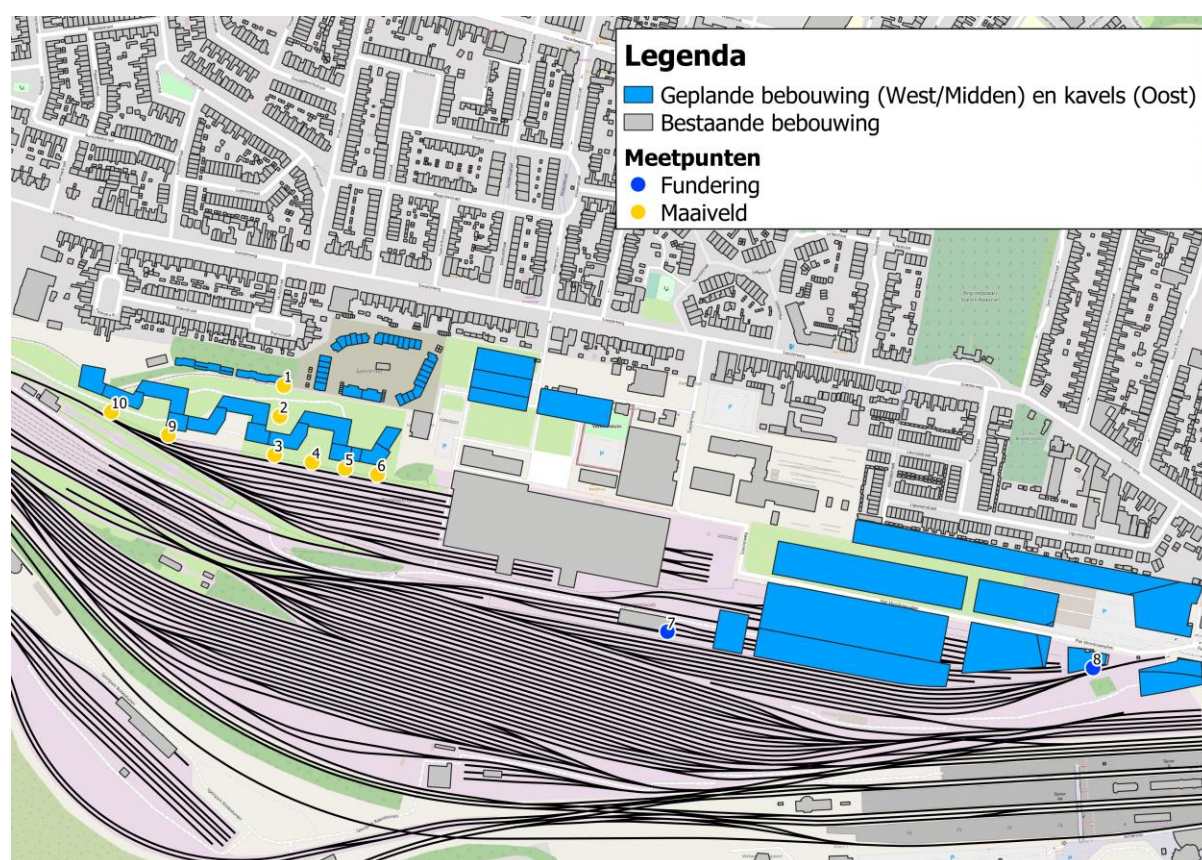
Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Breedplaatvloer 200 mm met 80 mm cementdekvloer (midden- en hoogbouw) Kanaalplaatvloer 200 mm met 80 mm cementdekvloer (laagbouw)
Hoogte	10 m (laagbouw) 30 m (middenbouw) 50 m (hoogbouw)
Lengte vloerveld	5.2 m, 6.6 m en 8.0 m
Breedte vloerveld	10 m
Constructietype	Wanden-vloeren (laagbouw) Wanden-vloeren of tunnelbouw (middenbouw)
Fundering	Op palen
Stijfheid gebouwen	Prefab of in-situ beton (middenbouw) Prefab beton of kalkzandsteen met metselwerk (laagbouw)

2.2.2 Gegevens ondergrond

Voor gegevens van de ondergrond is gebruik gemaakt van beschikbare boringen en sonderingen uit Dinoloket en bodemonderzoeken die in de nabijheid van het plangebied zijn uitgevoerd. Deze gegevens zijn gebruikt om de bodemopbouw te modelleren. De bodemopbouw heeft invloed op hoe de trillingen uitdempen met de afstand, en op hoe de gebouwen reageren op trillingen.

2.2.3 Meetresultaten

Door Alcedo zijn in het kader van dit onderzoek metingen uitgevoerd in het onderzoeksgebied op een aantal punten, zie Figuur 3. De metingen zijn uitgevoerd in juni 2020. De meetresultaten van het meetonderzoek worden weergegeven in hoofdstuk 4.



Figuur 3 Meetpunten in het onderzoeksgebied

3 Beoordelingskader en werkwijze

In dit hoofdstuk geven wij een toelichting op het beoordelingskader, de werkwijze en de gebruikte rekenmethode.

3.1 Beoordelingskader

Er bestaat in Nederland geen wettelijk kader voor de beoordeling van trillingshinder in gebouwen. Wel geldt dat in het kader van een goede ruimtelijke ordening kan worden verzocht om trillingen mee te nemen bij de wijziging van bestemmingsplannen waar trillingen een rol kunnen spelen. Het is daarom gebruikelijk om bij bestemmingsplan wijzigingen aandacht te besteden aan trillingen, zeker als deze zich rond bekende trillingsbronnen als spoorlijnen bevinden. Op basis van jurisprudentie wordt daarbij al enkele decennia gebruik gemaakt van de SBR-richtlijn om trillingen in gebouwen te beoordelen.¹

Deze SBR-richtlijn bestaat uit drie delen (deel A – schade in gebouwen, deel B – hinder voor personen in gebouwen en deel C – verstoring van gevoelige apparatuur) waarvan alleen deel B voor dit onderzoek relevant is. De afstand tussen het spoor en de gebouwen is dermate groot dat er geen schade aan de gebouwen zal ontstaan, en verstoring van gevoelige apparatuur als gevolg van de realisatie van dit plan is ook niet aan de orde.

In deze SBR-richtlijn deel B zijn een aantal aspecten relevant, deze worden hieronder kort toegelicht:

1. De richtlijn toetst zowel een maximaal optredende trillingssterkte (V_{max} , treedt op bij de trein die gedurende de meetperiode de hoogste trillingen veroorzaakt) als het tijdsgemiddelde van de trillingen (V_{per} , deze grootheid is in tegenstelling tot V_{max} dus ook afhankelijk van het aantal treinen).
2. De richtlijn maakt in de beoordeling onderscheid tussen verschillende situaties, en toetst daarbij strenger in:
 - a. Nieuwbouwsituaties (nieuwe gebouwen, nieuw spoor, aanleg van wissels). Bij bestaande situaties zijn de streefwaarden minder streng, er wordt dan uitgegaan van een zekere mate van gewenning en er zijn minder mogelijkheden om de trillingen te reduceren.
 - b. Gebouwen met een overnachtingsfunctie (woningen, ziekenhuizen). De meeste hinder wordt vaak in rust ervaren. Bij gebouwen met een niet-

¹ Voor spoorprojecten wordt door ProRail sinds 2012 ook wel gebruik gemaakt van de Bts, deze is afgeleid van de SBR-richtlijn en op aspecten aangescherpt (waaronder een doelmatigheidsafweging en een andere manier om de trillingen vast te stellen). Deze richtlijn wordt echter doorgaans niet gebruikt om de trillingen in nieuwbouw langs het spoor te beoordelen.

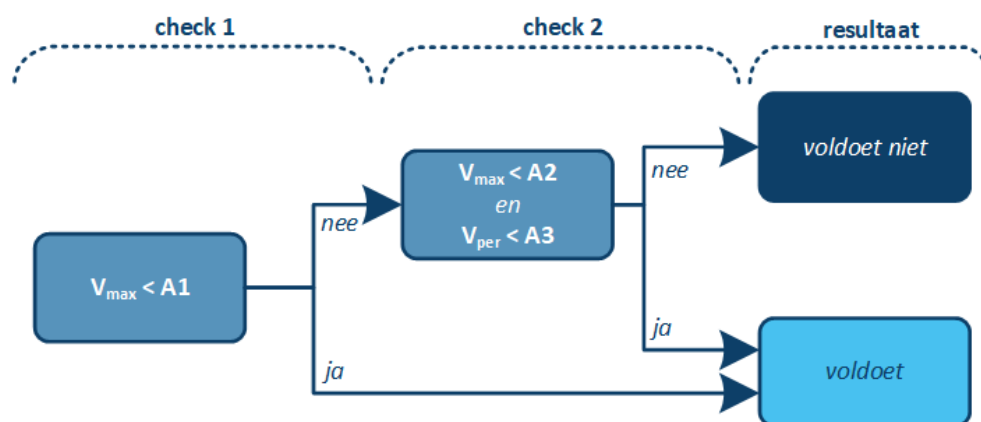
overnachtingsfunctie (kantoren, scholen) gelden minder strenge streefwaarden. Winkels, sport- en industriepanden vallen buiten de richtlijn.

- c. De nacht, omdat de meeste hinder vaak in rust wordt ervaren. De streefwaarden voor overdag zijn ca. een factor 2 minder streng dan 's nachts.
3. Een gebouw kan op twee manieren voldoen aan de richtlijn: de trillingssterkte V_{max} moet lager zijn dan de onderste streefwaarde A1 (zie Tabel 2), óf V_{max} moet lager zijn dan de bovenste streefwaarde A2, waarbij tegelijkertijd de trillingsintensiteit V_{per} lager is dan de streefwaarde A3. Zie ook het schema in Figuur 6.

In dit onderzoek is in deelgebied West uitsluitend sprake van bebouwing met bestemming *wonen*, in deelgebied Midden is geen sprake van trillingsgevoelige² bebouwing en in deelgebied Oost is sprake van gemengde bebouwing met *wonen*, *kantoor* en niet trillingsgevoelige bebouwing.

Tabel 4 Streefwaarden in de SBR-richtlijn deel B voor nieuwbouw

Functie	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
Onderwijs en kantoor	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
Bijeenkomst	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
Kritische werkruimte	0.1	0.1	-	0.1	0.1	-



Figuur 4 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

Een locatie die conform de SBR-richtlijn deel B niet voldoet aan het beoordelingskader, valt niet direct af als mogelijke woon- of kantoorlocatie. De richtlijn biedt in bijlage 5 namelijk een aantal handvatten aan om maatregelen af te wegen. Deze bijlage hanteert 5 niveaus van hinderclassificatie, zie Tabel 3.

² Onder trillingsgevoelige bebouwing wordt bebouwing verstaan die valt binnen het beoordelingskader van de SBR B-richtlijn. Horeca, winkels, sport- en evenementenlocaties en industrie valt hier bijvoorbeeld niet onder.

Tabel 5 Classificatie van hinder conform de SBR-richtlijn deel B, bijlage 5

$V_{\max}$	Hinderkwalificatie	Aanwijzingen
< 0.1	Geen hinder	Geen maatregelen nodig
0.1 – 0.2	Weinig hinder	Geen maatregelen nodig
0.2 – 0.8	Matige hinder	Doelmatigheidsafweging nodig (zie onder)
0.8 – 3.2	Hinder	Doelmatigheidsafweging nodig (zie onder)
> 3.2	Ernstige hinder	Niet acceptabel

Bij geen of weinig hinder zijn geen maatregelen nodig om de trillingen te reduceren, bij de classificaties 'matige hinder' en 'hinder' is een maatregelafweging nodig. 'Ernstige hinder' is niet toelaatbaar. Voor de afweging van maatregelen bij 'matige hinder' en 'hinder' geeft de richtlijn aan dat dit kan worden geaccepteerd onder een aantal voorwaarden:

1. De mate waarin de trillingssterkte voorkomt. Hiervoor geldt dat de trillingsintensiteit V_{per} een goede indicatie is, of het aantal overschrijdingen per dag. Hierbij geldt dat bij een lage waarde van V_{per} of een gering aantal overschrijdingen, een maatregel minder snel als doelmatig mag worden beschouwd, omdat de kosten dan niet meer opwegen tegen het ervaren effect.
2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. Hierbij geldt dat het niet nodig is om de trillingen van het treinverkeer te reduceren tot onder het niveau van de achtergrondtrillingen. In dat geval zijn maatregelen als niet doelmatig te beschouwen, omdat de hinder er niet door afneemt.
3. De mogelijkheid tot het treffen van reducerende maatregelen. Het is conform bestaande jurisprudentie gebruikelijk om hierbij een afweging te maken tussen de kosten en het effect van de maatregelen, maar ook aspecten als duurzaamheid en impact op de omgeving kunnen worden meegenomen in deze afweging. Hierbij geldt dat een maatregel met hoge kosten of impact en een beperkt effect minder snel als doelmatig mag worden beschouwd, omdat de kosten dan niet meer opwegen tegen het ervaren effect. In onderstaand kader worden mogelijke maatregelen benoemd.

Maatregelen

Maatregelen tegen spoorverkeer kunnen op drie niveaus worden getroffen:

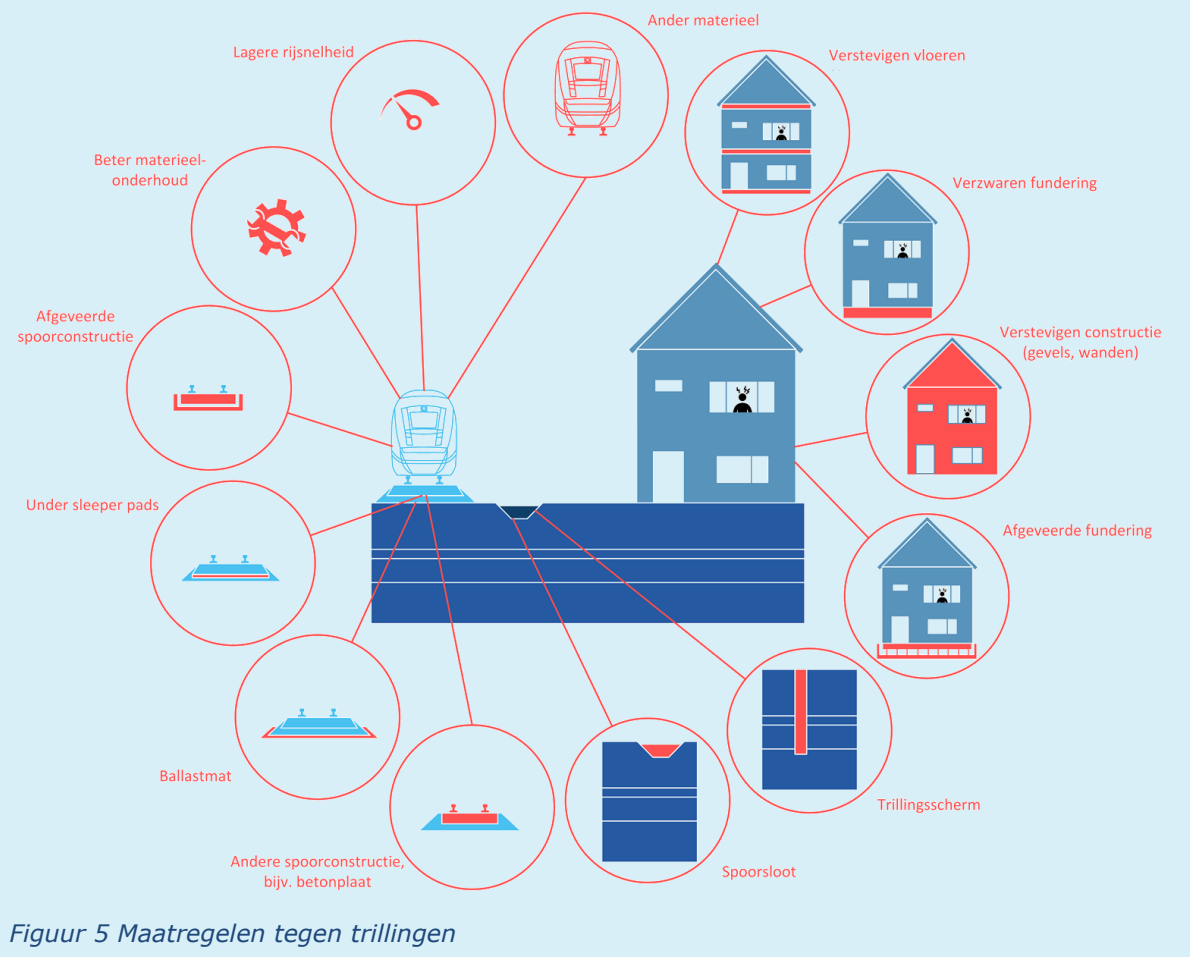
1. Bij de trillingsbron (de voertuigen of het spoor)
2. In de bodem (tussen het spoor en de gebouwen)
3. Bij de ontvanger (het gebouw waarin de trillingen worden ervaren).

Maatregelen op de verschillende niveaus zijn weergegeven in Figuur 7.

De meest effectieve manier om de trillingen te reduceren, is het nemen van maatregelen aan de trillingsbron (het spoor of de voertuigen), bijvoorbeeld door het toepassen van under sleeper pads, ballastmatten, het aanpassen van de rijnsnelheid of het hanteren van strengere vlakheidseisen voor het spoor. Deze maatregelen vallen doorgaans buiten de scope van niet-spoor gerelateerde onderzoeken, omdat deze buiten het plangebied moeten worden getroffen. Vaak zijn de kosten van deze maatregelen hoger dan maatregelen in de bodem of aan gebouwen, onder meer doordat langdurige buitendienststellingen nodig zijn.

Bij maatregelen in de bodem kan gedacht worden aan het toevoegen van obstakels in de bodem, die ervoor zorgen dat de gebouwen worden afgeschermd. Voorbeelden zijn het toevoegen van een spoorloot of een trillingsscherm van piepschuim (EPS), beton, jet-grout (soil-mix methode voor beton) of een damwand. Nadeel van deze maatregelen is dat deze vooral effectief zijn dicht op de trillingsbron (het spoor) of dicht op de bebouwing, waardoor planologische inpassing doorgaans complex is. Verder geldt voor deze maatregelen vaak een lange bouwtijd, forse neveneffecten (op natuur, duurzaamheid, hinder tijdens realisatie) en zijn deze maatregelen vaak niet of slechts aan te passen aan toekomstige situatie.

Bij maatregelen aan de gebouwen is een breed scala aan maatregelen mogelijk. Die variëren van het zwaarder funderen of stijver uitvoeren van de gebouwen (bijvoorbeeld door te kiezen voor een tunnelbouwmethode of stijvere vloeren), het toepassen van meer dempende materialen (zoals hout en metselwerk in plaats van beton, of breedplaatvloeren in plaats van kanaalplaatvloeren) tot het ontkoppelen van de fundering of de vloeren door middel van rubberen oplegblokken of stalen veren. Bij nieuwbouw zijn dit meestal de meest eenvoudige maatregelen om te treffen, de kosten zijn eigenlijk altijd lager dan 10% van de stichtingskosten van een gebouw.



4. De historie. In situaties waarbij in het verleden bijvoorbeeld al forse ingrepen zijn gedaan om de trillingen te reduceren en waarbij geen projecten zijn gepland die een toekomstige toename van de trillingen zullen veroorzaken, kan eerder worden betoogd dat maatregelen niet doelmatig zijn.

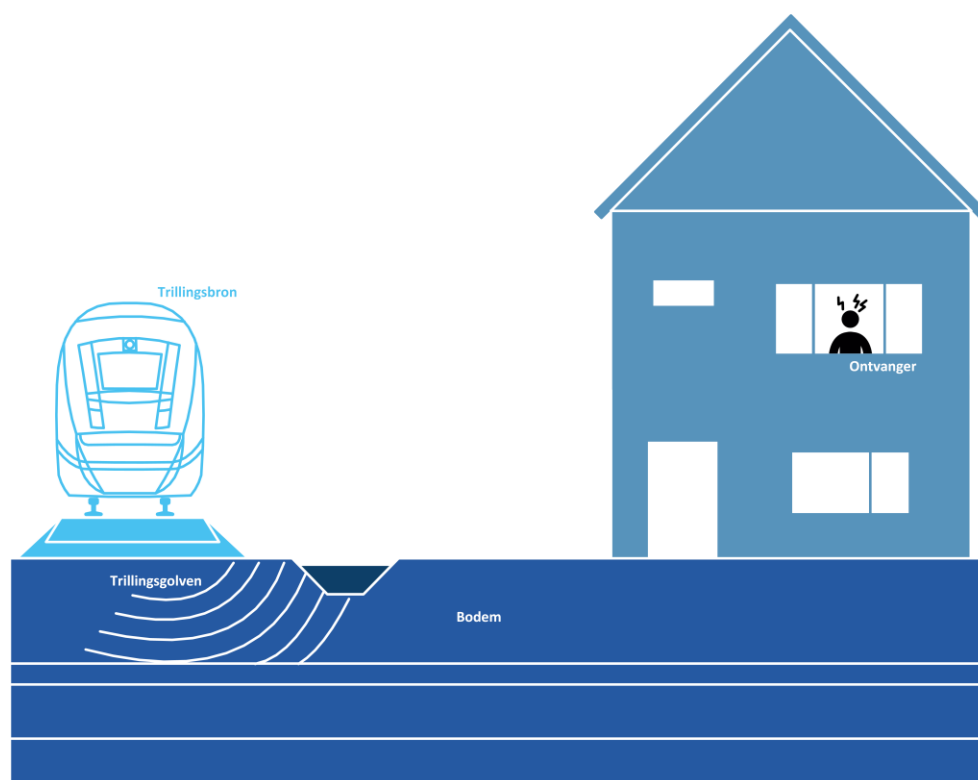
Op basis van bovenstaande handvatten kan per situatie worden beoordeeld of er maatregelen nodig zijn, en zo ja, of deze maatregelen doelmatig zijn of dat er ook zonder maatregelen een acceptabele situatie ontstaat.

3.2 Rekenmethode

In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde gebouwen, wordt op basis van metingen aan bestaande bebouwing en op maaiveld een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande nieuwe bebouwing. Deze verwachte trillingen zijn afhankelijk van de constructieve eigenschappen van de geplande bebouwing, maar ook van de bodem, de afstand tot het spoor en natuurlijk de gemeten trillingen. Hieronder wordt een korte uitleg gegeven over hoe trillingen zich voortplanten van de trillingsbron tot in het gebouw, en hoe dat is vertaald naar een rekenmodel.

3.2.1 Trillingen – van trillingsbron naar gebouw

Trillingen ontstaan doordat een bewegend object (een trein, lightrailvoertuig of vrachtwagen bijvoorbeeld) over een niet-efen ondergrond rijdt. Door de massa en beweging van het voertuig, variaties in de ondergrond (die per definitie niet perfect vlak is) en variaties in de rondheid van de wielen van het voertuig ontstaan spanningen in de bodem die zich door de bodem verplaatsen. Afhankelijk van de opbouw van de bodem en de aanwezigheid van obstakels (zoals sloten en damwanden) verplaatsen de trillingen zich diep of juist ondiep door de bodem. Gebouwen worden daardoor in trilling gebracht. Afhankelijk van hoe het gebouw is geconstrueerd, worden bepaalde trillingen meer of minder versterkt in het gebouw. Deze trillingen kunnen als hinderlijk worden ervaren door personen in gebouwen. Dit hele systeem van trillingsbron (hier de trein), overdrachtsmedium (de bodem, waardoor de trillingen zich verplaatsen) en ontvanger (het gebouw met daarin de personen die de hinder ervaren) is schematisch weergegeven in Figuur 8.



Figuur 6 Trillingen – het systeem van trillingsbron, de bodem als doorgeefmedium en het gebouw als ontvanger

In de subparagrafen hierna wordt toegelicht hoe hier in dit onderzoek mee wordt omgegaan.

3.2.2 De trillingsbron

In dit onderzoek zijn treinen de bron van de trillingen. De trillingen van het treinverkeer zijn gemeten door Alcedo op meerdere punten in de omgeving van het plangebied, onder meer aan de fundering van bestaande panden en op maaiveld. De beoordeling van de trillingen in de geplande bebouwing heeft plaatsgevonden op basis van deze metingen.

3.2.3 De bodem

De bodem op deze locatie bestaat hoofdzakelijk uit zandlagen met verschillende stijfheden, zie bijlage I. De uitdamping van de trillingen met de afstand is bepaald met een rekenmodel op basis van deze bodemopbouw voor een zo betrouwbaar mogelijke predictie van de trillingen, en geijkt aan de hand van metingen op verschillende afstanden tot het spoor in het plangebied.

3.2.4 Het gebouw

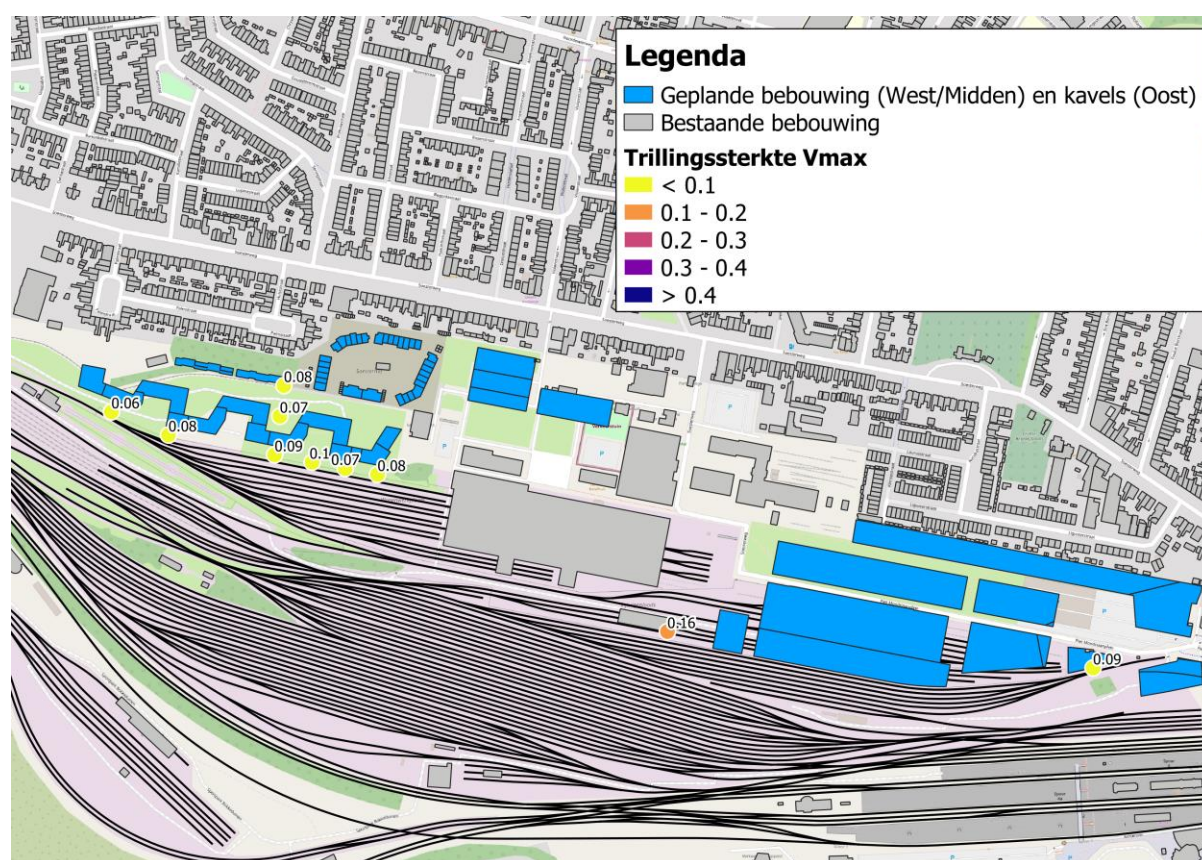
De trillingen gaan via de fundering een gebouw binnen. Afhankelijk van het type fundering, de bodem, de massa en afmetingen van het gebouw zal de fundering de trillingen meer of minder uitdempen. Vervolgens worden de trillingen in het gebouw weer versterkt door bewegingen van het gebouw en de vloeren. Het gebouwgedrag is in dit onderzoek bepaald op basis van de bodemopbouw, de constructieve eigenschappen en de gebruikte materialen van de gebouwen. Voor deelgebied Oost zijn een aantal gebruikelijke varianten van de bebouwing doorgerekend om inzicht te geven in de verwachte trillingen en de gevoeligheid voor het type constructie. Hiervoor maken we gebruik van het rekenmodel Buildyn, een zogenaamd beam-element model (BEM) waarin het gebouw gemodelleerd en doorgerekend wordt. De resultaten van het model zijn geijkt met praktijkresultaten uit metingen. Een toelichting op het rekenmodel Buildyn is gegeven in bijlage II.

4 Verwachte trillingen in de woningen

In dit hoofdstuk wordt eerst een korte toelichting gegeven op de meetresultaten, daarna worden de verwachte trillingen in de geplande bebouwing gegeven. Hierbij is gebruik gemaakt van de beoordelingsmethode en de rekenmethodiek zoals toegelicht in het voorgaande hoofdstuk.

4.1 Meetresultaten

Alcedo heeft metingen uitgevoerd aan op maaiveld (in deelgebied West) en aan de fundering van panden (in deelgebied Oost) in het plangebied. De gemeten trillingen op deze meetpunten zijn weergegeven Figuur 7.



Figuur 7 Resultaten trillingsmetingen

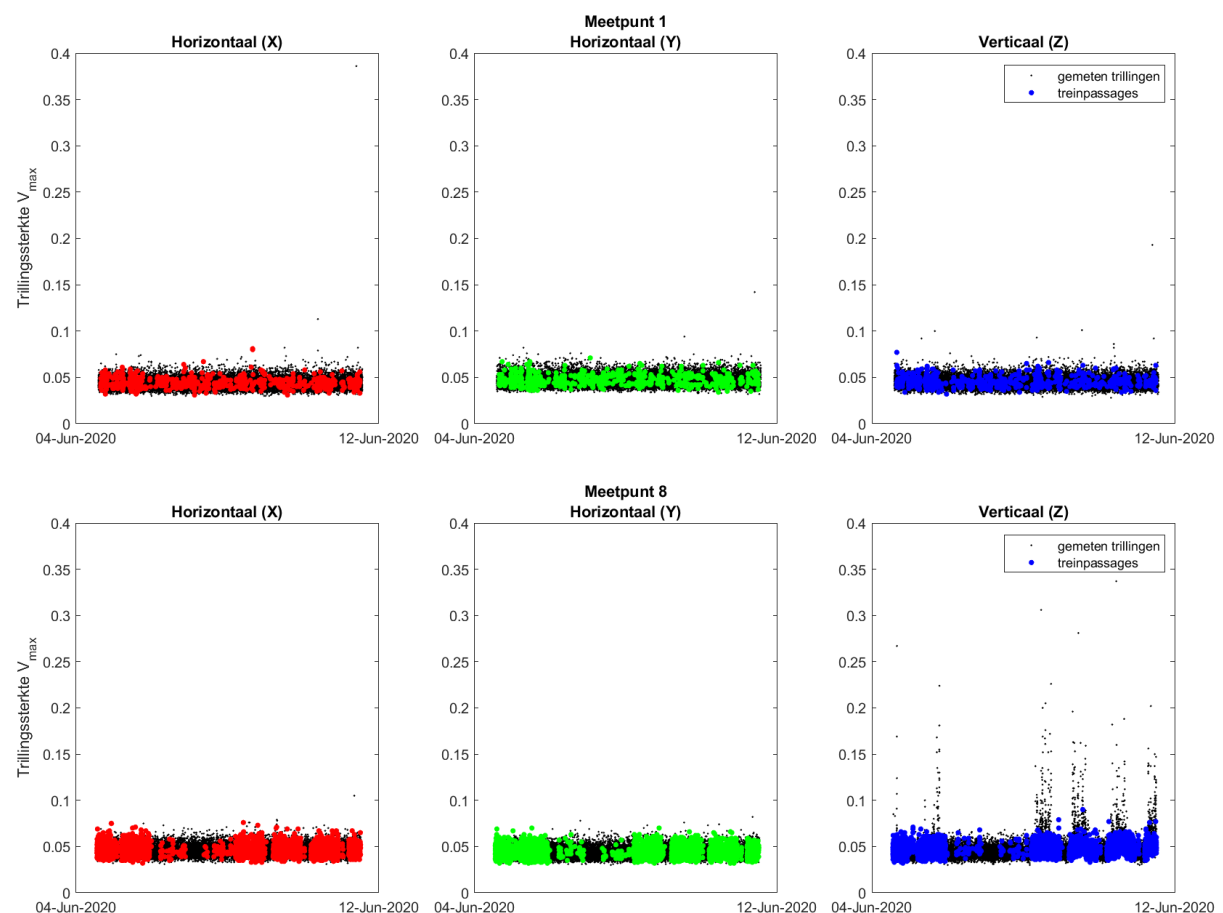
Detailgrafieken met de trillingen als functie van de tijd zijn voor twee meetpunten (1, op maaiveld, deelgebied West en 8, aan fundering NS simulatorgebouw, deelgebied Oost) weergegeven in Figuur 8. Voor de overige meetpunten zijn deze grafieken opgenomen in bijlage III.

In de metingen valt het volgende op:

1. De trillingen zijn op vrijwel alle meetpunten maatgevend in verticale richting. De hoogste trillingen zijn afkomstig van goederentreinen en de IC Berlijn (internationale

trein, bestaande uit een zware locomotief (die maatgevend is voor de trillingen) en getrokken wagons).

2. Op een aantal meetpunten geven rangeerbewegingen de hoogste trillingen. Hiervoor geldt het volgende:
 - a. Bij deelgebied West is sprake van incidentele rangeerbewegingen (soms enkele rangeerbewegingen per dag, maar slechts zeer incidenteel, meeste dagen geen rangeerbewegingen). Deze incidentele rangeerbewegingen zijn niet meegenomen in de bepaling van de trillingssterkte.
 - b. Bij deelgebied Oost is sprake van regelmatige rangeerbewegingen (meerdere malen per dag op alle dagen). Deze structurele rangeerbewegingen zijn wel meegenomen in de bepaling van de trillingssterkte.
3. De hoogste trillingen zijn gemeten bij de loods (meetpunt 7), dit is dichtbij het rangeerterrein. De trillingen van doorgaand treinverkeer zijn vergelijkbaar met de andere meetpunten, maar met name (het structurele) rangeerverkeer geeft hier ca. een factor 2 hogere trillingen dan het doorgaande treinverkeer.

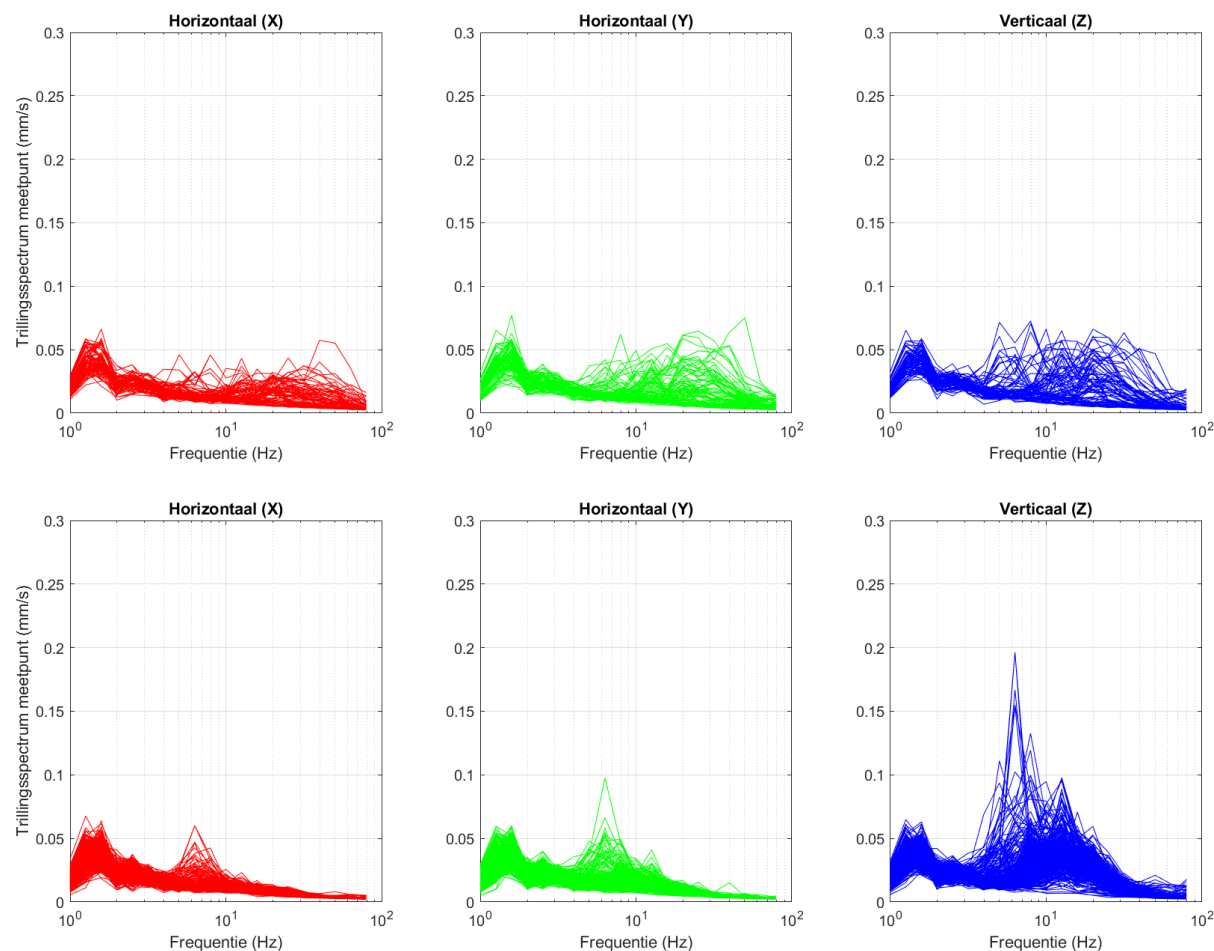


Figuur 8 Gemeten trillingen op meetpunt 1 (maaiaveld, boven) en meetpunt 8 (fundering simulatorgebouw NS, onder)

De frequentie-inhoud (spectrogram, weergegeven als 1/3-octaaftbandspectrum of tertsbandspectrum) van de trillingen op meetpunt 3 en 8 zijn weergegeven in Figuur 9. In deze figuur is zichtbaar dat er meerdere dominante (maatgevende) frequenties zijn, bij 5

tot 8 Hz (voornamelijk door de IC Berlin en goederentreinen) en rond 10 Hz (vooral van reizigerstreinen). Bij het meetpunt op maaiveld zijn ook hogere frequenties zichtbaar, deze worden door een fundering sterk uitgedempt en zijn daardoor niet meer zichtbaar op het meetpunt aan de fundering van de loods (meetpunt 7).

De trillingsspectra zijn gebruikelijk voor dit type bodems, en in lijn met metingen van omliggende locaties in Amersfoort.



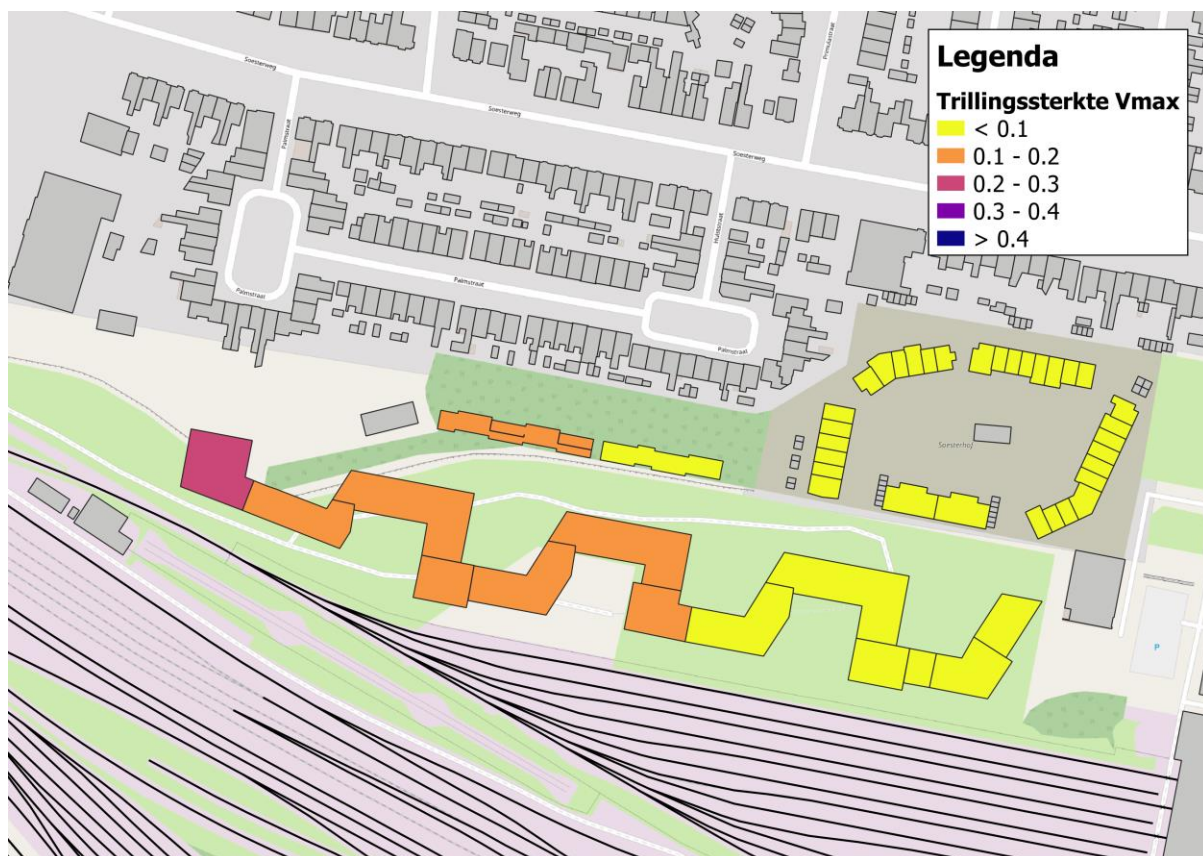
Figuur 9 Tertsbandspectra bij meetpunt 3 (op maaiveld, deelgebied West, boven) en bij meetpunt 7 (fundering, loods, deelgebied Oost, onder)

4.2 Trillingen in geplande nieuwbouw

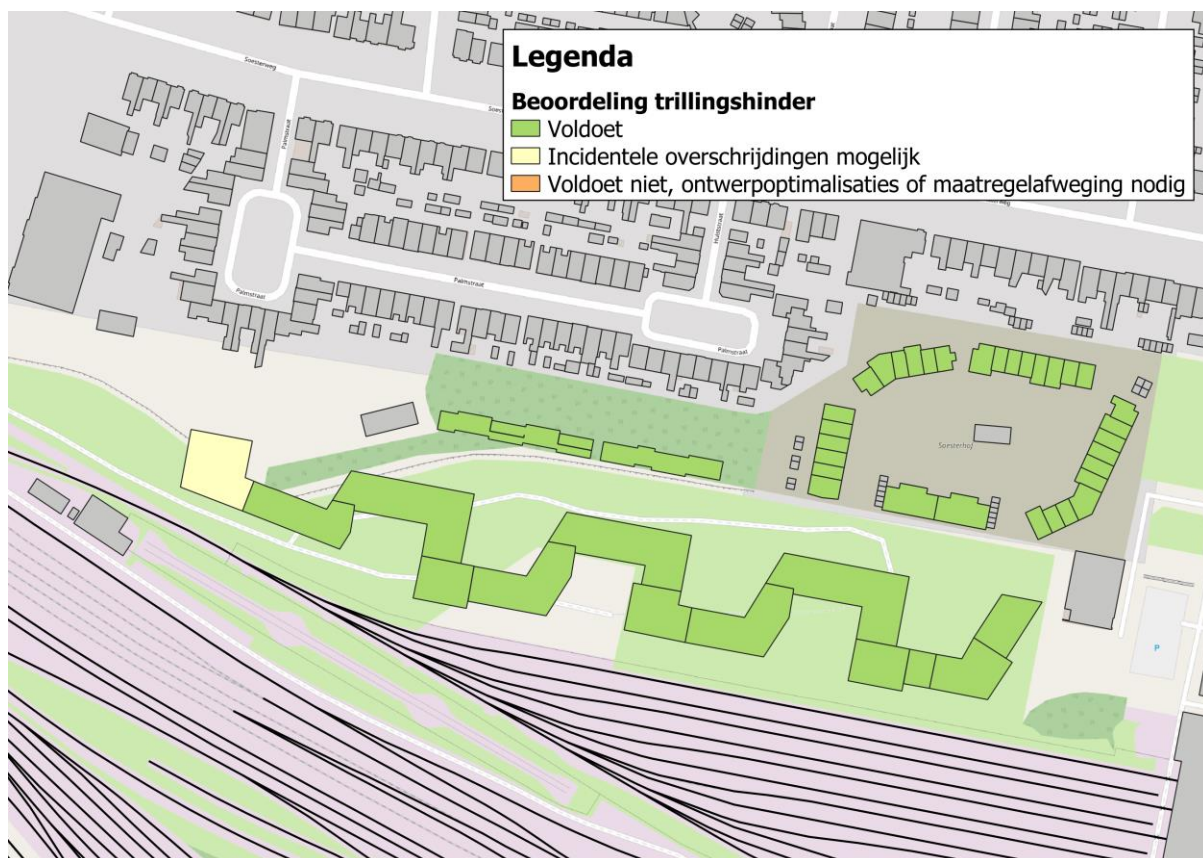
De geplande gebouwen zijn gemodelleerd op basis van de input uit hoofdstuk 2. Het (frequentie-afhankelijke) gedrag van de gebouwen in deelgebied West is weergegeven in bijlage II. Met deze resultaten is bepaald in welke mate de trillingen worden versterkt tussen de huidige meetpunten en de vloeren in de toekomstige woningen. Deze versterking is onder meer afhankelijk van het type constructie en de afstand tot het spoor.

4.2.1 Deelgebied West

De resultaten voor de trillingssterkte V_{max} voor deelgebied West zijn weergegeven in Figuur 10. De trillingsintensiteit is in alle gebouwen in deelgebied West ruim lager dan de streefwaarde (0.05). De beoordeling van de trillingen op de SBR B-richtlijn is weergegeven in Figuur 11.



Figuur 10 Trillingssterkte V_{max} in deelgebied West



Figuur 11 Beoordeling trillingen in deelgebied West

Uit de resultaten blijkt het volgende:

1. De trillingen zijn hoger aan de westzijde van het onderzoeksgebied, dit gebied ligt ook dichterbij het spoor.
2. In geen van de gebouwen wordt op basis van het huidige spoorgebruik en aantal treinen een overschrijding van de SBR B-richtlijn verwacht. In het meest westelijke gebouw zijn incidentele overschrijdingen in de toekomst, na intensivering van het goederenvervoer, echter niet uit te sluiten. Het gaat dan om maximaal 2 treinen per week, dus om incidentele overschrijdingen.

Tenslotte een kanttekening bij de resultaten voor deelgebied West: zoals eerder al is aangegeven, is in deelgebied West momenteel nog sprake van incidentele rangeerbewegingen (soms enkele rangeerbewegingen per dag, maar slechts zeer incidenteel, meeste dagen geen rangeerbewegingen). Deze incidentele rangeerbewegingen zijn niet meegenomen in de bepaling van de trillingssterkte, maar kunnen (indien gehandhaafd in de toekomst) wel voelbaar zijn in de bebouwing dichtbij het spoor.

4.2.2 Deelgebied Midden

In deelgebied Midden bevindt zich geen trillingsgevoelige bebouwing, een toetsing aan de richtlijnen is daarom niet nodig voor dit deelgebied. De trillingen in dit gebied zijn daarom niet afzonderlijk in kaart gebracht, maar op hoofdlijnen meegenomen in het onderzoek voor deelgebied Oost.

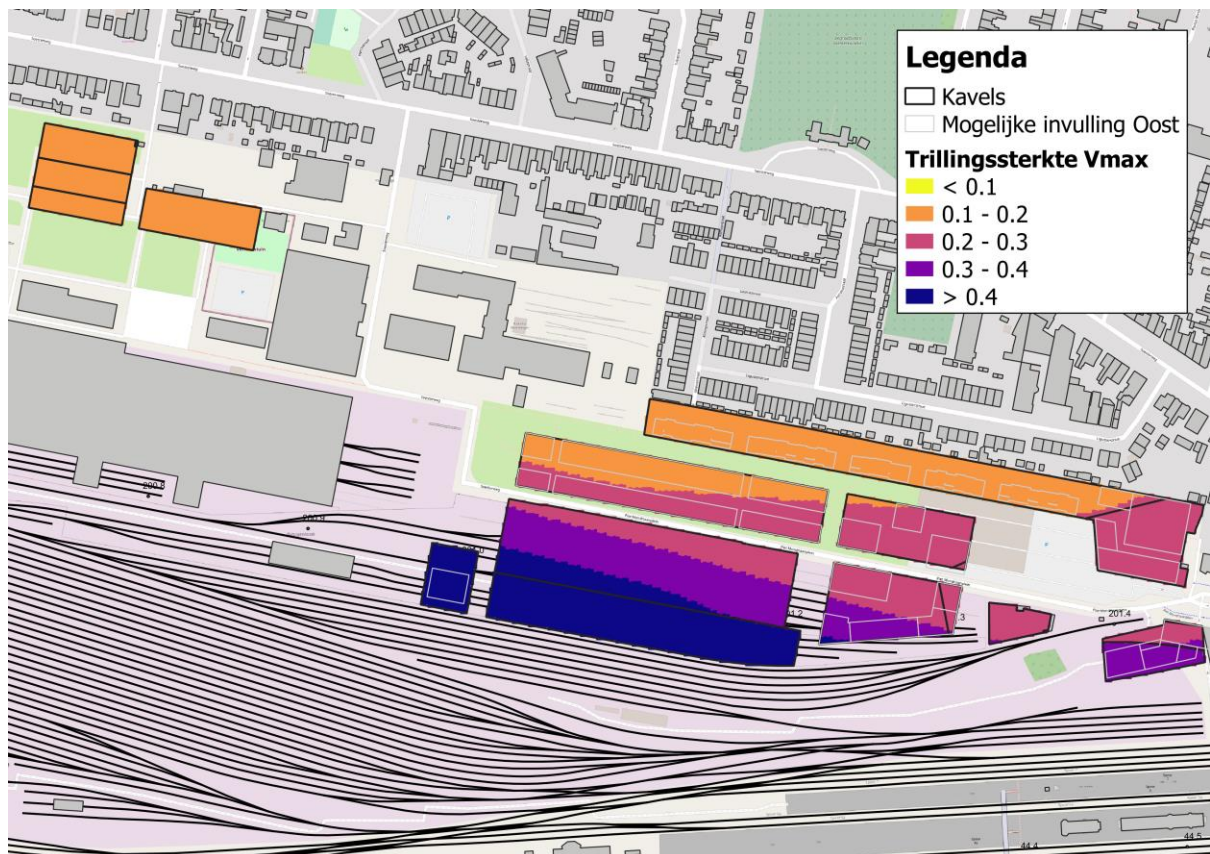
4.2.3 Deelgebied Oost

Voor deelgebied Oost geldt dat de exacte detaillering van de bebouwing nog onbekend is. Daarom zijn meerdere varianten aan bebouwing doorgerekend. De resultaten van deze berekeningen zijn opgenomen in bijlage IV. De belangrijkste conclusies van dit variantenonderzoek zijn:

1. De beukmaat heeft slechts beperkt invloed op de hoogte van de trillingen.
2. De trillingen zijn lager in gebouwen met forse bouwvolumes en bij toenemende bouwhoogte.

Omdat de exacte detaillering van de constructie nog onbekend is, presenteren we in dit onderzoek twee parameters:

1. De bovengrens voor de trillingssterkte V_{max} . Deze is uit de variantenstudie bepaald en geeft aan wat de maximaal te verwachten trillingssterkte is in bijv. grondgebonden laagbouw met een bouwhoogte van ca. 10 meter. Hoe minder trillingsgevoelig de bebouwing wordt gedetailleerd, hoe lager de werkelijke trillingen zullen zijn. Een voorbeeld voor grondgebonden laagbouw is weergegeven in Figuur 12. Kaarten voor gebouwen met 30 en 50 meter bouwhoogte zijn weergegeven in bijlage IV.



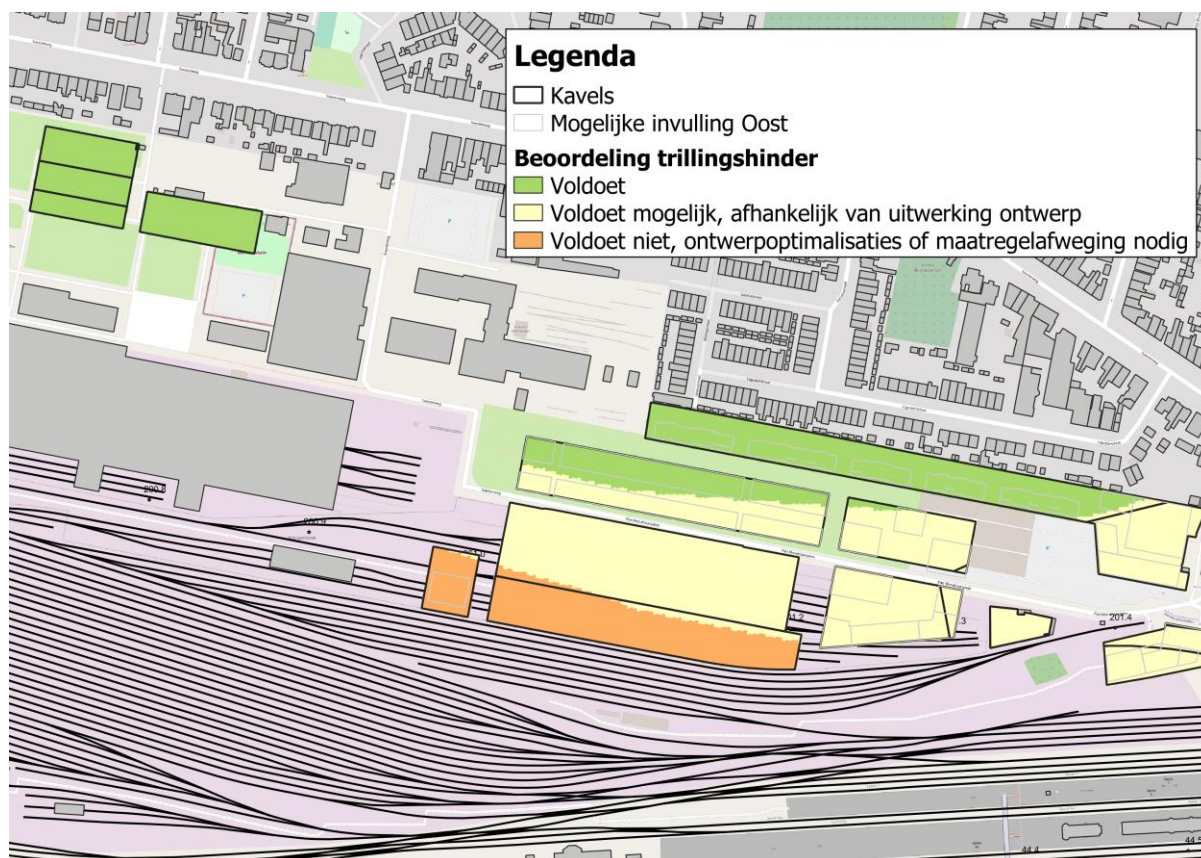
Figuur 12 Bovengrens van de trillingssterkte V_{max} voor grondgebonden laagbouw (ca. 10 m hoog)

2. Een beoordeling van de trillingen aan de SBR B-richtlijn. Hierbij hanteren we drie groepen:

- a. Locatie voldoet aan het beoordelingskader (groen), ongeacht de constructieve uitwerking van de gebouwen.
- b. Locatie kan voldoen aan het beoordelingskader (geel), maar dit is afhankelijk van de constructieve uitwerking van de gebouwen. In deze zone kunnen bijvoorbeeld ontwerpoptimalisaties van de geplande bebouwing nodig zijn. In ieder geval dient in deze zone rekening te worden gehouden met trillingen bij het realiseren van nieuwe gebouwen. Mogelijke optimalisaties voor gebouwen in deze zone zijn het realiseren van gebouwen op een parkeerkelder of zwaardere fundering, het realiseren van grotere bouwvolumes, het toepassen van stijvere (dikkere) vloeren of het toevoegen van extra constructieve dwarswanden.
- c. Locatie kan alleen met maatregelen voldoen aan het beoordelingskader (oranje), in deze zone zijn zwaardere ingrepen dan alleen constructieve optimalisaties nodig om te voldoen aan de streefwaarden uit het beoordelingskader. Mogelijke maatregelen in deze zone zijn, naast bouwkundige optimalisaties, trillingsschermen in de bodem (bijv. damwanden, trillingsschermen van beton of jet-grout) of het afveren van de gebouwen.

Een voorbeeld voor grondgebonden laagbouw (bouwhoogte ca. 10 meter) met bestemming *wonen* is weergegeven in Figuur 13. Kaarten voor gebouwen met 30 en

50 meter bouwhoogte, alsmede voor een beoordeling met bestemming *kantoor*, zijn weergegeven in bijlage IV.



Figuur 13 Beoordeling trillingen voor grondgebonden laagbouw (ca. 10 m hoog), bestemming wonen

Samengevat geldt:

1. Binnen de grenzen van de ontwikkellocaties voldoen de trillingen van het treinverkeer aan de SBR B-richtlijn voor bestemming *kantoor*, maar niet zonder meer voor bestemming *wonen*.
2. Grondgebonden laagbouw met bestemming *wonen* is m.n. dichtbij het rangeerterrein alleen mogelijk met constructieve optimalisaties van het ontwerp en mogelijk met maatregelen. Voor grotere bouwvolumes (minimaal 5 bouwlagen) geldt dat deze, mits qua trillingen goed ontworpen, naar verwachting wel voldoen aan het beoordelingskader voor *wonen*.

4.3 Maatregelen

4.3.1 Analyse per deelgebied

T.a.v. het wel of niet treffen van maatregelen geldt het volgende:

1. In deelgebied Oost is de bebouwing nog onvoldoende ontwikkeld om een zinvolle maatregelbeschouwing uit te voeren. Op basis van de resultaten van dit onderzoek adviseren we wel om de volgende handvatten mee te nemen in de detaillering van de plannen:

- a. Plan vooral grotere gebouvvolumes in de zone dichtbij het spoor, bij voorkeur met een zware fundering (bijv. parkeerkelder)
 - b. Probeer in de verdere uitwerking van de plannen (constructief ontwerp) de gebouwen zo stijf mogelijk te construeren (stijver dan bijv. vanuit constructief oogpunt noodzakelijk is). Daardoor zijn de gebouwen minder gevoelig voor trillingen.
 - c. Voer tijdens het constructieve uitwerkingsproces een gedetailleerdere toets op trillingen uit op basis van het dan liggende ontwerp. We adviseren om, gezien de vrij forse variatie tussen de twee meetpunten in deelgebied Oost, daarbij aanvullende metingen uit te voeren in dit deelgebied. Indien uit dit onderzoek blijkt dat de trillingen niet voldoen aan het beoordelingskader, dan kunnen aanvullende maatregelen, zoals het afveren van bebouwing of het verzwaren van de fundering, worden afgewogen op doelmatigheid.
2. In deelgebied Midden is geen trillingsgevoelige bebouwing gepland, dus hier zijn ook geen maatregelen nodig tegen trillingen.
 3. In deelgebied West geldt dat op basis van het huidige spoorgebruik en aantal treinen wordt voldaan aan het beoordelingskader. Daarom is een maatregelafweging niet strikt noodzakelijk. Omdat overschrijdingen niet volledig zijn uit te sluiten bij intensivering van het goederenvervoer hebben we toch een maatregelafweging uitgevoerd (in het kader van een toekomstvast plan). Deze afweging beschrijven we in de volgende subparagrafen.

4.3.2 Analyse voor deelgebied West

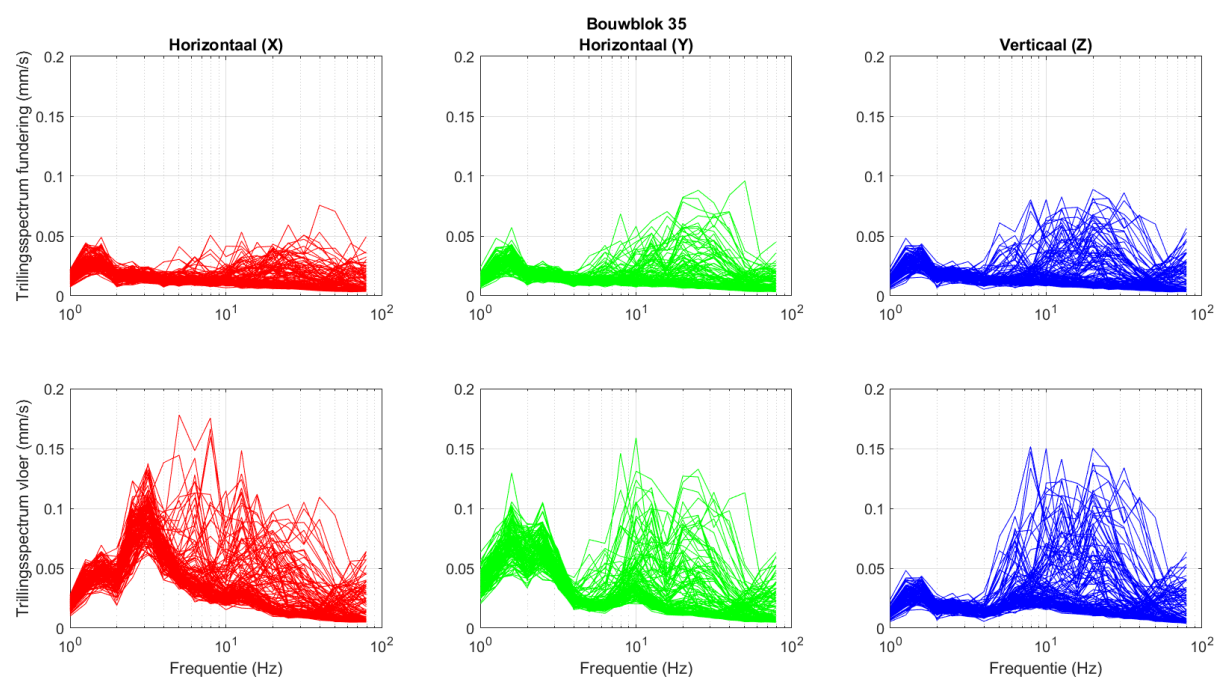
Voor de afweging van maatregelen geeft bijlage 5 van de SBR B-richtlijn handvatten. Deze bijlage classificeert de trillingen in het plangebied als matige hinder. Vervolgens geeft deze bijlage aan dat matige hinder kan worden geaccepteerd onder een aantal voorwaarden:

1. De mate waarin de trillingssterkte voorkomt. Hiervoor geldt dat de trillingsintensiteit V_{per} een goede indicatie is. Die is laag ($V_{per} < 0.04$, dus lager dan de streefwaarde van 0.05). Verder gaat het om maximaal 2 overschrijdingen per week, die alleen optreden als deze treinen met een afwijkende trillingssterkte 's nachts gaan rijden. Op dit moment rijden deze treinen overdag, en is er geen sprake van een overschrijding. In de toekomst, met de voorziene toename van het goederenvervoer, zouden deze treinen ook 's nachts kunnen passeren. Er is dus maximaal sprake van incidentele overschrijdingen, die het achterwege laten van een maatregel zouden kunnen rechtvaardigen.
2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. Daar is hier geen sprake van.
3. De mogelijkheid tot het treffen van reducerende maatregelen. Het is conform bestaande jurisprudentie gebruikelijk om hierbij een afweging te maken tussen de kosten en het effect van de maatregelen, maar ook aspecten als duurzaamheid en impact op de omgeving kunnen worden meegenomen in deze afweging.

Omdat voorwaarde 2 niet van toepassing is, gaan we hierna, na een analyse van de trillingen, in op maatregelen om de trillingen te reduceren.

4.3.3 Analyse resultaten

Om te bepalen welke trillingsrichting en trillingsfrequenties in de gebouwen maatgevend zijn, is een nadere analyse uitgevoerd van de verwachte trillingen. De berekende trillingsspectra op de fundering en op het midden van het vloerveld van het bouwblok met incidentele overschrijdingen zijn weergegeven in Figuur 14.



Figuur 14 Trillingsspectra op de fundering (boven) en op de hoogste verdieping (onder) voor het bouwblok met incidentele overschrijdingen in deelgebied West

Uit Figuur 14 volgt dat de hoogste trillingen optreden in horizontale X-richting (dwars op het gebouw, loodrecht op het spoor), met name als gevolg van rotatie en buiging van het pand (hoogte en diepte van het pand vallen ongunstig samen met de trillingsgolven in de bodem). De trillingen zijn hierdoor vooral hoog bij de buigingsfrequentie van het gebouw (2.5 tot 3 Hz), maar ook bij hogere frequenties is nog veel trillingsenergie aanwezig. Maatregelen die genomen worden moeten daarom effectief zijn tegen een breed spectrum van trillingen. In de volgende subparagrafen wordt ingegaan op mogelijke maatregelen aan de trillingsbron, in de bodem of aan de gebouwen.

4.3.4 Maatregelen aan de trillingsbron

De meest effectieve manier om de trillingen te reduceren, is het nemen van maatregelen aan de trillingsbron (het spoor of de treinen), bijvoorbeeld door het toepassen van een betonplaat onder het spoor (effectief tegen laagfrequente trillingen) of door strengere onderhoudseisen aan het spoor te stellen. Deze maatregelen vallen echter buiten de scope van dit onderzoek, omdat deze maatregelen allemaal buiten het plangebied moeten worden getroffen. Bovendien brengen dergelijke maatregelen zeer hoge kosten met zich mee (o.a. door stagnatie van het treinverkeer gedurende langere tijd of hogere exploitatiekosten).

4.3.5 Maatregelen in de bodem

Bij maatregelen in de bodem kan gedacht worden aan het toevoegen van obstakels in de bodem, die ervoor zorgen dat de gebouwen worden afgeschermd. Voorbeelden zijn het toevoegen van een spoorloot, een trillingsscherp van piepschuim (EPS), beton, jet-grout (soil-mix methode voor beton) of een damwand. Nadeel van deze maatregelen is dat deze pas bij grote afmetingen (lees: grote diepte, meer dan 20 meter) effectief zijn tegen de laagfrequente (en dus lange) trillingsgolven die voor de hoogste trillingen zorgen. Bovendien zijn deze maatregelen niet aanpasbaar aan toekomstige situaties.

Gezien de beperkte effectiviteit van deze maatregelen staan de kosten niet in relatie tot het effect van deze maatregelen, en nog veel minder in relatie tot het zeer beperkte aantal overschrijdingen. Maatregelen in de bodem worden daarmee niet doelmatig geacht³.

4.3.6 Maatregelen aan de gebouwen

Bij maatregelen aan de gebouwen is een breed scala aan maatregelen mogelijk. Die variëren van het breder maken van het bouwblok, het creëren van meer stijfheid in horizontale richting door extra betonnen dwarswanden aan te brengen tot het zwaarder maken van de fundering. Maatregelen zoals het afveren van de bebouwing zijn niet effectief tegen de laagfrequente trillingen die hier zijn gemeten. Het globale effect en de kosten van de mogelijke maatregelen aan het bouwblok zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Mogelijke maatregelen aan de gebouwen

Maatregel	Effect	Kosten ⁴
Stijvere constructie	10 – 25%	< 4% SK
Breder maken van bebouwing in dwarsrichting	5 – 15%	10 – 20% SK
Toepassen van dempende materialen	10 – 20%	< 5% SK
Ontkoppelen van de vloeren	0 %	2 – 4% SK
Ontkoppelen van de fundering (afveren)	0 %	4 – 6% SK
Inpakken van de fundering	0 %	1 – 3% SK
Zwaardere fundering	10 – 20%	2 – 5% SK

Door het gebouw uit te voeren met een zwaardere (dikkere) fundering (bijv. door de parkeergarage onder het gebouw verder door te trekken richting de westzijde), het gebouw stijver te construeren (bijv. dikkere vloeren, 260/250 i.p.v. 200 mm en meer of stijvere dwarswanden), of door het gebruik van meer dempende materialen (bijv. kalkzandsteen, of liever nog metselwerk) i.p.v. prefab beton, is het mogelijk om te voldoen aan het beoordelingskader. Dergelijke maatregelen brengen wel additionele kosten met zich mee.

³ ProRail hanteert voor het treffen van trillingsmaatregelen vaak een bedrag van € 47.000 in bestaande situaties. De kosten voor maatregelen in de bodem zijn ruim hoger dan dit bedrag. Bovendien zal een dergelijke kostenverhoging leiden tot onverkoopte woningen, daarom wordt bij nieuwbouw vaak een (veel) lager (projectafhankelijk te motiveren) bedrag gehanteerd.

⁴ SK = Stichtingskosten

Gezien het feit dat er op basis van het huidige aantal treinen geen overschrijdingen zijn, en er in de toekomst hooguit een kans is op incidentele overschrijdingen, worden ook dergelijke maatregelen (tenzij eenvoudig inpasbaar in het ontwerp) niet doelmatig geacht.

4.3.7 Afweging van maatregelen

Formeel wordt in het gehele deelgebied voldaan aan het beoordelingskader. Wel kan in de toekomst, na intensivering van het goederenverkeer, sprake zijn van incidentele overschrijdingen (maximaal 2 keer per week). Het gaat om beperkte overschrijdingen van minder dan 10 procent van de streefwaarde uit de SBR B-richtlijn. De trillingen voldoen wel ruim aan de streefwaarden voor de dag, en ook aan de streefwaarden voor bestaande situaties uit de SBR B-richtlijn, waarin een zeker gewinningseffect is meegenomen.

Omdat in de toekomst mogelijk niet wordt voldaan aan het beoordelingskader, is op basis van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn een maatregelafweging uitgevoerd. Hieruit volgt dat maatregelen aan het spoor gezien de hoge kosten niet doelmatig zijn en dat maatregelen in de bodem gezien de incidentele overschrijdingen, het geringe effect en de hoge kosten van deze maatregelen evenmin doelmatig zijn. Wel adviseren wij om bij de constructieve uitwerking van het ontwerp van het meest westelijke bouwblok te onderzoeken of het mogelijk is om dit bouwblok minder gevoelig voor trillingen te construeren, door een of meer van de volgende aanpassingen door te voeren:

- Het toepassen van een zwaardere fundering (in dit onderzoek is gerekend met een standaard palenfundering). Door de fundering dikker of groter (bijv. i.c.m. parkeergarage) uit te voeren, nemen de trillingen af.
- Het toepassen van een stijvere vloer, bijvoorbeeld door te werken met een kortere beukmaat of een dikkere vloer (eigenfrequentie bij voorkeur hoger dan 10 Hz).
- Het toepassen van meer of stijvere dwarswanden, om de horizontale stijfheid van het gebouw te vergroten.

Overigens geldt dat ook zonder bovenstaande aanpassingen geen onacceptabele situatie ontstaat in het licht van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn, gezien het feit dat het gaat om hooguit incidentele overschrijdingen in de toekomst (maximaal 2 per week).

4.3.8 Onzekerheden in het onderzoek

Dit onderzoek kent een aantal onzekerheden, hiervoor geldt het volgende:

1. Ten aanzien van de trillingsbron: de natuurlijke variatie als gevolg van spooronderhoud en de temperatuur kan zorgen voor zo'n 30% variatie in de trillingen, afhankelijk van de spoorconstructie en de bodemopbouw. Er is gemeten in een klimatologisch als normaal te typeren periode. Er is geen informatie bekend over de huidige status van de spoorligging, maar er is gebruik gemaakt van een groot aantal meetpunten waarmee eventuele variaties in spoorligging zijn meegenomen in de analyses. Er is op basis van bovenstaande informatie geen reden om te twijfelen aan de representativiteit van de berekeningen voor de toekomstige trillingen. Bovendien geldt dat deze variatie op grotere afstanden van het spoor, zoals in het huidige plangebied, vaak kleiner is.
2. Ten aanzien van de bodem geldt dat met name op korte afstand tot het spoor variaties in de trillingen mogelijk zijn door lokale variaties in de bodem. Omdat het bouwplan

zich op grotere afstand van het spoor bevindt, is de invloed van die lokale variaties beperkt.

3. Ten aanzien van de gebouwen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en definitief ontwerp). Bovendien is het dynamische gedrag van bijvoorbeeld beton afhankelijk van de mate van gescheurdheid van het beton en zijn er natuurlijke variaties in materiaalgedrag (van bijvoorbeeld hout, metselwerk en beton). In de berekeningen is gerekend met een verwachtingswaarde van de trillingen op basis van een aan de hand van praktijkmetingen geijkt rekenmodel. Hiermee wordt een resultaat verkregen dat representatief is voor de toekomstige situatie.

Bovenstaande onzekerheden geven geen aanleiding tot een andere maatregelafweging.

5 Conclusies en aanbevelingen

In het voorliggende onderzoek is de trillingssituatie in het plangebied van de Wagenwerkplaats in Amersfoort in beeld gebracht. Hiervoor is een meetonderzoek uitgevoerd in het plangebied en zijn berekeningen uitgevoerd om vast te stellen welke gebouwen (voor de al uitgewerkte deelgebieden West en Midden) en in welke delen van de kavels (voor het nog niet uitgewerkte deelgebied Oost) zonder aanvullende trillingsmaatregelen kunnen worden gerealiseerd.

De conclusies van het onderzoek zijn als volgt:

1. Voor deelgebied West geldt dat op basis van het huidige aantal treinen wordt voldaan aan de SBR B-richtlijn. In het meest westelijke bouwblok zijn incidentele overschrijdingen in de toekomst, na intensivering van het goederenvervoer, echter niet volledig uit te sluiten. Het gaat dan om maximaal 2 treinen per week, dus om incidentele overschrijdingen.
2. Voor deelgebied Midden geldt dat hier geen trillingsgevoelige bebouwing is gepland.
3. Voor deelgebied Oost geldt dat de trillingen van het treinverkeer voldoen aan de SBR B-richtlijn voor bestemming *kantoor*, maar niet zonder meer voor bestemming *wonen*. Om te voldoen aan het beoordelingskader is grondgebonden laagbouw met bestemming *wonen* m.n. dichtbij het rangeerterrein alleen mogelijk met constructieve optimalisaties van het ontwerp en mogelijk met maatregelen. Voor grotere bouwvolumes (minimaal 5 bouwlagen) geldt dat deze, mits qua trillingen goed ontworpen, naar verwachting wel voldoen aan het beoordelingskader voor *wonen*.

Omdat voor deelgebied West niet volledig wordt voldaan aan het beoordelingskader, is een maatregelafweging uitgevoerd. Hieruit volgt dat:

1. Maatregelen aan het spoor gezien de hoge kosten niet doelmatig zijn. Bovendien vallen deze maatregelen buiten het plangebied.
2. Maatregelen in de bodem hoge kosten met zich meebrengen en niet effectief en dus niet doelmatig zijn.
3. Maatregelen aan de bebouwing wel kunnen zorgen voor ook in de toekomst voldoen aan het beoordelingskader, maar wel extra kosten met zich meebrengen. We adviseren om bij de verdere constructieve uitwerking van het ontwerp van het meest westelijke bouwblok te onderzoeken of het mogelijk is om dit bouwblok minder gevoelig voor trillingen te construeren, door deze bijvoorbeeld met een zwaardere fundering, dikkere vloer of stijvere (of meer) dwarswanden uit te voeren.

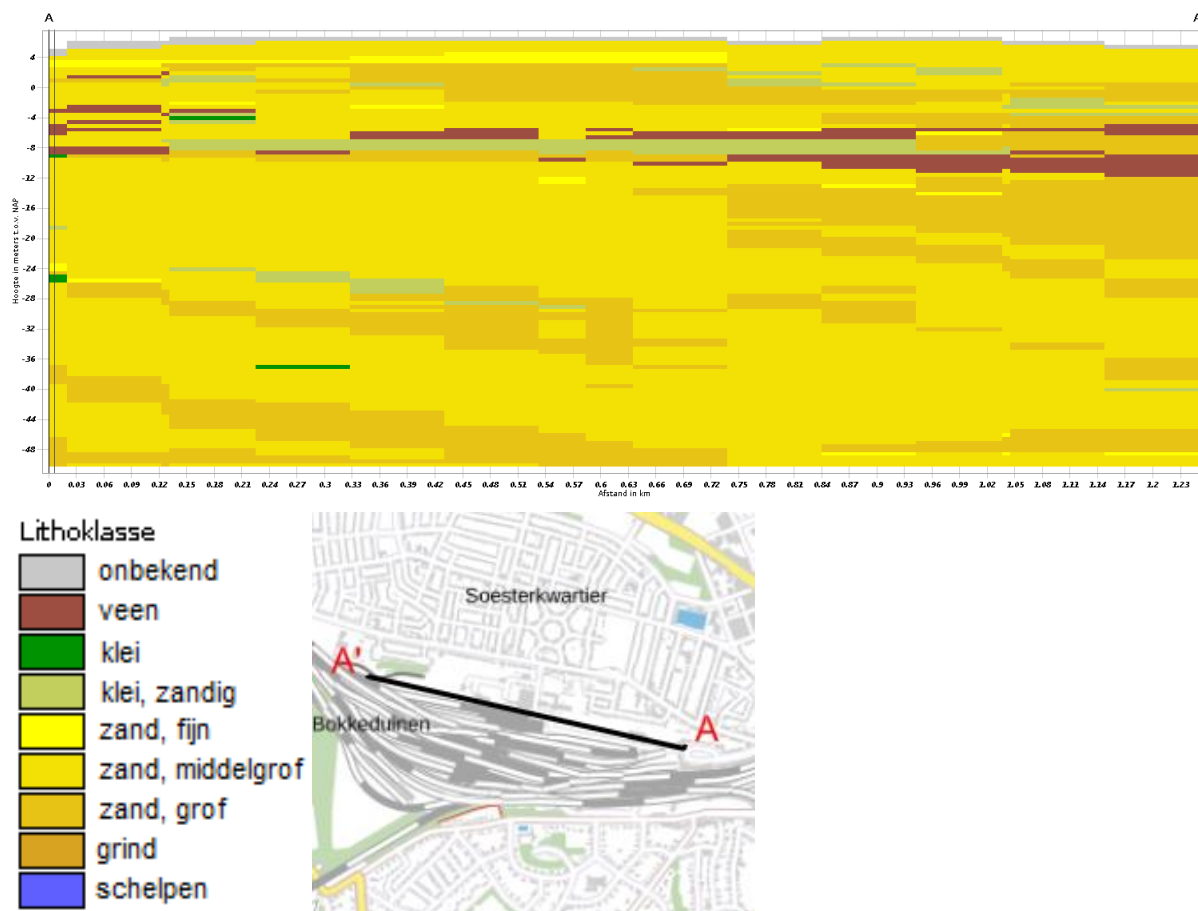
Overigens geldt dat ook zonder bovenstaande aanpassingen geen onacceptabele situatie ontstaat in het licht van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn, gezien het feit dat het gaat om hooguit incidentele overschrijdingen in de toekomst (maximaal 2 per week).

Voor de bebouwing in deelgebied Oost adviseren we wel om de volgende handvatten mee te nemen in de detaillering van de plannen:

1. Plan vooral grotere gebouwvolumes in de zone dichtbij het spoor, bij voorkeur met een zware fundering (bijv. parkeerkelder)
2. Probeer in de verdere uitwerking van de plannen (constructief ontwerp) de gebouwen zo stijf mogelijk te construeren (stijver dan bijv. vanuit constructief oogpunt noodzakelijk is). Daardoor zijn de gebouwen minder gevoelig voor trillingen.
3. Voer tijdens het constructieve uitwerkingsproces een gedetailleerdere toets op trillingen uit op basis van het dan liggende ontwerp. We adviseren wel om, gezien de vrij forse variatie tussen de twee meetpunten in deelgebied Oost, daarbij om aanvullende metingen uit te voeren in dit deelgebied. Indien uit dit onderzoek blijkt dat de trillingen niet voldoen aan het beoordelingskader, dan kunnen aanvullende maatregelen, zoals het afveren van bebouwing of het verzwaren van de fundering, worden afgewogen op doelmatigheid.

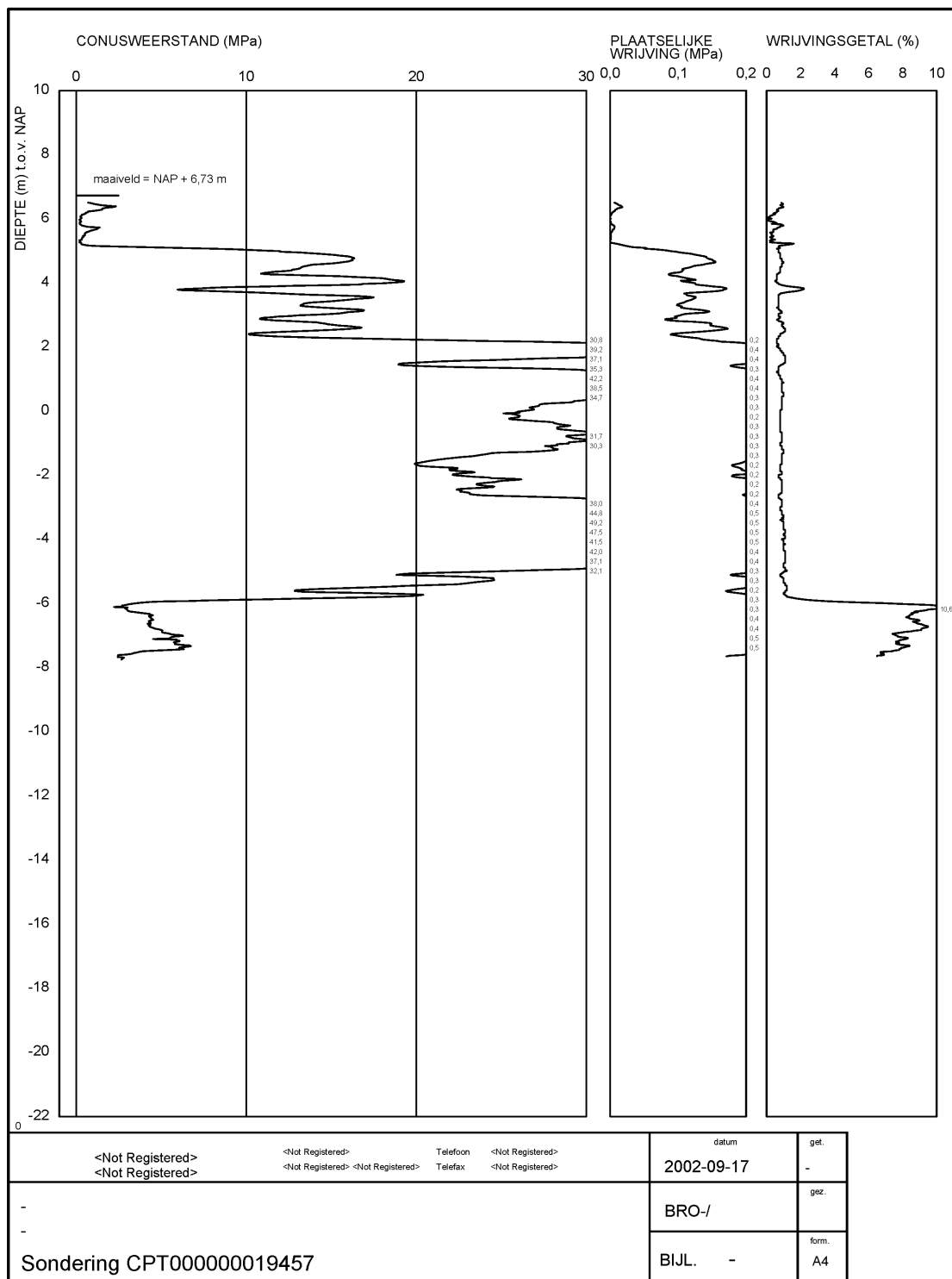
Bijlage geotechnisch bodemonderzoek

Deze bijlage bevat geotechnische achtergrondinformatie. Deze informatie is gebruikt in het rekenmodel om bijvoorbeeld de uitdemping van de trillingen met de afstand en het gedrag van de bebouwing te bepalen. De bodemopbouw op basis van het GeoTop-model is weergegeven in Figuur 13. Hier is te zien dat de bodem is opgebouwd uit zandlagen. Op enkele meters diepte komen lokaal wat slappere lagen (klei, leem of veen) voor. De zandige bodem zorgt ervoor dat de trillingen slecht uitdempem met de afstand.



Figuur 15 Bodemopbouw in onderzoeksgebied

Een representatieve sondering uit de oostkant van het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur 16.



Figuur 16 Representatieve sondering CPT000000019457



Bijlage toelichting op rekenmodel

Toelichting rekenmodel

In dit rapport is gebruik gemaakt van het door We-Boost Data ontwikkelde rekenmodel Buildyn om de trillingen in de geplande bebouwing te berekenen. Dit rekenmodel bevat een aantal modules:

1. Een module om op basis van een ruimtelijk GIS-model de trillingen in een plangebied te berekenen. Deze module maakt op basis van gegevens uit het Geluidregister Spoor, de lokale bodemopbouw en situatie en ruim 400 metingen in gebouwen in heel Nederland, een berekening van de verwachte trillingen in gebouwen op basis van een aantal kenmerken.
2. Een module op basis van een zogenaamd beam-element model (BEM) waarin gebouwen gemodelleerd en doorgerekend worden. Deze module wordt gebruikt om nauwkeurige trillingspredicties in gebouwen op te stellen, maar is in dit onderzoek niet gebruikt omdat er geen specifieke gegevens van de bebouwing beschikbaar zijn. Deze module is geijkt met praktijkresultaten uit ruim 200 metingen in gebouwen.

In het voorliggende onderzoek is gebruik gemaakt van beide modules, deze worden in deze bijlage nader toegelicht.

Opzet GIS-module rekenmodel

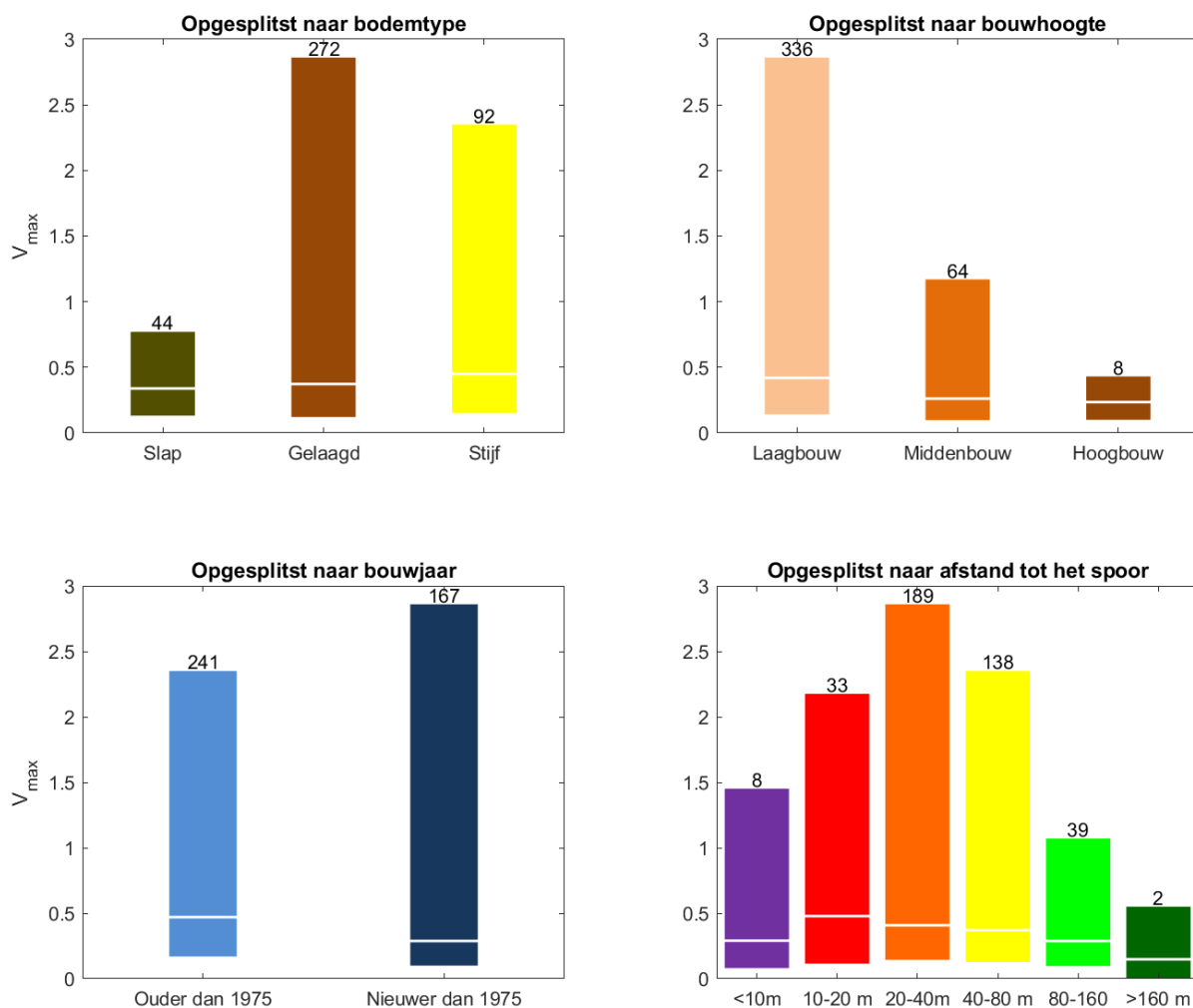
De GIS-module in Buildyn berekent de trillingen van trein-, metro-, tram- en wegverkeer op een willekeurig punt op basis van een rekenmodel gebaseerd op een data-analyse met niet-lineaire regressie op ruim 400 metingen die in Nederland zijn uitgevoerd door diverse onderzoeks- en adviesbureaus, en waarvan de meetresultaten publiek beschikbaar zijn (bijvoorbeeld via rapportages op www.ruimtelijkeplannen.nl). Hiervoor is een database aangelegd waarbij de kenmerken van deze metingen (bijvoorbeeld gebouweigenschappen (zoals bouwjaar, hoogte, type constructie, type vloer), bodemeigenschappen (zoals type bodem, geotechnische gegevens, hoogte van het terrein) en eigenschappen van de trillingsbron (zoals type voertuigen, rijsnelheid, aanwezigheid van wissels of drempels, type spoor- of wegconstructie) zijn vastgelegd.

Op deze database is met kunstmatige intelligentietechnieken (supervised learning en random forest) een niet-lineaire regressie uitgevoerd, waarmee een algoritme is gemaakt dat voor een willekeurige, niet-gemeten situatie de trillingen berekent op basis van de eigenschappen van die locatie. Een aantal tussenresultaten van het model op de trainingsset van ruim 400 gebouwen is weergegeven in Figuur 15 voor een situatie langs het spoor. In deze figuur is het volgende te zien:

1. Bodem: de breedte van de trillingen (weergegeven als de balk) is het grootst bij een gelaagde bodem. Dat is verklaarbaar omdat de onzekerheid in de bodemopbouw daar vaak het grootst is. Ook bij zandbodems is een grote variatie zichtbaar, dat komt omdat de ligging van het spoor en de aanwezigheid van bijvoorbeeld wissels en slechte overwegen daar veel meer invloed heeft dan op een slappe bodem. De mediaan van

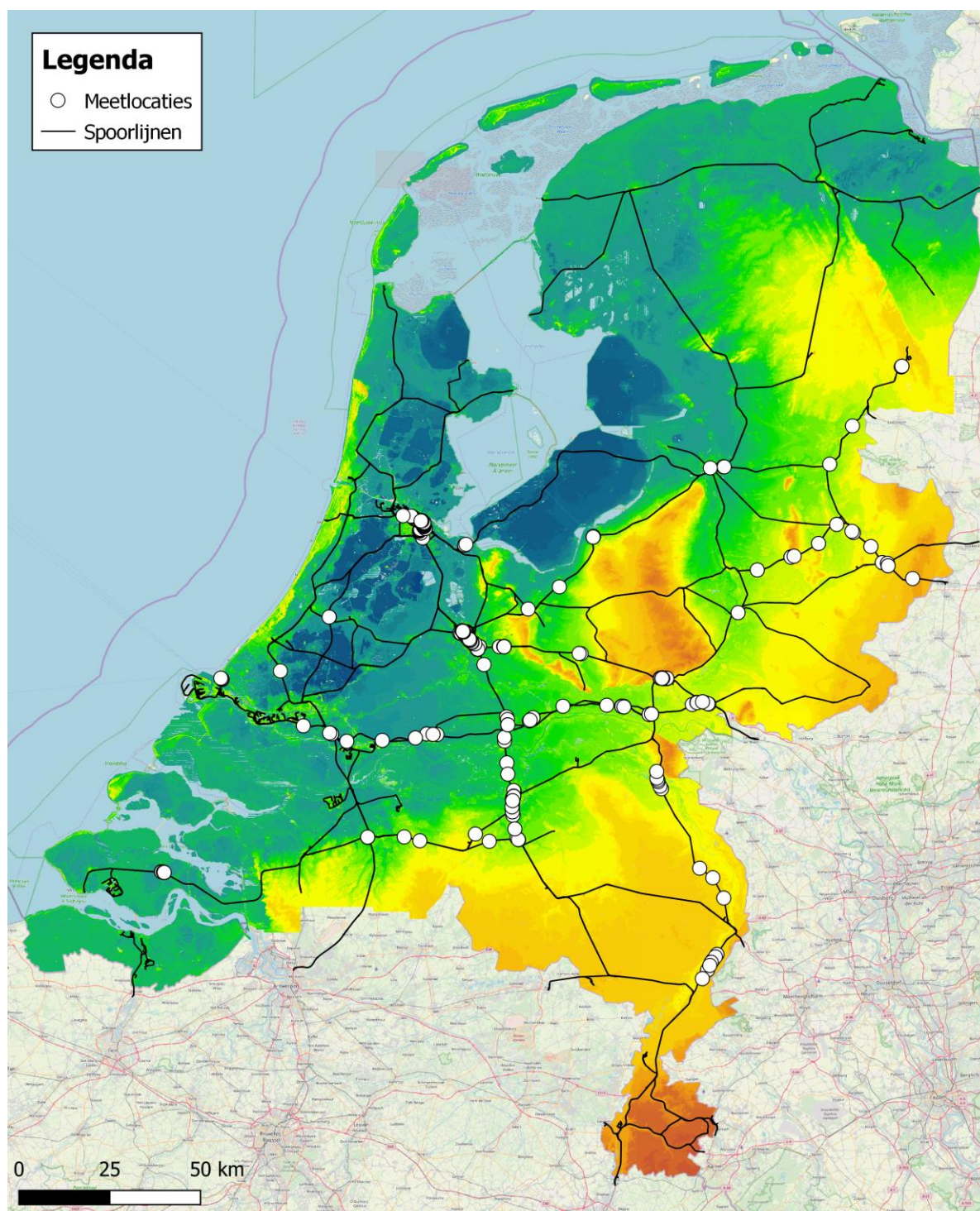
de trillingen (de witte lijn) verschilt niet significant tussen de verschillende bodemtypes.

2. Gebouwhoogte: de trillingen nemen significant af in hogere gebouwen. Dit komt vooral door een stijvere constructie en grotere massa, waardoor de gebouwen minder snel in beweging worden gebracht.
3. Bouwjaar: de mediane of middelste trillingsniveaus (weergegeven met de witte lijn) zijn bij oude gebouwen significant hoger dan bij nieuwe gebouwen. Dit komt doordat oude gebouwen vaak houten vloeren hebben, en daardoor gevoeliger zijn voor trillingen. Er is geen significant verschil in de maximale trillingssterkte tussen nieuwe en oude gebouwen. Dit komt vooral doordat bij enkele nieuwe gebouwen dichtbij een spoorwegovergang een significant afwijkend trillingsniveau is gemeten.
4. Afstand tot het spoor: zoals verwacht nemen de trillingen af met de afstand tot het spoor. Duidelijk zichtbaar is wel dat op korte afstand tot het spoor niet altijd de hoogste trillingen optreden (doordat de trillingsgolven daar nog niet goed zijn ontwikkeld) en dat ook op grote afstand (meer dan 160 meter) vrij hoge trillingen kunnen optreden.



Figuur 17 Enkele classificaties van de metingen zoals gebruikt in Buildyn

De locaties van de gebruikte metingen zijn weergegeven in Figuur 18. Er is een goede geografische spreiding in het midden van het land, in de noordelijke provincies zijn minder meetlocaties.

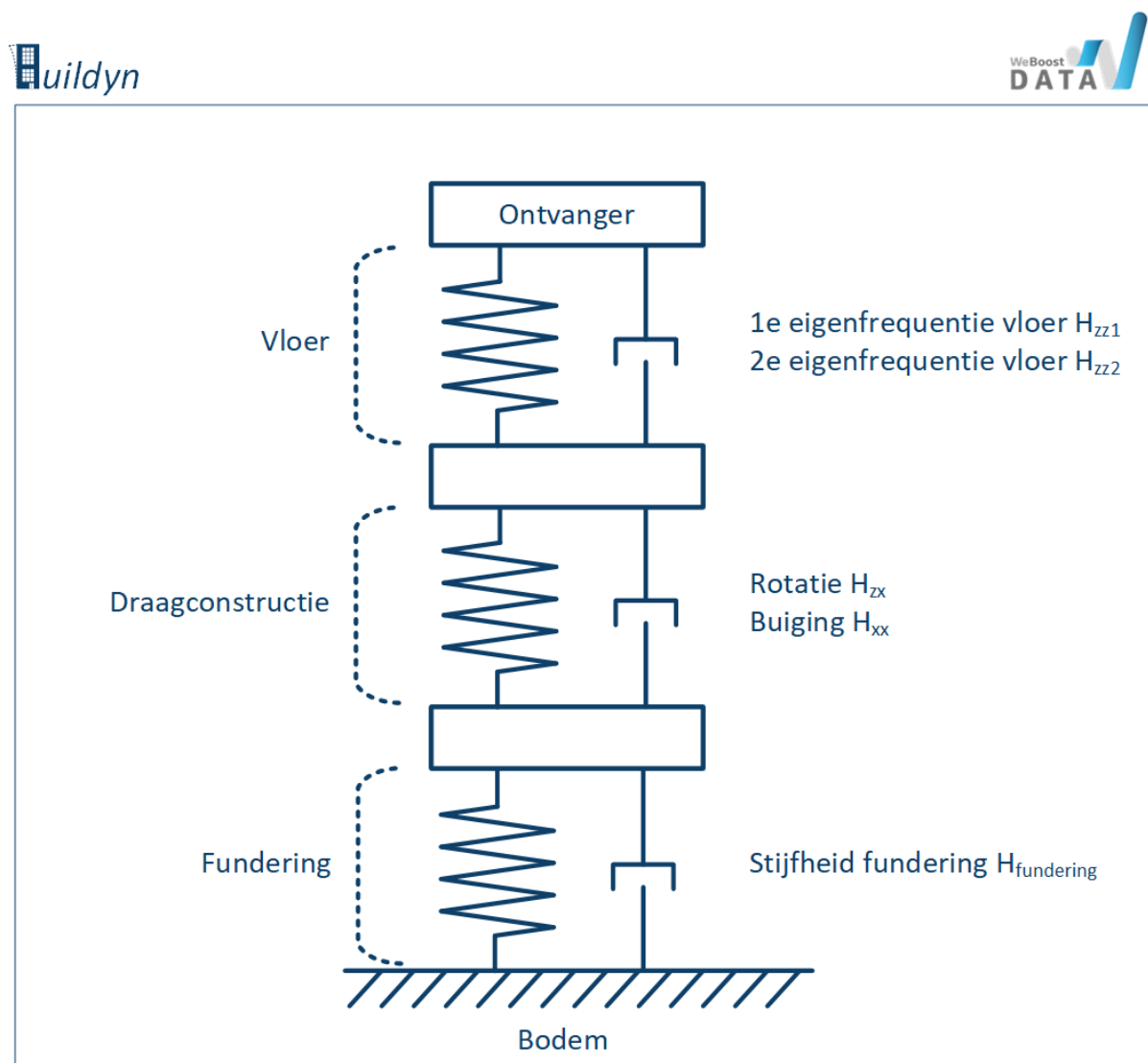


Figuur 18 Locaties van metingen gebruikt in Buildyn, geprojecteerd op een hoogtekaart van Nederland

Opzet BEM-modules rekenmodel

In dit rapport is daarnaast gebruik gemaakt van het door We-Boost Data ontwikkelde rekenmodel Buildyn om de trillingen in de geplande bebouwing te berekenen. Buildyn is een zogenaamd beam-element model (BEM) waarin een gebouw gemodelleerd en doorgerekend wordt. De resultaten van het model zijn geijkt met praktijkresultaten uit ruim 200 metingen in gebouwen. Dit model bestaat uit een aantal modules, deze worden in deze bijlage kort toegelicht.

In Buildyn wordt een gebouw gemodelleerd door middel van gekoppelde massa-veersystemen, zie Figuur 19. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 19, worden in deze bijlage nader toegelicht.



Figuur 19 Principe van Buildyn met een gebouw als gekoppeld massaveersysteem. Rechts de verschillende componenten van het rekenmodel

Fundering

De fundering van een gebouw kan de trillingen uitdempen. De invloed van de fundering op de trillingen is afhankelijk van een aantal parameters:

- Type fundering (op staal, op palen, oude strokenfundering)
- Afmetingen en gewicht van het gebouw
- Bodem waarop het gebouw staat

Met name boven de 10 Hz kunnen trillingen worden uitgedempt door de fundering.

In Buildyn wordt de invloed van de stijfheid van het gebouw als geheel (de zogenaamde rigid-body-mode) verdisconteerd in de stijfheid van de fundering. Overige stijfheidseffecten worden meegenomen in de draagconstructie

Draagconstructie

De trillingen worden door de draagconstructie vaak versterkt. Hierbij zijn meerdere effecten te onderscheiden, waarbij met name rotatie van het gebouw als geheel (op de ondergrond) en doorbuiging een rol spelen.

Het principe van rotatie is rechts weergegeven. Verticale trillingsgolven zorgen voor rotatie van het gebouw, waardoor met name in hogere gebouwen horizontale trillingen ontstaan.

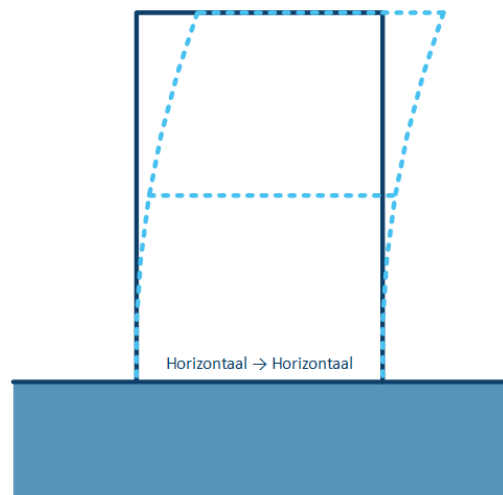
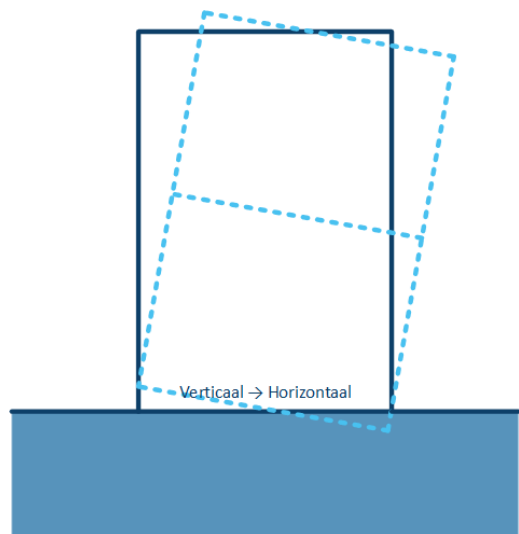
Dit effect wordt in Buildyn weergegeven als H_{zx} , en is afhankelijk van:

- Afmetingen van het gebouw (breedte, lengte, hoogte)
- Gewicht van het gebouw
- Type en gewicht van de fundering
- Stijfheid van de ondergrond

Het tweede principe, dat van doorbuiging van het gebouw, is rechts weergegeven. Hierbij zijn met name de horizontale trillingsgolven maatgevend, die bij slappere gebouwen zorgen voor doorbuiging van het gebouw, en daarmee voor horizontale trillingen hoger in het gebouw.

Dit effect wordt in Buildyn weergegeven als H_{xx} , en is afhankelijk van:

- Afmetingen van het gebouw (breedte, lengte, hoogte)



- Constructietype (stijfheid, starheid van verbindingen, open ruimtes)
- Gebruikte materialen

Vloeren

Trillingen worden doorgaans als maatgevend ervaren in het midden van de vloeren, waar de doorbuiging het grootst is en de laagste eigenfrequentie optreedt. In specifieke gevallen, met name op stijve zandgronden en bij hoge trillingsfrequenties, kan ook de zogenaamde tweede buigmodus van een vloer een rol spelen. In Buildyn worden daarom beide effecten gemodelleerd.

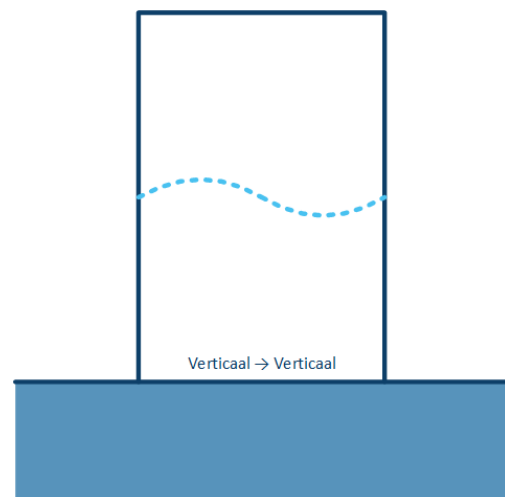
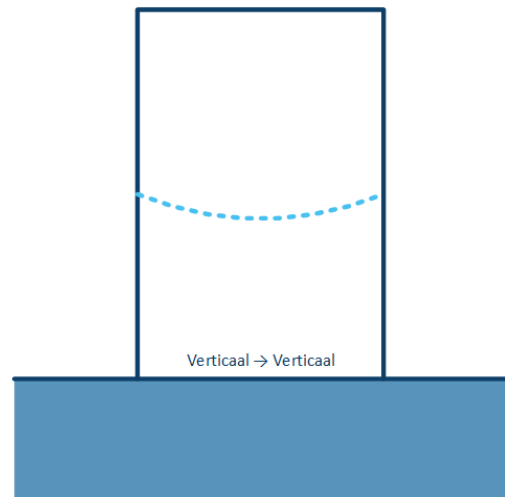
De eerste buigmodus van de vloer (bij de eerste eigenfrequentie) is simpele doorbuiging, zoals weergegeven in de principeschets rechts. Met name de eigenfrequentie (de frequentie waarvoor de vloer gevoelig is) en de damping bepalen in hoeverre de trillingen worden opgeslingerd. De trillingen zijn het hoogst in het midden van de vloer.

Dit effect wordt in Buildyn weergegeven als H_{zz1} , en is afhankelijk van:

- Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- Afmetingen van de vloer
- Type oplegging

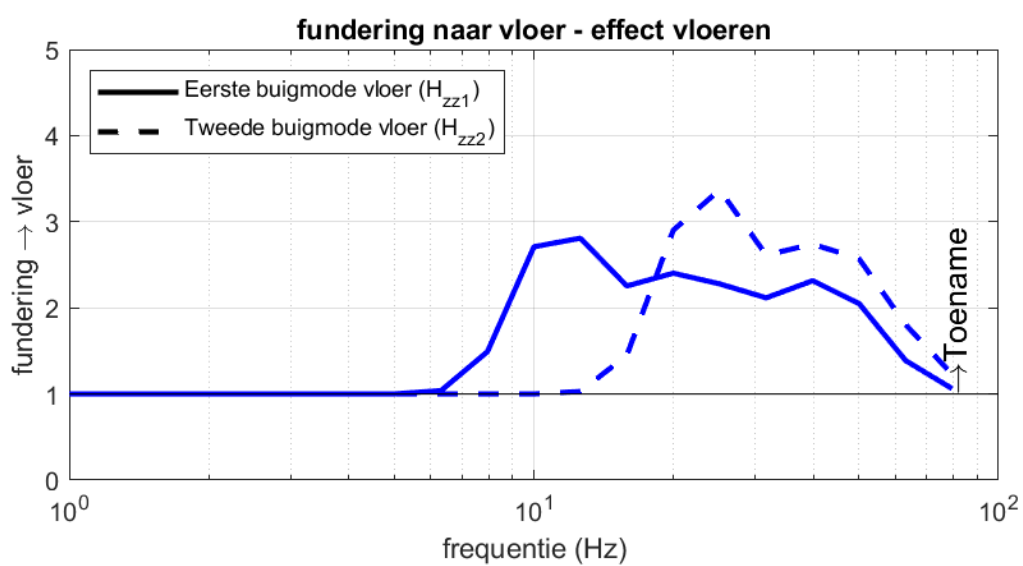
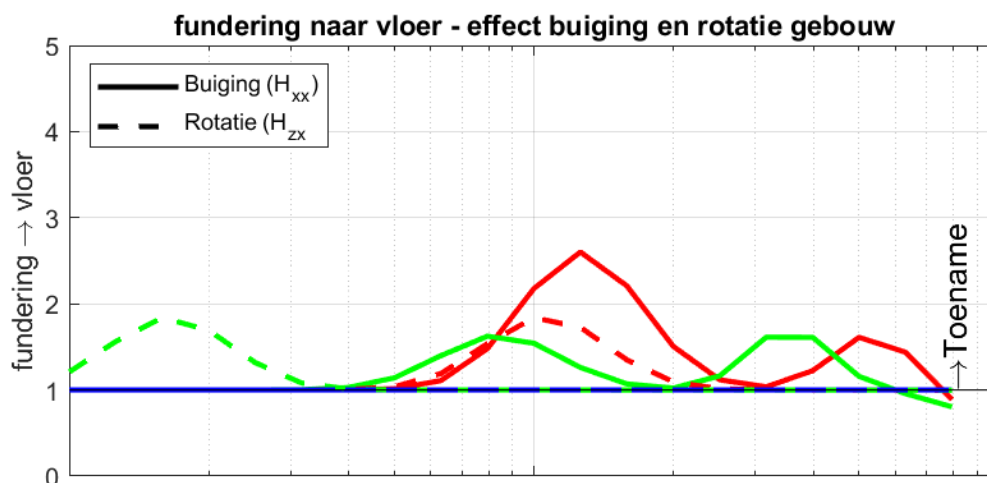
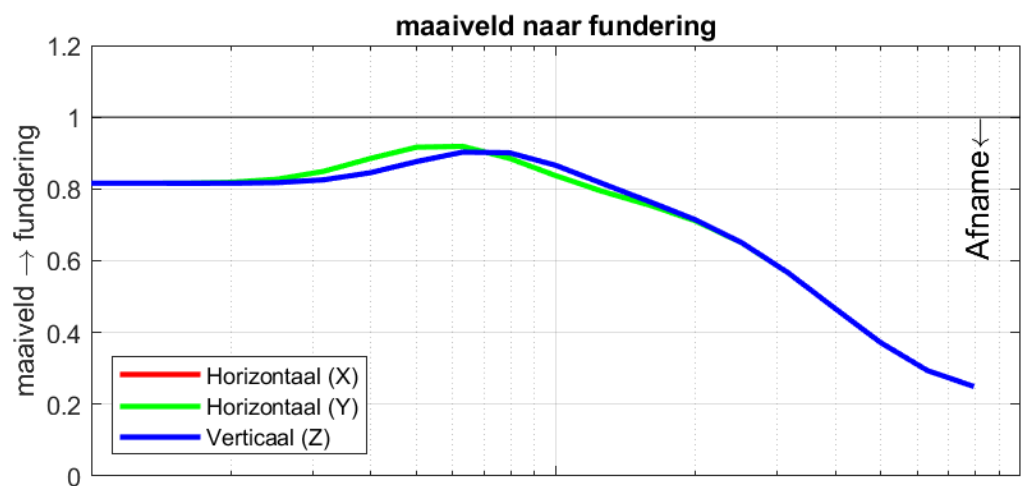
Bij de tweede buigmodus van de vloer (bij de tweede eigenfrequentie) zijn de trillingen maximaal op ongeveer $\frac{1}{4}$ van het vloerveld, zie de principeschets rechts.

Dit effect wordt in Buildyn weergegeven als H_{zz2} , en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1} .

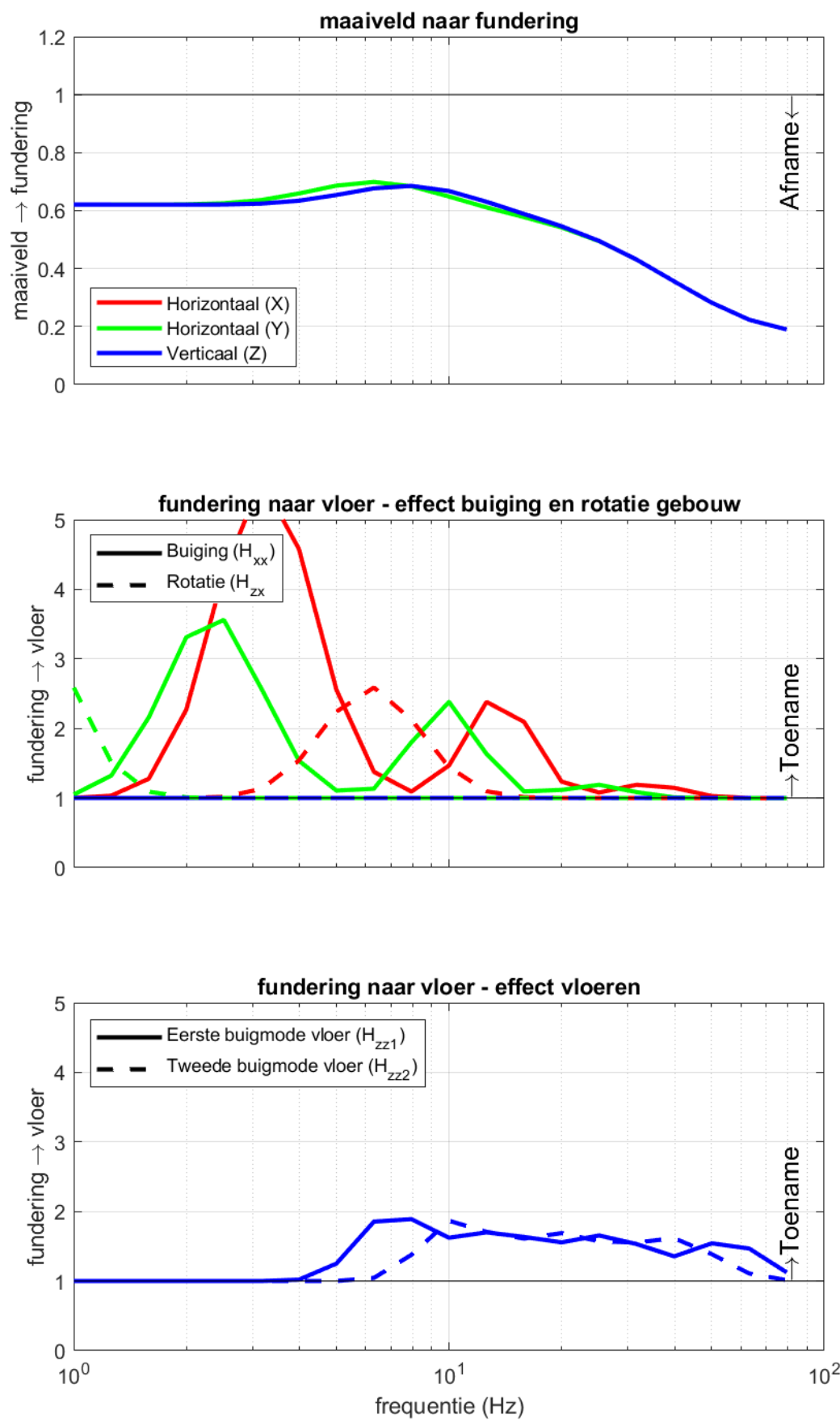


Resultaten

De resultaten uit de Buildyn-berekeningen voor grondgebonden laagbouw en voor appartementengebouwen (8 bouwlagen) in deelgebied West zijn weergegeven in Figuur 20 resp. Figuur 21.



Figuur 20 Buildyn-resultaten voor grondgebonden laagbouw met kanaalplaatvloer in deelgebied West

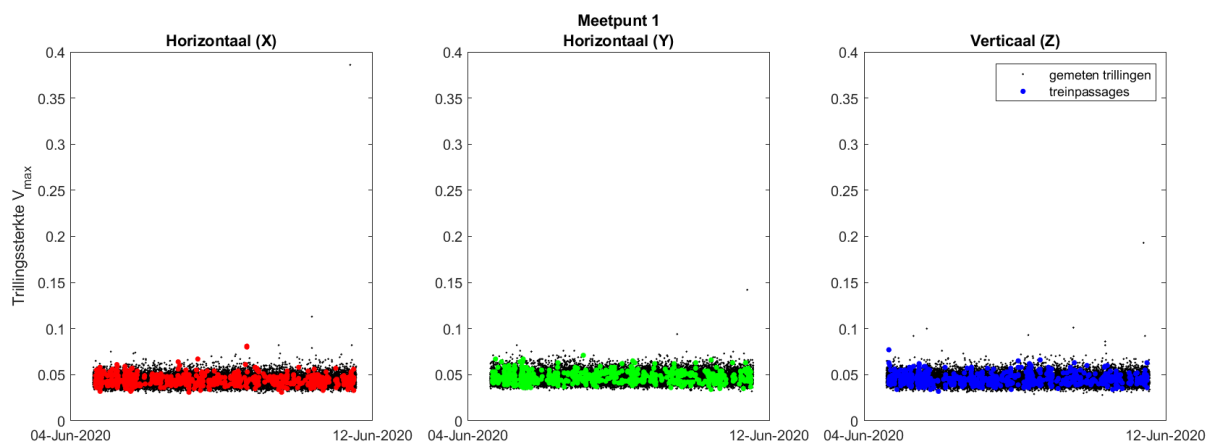


Figuur 21 Buildyn-resultaten voor 8-laags appartementengebouw in deelgebied West

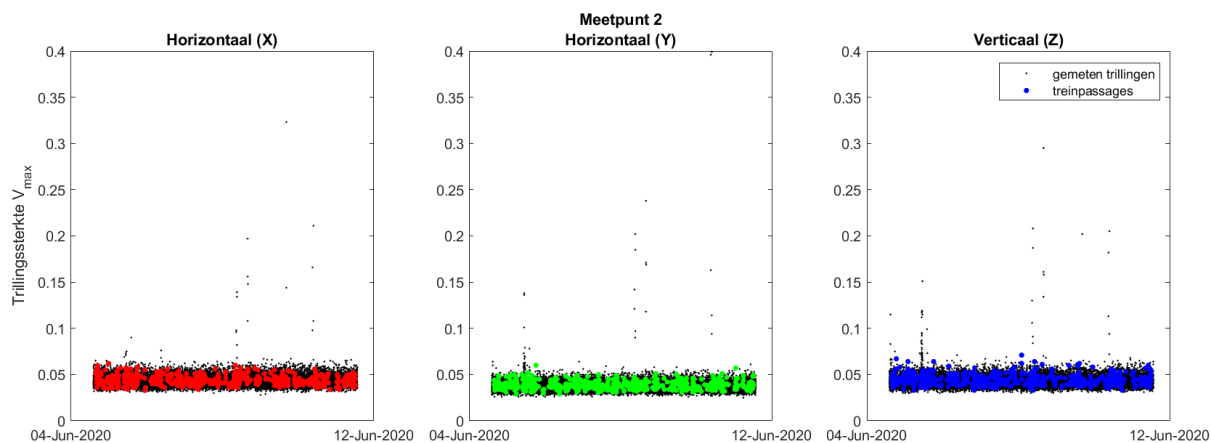


Bijlage meetresultaten

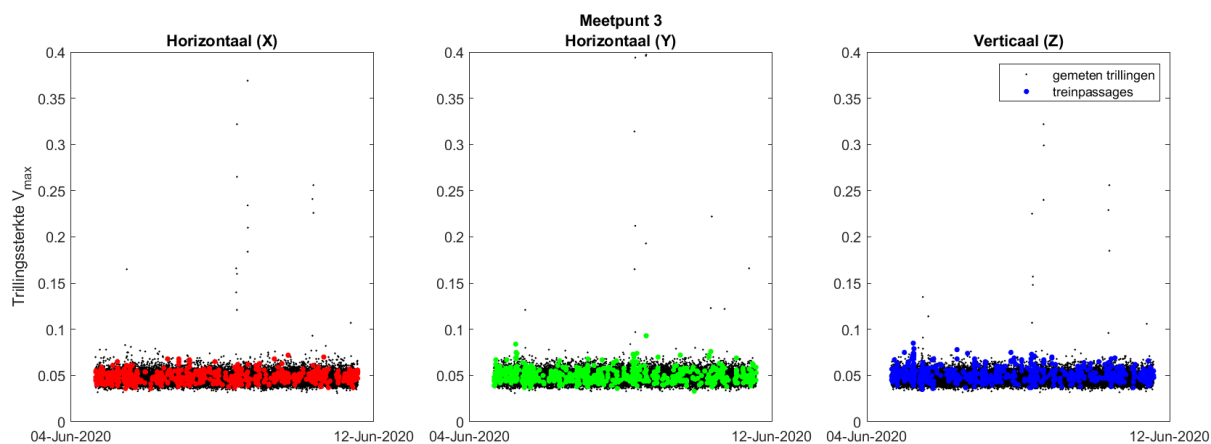
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt is de trillingssterkte (V_{max}) per 30 seconden als functie van de tijd weergegeven.



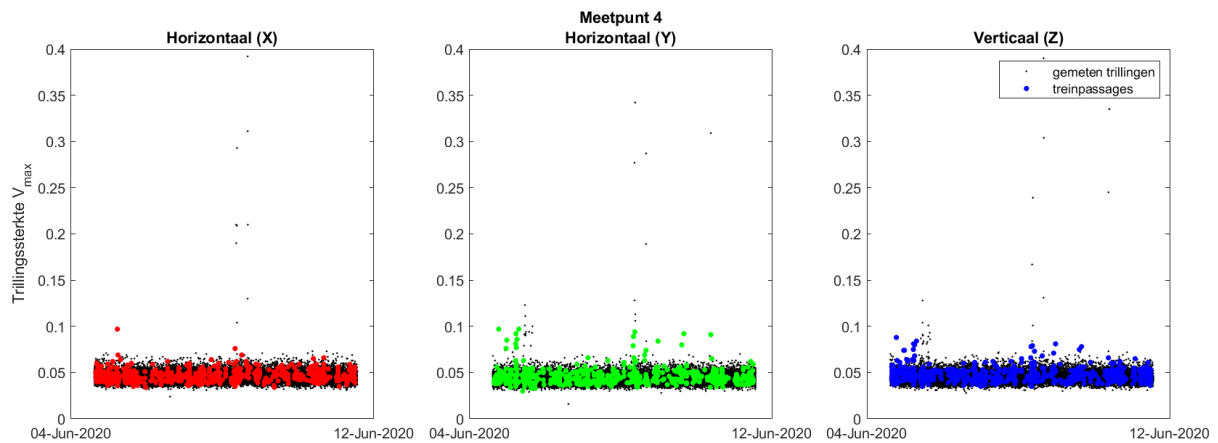
Figuur 22 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 1



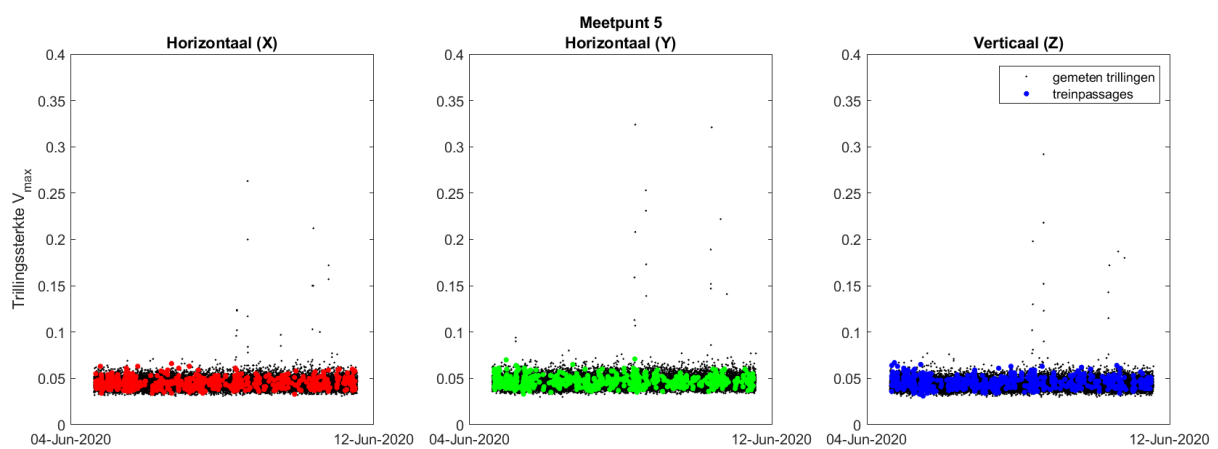
Figuur 23 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 2



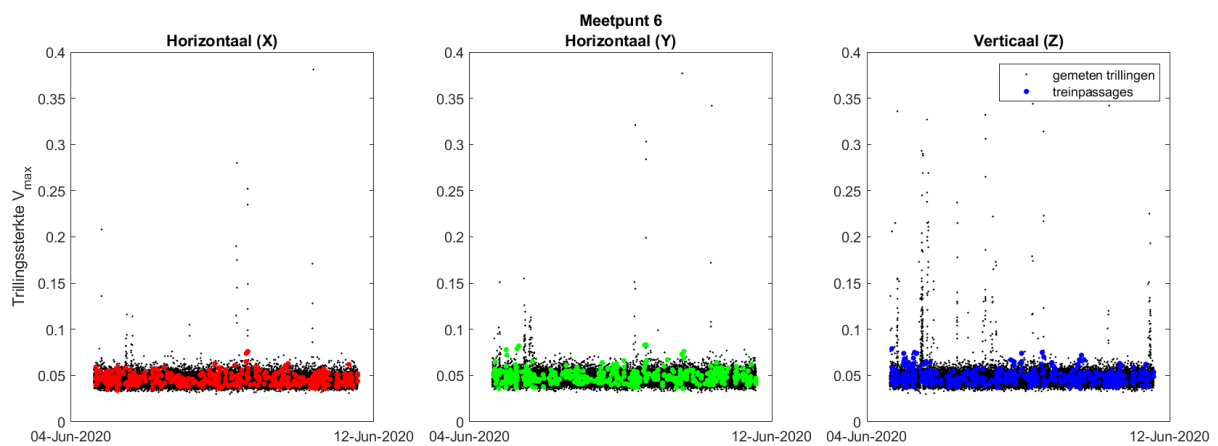
Figuur 24 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 3



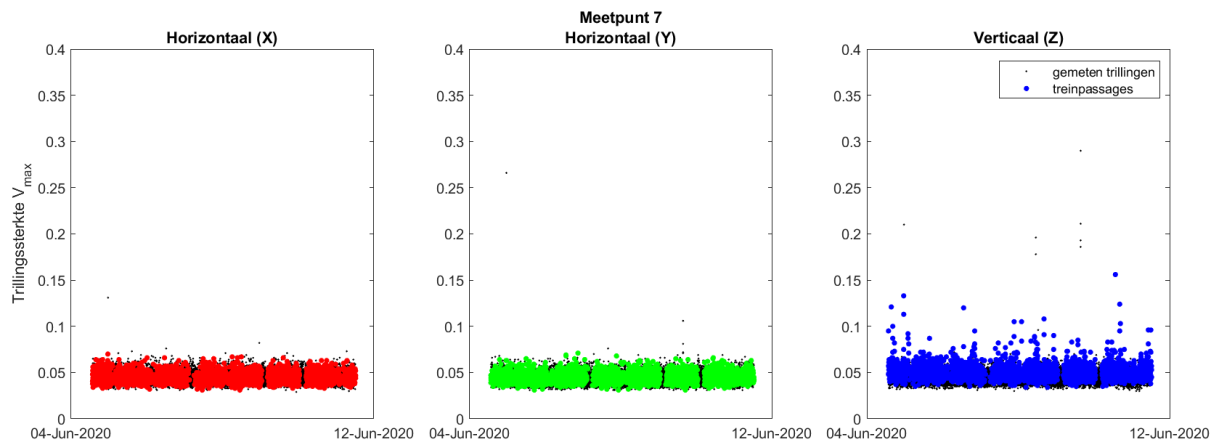
Figuur 25 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 4



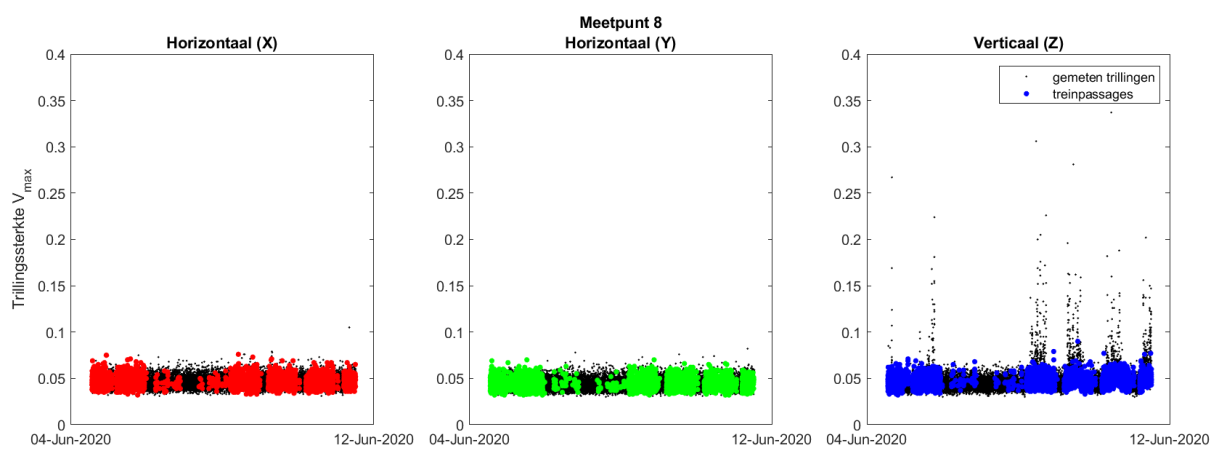
Figuur 26 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 5



Figuur 27 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 6

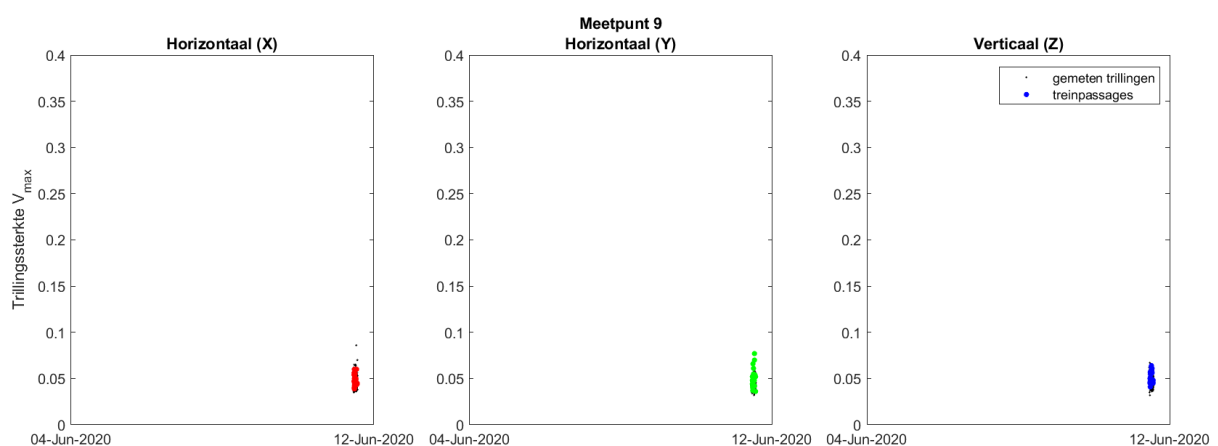


Figuur 28 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 7

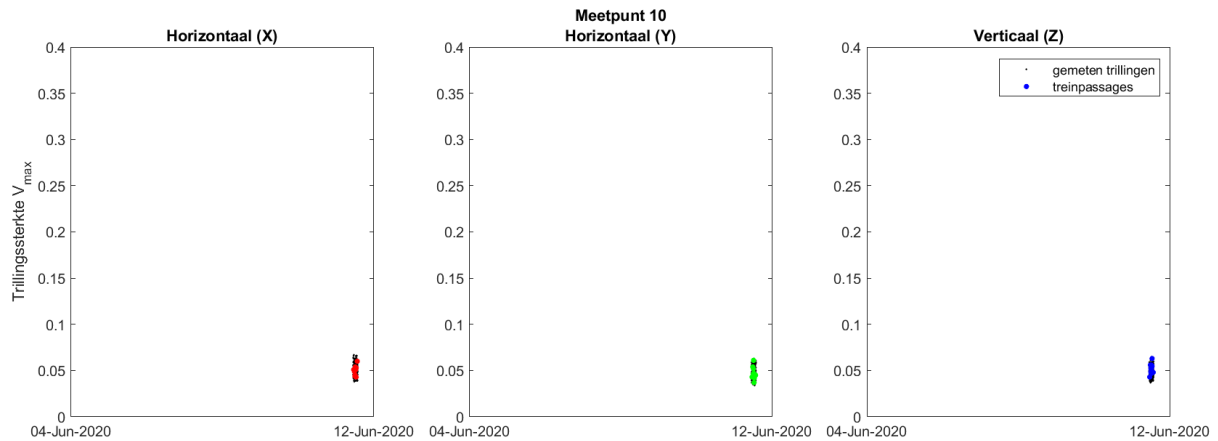


Figuur 29 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 8

Op twee meetpunten (9 en 10) is kortstondig gemeten, deze meetpunten zijn geplaatst als aanvullende meetpunten. In de berekeningen is gecorrigeerd voor de kortere meetduur.

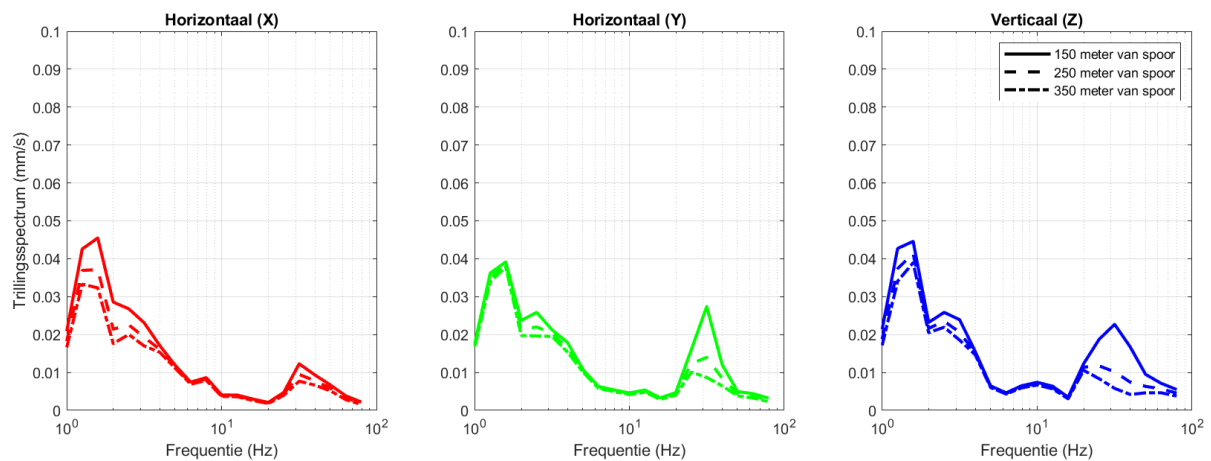


Figuur 30 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 9



Figuur 31 Trillingen als functie van de tijd bij meetpunt 10

Op de meetpunten zijn ook trillingsspectra geregistreerd. Deze spectra zijn vertaald naar tertsbandspectra, de gemiddelde trillingsspectra op 150, 250 en 350 meter zijn weergegeven in Figuur 24.

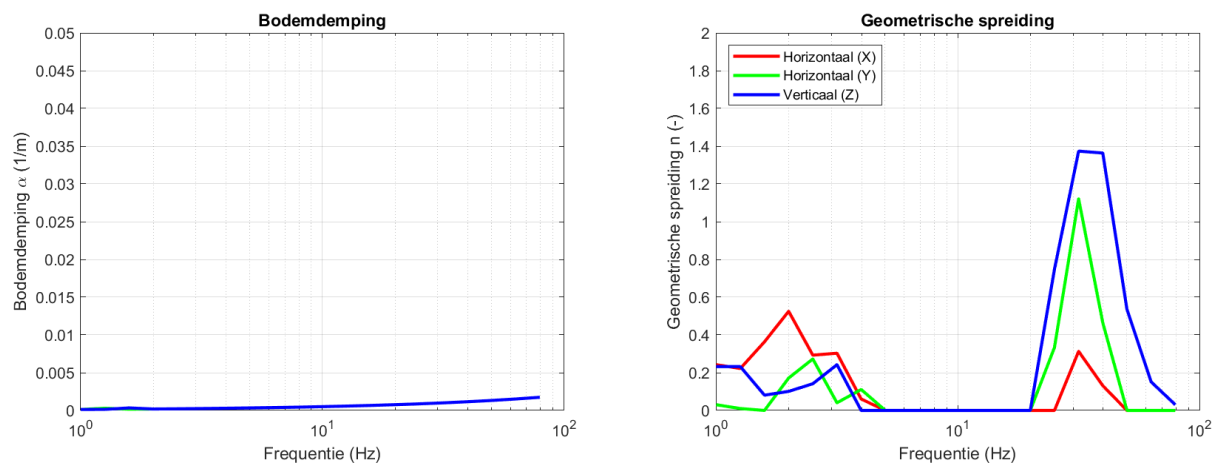


Figuur 32 Trillingsspectra op 150, 250 en 350 meter van het spoor

Met behulp van deze trillingsspectra is de uitdamping van de trillingen met de afstand bepaald. Voor deze uitdamping van de trillingen met de afstand wordt de Barkanvergelijking gebruikt (zie vergelijking 1).

$$V(r) = V(r_0) \left(\frac{r_0}{r} \right)^n e^{-\alpha(r-r_0)} \quad (1)$$

Hierbij is $V(r)$ de trillingssterkte op een willekeurige afstand r , r_0 is een referentieafstand (hier 20 meter), α is de bodemdemping (zie Figuur 25) en n is de geometrische uitspreiding van de trillingsgolf (zie Figuur 25). Deze resultaten zijn verwerkt in de kalibratie van het rekenmodel.



Figuur 33 Bodemdemping α (links) en geometrische spreidingsfactor n (rechts) in het plangebied

IV Bijlage kaartmateriaal

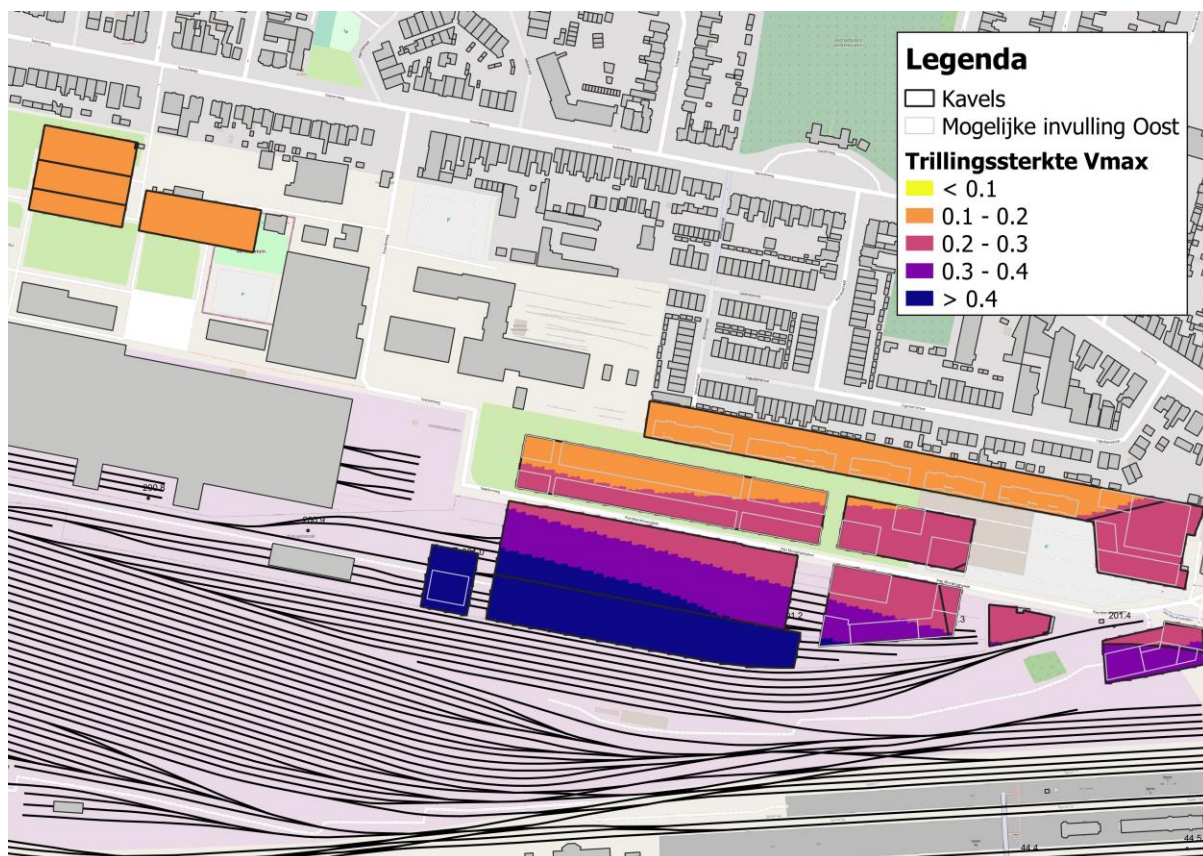
Deze bijlage bevat kaarten met contouren van de berekende trillingen voor deelgebied Midden en Oost. Kaarten voor deelgebied West zijn opgenomen in de hoofdtekst.

Er zijn, zoals weergegeven in hoofdstuk 2, meerdere gebouwtypes beschouwd. De in deze bijlage getoonde kaarten zijn samenvattingen voor laagbouw (ca. 10 m hoog, representatief voor grondgebonden woningen), middenbouw (ca. 30 m hoog) en hoogbouw (ca. 50 m hoog).

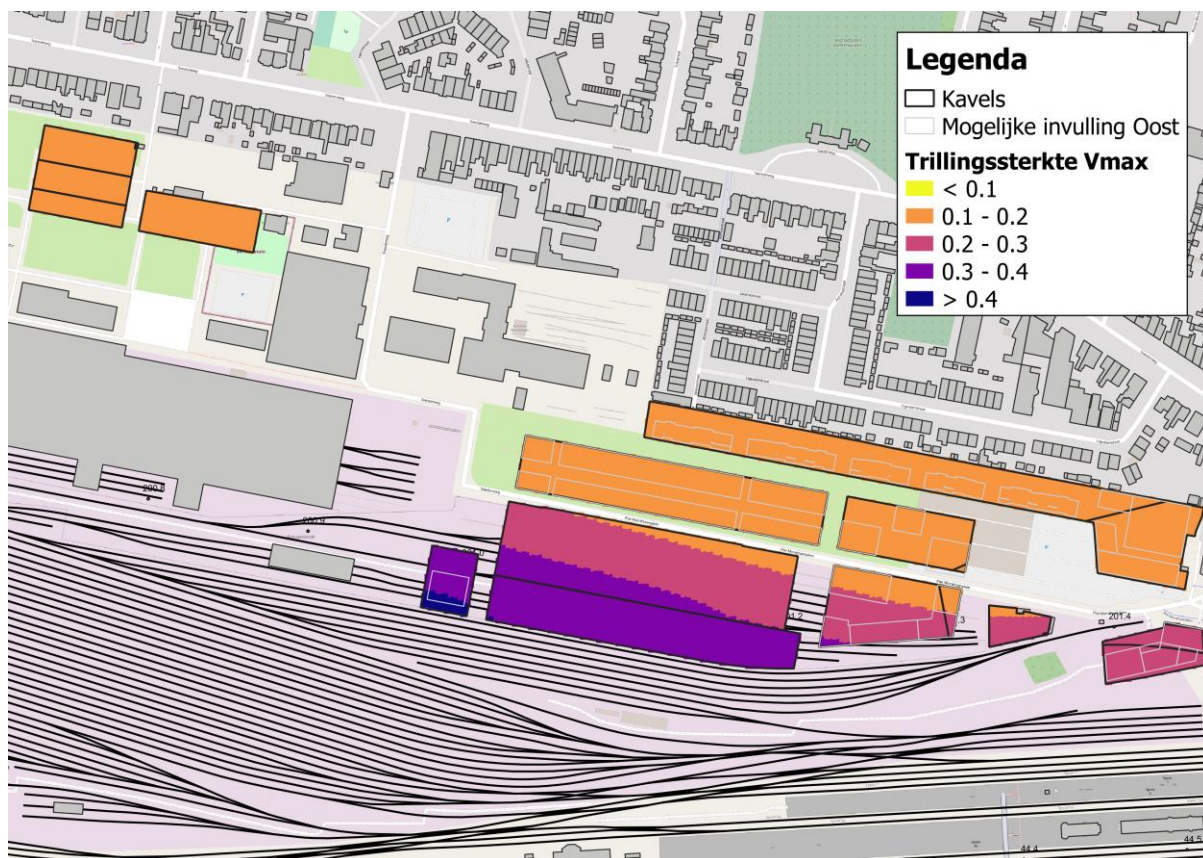
Per gebouwtype hebben we een kaart opgenomen met contouren van de bovengrens van de trillingssterkte V_{max} .

Verder hebben we contourenkaarten opgenomen van een beoordeling van de trillingen voor de functies *kantoor* en *onderwijs*, en voor de functies *wonen* en *gezondheidszorg*. Hierbij worden drie klassen gehanteerd:

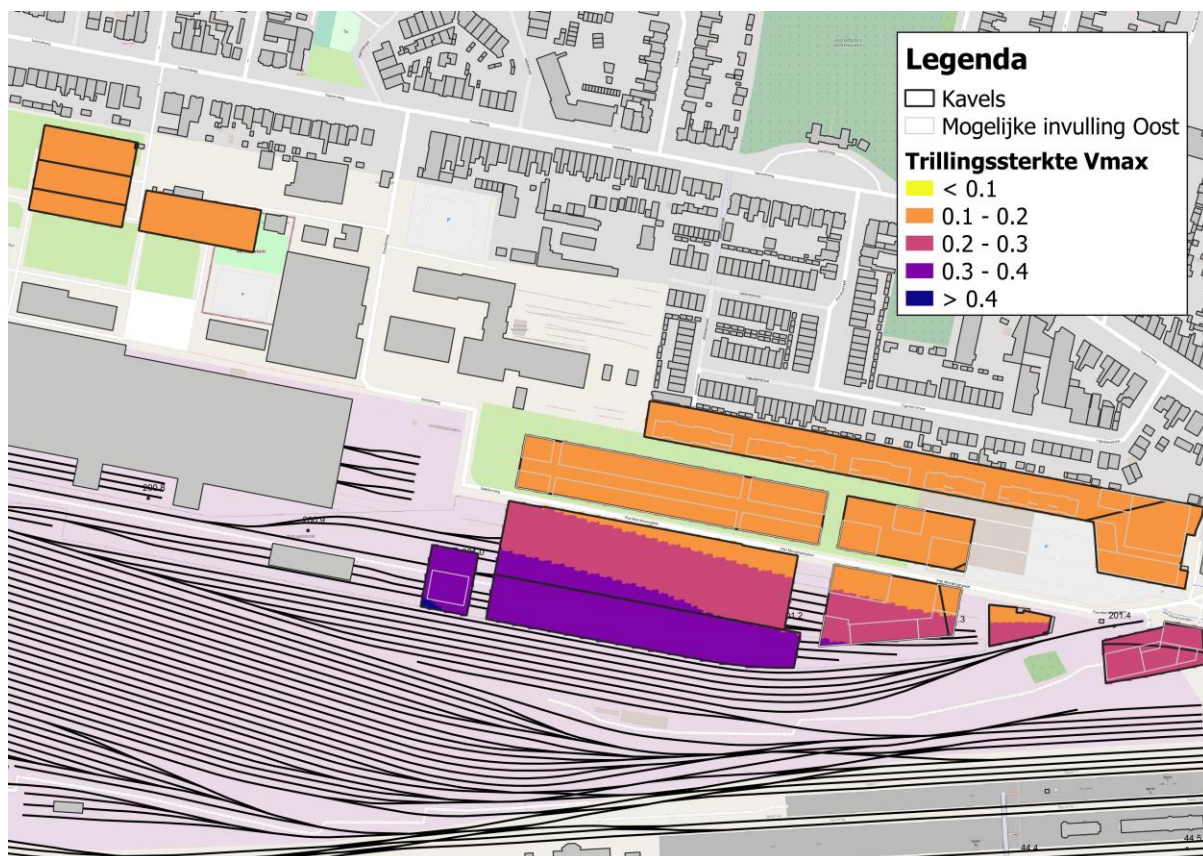
- Groen: Voldoet aan de streefwaarden. Hier kan zonder nader onderzoek gebouwd worden.
- Geel: Voldoet mogelijk aan de streefwaarden, maar dat is afhankelijk van de constructieve uitwerking van de gebouwen. In deze zone is nader onderzoek nodig, en kunnen ontwerpoptimalisaties van gebouwen nodig zijn. Mogelijke optimalisaties voor gebouwen in deze zone zijn het realiseren van gebouwen op een parkeerkelder of zwaardere fundering, het realiseren van grotere bouwvolumes, het toepassen van stijvere (dikkere) vloeren of het toevoegen van extra constructieve dwarswanden.
- Oranje: Voldoet niet aan de streefwaarden. In deze zone zijn zwaardere ingrepen dan alleen constructieve optimalisaties nodig om te voldoen aan de streefwaarden uit het beoordelingskader. Mogelijke maatregelen in deze zone zijn, naast bouwkundige optimalisaties, trillingsschermen in de bodem (bijv. damwanden, trillingsschermen van beton of jet-grout) of het afveren van de gebouwen.



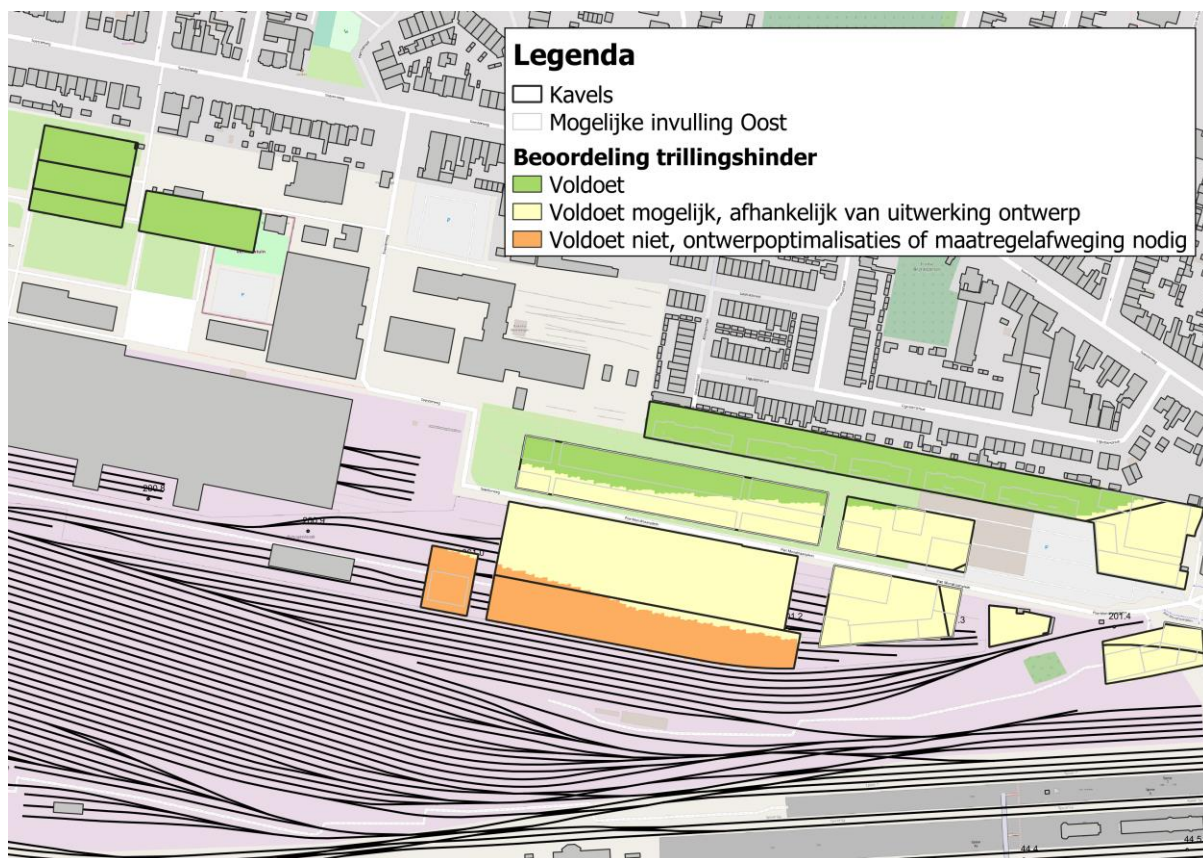
Figuur 34 Bovengrens van de trillingssterkte V_{max} voor laagbouw (ca. 10 m hoog)



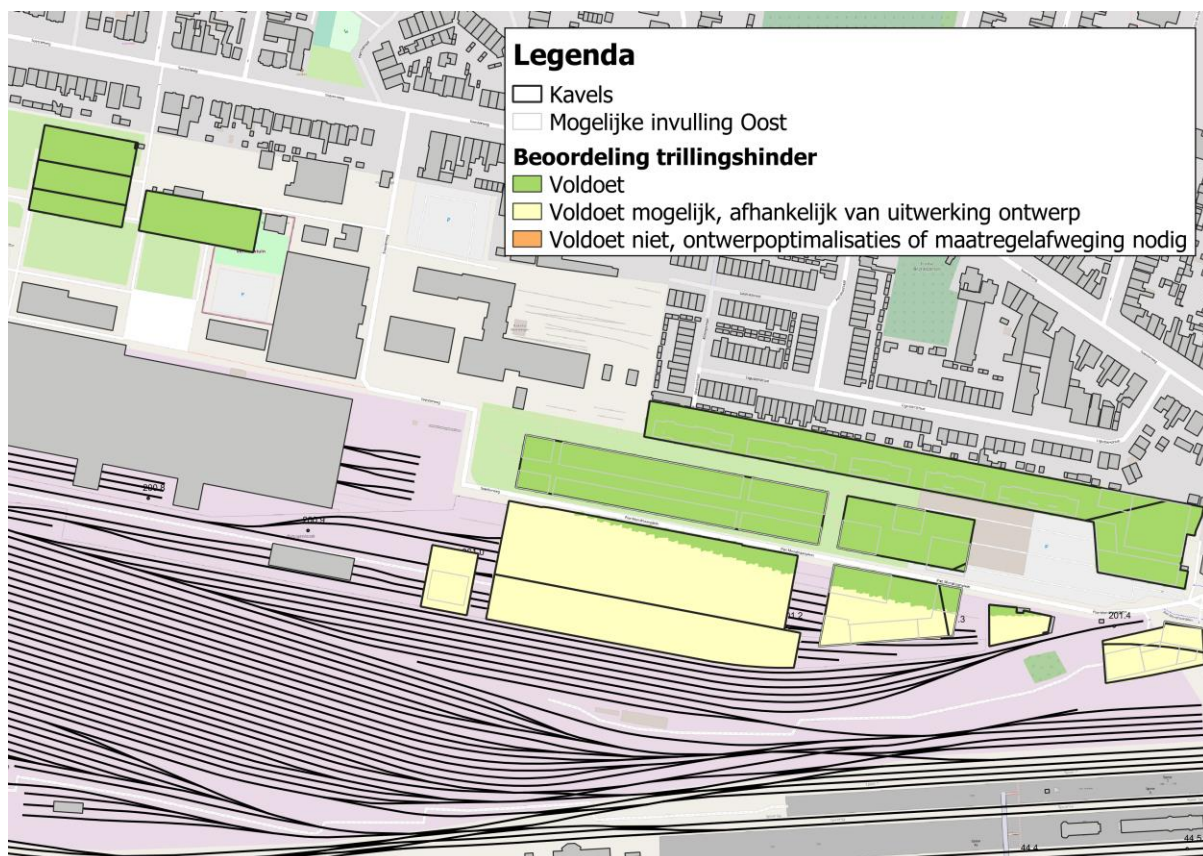
Figuur 35 Bovengrens van de trillingssterkte V_{max} voor middenbouw (ca. 30 m hoog)



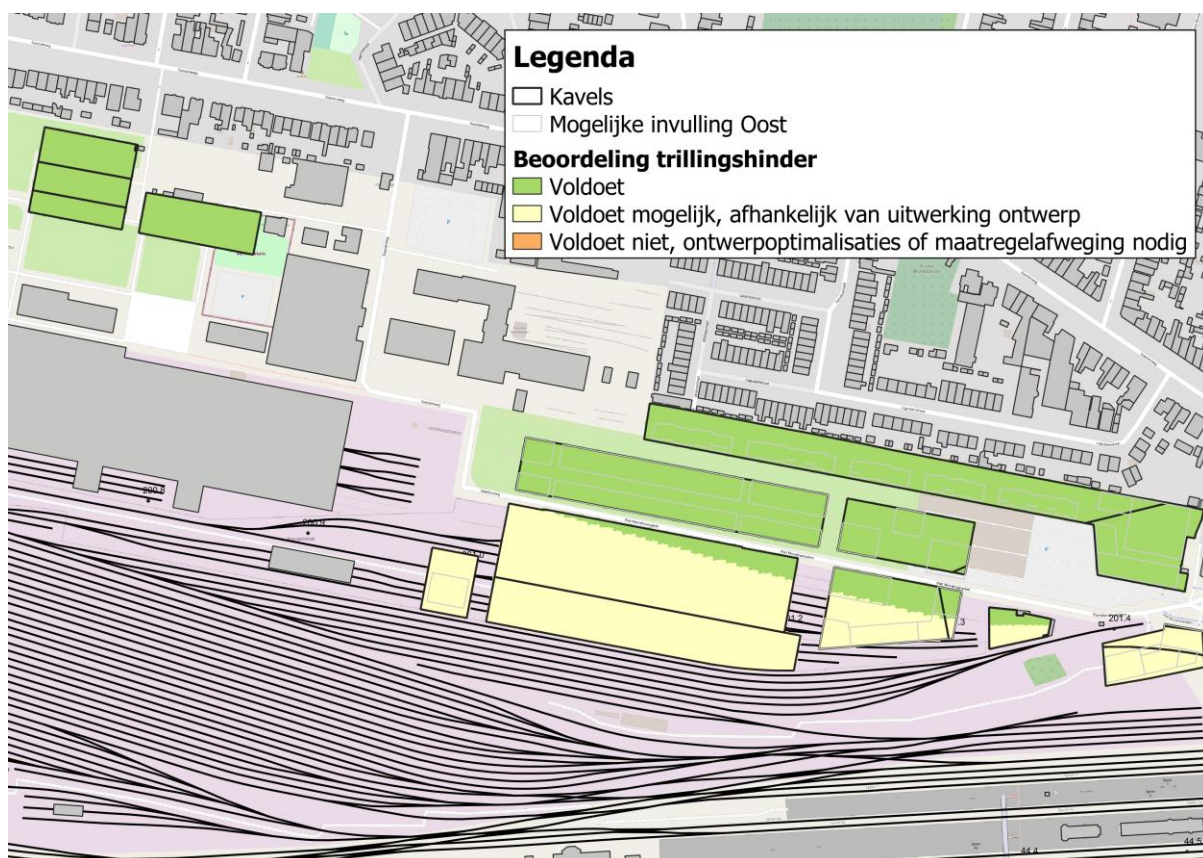
Figuur 36 Bovengrens van de trillingssterkte V_{max} voor hoogbouw (ca. 50 m hoog)



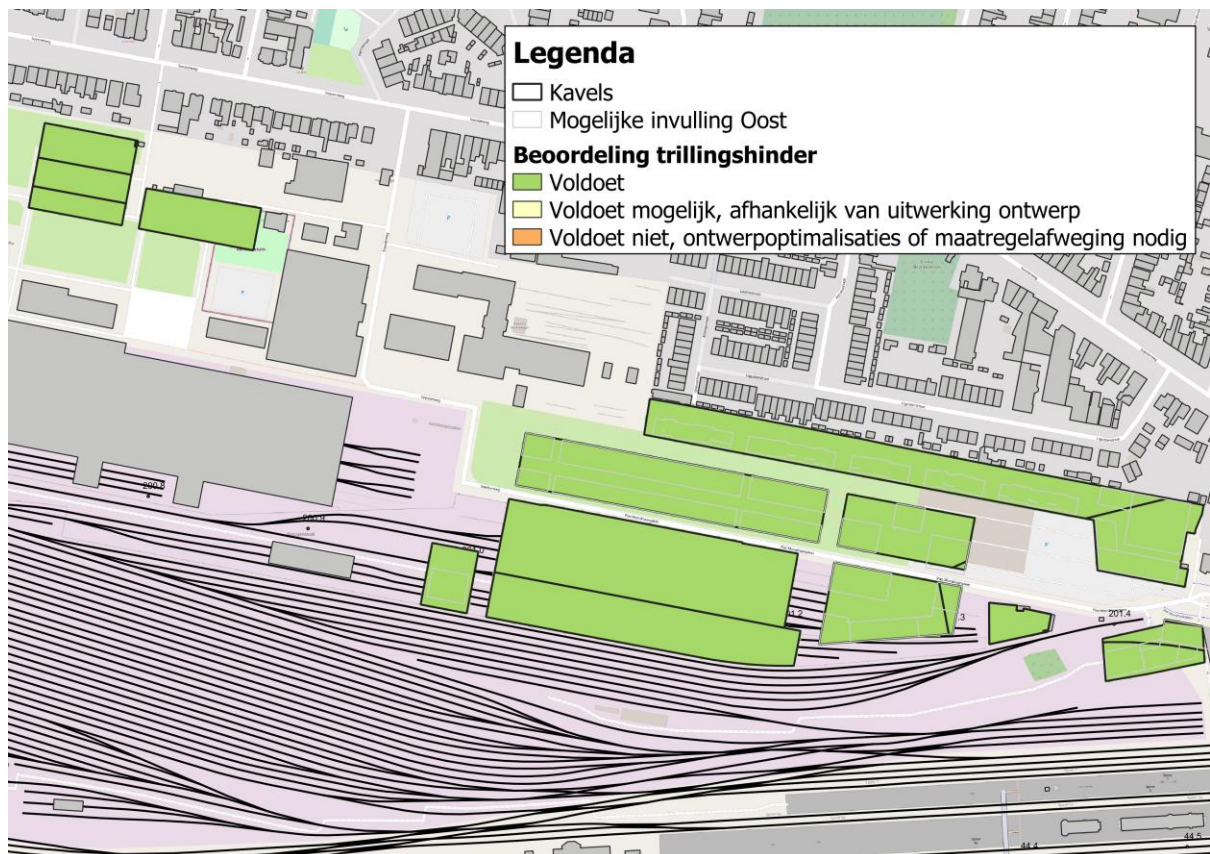
Figuur 37 Bepoeding van de trillingen gebouwfunctie wonen, laagbouw (ca. 10 m hoog)



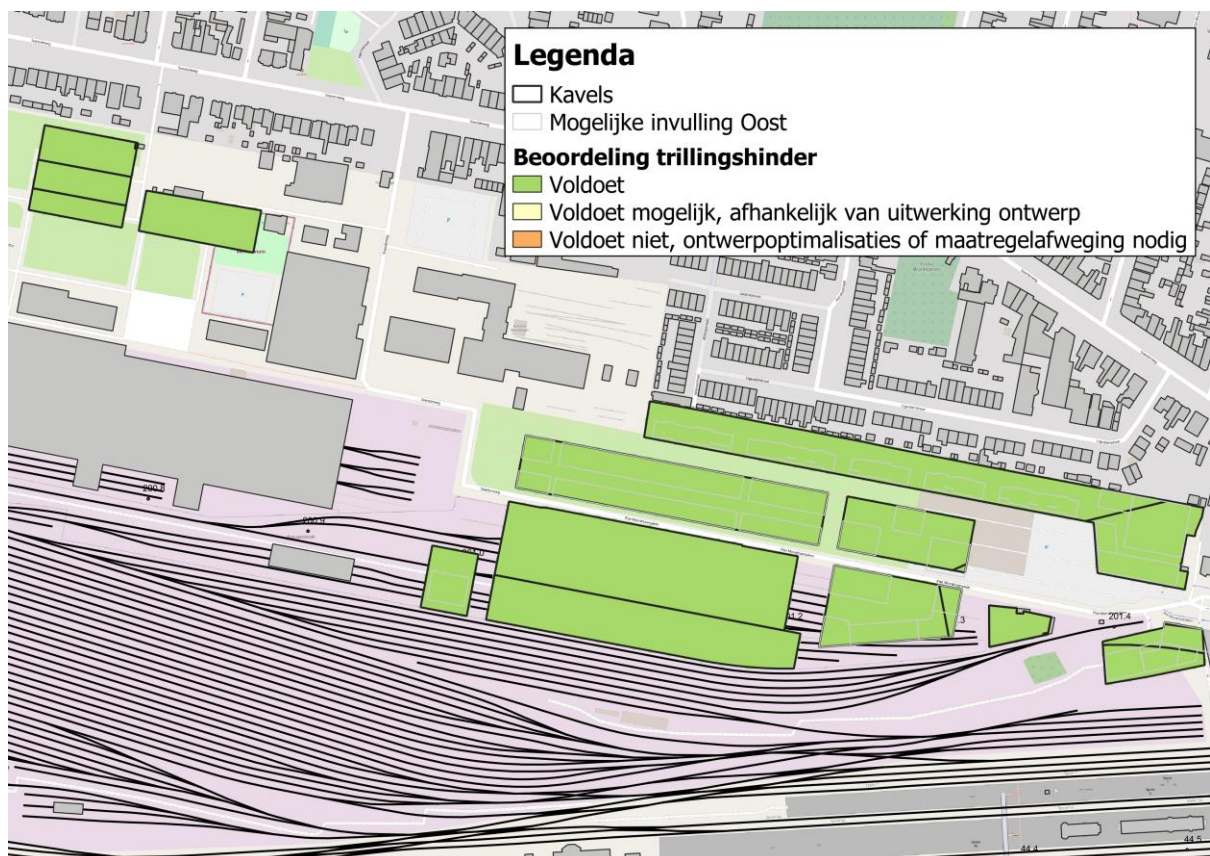
Figuur 38 Beoordeling van de trillingen gebouwfunctie wonen, middenbouw (ca. 30 m hoog)



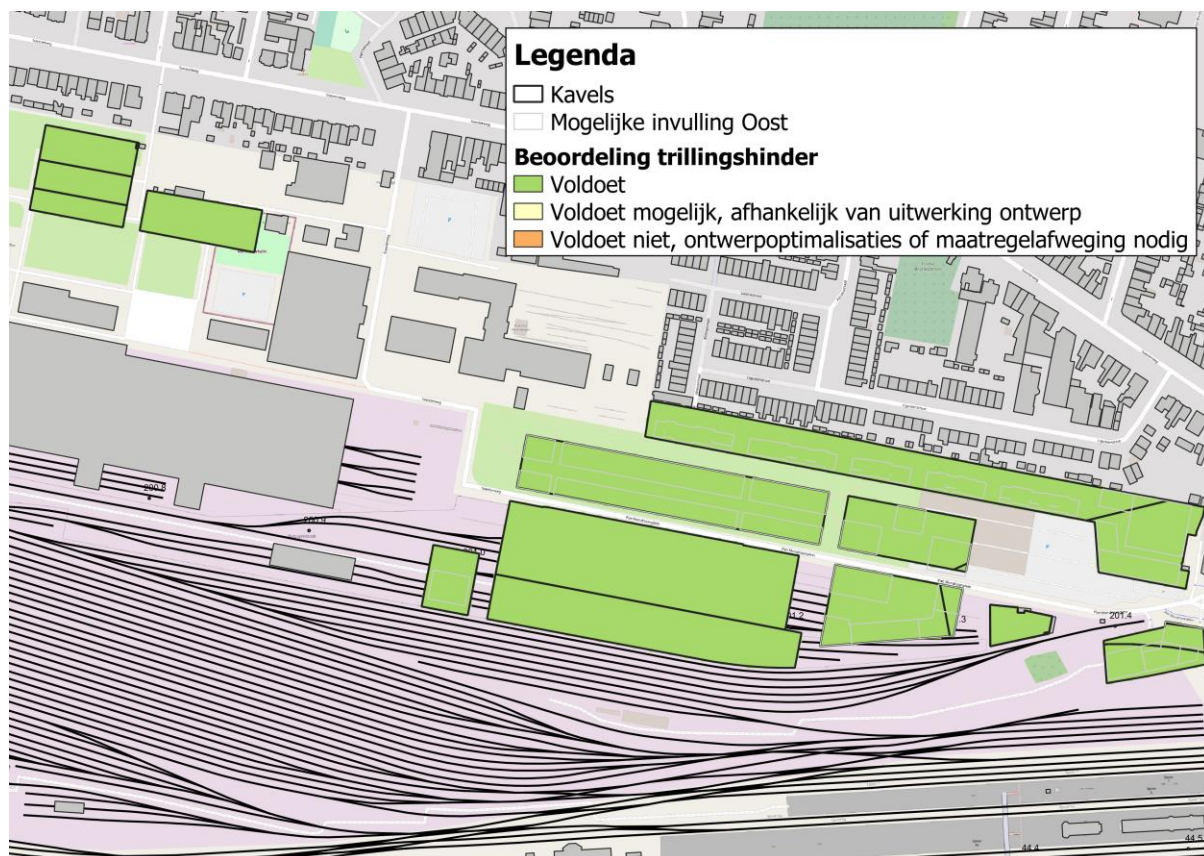
Figuur 39 Beoordeling van de trillingen gebouwfunctie wonen, hoogbouw (ca. 50 m hoog)



Figuur 40 Beoordeling van de trillingen gebouwfunctie kantoor, laagbouw (ca. 10 m hoog)



Figuur 41 Beoordeling van de trillingen gebouwfunctie kantoor, middenbouw (ca. 30 m hoog)



Figuur 42 Beoordeling van de trillingen gebouwfunctie kantoor, hoogbouw (ca. 50 m hoog)