WEBOOST



TRILLINGSONDERZOEK T.B.V. NIEUWBOUW

# TIJDELIJKE WONINGEN WELLEVELDSESTRAAT DUIVEN

Gemeente Duiven
Ontvangstdatum : 17-11-2025
Documentnummer: D2025-00019291

# COLOFON


Auteur [redacted]
[redacted]@we-boost.nl
+31 6 [redacted]






| | |
|---|---|
| Projectcode | *WBD2025-036* |
| Versienr | *2.0* |
| Datum | *13 november 2025* |
| Status | *Definitief* |
| Opdrachtgever | *Gemeente Duiven* |


Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van metingen van





© We-Boost 2025

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.

# DE KERN VAN DIT RAPPORT

Aan de Welleveldsestraat 2 in Duiven worden tijdelijke woningen gerealiseerd, verdeeld over 6 bouwblokken. De woningen liggen op korte afstand van de spoorlijn Arnhem - Zevenaar. Daardoor kunnen trillingen van treinverkeer als hinderlijk worden ervaren. Daarom is onderzoek naar de aard en omvang van de trillingen nodig.

Doel van het voorliggende onderzoek is om vast te stellen of er sprake zal zijn van trillingshinder in de geplande gebouwen, en zo ja, met welke maatregelen een aanvaardbaar verblijfsklimaat kan worden gegarandeerd (e.e.a. conform de Omgevingswet (art. 4.2), waar gesproken wordt over een 'evenwichtige toedeling van functies aan locaties'). Voor het beoordelen van mogelijke trillingshinder maken we gebruik van de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn. Deze streefwaarden zijn voorkeurswaarden, waarbij het streven moet zijn om de trillingen in de beoogde bebouwing te laten voldoen aan deze waarden.

In dit onderzoek is met behulp van metingen op de bouwlocatie en modelberekeningen onderzocht wat de trillingen zullen zijn in de toekomstige bebouwing. Hierbij volgen we de aanpak zoals voorgeschreven in de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

## CONCLUSIES

De belangrijkste conclusie van het onderzoek is dat er in 3 van de geplande 4 bouwblokken niet wordt voldaan aan het beoordelingskader, zie de figuur hiernaast. Dat komt door de korte afstand tot het spoor in combinatie met de lichtere woningen, en omdat de trillingen in het oostelijke deel van het plangebied wat hoger zijn, mogelijk door verschillen in bodemopbouw of spoorligging.




Bij deze overschrijdingen is een aantal zaken relevant:

- Het gaat om incidentele overschrijdingen (maximaal 1 per dag in het bouwblok met de hoogste trillingen, in de andere bouwblokken om maximaal 1 per week).
- Alle overschrijdingen zijn het gevolg van de passage van goederen- en werktreinen, die hier niet regulier rijden (maar alleen tijdens werkzaamheden en omleidingsroutes). De trillingen van reizigerstreinen voldoen wel aan het beoordelingskader.
- Er is gemeten in een droge periode, waardoor de kleibodem is uitgedroogd en de trillingen hoger waren. De resultaten in dit onderzoek zijn daarmee worst-case.

Ten opzichte van het eerdere onderzoek, waarbij nog sprake was van 6 bouwblokken, is het plan aangepast door de woningen verder bij het spoor vandaan te plaatsen. Daarmee zijn de trillingen met zo'n 20 procent afgenomen.

## ADVIES VOOR MAATREGELEN

Omdat er overschrijdingen van het beoordelingskader voor trillingshinder mogelijk zijn, is nader onderzoek gedaan naar maatregelen waarmee die overschrijdingen kunnen worden voorkomen. Hierbij is gekeken naar maatregelen aan de bron (het spoor of de treinen), in de bodem of aan de geplande gebouwen. Uit het maatregelenonderzoek volgt dat:

1. **Maatregelen aan de bron** van de trillingen (het spoor of de treinen) vergen een lange afstemmingsperiode met ProRail, de beheerder van het spoor. De minst kostbare, naar verwachting voldoende effectieve maatregel is het aanbrengen van under sleeper pads, rubberen matjes onder de dwarsliggers, over een lengte van ca. 200 meter onder beide sporen, deze maatregel kost rond de € 300.000 incl. BTW, maar exclusief kosten voor buitendienststellingen en afstemming met ProRail. Deze kosten worden dus hoger.
2. **Maatregelen in de bodem** zijn beperkt effectief en zeer kostbaar. De meest kosteneffectieve maatregel is het verdiepen van de spoorsloot naar minimaal 3 meter diepte, zodat de kleilaag waar de meeste trillingen doorheen gaan, wordt doorsneden. Met deze maatregel kunnen de trillingen met maximaal 40 procent worden verlaagd, maar zijn nog steeds incidentele overschrijdingen van de streefwaarden mogelijk in 1 van de 4 de bouwblokken. Een trillingsscherm van beton of een damwand is zo kostbaar, dat de kosten niet in verhouding staan tot de bouwkosten van de woningen.
3. **Maatregelen aan de gebouwen** zijn beperkt mogelijk, omdat het om tijdelijke woningen volgens een vast, modulair concept gaat. Een zware fundering (dikke betonnen plaat of zware paalfundering) is voor tijdelijke woningen bijvoorbeeld ongewenst. De enige mogelijkheden zijn de keuze voor een zo min mogelijk trillingsgevoelig type woning (dat verschilt namelijk per aanbieder van tijdelijke woningen) of het isoleren van de fundering.

Gelet op bovenstaande is ons advies hieronder opgenomen:

Onderzoek bij de verdere uitwerking van het plan de volgende mogelijkheden:

1. Kies een woningtype met een **eigenfrequentie van de vloer die niet hoger is dan 10 Hz**, om versterking van de trillingen door de vloer te voorkomen.
2. Is het mogelijk om de bestaande greppel/**spoorsloot te verdiepen naar 3 meter** diep? Hiermee wordt de kleilaag doorsneden en nemen de trillingen fors af. Alternatief is om, buiten de vergunningsplichtige zone van ProRail, en dus op eigen terrein, een waterberging te maken die het spoor afschermt.

Met bovenstaande maatregelen kan worden voldaan aan het beoordelingskader.

Tenslotte, bij trillingen is sprake van streefwaarden in de beoordelingsrichtlijn. Als de streefwaarden niet worden gehaald, dan dienen maatregelen te worden afgewogen volgens het ALARA-principe (As Low As Reasonably Achievable, conform bijlage 5 van de SBR B-richtlijn, het beoordelingskader voor trillingshinder). Met bovenstaand advies kan worden voldaan aan het beoordelingskader, maar dit kan leiden tot een onhaalbaar plan, bijvoorbeeld door te hoge kosten.

Een ALARA-afweging kan dan helpen om minder kostbare of zelfs geen maatregelen te motiveren. Argumenten die hierbij kunnen worden gebruikt, zijn:

- Er is sprake van een **beperkt aantal overschrijdingen** van de streefwaarden (maximaal 1 per dag, in de meeste bouwblokken maximaal 1 per week).

- De treinen die voor overschrijdingen zorgen, rijden **niet in de reguliere dienstregeling** maar alleen tijdens stremmingen op andere baanvakken (omleidingen) of werkzaamheden. De trillingen van het reguliere treinverkeer voldoen wel aan de streefwaarden.
- Het huidige onderzoek is relatief **worst-case gemeten**: er is gemeten in een zeer droge periode, waardoor de kleibodem sterk is uitgedroogd en de trillingen hoger zijn. In de meting is te zien dat, na een regenperiode, de trillingen met zo'n 20 tot 25 procent afnamen.
- De trillingen voldoen weliswaar niet aan de streefwaarden voor nieuwe woningen, maar **wel aan de soepeler streefwaarden voor bestaande gebouwen** (die hier overigens formeel niet van toepassing zijn, maar wel aangeven in hoeverre de situatie wel of niet aanvaardbaar is i.r.t. hinder en gezondheid).
- De **kosten van maatregelen** moeten in relatie staan tot de bouwkosten van de woningen. Bij hoge kosten of grote uitvoeringsrisico's zijn maatregelen minder snel doelmatig. Gelet op het tijdelijke karakter van de woningen, geldt dat de kosten van maatregelen per bouwjaar van de woning relatief hoog zijn.

Met bovenstaande argumenten kan, gelet op het beperkte en incidentele karakter van de overschrijdingen worden betoogd dat ook zonder maatregelen geen sprake is van een onevenwichtige toedeling van functies aan locaties (art. 4.2 Ow), en dat er dus een aanvaardbare situatie ontstaat in de geplande woningen t.a.v. spoortrillingen.

# INHOUDSOPGAVE


**1. INLEIDING** **9**

1.1. Aanleiding 9

1.2. Doel 9

1.3. Onderzoeksmethode 9

1.4. Leeswijzer 10

**2. SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN** **12**

2.1. Situatie 12

2.2. Uitgangspunten 13

**3. BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE** **16**

3.1. Trillingen en wetgeving 16

3.2. Beoordelingskader trillingshinder 16

3.3. Rekenmethode 17

**4. VERWACHTE TRILLINGEN** **22**

4.1. Meetresultaten 22

4.2. Trillingen in geplande gebouwen 22

4.3. Analyse van de trillingen 24

**5. MITIGERENDE MAATREGELEN** **26**

5.1. Nut en noodzaak van maatregelen 26

5.2. Maatregelen aan de trillingsbron 26

5.3. Maatregelen in de bodem 27

5.4. Optimalisaties aan gebouwen 29

5.5. Conclusies en advies voor maatregelen 30

**BIJLAGEN** **32**

**I. GRONDONDERZOEK** **33**

II. **REKENMODEL** **35**

II.1 Trillingsmeting 36

II.2 Gegevens treinpassages 37

II.3 Bepalen verschillen tussen meetpunten 37

II.4 Opstellen bodemmodel 38

II.5 Bepalen trillingsspectra t.p.v. randen gebouw 38

II.6 Opstellen gebouwmodel 38

II.7 Bepalen trillingsspectra t.p.v. fundering gebouw 43

II.8 Bepalen trillingsspectra t.p.v. vloeren gebouw 43

II.9 Bepalen Vmax en Vper t.p.v. vloeren gebouw 44

II.10 Omgaan met onzekerheden 45

II.11 Validatie van het rekenmodel 46

III. **METINGEN** **52**

III.1 Gegevens metingen 52

III.2 Resultaten metingen 53

IV. **DETAILS MAATREGELEN** **58**



# 1 INLEIDING

In dit hoofdstuk geven we een korte omschrijving van de inhoud van dit onderzoek: de aanleiding, het doel van het onderzoek en een beknopte leeswijzer om informatie snel te kunnen vinden.

# 1. INLEIDING

## 1.1. AANLEIDING

Aan de Welleveldsestraat 2 in Duiven worden tijdelijke woningen gerealiseerd, verdeeld over 4 bouwblokken. De woningen liggen op korte afstand van de spoorlijn Arnhem - Zevenaar, zie Figuur 1. Daardoor kunnen trillingen van treinverkeer als hinderlijk worden ervaren.




*Figuur 1 Plangebied*

## 1.2. DOEL

Doel van dit onderzoek is om vast te stellen of er sprake zal zijn van trillingshinder in de geplande 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, conform de in de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* omschreven aanpak. Deze trillingen toetsen we aan het van toepassing zijnde beoordelingskader. Als we overschrijdingen van het beoordelingskader verwachten, dan geven we aan met welke constructieve randvoorwaarden of maatregelen kan worden voldaan aan de streefwaarden uit het beoordelingskader.

## 1.3. ONDERZOEKSMETHODE

Voor het berekenen van de trillingen in gebouwen is geen algemeen voorgeschreven rekenmodel beschikbaar. Daarom gebruiken onderzoeksbureaus eigen rekenmodellen en/of methodieken. Grofweg zijn er drie types rekenmodellen:

1. **Empirische formules**, waarbij de trillingen op basis van vaak relatief grove, op de praktijk gebaseerde overdrachten worden bepaald. Dit type rekenmodel is vooral bruikbaar in standaardsituaties, maar schiet tekort bij meer complexe gebouwen en situaties.
2. **Analytische rekenmodellen**, waarbij gebruik wordt gemaakt van theoretische formules om de eigenschappen van een gebouw te berekenen. De nauwkeurigheid kan hoger zijn dan bij empirische formules, maar er zijn geen analytische formules om de meer complexe trillingsbewegingen van een gebouw te beschrijven.
3. **Eindige elementenmodellen**, waarbij het gebouw in detail wordt gemodelleerd en de modelleur aannames doet over bijvoorbeeld de eigenschappen van materialen en hun gedrag. Met deze methode zijn details in gebouwgedrag goed inzichtelijk te maken.

Elk model heeft voor- en nadelen, zie ook Bijlage II van dit rapport. De eerste twee methodes hebben als belangrijkste nadeel dat ze details van het trillingsgedrag missen, de laatste methode is zeer gevoelig voor de gebruikte input en leidt zonder koppeling met praktijkresultaten vaak tot sterke afwijkingen.

Daarom heeft We-Boost bij dit onderzoek ervoor gekozen om een semi-empirisch rekenmodel te gebruiken, waarbij we de sterke kanten van deze drie methodes combineren in een uniek rekenmodel met een bewezen hoge betrouwbaarheid: we combineren de match met de praktijk van de empirische formules, de snelheid en accuratesse van de analytische formules en de details van de eindige elementenmodellen. Het grote voordeel van dit rekenmodel is de hoge betrouwbaarheid: uit evaluatiemetingen blijkt dat het gebruikte rekenmodel door de kalibratie met praktijkdata een nauwkeurigheid heeft die in de meeste gevallen significant beter is dan een standaard, niet met praktijkdata gekalibreerd Eindige Elementenmodel. Dat komt doordat de resultaten van het gebruikte rekenmodel gebaseerd zijn op werkelijke (as-built) data, terwijl een Eindige Elementenmodel zeer gevoelig is voor de gebruikte input t.a.v. bijv. demping en stijfheden. In Bijlage II gaan we nader in op de validatie van het rekenmodel.

## 1.4. 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 berekenen we de trillingen in de gebouwen 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 gaan we in op maatregelen om de trillingen in de gebouwen te verminderen.

De bijlages bevatten technische informatie van het onderzoek, zoals een toelichting op de rekenmethodiek en grondonderzoek van nabijgelegen locaties.



# SITUATIEBESCHRIJVING

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

# 2. SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN

## 2.1. SITUATIE

Het plangebied bestaat momenteel uit grasland. Hierop worden 4 bouwblokken gerealiseerd, in een concept van tijdelijke, modulaire woningen van twee bouwlagen. De bestaande en geplande bebouwing is weergegeven in Figuur 2.




*Figuur 2 Huidige en toekomstige bebouwing rond de planlocatie*

De bebouwing is gepland op een afstand van 40 tot 65 meter van het spoor. De rijsnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. Deze gegevens zijn gebaseerd op het Geluidsregister Spoor en gegevens van de vervoerders. Er is een toename van het aantal sprinters voorzien, door de komst van de RegioExpres komt er 1 trein per uur per richting bij.

*Tabel 1 Treinen, rijsnelheid en aantal treinen per uur per richting (gemiddeld, per richting)*

| Type trein | Rijsnelheid | dag (7:00 – 19:00) | avond (19:00 – 23:00) | nacht (23:00 – 7:00) |
|---|---|---|---|---|
| Sprinters | 80 - 110 km/h | 5.00 | 3.00 | 0.75 |
| ICE | 130 km/h | 0.50 | 0.50 | 0.00 |
| Goederen | 90 km/h | 0.03 | 0.03 | 0.07 |

Andere trillingsbronnen, zoals zwaar wegverkeer, zullen gezien de afstand tot de weg en het verkeersbeeld niet voor hinderlijke trillingen in de woningen zorgen. Trillingen door wegverkeer worden daarom niet nader onderzocht.

## 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

Voor het uitvoeren van de berekeningen is gerekend met een aantal varianten, gebaseerd op ontwerptekeningen van tijdelijke woningen van diverse aanbieders (Fairland Studios, Daiwa House). In Tabel 2 is aangegeven welke varianten zijn doorgerekend. In die tabel zijn de belangrijkste eigenschappen van de bebouwing weergegeven. Het rekenmodel voor de bebouwing is hierop gebaseerd.

*Tabel 2 Eigenschappen bebouwing*

| Parameter | Eigenschappen |
|---|---|
| Vloertype | Diverse varianten:<br>• Staal-betonvloeren (stalen balken, betonnen schil en isolatie tussen stalen balken)<br>• Hout-staalvloeren (stalen balken, houten vloer en isolatie tussen stalen balken)<br>• Houten vloeren (houten balken, houten vloer en isolatie tussen houten balken) |
| Hoogte gebouwe | 2 bouwlagen |
| Constructie | Houtskeletbouw, versterkt met stalen spanten |
| Fundering | Op staal |

### 2.2.2. GEGEVENS ONDERGROND

Voor gegevens van de ondergrond is gebruik gemaakt van in de omgeving uitgevoerde boringen en sonderingen. Deze gegevens zijn gebruikt om de bodemopbouw en fundering 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

In Figuur 3 laten we de locaties zien van de punten waar door Alcedo metingen zijn uitgevoerd. Het gaat hierbij om 5 meetpunten op maaiveld, op de randen van de nieuwe gebouwen in een eerdere variant[1]. De meetpunten zijn zo geplaatst om de variatie van de trillingen langs het spoor te meten. De metingen zijn uitgevoerd van 24 juni tot en met 2 juli 2025. Tijdens de meetperiode was er sprake van relatief veel werktreinen en meer goederenverkeer door omleidingsroutes, deze route is standaard goederencorridor.

De meting heeft een meetduur van ruim een week, conform de eisen uit de SBR B-richtlijn, om de trillingen van de treinen betrouwbaar vast te leggen. Op een aantal meetpunten is korter gemeten, deze meetpunten zijn gebruikt om de (frequentie-afhankelijke) verhouding tussen die specifieke meetpunten en het meetpunt van een week vast te leggen. Zo ontstaat inzicht in het effect van de variatie van de trillingen in het plangebied. Vervolgens is die verhouding gebruikt

[1] In de huidige opzet zijn de gebouwen verder bij het spoor vandaan geplaatst, maar deze meetpunten zijn nog steeds bruikbaar, omdat ook de invloed van de afstand tot het spoor met de metingen is vastgesteld.

om de trillingen op alle meetpunten over de hele meetduur vast te stellen (methode conform RIVAS en CargoVibes onderzoeken). De metingen zijn uitgevoerd met FrogWatch trillingsmeters, die voldoen aan de eisen uit de SBR-richtlijnen[2]. Verdere gegevens over de metingen zijn opgenomen in bijlage III van dit rapport.




*Figuur 3 Meetpunten*

[2] Zie een uitgebreide toelichting van de specificaties op https://www.frog.watch/facts/. Er wordt uitsluitend gebruik gemaakt van sensoren die voldoen aan de kalibratie-eisen uit de SBR B-richtlijn.



# 3. BEOORDELINGSKADER

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

# 3. BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE

## 3.1. TRILLINGEN EN WETGEVING

Er bestaat in Nederland geen wettelijk kader voor de beoordeling van trillingshinder van weg-, spoor- en vaarverkeer in gebouwen. Wel geldt dat in het kader van een 'evenwichtige toedeling van functies aan locaties' (art. 4.2 uit de Omgevingswet (Ow)) trillingshinder (waar relevant) in kaart dient te worden gebracht en betrokken bij de afweging in het kader van het beschermen van de fysieke leefomgeving. Net als onder de vroegere Wro zijn hulpmiddelen als de Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen en de SBR-richtlijn van toepassing om mogelijke trillingshinder in kaart te brengen respectievelijk te beoordelen. Als zodanig is er voor trillingshinder ten gevolge van spoorverkeer niets veranderd onder de Ow ten opzichte van de Wro.

## 3.2. BEOORDELINGSKADER TRILLINGSHINDER

Op basis van jurisprudentie wordt al enkele decennia gebruik gemaakt van de SBR-richtlijn om trillingen in gebouwen te beoordelen.[3]

Deze SBR-richtlijn bestaat uit drie delen (deel A[4]– schade in gebouwen, deel B[5] – hinder voor personen in gebouwen en deel C[6] – verstoring van gevoelige apparatuur) waarvan alleen deel B voor dit onderzoek relevant is. De afstand tussen het spoor en het gebouw 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

[3] 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 nieuw te bouwen woningen langs het spoor te beoordelen.

[4] SBR-richtlijn deel A:2017 – Schade aan bouwwerken

[5] SBR-richtlijn deel B:2002 – Hinder voor personen in gebouwen

[6] SBR-richtlijn deel C:2002 – Verstoring van trillingsgevoelige apparatuur

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-overnachtingsfunctie (kantoren, scholen) gelden minder strenge streefwaarden. Winkels, sport- en industriepanden vallen buiten de richtlijn. In dit plan gaat het om gebouwen met een woonfunctie. Tijdelijke woningen zijn geen specifieke categorie binnen de SBR B-richtlijn, doorgaans wordt beoordeeld conform de richtlijn voor definitieve woningen. Sommige gemeentes hebben een eigen afwegingskader voor tijdelijke woningen, maar dit wordt vooral gebruikt voor het afwegen van maatregelen (omdat die minder snel doelmatig zijn bij een kortere levensduur van de woning).

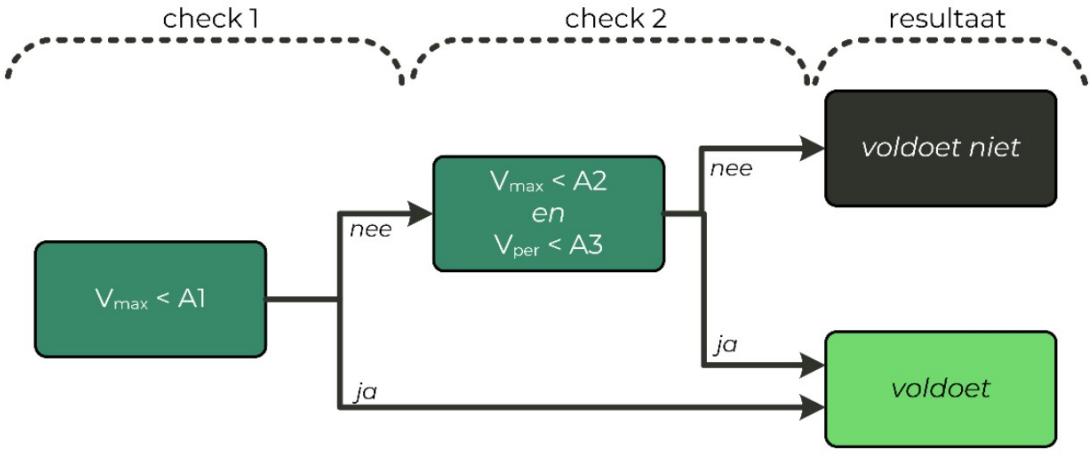
c. De nacht, omdat de meeste hinder vaak in rust wordt ervaren. De streefwaarden voor overdag zijn ca. een factor 2 minder streng dan 's nachts in gebouwen met een overnachtingsfunctie.

Een gebouw kan op twee manieren voldoen aan de richtlijn: de trillingssterkte $V_{max}$ moet lager zijn dan de onderste streefwaarde A1 (zie Tabel 3), 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 4. In dit rapport worden de trillingen, conform de SBR B-richtlijn, beoordeeld op de streefwaarden voor een nieuwe situatie.

Bij overschrijdingen van de streefwaarde geeft de SBR B-richtlijn in bijlage 5 handvatten om maatregelen af te wegen op doelmatigheid.

*Tabel 3 Streefwaarden in de SBR-richtlijn deel B voor gebouwen met bestemming wonen*

| | Dag en avond | | | Nacht | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Situatie** | **A1** | **A2** | **A3** | **A1** | **A2** | **A3** |
| Wonen, nieuwe situatie | 0.1 | 0.4 | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.05 |
| Wonen, bestaande situatie | 0.2 | 0.8 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.1 |




*Figuur 4 Schema beoordeling SBR B-richtlijn*

## 3.3. REKENMETHODE

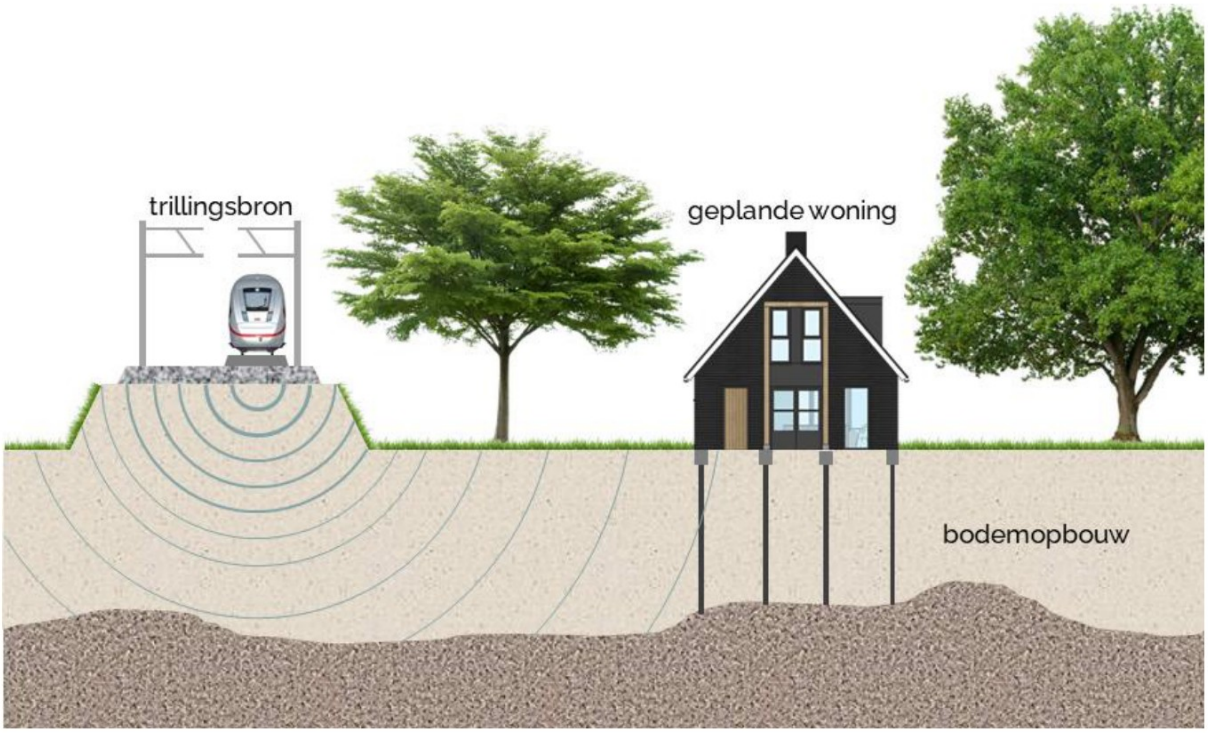
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde bebouwing, wordt op basis van metingen in de omgeving van de bebouwing (op maaiveld) een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande

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. In de volgende subparagrafen wordt beschreven hoe dat is vertaald naar een rekenmodel.

### 3.3.1. TRILLINGEN – VAN TRILLINGSBRON NAAR GEBOUW

Trillingen ontstaan doordat een bewegend object (een trein, tram of vrachtwagen bijvoorbeeld) over een niet-effen 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 5.

In de subparagrafen hieronder wordt toegelicht hoe in dit onderzoek hiermee wordt omgegaan.




*Figuur 5 Trillingen – het systeem van trillingsbron, de bodem en het gebouw als ontvanger*

### 3.3.2. DE TRILLINGSBRON

In dit onderzoek zijn treinen de bron van de trillingen. De trillingen van het treinverkeer zijn gemeten door Alcedo op punten op maaiveld in het plangebied. De beoordeling van de trillingen in de geplande bebouwing heeft plaatsgevonden op basis van deze metingen. Hierbij is in het rekenmodel gecorrigeerd voor afstand tot het spoor en de invloed van puntbronnen in het spoor. De metingen zijn gebruikt als input voor het rekenmodel, waarbij de gemeten trillingen in het

rekenmodel als trillingsbelasting op de fundering van het gebouw zijn aangebracht. Meer informatie hierover is te vinden in bijlage II.

### 3.3.3. DE BODEM

De bodem op deze locatie bestaat uit zand- en kleilagen, zie bijlage I.

De uitdemping 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. In bijlage II geven we hier meer informatie over.

### 3.3.4. 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. Hiervoor maken we gebruik van een rekenmodel waarin de gebouwen gemodelleerd en doorgerekend worden. De resultaten van het model zijn geijkt met praktijkresultaten uit metingen. Een toelichting op het rekenmodel is gegeven in bijlage II.

### 3.3.5. ONZEKERHEDEN IN HET ONDERZOEK

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

- Ten aanzien van de trillingsbron: de natuurlijke variatie als gevolg van spooronderhoud en de temperatuur kunnen zorgen voor zo'n 30% variatie in de trillingen, afhankelijk van de spoorconstructie en de bodemopbouw. Er is gemeten in een klimatologisch als erg droog te karakteriseren periode, waardoor de kleilagen in de bodem erg hard waren. Uit metingen op andere locaties blijkt dat dit kan zorgen voor een factor 1,5 tot 2 hogere trillingen. Uit meetgegevens van ProRail blijkt dat de spoorligging op deze locatie niet zo sterk varieert. Gelet op bovenstaande is de verwachting dat dit onderzoek relatief worst-case is, en dat de trillingen mogelijk worden overschat.
- 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. Door te meten op meerdere punten hebben we deze variaties waar mogelijk in kaart gebracht. De variaties zijn meegenomen in de bepaling van de onzekerheid van de trillingen.
- Ten aanzien van de gebouwen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en technisch ontwerp). Bovendien zijn er natuurlijke variaties in materiaalgedrag (van bijvoorbeeld hout). Dit heeft zowel impact op de stijfheid als de demping van het gebouw. In de berekeningen zijn deze variaties beschreven als onzekerheden (bandbreedtes) rond de verwachte waardes.
- Ten aanzien van het rekenmodel zijn er ook onzekerheden. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van een combinatie van resultaten uit numerieke (eindige elementen) modellen, analytische modellen en empirische gegevens, dus op basis van metingen. Met het rekenmodel, dat nader is omschreven in bijlage II, worden de overdrachten van de trillingen berekend in het gebouw. De modellen zijn daarbij gekalibreerd met resultaten uit metingen. Vooral voor gebouwen met niet standaard vormen, afmetingen of materialen zijn er vaak weinig meetresultaten beschikbaar, en zijn de onzekerheden groter. Deze onzekerheden zijn

verwerkt in de berekeningen. Validatiegegevens van het rekenmodel zijn opgenomen in bijlage II.

- Ten aanzien van het effect van maatregelen geldt dat met name het effect van maatregelen in de bodem sterk afhankelijk is van de lokale bodemopbouw. Het effect van dergelijke maatregelen kan op voorhand redelijk nauwkeurig worden bepaald met behulp van een eindige elementenmodel, maar ook dan nog geldt dat door variaties in de lokale bodemopbouw het effect relatief onzeker is. Daarom is het effect weergegeven als bandbreedte in dit onderzoek, en wordt bij de afweging van maatregelen rekening gehouden met deze bandbreedte in het effect.

In bijlage II wordt aangegeven hoe het rekenmodel met deze onzekerheden omgaat. Bij de discussie van de resultaten wordt ingegaan op de invloed van de onzekerheden op de conclusies van het onderzoek.



# VERWACHTE TRILLINGEN

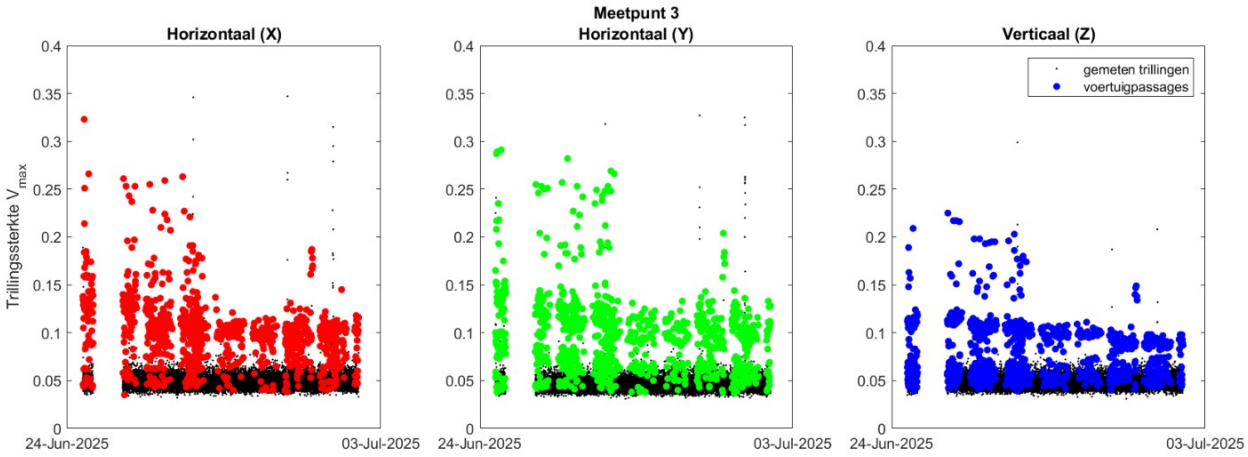
In dit hoofdstuk wordt eerst een korte toelichting gegeven op de meetresultaten, daarna worden de verwachte trillingen in de geplande bebouwing gegeven. Hierbij is gebruik gemaakt van de beoordelingsmethode en de rekenmethodiek zoals toegelicht in het voorgaande hoofdstuk.

# 4 VERWACHTE TRILLINGEN

## 4.1. MEETRESULTATEN

Alcedo heeft metingen uitgevoerd op maaiveld. De trillingen op meetpunt 3 zijn weergegeven in Figuur 6, voor de andere meetpunten zijn deze en andere figuren van de metingen opgenomen in bijlage III. In Figuur 6 valt het volgende op:

1. De eerste paar dagen was er sprake van een aantal uitschieters in de trillingen. Dit zijn goederen- en werktreinen (door werkzaamheden op nabijgelegen trajecten en omrijden van goederentreinen). De trillingen van deze treinen zijn ongeveer een factor 2 hoger dan die van de andere treinen.
2. Na 25 en 26 juni nemen de trillingen van de reizigerstreinen (waarden rond 0.10 - 0.15) af, dit komt vermoedelijk door de neerslag die op die dagen is gevallen.




*Figuur 6 Gemeten trillingen op meetpunt 1*

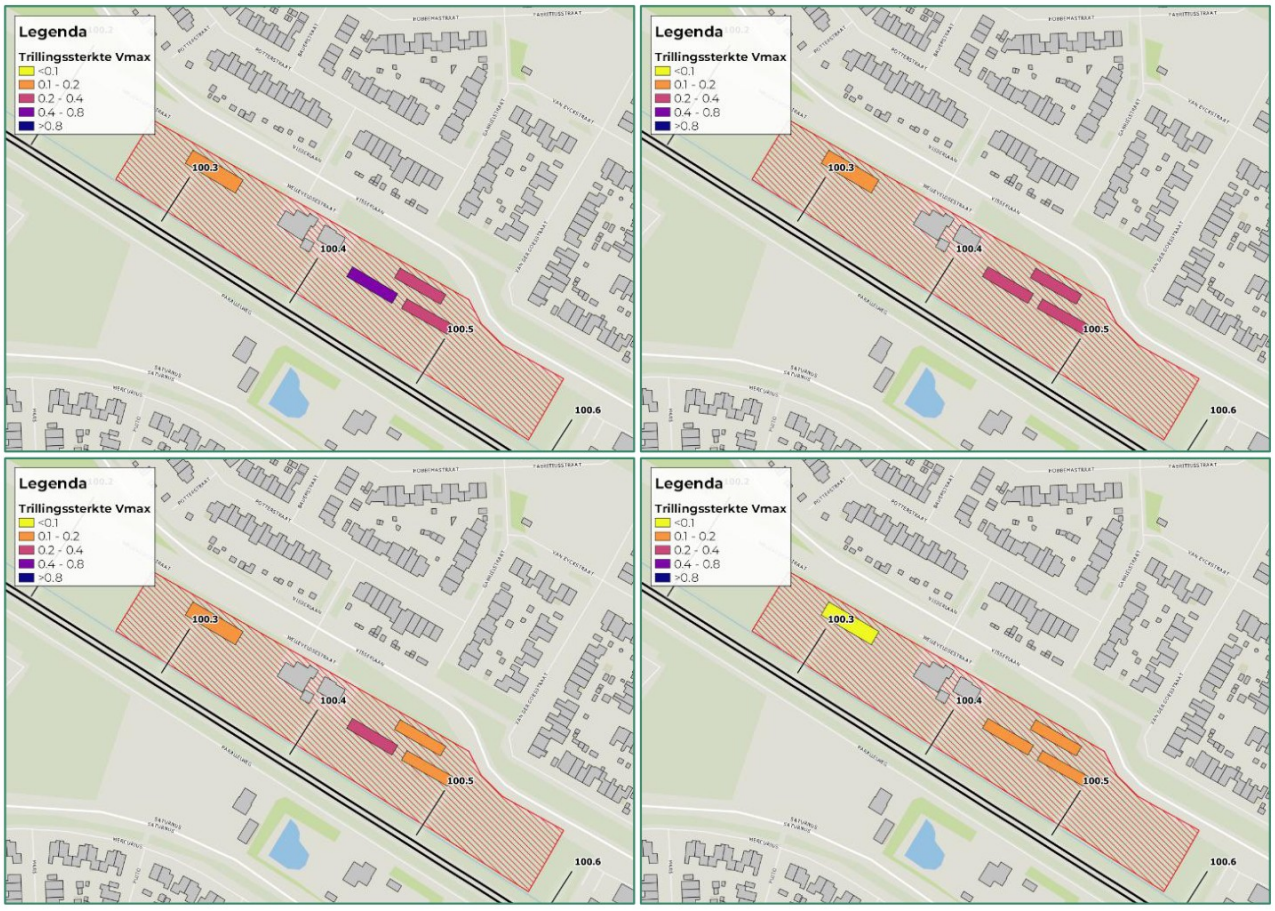
## 4.2. TRILLINGEN IN GEPLANDE GEBOUWEN

De bebouwing is gemodelleerd op basis van de input uit hoofdstuk 2. Het trillingsgedrag van de geplande gebouwen is weergegeven in Bijlage II. Met de modelresultaten zijn de trillingen in de toekomstige gebouwen bepaald. De resultaten hebben we weergegeven in Tabel 4, samen met een beoordeling van de trillingen. De trillingen zijn weergegeven als een bandbreedte (90 procent onzekerheidsinterval), omdat de trillingen afhankelijk zijn van de positie op de verdieping en onzekerheden in de constructie en berekeningen (zie paragraaf 3.3.5 en bijlage II). Gele arcering geeft aan dat er in een deel van de woningen niet wordt voldaan aan de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn.

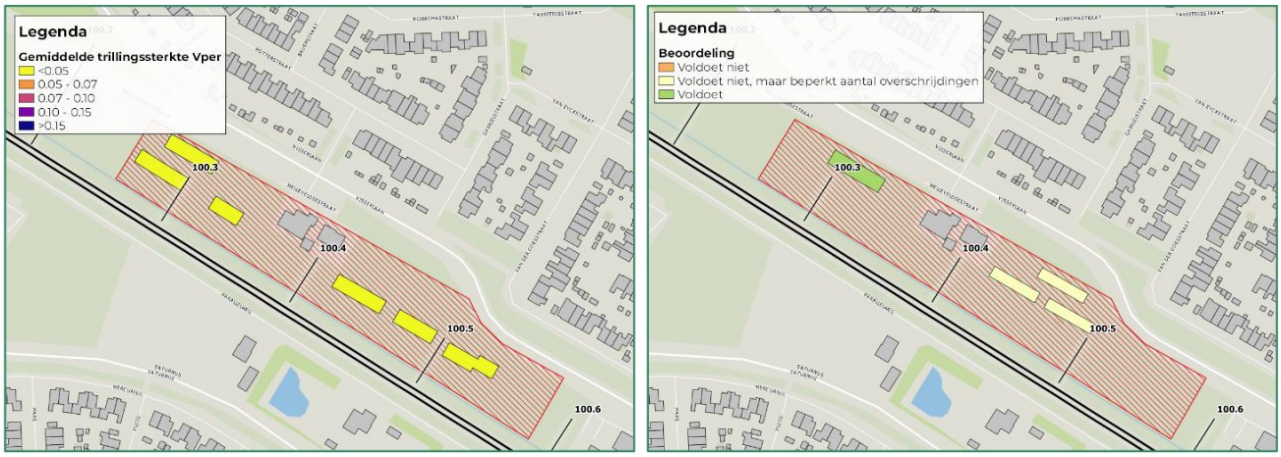
*Tabel 4 Trillingen per constructietype en beoordeling op SBR B-richtlijn*

| Situatie | $V_{max, dag}$ | $V_{max, nacht}$ | $V_{per}$ | Beoordeling |
|---|---|---|---|---|
| Met goederen- en werktreinen | 0.2 - 0.5 | 0.2 - 0.4 | 0.01 - 0.04 | Voldoet niet in alle woningen |
| Zonder goederen- en werktreinen | 0.1 - 0.3 | 0.1 - 0.2 | 0.01 - 0.02 | Voldoet |

De maximale trillingssterkte $V_{max}$ per bouwblok is weergegeven in Figuur 7. De gemiddelde trillingssterkte $V_{per}$ en de beoordeling van de trillingen aan de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn is weergegeven in Figuur 8.




*Figuur 7 Bovengrens van de trillingssterkte $V_{max}$ overdag (linksboven) en in de nacht (rechtsboven) op basis van huidige metingen, onder zonder goederen- en werktreinen (die hier niet regulier rijden)*




*Figuur 8 Bovengrens van de gemiddelde trillingssterkte $V_{per}$ (links) en beoordeling van de trillingen (rechts)*

Uit het onderzoek volgt:

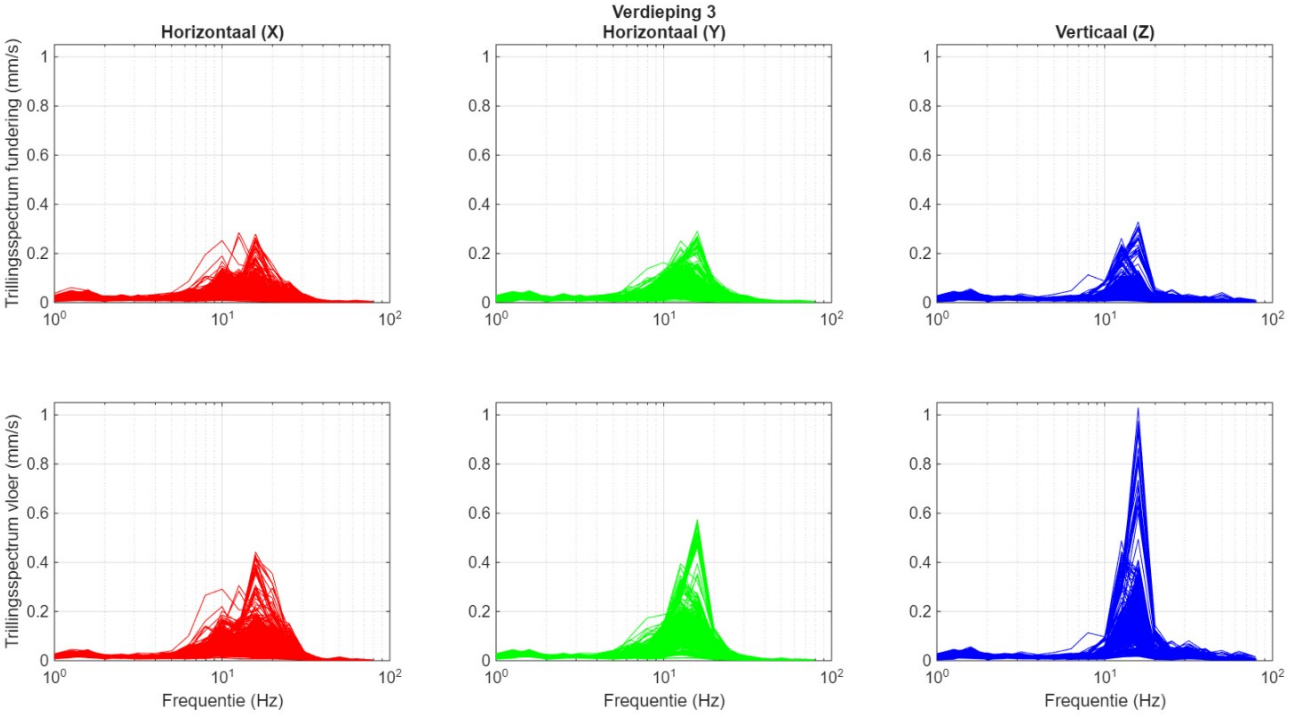
1. De trillingen zijn het hoogst in het midden van het plangebied. Het bouwblok aan de westkant voldoet aan het beoordelingskader, de andere bouwblokken hebben incidentele overschrijdingen van de streefwaarden voor nieuwbouw. De trillingen van reizigerstreinen voldoen aan het beoordelingskader, maar voor goederen- en werktreinen zijn overschrijdingen van de streefwaarden mogelijk.
2. Uit de verschillende varianten die zijn doorgerekend, blijkt het volgende:

a. De constructie van de tijdelijke woningen heeft maar beperkt invloed op de trillingen. Woningen met een meer dempende constructie (hout) hebben iets lagere trillingen dan constructies van staal.
b. De eigenfrequentie van de vloer heeft sterk invloed op de trillingen. Vooral in woningen waarbij de eigenfrequentie samenvalt met de trillingen van de treinen, kunnen hogere trillingen voorkomen. Dat is vooral het geval bij wat hogere eigenfrequenties, boven de 12,5 Hz. Bij lagere eigenfrequenties nemen de trillingen in de woningen af.

3. Het aantal overschrijdingen is beperkt. Bij de worst-case variant met een eigenfrequentie van de vloer boven 12,5 Hz, gaat het om maximaal 1 overschrijding per dag. Bij een eigenfrequentie onder de 12,5 Hz neemt het aantal overschrijdingen af naar maximaal 1 per week.

## 4.3. ANALYSE VAN DE TRILLINGEN

Om meer inzicht te geven in de maatgevende trillingsfrequenties en richtingen, is hiervoor een nadere analyse uitgevoerd, zie Figuur 9 voor de verwachte trillingsspectra van alle treinpassages op de vloer van de maatgevende woning. In deze figuur is de trillingssnelheid per treinpasssage weergegeven als tertsbandspectrum op de fundering en op de vloer. Uit deze figuur kan worden afgeleid bij welke frequentie en in welke trillingsrichting de trillingen het hoogst zijn. Uit Figuur 9 volgt dat in deze variant (eigenfrequentie van 15 Hz van de vloer) vooral de verticale trillingen maatgevend zijn, deze zijn ca. 40% hoger dan de horizontale trillingen. De horizontale trillingen worden vooral versterkt door horizontale resonanties van de constructie, de verticale trillingen vooral door de eigenfrequentie van de vloer.




*Figuur 9 Trillingsspectra op de fundering (boven) en op de begane grondvloer (onder)*

Om te voldoen aan het beoordelingskader is een afname van de trillingen met maximaal 40 procent nodig, afhankelijk van de constructie van de woningen. In het volgende hoofdstuk gaan we in op mogelijke maatregelen om de trillingen te verminderen.



# 5. MAATREGELEN

In dit hoofdstuk worden handvatten gegeven om de woning trillingsarm te ontwerpen, en wordt aangegeven welke maatregelen mogelijk zijn om de trillingen te verminderen.
Hierbij worden ook handvatten gegeven voor een juridisch houdbare afweging tussen effect en kosten van maatregelen.

# 5. MITIGERENDE MAATREGELEN

Door de korte afstand tot het spoor is sprake van relatief hoge trillingen in een deel van de woningen. In dit hoofdstuk beschrijven we de mogelijke maatregelen en bouwkundige optimalisaties waarmee de trillingen kunnen worden verminderd.

## 5.1. NUT EN NOODZAAK VAN MAATREGELEN

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

1. De mate waarin de trillingssterkte voorkomt. Hiervoor geldt dat de gemiddelde trillingssterkte $V_{per}$ een goede indicatie is. Deze voldoet aan de streefwaarden: ($V_{per}$ is hier maximaal 0.04, streefwaarde is 0.05). Verder is sprake van een beperkt aantal overschrijdingen (minder dan 1 per dag). Er is dus sprake van een beperkt aantal overschrijdingen van de trillingen. Relevant hierbij is dat deze overschrijdingen allemaal het gevolg zijn van goederen- en werktreinen, die hier niet rijden in de reguliere dienstregeling.
2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. Wegverkeer zorgt niet voor hinderlijke trillingen op deze locatie. Er is daarom geen sprake van een maskerend effect.
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.

Gelet op bovenstaande dient daarom een afweging plaats te vinden waarbij maatregelen worden afgewogen op doelmatigheid (kosten vs. effect), waarbij we streven naar een redelijkerwijs zo laag mogelijk trillingsniveau in het gebouw. Bij trillingen is geen uitgewerkt doelmatigheidscriterium, daarom wordt doorgaans het ALARA-principe (As Low As Reasonably Achievable, zo laag als redelijkerwijs mogelijk) toegepast bij het afwegen van maatregelen. Maatregelen die tegen acceptabele kosten en weinig risico's zijn te treffen, worden dan getroffen, duurdere of risicovolle maatregelen niet.

Hierbij beschouwen we eerst de mogelijke maatregelen aan de trillingsbron (de trein of het spoor), vervolgens maatregelen in de bodem en tenslotte ook maatregelen in of aan het gebouw (zoals bouwkundige optimalisaties).

## 5.2. 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). De hier maatgevende trillingen worden vooral veroorzaakt door de korte afstand tot het spoor. Meest effectief is het toepassen van een zachte isolatielaag onder het spoor (denk aan een ballastmat (dikke rubberen mat onder het ballast) of under sleeper pads (rubberen matjes onder de dwarsliggers)).

De kosten voor het toepassen van under sleeper pads over een lengte[7] van 200 meter per spoor bedragen ca. € 300.000 incl. BTW. Om under sleeper pads aan te brengen, moeten de dwarsliggers worden vervangen. Ballastmatten zijn fors kostbaarder, omdat het hele spoor daarvoor moet worden verwijderd en teruggeplaatst. Voor alle maatregelen aan het spoor geldt dat de initiatiefnemer hier zelf geen beslissing over kan nemen en dat lange afstemtrajecten met ProRail nodig zijn. Maatregelen aan het spoor zijn onzeker en kennen een lang aanlooptraject, en worden daarom niet als haalbare optie gezien.

## 5.3. 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 trillingsscherm van piepschuim (EPS), beton, jet-grout (soil-mix methode voor beton) of een damwand. Alternatief is het verdiepen van de bestaande spoorsloot, zodat de kleilaag wordt doorsneden. In dat geval is een diepte tot ca. 3 meter nodig. Trillingsschermen zijn erg kostbaar. Om de gebouwen af te schermen, is een trillingsscherm van ca. 160 meter lengte, zie Figuur 10.



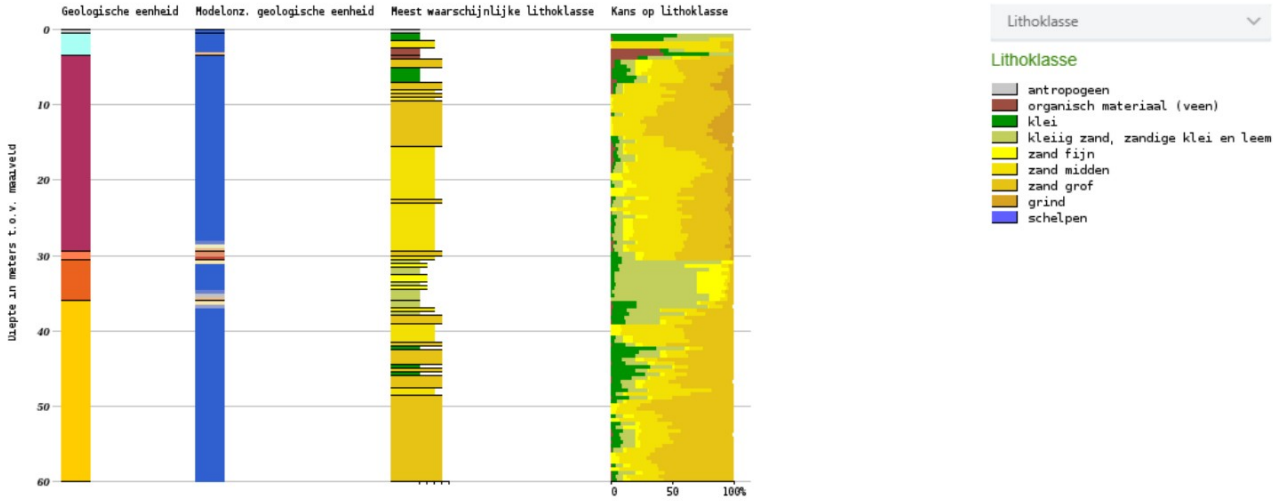

*Figuur 10 Mogelijke locatie van trillingsscherm*

Om de diepte van een scherm te bepalen, is gekeken naar de opbouw van de bodem en de lengte van de maatgevende trillingsgolven. De opbouw van de bodem is weergegeven in Figuur 11. De bodem is relatief gelaagd, de meeste trillingen gaan door de bovenste lagen. Op basis van

[7] Bij under sleeper pads en ballastmatten moeten ook transitiezones (overgangszones van normaal ballastbed naar de zachte ballastmat of under sleeper pads) worden gehanteerd. Deze zijn meegenomen in de genoemde lengtes.

de maatgevende trillingsfrequenties is een scherm van ca. 5 meter diepte nodig om de trillingen voldoende te reduceren.

Vervolgens is, op basis van literatuuronderzoek (eindige elementenmodellen en meetonderzoeken op vergelijkbare bodems) onderzoek gedaan naar kansrijke maatregelen. Een aantal van de meest kansrijke maatregelen in de bodem met een inschatting van het effect (op basis van berekeningen en literatuur, waarbij we rekening houden met de opbouw van de bodem en de maatgevende trillingsfrequenties) en de kosten zijn weergegeven in Tabel 5. Veel andere maatregelen in de bodem zijn veel kostbaarder, en daarom hier niet nader beschouwd.




*Figuur 11 Opbouw van de bodem*

*Tabel 5 Voorbeelden van maatregelen in de bodem, effect op trillingen en kosten*

| Maatregel | Effect | Kosten[8] |
|---|---|---|
| Betonnen wand (diepwandmethode), 5 m diep, 0.5 m breed | 25 – 40% | € 1.0 - € 1.6 mln. |
| Betonnen wand, 5 m diep, 0.5 m breed, tot 3 m diep bekleed met 100 mm rubber | 35 - 60% | € 1.4 - € 2.1 mln. |
| Damwand AZ26-700N, 5 m diep (intrillen) | 10 – 20% | € 0.5 - € 0.7 mln. |
| Trillingsscherm EPS (piepschuim), 5 m diep, 1.0 m dik | 20 - 30% | € 0.3 - € 0.5 mln. |
| Sloot, 3.0 m diep | 25 - 40% | € 0.1 - € 0.2 mln. |

Geen van de maatregelen in de bodem is met zekerheid voldoende effectief. Meest effectief is een betonnen diepwand van 5 meter diep, 0.5 meter breed en aan de spoorzijde bekleed met een zacht materiaal (bijv. 100 mm rubber of 500 mm EPS), deze maatregel is *mogelijk* voldoende effectief. De kosten van deze maatregel zijn echter zeer hoog, met € 1.4 tot € 2.1 mln. Dergelijke kosten staan ook niet in verhouding tot de bouwsom van de geplande woningen.

Het verdiepen van de bestaande greppel naar 3 meter is weliswaar minder effectief, maar heeft ook een factor 20 lagere kosten, en is daarmee veel kosteneffectiever.

[8] Totale investeringskosten, incl. BTW, prijspeil november 2025, met een bandbreedte van +/-25%. Kosten zijn exclusief kosten voor grondverwerving, verleggen van kabels en leidingen en kosten voor een vergunningsprocedure. De werkelijke kosten van maatregelen zullen daardoor hoger uitvallen.

## 5.4. OPTIMALISATIES AAN GEBOUWEN

Tenslotte zijn ook optimalisaties aan de woningen mogelijk, maar bij tijdelijke woningen volgens een vast concept zijn de mogelijkheden beperkt. Wel zijn er verschillen tussen leveranciers, waardoor het kiezen van het juiste concept kan helpen in het verminderen van de trillingen. Het globale effect en de kosten van de mogelijke maatregelen aan de woningen zijn weergegeven in Tabel 6.

*Tabel 6 Mogelijke maatregelen aan gebouwen*

| Maatregel | Effect | Kosten[9] |
|---|---|---|
| Vloer met eigenfrequentie < 10 Hz | 20 - 30 % | geen meerkosten |
| Woning met meer dempende draagconstructie (hout i.p.v. staal) | 0 - 5% | geen meerkosten |
| Paalfundering i.p.v. fundering op betonplaten | 15 - 35% | 5 - 10% SK |
| Dikke betonnen plaatfundering i.p.v. fundering op betonplaten | 10 - 25% | 10 - 15% SK |
| Ontkoppelen van de fundering (afveren, op max. 4 Hz) | 70 - 90% | € 200.000 - € 375.000 |
| Prefab L-wand met luchtspouw voor fundering | 5 - 15% | € 100.000 - € 150.000 |
| EPS-blokken (1 m dik, 2 m diep) voor fundering | 10 - 20% | € 130.000 - € 220.000 |

In dit overzicht is te zien dat:

1. De **keuze van het woningtype** relevant is. Vooral de eigenfrequentie van de vloer en de draagconstructie heeft invloed op de trillingen. Met de keuze voor het juiste type woningen (m.n. de eigenfrequentie van de vloer) zijn de trillingen met zo'n 30% te verminderen. Dan resteren nog incidentele, beperkte overschrijdingen. Concreet betekent dit dat moet worden gekozen voor een woningtype met een eigenfrequentie van de vloer die niet hoger is dan 10 Hz, zo wordt opslingering van de trillingen door de vloer voorkomen. Verder geldt dat de trillingen iets lager zijn in woningtypes met een houten draagconstructie. De houten constructie is weliswaar lichter (en daardoor gevoeliger voor trillingen), maar kent ook wat meer demping, waardoor de trillingen minder worden versterkt. Al met al zorgt dat voor iets lagere trillingen.
2. Met een **geoptimaliseerde fundering** kunnen de trillingen eveneens fors worden verminderd. Nadeel van dit type maatregelen (paalfundering of dikke betonnen plaatfundering) is dat deze eigenlijk niet realistisch zijn voor dit type tijdelijke woningen.
3. Door de **fundering te isoleren** van zijn omgeving kunnen de trillingen ook worden verminderd. Daarvoor zijn meerdere methodes, denk aan een prefab L-wand met luchtspouw voor de fundering, dikke blokken piepschuim (EPS) voor de fundering of zelfs een dubbele, afgeveerde fundering. In Bijlage IV zijn uitwerkingsvoorbeelden van deze oplossingen gegeven.

Alleen met een afgeveerde fundering is het mogelijk om met zekerheid in alle woningen te voldoen aan de streefwaarden. Een combinatie van het juiste woningtype en een geïsoleerde fundering zorgt ook voor het voldoen aan de streefwaarden.

[9] SK = Stichtingskosten. Kosten zijn o.b.v. prijspeil juli 2025, voor alle 5 bouwblokken met overschrijdingen samen

## 5.5. CONCLUSIES EN ADVIES VOOR MAATREGELEN

In een deel van de woningen worden overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder verwacht. Dit komt door de korte afstand tot het spoor en de relatief lichte woningen. Relevant hierbij is wel dat het om overschrijdingen gaat door goederen- en werktreinen, die hier niet in de reguliere dienstregeling zitten (maar vooral tijdens omleidingsroutes en werkzaamheden passeren).

Omdat er overschrijdingen van de streefwaarden mogelijk zijn, hebben we een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. Uit dit onderzoek volgt dat:

1. **Maatregelen aan de bron** van de trillingen (het spoor of de treinen) vergen een lange afstemmingsperiode met ProRail, de beheerder van het spoor. De minst kostbare, naar verwachting voldoende effectieve maatregel is het aanbrengen van under sleeper pads, rubberen matjes onder de dwarsliggers, over een lengte van ca. 350 meter onder beide sporen, deze maatregel kost rond de € 300.000 incl. BTW, maar exclusief kosten voor buitendienststellingen en afstemming met ProRail. Deze kosten worden dus hoger.
2. **Maatregelen in de bodem** zijn beperkt effectief en zeer kostbaar. De meest kosteneffectieve maatregel is het verdiepen van de spoorsloot naar minimaal 3 meter diepte, zodat de kleilaag waar de meeste trillingen doorheen gaan, wordt doorsneden. Met deze maatregel kunnen de trillingen met maximaal 40 procent worden verlaagd, maar zijn nog steeds incidentele overschrijdingen van de streefwaarden mogelijk in een het middelste bouwblok, omdat de trillingen van het spoor daar wat hoger zijn. Trillingsschermen van beton of een damwand bijvoorbeeld zijn zo kostbaar, dat de kosten niet in verhouding staan tot de bouwkosten van de woningen.
3. **Maatregelen aan de gebouwen** zijn beperkt mogelijk, omdat het om modulaire woningen volgens een standaardconcept gaat. Mogelijke maatregelen zijn:
    a. Kies het juiste woningtype: er is verschil in trillingsgedrag tussen woningen van verschillende aanbieders. Kies voor woningen met een maximale eigenfrequentie van de vloer van 10 Hz, en liefst geen stalen draagconstructie (maar bijv. van hout). Hiermee zijn de trillingen met maximaal 30 procent te verminderen, en is alleen in het middelste bouwblok nog sprake van incidentele overschrijdingen.
    b. Toepassen van een verzwaarde fundering (dikke betonnen plaatfundering van 500 mm dik of een zware paalfundering) zorgt ook voor lagere trillingen, maar is niet realistisch voor tijdelijke woningen. Bovendien is het effect hiervan beperkt.
    c. Tenslotte kan nog worden gedacht aan het isoleren van de fundering door het plaatsen van een prefab L-wand of dikke blokken EPS (piepschuim, 1 meter dik) van 2 meter diep rond de woonblokken. Het effect van deze maatregelen is maximaal zo'n 20 procent.
    d. De enige maatregel die met zekerheid voldoende effectief is, en waarmee dus wordt voldaan aan het beoordelingskader, is het toepassen van stalen veerdozen, afgeveerd op maximaal 4 Hz, tussen de woningen en de betonnen funderingsplaten.

Conform het beoordelingskader voor trillingen dienen bovenstaande maatregelen door de initiatiefnemer te worden afgewogen op doelmatigheid (effect afwegen tegen de kosten). Hiervoor biedt bijlage 5 van de SBR B-richtlijn handvatten, meestal wordt hier gebruik gemaakt van een ALARA-afweging (As Low As Reasonably Achievable, zo laag als redelijkerwijs mogelijk) waarbij door initiatiefnemer al het mogelijke wordt gedaan wat nog tegen acceptabele kosten realiseerbaar is. Relevant hierbij is dat bij trillingshinder sprake is van streefwaarden, niet van grenswaarden. Met minder kostbare maatregelen kan bijvoorbeeld wel het aantal

overschrijdingen fors worden verminderd, en kan ook worden voldaan aan de streefwaarden voor bestaande bouw (die hier overigens formeel niet van toepassing zijn). Dit geeft echter wel een indicatie van de mate van overschrijding. Hiermee kan worden betoogd dat sprake is van een aanvaardbaar woon- en leefklimaat t.a.v. trillingen, ondanks dat niet wordt voldaan aan de streefwaarden voor nieuwbouw.

# BIJLAGEN

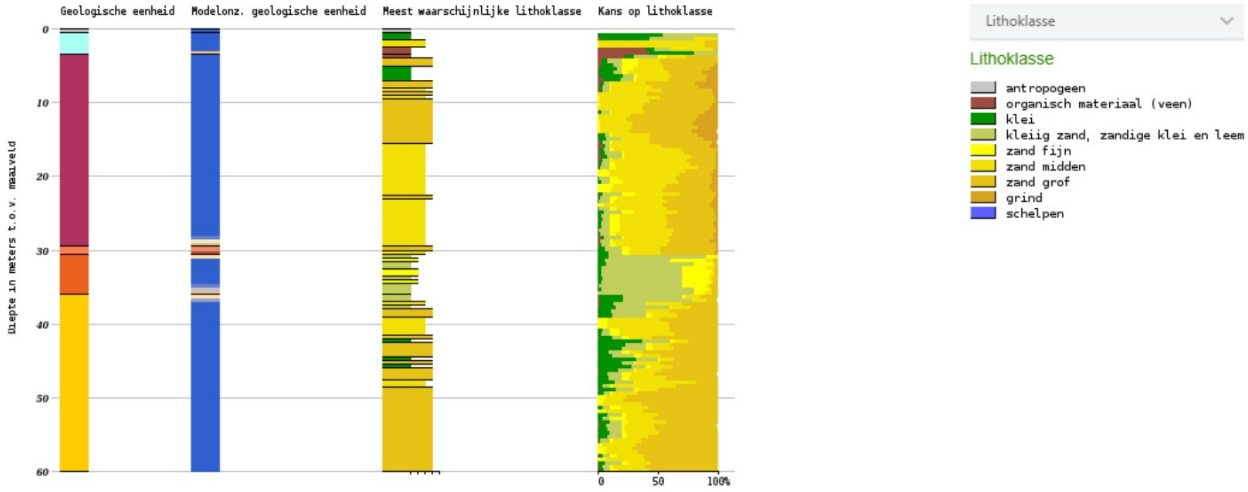
Hierna zijn de volgende bijlagen opgenomen:

I. **Bijlage I - Grondonderzoek**, waarin voorbeelden van de gebruikte input om de bodem te modelleren zijn opgenomen.
II. **Bijlage II - Rekenmodel**, met een toelichting op het gebruikte rekenmodel en voorbeelden van output
III. **Bijlage III - Metingen**, met de resultaten van de trillingsmetingen die ten grondslag liggen aan het onderzoek
IV. **Bijlage IV - Details maatregelen**, met detailschetsen van de inpassing van de besproken maatregelen

# GRONDONDERZOEK

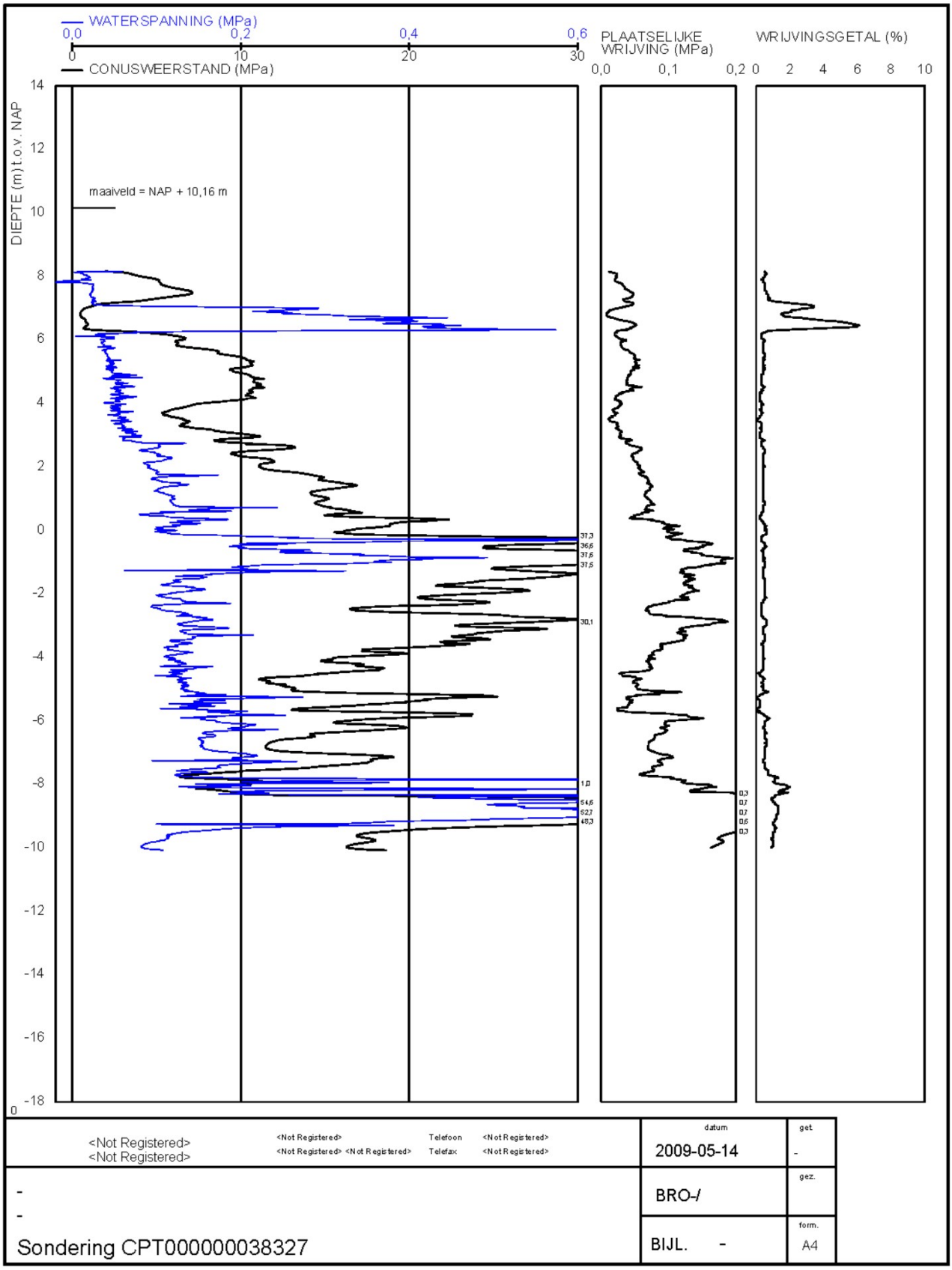
Deze bijlage bevat geotechnische achtergrondinformatie. Deze informatie is gebruikt om bijvoorbeeld de uitdemping van de trillingen met de afstand te bepalen. Daarnaast is deze informatie gebruikt in het rekenmodel waarmee de dynamische eigenschappen van de bebouwing worden bepaald.

Een grondboring in de nabijheid van het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur 12. Uit de grondboring blijkt dat de bodem is opgebouwd uit zand- en kleilagen.




*Figuur 12 Boring in het onderzoeksgebied*

Een representatieve sondering uit de buurt van het onderzoeksgebied, waarin onder meer de conusweerstand te zien is, is weergegeven in Figuur 13. Ook deze sondering laat een gelaagde grondopbouw zien, met bovenin een slappere laag.




*Figuur 13 Sondering uit omgeving onderzoeksgebied*

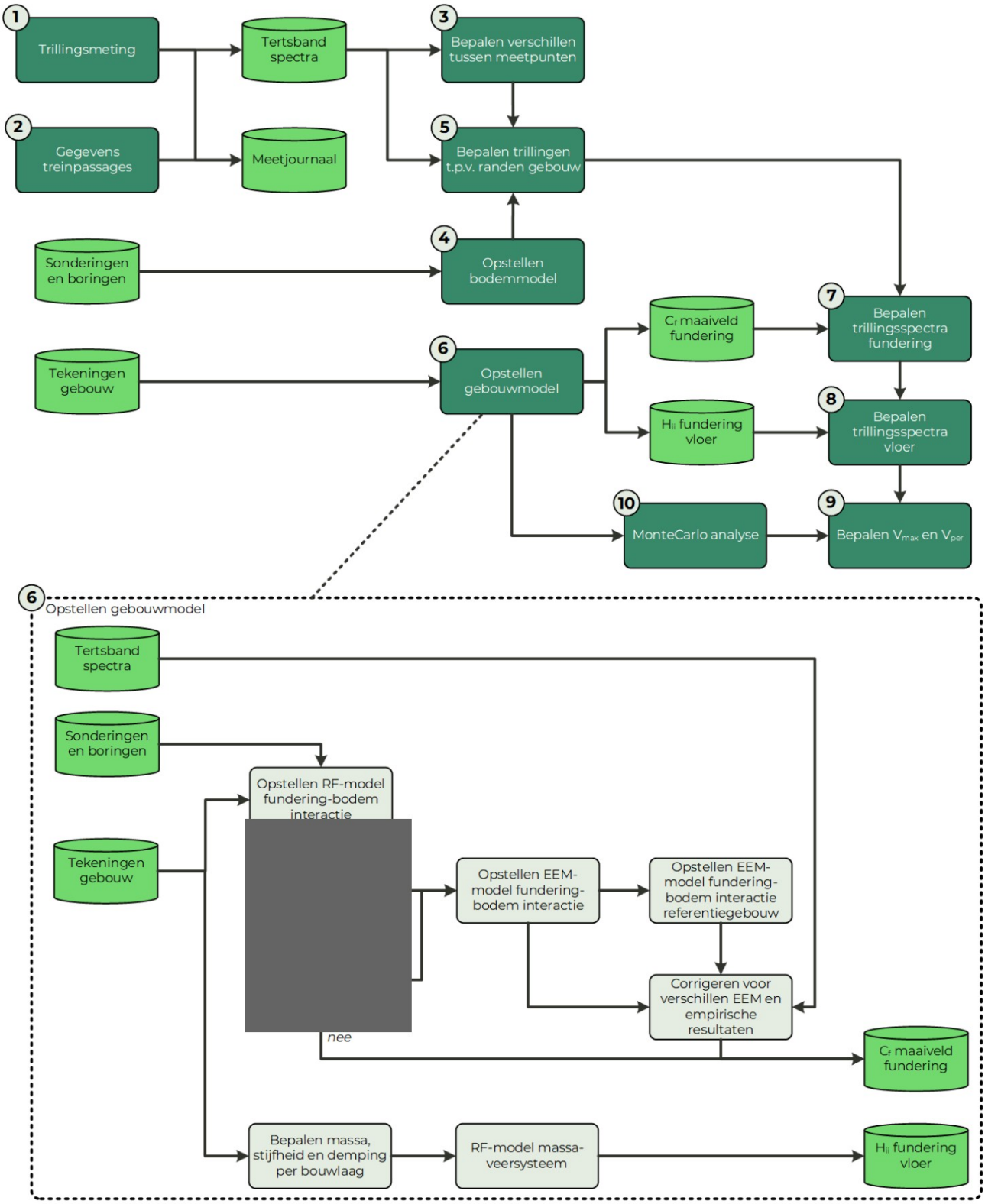
# II. REKENMODEL

Er bestaat geen voorgeschreven rekenmethodiek om de trillingen in een gebouw te bepalen. Afhankelijk van de trillingsbelasting op maaiveld schrijft de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* een hoger of lager detailniveau van het rekenmodel voor, maar het specifiek te gebruiken rekenmodel wordt niet voorgeschreven. Modellen die veel worden gebruikt zijn (globaal in oplopende nauwkeurigheid) empirische formules, analytische modellen en eindige elementenmodellen (zowel 2D-, 2,5D- als 3D-modellen). Na honderden projecten en evaluaties van al die genoemde modellen, hebben we het volgende geconstateerd:

1. Empirische formules zijn vaak grof, en vooral bruikbaar als de trillingen op maaiveld laag zijn. Ze zijn vooral bruikbaar in situaties die vergelijkbaar zijn met de situatie waarin de empirische formule is bepaald.
2. Analytische modellen en formules zijn bij eenvoudige, meer standaard gebouwen prima bruikbaar, maar bij complexe constructies of onderdelen daarvan missen ze soms belangrijke trillingsmodes. Wel zijn deze modellen vaak goed geschikt om het trillingsgedrag van vloervelden te bepalen.
3. Eindige elementenmodellen zijn erg nauwkeurig, mits juist gemodelleerd. Het probleem is echter dat onderzoeksbureaus sterk uiteenlopende waarden gebruiken als input voor het rekenmodel. Keuzes in bijvoorbeeld materiaalstijfheid, demping en de wijze van modelleren hebben grote impact op de resultaten. Bovendien geldt dat de gebruikte waarden in de praktijk altijd anders zijn (verschillen tussen ontwerp en as-built situatie, denk aan de wijze van inklemmen van een vloer, de gescheurdheid van beton of natuurlijke variatie in materiaalgedrag van hout). Ook de koppeling tussen bijvoorbeeld de bodem en een gebouw is lastig nauwkeurig te modelleren. Gevolg hiervan is dat we in de praktijk bij alle getoetste situaties sterke verschillen vinden tussen de modelberekening en het werkelijke trillingsgedrag van een gebouw.

Omdat alle drie deze hoofdmethodes in de praktijk vaak sterke afwijkingen geven van de werkelijk optredende trillingen én er geen voorgeschreven, algemeen geaccepteerd model is, heeft We-Boost een eigen rekenmodel ontwikkeld waarin we het beste van deze drie methodes combineren. We maken hierbij gebruik van een combinatie van eindige elementenberekeningen en analytische formules, die we combineren met een zogenaamd random forest algoritme (een AI-techniek om resultaten in complexe situaties te voorspellen op basis van resultaten uit het verleden). Dit random forest algoritme is getraind op een database met honderden metingen in gebouwen, waarbij het algoritme relaties heeft gelegd tussen gebouwparameters (denk aan vloeroverspanning, constructietype, hoogte, breedte, lengte, aantal funderingspalen, type funderingspalen, bodemstijfheid) om daaruit het trillingsgedrag van het gebouw te voorspellen.

In deze bijlage beschrijven we ons model. Een validatierapport van het model is gegeven in Bijlage V. Visueel is het rekenproces weergegeven in Figuur 14, hieronder beschrijven we per stap de methode en geven we zoveel mogelijk tussenresultaten. De nummers in de figuur corresponderen met de subparagrafen hieronder.




*Figuur 14 Stappen in rekenmodel*

## II.1 TRILLINGSMETING

De eerste stap is het uitvoeren van een trillingsmeting. De meetlocaties worden gekozen op basis van de ligging van de geplande gebouwen, de locatie van de trillingsbron (zijn er extra trillingsbronnen zoals wissels, ES-lassen of overwegen), de omvang van het plangebied (bij een groter gebied meer meetpunten om de variatie in trillingen in beeld te brengen) en waar mogelijk een vast punt in de omgeving, omdat de trillingen daar reproduceerbaar en betrouwbaar kunnen worden vastgesteld.

De meting heeft altijd een meetduur van minimaal een week, conform het beoordelingskader, de SBR B-richtlijn, om de trillingen van de treinen voldoende betrouwbaar vast te leggen. Met name goederentreinen kennen sterke variaties in de trillingen en passeren vaak niet zo vaak, waardoor een lange meetperiode nodig is om de trillingen voldoende betrouwbaar vast te stellen. De trillingssterkte wordt vastgesteld conform de SBR B-richtlijn.

Gegevens over de metingen zijn opgenomen in bijlage III. Resultaat van de metingen zijn trillingssignalen (mm/s).

## II.2 GEGEVENS TREINPASSAGES

De metingen worden gecombineerd met gegevens van treinpassages. Hiervoor worden meerdere bronnen gebruikt, afhankelijk van het project: gegevens vanuit het OpenOV-loket (reizigerstreinen), een classificatie-algoritme dat getraind is om treinpassages te herkennen in de trillingssignalen en een handmatige controle op afwijkende resultaten.

Resultaat van deze stap is een meetjournaal (database met per treinpassage per meetpunt de trillingssterkte $V_{max}$) en per treinpassage het bijbehorende trillingssignaal (1/3-octaafbandspectra of tertsbandspectra).

## II.3 BEPALEN VERSCHILLEN TUSSEN MEETPUNTEN

Bij elke meting maken we gebruik van meerdere meetpunten, om variaties in de bodem of de invloed van extra trillingsbronnen (zie paragraaf II.1) in beeld te brengen. Vervolgens bepalen we de frequentie-afhankelijke verschillen tussen meetpunten door per meetpunt de trillingsspectra per treinpassage met elkaar te vergelijken. Hieruit halen we drie dingen:

1. De variatie in de trillingen over het plangebied, veroorzaakt door onzekerheden in de bron of bodem. Deze onzekerheid nemen we mee in de prognoses (zie paragraaf II.10).
2. De invloed van extra trillingsbronnen, zoals wissels en ES-lassen, of de invloed van bijvoorbeeld een sloot of damwand. Deze invloeden nemen we mee in het rekenmodel door de variatie van de trillingen over het plangebied in kaart te brengen. Het trillingsspectrum op de ene hoek van het gebouw kan dus anders zijn dan op de andere hoek van het gebouw, zie paragraaf II.5).
3. De uitdemping van de trillingen met de afstand, op basis van de empirische, frequentie-afhankelijke Barkanvergelijking, zoals weergegeven in vergelijking 1.

$$V(f,r) = V_0(f,r_0) \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^{n(f)} \cdot e^{-\alpha \cdot (r-r_0)} \qquad (1)$$

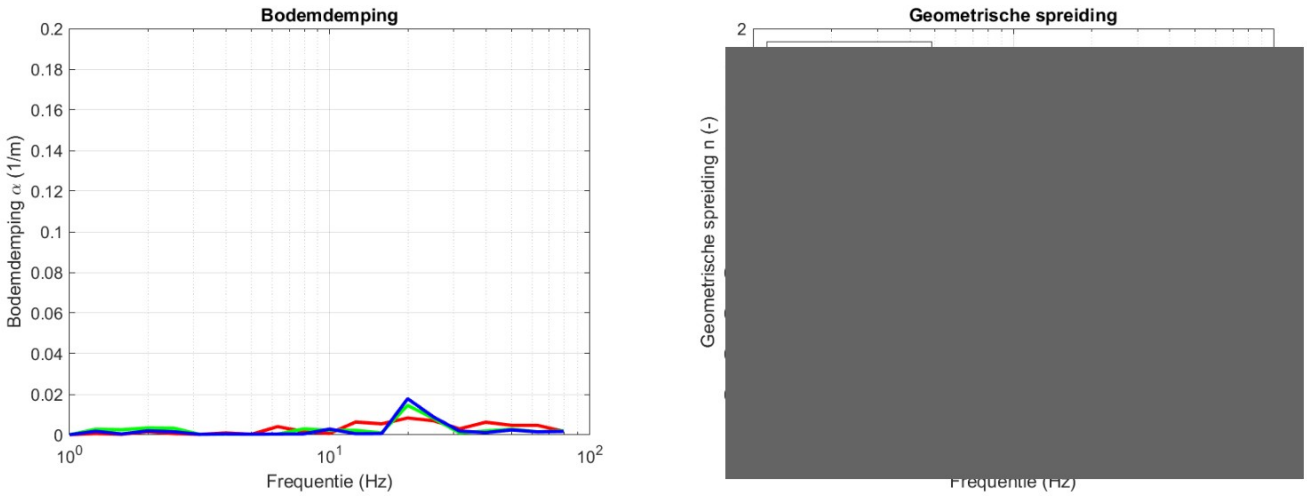
In deze vergelijking staat $V$ voor de trillingssnelheid, $f$ voor de frequentie, $r$ voor de afstand tot de trillingsbron, $r_0$ voor de referentieafstand (hier 20 m), $n$ voor de geometrische spreidingsfactor en $\alpha$ voor de bodemdemping. De parameters $V_0$, $n$ en $\alpha$ worden bepaald met de kleinste kwadratenmethode.

De prognoses van de trillingen zijn gebaseerd op de sensor met de meetduur van een week die het dichtst bij het gebouw staat waarvoor de resultaten nodig zijn. Op veel punten meten we korter, dat is voldoende om de invloed van variaties in beeld te brengen, zie ook paragraaf 2.2.3 voor een nadere motivatie.

## II.4 OPSTELLEN BODEMMODEL

In veel situaties is er sprake van verschillen in de opbouw van de bodem, kunnen metingen niet worden uitgevoerd ter plekke van de beoogde bouwlocatie of is sprake van een groter gebouw, zodat we de trillingen willen vaststellen op meerdere punten in het plangebied. Dit doen we door een bodemmodel op te stellen, daarmee de uitdemping van de trillingen met de afstand te berekenen en dat te kalibreren met de resultaten uit de metingen.

Het bodemmodel wordt opgebouwd op basis van sonderingen en boringen. Op basis van de conusweerstand $q_c$ en het wrijvingsgetal $f_w$ worden de frequentie-afhankelijke parameters $n$ en $\alpha$ uit vergelijking 1 bepaald met behulp van een random forestmodel, getraind op data uit honderden metingen die op maaiveld zijn uitgevoerd in heel Nederland. Resultaat is, naast de genoemde parameters uit de Barkanvergelijking, een inschatting van de onzekerheid van die parameters. Deze onzekerheid is afhankelijk van (1) de afstand tussen gebruikte sonderingen en het gebouw, (2) het aantal gebruikte sonderingen, (3) de variatie in de sonderingen en (4) in hoeverre de gebruikte sonderingen lijken op sonderingen uit het random forestmodel. Een voorbeeld van de door het model bepaalde parameters uit vergelijking 1 is weergegeven in Figuur 15.




*Figuur 15 Bodemdemping α (links) en geometrische spreiding n (rechts) als functie van de frequentie, bepaald met random forestmodel*

## II.5 BEPALEN TRILLINGSSPECTRA T.P.V. RANDEN GEBOUW

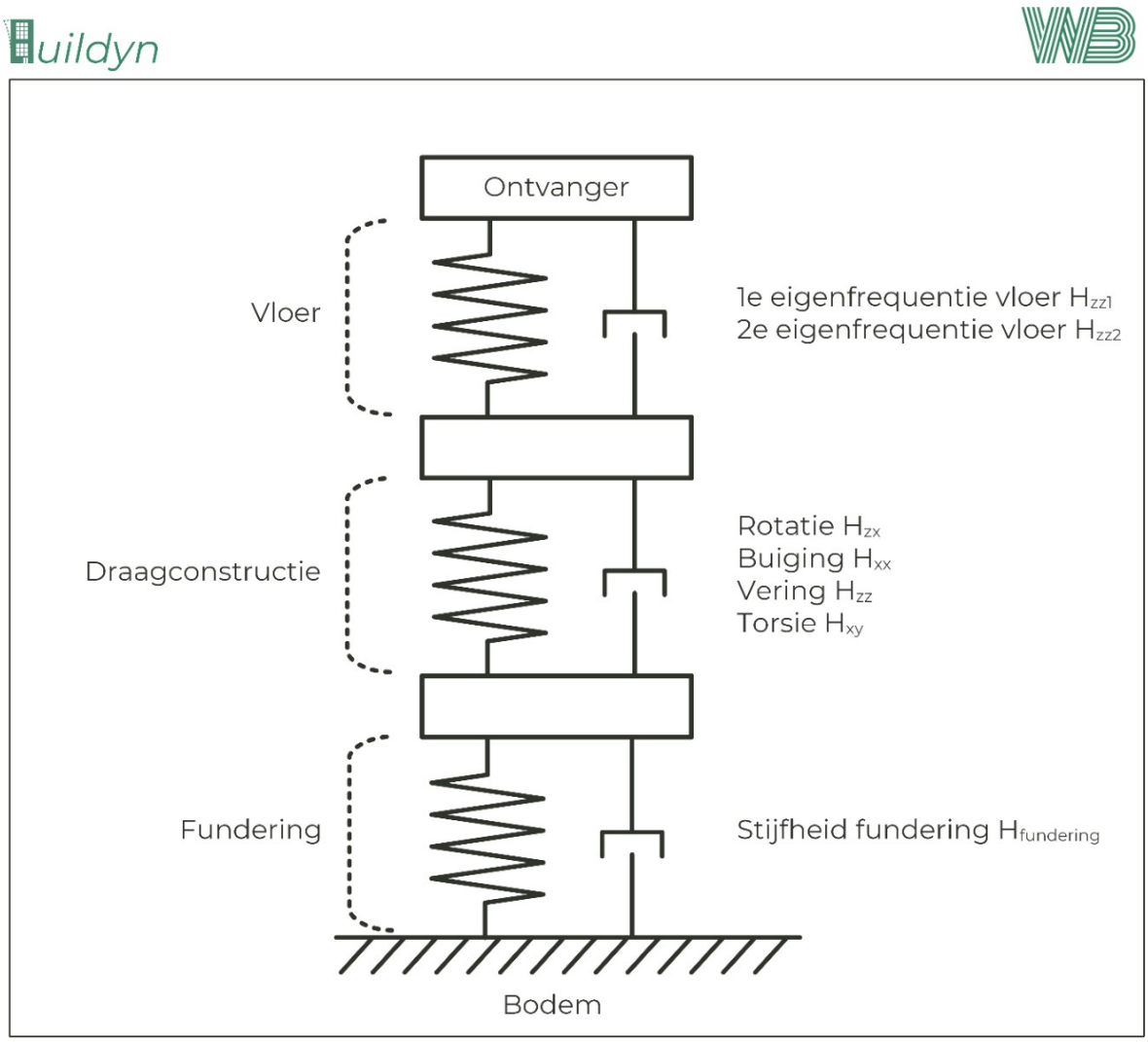
Op basis van de resultaten uit stap 3 en 4, en met behulp van vergelijking 1, worden vervolgens de trillingsspectra in het gehele plangebied bepaald. De invloed van puntbronnen wordt separaat meegenomen, waarbij de trillingen van de puntbronnen energetisch worden opgeteld bij de trillingen van het doorgaande spoor.

Na deze stap zijn de trillingen ter plaatse van de randen van het gebouw op maaiveld bekend.

## II.6 OPSTELLEN GEBOUWMODEL

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van het rekenmodel Buildyn om de trillingen in de geplande bebouwing te berekenen. In Buildyn wordt het trillingsgedrag van een gebouw berekend met behulp van een combinatie van enkele rekenmodules, waarbij de hoofdmoot wordt gevorm door een random forest algoritme. Dit algoritme is getraind op een database met meer dan 600 praktijkmetingen. In deze paragraaf beschrijven we het gebruikte rekenmodel.

In Buildyn wordt een gebouw gemodelleerd door middel van gekoppelde massa-veersystemen, zie Figuur 16, waarbij eerst de details per bouwlaag worden bepaald, waarna een random forest algoritme de trillingsresponsie berekent van het gebouw. Zowel bij het trainen als bij het testen van het random forest algoritme worden gebouwen beschouwd als gekoppelde massa-veersystemen. Op basis van afmetingen, massa, stijfheid en materiaalparameters (zoals de demping) berekent het algoritme een veerstijfheid en demping, en daaruit de trillingsoverdracht in het gebouw. Het algoritme berekent deze overdrachten frequentie-afhankelijk, en geeft daarnaast een onzekerheidsmarge weer.




*Figuur 16 Principe van Buildyn met een gebouw als gekoppeld massaveersysteem. Rechts de verschillende componenten van het rekenmodel*

Voor de materiaalparameters maken we gebruik van standaard materiaaleigenschappen op basis van literatuurgegevens en normen. Deze materiaaleigenschappen zoals gebruikt in het rekenmodel zijn weergegeven in Tabel 7. Voor materialen met een niet-lineaire elasticiteit zoals rubber en EPS maken we gebruik van spanning-rekkrommes om de materiaaleigenschappen te beschrijven.

*Tabel 7 Initiële modelparameters*

| Materiaal | E-modulus E | Demping $\zeta$ | Dichtheid $\rho$ | Poissons ratio $\nu$ |
|---|---|---|---|---|
| Beton C30/37 | 33 GPa | 3 % | 2500 kg/m$^3$ | 0,20 |

| Materiaal | E-modulus E | Demping ζ | Dichtheid ρ | Poissons ratio ν |
|---|---|---|---|---|
| Beton C55/67 | 38 GPa | 3 % | 2500 kg/m³ | 0,20 |
| Beton C80/95 | 42 GPa | 3 % | 2500 kg/m³ | 0,20 |
| Metselwerk | 8 GPa | 4 % | 1800 kg/m³ | 0,25 |
| Staal | 210 GPa | 1 % | 700 kg/m³ | 0,30 |
| Hout | 13 GPa | 5 % | 7850 kg/m³ | 0,40 |

Het model bestaat uit twee hoofdonderdelen: een module om het gedrag van de fundering te bepalen en een module om het gedrag van het gebouw te bepalen. Deze worden hieronder toegelicht.

### II.6.1 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) en afmetingen daarvan (denk aan paaltype (geboord, prefab), paallengte, paaldiameter en aantal palen, of dikte van de funderingsbalken)
- Afmetingen en gewicht van het gebouw
- Bodem waarop het gebouw staat
- Eventuele afscherming of isolatie van de fundering

Vooral boven de 10 Hz worden trillingen uitgedempt door de fundering, bij slappe bodems en grote gebouwen kan ook al bij lagere frequenties demping optreden, met name in horizontale richting. Bij stijvere bodems kan, zeker in verticale richting, demping optreden vanaf veel hogere frequenties.

Optimalisaties van de fundering (zoals langere palen, dikkere palen, meer of minder palen, een dikkere poer en het bekleden van de fundering met bijv. rubber of EPS) worden ook in het model doorgerekend.

Het bepalen van het gedrag van de fundering gaat als volgt:

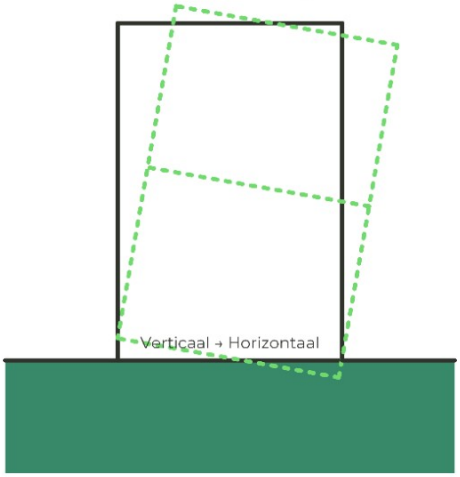
1. Eerst bepalen we met behulp van een random forest algoritme de frequentie-afhankelijke overdracht van maaiveld naar fundering op de randen van het gebouw. Als input gebruiken we hierbij de opbouw van de bodem (vanuit sonderingen), de massa van het gebouw en de eigenschappen van de fundering (aantal palen, type palen, lengte palen, dikte funderingsbalken of -poer).

Bij complexe funderingen (denk aan een combinatie van een parkeergarage en een paalfundering) of bijzondere funderingen (denk aan hele zware funderingen) zullen de uitkomsten uit het random forest model een grote onzekerheid kennen. In dat geval voegen we een tweede stap toe waarbij met behulp van een eindige elementenmodel de bodem-funderingsinteractie nauwkeuriger wordt berekend. Dat is in dit geval niet gedaan, de woningen worden op staal gefundeerd.

### II.6.2 GEBOUWCONSTRUCTIE

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), doorbuiging en vering van het gebouw op zijn fundatie een rol spelen. Bij hogere of slappere gebouwen speelt ook doorbuiging en torsie (rotatie om een verticale as in het gebouw) een rol.

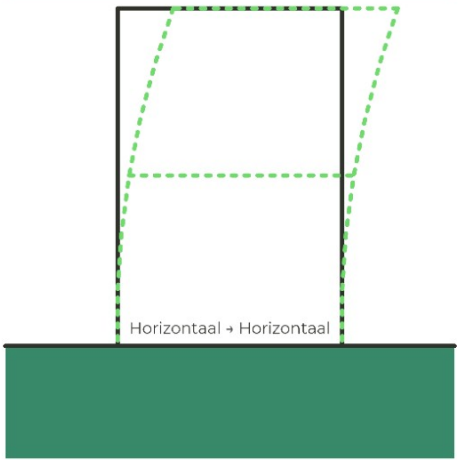
Het principe van rotatie is rechts weergegeven. Verticale trillingsgolven zorgen voor rotatie van het gebouw, waardoor met name in hogere gebouwen horizontale trillingen ontstaan.




Dit effect noemen we $H_{zx}$, 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

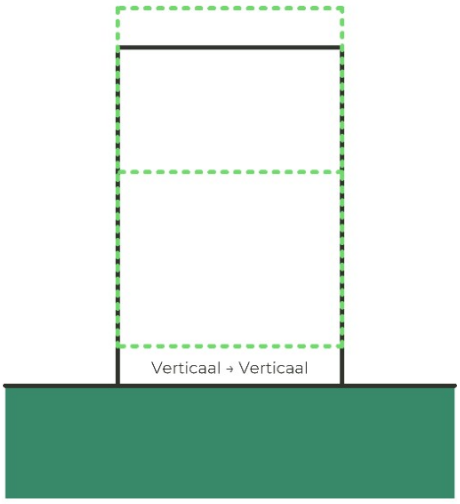
Het tweede principe, dat van doorbuiging van het gebouw, is rechts weergegeven (eerste eigenfrequentie). Hierbij zijn met name de horizontale trillingsgolven maatgevend, die bij slappere gebouwen zorgen voor doorbuiging van het gebouw, en daarmee voor horizontale trillingen hoger in het gebouw.




Dit effect noemen we $H_{xx}$, en is afhankelijk van:

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

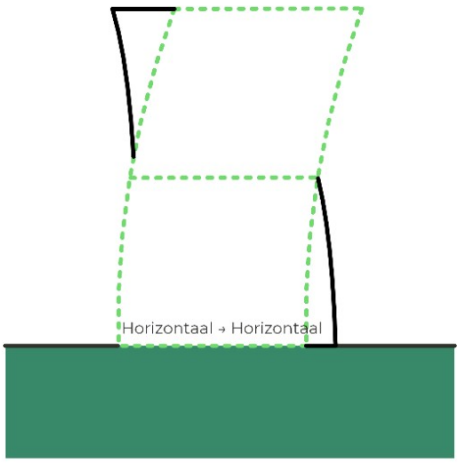
Het derde principe, dat van vering van het gebouw op zijn fundatie, is rechts weergegeven. Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappe onderlaag of lokaal slappere elementen (denk aan kolommen en balkenstructuren). Dit effect noemen we $H_{zz}$, en is afhankelijk van:




- Hoogte van het gebouw
- Constructietype (stijfheid, starheid van verbindingen, open ruimtes)

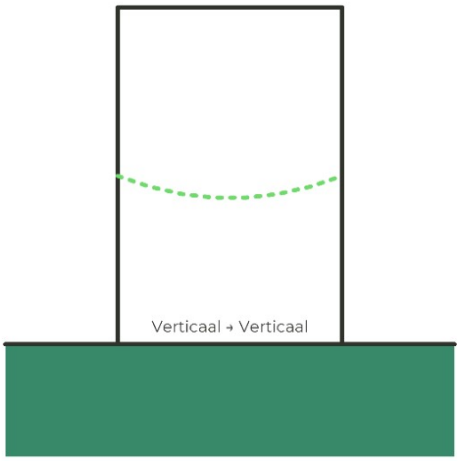
Het vierde principe, dat van torsie van het gebouw, is rechts weergegeven (eerste eigenfrequentie). Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappere constructie. Dit effect noemen we $H_{xy}$, en is afhankelijk van:

- Hoogte van het gebouw
- Constructietype (stijfheid, starheid van verbindingen, open ruimtes)
- Afmetingen van het gebouw (symmetrie)




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 het rekenmodel worden daarom beide effecten meegenomen.

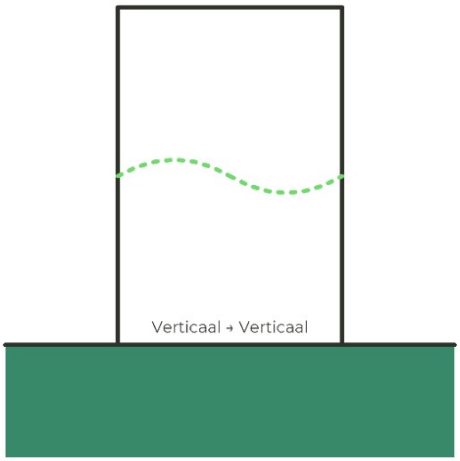
De eerste buigmodus van de vloer (bij de eerste eigenfrequentie) is simpele doorbuiging, zoals weergegeven in de principeschets rechts. Met name de eigenfrequentie (de frequentie waarvoor de vloer gevoelig is) en de demping bepalen in hoeverre de trillingen worden opgeslingerd. De trillingen zijn het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




Dit effect noemen we $H_{zz1}$, 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 ¼ van het vloerveld, zie de principeschets rechts.




Dit effect noemen we $H_{zz2}$, en is afhankelijk van dezelfde parameters als $H_{zz1}$.

Uiteindelijk zorgen alle gebouwbewegingen samen voor een versterking van de trillingen tussen de fundering en de vloer. In de hiernavolgende figuren zijn deze totale overdrachten in de X-, Y- en Z-richting van het gebouw weergegeven. Voor de vloeren wordt onderscheid gemaakt tussen de $H_{zz1}$ en de $H_{zz2}$-beweging, omdat beide niet op hetzelfde punt kunnen optreden ($H_{zz1}$ is maximaal in het midden van de vloer, $H_{zz2}$ op een kwart van de randen).

Het bepalen van het gedrag van het gebouw gaat als volgt:

1. Eerst bepalen we per bouwlaag van het gebouw de eigenschappen van die bouwlaag. Denk hierbij aan afmetingen, maar ook aan eigenschappen als de stijfheid (buig- en torsiestijfheid, elasticiteitsmodulus) en demping (op basis van de toegepaste materialen en verbindingen).
2. Vervolgens modelleren we het gebouw door voor elke bouwlaag de mechanische eigenschappen in een soort beam element model toe te voegen (zie Figuur 16). Op basis van de configuratie (aantal bouwlagen) en de ingevoerde eigenschappen berekent het random forest algoritme vervolgens de frequentieafhankelijke trillingsresponsie van het gebouw tot aan de vloeropleggingen, en de onzekerheid in die responsie. Hiermee ontstaat een trillingsoverdracht in het gebouw die zo goed mogelijk aansluit bij de in de praktijk te verwachten trillingsoverdracht, en bij de werkelijke omstandigheden zoals gemeten in de praktijk (denk aan de werkelijke stijfheid van opleggingen, de werkelijke demping en de werkelijke stijfheid van het materiaal).
3. Tenslotte bepalen we de overdracht van de oplegging van de vloeren naar rekenpunten op de vloer, waar de werkelijke hinder wordt ervaren. Eerst maken we een model van het vloerveld om de overdracht van de oplegging naar het midden van de vloer te bepalen. Hiervoor combineren we analytische formules (bij complexer gevormde vloervelden doen we dit via een iteratief proces) om de responsie van de vloer in het frequentiedomein te bepalen. De mechanische eigenschappen in deze formules (demping, stijfheid) volgen uit het random forest algoritme, en zijn dus gebaseerd op praktijkdata. We bepalen we resultaten in de hoeken van vloervelden, in het midden van de vloervelden en op een kwart van de overspanning. Meestal is het midden van het vloerveld voor trillingen maatgevend.

Relevant bij onze methode van het gebruiken van random forest algoritme is dat deze nauwkeuriger is naarmate gebouwen sterker overeenkomen. Met name grondgebonden woningen komen veelvuldig voor in de database, voor hogere gebouwen zijn minder metingen beschikbaar in de database en is de onzekerheid in de resultaten groter. We gaan hieronder nog in op de betrouwbaarheid van het rekenmodel, en de toepasbaarheid voor hoge gebouwen.

## II.7 BEPALEN TRILLINGSSPECTRA T.P.V. FUNDERING GEBOUW

In de volgende stap worden de resultaten op maaiveld vertaald naar de resultaten op de fundering van het gebouw. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de resultaten uit stap 5 en stap 6. De trillingsspectra op de fundering worden berekend met behulp van vergelijking 2:

$$\begin{matrix} V_{x,fundering}(f) \\ V_{y,fundering}(f) \\ V_{z,fundering}(f) \end{matrix} = \sqrt{\begin{bmatrix} C^2_{f,xx}(f) & C^2_{f,yx}(f) & C^2_{f,zx}(f) \\ C^2_{f,xy}(f) & C^2_{f,yy}(f) & C^2_{f,zy}(f) \\ C^2_{f,xz}(f) & C^2_{f,yz}(f) & C^2_{f,zz}(f) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V^2_{x,mv}(f) \\ V^2_{y,mv}(f) \\ V^2_{z,mv}(f) \end{bmatrix}} \qquad (2)$$

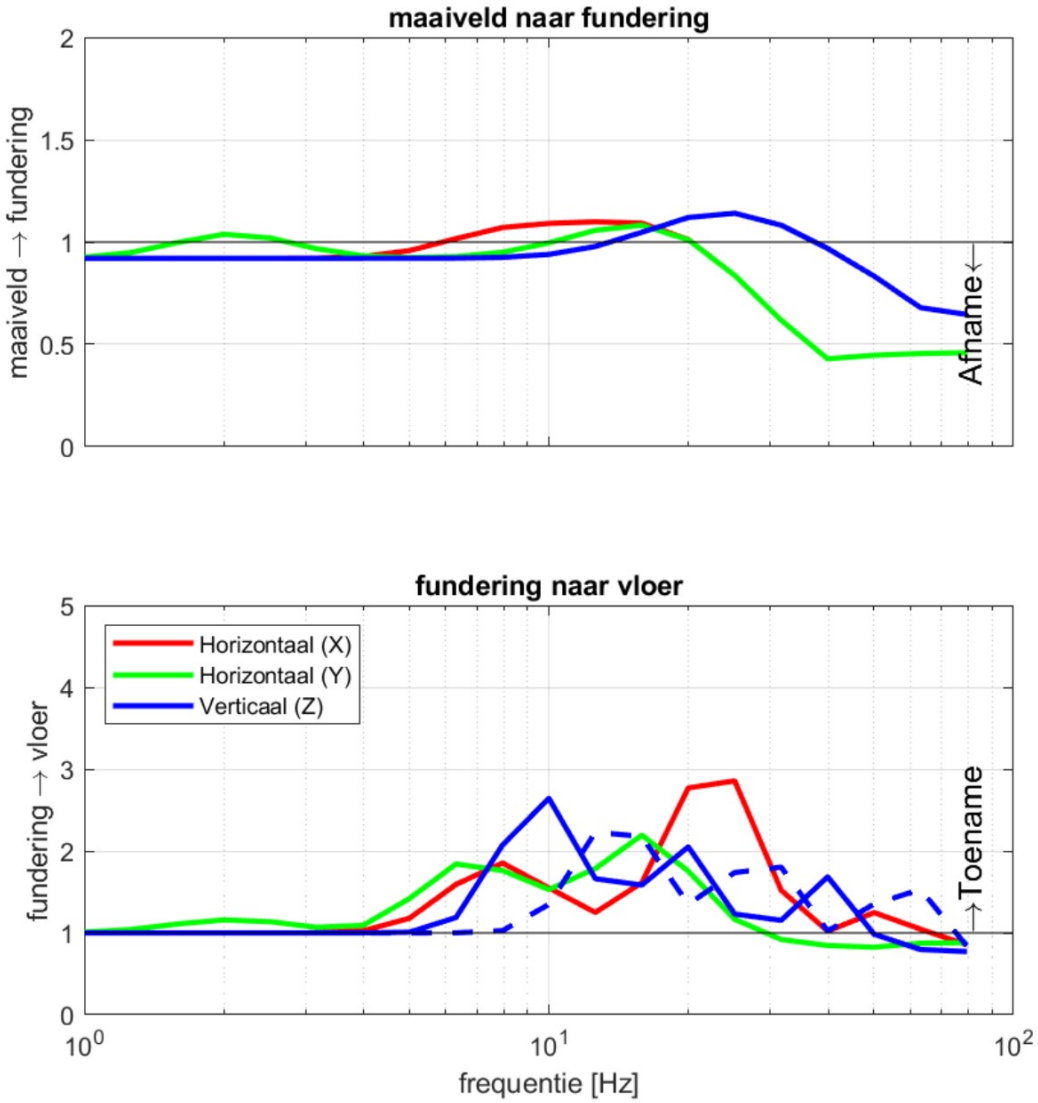
Hierin zijn $C_{f,ii}$ de frequentie-afhankelijke overdrachten van maaiveld naar fundering, zoals deze volgen uit het model. Dominant hierin zijn vooral de diagonale coëfficiënten. Door vervolgens $V_{i,fundering}(f)$ te delen op $V_{i,mv}$(f) in een hoek van het gebouw ontstaat een beeld van de vaak gepresenteerde overdracht $C_f(f)$ van maaiveld naar fundering, zie Figuur 17.

## II.8 BEPALEN TRILLINGSSPECTRA T.P.V. VLOEREN GEBOUW

In de volgende stap worden de resultaten op de fundering vertaald naar de resultaten op de vloeren in het gebouw. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de resultaten uit de voorgaande stappen. De trillingsspectra op de vloeren worden berekend met behulp van vergelijking 3:

$$\begin{matrix} V_{x,vloer}(f) \\ V_{y,vloer}(f) \\ V_{z,vloer}(f) \end{matrix} = \sqrt{\begin{bmatrix} H_{xx}^2(f) & H_{yx}^2(f) & H_{zx}^2(f) \\ H_{xy}^2(f) & H_{yy}^2(f) & H_{zy}^2(f) \\ H_{xz}^2(f) & H_{yz}^2(f) & H_{zz}^2(f) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{x,fundering}^2(f) \\ V_{y,fundering}^2(f) \\ V_{z,fundering}^2(f) \end{bmatrix}} \quad (3)$$

Hierin zijn $H_{fi}$ de frequentie-afhankelijke overdrachten van maaiveld naar fundering, zoals deze volgen uit het model. Door vervolgens $V_{i,vloer}(f)$ te delen op $V_{i,fundering}$(f) in een hoek van het gebouw ontstaat een beeld van de vaak gepresenteerde overdracht $C_v(f)$ van fundering naar de vloer. Deze zijn voor het midden van de vloer weergegeven in Figuur 17 bij een eigenfrequentie van de vloer van 10 Hz, en een fundering op staal.




*Figuur 17 Gemiddelde overdracht van fundering naar het maatgevende punt op vloer van woning. Doorgaande lijn verticaal is midden vloer, onderbroken lijn is op ¼ en ¾ van overspanning*

## II.9 BEPALEN VMAX EN VPER T.P.V. VLOEREN GEBOUW

In de laatste stap worden de te toetsen grootheden $V_{max}$ en $V_{per}$ bepaald. Hiervoor volgen we de volgende procedure:

1. Per gemeten treinpassage berekenen we het trillingsspectrum op de vloer van het gebouw, op basis van de resultaten uit stap 8.

2. We berekenen de $V_{i,max,rms}$ op basis van het trillingsspectrum op de vloer en vanuit het originele meetpunt (op maaiveld of de fundering), waarna we de verhouding tussen die twee bepalen en de gemeten $V_{i,max}$ hiermee corrigeren. Hiermee krijgen we een zo nauwkeurig mogelijke inschatting van $V_{i,max}$ op de vloer in het geplande gebouw. Deze methode is gebaseerd op de methode zoals gebruik in de *Beleidsregel trillinghinder spoor* (Bts), waar de $V_{max}$ ook wordt berekend op basis van de $V_{rms}$[10]
3. We berekenen de maximale trillingssterkte per vloer, door over alle meetrichtingen heen (X, Y en Z) en over alle rekenpunten op de vloeren heen het maximum te bepalen.
4. Vervolgens berekenen we conform de procedure uit de SBR B-richtlijn de gemiddelde trillingssterkte $V_{per}$.

De resultaten toetsen we aan het beoordelingskader, de SBR B-richtlijn.

## II.10 OMGAAN MET ONZEKERHEDEN

Zoals in paragraaf 0 is toegelicht, zitten er diverse onzekerheden in het onderzoek. Dat varieert van onzekerheden in de metingen, in de opbouw van de bodem, variaties in kwaliteit van de bouwmaterialen en verschillen tussen ontwerp en uitvoering, tot onzekerheden in de gebruikte modellen.

In dit onderzoek is daar als volgt mee omgegaan: van elke parameter is een onzekerheid bepaald, met uitzondering van de daadwerkelijk gemeten trillingen. Voor de belangrijkste modelparameters is dat globaal het volgende:

- Beton: 10% op stijfheid, 5% op massa en 15% op demping
- Metselwerk: 15% op stijfheid, 5% op massa en 20% op demping
- Staal: 5% op stijfheid, 5% op massa en 15% op demping
- Gebouwinrichting: 25% op massa, 35% op demping
- Bodemopbouw: 15% op stijfheid, 15% op massa, 25% op demping
- Hout: 25% op stijfheid, 10% op massa en 25% op demping (maar hier niet van toepassing)

Zoals in paragraaf 0 is toegelicht, kunnen de gemeten trillingen door het jaar heen ook variëren, maar het is met een meetduur van een week (of zelfs een maand) niet mogelijk om te bepalen of de meting is uitgevoerd op een moment dat de trillingen hoger of lager dan het gemiddelde op deze locatie zijn. In werkelijkheid kunnen de trillingen dus zowel hoger als lager zijn, maar het globale beeld van de verwachte trillingen wijzigt daarmee niet wezenlijk: er ontstaat niet ineens een onaanvaardbaar woon- en leefklimaat t.a.v. trillingen.

Voor alle andere parameters is, op basis van metingen, de random forest analyse op de database met gebouwen en de afwijking van de geplande bebouwing en de bebouwing in de database, een inschatting gemaakt van de onzekerheden in de parameters (zoals demping en stijfheid van de onderdelen) en modellen (zoals onzekerheid in hoe goed het model de overdrachten kan berekenen). De onzekerheden worden via een MonteCarlo-analyse (N=100) doorgerekend naar een onzekerheid in de eindresultaten. De eindresultaten worden daarom als een bandbreedte weergegeven. Het is goed om te beseffen dat bovenop die bandbreedte nog een aanvullende bandbreedte mogelijk is vanuit de onzekerheid van de metingen, zoals hierboven beschreven.

---

[10] Zie Koopman , A., LA.131001a.M04 van 13 april 2018

## II.11 VALIDATIE VAN HET REKENMODEL

In dit onderzoek zijn de trillingen berekend met een door We-Boost ontwikkeld rekenmodel, waarin een random forest algoritme empirische resultaten (vanuit ruim 600 praktijkmetingen), analytische formules en resultaten uit eindige elementenberekeningen combineert om het dynamische gedrag van een gebouw te bepalen. Omdat het rekenhart van het rekenmodel niet is vrijgegeven, onderbouwen we de betrouwbaarheid van het rekenmodel op basis van vrijgegeven input, output en enkele tussenresultaten (die dus controleerbaar zijn) en op basis van validatiemetingen in de praktijk (die dus laten zien of het model ook daadwerkelijk doet wat wij claimen, namelijk de trillingen betrouwbaar voorspellen). In deze bijlage is deze validatie van het rekenmodel opgenomen.

Eerst gaan we in op onze validatie-aanpak, daarna beschrijven we een vergelijking tussen daadwerkelijk gemeten en met het rekenmodel berekende trillingen, en daarna gaan we nog in meer detail in op enkele relevante validatiecases waarvan we meer informatie geven.

### II.11.1 VALIDATIEMETHODE

In de praktijk is het vaak lastig om betrouwbare validatiemetingen uit te voeren, omdat niet alle ontwikkelaars openstaan voor het uitvoeren van een oplevermeting na realisatie van het gebouw. Om het aantal validatiecases te vergroten, hebben we daarom de volgende aanpak gehanteerd:

1. **Zelf geadviseerde gebouwen**: Bij elk opgeleverd gebouw waarbij wij trillingsadvies hebben uitgebracht, vragen we de ontwikkelaar of deze openstaat voor een oplevermeting. Indien ja, dan doen we het volgende:
    a. We voeren een trillingsmeting uit waarbij we minimaal 2 meetpunten plaatsen: 1 meetpunt op een stijf punt van de fundering, zo dicht mogelijk bij de trillingsbron, en 1 meetpunt op het midden van de vloer van de hoogst bewoonde verdieping (e.e.a. conform de SBR B-richtlijn). Waar mogelijk plaatsen we een extra meetpunt op de onderste verdieping (eveneens midden vloerveld) of op een tweede positie hoog in het gebouw, en liefst ook op maaiveld vlak voor het gebouw, dichtbij het meetpunt aan de fundering (op ca. 1 meter afstand van de gevel).
    b. Per treinpassage bepalen we de frequentieafhankelijke overdracht van de trillingen tussen alle meetpunten in het gebouw en het meetpunt op de fundering (dit is de overdracht $C_v$ en de overdracht tussen het meetpunt op de fundering en op maaiveld (dit is de overdracht $C_f$).
    c. In de validatie vergelijken we:
        i. Kwalitatief: de vooraf (in het onderzoek voorafgaand aan de bouw) berekende frequentieafhankelijke overdracht en de achteraf (na oplevering) gemeten overdracht. Bij een betrouwbaar rekenmodel zijn de afwijkingen in bijvoorbeeld eigenfrequentie en demping beperkt, en lijken de overdrachten op elkaar.
        ii. Kwantitatief: we gebruiken de bij de oplevermeting gemeten trillingssignalen op maaiveld of op de fundering (afhankelijk van welke meetpunten zijn geplaatst) om met behulp van de vooraf (in het onderzoek voorafgaand aan de bouw) berekende frequentieafhankelijke overdracht de trillingssterkte in het gebouw op de verschillende meetpunten te berekenen. Deze trillingssterkte vergelijken we met de werkelijk gemeten trillingssterkte. We vergelijken ook met de vooraf berekende trillingssterkte, maar de praktijk laat zien dat variaties in de bronsterkte van de trillingen in sommige gevallen kunnen zorgen voor vrij grote afwijkingen, waardoor een correcte validatie niet mogelijk is.

d. Na de validatie voegen we het gerealiseerde gebouw toe aan de database waarop het random forest algoritme van het rekenmodel wordt getraind. Ongeveer één keer per jaar trainen we het algoritme op basis van de nieuwe database, om het nauwkeuriger te maken.

2. **Niet zelf-geadviseerde gebouwen**: om het aantal validatiecases te vergroten, maken we ook gebruik van metingen in gebouwen waar we niet zelf voor hebben geadviseerd. Daarbij volgen we dan deze aanpak:
   a. We vragen de resultaten van metingen op (bijvoorbeeld bij ProRail of partijen met wie we samenwerken). We vragen daarbij zowel gegevens van de meting op (welke trillingsmeters zijn gebruikt, waar zijn die geplaatst, foto's van de meetopstelling) als de meetresultaten zelf (trillingssignalen per treinpassage).
   b. We vragen bouwtekeningen op van het gebouw, bijvoorbeeld bij de ontwikkelaar (als die daarvoor openstaat), partijen met wie we samenwerken of bij de gemeente waar de vergunningsaanvraag is ingediend. Op basis daarvan modelleren we het gebouw en bepalen de frequentie-afhankelijke overdracht met het rekenmodel.
   c. Vervolgens herhalen we de stappen b., c. en d. zoals hierboven beschreven onder punt **1.**

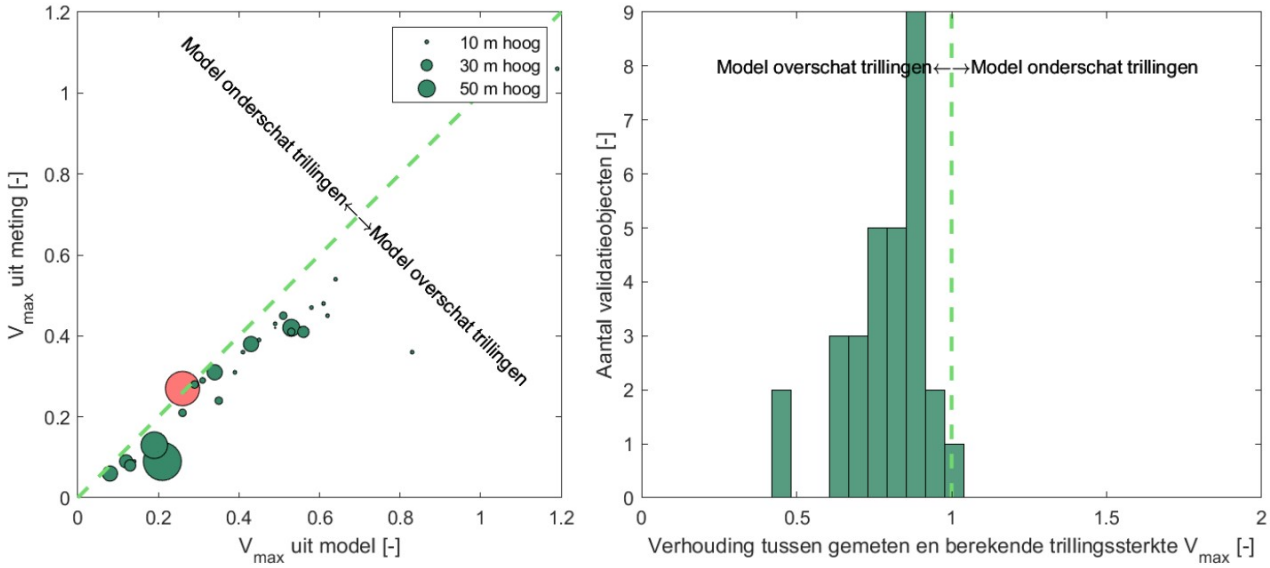
### II.11.2 VALIDATIECASES

Uit evaluatiemetingen blijkt dat het gebruikte rekenmodel een nauwkeurigheid heeft die in de meeste gevallen significant beter is dan een standaard, niet met praktijkdata gekalibreerd Eindige Elementenmodel. Dat komt doordat de resultaten van het Buildyn-model gebaseerd zijn op werkelijke (as-built) data, terwijl een Eindige Elementenmodel zeer gevoelig is voor de gebruikte input t.a.v. bijv. demping en stijfheden. Uit praktijkevaluaties zien we dat die modellen sterke afwijkingen kunnen vertonen, en heel gevoelig kunnen zijn voor kleine wijzigingen in de input. Ook gaan verschillende onderzoekers heel verschillend om met de keuze van materiaalparameters (bodem, dynamische stijfheid, demping), modelleringsmethode (tijds- of frequentiedomein) en demping. Gevolg daarvan is dat de resultaten uit een eindige elementenmodel sterk kunnen variëren, al naar gelang de gebruikte input. Dat is de reden dat het in dit onderzoek gebruikte rekenmodel gekalibreerd is met praktijkdata, wat de nauwkeurigheid sterk ten goede komt.

Qua detailniveau, zoals omschreven in de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* (Tabel 10.3), gaat het bij het gebruikte rekenmodel om een model tussen niveau III en IV: het betreft een 3D-model, maar lokale, specifieke details (zoals uitkragingen) worden niet gemodelleerd. In de praktijk zien we dat dit meestal geen consequenties heeft voor de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid, omdat er vrijwel nooit sprake is van gevoelige functies boven uitkragingen.

Het model is tot nu toe gevalideerd voor 30 gebouwen. De vooraf berekende trillingssterkte en de achteraf gemeten trillingssterkte voor deze 30 gebouwen is weergegeven in Figuur 18. De grootte van de bolletjes schaalt met de hoogte van het gebouw. In 1 van de 30 cases was het model niet conservatief genoeg. In alle andere gevallen was het model voldoende conservatief. Voor deze 30 validatiecases haalt het model de beloofde 95% betrouwbaarheid dus ruim (97% van de gevallen heeft een lagere trillingssterkte dan vooraf berekend).

Een histogram van de afwijking tussen model en werkelijkheid (verhouding tussen gemeten en vooraf berekende trillingssterkte) is ook weergegeven in deze figuur. Hier is de verdeling te zien in de afwijking tussen model en werkelijkheid. Gemiddeld is het model 20% te conservatief bij deze validatiecases (trillingen worden met ruim 20 procent overschat).

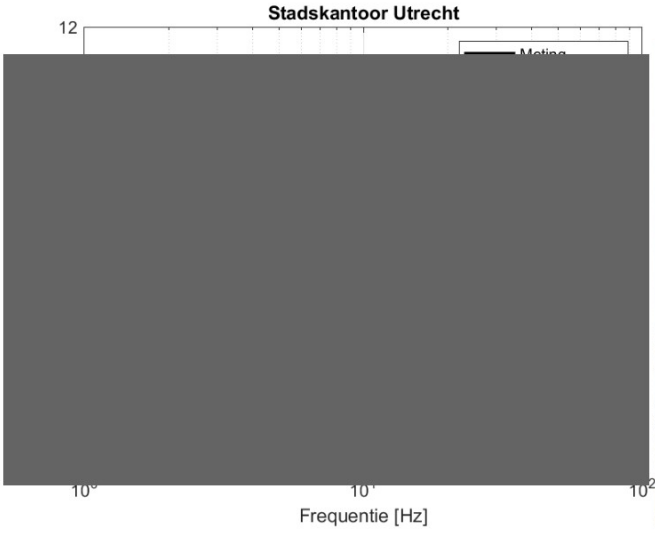



*Figuur 18 Gemeten vs. vooraf berekende trillingssterkte (links) en histogram van de afwijking tussen model en gemeten trillingen (rechts).*

### II.11.3 VOORBEELDEN

In deze subparagraaf geven we een aantal voorbeelden uit de praktijk waarin we een vergelijking maken tussen gemeten en vooraf berekende overdrachten. Het betreft gebouwen waar een validatiemeting is gedaan en vooraf een model is gemaakt van de bebouwing op basis van tekeningen, analoog aan de situatie bij het voorliggende gebouw.

Het eerste gebouw is het Utrechtse Stadskantoor, een constructie met stalen diagonalen, een betonnen kern en betonnen vloeren. De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 19.





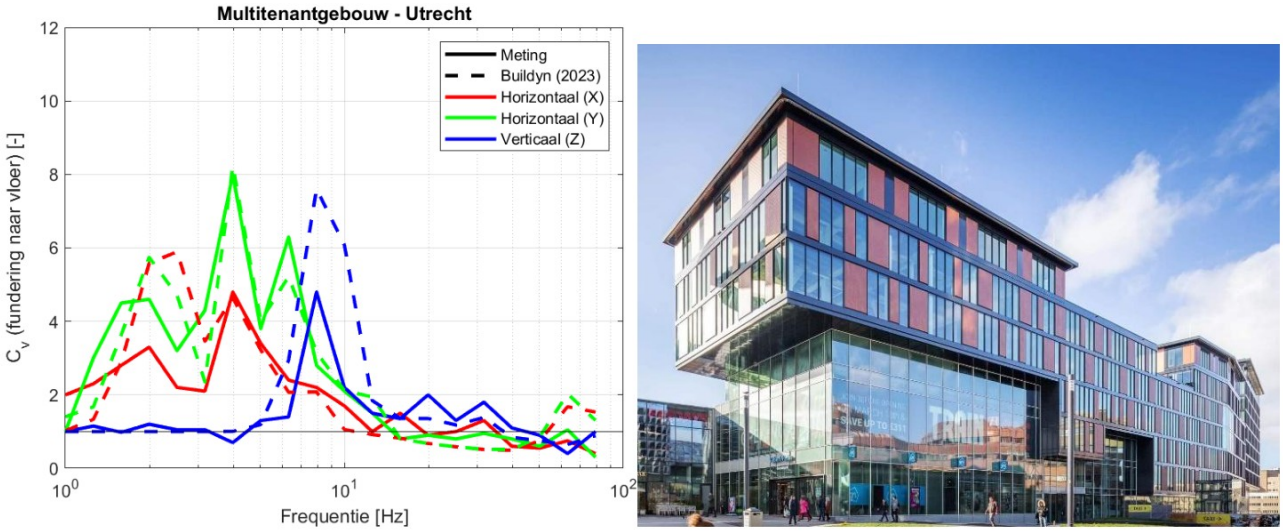

*Figuur 19 Stadskantoor in Utrecht, links de gemeten en berekende overdrachten, rechts een foto van het gebouw*

De belangrijkste verschillen tussen model en meting zijn:

1. Vanaf ca. 20 Hz is de overdracht in het model lager (verticale richting). Relevant hierbij is dat de trillingen bij die frequenties weinig energie hebben. Op basis van deze berekeningen lijkt het alsof het model de demping overschat bij hogere frequenties.

2. Verder zien we kleiner verschuivingen in de eigenfrequenties, vermoedelijk door verschillen in constructie en materiaalstijfheden, of verschillen in belasting.

Het tweede gebouw is het Noordgebouw in Utrecht, een constructie met stalen kolommen en Comflorvloeren. De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 20.



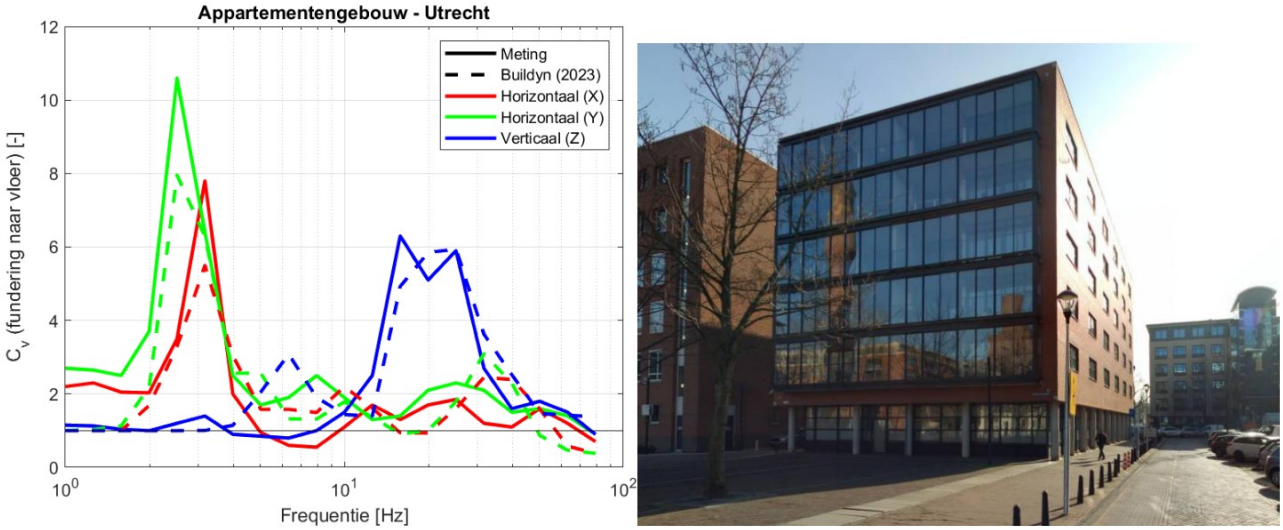

*Figuur 20 Noordgebouw in Utrecht, links de gemeten en berekende overdrachten, rechts een foto van het gebouw*

Hier zien we wat grotere verschillen tussen model en meting:

1. De laagste eigenfrequentie wordt door het model wat overschat, blijkbaar is het gebouw toch iets slapper (mogelijk slappere verbindingen) dan het model inschat.
2. Verder zien we dat het model de verticale opslingering van de trillingen rond 10 Hz overschat.

Relevant hierbij is dat dit een vrij uniek gebouw is, waarvoor de database van het model beperkt is. Mede daardoor zit er een relatief grote onzekerheidsmarge op de resultaten.

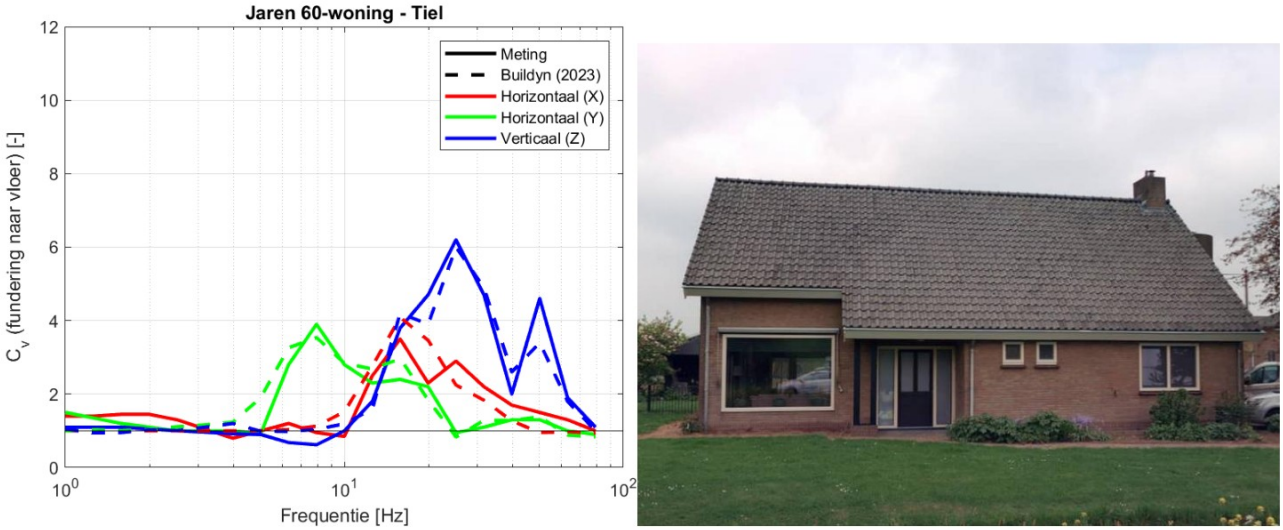
Het derde gebouw is een appartementengebouw in Utrecht, een constructie met prefab betonnen wanden, breedplaatvloeren en onderin een open kolommenstructuur. De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 21.




*Figuur 21 Appartementengebouw in Utrecht, links de gemeten en berekende overdrachten, rechts een foto van het gebouw*

Het model heeft hier een aantal afwijkingen van de metingen. We zien dat de demping in het model bij de laagste eigenfrequentie hoger is, waardoor de overdracht daar wat wordt onderschat. De piek in de modeloverdracht rond 6 Hz zien we niet terug in de metingen.

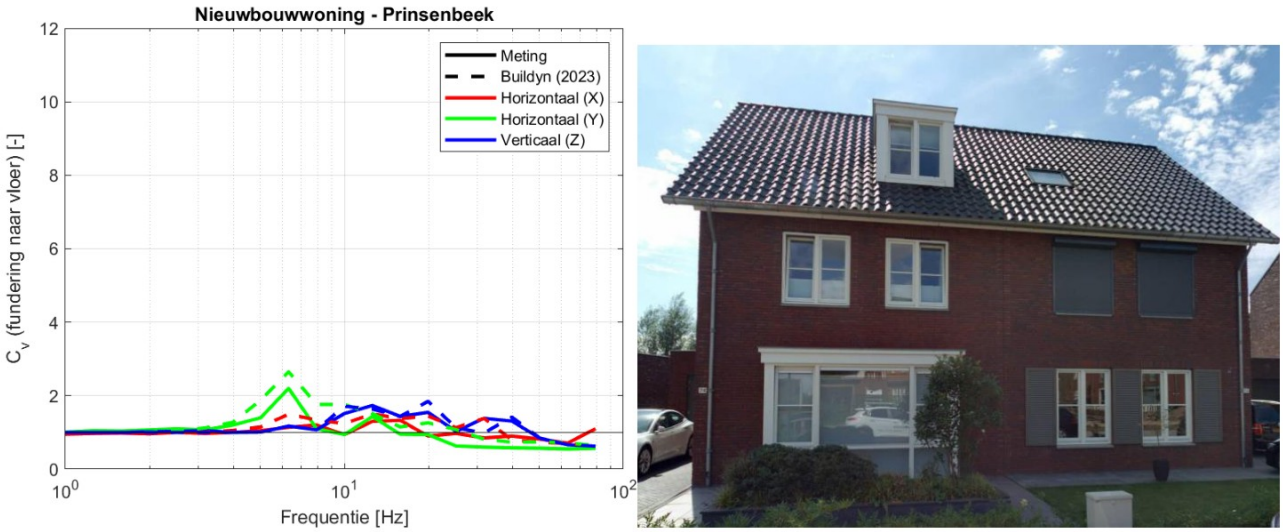
Het vierde gebouw is een wat oudere woning in Tiel, opgebouwd uit een conventionele constructie van metselwerk en met houten vloeren. De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 22.




*Figuur 22 Vrijstaande woning in Tiel, links de gemeten en berekende overdrachten, rechts een foto van het gebouw*

Het model is hier vrij nauwkeurig, doordat de database goed gevuld is met tientallen vergelijkbare woningen.

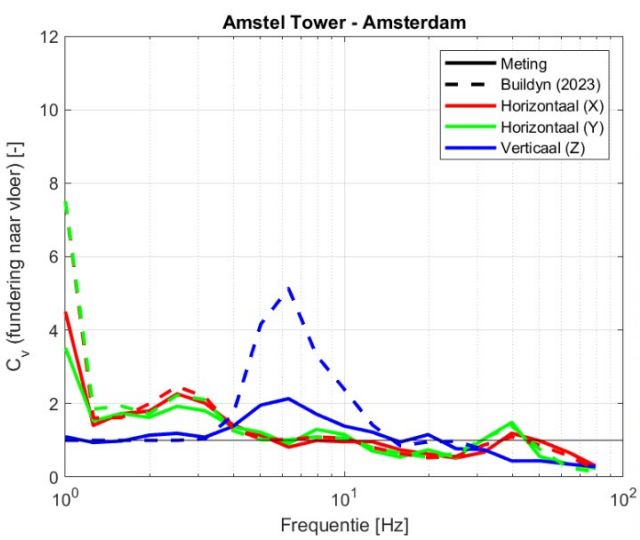
Het vijfde gebouw is een vrijstaande woning in Prinsenbeek, opgebouwd uit prefab beton en afgewerkt met metselwerk. De vloeren bestaan uit leidingplaatvloeren met een 80 mm smeervloer. De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 22.




*Figuur 23 Twee-onder-een-kapwoning in Prinsenbeek, links de gemeten en berekende overdrachten, rechts een foto van het gebouw*

De gemeten overdracht is hier erg laag, het model geeft een beperkte overschatting van de trillingen.

Het zesde gebouw is de Amstel Tower in Amsterdam, een ruim 100 meter hoge woontoren op een commerciele plint, gebouwd uit in het werk gestort beton met breedplaatvloeren. De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 24.






*Figuur 24 Amstel Tower in Amsterdam, links de gemeten en berekende overdrachten, rechts een foto van het gebouw*

De belangrijkste verschillen tussen model en meting zijn:

1. Bij zeer lage frequenties is het rekenmodel in horizontale richting te conservatief. Blijkbaar is de werkelijke demping in het gebouw hoger dan de gebruikte demping. Mogelijk komt dit doordat het gebouw volledig in-situ is gestort, waardoor er relatief veel demping optreedt.
2. Tussen 4 en 10 Hz is het rekenmodel in verticale richting te conservatief. Dit komt vooral doordat de demping (net als in horizontale richting) wordt onderschat, en in mindere mate doordat de stijfheid van de constructie wat wordt onderschat.
3. Verder zien we kleiner verschuivingen in de eigenfrequenties, vermoedelijk door verschillen in constructie en materiaalstijfheden, of verschillen in belasting.

# III. METINGEN

Deze bijlage bevat gegevens over de metingen.

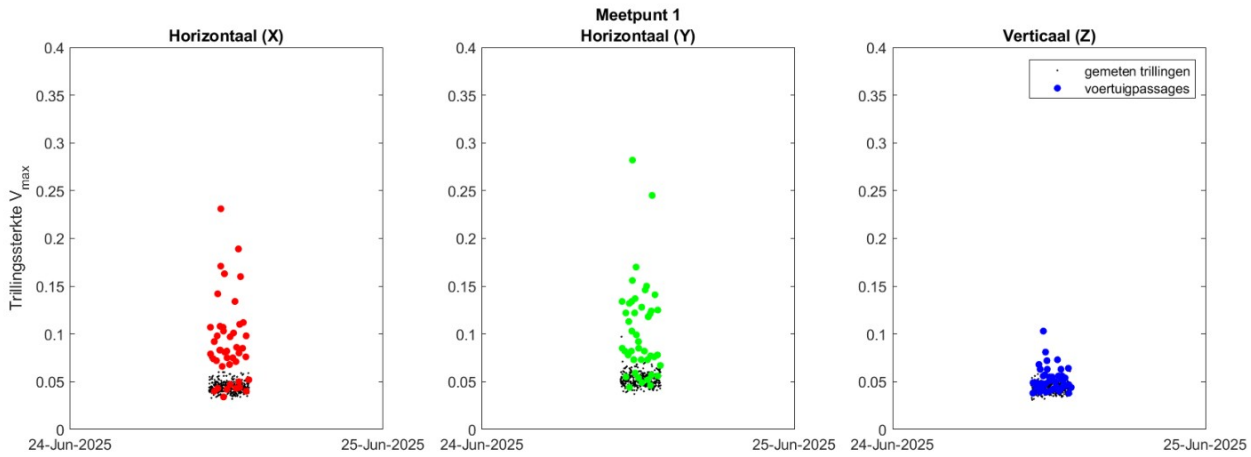
## III.1 GEGEVENS METINGEN

Hieronder is een overzicht opgenomen met relevante gegevens van de metingen, conform de eisen in hoofdstuk 11 uit de SBR B-richtlijn.

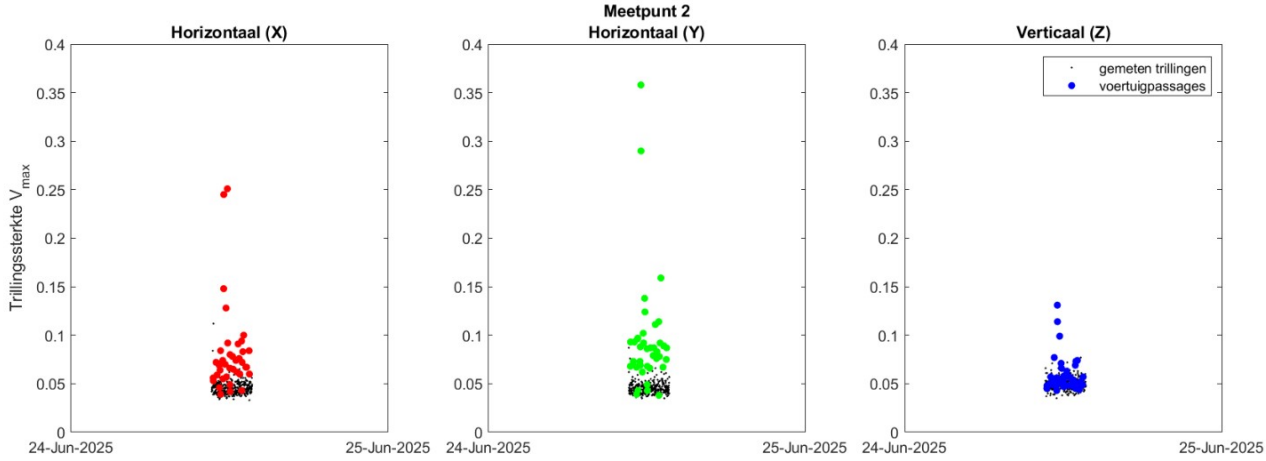
| | | |
|---|---|---|
| 1 | *Uitvoerende partij* | Alcedo B.V.<br>Ondernemersweg 3<br>7451PK Holten |
| | *Verantwoordelijke* | [redacted] |
| 2 | *Meting uitgevoerd door* | [redacted] |
| 3 | *Datum en tijd metingen* | 24 juni tot en met 2 juli 2025 |
| 4 | *Trillingsbron* | Treinen |
| 5 | *Classificatie gebouw* | Zie paragraaf 3.2 |
| 6 | *Locatie metingen* | Zie Figuur 3 |
| 7 | *Geotechnische gegevens* | Zie bijlage I |
| 8 | *Locaties meetpunten en meetrichtingen* | Zie Figuur 3, tenzij anders vermeld:<br>X-richting loodrecht op de trillingsbron<br>Y-richting parallel aan trillingsbron<br>Z-richting verticaal |
| 9 | *Gebruikte apparatuur* | FrogWatch opnemers. Zie een uitgebreide toelichting van de specificaties op https://www.frog.watch/facts/. |
| 10 | *Gemeten trillingen* | Zie bijlage III.2 |
| 11 | *Motivatie classificatie gebouw* | Op basis van tekeningen |
| 12 | *Overige relevante omstandigheden* | Geen |

## III.2 RESULTATEN METINGEN

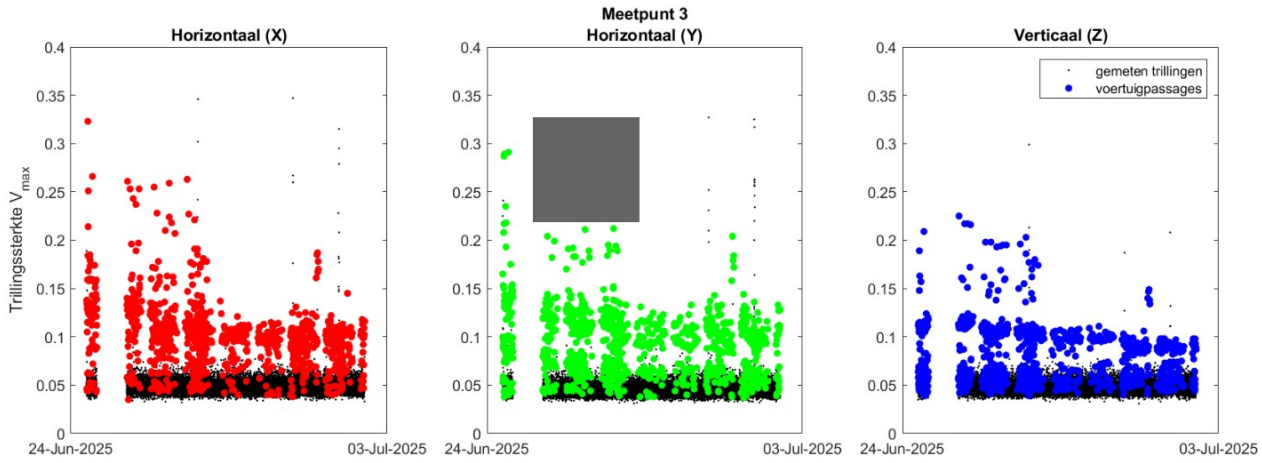
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



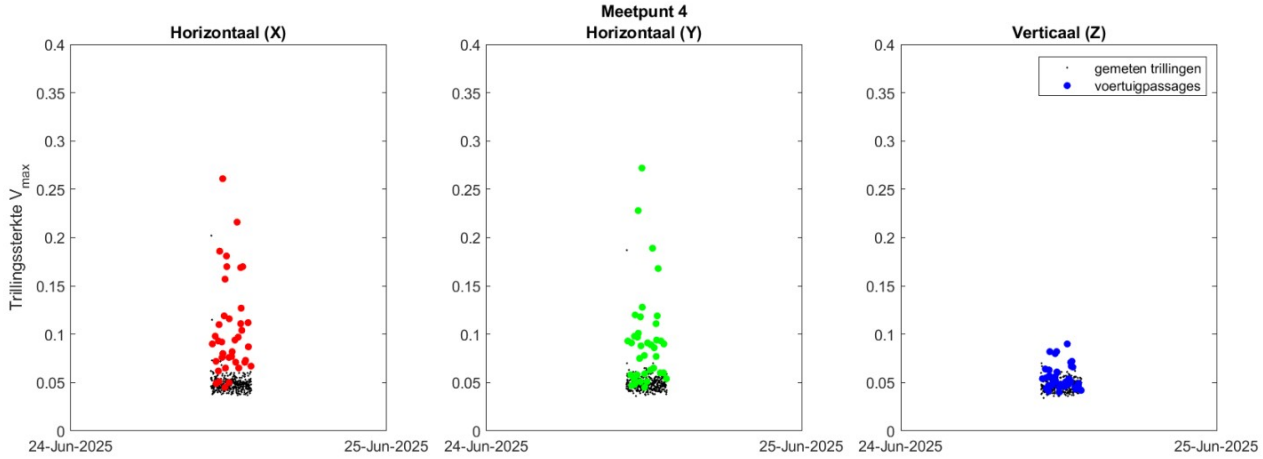

*Figuur 25 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (maaiveld)*



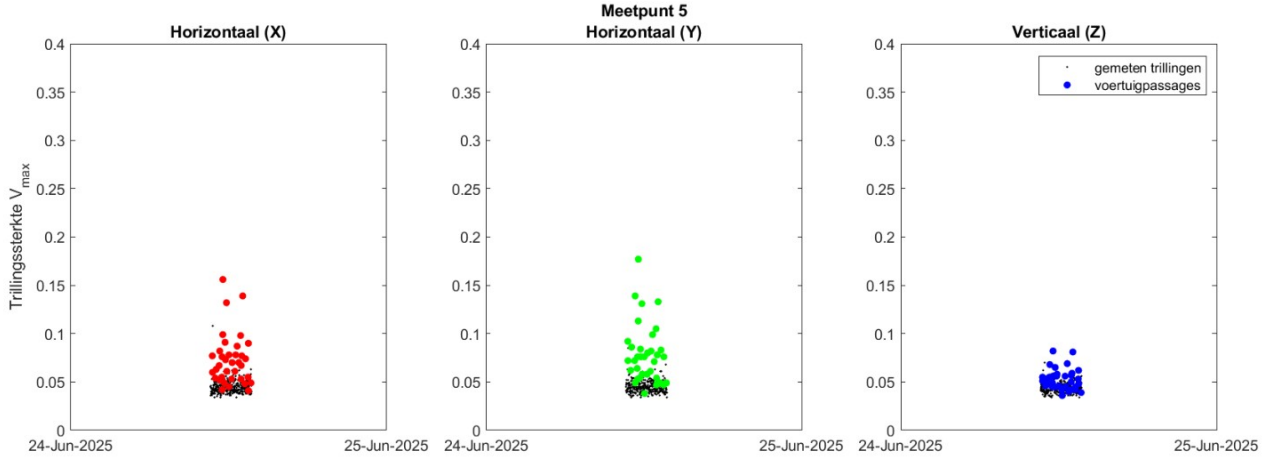

*Figuur 26 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (maaiveld)*



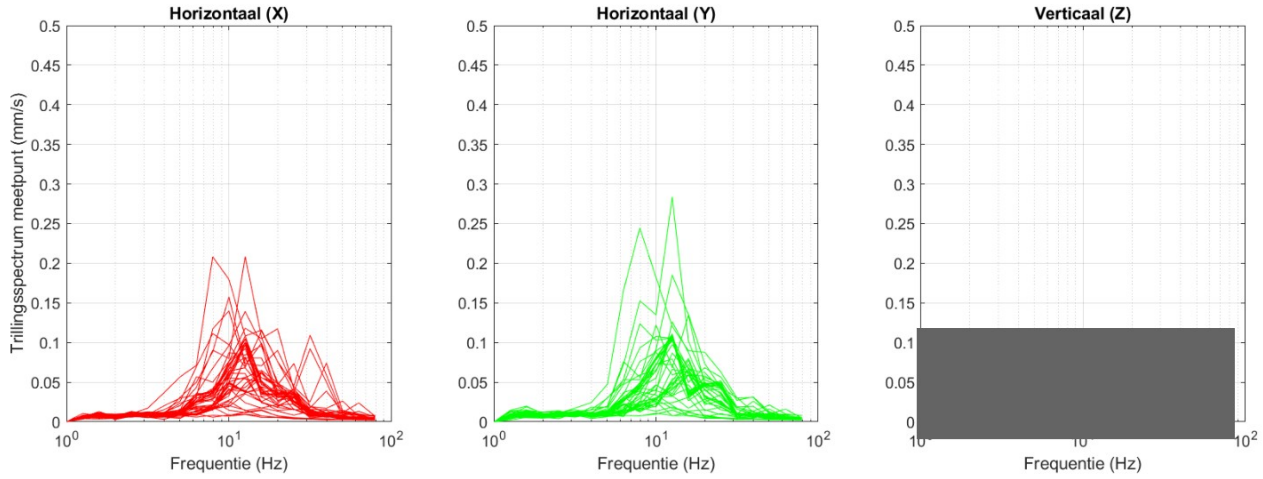

*Figuur 27 Gemeten trillingen bij meetpunt 3 (maaiveld)*



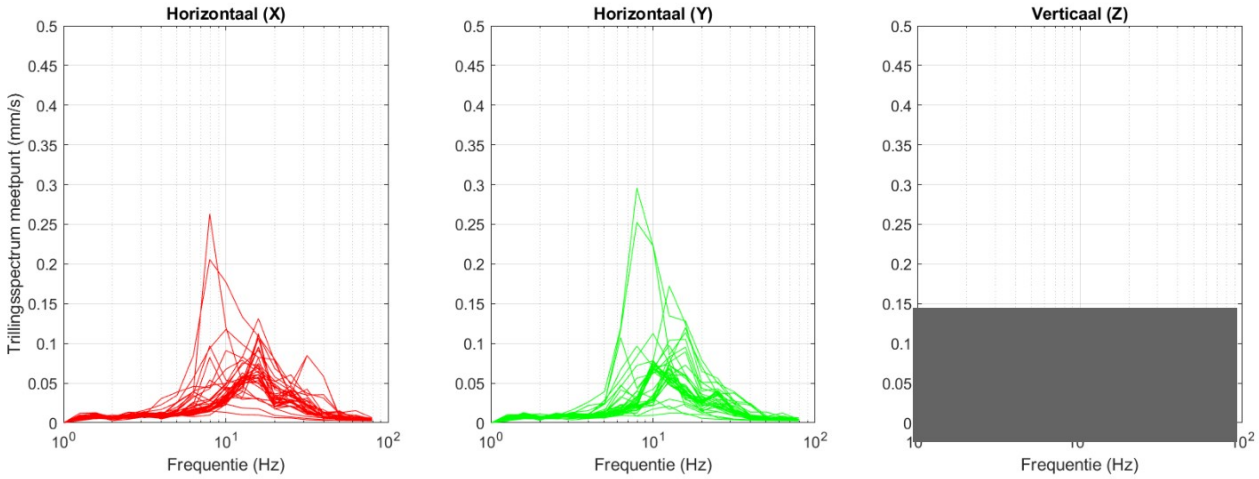

*Figuur 28 Gemeten trillingen bij meetpunt 4 (maaiveld)*



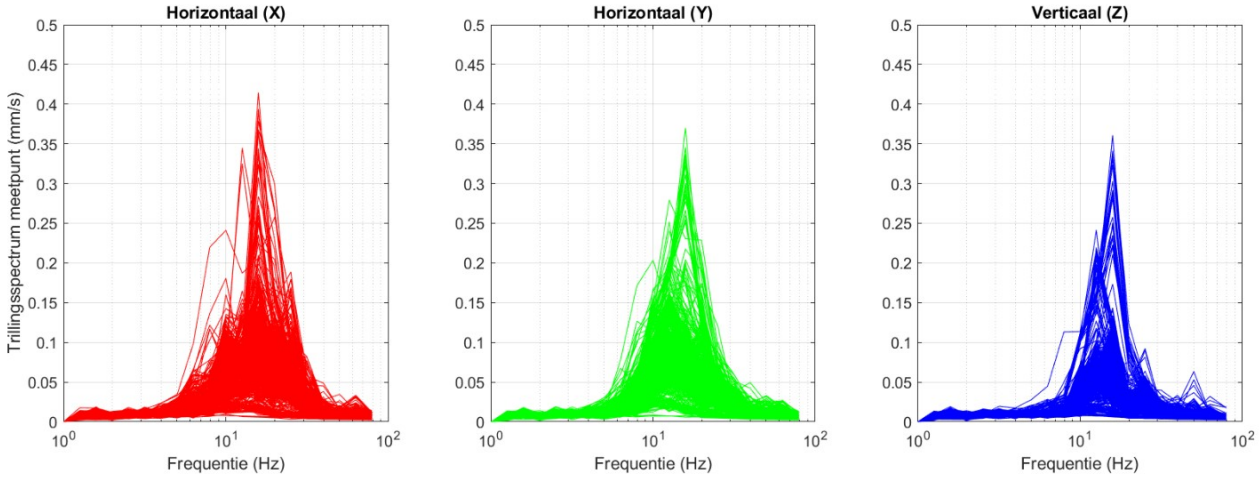

*Figuur 29 Gemeten trillingen bij meetpunt 5 (maaiveld, verder bij spoor vandaan)*



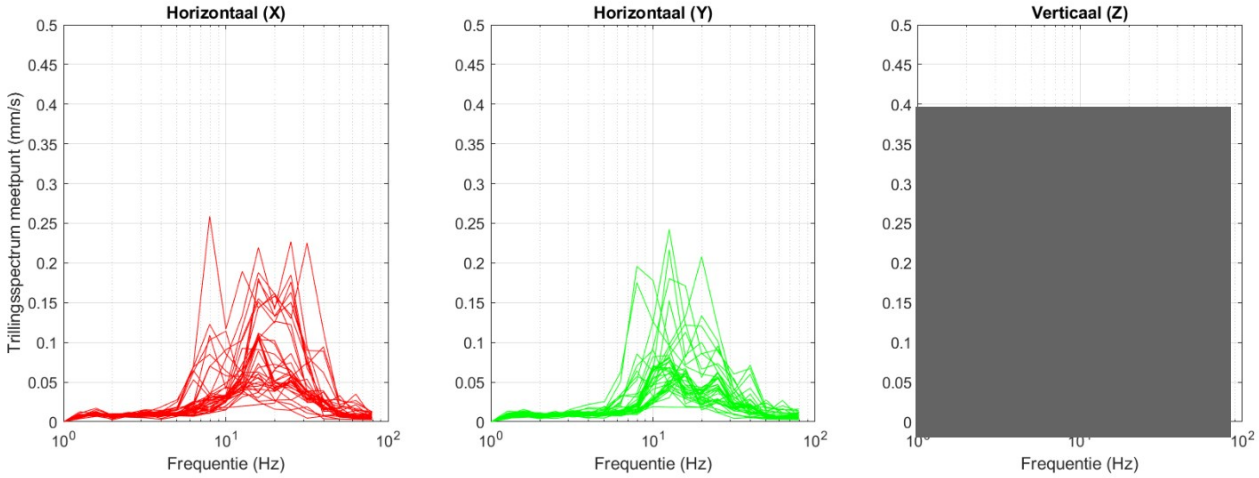

*Figuur 30 Tertsbandspectra bij meetpunt 1*



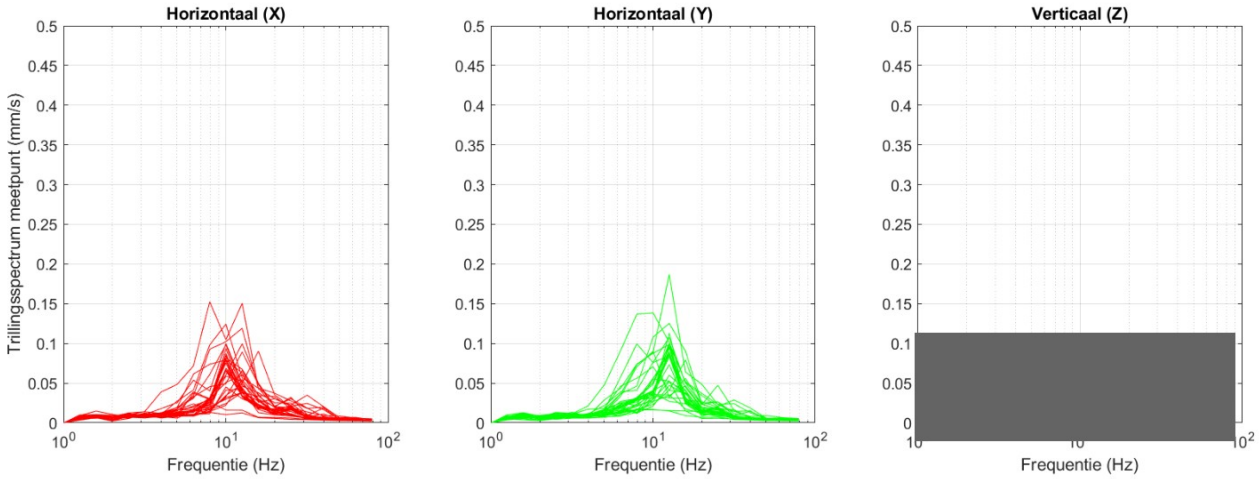

*Figuur 31 Tertsbandspectra bij meetpunt 2*




*Figuur 32 Tertsbandspectra bij meetpunt 3*




*Figuur 33 Tertsbandspectra bij meetpunt 4*

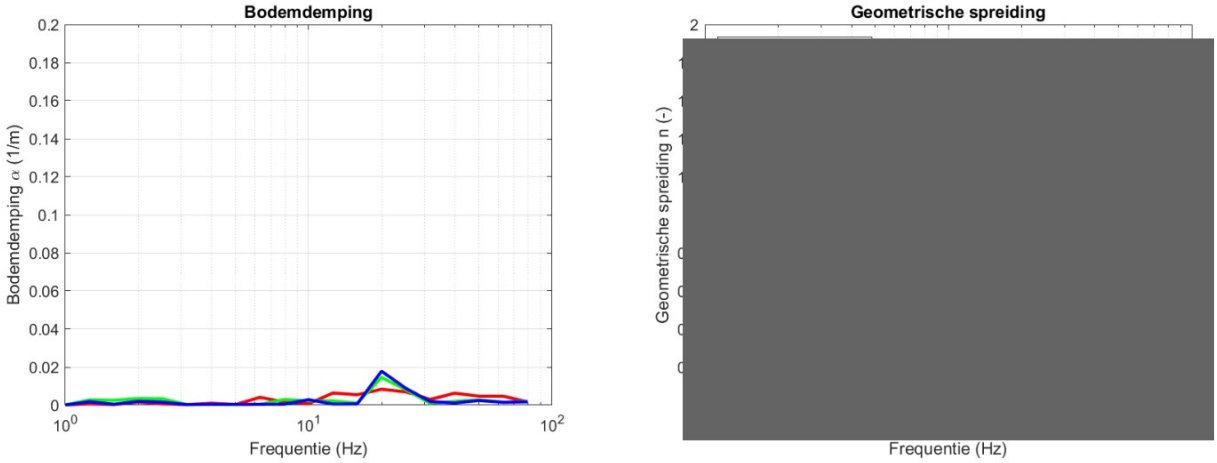



*Figuur 34 Tertsbandspectra bij meetpunt 5*

De uitdemping van de trillingen als functie van de afstand is bepaald met de empirische Barkan-vergelijking, zoals weergegeven in vergelijking 1.

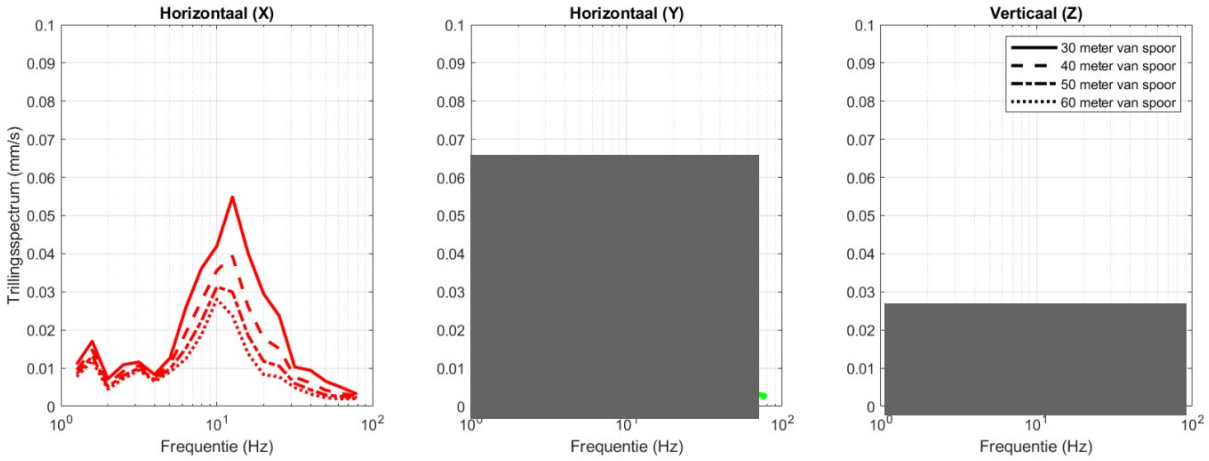
$$V(f,r) = V_0(f,r_0) \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^{n(f)} \cdot e^{-\alpha \cdot (r-r_0)} \qquad (1)$$

In deze vergelijking staat $V$ voor de trillingssnelheid, $f$ voor de frequentie, $r$ voor de afstand tot de trillingsbron, $r_0$ voor de referentieafstand (hier 20 m), $n$ voor de geometrische spreidingsfactor en $\alpha$ voor de bodemdemping. De geometrische spreiding en bodemdemping zijn weergegeven in Figuur 37.




*Figuur 35 Bodemdemping α (links) en geometrische spreiding n (rechts) als functie van de frequentie*

De gemiddelde trillingsspectra op verschillende afstanden van het spoor zijn weergegeven in Figuur 36. Hier is te zien dat vooral boven de 6 Hz de trillingen sterk uitdempen met de afstand.

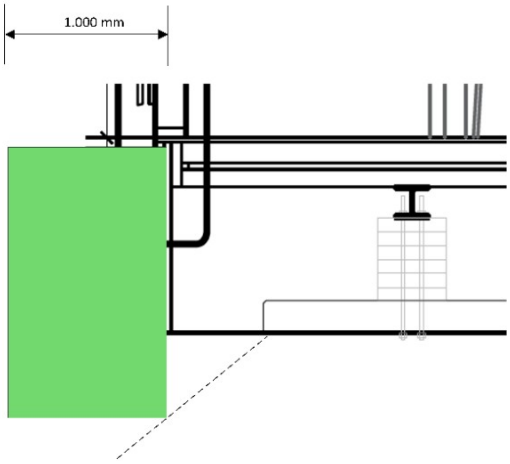



*Figuur 36 Gemiddelde trillingsspectra verschillende afstanden van het spoor*

# IV. DETAILS MAATREGELEN

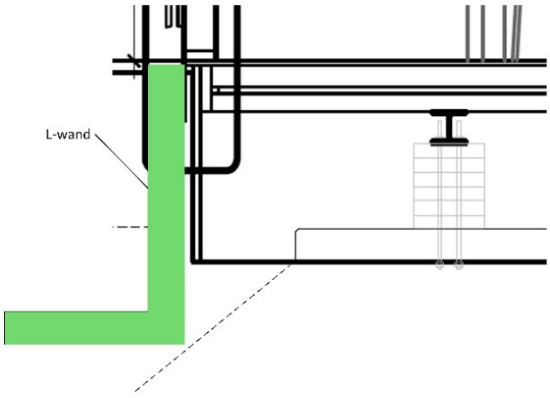
Deze bijlage bevat achtergrondinformatie en principedetails van de besproken maatregelen en optimalisaties van de woningen. Hierbij is uitgegaan van een standaard fundering op betonplaten.

Een principeschets van het bekleden van afschermen van de fundering met EPS (piepschuim) is weergegeven in Figuur 37. De EPS-kwaliteit dient wat zwaarder te zijn dan standaard i.v.m. de gronddruk. Hier is EPS200 aangegeven. Aandachtspunt is opdrijving, gelet op de waterstand is verankering aan de woning nodig. De minimale dikte van 1.000 mm is nodig. Ook de diepte is belangrijk, deze dient zo diep mogelijk te zijn als aanvaardbaar is voor de gronddruk vanuit de fundering. Te ondiep leidt tot een lagere effectiviteit. Verder dient dit niet alleen aan de spoorzijde, maar ook aan de zijkanten te worden aangebracht.



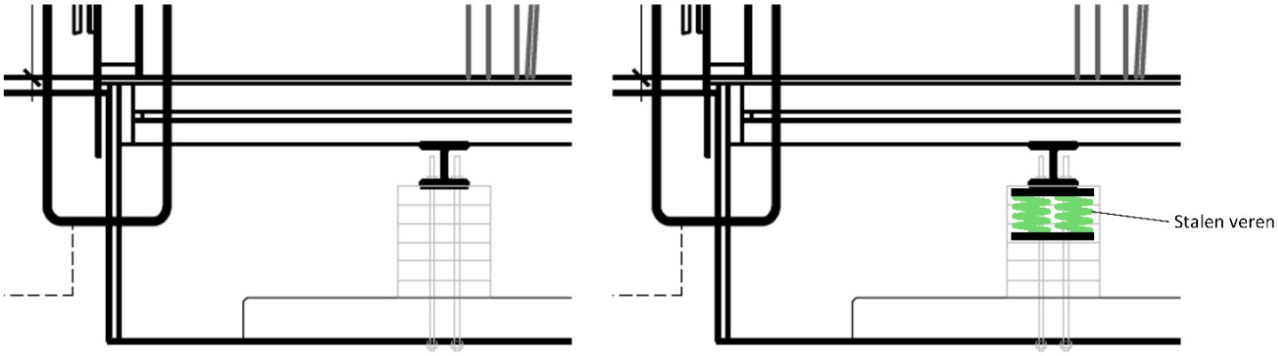

*Figuur 37 Fundering met EPS-scherm ervoor*

Een prefab L-wand voor de fundering is ook mogelijk, zie Figuur 38. Aandachtspunt is dat de ruimte achter de L-wand (onder de woning) ontgraven dient te worden, maar zodanig dat dit nog acceptabel is met de gronddruk van de funderingsplaten.




*Figuur 38 Fundering met prefab L-wand*

Een principeschets met een afgeveerde fundering is weergegeven in Figuur 39. Relevant hierbij is de afveerfrequentie van de stalen veren, die mag niet hoger zijn dan 4 Hz. Mogelijke leveranciers zijn Vilton CDM en Hakron.




*Figuur 39 Standaardfundering (links) en met stalen veren (rechts)*