

WEBOOST



**TRILLINGSONDERZOEK T.B.V. NIEUWBOUW**

---

**TREE HOUSE**

# COLOFON

Auteur



Controle en vrijgave



Projectcode

WBD2021-049

Versienr

8.0

Datum

25 september 2024

Status

Definitief

Opdrachtgever

Provast

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van metingen van

# ALCEDO

© We-Boost 2024

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

Naast Rotterdam Centraal Station wordt nieuwbouw ontwikkeld met een gecombineerde horeca-, kantoor- en woonfunctie: Tree House, een gebouw van 130 meter hoog. Tree House komt te staan in de zone tot 100 meter van het spoor. Daarnaast rijden er trams vlak langs de bebouwing. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van trein- en tramverkeer niet op voorhand worden uitgesloten.

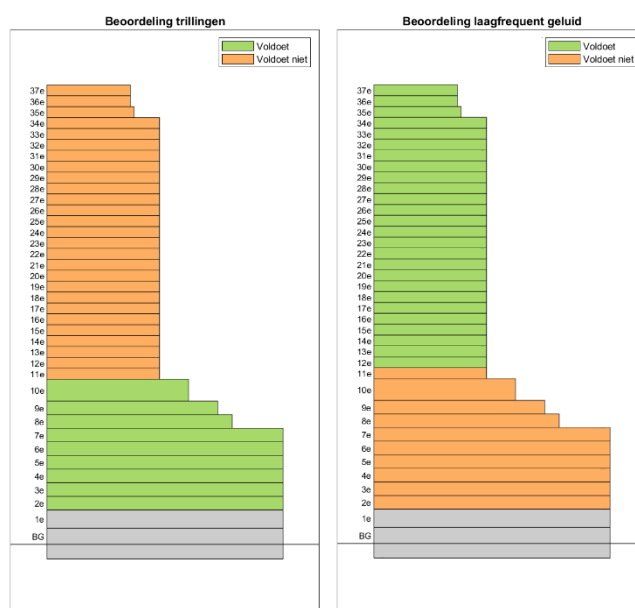
Doel van het voorliggende onderzoek is daarom om vast te stellen of er sprake zal zijn van trillingshinder en contactgeluid (laagfrequent geluid) in de geplande bebouwing, en zo ja, met welke maatregelen een aanvaardbaar woon- en leefklimaat kan worden gegarandeerd (e.e.a. conform de Wro art. 3.1). Voor 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. Voor laagfrequent geluid geldt dat dit niet gereguleerd is, en doorgaans niet wordt beschouwd in dit soort situaties (omdat trillingen en direct luchtgeluid bij bovengrondse trein- en tramsporen maatgevend zijn qua hinder), maar hier wel is beschouwd om een zo hoog mogelijke kwaliteit van het woon- en leefklimaat in het geplande gebouw te bereiken.

In dit onderzoek is met behulp van metingen en modelberekeningen onderzocht wat de trillingen en het laagfrequent geluid 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 op de woonlagen *mogelijk niet* wordt voldaan aan het beoordelingskader voor trillingshinder, de SBR B-richtlijn. In de figuren rechts is zichtbaar om welke verdiepingen het gaat waar mogelijk niet wordt voldaan aan de *streefwaarden* uit het beoordelingskader. Relevant hierbij is dat het gaat om een worst-case inschatting (bovengrens van de trillingen) en dat het gaat om incidentele passages van goederentreinen (ca 1 keer per week). In de berekening met de *verwachtingswaarden* van het gebouwgedrag wordt wel voldaan aan het beoordelingskader.

Voor laagfrequent geluid is beoordeeld op de methode De Ruiter. Conclusie is dat in de meeste kantoorlagen en de onderste twee woonlagen overschrijdingen van de grenswaarden voor laagfrequent geluid mogelijk zijn, vooral door trampassages, en in mindere mate ook door reizigerstreinen op de meest nabijgelegen sporen.



Omdat overschrijdingen van het beoordelingskader niet volledig kunnen worden uitgesloten, is onderzoek gedaan naar mitigerende maatregelen. Hierbij is zowel gekeken naar maatregelen aan het spoor, in de bodem en naar maatregelen aan het geplande gebouw.

## AFWEGING VAN MAATREGELEN

De belangrijkste conclusies van het maatregelenonderzoek zijn:

- ▶ Maatregelen tegen **trillingshinder** zijn zeer kostbaar en maar beperkt effectief: er is sprake van incidentele overschrijdingen (ca. 1 per week), die alleen met zeer kostbare ingrepen mogelijk kunnen worden voorkomen. Effectieve maatregelen aan het spoor kosten meer dan € 16 mln., maatregelen in de bodem zijn niet effectief en niet inpasbaar omdat het gebouw strak tegen de sporenbundel en de expeditieruimte van ProRail/NS aanligt, en verdere optimalisaties aan het gebouw zijn onvoldoende effectief, omdat het gebouw al sterk is geoptimaliseerd en andere maatregelen technisch niet uitvoerbaar of onvoldoende effectief zijn tegen de lage trillingsfrequenties van de goederentreinen. De enige maatregel bij het gebouw die voldoende effectief is, is het volledig inpakken van de fundering (kelder, poer en palen tot minimaal 9 meter onder maaiveld) met minimaal 400 mm dik rubber. Deze maatregel kost € 18.4 mln., wat neerkomt op een bedrag van € 61.500 per appartement, ruim meer dan het richtbedrag voor maatregelen wat ProRail hanteert (€ 47.000 per woning) bij doelmatigheidsafwegingen (en nog hoger dan de kosten van maatregelen aan het spoor). Bovendien dient het gebouw dan minimaal 400 mm op te schuiven bij het spoor vandaan, hiermee valt het gebouw buiten de contouren van het Bestemmingsplan.

**ALARA-afweging:** bij trillingen is sprake van streefwaarden in de beoordelingsrichtlijn. Als de streefwaarden niet worden gehaald, dan dienen maatregelen te worden afgewogen op doelmatigheid (conform bijlage 5 van de SBR B-richtlijn, het beoordelingskader voor trillingshinder). Het kan dus zijn dat maatregelen vanwege kosten of inpassingsbezwaren niet worden getroffen, mits goed wordt gemotiveerd dat geen onaanvaardbaar woon- en leefklimaat ontstaat. Dat is op deze locatie het geval, gelet op (1) het feit dat al het mogelijke is gedaan om de trillingen redelijkerwijs zoveel mogelijk te beperken (ALARA-principe), (2) het beperkte aantal overschrijdingen (maximaal 1 per week, gebaseerd op de worst-case berekening, want in de verwachtingswaarde van de resultaten wordt wel voldaan aan de streefwaarden), (3) het onzekere (en mogelijk onvoldoende) effect van maatregelen, (4) de hoge meerkosten van maatregelen, (5) het gegeven dat het in het gehele gebouw gaat om slechts 8 ernstig slaapverstoorden extra ten opzichte van als zou worden voldaan aan de streefwaarden voor nieuwbouw<sup>1</sup>, (6) de zeer hoge kosten van maatregelen, die niet in relatie staan tot de bouwkosten en het beperkte aantal overschrijdingen en (7) het gegeven dat de trillingen weliswaar niet voldoen aan de strenge streefwaarden voor nieuwbouw uit de SBR B-richtlijn, maar wel ruimschoots aan de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties uit de SBR B-richtlijn (die hier overigens niet van toepassing zijn, omdat het om een nieuw gebouw gaat, maar dit geeft wel meer inzicht in de mate van hoe aanvaardbaar de trillingen zijn).

---

<sup>1</sup> O.b.v. 299 appartementen en gemiddeld 2 personen per appartement en de dosis-effectrelaties voor ernstige slaapverstoring zoals door RIVM gepubliceerd. Zie ook E. van Kempen et al, *Hinder en slaapverstoring door trillingen van treinen, Resultaten van de Vervolgmeting "Wonen langs het spoor"*, RIVM-rapport 2023-0327. De investeringen van aanvullende maatregelen dienen in verhouding te staan met het aantal ernstig slaapverstoorden. Een maatregel aan het spoor (€ 16 mln.) komt dan neer op ca. € 2 mln. per ernstig slaapverstoorde. Het inpakken van de fundering is nog kostbaarder per ernstig slaapverstoorde.





- Maatregelen tegen **laagfrequent geluidhinder** van de **treinen** zijn ingrijpend en zeer kostbaar: alleen op de 2<sup>e</sup> verdieping (dus in de kantoren) is sprake van overschrijdingen. Het gaat om beperkte overschrijdingen (max. 3 dB), die maximaal 1 keer per uur optreden. Om deze overschrijdingen te voorkomen is isolatie van de kelderwand ten opzichte van de damwand tussen de expeditieruimte van ProRail/NS en het gebouw een mogelijke oplossing. Hier is echter geen ruimte voor, dit leidt daarom tot forse uitvoeringskosten en risico's.  
**ALARA-afweging:** gelet op het beperkte aantal overschrijdingen, de beperkte mate van overschrijding, het feit dat het gebouw in een drukke, stedelijke spoorzone wordt gerealiseerd (waar mensen trillingen en geluid doorgaans eerder accepteren) en het feit dat laagfrequent geluid ongereguleerd is, geldt dat de uitvoeringskosten van een dergelijke maatregel niet opwegen tegen de afname van de hinder.
- Maatregelen tegen **laagfrequent geluidhinder** van de **trams** zijn relatief eenvoudig te treffen, en er is sprake van relatief hoge laagfrequent geluidniveaus. Er is sprake van een groot aantal trampassages (ca. 1 per minuut), die tot op de 1<sup>e</sup> woonverdieping als hinderlijk kunnen worden ervaren. De meest kosteneffectieve maatregel om deze overschrijdingen te voorkomen, is door de fundering aan de tramzijde (en ca. 4 meter de hoek om) in te pakken met 600 mm dikke blokken EPS, vóór het verwijderen van de tijdelijke damwand. Hiermee is het comfortniveau in de bebouwing aanzienlijk te verhogen, en zorgen de trampassages niet meer voor hinderlijk laagfrequent geluid. Op de onderste bouwlagen kan, ook met deze maatregel, echter nog wel sprake zijn van hoorbaar laagfrequent geluid. De materiaalkosten van deze maatregel bedragen ca. € 70.000, de uitvoeringskosten zijn nog niet in beeld gebracht. Deze maatregel heeft veel effect op het comfortniveau.  
**ALARA-afweging:** gelet op de beperkte meerkosten en het grote effect is de voorgestelde comfortmaatregel tegen het laagfrequent geluid van de trams al snel doelmatig. Anderzijds kan ook hier eventueel worden gemotiveerd dat maatregelen niet noodzakelijk zijn: het gebouw wordt in een drukke, stedelijke spoorzone gerealiseerd (waar mensen trillingen en geluid doorgaans eerder accepteren), in heel Rotterdam staan gebouwen zonder maatregelen nog veel dichter op tramlijnen, en laagfrequent geluid is ongereguleerd.

Samengevat, gezien de incidentele, beperkte overschrijdingen in de worst-case berekening en de hoge kosten, slechte inpasbaarheid en beperkte effectiviteit van maatregelen, kan daarom in het licht van Wro art. 3.1 worden gemotiveerd dat er geen onaanvaardbaar woon- en leefklimaat t.a.v. trillingen ontstaat in het geplande gebouw.

Met de voorgestelde maatregel tegen het laagfrequent geluid van de trams, is er ook t.a.v. laagfrequent geluid een aanvaardbaar woon- en leefklimaat in het geplande gebouw.



# INHOUDSOPGAVE

<b>1.</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>9</b>
1.1.	Aanleiding	9
1.2.	Doel	9
1.3.	Onderzoeksmethode	10
1.4.	Leeswijzer	10
<b>2.</b>	<b>SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN</b>	<b>12</b>
2.1.	Situatie	12
2.2.	Uitgangspunten	13
<b>3.</b>	<b>BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE</b>	<b>18</b>
3.1.	Trillingen en wetgeving	18
3.2.	Beoordelingskader trillingen	18
3.3.	Beoordelingskader laagfrequent geluid	20
3.4.	Rekenmethode	21
<b>4.</b>	<b>VERWACHTE TRILLINGEN</b>	<b>26</b>
4.1.	Meetresultaten	26
4.2.	Trillingen in geplande gebouw	26
<b>5.</b>	<b>MITIGERENDE MAATREGELEN</b>	<b>30</b>
5.1.	Nut en noodzaak van maatregelen	30
5.2.	Analyse resultaten	31
5.3.	Maatregelen aan de trillingsbron	32
5.4.	Maatregelen in de bodem	33
5.5.	Maatregelen aan de gebouwen	36
5.6.	Afweging van maatregelen	38
	<b>BIJLAGEN</b>	<b>41</b>



<b>I.</b>	<b>GRONDONDERZOEK</b>	<b>42</b>
<b>II.</b>	<b>REKENMODEL</b>	<b>45</b>
II.1	Trillingsmeting	46
II.2	Gegevens treinpassages	47
II.3	Bepalen verschillen tussen meetpunten	47
II.4	Opstellen bodemmodel	48
II.5	Bepalen trillingsspectra t.p.v. randen gebouw	48
II.6	Opstellen gebouwmodel	49
II.7	Bepalen trillingsspectra t.p.v. fundering gebouw	55
II.8	Bepalen trillingsspectra t.p.v. vloeren gebouw	55
II.9	Bepalen $V_{max}$ en $V_{per}$ t.p.v. vloeren gebouw	56
II.10	Omgaan met onzekerheden	57
II.11	Bepalen van laagfrequent geluid	58
<b>III.</b>	<b>METINGEN</b>	<b>60</b>
III.1	Gegevens metingen	60
III.2	Resultaten metingen	61
<b>IV.</b>	<b>DETAILS MAATREGELEN</b>	<b>65</b>
IV.1	Inpakken fundering aan tramzijde met EPS	65
IV.2	Inpakken fundering met rubber	68
<b>V.</b>	<b>VALIDATIE REKENMODEL</b>	<b>73</b>
V.1	Validatiemethode	73
V.2	Validatiecases	74

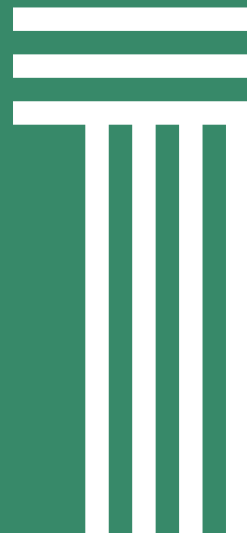




## INLEIDING



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.

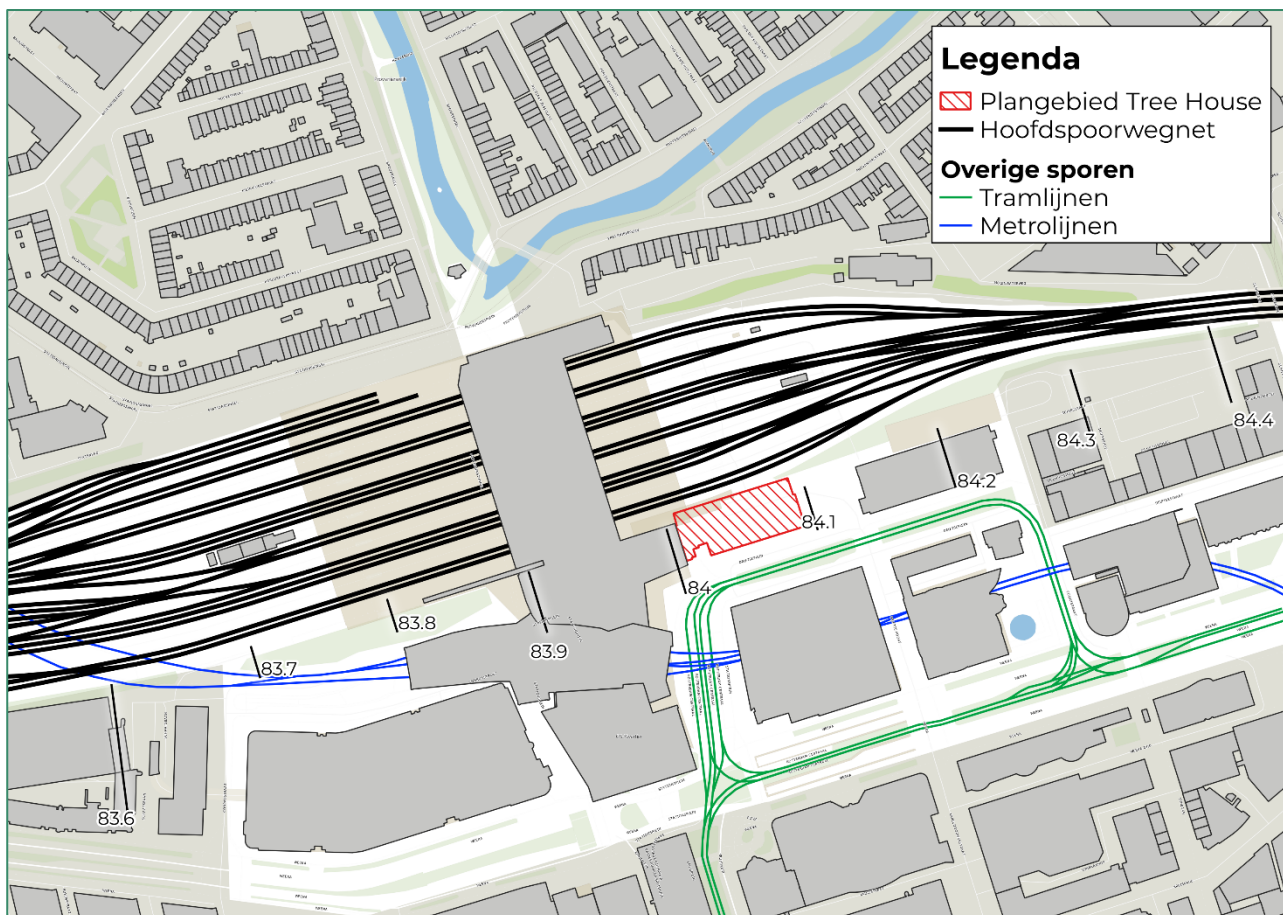




# INLEIDING

## 1.1. AANLEIDING

Naast Rotterdam Centraal Station wordt nieuwbouw ontwikkeld met een gecombineerde horeca-, kantoor- en woonfunctie: Tree House, een gebouw van 130 meter hoog. Tree House bevindt zich binnen een zone van 100 meter tot het spoor. Daarnaast rijden er trams vlak langs de bebouwing, zie Figuur 1. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van trein- en tramverkeer niet op voorhand worden uitgesloten.



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 aanpassingen 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 V 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 woningen op basis van de gemeten trillingen en de eigenschappen van het gebouw. Het resultaat van deze stap wordt in hoofdstuk 4 beschreven. In hoofdstuk 5 gaan we in op mogelijke maatregelen om de trillingen te verminderen.

De bijlagen bevatten technische informatie van het onderzoek, zoals een toelichting op de rekenmethodiek, grondonderzoek van nabijgelegen locaties, informatie over de onderzochte maatregelen en een validatie van het rekenmodel.







## SITUATIEBESCHRIJVING



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

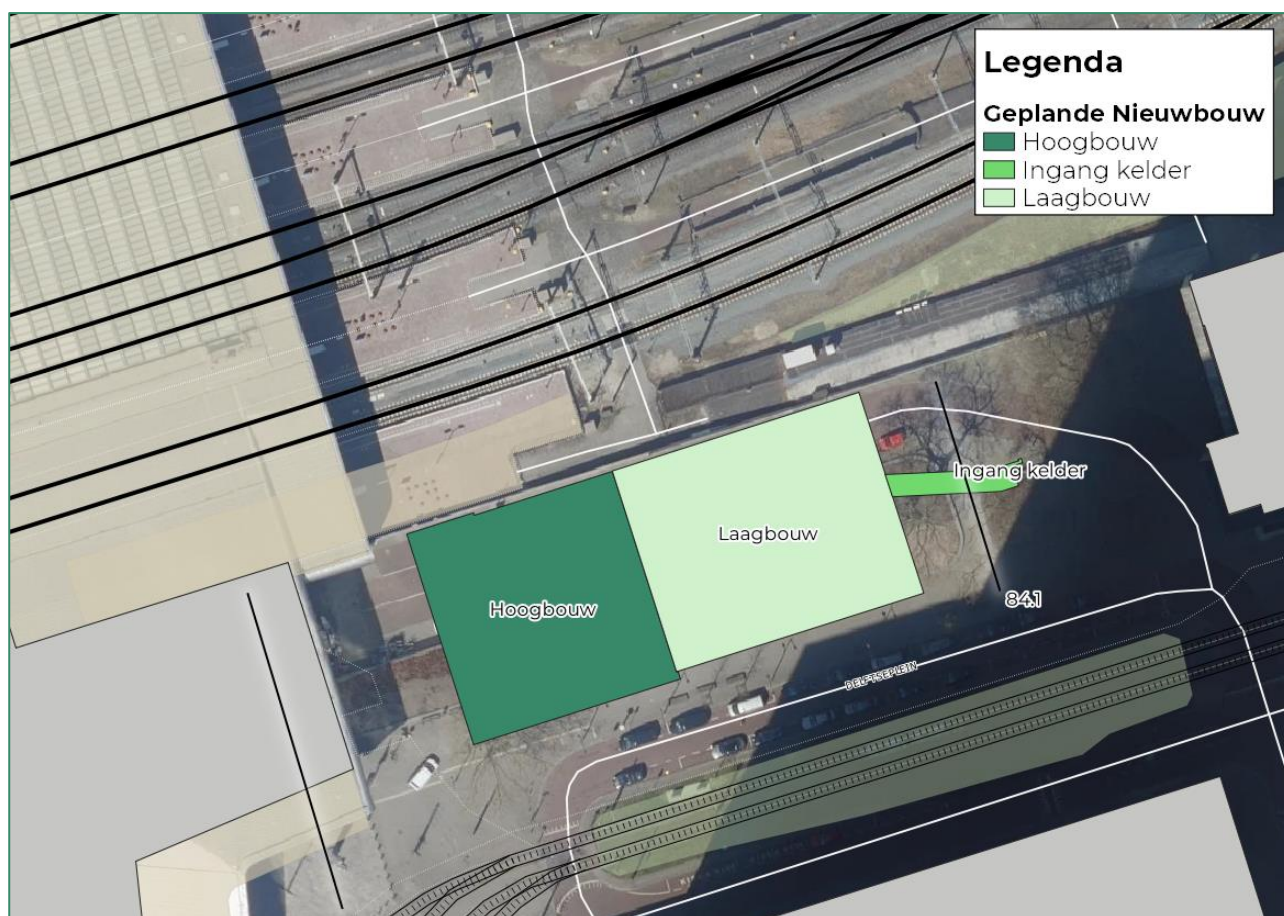




## **SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN**

### **2.1. SITUATIE**

Het Tree House gebouw wordt gerealiseerd aan het Delftseplein, tussen de gebouwen Delftse Poort (151 meter hoog) en Central Post (59 meter hoog). Ten noorden van de projectlocatie bevindt zich de spoorzone, ten zuiden een tramlijn. Tree House bestaat uit een combinatie van hoogbouw (ca. 129 meter hoog) en laagbouw (ca. 32 tot 45 meter hoog), waarbij de laagbouw bestaat uit kantoorverdiepingen met commerciële plint, terwijl de hoogbouw (vanaf de 11<sup>e</sup> verdieping) is bestemd voor wonen. Het gebouw heeft een kelder onder de laagbouw, met technische ruimten en een fietsenstalling. Onder de hoogbouw bevindt zich een zware, constructieve poer. De locaties van de delen van het plan zijn weergegeven in Figuur 2.



*Figuur 2 Toekomstige bebouwing op de planlocatie*

De geplande nieuwbouw bevindt zich in een zone van 16 tot 50 meter van het spoor, en op 17 meter van de tramlijn. De rijksnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. De gegevens in Tabel 1 zijn gebaseerd op het Geluidsregister Spoor en gegevens van de vervoerders. Volgens de IMA-2021 (vooruitblik voor spoorvervoer) kan het aantal goederentreinen toenemen. Er wordt eveneens een lichte toename van het aantal reizigerstreinen voorzien. In de berekeningen is met deze toenames rekening gehouden.

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

Type trein	Rijksnelheid	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Sprinter	30-50 km/h	6.00	4.00	1.63
Intercity	40 km/h	6.00	4.75	1.38
Internationale trein	40 km/h	2.17	2.25	0.13
Goederentrein	30-60 km/h	0.42	0.63	0.31

Ook de trams voor de bebouwing kunnen, gezien de korte afstand tot de tramlijn, voor trillingen in de bebouwing zorgen. Andere trillingsbronnen, zoals weg- en metroverkeer, zullen, gezien de afstand tot de bebouwing, niet voor voelbare trillingen zorgen in de geplande bebouwing.

## 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.

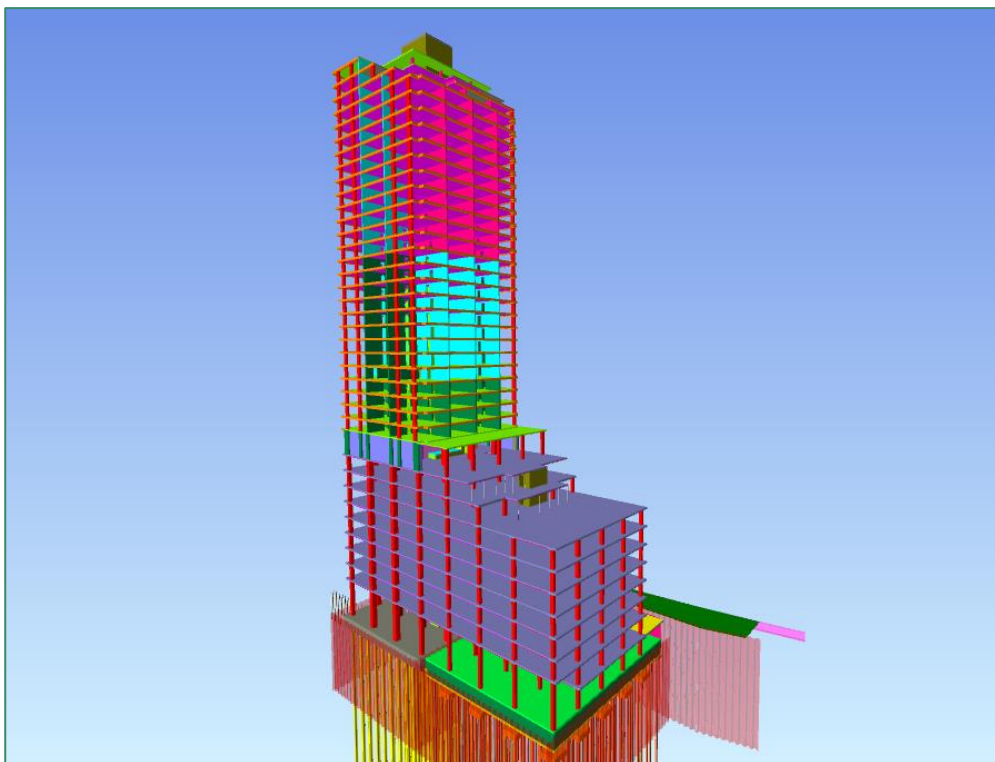
### 2.2.1. GEGEVENS BEBOUWING

Voor het uitvoeren van de berekeningen is uitgegaan van het aangepaste DO van 7 april 2022. Omdat er altijd verschillen zijn tussen DO en As-Built, hebben we in de berekeningen enkele varianten doorgerekend qua dynamische stijfheid van de materialen en verbindingen, zodat we robuuste uitspraken kunnen doen over de verwachte trillingen in het gebouw. Meer informatie hierover is te vinden in bijlage II, paragraaf 11.

In Tabel 2 zijn de belangrijkste eigenschappen van het DO weergegeven, een weergave van het 3D-model van Tree House hebben we opgenomen in Figuur 3. Het rekenmodel voor de bebouwing is hierop gebaseerd.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

Parameter	Eigenschappen
Vloertype	<ul style="list-style-type: none"> <li>Begane grond: In-situ betonvloer 400 mm, C55/67</li> <li>Verdieping 1 t/m 10: Polyplaatvloer 340 mm, 20% gewichtsbesparing, C55/67, 90 mm computervloer</li> <li>Verdieping 11 t/m 37: Breedplaatvloer 280 mm, C55/67, 30 mm isolatie en 60 mm anhydriet dekvloer</li> <li>Verdieping 38: Breedplaatvloer 280 mm, C30/37</li> </ul>
Hoogte	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laagbouw: 31.8 tot 45.3 meter (getrapt)</li> <li>Hoogbouw: 129.0 meter (lift, hoogste bouwlaag 126.3 meter)</li> </ul>
Lengte vloerveld	7.2 tot 9.0 meter
Breedte vloerveld	7.2 tot 11.0 meter
Constructietype	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laagbouw: kolommen, balken en wanden in-situ beton, C55/67</li> <li>Hoogbouw: kolommen, balken en wanden prefab beton, C55/67 (m.u.v. wanden 10<sup>e</sup> en 11<sup>e</sup> verdieping, C80/95)</li> </ul>
Fundering	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laagbouw: Fundex 460/560, -29.0 en -30.0 m PPN, en Fundex 540/660, -32.0 m PPN</li> <li>Hoogbouw: Poer met Tubex 762/950, -58.0 m PPN</li> </ul>



Figuur 3 Aanzicht uit 3D-model Tree House

### 2.2.2. GEGEVENS ONDERGROND

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

### 2.2.3. MEETRESULTATEN

Zoals te zien in Figuur 4 zijn door Alcedo op vijf locaties metingen uitgevoerd. Het gaat hierbij om vier meetpunten op het maaiveld en een meetpunt aan de fundering van het naastgelegen gebouw Central Post. De metingen zijn uitgevoerd van 24 november 2021 tot 2 december 2021.

De meting heeft een meetduur van 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 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<sup>2</sup>. Verdere gegevens over de metingen zijn opgenomen in bijlage III van dit rapport.

<sup>2</sup> 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.





*Figuur 4 Meetpunten*

Verder is gekeken naar de representativiteit van de metingen. Hiervoor geldt het volgende:

1. Er waren geen significante (langer dan 3 uur) verstoringen in de treindienst tijdens de meetperiode, er zijn daardoor voldoende reizigers- en goederentreinen gepasseerd.
2. Er zijn 145 goederentreinen gepasseerd tijdens de meetperiode, zo blijkt uit gegevens van ProRail. In een normale week in 2021 waren dat er 138. Ter indicatie, in 2023 waren dit er met ca. 106 per week minder. Er is dus een representatief aantal goederentreinen gemeten.

Verder is nog relevant dat de doorgaande goederentreinen op de corridor Rotterdam-Zuid – Rotterdam Centraal – Gouda rijden. Af en toe (ca. 1 per dag) rijdt een goederentrein door richting Den Haag, maar deze zijn qua trillingen niet maatgevend (gaat niet om zwaarbeladen treinen die voor de maatgevende, laagfrequente trillingen zorgen). Heel af en toe rijdt er een goederentrein richting Vlaardingen, maar dit gaat om een zeer beperkt aantal passages, en ook dit zijn relatief lichte, korte treinen, die voor de trillingen in het gebouw niet maatgevend zijn.

In het voorliggende onderzoek is rekening gehouden met gepubliceerde toekomstverwachtingen en juridisch vastgestelde plannen. Immers, voor juridisch nog niet vastgestelde plannen geldt dat in die plannen rekening dient te worden gehouden met (de trillingen in) Tree House. De volgende wijzigingen worden verwacht:

1. Er wordt een toename van het treinverkeer verwacht. Hoewel de exacte toename nog niet duidelijk is, is in dit onderzoek gerekend met het bovengrens-scenario (maximale groei) uit de IMA-2021 (zie boven). Daarmee wordt worst-case gerekend t.a.v. het aantal treinen. Vooral voor goederentreinen wordt een toename van het aantal treinen voorzien.

2. Er is één juridisch vastgesteld plan dat raakvlakken heeft met de trillingen in Tree House. Het betreft het project PHS Rotterdam-Rijswijk. Hoewel het projectgebied van dat project ten westen van station Rotterdam Centraal eindigt, kan dit project wel impact hebben. Door de sanering van een aantal wissels aan de westzijde van station Rotterdam Centraal, kunnen de maatgevende goederentreinen (van, maar vooral naar Gouda) in de toekomst niet dichterbij dan op 72 meter van Tree House rijden. Momenteel kunnen deze goederentreinen ook op 52 meter van het gebouw rijden, maar na de oplevering van PHS Rotterdam-Rijswijk is deze route niet meer mogelijk. De lichtere goederentreinen, van en naar Den Haag en Vlaardingen, kunnen wel dichterbij het gebouw rijden, maar doen dat in de praktijk ook niet en zijn qua trillingen niet maatgevend. Er zijn ook geen plannen om deze routing te wijzigen. Verder is nog relevant dat de meest nabij het gebouw gelegen sporen niet als doorgaande sporen worden gebruikt, aan de westzijde van station Rotterdam Centraal leiden deze naar een emplacement met snelheidsbeperkingen (doodlopende sporen of 1:9-wissels die met lage snelheid moeten worden bereden), waardoor de rijnsnelheid van eventueel incidenteel passerende goederentreinen op die sporen laag is.







# BEOORDELINGSKADER



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





# **BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE**

## **3.1. TRILLINGEN EN WETGEVING**

Er bestaat in Nederland geen wettelijk kader voor de beoordeling van trillingshinder in gebouwen. Wel geldt dat in het kader van een goede ruimtelijke ordening o.b.v. de Wet Ruimtelijke Ordening (Wro) kan worden verzocht om trillingen mee te nemen bij de wijziging van bestemmingsplannen waar trillingen een rol kunnen spelen. Hierbij zijn hulpmiddelen als de Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen en de SBR-richtlijn van toepassing om mogelijke trillingshinder in kaart te brengen respectievelijk te beoordelen.

## **3.2. BEOORDELINGSKADER TRILLINGEN**

Op basis van jurisprudentie wordt al enkele decennia gebruik gemaakt van de SBR-richtlijn om trillingen in gebouwen te beoordelen.<sup>3</sup>

Deze SBR-richtlijn bestaat uit drie delen (deel A<sup>4</sup> – schade in gebouwen, deel B<sup>5</sup> – hinder voor personen in gebouwen en deel C<sup>6</sup> – 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 een zekere mate van gewenning en er zijn minder mogelijkheden om de trillingen te reduceren. In dit plan gaat het om een nieuw gebouw.
  - b. Gebouwen met een overnachtingsfunctie (woningen, ziekenhuizen). De meeste hinder wordt vaak in rust ervaren. Bij gebouwen met een niet-overnachtingsfunctie

---

<sup>3</sup> 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. In dit onderzoek is de Bts dan ook niet gebruikt als beoordelingskader.

<sup>4</sup> SBR-richtlijn deel A:2017 – Schade aan bouwwerken

<sup>5</sup> SBR-richtlijn deel B:2002 – Hinder voor personen in gebouwen

<sup>6</sup> SBR-richtlijn deel C:2002 – Verstoring van trillingsgevoelige apparatuur



(kantoren, scholen) gelden minder strenge streefwaarden. Winkels, sport- en industriepanden vallen buiten de richtlijn. In dit plan gaat het om commerciële functies (onderste twee lagen), kantoorfuncties (rest laagbouw) en woonfuncties (hoogbouw). De onderste twee bouwlagen met commerciële functies vallen dus buiten het beoordelingskader, de verdiepingen 2 tot en met 11 bevatten kantoorfuncties en de verdiepingen daarboven woonfuncties.

- 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.

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 5. In dit rapport worden de trillingen, conform de SBR B-richtlijn, beoordeeld op de streefwaarden voor een nieuwe situatie<sup>7</sup>.

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

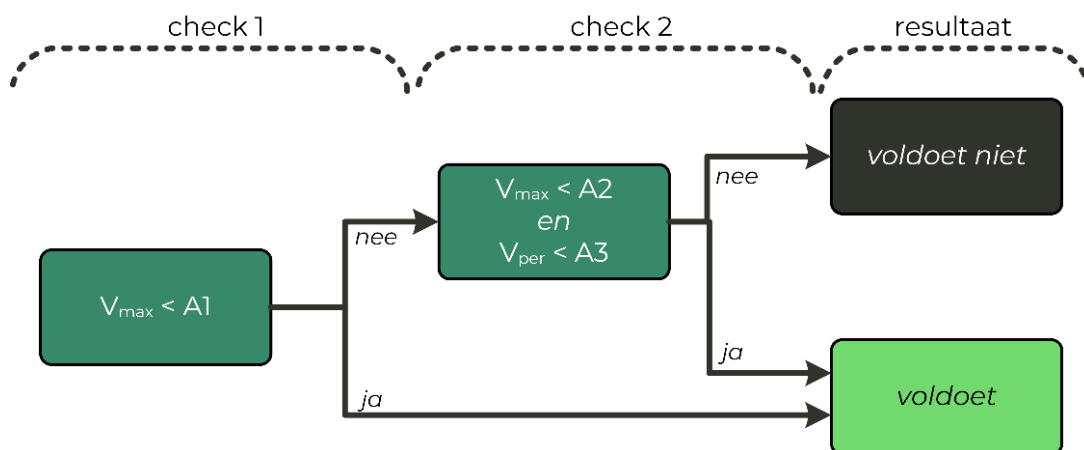
*Tabel 3 Streefwaarden in de SBR-richtlijn deel B voor gebouwen met bestemming wonen en kantoor*

Situatie	Dag en avond			Nacht		
	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	0.10	0.2	0.4	0.10
Kantoor, nieuwe situatie	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
Kantoor, bestaande situatie	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15

<sup>7</sup> Relevant hierbij is hoe dient te worden omgegaan met de streefwaarden: voldoet een waarde van 0.24 wel of niet aan de streefwaarde van 0.2? Hierbij geldt dat de SBR B-richtlijn ambivalent is in het toepassen van de streefwaarden. In par. 10.5.1 wordt aangegeven dat om te voldoen trillingen lager moeten zijn dan de streefwaarden, terwijl in bijlage 2 staat dat de trillingen niet hoger mogen zijn dan de streefwaarden, en ook bij de afweging van maatregelen in bestaande situaties hoeven de trillingen niet lager te zijn dan de streefwaarden voor een nieuwe situatie. Ook in de Beleidsregel trillinghinder spoor wordt aangegeven 'eerst toetsen, dan afronden' en dat trillingen niet groter mogen zijn dan de streefwaarden. Verder geeft ook de Omgevingswet dit ook aan: trillingen mogen niet groter zijn dan streefwaarden.

TNO heeft, ondanks deze argumenten, aangegeven in haar review van dit rapport dat wat haar betreft de streefwaarde van 0.2 dient te worden geïnterpreteerd als 0.20, omdat de A1-streefwaarden in de SBR B-richtlijn twee decimalen kennen, waarmee volgens TNO impliciet wordt aangegeven dat dit ook voor A2 zou moeten gelden. In dit rapport wordt, om tegemoet te komen aan deze wens van TNO, de waarde van 0.2 dus als 0.20 gelezen.





Figuur 5 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

### 3.3. BEOORDELINGSKADER LAAGFREQUENT GELUID

Omdat de geplande bebouwing dicht bij het spoor en een tramlijn wordt gerealiseerd, is er een kans op laagfrequent geluidhinder. Laagfrequent geluid is geluid dat ontstaat doordat in trilling gebrachte wanden en vloeren geluid afstralen.

Voor laagfrequent geluid ontbreekt, net als voor trillingen, een wettelijk kader. Noch in de Wet Geluidhinder, noch in het Bouwbesluit of het Bestemmingsplan zijn eisen opgenomen ten aanzien van laagfrequent geluid. We beschouwen laagfrequent geluidhinder daarom vooral om een zo optimaal mogelijk woon- en leefklimaat in het gebouw te verzorgen, waar dat normaal gesproken niet wordt gedaan bij bovengrondse situaties (omdat luchtgeluid en trillingen dan doorgaans maatgevend zijn qua hinder).

Voor laagfrequent geluid zijn drie toetsingskader bekend in Nederland:

1. De **NSG-richtlijn** voor laagfrequent geluid (1999). Deze richtlijn is opgesteld door de Nederlandse Stichting Geluidhinder (NSG), en geeft aan of geluid hoorbaar is. De curve is opgesteld voor het gemiddelde geluidniveau in een woning dat 90% van een groep 55-plussers kan horen. Dat betekent concreet dat de meeste mensen een geluidniveau dat gelijk aan of hoger dan dit geluidniveau is, kan horen. Uit onderzoeken blijkt dat zo'n 10 procent van de mensen gevoeliger is voor laagfrequent geluid, en ook lagere geluidsniveaus kan horen, tot wel 10 dB onder deze referentiecure. Belangrijk bij deze curve is dat een overschrijding kan leiden tot een klacht, maar niet per se dat sprake is van een hinderlijke situatie.
2. De **Vercammencurve** (1989). Deze curve is door Vercammen en Heringa ontwikkeld in opdracht van het ministerie van VROM, om de hinderlijkheid van laagfrequent geluid te beoordelen. Uitgangspunt bij deze curve is dat enige hinder mogelijk moet zijn, zoals dat ook geldt voor het wettelijk toetsingskader voor geluid. De Vercammencurve wordt regelmatig toegepast bij het toetsen van bijvoorbeeld milieuvergunningen voor bedrijven, en is vanuit de jurisprudentie daarvoor een gebruikelijk toetsingskader. Belangrijk bij deze curve is dat een overschrijding betekent dat er een grote kans is op hinder door laagfrequent geluid, maar de curve is in principe opgesteld voor meer continue bronnen, en niet voor voertuigpassages.
3. De GWR-richtlijn, of **methode De Ruiter** (2008). Deze methode is door Bob de Ruiter van Gemeentewerken Rotterdam ontwikkeld voor het beoordelen van laagfrequent geluid door railinfra, zoals treinen, metro's en trams. De methode wordt met regelmaat toegepast voor het beoordelen van laagfrequent geluid als gevolg van spoorverkeer, hier is ook jurisprudentie op. Belangrijk bij deze curve is dat een overschrijding betekent dat er een grote kans is op hinder door laagfrequent geluid.



De methode De Ruiter is, gelet op bovenstaande, het meest voor de hand liggende beoordelingskader om laagfrequent geluid in het voorliggende plan te beoordelen. De methode kent twee beoordelingen:

1. Een beoordeling van het A-gewogen passageniveau  $L_{Amax}$  in het frequentiebereik tussen 10 en 250 Hz, bepaald per voertuigpassage. De grenswaarde bedraagt 35 dB(A) voor woningen, voor kantoren wordt een grenswaarde van 40 dB(A) gehanteerd. Overigens kunnen geluidniveaus vanaf ca. 20 dB(A) al hoorbaar zijn.
2. Een beoordeling van het ongewogen passageniveau  $L_{Lmax}$  in de octaafbanden 16, 32, 64 en 125 Hz. In alle octaafbanden moet het geluidniveau lager zijn dan de grenswaarde.

De grenswaarden voor gebouwen met woon- en kantoorfunctie zijn weergegeven in Tabel 4.

*Tabel 4 Grenswaarden methode De Ruiter voor gebouwen met bestemming wonen en kantoor*

Bestemming	$L_{Lmax}$ [dB]				$L_{Amax}$ [dB(A)]
	16 Hz	32 Hz	64 Hz	125 Hz	10 – 250 Hz
Wonen	80	68	55	45	35
Kantoor	85	73	60	50	40

### 3.4. REKENMETHODE

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

#### 3.4.1. 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 6.

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



*Figuur 6 Trillingen –system van trillingsbron, bodem als doorgeefmedium en gebouw als ontvanger*

### **3.4.2. DE TRILLINGSBRON**

In dit onderzoek zijn treinen en trams de bron van de trillingen. De trillingen van het trein- en tramverkeer zijn gemeten door Alcedo op vier punten op maaiveld in het plangebied en aan de fundering van het bestaande gebouw Central Post. De beoordeling van de trillingen in de geplande bebouwing heeft plaatsgevonden op basis van deze metingen. De metingen zijn gebruikt als input voor het rekenmodel, waarbij de gemeten trillingen op de fundering van het gebouw zijn aangebracht. Meer informatie hierover is te vinden in bijlage II.

### **3.4.3. DE BODEM**

De bodem op deze locatie bestaat voornamelijk uit slappe klei- en veenlagen, met daaronder een stijver zandpakket, zie bijlage I, maar lokaal komen ook hoger in het bodempakket zandlagen voor. De diepte van deze laag wisselt sterk, zo blijkt uit een vergelijking van verschillende sonderingen.

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. Overigens zijn de meetpunten zodanig aangebracht dat deze op de randen van het geplande gebouw staan, om de invloed van rekenonzekerheden te minimaliseren.

### **3.4.4. 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 door We-Boost ontwikkeld rekenmodel, waarin we

empirische resultaten, analytische formules en resultaten uit 3D eindige elementenmodellen combineren met een random forest algoritme (AI-techniek om op basis van grote hoeveelheden data een voorspelling te doen). Een toelichting op het rekenmodel is gegeven in Bijlage II, validatiegegevens van het model zijn gegeven in Bijlage V.

Het laagfrequent geluid in de bebouwing is berekend op basis van de berekende trillingen. Relevant hierbij is dat de gebruikte trillingsmeters niet geschikt zijn om de trillingen boven 100 Hz nauwkeurig te registreren. Daarom hebben we, voor de trillingen boven 100 Hz, gebruik gemaakt van een eigen database met metingen die aan trein- en trampassages in vergelijkbare situaties zijn uitgevoerd.

Laagfrequent geluid ontstaat doordat vloeren en wanden in trilling worden gebracht. Het geluidsdrukkniveau is berekend met behulp van een door TNO opgestelde vergelijking<sup>8</sup>. Deze vergelijking wordt breed toegepast voor het berekenen van laagfrequent geluid in nog niet gerealiseerde bebouwing, en is gebaseerd op praktijkervaringen. In de vergelijking van TNO wordt het geluidsdrukkniveau berekend op basis van de afmetingen van de ruimte en de gebruikte materialen (absorptie, afstraling). Bij grote, open en kaal ingerichte ruimtes ontstaat een hoger geluidsdrukkniveau dan in kleinere ruimtes met meer dempende materialen. In Tree House gaat het deels om grote, open ruimtes (de kantoorruimtes op de onderste verdiepingen), deels om kleinere ruimtes (de woonruimtes op hoger gelegen verdiepingen), zie ook bijlage II voor meer informatie over het gebruikte rekenmodel en de aannames die zijn gedaan in dit onderzoek.

#### **3.4.5. 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 normaal te typeren periode. Er is geen informatie bekend over de huidige status van de spoorligging. Door te meten op meerdere punten hebben we variaties waar mogelijk meegenomen in de analyse en berekeningen. Verder geldt dat de metingen qua routing van de maatgevende goederentreinen worst-case zijn: in de toekomst kunnen de zware goederentreinen minder dicht bij het gebouw rijden dan nu het geval is. Er is op basis van bovenstaande informatie geen reden om te twijfelen aan de representativiteit van de berekeningen voor de toekomstige trillingen.
- 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 op meerdere punten te meten is de invloed van deze variaties meegenomen in de berekeningen. Bovendien is op diverse afstanden van het spoor gemeten, en vooral op de locaties waar de randen van het toekomstige gebouw komen te staan. De invloed van de onzekerheid in de bodem is daarmee meegenomen in de analyse, de impact op de resultaten is daardoor beperkt.
- Ten aanzien van de gebouwen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en definitief ontwerp). Bovendien is

---

<sup>8</sup> Molenaar, ir. D.J. et al., *Prognoses van trillingen en laagfrequent geluid als gevolg van de TBM passage in en om de woning Patrimoniumpark 26 in Leiderdorp*, TNO Bouw, 16 mei 2003, 2002-C1-R2129



het dynamische gedrag van bijvoorbeeld beton afhankelijk van de mate van gescheurdheid van het beton en zijn er natuurlijke variaties in materiaalgedrag (van bijvoorbeeld hout, metselwerk en beton). 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 numerieke (eindige elementen) modellen, analytische modellen en empirische gegevens, 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 hoge gebouwen (boven de 90 meter, zoals hier bij Tree House), zijn er echter weinig meetresultaten beschikbaar, en zijn de onzekerheden groter. Deze onzekerheid is verwerkt in de berekeningen. Validatiegegevens van het rekenmodel zijn opgenomen in Bijlage V.
- 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



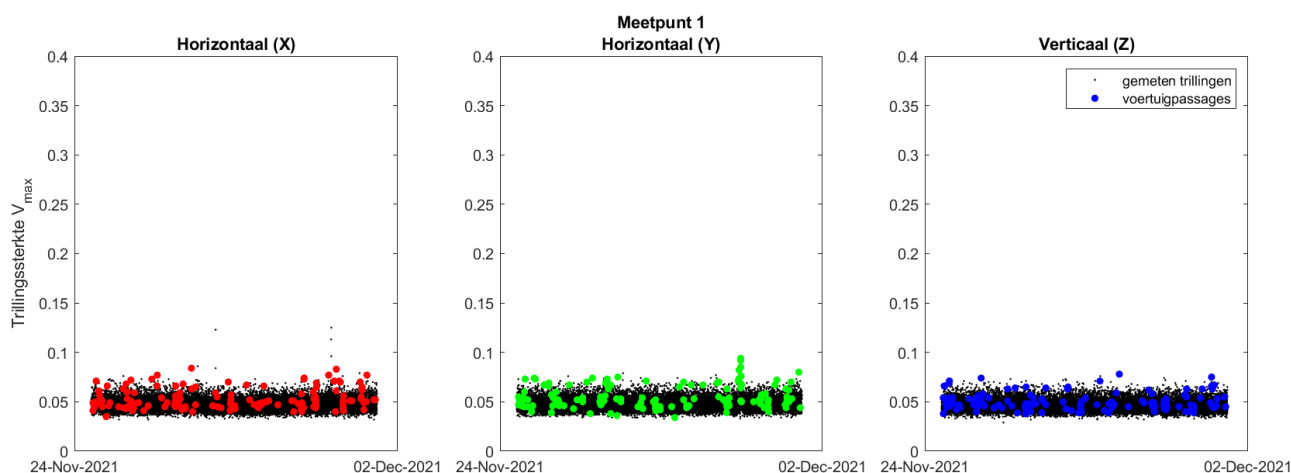
In dit hoofdstuk wordt eerst een korte toelichting gegeven op de meetresultaten, daarna worden de verwachte trillingen en het laagfrequent geluid in de geplande bebouwing gegeven. Hierbij is gebruik gemaakt van de beoordelingsmethode en de rekenmethodiek zoals toegelicht in het voorgaande hoofdstuk.



# **VERWACHTE TRILLINGEN**

## **4.1. MEETRESULTATEN**

Alcedo heeft metingen uitgevoerd op maaiveld en aan de fundering van het naastgelegen gebouw Central Post. De trillingen op het meetpunt aan de fundering zijn weergegeven in Figuur 7. Overige gegevens uit de metingen hebben we opgenomen in bijlage III. In Figuur 7 valt op dat de trillingen van reizigerstreinen en vrijwel alle trams op de fundering van het gebouw wegvallen in het achtergrondniveau (de ruis). Vooral zware goederentreinen, en incidenteel een tram, zorgen voor trillingen die hoger zijn dan het achtergrondniveau.



*Figuur 7 Gemeten trillingen aan fundering Central Post, trillingsniveaus boven de achtergrondruis zijn gemarkeerd*

De trillingen zijn relatief laag. Dit is, gezien de afstand tot de maatgevende goederensporen (meer dan 60 meter afstand voor de meeste treinen), de slappe bodemopbouw en het feit dat hier gemeten is op de fundering van een zwaar gebouw, niet afwijkend ten opzichte van vergelijkbare metingen in de buurt van Tree House (metingen in de buurt van Pompenburg en Hofplein laten vergelijkbare trillingssterktes op de fundering van grotere gebouwen zien), zie Tabel 1.

*Tabel 5 Meetresultaten trillingen op fundering van vergelijkbare gebouwen*

Gebouw	Hoogte	Afstand (maatgevende) spoor	Trillingssterkte $V_{max}$
Stadskantoor Utrecht	90 m	40 meter	0.1
Hofplein 20 Rotterdam	95 m	57 meter	0.1
Hofplein 33 Rotterdam	50 m	180 meter	0.1
Defltseplein 27 Rotterdam	55 m	55 meter	0.1
Pompenburg 6xx Rotterdam	40 m	135 meter	0.1
<b>Tree House Rotterdam</b>	<b>129 m</b>	<b>60 meter</b>	<b>0.1</b>

## **4.2. TRILLINGEN IN GEPLANDE GEBOUW**

De geplande bebouwing is gemodelleerd op basis van de informatie uit Tabel 2. Een voorbeeld van het (frequentie-afhankelijke) gedrag van de geplande bebouwing is weergegeven in bijlage II. Met deze resultaten is bepaald in welke mate de trillingen worden versterkt tussen de huidige meetpunten en de vloeren in de toekomstige bebouwing.



De resultaten hebben we weergegeven in Tabel 6, samen met een beoordeling van de trillingen. De trillingen zijn weergegeven als een bandbreedte (90 procent onzekerheidsinterval), omdat de trillingen per verdieping anders zijn, en daarnaast een beperkte onzekerheid kennen als gevolg van variatie in natuurlijk materiaalgedrag, verschillen tussen bouwlagen, verschillen tussen DO en de uiteindelijke As-Built situatie en onzekerheden in de berekeningen (zie paragraaf 3.4.5 en bijlage II). **Oranje** arcering geeft aan dat er sprake is van een overschrijding van de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn. Ter indicatie zijn ook de streefwaarden weergegeven, zowel voor een nieuwe situatie als de soepeler streefwaarden voor een bestaande situatie (waaraan wordt voldaan op deze locatie, maar deze streefwaarden voor een bestaande situatie zijn hier formeel niet van toepassing).

*Tabel 6 Trillingen per gebouwdeel en beoordeling op SBR B-richtlijn*

Bouwdeel	V <sub>max,dag</sub>	V <sub>max,nacht</sub>	V <sub>per</sub>	Beoordeling
Laagbouw (commercieel, BG en 1 <sup>e</sup> )	0.1 – 0.2	0.1 – 0.2	0.00 – 0.01	Valt buiten beoordelingskader, zie paragraaf 3.2
Laagbouw (kantoor, 2 <sup>e</sup> – 11 <sup>e</sup> )	0.1 – 0.3	0.1 – 0.3	0.00 – 0.01	Voldoet
Hoogbouw (wonen, 12 <sup>e</sup> – 37 <sup>e</sup> )	0.2 – 0.3	0.2 – 0.3	0.00 – 0.01	Voldoet niet, incidentele overschrijdingen in nacht
Streefwaarden nieuw (wonen)	<b>0.4</b>	<b>0.2</b>	<b>0.05</b>	
Streefwaarden bestaand (wonen)	<b>0.8</b>	<b>0.4</b>	<b>0.07</b>	
Streefwaarden nieuw (kantoor)	<b>0.6</b>	<b>0.6</b>	<b>0.07</b>	
Streefwaarden bestaand (kantoor)	<b>1.2</b>	<b>1.2</b>	<b>0.15</b>	

Voor laagfrequent geluid is de beoordeling weergegeven in Tabel 7.

*Tabel 7 Laagfrequent geluid per gebouwdeel en beoordeling op SBR B-richtlijn*

Bouwdeel	L <sub>Lmax</sub> [dB]				L <sub>Amax</sub>	Beoordeling
	16 Hz	32 Hz	64 Hz	125 Hz		
Laagbouw (commercieel, BG en 1 <sup>e</sup> )	72-79	56-67	58-76	41-58	34-52	Valt buiten beoordelingskader
Laagbouw (kantoor, 2 <sup>e</sup> – 11 <sup>e</sup> )	68-81	50-65	52-73	33-55	26-48	Voldoet niet overal
Hoogbouw (wonen, 12 <sup>e</sup> – 37 <sup>e</sup> )	61-70	44-53	37-56	13-32	10-28	Voldoet niet overal
Grenswaarden (wonen)	<b>80</b>	<b>68</b>	<b>55</b>	<b>45</b>	<b>35</b>	
Grenswaarden (kantoor)	<b>85</b>	<b>73</b>	<b>60</b>	<b>50</b>	<b>40</b>	

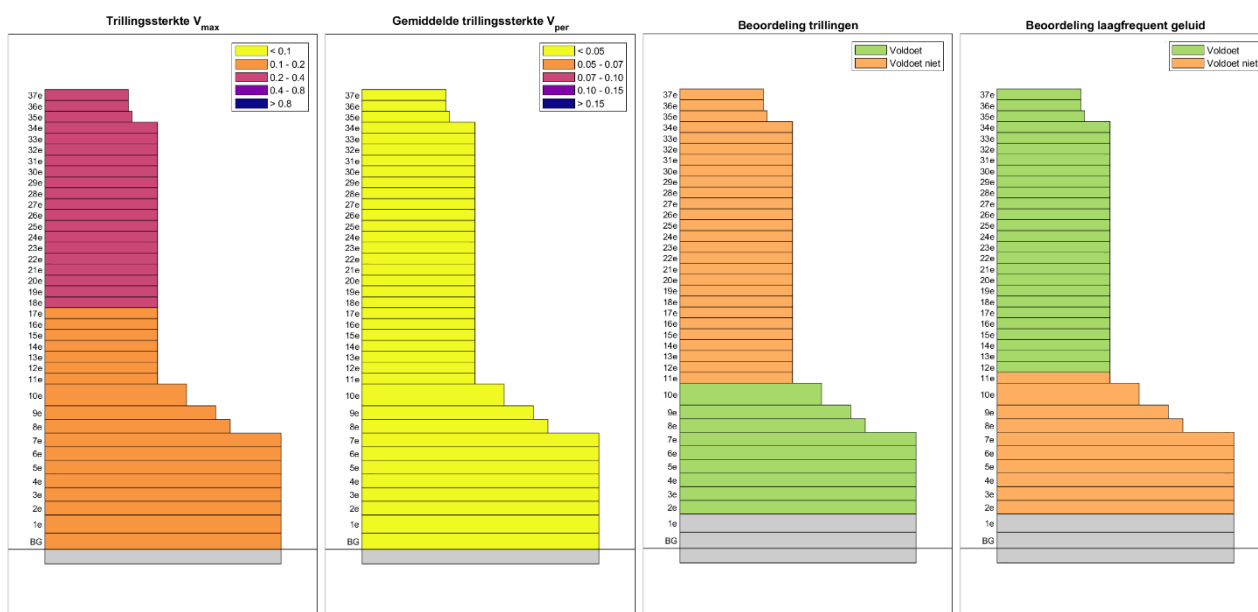
Resultaten per verdieping zijn weergegeven in Figuur 8. De weergegeven resultaten betreffen de bovengrens van de trillingen en het laagfrequent geluid per verdieping, over de verdiepingen heen variëren de trillingen en het laagfrequent geluid.

Samengevat geldt het volgende:

- De hoogste trillingen treden op bovenin het gebouw. Er is sprake van incidentele overschrijdingen (ongeveer 1 per week) als gevolg van zware goederentreinen met een wat afwijkende trillingssterkte.



- In de laagbouw zijn de trillingen vooral hoger in het deel boven de kelder, vooral door de meer open structuur (kolommen) en de lichtere fundering. Hierdoor is dit bouwdeel gevoeliger voor trillingen van vooral goederentreinen. De trillingen die hier optreden worden vooral veroorzaakt door torsie (roteren van gebouwen om verticale as). In de laagbouw is geen sprake van gebouwen met een overnachtingsfunctie, en zijn de streefwaarden dus soepeler. Hier zijn geen overschrijdingen.
- Het laagfrequent geluid neemt af met de hoogte, als gevolg van demping in het gebouw. Op de kantoorlagen en de onderste woonlaag is sprake van overschrijdingen van de grenswaarden uit de methode De Ruiter. De maximale overschrijding op de laagste kantoorverdieping bedraagt maximaal zo'n 13 dB, de overschrijding treedt op in de 63 Hz octaafband. Op de onderste woonlaag is sprake van beperkte overschrijdingen, van maximaal ca. 1 dB in de 63 Hz octaafband.



Figuur 8 Van links naar rechts, maximale trillingssterkte  $V_{max}$  per verdieping, gemiddelde trillingssterkte  $V_{per}$  per verdieping, beoordeling trillingen (SBR B-richtlijn) en beoordeling laagfrequent geluid (methode De Ruiter)

Een samenvattende beoordeling is hieronder weergegeven in Tabel 8. In geval van overschrijdingen is aangegeven op hoeveel lagen niet wordt voldaan aan het beoordelingskader.

Tabel 8 Samenvattende beoordeling

Voertuig	Trillingen		Laagfrequent geluid	
	Kantoren	Wonen	Kantoren	Wonen
Goederentreinen	Voldoet	1/week, 27 lagen	Voldoet	Voldoet
Reizigerstreinen	Voldoet	Voldoet	1 laag	Voldoet
Trams	Voldoet	Voldoet	9 lagen	1 laag

Omdat er sprake is van overschrijdingen van het beoordelingskader, wordt in het volgende hoofdstuk ingegaan op mitigerende maatregelen.



## MAATREGELEN



In dit hoofdstuk wordt meer in detail gekeken naar de in het vorige hoofdstuk geconstateerde overschrijdingen van het beoordelingskader. Vervolgens wordt gekeken naar mogelijke maatregelen, en naar het effect en de kosten van die maatregelen.



## MITIGERENDE MAATREGELEN

### 5.1. NUT EN NOODZAAK VAN MAATREGELEN

Door de passage van een goederentrein met een afwijkende trillingssterkte wordt in een deel van het gebouw niet voldaan aan het beoordelingskader voor trillingshinder. Daarnaast zorgen trams en treinen op dichtbijgelegen sporen voor overschrijdingen van het beoordelingskader voor laagfrequent geluid in een deel van de bebouwing. In de richtlijn voor trillingshinder wordt aangegeven dat, in geval van overschrijdingen, maatregelen dienen te worden afgewogen. Deze afweging beschrijven we in deze paragraaf.

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

1. De mate waarin de trillingssterkte voorkomt. Hiervoor geldt dat de gemiddelde trillingssterkte  $V_{per}$  een goede indicatie is. Die is laag ( $V_{per}$  bedraagt maximaal 0,01, en voldoet daarmee ruimschoots aan de streefwaarde). Er is sprake van een beperkt aantal overschrijdingen, namelijk maximaal 1 per week. Het beperkte aantal overschrijdingen in combinatie met de lage gemiddelde trillingssterkte  $V_{per}$ , kan het achterwege laten van een maatregel rechtvaardigen. Voor laagfrequent geluid is dit niet aan de orde, daar gaat het om een groot aantal trampassages boven de grenswaarden, maar relevant hierbij is wel dat laagfrequent geluid niet gereguleerd is, en doorgaans in bovengrondse situaties (zoals hier) niet wordt beschouwd. Hier is wel naar laagfrequent geluid gekeken om te zorgen voor een zo goed mogelijk woon- en leefklimaat, en om te voorkomen dat eventuele maatregelen tegen trillingen het laagfrequent geluid in het gebouw sterker maken.
2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het trein- en tramverkeer kunnen maskeren. Daar is hier geen sprake van, er zijn geen andere relevante trillingsbronnen in de nabijheid van het plangebied.
3. De mogelijkheid tot het treffen van reducerende maatregelen. Het is conform bestaande jurisprudentie<sup>9</sup> 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.

Hieronder gaan we in op maatregelen om de trillingen te reduceren, met als neven doel om ook het laagfrequent geluid te verminderen. Om effectieve maatregelen te treffen, stellen we eerst vast bij welke trillingsfrequenties vooral hoge trillingen optreden. Daarna gaan we in op

---

<sup>9</sup> Zie bijvoorbeeld de uitspraak van de bestuursrechter in het kader van het project Doorstroomstation Utrecht, 201505856/1/R6



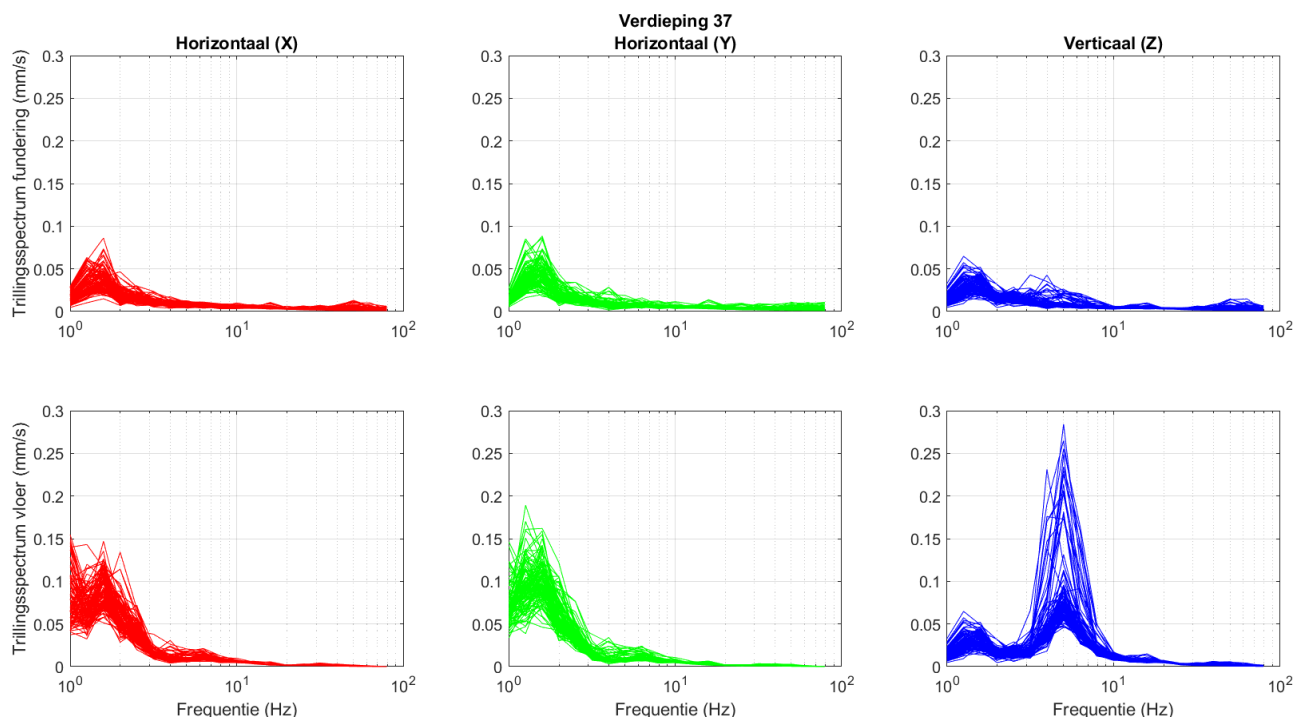
maatregelen die mogelijk zijn aan de trillingsbron (de trein of het spoor), maatregelen in de bodem en maatregelen aan het gebouw. Daarbij bespreken we ook bouwkundige optimalisaties.

## 5.2. ANALYSE RESULTATEN

Om te bepalen welke trillingsrichting en trillingsfrequenties in de gebouwen maatgevend zijn, is een nadere analyse uitgevoerd van de verwachte trillingen, zie Figuur 11. In deze figuur is de trillingssnelheid per treinpassage weergegeven als tertsbandspectrum op de fundering en de hoogste verdieping (37). Hieruit kan worden afgeleid bij welke frequentie en in welke trillingsrichting de trillingen het hoogst zijn.

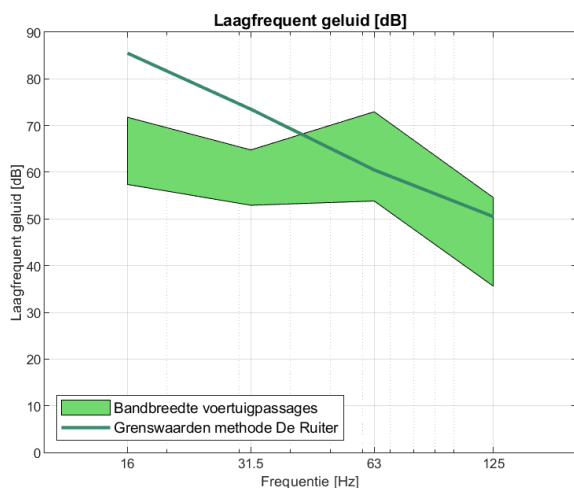
Uit Figuur 9 volgt dat de hoogste trillingen maatgevend zijn in verticale richting, vooral als gevolg van inverting van het gebouw (en delen daarvan) op zichzelf. Het grootste deel van de opslinging tussen begane grond en hoogbouw vindt plaats in de open kolommenstructuur van de laagbouw. De trillingen zijn vooral hoog tussen 3 en 6 Hz, dat zijn de frequenties waarbij goederentreinen veel trillingsenergie in de bodem brengen, en waar de gebouwdelen gevoelig voor zijn. Maatregelen die genomen worden, moeten vooral effectief zijn tegen trillingen bij die lage frequenties, maatregelen die de trillingen bij hogere frequenties verminderen zijn namelijk niet effectief.

Om te voldoen aan het beoordelingskader, is een afname van de trillingssterkte  $V_{max}$  met 36 procent nodig.



*Figuur 9 Verwachte trillingen op fundering (boven) en op hoogste verdieping (onder)*

Voor laagfrequent geluid geldt dat dit het hoogst is op de 1<sup>e</sup> kantoorlaag, verdieping 2. Het laagfrequent geluidsspectrum en de grenswaarden zijn weergegeven in Figuur 10.



*Figuur 10 Laagfrequent geluid (bandbreedte geeft variatie in trams en treinen aan), verdieping 2*

De hoogste geluidsniveaus treden op in de 63 Hz-octaaftband. Maatregelen moeten vooral effectief zijn tegen de wat hogere trillingsfrequenties, globaal vanaf ca. 32 Hz. Uit Tabel 7 volgt dat voor de woonverdiepingen een maximale afname van 1 dB nodig is, en voor de kantoorverdiepingen een afname van 13 dB om overschrijdingen volledig te voorkomen.

In de volgende subparagrafen wordt ingegaan op mogelijke maatregelen aan de trillingsbron, in de bodem of aan de gebouwen.

### 5.3. 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 voertuigen). Het effect van deze maatregelen is bepaald op basis van eerdere onderzoeken<sup>10</sup>. Verder geldt dat voor trillingen andere maatregelen moeten worden genomen dan voor laagfrequent geluid:

- **Goederentreinen:** de trillingen worden vooral veroorzaakt door de indrukking van de bodem (statische aslast van de zware goederentreinen). Dit fenomeen kan worden verminderd door de sporen van de goederentreinen stijver te maken, bijvoorbeeld door het toevoegen van een zettingsvrije plaat. Hiervoor dienen meerdere sporen over een afstand van ca. 350 meter te worden voorzien van een onderheide betonplaat. De kosten van een dergelijke maatregel bedragen € 16 tot € 25 mln<sup>11</sup>. Het effect van deze maatregel loopt in de praktijk bij lage frequenties sterk uiteen (tussen de 10 en 40 procent effect bij de hier maatgevende frequenties, op basis van literatuur (eindige elementenmodellen en metingen, zoals bijv. in Oosthuizen)), terwijl er minimaal 36 procent effect nodig is om te voldoen aan de streefwaarden. Goedkopere maatregelen, zoals under sleeper pads of ballastmatten, zijn onvoldoende effectief tegen de laagfrequente trillingen van goederentreinen. Andere maatregelen aan het spoor of de treinen zijn niet of zeer beperkt effectief bij de hier optredende lage trillingsfrequenties.

<sup>10</sup> Meet- en modelonderzoeken die openbaar toegankelijk zijn en eigen meet- en modelonderzoek door We-Boost.

<sup>11</sup> Totale investeringskosten, incl. BTW, prijspeil 2022, met een bandbreedte van +/-25%. Kosten zijn exclusief kosten voor grondverwerving, omleiding van treinverkeer of alternatief vervoer van reizigers, verleggen van kabels en leidingen en kosten voor een vergunningsprocedure. De werkelijke kosten van maatregelen zullen daardoor hoger uitvallen. Kosten zijn op basis van een SSK-raming vanuit gegevens van producenten en aannemers. Per appartement met een overschrijding zijn de kosten daarmee hoger dan € 100.000.



- **Reizigerstreinen:** de trillingen van reizigerstreinen voldoen aan het beoordelingskader, er zijn alleen (beperkte) overschrijdingen van het beoordelingskader voor laagfrequent geluid door reizigerstreinen. Dit laagfrequent geluid, veroorzaakt door reizigerstreinen op de nabijgelegen sporen, kan worden verminderd door het toepassen van ballastmatten of under sleeper pads onder het spoor. De kosten hiervan bedragen € 1 tot € 3 mln. Relevant is dat op slechts één bouwlaag sprake is van overschrijdingen. Het gaat om een beperkt aantal overschrijdingen (ca. 1 trein per uur), en bovendien om lichte overschrijdingen. Under sleeper pads hebben meer dan 5 dB effect, voldoende om te voldoen aan het beoordelingskader (er is 3 dB effect nodig om te voldoen aan de grenswaarden).
- **Trams:** ook van de trams voldoen de trillingen aan het beoordelingskader. Het laagfrequent geluid van de trams kan niet eenvoudig worden opgelost met aanpassingen aan de bron, omdat sprake is van een ingegoten spoorconstructie. Alleen een complexe wijziging van het spoorstelsel van de trams, bijvoorbeeld door toepassing van een betonplaat op een dikke rubberen mat, kan een oplossing zijn. De kosten hiervan bedragen minimaal € 6 tot € 11 mln. Door deze constructie te optimaliseren kan het benodigde effect (minimaal 13 dB) worden gerealiseerd.

Voor al deze maatregelen geldt bovendien dat de maatregelen buiten het plangebied moeten worden getroffen, dus dat de initiatiefnemer afhankelijk is van processen van derden (ProRail, RET), waar hij zelfs niet of nauwelijks invloed op heeft.

## 5.4. 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 een trillingsscherm van EPS (piepschuim), beton, jet-grout (soil-mix methode), Mix-in-Place wand of een damwand. De laatste wordt hier al aangebracht tussen de ProRail/NS-expeditieruimte en het gebouw.

Nadeel van deze maatregelen is dat deze vaak kostbaar zijn en niet goed aanpasbaar aan toekomstige situaties. Om de laagfrequente trillingen van de goederentreinen, die diep door de bodem gaan, af te schermen, zijn bovendien zeer grote schermafmetingen (minimaal 20 meter diep, gezien de sterke variatie in de opbouw van de bodem<sup>12</sup> en de maatgevende trillingsfrequenties) nodig. En dan nog zien we uit praktijkmetingen (Arnhem, Utrecht) dat het effect tegen laagfrequente trillingen beperkt is.

Verder is een trillingsscherm alleen effectief dicht bij de bron of dicht bij de ontvanger. Gezien de ligging van het plangebied, de aanwezigheid van infrastructuur (sporen, wegen, kabels en leidingen) en het feit dat goederentreinen over een aantal sporen op grotere afstand rijden, is een positie dichtbij de bebouwing het meest voor de hand liggend, zie Figuur 11. Probleem is echter dat een scherm hier niet inpasbaar is aan de spoorzijde, omdat het gebouw strak tegen de sporenbundel en de expeditieruimte van NS/ProRail ligt. Het is daardoor technisch niet mogelijk om een trillingsscherm te realiseren dat het gebouw voldoende afschermt, de hierna weergegeven effectiviteit van maatregelen is dus vooral facultatief (om aan te geven wat een trillingsscherm doet in dit soort bodems, bij de hier maatgevende lage trillingsfrequenties). Een

<sup>12</sup> In bijlage I is te zien dat in een klein deel van het plangebied sprake is van een zandlaag tussen 6 en 9 meter onder maaiveld, maar deze is in het grootste deel van het plangebied afwezig, zie ook de sonderingen die in Dinoloket zijn te vinden. Op de meeste locaties onder het gebouw start de zandlaag op ca. 18 tot 20 meter onder maaiveld, daarboven zitten slappe lagen. Uit de maatgevende golf lengtes van de schuifgolven en de opbouw van de bodem volgt deze benodigde minimale diepte van 20 meter.





andere optie voor het scherm is onder het perron, dus binnen de spoorzone van ProRail. Hier zitten echter groutankers en spoorinfrastructuur in de weg, en is een zeer lange buitendienststelling nodig waardoor de kosten voor bodemmaatregelen op die locatie vele malen hoger liggen dan enkel de bouwkosten. Dit is dus evenmin een realistische locatie, waardoor er feitelijk geen realistische plek is voor een trillingsscherm in de bodem.



*Figuur 11 Locatie van mogelijke trillingsschermen buiten bouwkuip*

In theorie mogelijke maatregelen in de bodem met een inschatting van het effect en de kosten zijn weergegeven in Tabel 9. Het effect van de maatregelen is bepaald op basis van literatuur, zoals frequentie-afhankelijke modelberekeningen (met eindige elementenmodellen) en metingen (bijvoorbeeld in Arnhem (meerdere types schermen), Utrecht (meerdere types schermen) en Tricht). Hoewel eindige elementenmodellen soms enig effect voorspellen bij lage trillingsfrequenties, zien we in de praktijk dat het effect van dit soort schermen pas echt gaat optreden vanaf 6 tot 10 Hz (en dan vooral bij schermen met meerdere impedantiesprongen, dus bijv. met dikke lagen rubber beklede betonnen schermen), en dat het effect van de maatregelen bij lagere frequenties zeer beperkt is. In Tabel 9 is het verwachte effect weergegeven op basis van literatuur, waarbij we dit op basis van de hier maatgevende trillingsfrequenties, die voor reizigerstreinen anders zijn dan voor goederentreinen.

Voor de kosten is hierbij nog relevant dat de aanleg van een scherm diverse uitvoerings- en inpassingsrisico's met zich meebrengt, en dus mogelijk aanvullende kosten zoals herstelkosten van de omgeving, afhankelijk van de locatie. Zeker binnen de spoorbundel kunnen deze kosten sterk oplopen. Deze kosteninschattingen zijn dan ook niet meegenomen in dit overzicht.



Tabel 9 Mogelijke maatregelen in de bodem, effect op trillingen van goederentreinen en laagfrequent geluid van reizigerstreinen en trams en kosten (gebaseerd op scherm aan spoor- en aan tramzijde, totale lengte ca. 190 meter)

Maatregel	Effect <sup>13</sup>			Kosten <sup>14</sup>	Effect o.b.v.
	Goederen	Reizigers	Trams		
Betonnen diepwand	5 – 15%	20 – 40%	30 – 45%	€ 3.9 – 6.1 mln.	Literatuur
Jet-grout wand	5 – 10%	10 – 30%	25 – 40%	€ 3.4 – 5.3 mln.	Literatuur
Damwand	0%	0 – 5%	5 – 10%	€ 2.6 – 3.9 mln.	Literatuur
Betonnen diepwand met rubber	15 – 30%	40 – 60%	60 – 80%	€ 5.1 – 7.9 mln.	Literatuur
Damwand met EPS (piepschuim)	5 – 10%	15 – 30%	50 – 70%	€ 3.5 – 5.5 mln.	Literatuur
Damwand met sleuf (luchtspouw)	0 – 10%	10 – 25%	40 – 55%	€ 5.2 – 7.9 mln.	Literatuur
L-wand 4.0 m diep	0%	0%	10 – 20%	€ 1.0 – 1.5 mln.	Expert judgment
CSM-wand	0%	0 – 5%	5 – 10%	€ 1.0 – 1.6 mln.	Literatuur
Trillingsscherm EPS (piepschuim)	0%	15 – 30%	50 – 70%	€ 1.1 – 1.7 mln.	Expert judgment

Om in alle gevallen te voldoen aan het beoordelingskader, is 36 procent reductie van de trillingen van de goederentreinen nodig, 13 dB (ca. 75%) van laagfrequent geluid van de trams, en bijna 3 dB (ca. 25%) van laagfrequent geluid van de reizigerstreinen. De goedkoopste voldoende effectieve maatregelen zijn dan:

- **Goederentreinen:** betonnen diepwand, 20 meter diep, 0.5 meter breed, aan een zijde tot 7 meter diep bekleed met minimaal 100 mm dik rubber. De kosten hiervan bedragen € 2.8 tot 4.5 mln. voor een lengte van 100 meter (alleen spoorzijde). Echter, ook met deze maatregel kunnen incidentele overschrijdingen niet volledig worden uitgesloten. Grootste probleem is dat deze maatregel niet inpasbaar is, er is geen ruimte tussen spoor en gebouw om de maatregel te realiseren, en binnen de spoorzone zijn er ook geen geschikte locaties. Ook is het niet mogelijk om het gebouw volledig af te schermen aan de zijkanten, waardoor de lange, laagfrequente trillingsgolven het gebouw nog steeds kunnen bereiken.
- **Reizigerstreinen:** het voor goederentreinen effectieve trillingsscherm, is ook voor reizigerstreinen effectief. Hier kan echter ook worden volstaan met een andere oplossing, bijv. een trillingsscherm van EPS (minimaal 6 meter diep, 0.5 meter breed), tussen het spoor en de bebouwing. In de praktijk is dit alleen maar realiseerbaar onder het perron, aan de spoorzijde van de damwand (maar daar interactie met groutankers, spoorse kabels en leidingen en een

<sup>13</sup> Effect op de trillingssterkte  $V_{max}$  (goederentreinen) of het laagfrequent geluidniveau (reizigerstreinen en trams) o.b.v. expert judgment op literatuur en eerdere projecten. Het weergegeven effect is op basis van het verwachte trillingsspectrum (zie Figuur 9) en het frequentie-afhankelijke effect van de maatregelen. Effect is t.o.v. huidige ontwerp. Effect is weergegeven als bandbreedte, want mede afhankelijk van (1) onzekerheden in het effect, (2) onzekerheden in de lokale bodemopbouw, (3) onzekerheden in materiaalgedrag en (4) onzekerheden in het vaststellen van het effect van de maatregel. Merk hierbij op dat het effect van een maatregel op de gemiddelde trillingssterkte  $V_{per}$  altijd minimaal gelijk aan of groter is dan het effect van de maatregel op de trillingssterkte  $V_{max}$ .

<sup>14</sup> Totale investeringskosten, incl. BTW, prijspeil 2022, 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.



lange buitendienststelling nodig). Ook deze maatregel is daarmee praktisch niet inpasbaar. De kosten van deze maatregel bedragen € 0.4 tot € 0.5 mln. voor een lengte van 100 meter (uitgaande van geen bouwkuip nodig voor realisatie, en exclusief alle kosten voor aanpassingen die nodig zijn binnen de spoorzone).

- » **Trams:** de meest kosteneffectieve maatregel is een trillingsscherm van EPS (minimaal 5 meter diep, 0.6 meter breed), tussen het gebouw en de tramlijn. De kosten van een los scherm bedragen tussen de € 0.7 en € 1.1 mln. voor een lengte van 90 meter (uitgaande van bouwkuip voor realisatie i.v.m. grondwaterstand).

Voor al deze maatregelen geldt, net als bij maatregelen aan het spoor, dat ze buiten het plangebied dienen te worden getroffen, niet of slecht aanpasbaar zijn aan toekomstige situaties en hoge kosten met zich meebrengen. Voor de maatregelen tegen het treinverkeer geldt dat deze qua ruimte niet inpasbaar zijn op deze locatie. Tenslotte zijn de genoemde kosten nog exclusief kosten voor het verleggen van kabels en leidingen, vergunningverlening en herinrichten van de openbare ruimte op naastgelegen percelen.

## 5.5. MAATREGELEN AAN DE GEBOUWEN

Tenslotte zijn ook maatregelen aan de bebouwing mogelijk, naast de optimalisaties die tussen VO en DO al zijn doorgevoerd (denk aan verzwaren van de vloeren, kolommen en fundering). Met behulp van modellen (zie bijlage II) is onderzocht wat het effect is van verdere optimalisaties en maatregelen aan het gebouw. Die maatregelen variëren van het toepassen van een zwaardere fundering (zwaardere paalfundering met langere en dikkere palen), zwaarder construeren (dikkere wanden, zwaardere balken en kolommen) tot het ontkoppelen van de fundering door middel van stalen veren. Het effect en de kosten van de mogelijke maatregelen aan het gebouw zijn weergegeven in Tabel 10. Maatregelen die niet passen binnen de grenzen van het Bestemmingsplan, zoals het vergroten van de bouwvolumes, zijn hierbij niet beschouwd.

*Tabel 10 Mogelijke maatregelen aan de gebouwen, effect op trillingen van goederentreinen en laagfrequent geluid van reizigerstreinen en tram en kosten*

	Effect <sup>15</sup>				
Maatregel	Goederen	Reizigers	Trams	Kosten <sup>16</sup>	Effect o.b.v.
Wanden en kolommen verzwaren	0 – 5%	0%	0%	< 5% SK	Modelberekening
Dikkere vloeren	0%	0%	0%	< 3% SK	Modelberekening
Ontkoppelen vloeren	0%	5 – 10%	20 – 40%	2 – 4% SK	Literatuur
Ontkoppelen fundering (afveren)	40 – 60%	60 – 80%	70 – 90%	6 – 10% SK	Modelberekening
Afschermen zijkant fundering met rubber	0%	25 – 35%	40 – 60%	1 – 2% SK	Literatuur

<sup>15</sup> Effect op de trillingssterkte  $V_{max}$  (goederentreinen) of het laagfrequent geluidniveau (reizigerstreinen en trams) o.b.v. doorrekeningen (zie bijlage II voor gebruikt model) en expert judgment op literatuur en eerdere projecten. Het weergegeven effect is op basis van het verwachte trillingsspectrum (zie Figuur 9) en het frequentie-afhankelijke effect van de maatregelen. Effect is weergegeven als bandbreedte, want mede afhankelijk van (1) onzekerheden in het effect, (2) onzekerheden in de lokale bodemopbouw, (3) onzekerheden in materiaalgedrag en (4) onzekerheden in het vaststellen van het effect van de maatregel.

<sup>16</sup> SK = Stichtingskosten



	Effect <sup>15</sup>				
Maatregel	Goederen	Reizigers	Trams	Kosten <sup>16</sup>	Effect o.b.v.
Afschermen fundering met rubber	5 – 30%	35 – 50%	60 – 80%	5 – 10% SK	Literatuur
Afschermen fundering met EPS	0%	30 – 40%	50 – 70%	< 1% SK	Modelberekening
Zwaardere fundering	0 – 30%	20 – 30%	20 – 35%	2 – 4% SK	Modelberekening

Een korte toelichting op het effect van de maatregelen:

1. Vanwege de optimalisaties aan de constructie tussen VO en DO (denk aan stijvere wanden en vloeren, meer natte knopen voor stijvere verbindingen, dikkere penanten en kolommen), hebben verdere verstijvingen van wanden en kolommen in de woontoren, waar sprake is van de overschrijdingen, geen significant aanvullend effect meer. Alleen in de laagbouw zou, door veel extra dwarswanden toe te voegen, nog wat reductie van de trillingen kunnen worden behaald, maar dat past niet binnen het exploitatiemodel van het gebouw en heeft weinig effect op de trillingen in de woningen in de hoogbouw. Daarom is het effect van deze maatregel beperkt. Het effect van deze maatregel is doorgerekend met het rekenmodel uit Bijlage II, door deze als variant te modelleren.
2. De eigenfrequentie van de vloer ligt veel hoger dan de trillingen van de treinen, dus een dikkere vloer heeft geen effect.
3. Het ontkoppelen van de vloeren (ook technisch niet goed mogelijk in deze constructie) heeft ook pas vanaf hogere trillingsfrequenties effect, en is daarom hier niet effectief.
4. Het ontkoppelen van de fundering is met het rekenmodel uit Bijlage II doorgerekend, maar is in de praktijk technisch niet mogelijk door het hoge gewicht van het gebouw.
5. Het afschermen van de fundering met rubber of EPS (piepschuim) heeft tegen laagfrequente trillingen vrijwel geen effect, tenzij zeer grote diktes worden gehanteerd. Uit metingen en modelberekeningen blijkt dat het effect onder de 6 à 8 Hz vrijwel nihil is. Bijkomend probleem is dat de goederentreinen op grote afstand rijden, waardoor de trillingsgolven vanuit verschillende dieptes de fundering van het gebouw ingaan. Voor voldoende effect tegen deze laagfrequente golven moet ook de onderzijde van de fundering en de bovenzijde van de palen worden ingepakt, wat technisch ingewikkeld is gezien de bouwmethode. Het effect van afscherming met EPS aan de tramzijde is in Bijlage IV verder uitgewerkt. Ook de maatregel 'inpakken van de fundering met rubber' is op verzoek van TNO in Bijlage IV verder uitgewerkt. Probleem bij het toepassen van een dik materiaal tussen spoor en bebouwing is dat het gebouw evenredig moet opschuiven bij het spoor vandaan, omdat er geen ruimte is om deze extra voorziening op te vangen. Dit heeft dus impact op het ruimtebeslag.
6. Een zwaardere fundering is doorgerekend met het rekenmodel uit Bijlage II, maar in de praktijk zijn dikkere palen dan de nu beoogde 950 mm en paallengte van ca. 60 meter praktisch niet uitvoerbaar en is een grotere paaldikte ook maar zeer beperkt effectief. Het hier weergegeven effect is de maximale reductie die nog kan worden behaald uit een (theoretische) optimalisatie van de fundering onder de laagbouw, onder de hoogbouw zijn geen verdere optimalisaties mogelijk (en juist daar zijn de overschrijdingen).

De goedkoopste voldoende effectieve maatregelen aan het gebouw zijn daarom:

- » **Goederentreinen:** verzwaren van de fundering, door bijvoorbeeld de paaldiameter te vergroten naar minimaal 1000 mm, mogelijk zelfs meer, ook onder de laagbouw. Voor de trillingen in de hoogbouw heeft deze maatregel vrijwel geen effect. Ook met deze maatregel kunnen incidentele overschrijdingen dus niet worden uitgesloten, want onder de hoogbouw



kan de fundering niet verder worden verzwakt. Afveren van de gebouwen is technisch niet mogelijk door het hoge gewicht. Wel effectief is het inpakken van de fundering (funderingspaal, -poer en palen tot minimaal 9 meter onder maaiveld) met minimaal 400 mm rubber, hiermee is te voldoen aan de streefwaarden voor trillingshinder. Deze maatregel kost € 18.4 mln., wat neerkomt op een bedrag van € 61.500 per appartement, ruim meer dan het richtbedrag voor maatregelen wat ProRail hanteert (€ 47.000 per woning), zie Bijlage IV.2. Nadeel van deze maatregel is dat het gebouw dan minimaal 400 mm moet opschuiven bij het spoor vandaan, hiermee valt het gebouw buiten de contouren van het Bestemmingsplan. De maatregel is dus niet inpasbaar. Bovendien, gelet op de zeer hoge kosten in relatie tot het beperkte aantal overschrijdingen is dit geen acceptabele maatregel (ALARA-principe). Concreet betekent dit dat er geen haalbare, effectieve maatregelen in het gebouw zijn te treffen waarmee de trillingen van de goederentreinen in de hoogbouw significant verder kunnen worden verlaagd.

- » **Reizigerstreinen:** de voor goederentreinen genoemde verzwaring van de fundering is ook effectief tegen de trillingen van reizigerstreinen. Een andere, meer effectieve oplossing is het met bijv. rubber isoleren van de kelder van de functiescheidende damwand in het perron. Deze maatregel is niet goed inpasbaar vanwege ruimtegebrek, is uitvoeringstechnisch complex (en daarmee kostbaar), en zorgt voor ruimteverlies in het gebouw.
- » **Trams:** de meest kosteneffectieve maatregel is het plaatsen van EPS (kwaliteit 250 of 300 i.v.m. benodigde druksterkte, n.t.b.) met een dikte van 600 mm tussen de tijdelijke damwand en de kelderwand. De kosten van het EPS bedragen ca. € 70.000, de uitvoeringskosten zijn nog niet bepaald. Aandachtspunten bij deze maatregel zijn voorkomen van opdrijving (verankeren aan kelderwand) en afwerking aan bovenzijde (niet teveel materiaal erop om doorgeven van trillingen te voorkomen). Een schetsuitwerking hiervan is weergegeven in Bijlage IV.

## 5.6. AFWEGING VAN MAATREGELEN

In delen van het gebouw worden overschrijdingen verwacht van de streefwaarden voor trillingshinder en de grenswaarden voor laagfrequent geluidhinder. Voor trillingen gaat het om incidentele overschrijdingen in de hoger gelegen woonlagen, als gevolg van goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte (ca. 1 per week). Voor laagfrequent geluid gaat het vooral om overschrijdingen ten gevolge van de trams (t/m verdieping 11), en reizigerstreinen op nabijgelegen sporen (verdieping 2).

De meest kosteneffectieve maatregelen zoals benoemd in de voorgaande paragrafen zijn samengevat weergegeven in Tabel 11.

*Tabel 11 Meest kosteneffectieve maatregelen per type. B = Bronmaatregel (aan spoor), O = Overdrachtmaatregel (in bodem), G = Gebouwmaatregel (aan of in gebouw)*

Type maatregel	Goederentreinen	Reizigerstreinen	Trams
B: zettingsvrije plaat	voldoet mogelijk	voldoet niet	n.v.t.
B: onder sleeper pads	voldoet niet	voldoet	n.v.t.
B: betonplaat op rubber mat	n.v.t.	n.v.t.	voldoet
O: Beton, 20m diep, met rubber	voldoet mogelijk	voldoet	voldoet niet
O: EPS, 6 m diep, in perron	voldoet niet	voldoet	n.v.t.

Type maatregel	Goederentreinen	Reizigerstreinen	Trams
O: EPS, 4 m diep, tramzijde gebouw	n.v.t.	n.v.t.	voldoet
G: Verzwaren fundering	voldoet niet	voldoet	voldoet niet
G: isoleren damwand van kelderwand	voldoet niet	voldoet	n.v.t.
G: rubber tegen kelderwand	niet inpasbaar	niet inpasbaar	voldoet
G: EPS tegen kelderwand	niet inpasbaar	niet inpasbaar	voldoet

Op basis van Tabel 11 zijn de volgende conclusies te trekken:

- Maatregelen tegen **trillingshinder** zijn niet doelmatig: er is niet met zekerheid te voldoen aan het beoordelingskader, en de kosten van effectieve maatregelen zijn zeer hoog, hoger dan het richtbedrag wat ProRail hanteert bij doelmatigheidsafwegingen rond het spoor. Relevant hierbij is dat er sprake is van incidentele overschrijdingen (ca. 1 per week), door treinen met een afwijkende trillingssterkte, en dat overdag ruimschoots wordt voldaan aan de streefwaarden. Maatregelen aan het spoor zijn zeer kostbaar (meer dan € 16 mln.), maatregelen in de bodem zijn hier niet inpasbaar omdat het gebouw strak tegen de sporenbundel en de expeditieruimte van ProRail/NS aanligt, en met verdere optimalisaties aan de gebouwen is evenmin te voldoen aan het beoordelingskader. De enige maatregel bij het gebouw die voldoende effectief is, is het volledig inpakken van de fundering (kelder, poer en palen tot minimaal 9 meter onder maaiveld) met minimaal 400 mm dik rubber. Deze maatregel kost € 18.4 mln. Bovendien dient het gebouw dan minimaal 400 mm op te schuiven bij het spoor vandaan, hiermee valt het gebouw buiten de contouren van het Bestemmingsplan (niet inpasbaar).

De forse meerkosten van maatregelen in het spoor wegen niet op tegen de *mogelijke* afname van de trillingen (kosten meer dan € 50.000 per appartement met een overschrijding).

Bovendien, de trillingen voldoen weliswaar niet aan de strenge streefwaarden voor nieuwbouw uit de SBR B-richtlijn, maar wel ruimschoots aan de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties uit de SBR B-richtlijn (die formeel overigens niet van toepassing zijn voor nieuwe gebouwen, maar wel een indicatie geven over de aanvaardbaarheid van de trillingen). In die soepeler streefwaarden voor bestaande situaties is een zekere mate van gewinning meegenomen, die na verloop van tijd optreedt.

- Maatregelen tegen **laagfrequent geluidhinder** van de **treinen** zijn niet doelmatig, gelet op de hoge kosten en de beperkte overschrijdingen. Alleen op de 2<sup>e</sup> verdieping is sprake van overschrijdingen, het gaat om beperkte overschrijdingen (max. 3 dB), die maximaal 1 keer per uur optreden. Om deze overschrijdingen te voorkomen is isolatie van de kelderwand ten opzichte van de damwand tussen de expeditieruimte van ProRail/NS en het gebouw een mogelijke oplossing. Isolatie dient plaats te vinden met behulp van rubberen matten tussen kelderwand en damwand, maar leidt tot verlies van ruimte en forse uitvoeringskosten. Gelet op het beperkte aantal overschrijdingen (alleen de langzaam rijdende treinen op de meest nabij gelegen sporen), de beperkte mate van overschrijding, het feit dat het gebouw in een drukke, stedelijke spoorzone wordt gerealiseerd (waar mensen trillingen en geluid doorgaans eerder accepteren) en het feit dat laagfrequent geluid ongereguleerd is, kan worden gemotiveerd dat de uitvoeringskosten van een maatregel niet opwegen tegen de afname van de hinder.

- Maatregelen tegen **laagfrequent geluidhinder** van de **trams** zijn mogelijk doelmatig. Er is sprake van een groot aantal trampassages (ca. 1 per minuut), die tot op de 1<sup>e</sup> woonverdieping als hinderlijk kunnen worden ervaren. De meest kosteneffectieve maatregel om deze overschrijdingen te voorkomen, is door de fundering aan de tramzijde (en ca. 4 meter de hoek om) in te pakken met 600 mm dikke blokken EPS, vóór het verwijderen van de tijdelijke damwand. Hiermee is het comfortniveau in de bebouwing aanzienlijk te verhogen, en zorgen de trampassages niet meer voor hinderlijk laagfrequent geluid. De materiaalkosten van deze maatregel bedragen ca. € 70.000, de uitvoeringskosten zijn nog niet in beeld gebracht. Deze maatregel heeft veel effect op het comfortniveau. Ook bij de trams kan eventueel worden gemotiveerd dat maatregelen niet doelmatig zijn: het gebouw wordt in een drukke, stedelijke spoorzone gerealiseerd (waar mensen trillingen en geluid doorgaans eerder accepteren), in heel Rotterdam staan gebouwen zonder maatregelen nog veel dichters op tramlijnen, en laagfrequent geluid is ongereguleerd.





# BIJLAGEN

Dit document bevat de volgende bijlagen:

- I. **Bijlage I – Grondonderzoek**, waarin voorbeelden van de gebruikte input zijn weergegeven
- II. **Bijlage II – Rekenmodel**, met een toelichting op het gebruikte rekenmodel en voorbeelden van output en tussenresultaten
- III. **Bijlage III – Metingen**, met de resultaten van de trillingsmetingen die ten grondslag liggen aan het onderzoek
- IV. **Bijlage IV – Details maatregelen**, met een detailbeschouwing van de nader onderzochte maatregelen om de trillingen in het gebouw te verminderen
- V. **Bijlage V – Validatiegegevens rekenmodel**, met gegevens over de betrouwbaarheid van het model op basis van validaties van het rekenmodel met trillingsmetingen.

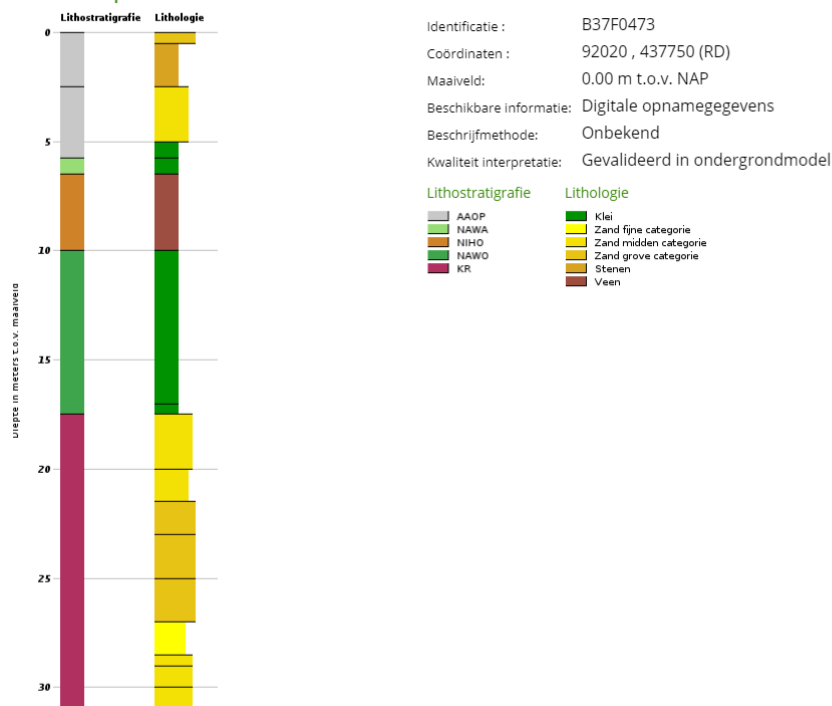


# GRONDONDERZOEK

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.

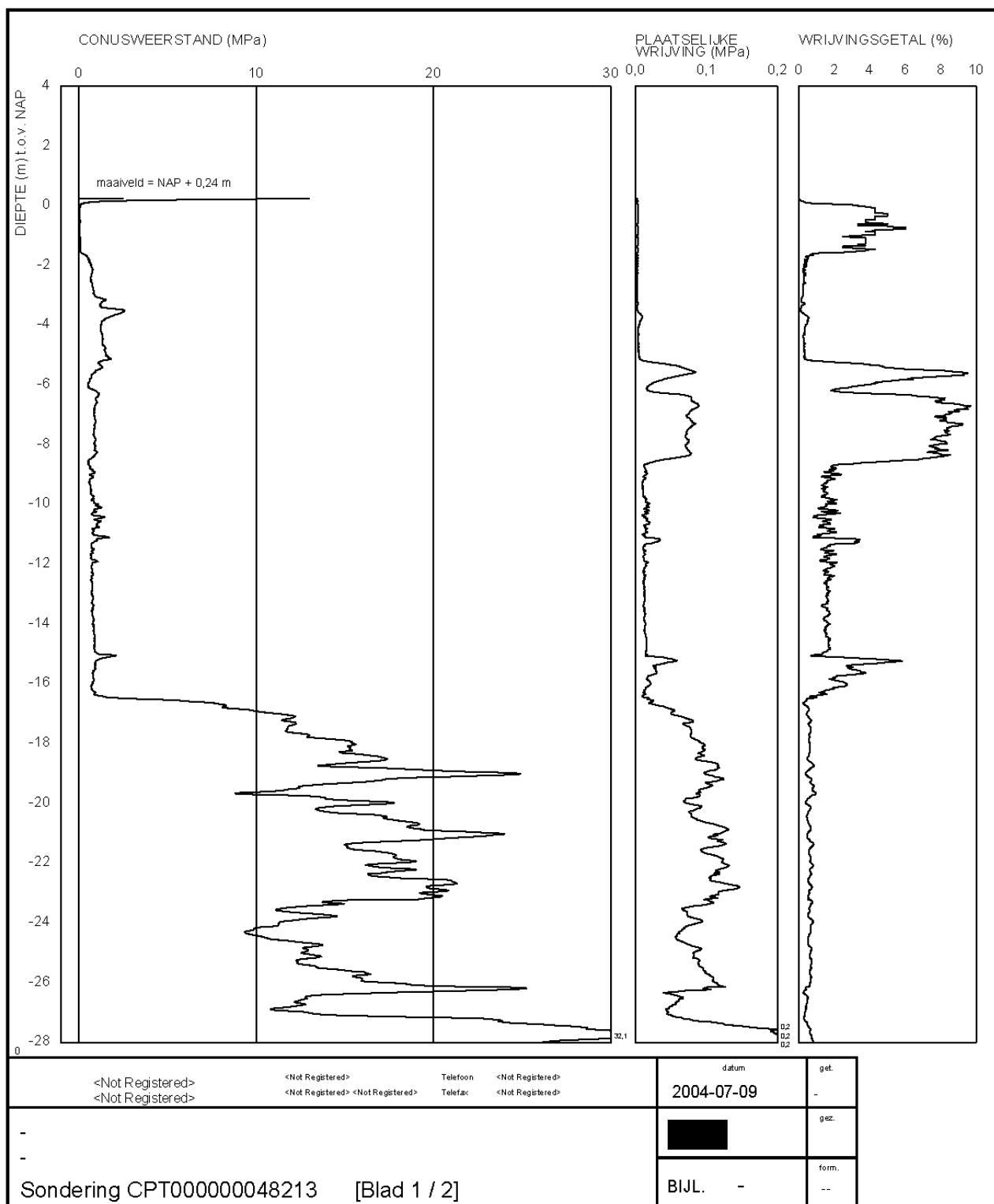
Een grondboring in de nabijheid van het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur 13. In deze boring is de bodem in de eerste meters opgebouwd uit zand, maar dit is een aangebracht pakket. De daaronder gelegen klei- en veenlagen zijn karakteristiek voor de eerste 15 tot 20 meter van de bodemopbouw, daaronder begint een vaster zandpakket.

## Boormonsterprofiel



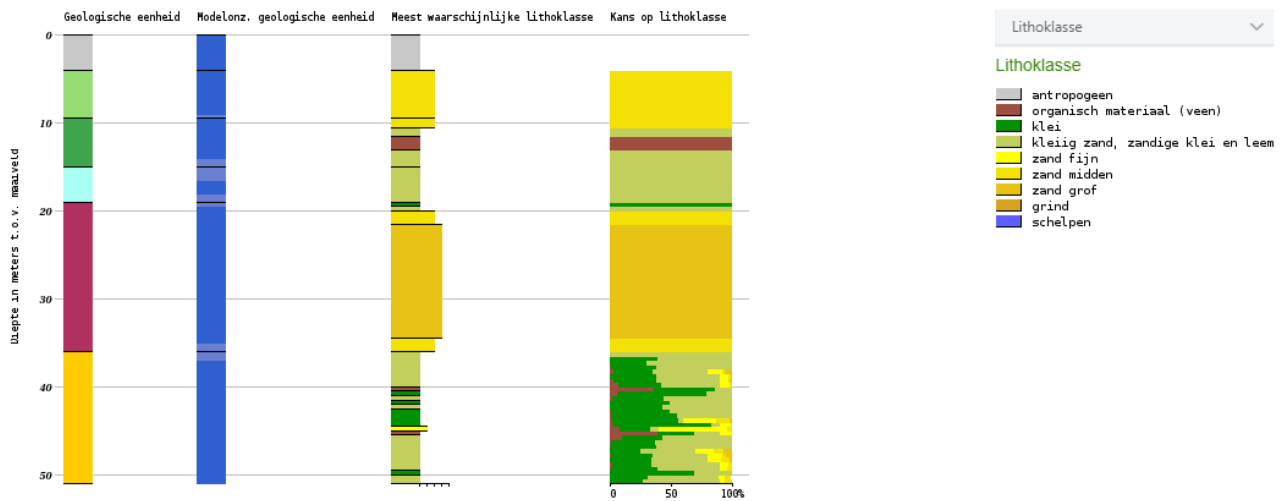
Figuur 12 Boring in het onderzoeksgebied

Een representatieve sondering uit het onderzoeksgebied, waarin onder meer de conusweerstand te zien is, is weergegeven in Figuur 13. Ook hier is te zien dat de bovenste ca. 17 meter van de bodem vooral uit slappere lagen bestaat, met daaronder stijvere zandlagen. De dikte van het bovenste slappe pakket wisselt, als verschillende sonderingen worden beschouwd. In de modellen zoals benoemd in bijlage II zijn meerdere sonderingen doorgerekend, om de invloed van deze variatie in bodemopbouw mee te nemen.

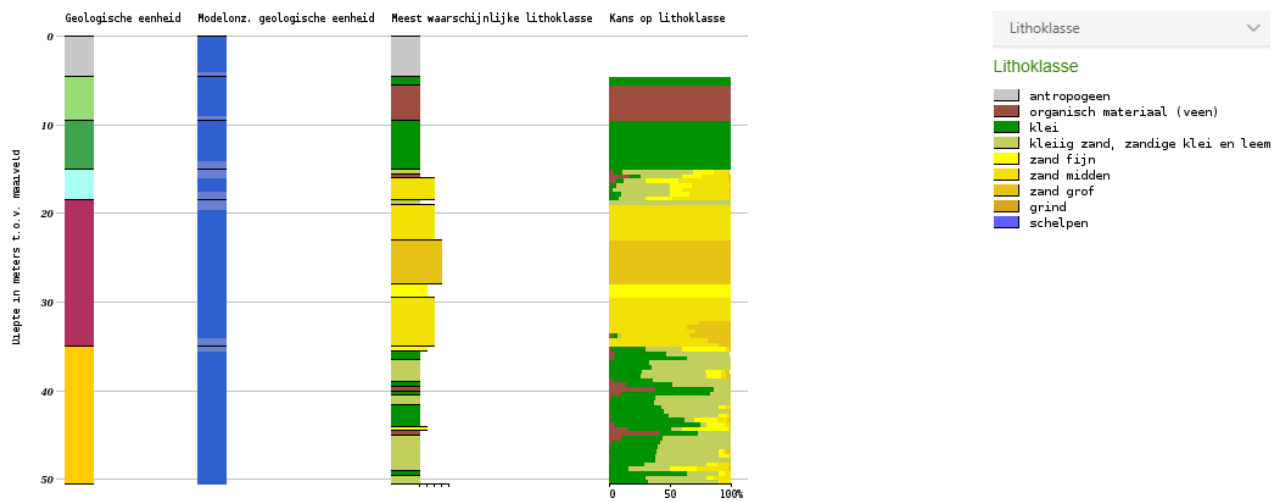


Figuur 13 Sondering nabij het onderzoeksgebied (alleen eerste 28 meter onder NAP)

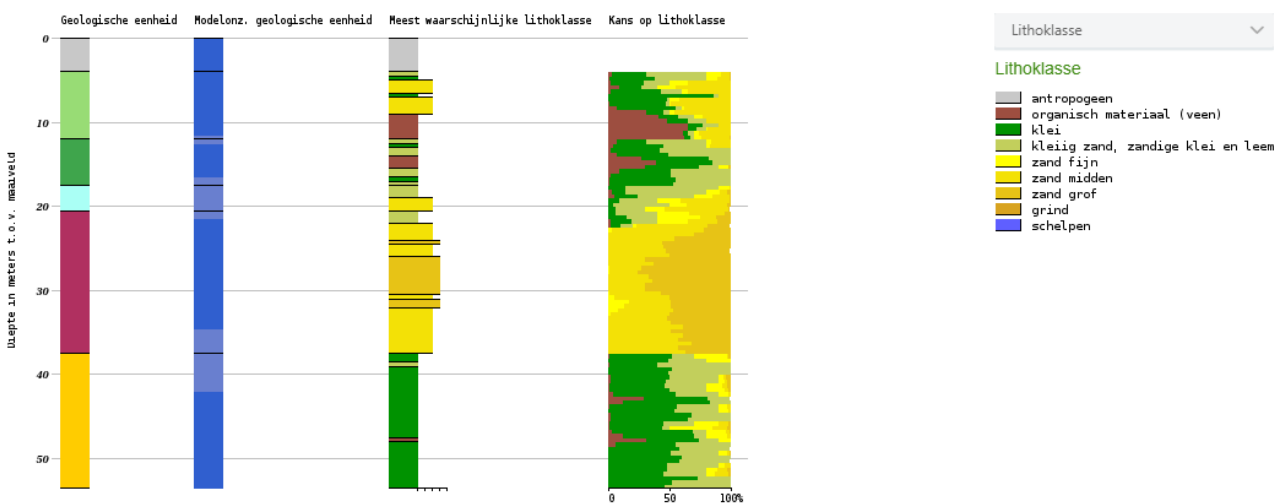
Relevant, met name bij het beschouwen van maatregelen in de bodem, is de opbouw van de lagen van de bodem. Op ca. 6 meter diepte is hierbij op sommige locaties een zandlaag aanwezig, die op andere locaties ontbreekt in de sonderingen. Zie ook hieronder enkele locaties van boringen in het plangebied.



Figuur 14 Bodemopbouw in westen van plangebied, met zandlaag vanaf ca. 6 meter diepte



Figuur 15 Bodemopbouw in oosten van plangebied, zonder zandlaag



Figuur 16 Bodemopbouw onder goederensporen, met 50-50 kans op zandlaag vanaf ca. 6 meter diepte





## REKENMODEL

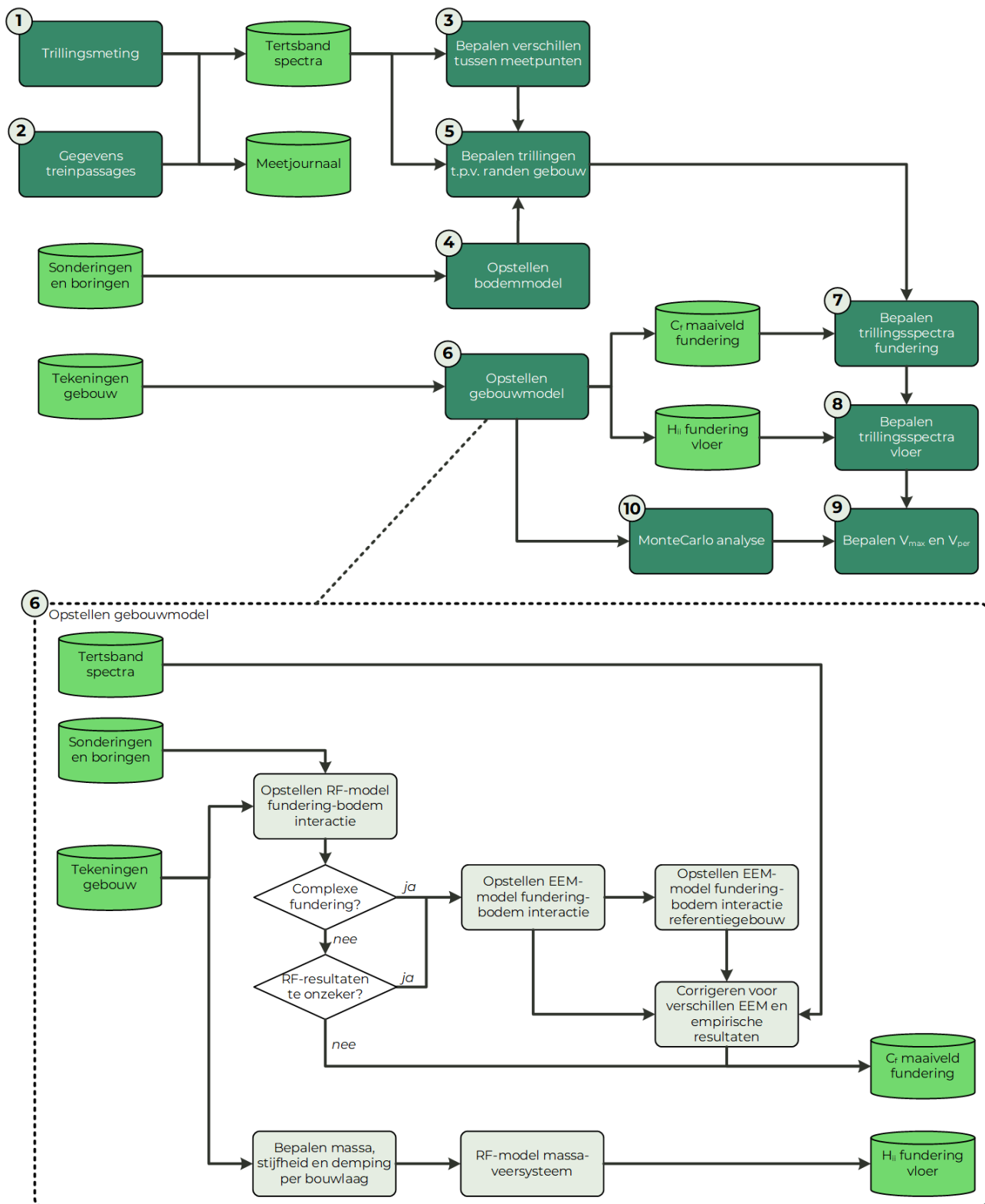
Er bestaat geen voorgeschreven rekenmethodiek om de trillingen in een gebouw te bepalen. Afhankelijk van de trillingsbelasting op maaiveld schrijft de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* een hoger of lager detailniveau van het rekenmodel voor, maar het specifiek te gebruiken rekenmodel wordt niet 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 trillingsmoden. 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 bouwparameters (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 17, hieronder beschrijven we per stap de methode en geven we zoveel mogelijk tussenresultaten. De nummers in de figuur corresponderen met de subparagrafen hieronder.





Figuur 17 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).

Voor het laagfrequent geluid van de treinen en trams is boven de 100 Hz gebruik gemaakt van een database met metingen die aan trein- en trampassages in vergelijkbare situaties zijn uitgevoerd (waaronder enkele dichtbijgelegen locaties in Rotterdam).

## 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-octaaftbandspectra 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.

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

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.

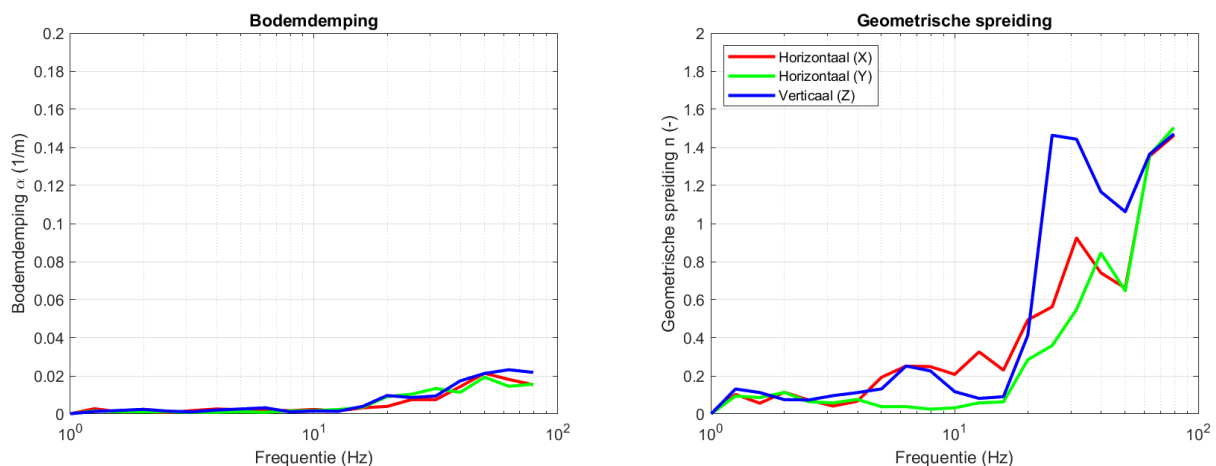


De prognoses van de trillingen zijn gebaseerd op de sensor met de meetduur van een week die het dichtst bij het gebouw staat waarvoor de resultaten nodig zijn. Op veel punten meten we korter, dat is voldoende om de invloed van variaties in beeld te brengen, zie ook paragraaf 2.2.3 voor een nadere motivatie.

## 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 18.



Figuur 18 Bodemdemping  $\alpha$  (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.

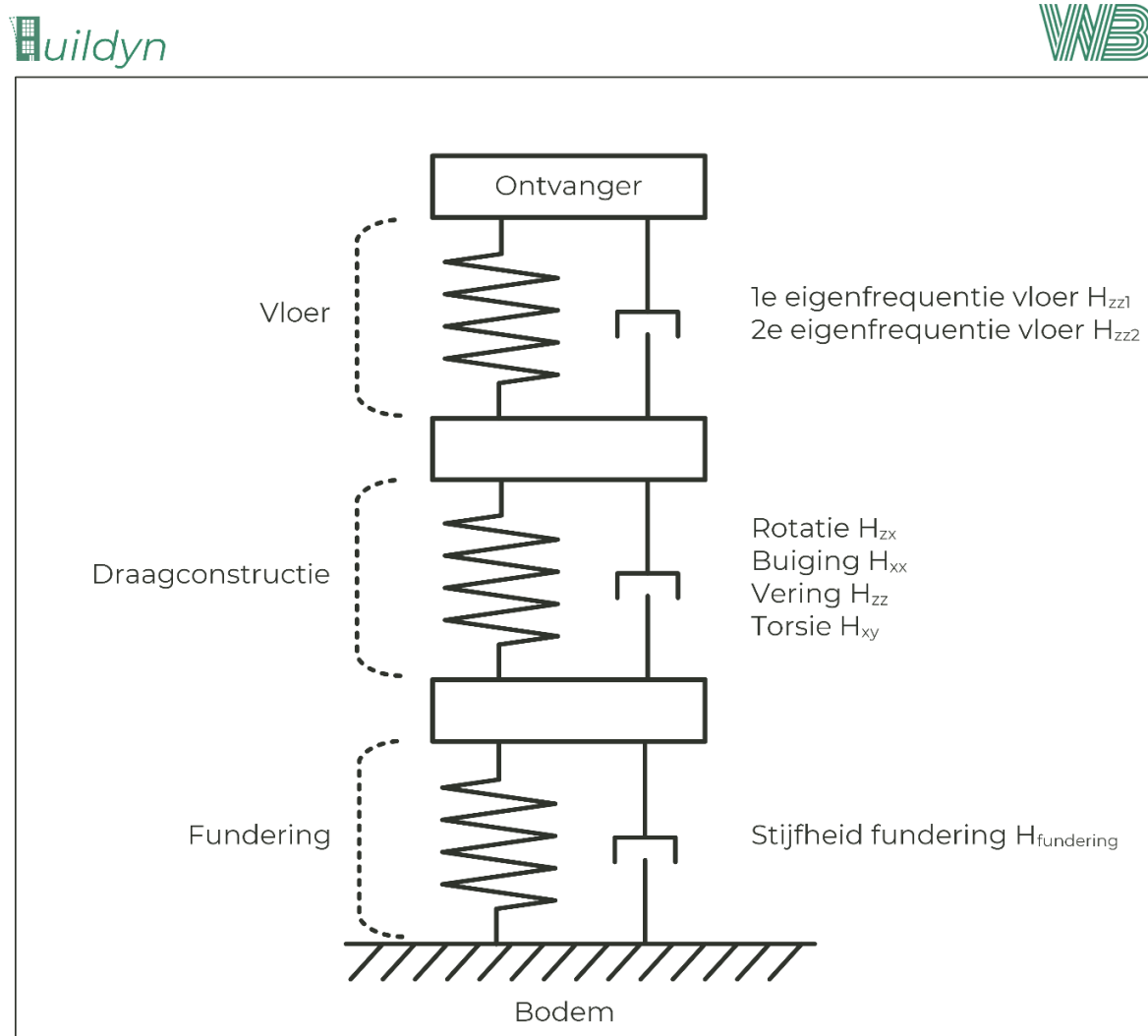
Na deze stap zijn de trillingen ter plaatse van de randen van het gebouw op maaiveld bekend.



## 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 gevormd 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 19, 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 19 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 12. Voor materialen met een niet-lineaire elasticiteit zoals

rubber en EPS maken we gebruik van spanning-rekkrommes om de materiaaleigenschappen te beschrijven.

Tabel 12 Initiële modelparameters

Materiaal	E-modulus E	Damping $\zeta$	Dichtheid $\rho$	Poissons ratio $\nu$
Beton C30/37	33 GPa	3 %	2500 kg/m <sup>3</sup>	0,20
Beton C55/67	38 GPa	3 %	2500 kg/m <sup>3</sup>	0,20
Beton C80/95	42 GPa	3 %	2500 kg/m <sup>3</sup>	0,20
Metselwerk	8 GPa	4 %	1800 kg/m <sup>3</sup>	0,25
Staal	210 GPa	1 %	700 kg/m <sup>3</sup>	0,30
Hout	13 GPa	5 %	7850 kg/m <sup>3</sup>	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

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

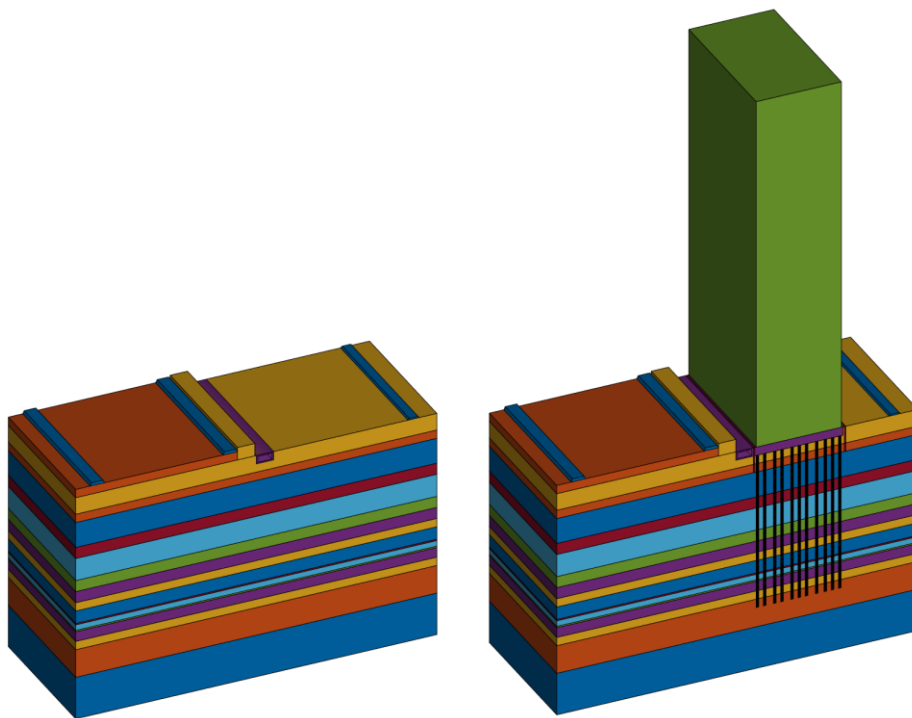
1. Eerst bepalen we met behulp van een random forest algoritme de frequentie-afhankelijke overdracht van maaiveld naar fundering op de randen van het gebouw. Als input gebruiken we hierbij de opbouw van de bodem (vanuit sonderingen), de massa van het gebouw en de eigenschappen van de fundering (aantal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

2. We maken een eindige elementenmodel van de bodem-funderingsinteractie. Dat doen we in drie stappen:
  - a. We maken een 3D eindige elementenmodel van de bodem (op basis van sonderingen) en de fundering van het gebouw. We modelleren de bodem op basis van sonderingen, en het gebouw op basis van de tekeningen van het gebouw. De eindige elementenvergelijkingen lossen we op in het tijdsdomein met het Newmark integratieschema. We maken daarbij gebruik van Rayleigh damping voor de bodemlagen, en boundary damping voor de interactie tussen bodem en gebouw. De trillingsbelasting brengen we aan ter plaatse van de maatgevende sporen (hier de sporen waar de goederentreinen rijden), en we lezen de output (trillingssignalen) uit ter plekke van de paalkoppen van het gebouw, in een model met en zonder gebouw, zie Figuur 20. Het model kent niet-reflecterende randvoorwaarden op de uiteinden van het model, en een minimale meshgrootte van 0.3 meter, opgebouwd uit volume elementen (meestal HEX8). Voor beam elementen wordt gerekend met Timoshenko beams. Op basis van de meshgrootte is het model te gebruiken voor trillingen tussen de 1 en 30 Hz (minimaal 10 elementen per golflengte, bij hogere frequenties neemt de nauwkeurigheid van het model af, maar deze zijn op slappere bodems doorgaans niet maatgevend).

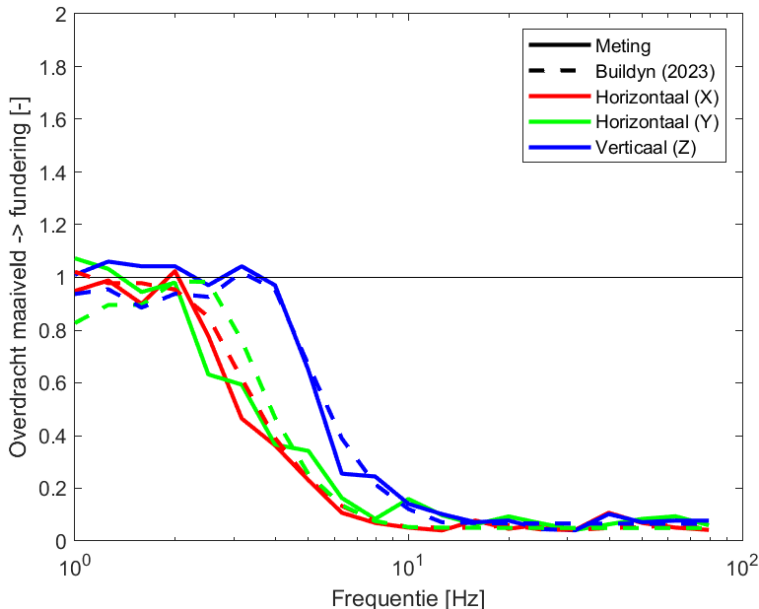


*Figuur 20 Bodemmodel zonder gebouw (links) en met gebouw (rechts). Gebouw is hier gemodelleerd als rigid body. De maatgevende sporen (links goederen, midden reizigers en rechts trams) zijn weergegeven.*

- b. Omdat een eindige elementenmodel zeer gevoelig is voor de gebruikte input, hebben we de overdracht van maaiveld naar fundering nauwkeuriger vastgesteld:
    - i. We meten de trillingen op een nabijgelegen, zo goed mogelijk vergelijkbaar pand, en bepalen ook voor dat pand de gemeten overdracht tussen maaiveld en fundering.

- ii. We maken van dit nabijgelegen pand eveneens een eindige elementenmodel (volgens de hierboven beschreven methode) en bepalen in dit eindige elementenmodel de overdracht van maaiveld naar fundering.

Bij Tree House is dit gedaan voor het naastgelegen gebouw Delftseplein, zie Figuur 21. We zien hier bij lage frequenties dat Buildyn de overdracht iets overschat, maar dat kan komen door lokale variaties in bodemopbouw bijvoorbeeld. Algemeen is de afwijking beperkt, en dit laat zien dat de gebruikte methode betrouwbare resultaten geeft voor nabijgelegen panden.



Figuur 21 Werkelijke en door Buildyn berekende funderingsoverdracht voor naastgelegen pand Delftseplein

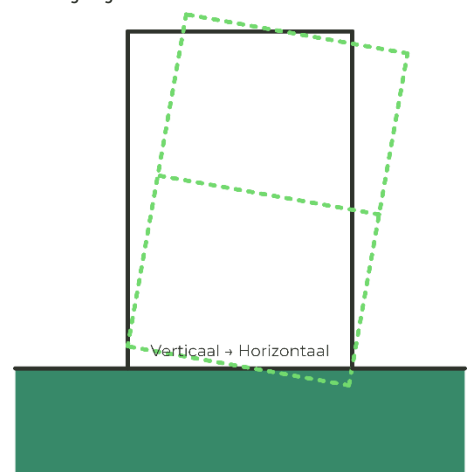
- c. Vervolgens 'kalibreren' we de in stap a. berekende overdracht met een correctiefactor die bepaald is uit de verhouding tussen de gemeten en gemodelleerde overdracht van het referentiegebouw, zoals bepaald onder stap b. Met deze methode krijgen we een betrouwbare omschrijving van de matrix  $H_{fundering}$ . We maken een eindige elementenmodel per bouwlaag. Hierin modelleren we de vloer, het plafond en de wanden, en geven deze de ontwerpparameters en de basiseigenschappen mee zoals weergegeven in Tabel 12. Vervolgens bepalen we de dynamische eigenschappen van die bouwlaag, zoals de stijfheids-, dempings- en massamatrix.

## 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:

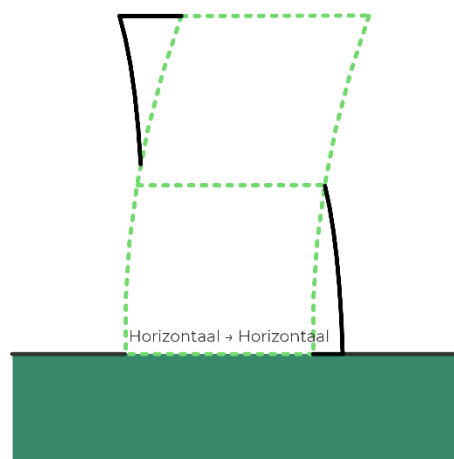
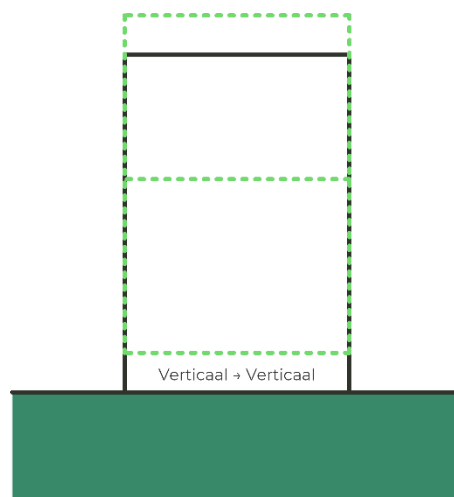
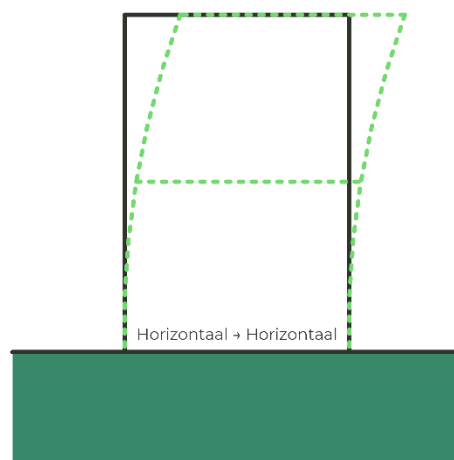
- Afmetingen van het gebouw
- Constructietype (stijfheid, starheid van verbindingen, open ruimtes)
- Gebruikte materialen

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 damping 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

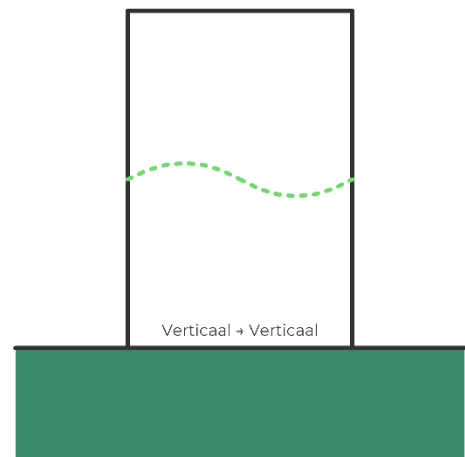
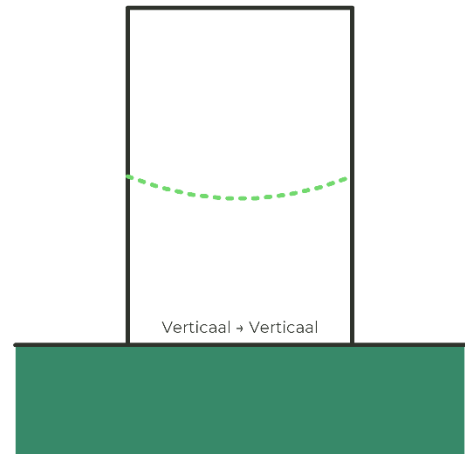
Bij de tweede buigmodus van de vloer (bij de tweede eigenfrequentie) zijn de trillingen maximaal op ongeveer  $\frac{1}{4}$  van het vloerveld, zie de principeschets rechts.

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 damping (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 19). 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 damping 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 (damping, 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:

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

Hierin zijn  $C_{f,ij}$  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 22.

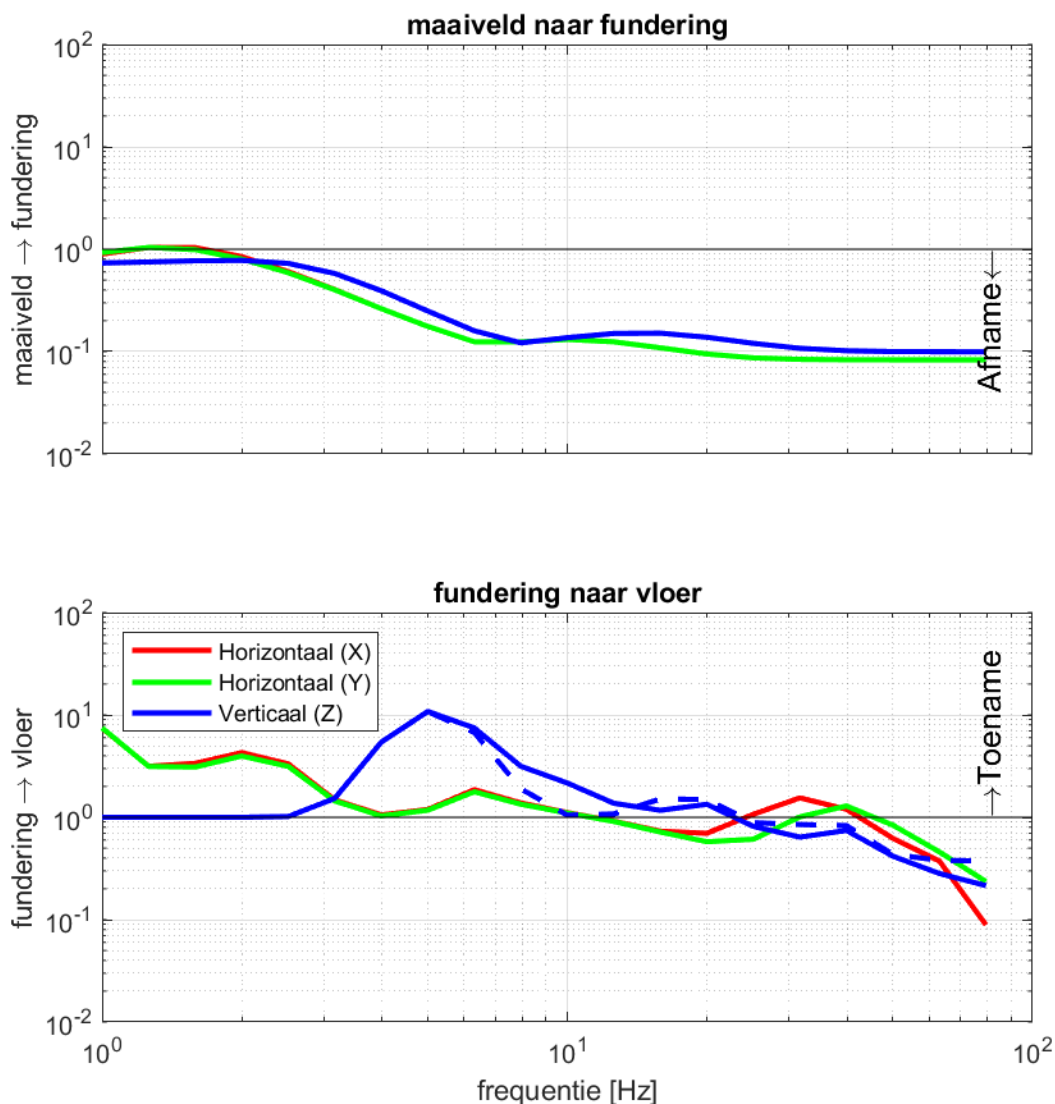
## II.8 BEPALEN TRILLINGSSPECTRA T.P.V. VLOEREN GEBOUW

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 op de hoogste verdieping weergegeven in Figuur 22. Let op: dit betreft resultaten met de 2022-versie van Buildyn, zoals hierboven in paragraaf II.5.4 aangegeven zorgt de 2023-versie voor een wat hogere overdracht, met name bij frequenties boven 10 Hz.





Figuur 22 Gemiddelde overdracht van fundering naar het maatgevende punt op verdieping 37. Doorgaande lijn verticaal is midden vloer, onderbroken lijn is op  $\frac{3}{4}$  en  $\frac{3}{4}$  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 trein- en trampassage 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  $V_{rms}$ <sup>17</sup>
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.

<sup>17</sup> Zie Koopman, A., LA.131001a.M04 van 13 april 2018



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 3.4.5 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 3.4.5 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.

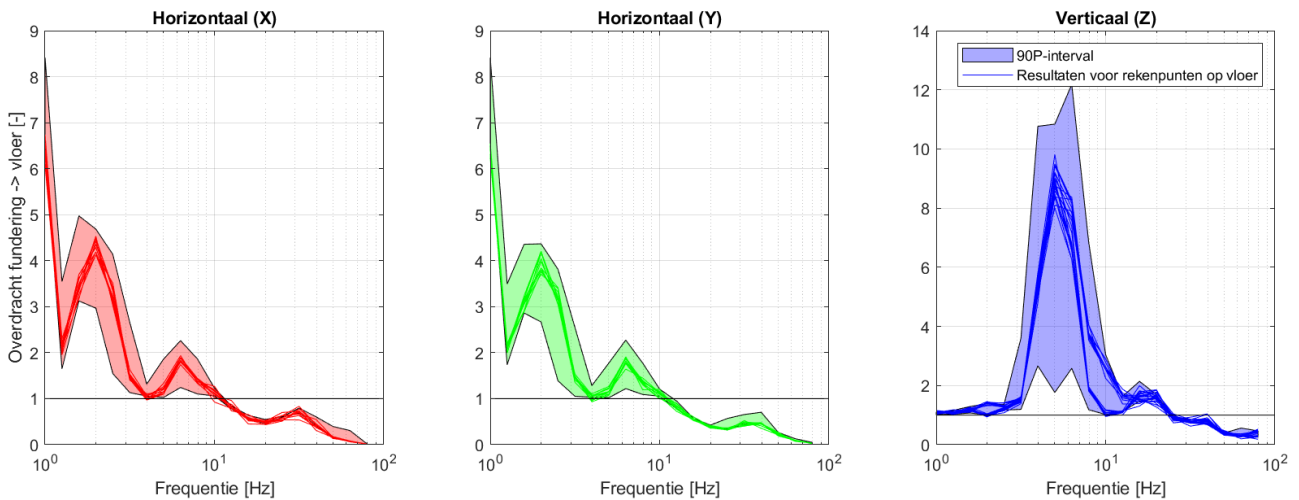
Voor alle andere parameters is, op basis van metingen, de random forest analyse op de database met gebouwen en de afwijking van de geplande bebouwing en de bebouwing in de database, een inschatting gemaakt van de onzekerheden in de parameters (zoals demping en stijfheid van de onderdelen) en modellen (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.

Om een indruk te geven van de invloed van onzekerheden op de resultaten, hebben we in Figuur 23 het volgende weergegeven:

1. Voor één run van het model hebben we voor de hoogste verdieping de overdracht van fundering naar de vloer weergegeven voor een aantal output punten (midden vloer, kwart overspanning) in X-, Y- en Z-richting.
2. Daarnaast hebben we de onder- en bovengrens vanuit de gehele gevoeligheidsanalyse weergegeven als een 90P-betrouwbaarheidsinterval.

In deze figuur is te zien dat met name de verticale trillingen tussen 3 en 8 Hz een sterke onzekerheid kennen, dit komt vooral door de hoogte van het gebouw (waar het rekenmodel onzeker is omdat dergelijke hoge modellen niet voorkomen in de kalibratiedatabase) en door

onzekerheden in de materiaaleigenschappen (die bij hoge gebouwen voor sterke variaties kunnen zorgen). Relevant hierbij is dat er alleen overschrijdingen zijn als we uitgaan van de worst-case situatie, de trillingsniveaus kunnen ook een factor 2 lager zijn waarmee ruimschoots wordt voldaan aan de streefwaarden voor trillingshinder.



Figuur 23 Overdracht voor één modelrun op de hoogste verdieping in X-, Y- en Z-richting, en algehele onzekerheid over alle modelruns heen o.b.v. MonteCarlo-analyse

## II.11 BEPALEN VAN LAAGFREQUENT GELUID

Laagfrequent geluid ontstaat doordat vloeren en wanden in trilling worden gebracht. Het geluidsdrukkniveau is berekend met behulp van vergelijking 4:

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{rc\sigma Sv(f)^2}{W_0} \right) - 10 \log_{10} \left( \frac{aA}{4} \right) + 10 \log_{10} \left( \left( \frac{4}{\pi^2} \right)^2 \right) \quad (4)$$

De eerste term is een weergave van het geluidsdrukkniveau ten gevolge van de trillingen. Hierbij is  $L_p$  het geluidsdrukkniveau in dB,  $v(f)$  is de waarde van het effectieve trillingsspectrum in m/s op het midden van de vloer. Dit effectieve trillingsspectrum is bepaald in de vorm van tertsbandspectra (1/3 octaafbandspectra). Verder is  $r$  de dichtheid van lucht, bij kamertemperatuur 1.29 kg/m<sup>3</sup>,  $c$  is de geluidssnelheid in lucht, bij kamertemperatuur en normale druk 344 m/s,  $\sigma$  is de afstraalcoëfficiënt van de kamer, die afneemt van ongeveer 1 (bij frequenties rond 10 Hz) tot 0.1 tot 0.3 (bij frequenties rond 50 Hz) en vervolgens weer toeneemt tot 1 (voor frequentie rond en boven 100 Hz), afhankelijk van de eigenschappen van de materialen in de ruimte.  $S$  is het trillende oppervlak in m<sup>2</sup> en  $W_0$  het referentievermogen in pW.

De tweede term is een correctiefactor voor de absorptie in de ruimte, hierin is  $a$  de absorptiecoëfficiënt die varieert tussen de 0.01 en 0.20 voor de meeste materialen.  $A$  is het totale oppervlak van wanden, plafond en vloeren in de ruimte in m<sup>2</sup>.

De derde term dient alleen toegepast te worden indien het vlak wat beschouwd wordt trilt rond de eerste eigenfrequentie. In dat geval mag deze term met een grootte van -7.8 dB, bij het totaal worden opgeteld. Bij hogere frequenties mag deze correctie niet worden toegepast.

De toeslagfactoren variëren dus met de grootte van de ruimte, de frequentie en de materialen die worden toegepast. Grofweg kan gesteld worden dat de laagfrequent geluidsniveaus hoger zijn in kleinere ruimtes met weinig absorptie (beton, steen) en een lage aanstootfrequentie van het

trillende vlak. Onderin Tree House is vooral sprake van relatief open kantoorruimtes (waar mogelijk nog tussenwanden worden geplaatst met een hogere absorptiecoëfficiënt), meer naar boven, waar de laagfrequent geluidniveaus lager zijn, zijn de ruimtes kleiner en is de toeslagfactor wat hoger (zie de plattegronden van het gebouw en Figuur 3). Maar omdat de trillingsniveaus bij hogere frequenties daar al wat lager zijn door demping in de constructie, zijn de laagfrequent geluidniveaus in de woningen bovenin het gebouw alsnog lager dan in de kantoorlagen onderin het gebouw.

Bij laagfrequent geluid is tenslotte nog relevant dat er een grote onzekerheid in deze toeslagfactoren zit, die sterk afhankelijk is van persoonlijke keuzes van mensen t.a.v. de inrichting van ruimtes. Dit is als ontwikkelaar niet te beïnvloeden, en is ook terug te zien in de resultaten (relatief grote bandbreedte voor laagfrequent geluid).





## 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.

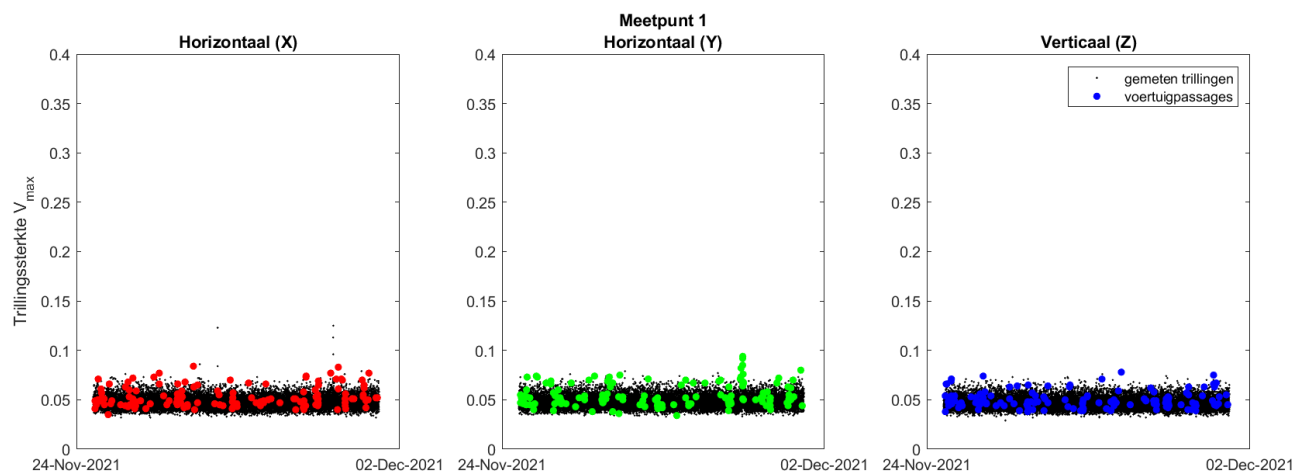
1	<i>Uitvoerende partij</i>	Alcedo B.V. Ondernemersweg 3 7451PK Holten
	<i>Verantwoordelijke</i>	[REDACTED]
2	<i>Meting uitgevoerd door</i>	[REDACTED]
3	<i>Datum en tijd metingen</i>	24 november tot 1 december 2021
4	<i>Trillingsbron</i>	Treinen en trams
5	<i>Classificatie gebouw</i>	Zie paragraaf 2.2.3
6	<i>Locatie metingen</i>	Zie Figuur 4
7	<i>Geotechnische gegevens</i>	Zie bijlage I
8	<i>Locaties meetpunten en meetrichtingen</i>	Zie Figuur 4, tenzij anders vermeld: X-richting loodrecht op de trillingsbron Y-richting parallel aan trillingsbron Z-richting verticaal
9	<i>Gebruikte apparatuur</i>	FrogWatch opnemers. Zie een uitgebreide toelichting van de specificaties op <a href="https://www.frog.watch/facts/">https://www.frog.watch/facts/</a> .
10	<i>Gemeten trillingen</i>	Zie bijlage III.2
11	<i>Motivatie classificatie gebouw</i>	Op basis van constructietekeningen en gegevens BAC
12	<i>Overige relevante omstandigheden</i>	Niet van toepassing



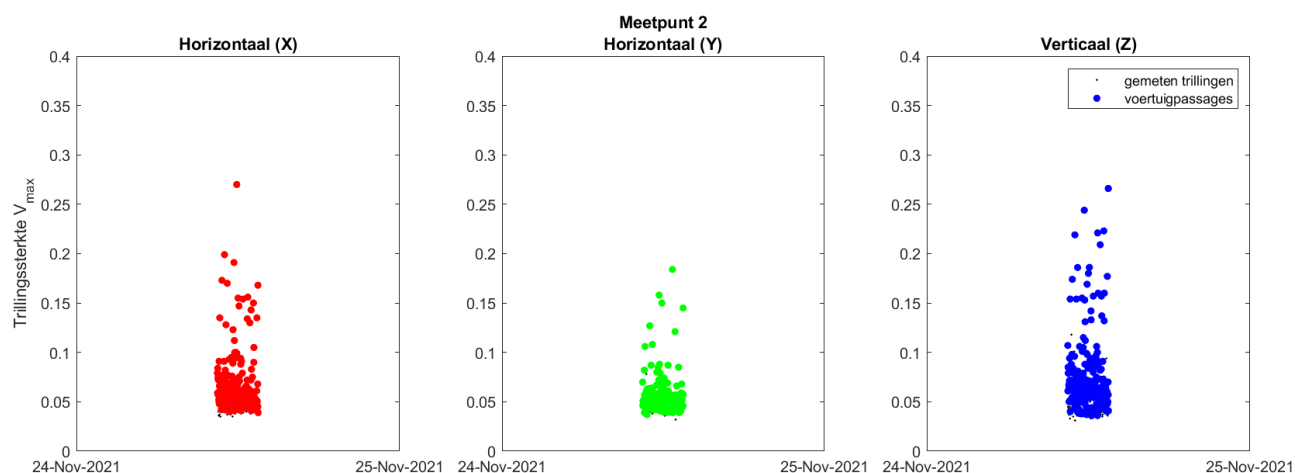


### III.2 RESULTATEN METINGEN

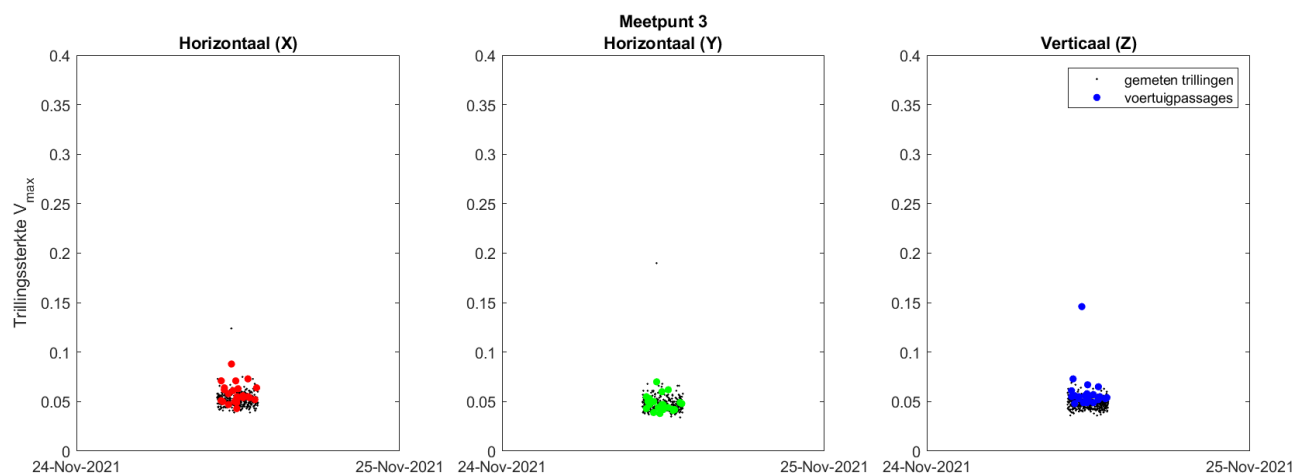
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven. Veel trein- en trampassages zijn op de fundering van Central Post lager dan het achtergrondniveau (ruisniveau) van de trillingen.



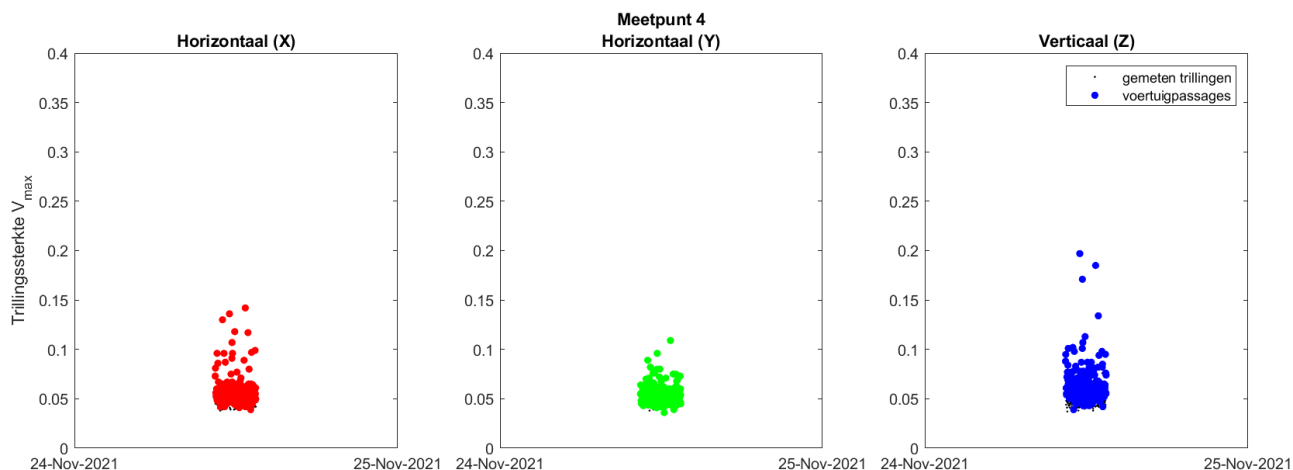
Figuur 24 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (fundering Central Post)



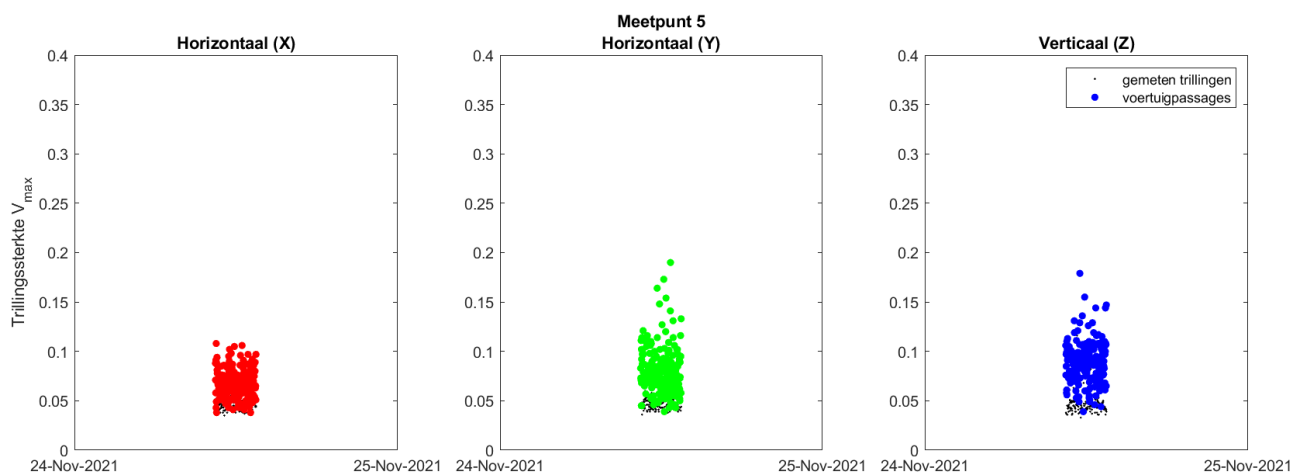
Figuur 25 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (maaiveld, nabij funderingspunt Central Post)



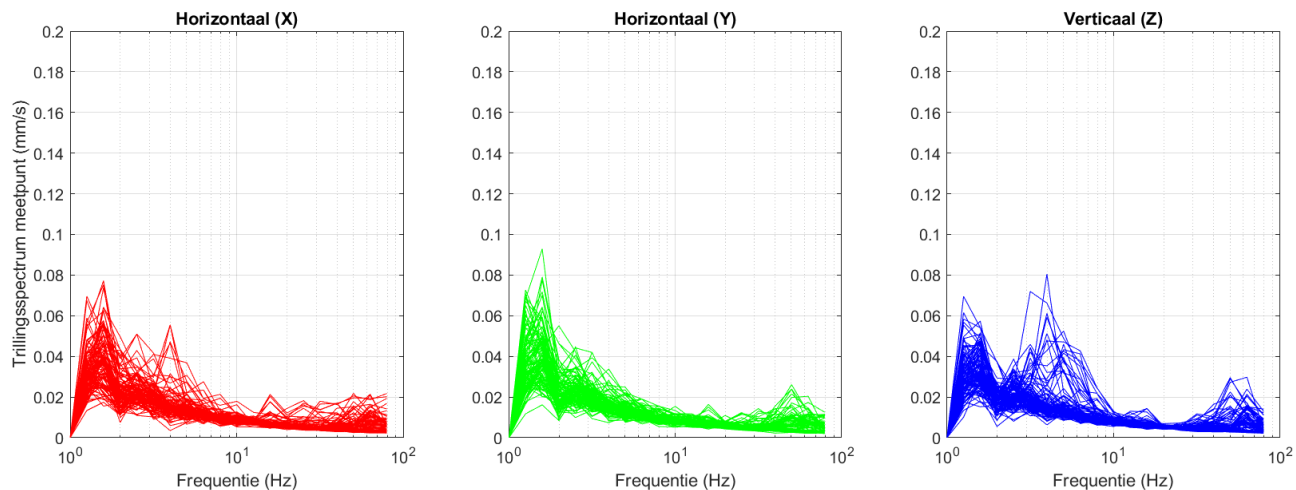
Figuur 26 Gemeten trillingen bij meetpunt 3 (maaiveld, nabij treinperron)



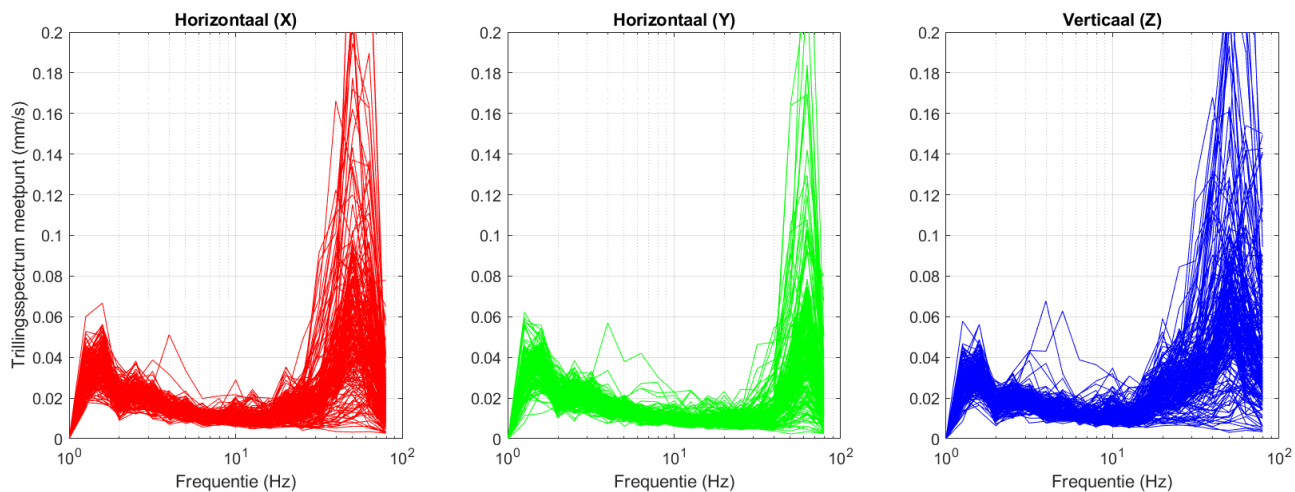
Figuur 27 Gemeten trillingen bij meetpunt 4 (maaiveld, halverwege gebouw, bij trams)



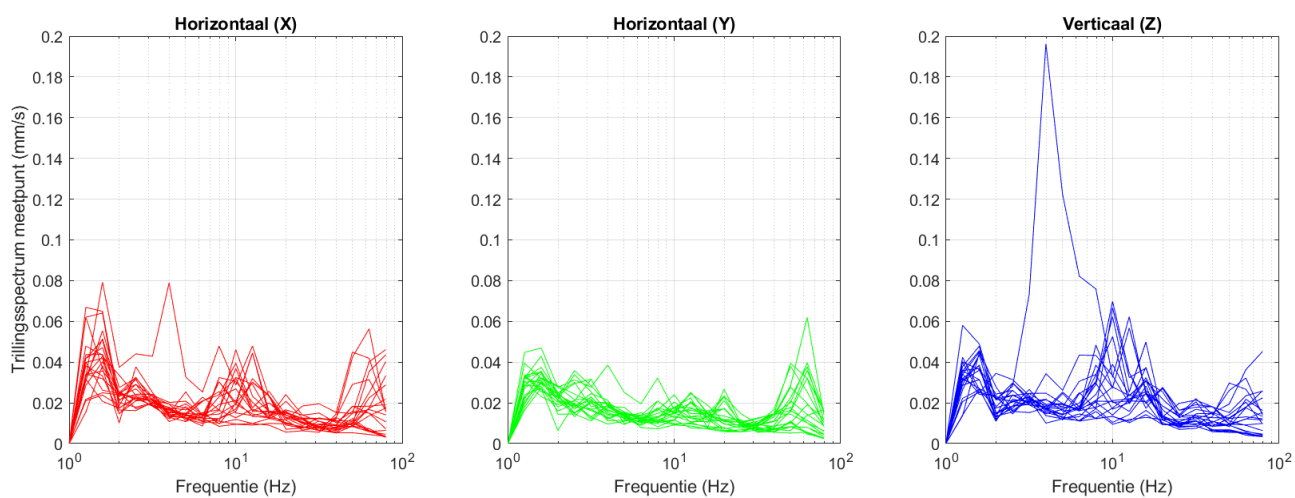
Figuur 28 Gemeten trillingen bij meetpunt 5 (maaiveld, bij bochten en wissels in tramlijn)



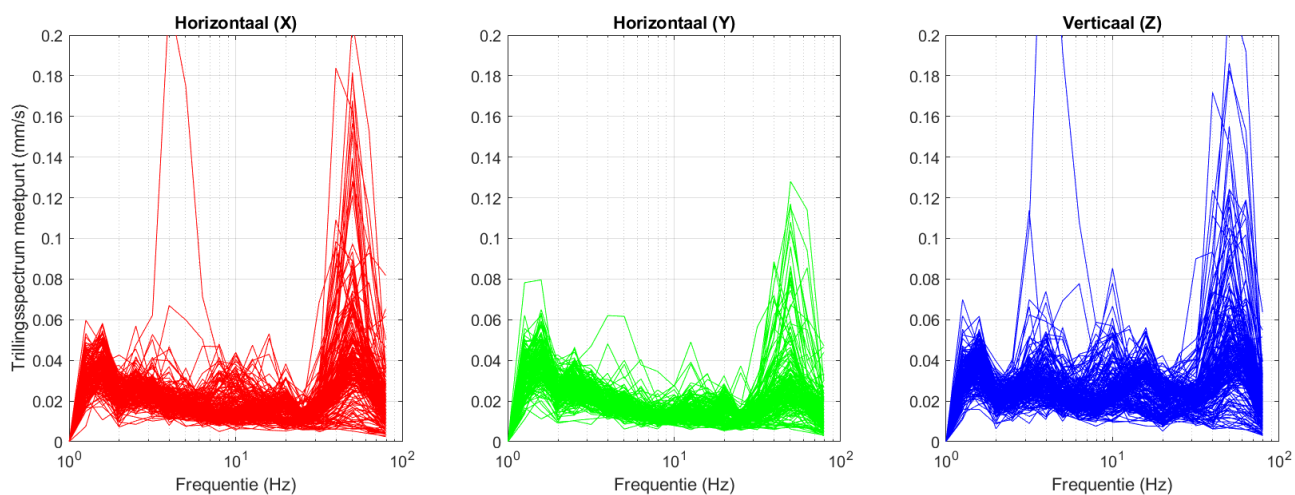
Figuur 29 Tertsbandspectra bij meetpunt 1



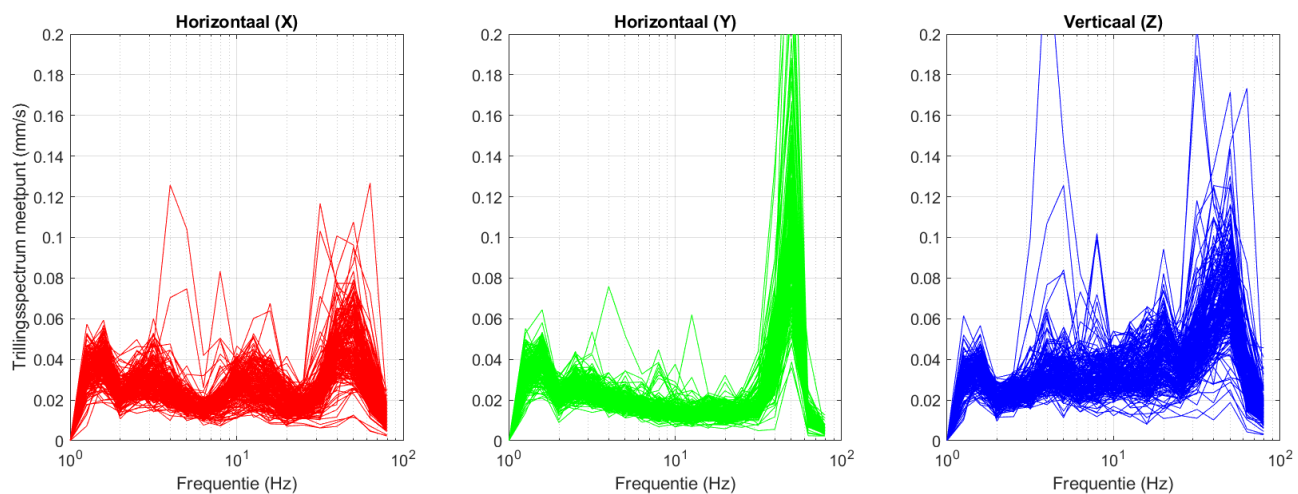
*Figuur 30 Tertsbandspectra bij meetpunt 2*



*Figuur 31 Tertsbandspectra bij meetpunt 3*



*Figuur 32 Tertsbandspectra bij meetpunt 4*



*Figuur 33 Tertsbandspectra bij meetpunt 5*

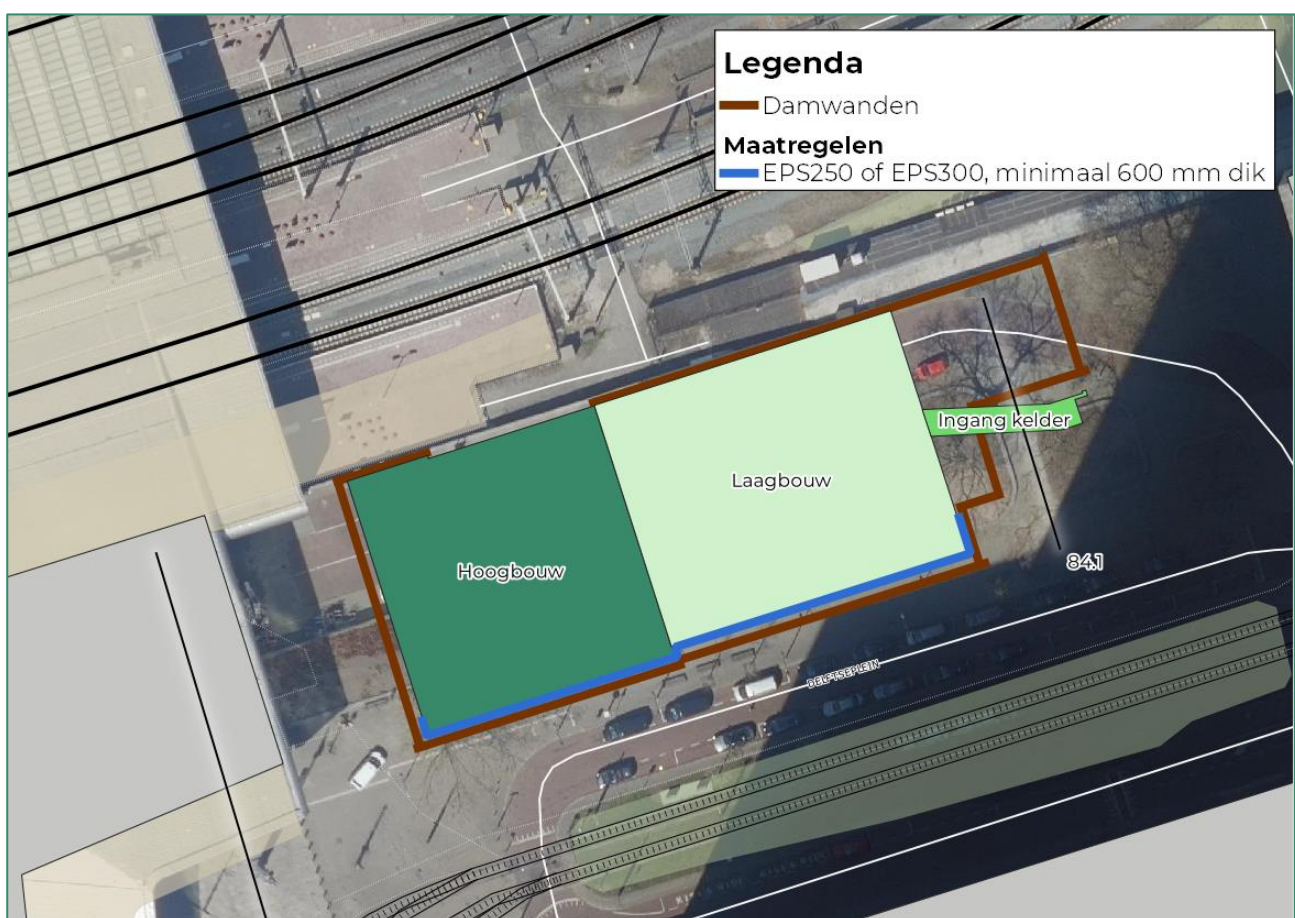


## IV DETAILS MAATREGELEN

In dit onderzoek zijn twee maatregelen in meer detail onderzocht: de meest kosteneffectieve maatregel om het laagfrequent geluid van de trams te verminderen (bekleden van de zijkant van de fundering met dikke blokken EPS) en de meest effectieve maatregel om de trillingen van de goederentreinen te verminderen (bekleden van de fundering met rubber). Hieronder beschrijven we deze maatregelen.

### IV.1 INPAKKEN FUNDERING AAN TRAMZIJDE MET EPS

De locatie van het EPS is weergegeven in Figuur 34. De blokken worden aan de binnenzijde (gebouwszijde) van de damwanden aangebracht, na aanbrengen damwanden. Het EPS dient, om voldoende afscherming te realiseren, ook ca. 4 meter om de hoek (zijanten van het gebouw) te worden aangebracht.



*Figuur 34 Locatie van mogelijk doelmatige maatregel*

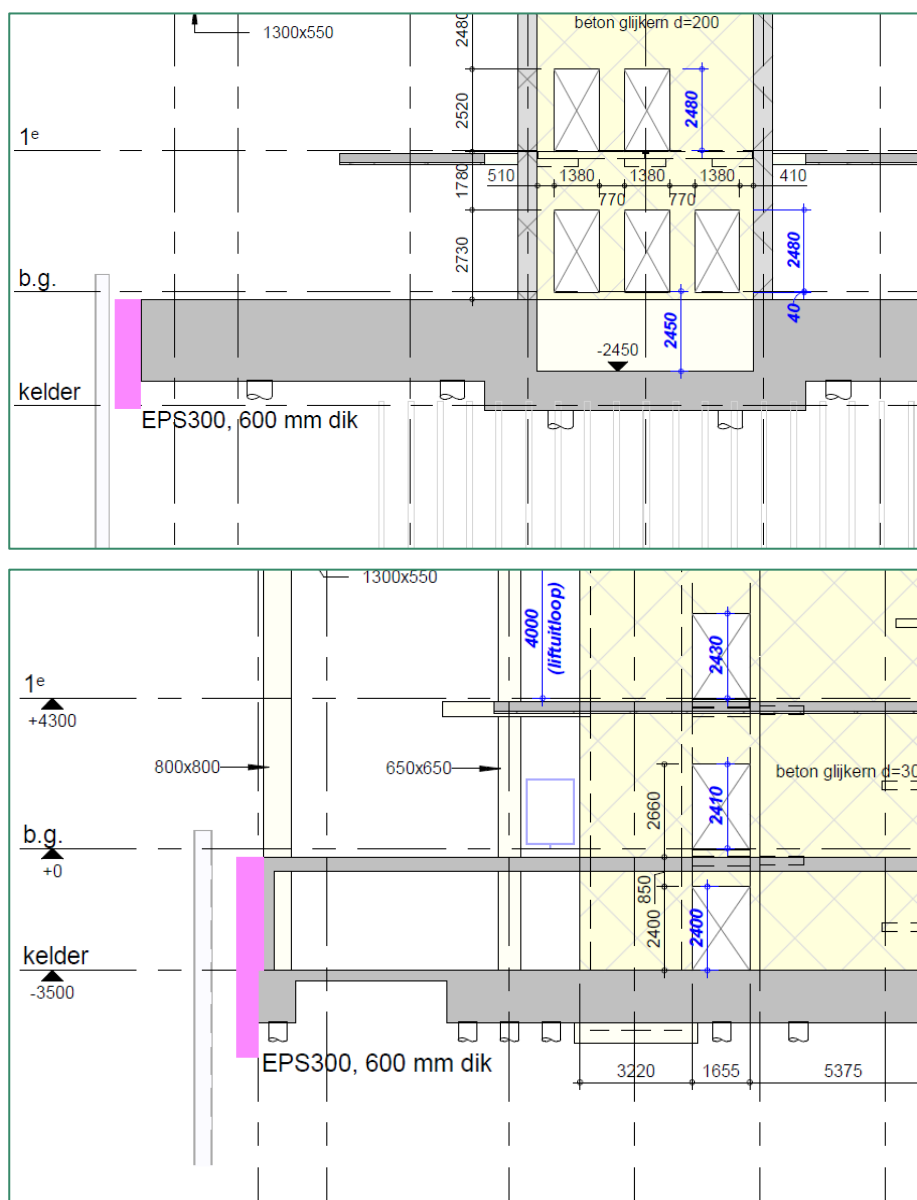
De effectiviteit van de maatregel is bepaald met behulp van eindige elementenmodellen, waarbij de exacte dimensionering is geoptimaliseerd op basis van (1) wat nodig is om het laagfrequent geluid te reduceren (groveweg zo dik mogelijk en zo diep mogelijk) en (2) wat technisch haalbaar en inpasbaar is. Dit heeft uiteindelijk geleid tot het voorstel wat in deze bijlage wordt beschreven.

Het gebruikte 3D eindige elementenmodel is hetzelfde model wat gebruikt is om de bodem-funderingsinteractie te bepalen (zie Bijlage II). De bodemopbouw is gemodelleerd op basis van sonderingen, waarbij de vorm van de fundering (in dit geval een poerconstructie) wel is gemodelleerd. Door modellen met en zonder EPS met elkaar te vergelijken, ontstaat een

'correctiefactor' of 'overdracht' die het effect van EPS aangeeft. Deze correctiefactor is gebruikt als correctie op de input voor het rekenmodel.

Een principeschets van isolatie tussen de kelderwand en de tijdelijke damwand aan de tramzijde van het gebouw is weergegeven in Figuur 35. Methode van aanbrengen is:

1. Aanbrengen tijdelijke damwand en ontgraven bouwkuip
2. Realiseren kelder
3. Aanbrengen EPS300, 600 mm dik, minimaal 500 mm uitstekend onder onderzijde keldervloer/poer. Mogelijk is lichtere kwaliteit (bijv. EPS250) ook voldoende. Verankeren aan kelderwand om opdrijven t.g.v. grondwater te voorkomen.
4. Verwijderen van stempelraam (t.h.v. begane grondvloer)
5. Aanstorten grond
6. Verwijderen tijdelijke damwand
7. Afdekken met dunne laag zand en bestratingsmateriaal.

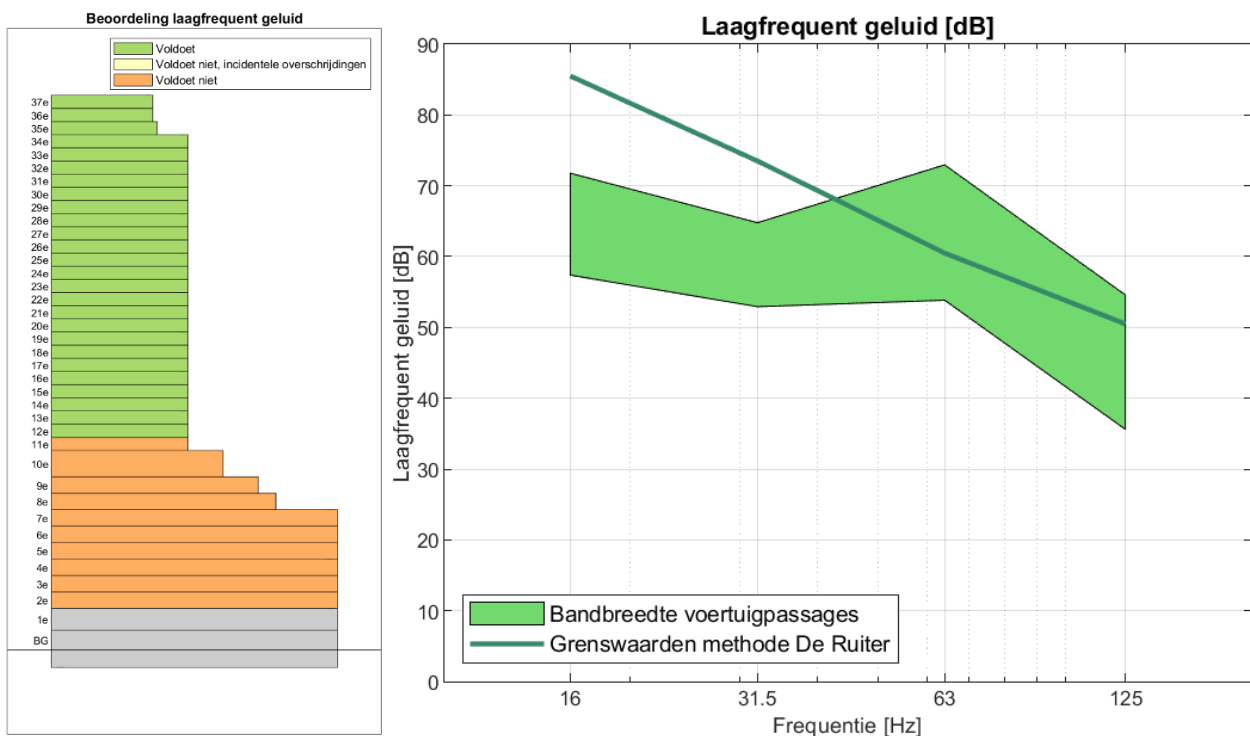


*Figuur 35 Principeschets van isolatie tussen tijdelijke damwand en kelder, tramzijde*

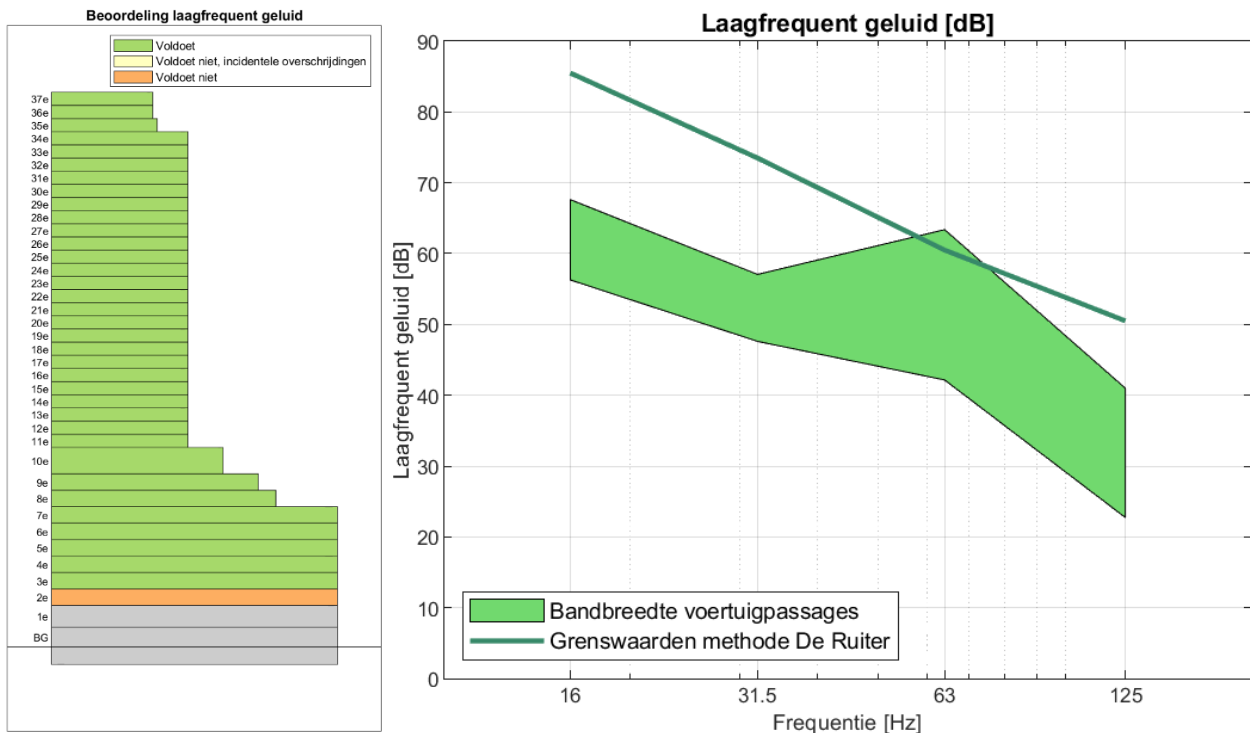
Aandachtspunten bij deze maatregel zijn:

1. Het garanderen van een goede afscherming van het EPS: tijdens verwijderen van het stempelraam moet de keldervloer afsteunen tegen de damwand, waardoor hier lokaal geen EPS kan zitten (ivm hoge druk). Het toepassen van isolerende materialen die een hogere druk kunnen weerstaan, kan een oplossing zijn. Een directe afsteuning van keldervloer op damwand (zonder isolerend materiaal) veroorzaakt namelijk een trillingslek, waardoor de effectiviteit van deze maatregel sterk afneemt.
2. Het voorkomen van zettingsverschillen op de overgang tussen EPS en grond in de bovenliggende bestrating.

Tenslotte is voor de mogelijk doelmatige maatregel aangegeven wat het effect van de maatregel is. In Figuur 36 is per verdieping aangegeven of wordt voldaan aan het beoordelingskader, en daarnaast wat het laagfrequent geluidsspectrum is op de maatgevende (2e) verdieping. In Figuur 37 is dit herhaald voor de situatie waarbij een maatregel wordt getroffen tegen de trams, dan resteert nog een beperkte overschrijding van bijna 3 dB op de 2e verdieping als gevolg van de passage van reizigerstreinen.



Figuur 36 Uitgangssituatie laagfrequent geluid, links overschrijdingen, rechts het geluidsspectrum op de maatgevende verdieping (2e verdieping)



*Figuur 37 Situatie met maatregel tegen trams, links overschrijdingen, rechts het geluidsspectrum op de maatgevende verdieping (2e verdieping)*

## IV.2 INPAKKEN FUNDERING MET RUBBER

In een review van dit rapport heeft TNO aangegeven dat de maatregel ‘fundering inpakken met dikke laag rubber’ naar verwachting effectief is. In deze paragraaf gaan we nader in op de inpasbaarheid en effectiviteit van deze maatregel.

### IV.2.1 EFFECT VAN DE MAATREGEL

Om het effect van de maatregel te bepalen hebben we verschillende methodes gevolgd:

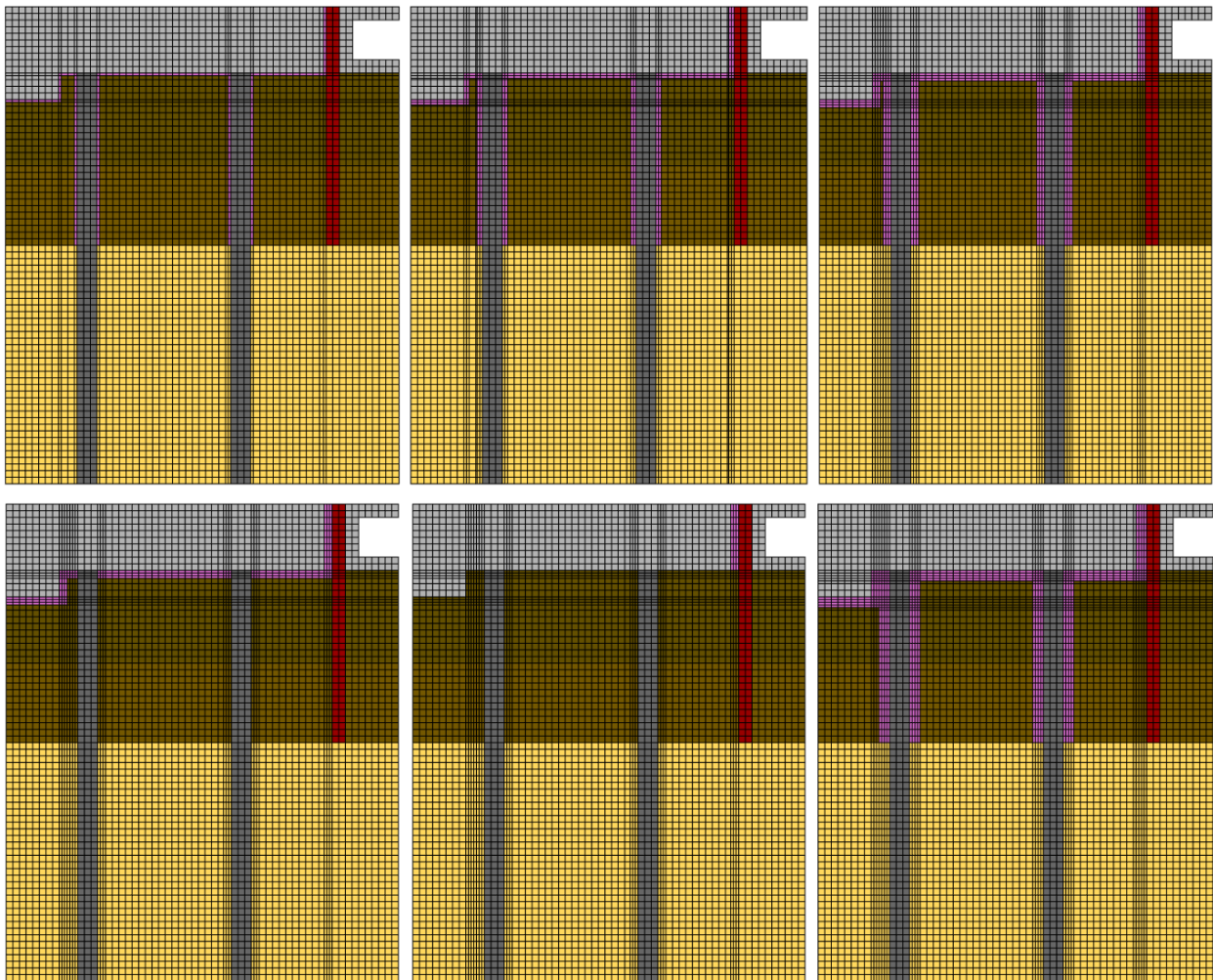
- Literatuuronderzoek.** Volgens de leverancier van dit materiaal, bijv. CDM, heeft de maatregel pas effect vanaf ca. 10 Hz bij toepassing van meerdere lagen (bijv. 200 mm). Een dikkere laag is ook mogelijk, bijv. 400 mm, waarmee volgens CDM de frequentie kan worden verlaagd naar 8 Hz. Bij lagere frequenties is het effect op basis van hun modelberekeningen en metingen nihil. Onduidelijk is wel of CDM hier spreekt over een op staal gefundeerd gebouw dat op deze mat is gebouwd (in dat geval gaat het om een massa-veersysteem), of dat het ook gaat om het hier beoogde effect van een impedantiesprong (stijfheidssprong), waardoor de trillingen worden verminderd.

In het buitenland zien we dat deze maatregel vrijwel uitsluitend wordt toegepast bij het tegengaan van laagfrequent geluid of trillingen van bijv. lightrailvoertuigen, met een focus op frequenties vanaf (vaak) 15 Hz. Ook dat is een indicatie dat deze maatregel bij frequenties onder de 10 Hz geen effect heeft.

Verder is gekeken naar 3D eindige elementen resultaten uit andere projecten (Pompenburg in Rotterdam, maar ook projecten met een stijvere bodem (waar de impedantiesprong groter is en het verwachte effect dus ook) zoals in Roermond, Arnhem en Maastricht). Ook daar zien we dat het effect van het inpakken van de fundering bij frequenties onder 10 Hz nihil is. Daar is steeds gerekend met diktes van 120 tot 150 mm. Ook bijvoorbeeld bij laagfrequente industriële trillingen (DAF-complex in Eindhoven) wordt door LBP Sight en Level Acoustics

and Vibration gerapporteerd dat inpakken van de fundering bij de daar genoemde laagfrequente trillingen (3 tot 6 Hz, net als hier) geen effect heeft.

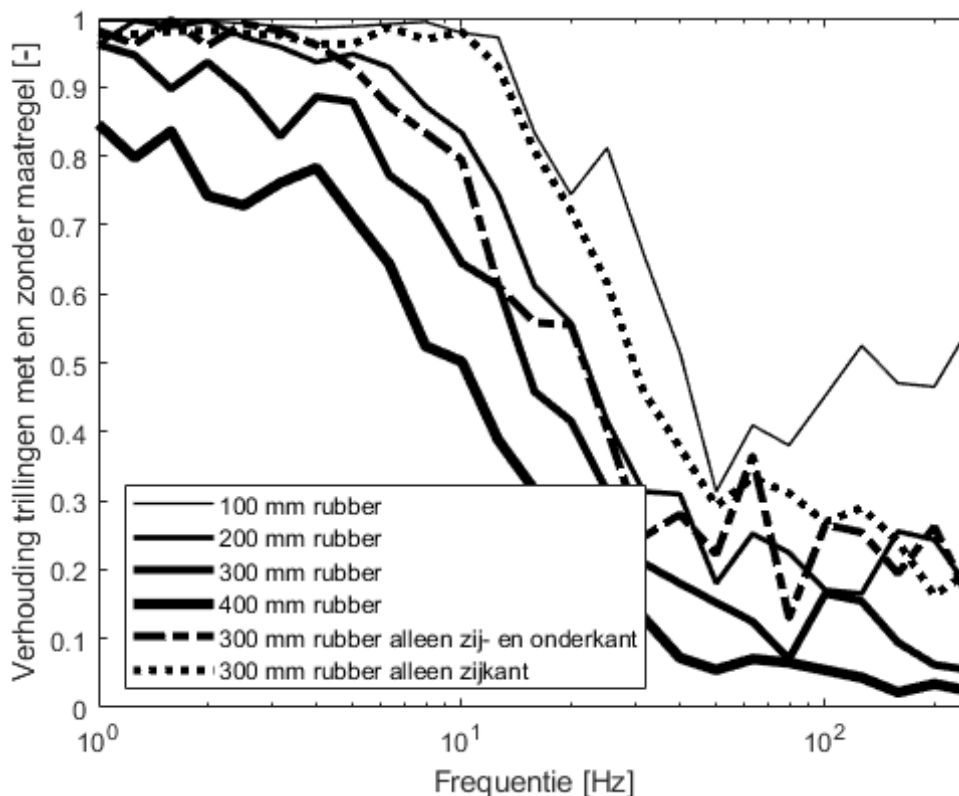
2. **Empirische resultaten.** In de praktijk is een trillingsscherm van beton bekleed met 120 mm rubber toegepast in Arnhem. Uit de Opleveringstoets van Sporen in Arnhem zien we pas vanaf 6 Hz effect van deze maatregel, maar de resultaten zijn lastig te interpreteren omdat ook het spoor sterk is gewijzigd (vernieuwd, andere spoorligging, minder wissels, hogere rijsnelheid van treinen). Het kan zijn dat het effect daardoor is onderschat of overschat.
3. **Berekeningen.** Op verzoek van TNO zijn aanvullende berekeningen uitgevoerd met een 3D eindige elementenmodel. Hierbij is alleen de fundering van het gebouw gemodelleerd, de palen zijn als vierkante palen gemodelleerd met een stijfheid die gelijk is aan de werkelijke stijfheid. Voor het rubber is gerekend met een equivalent van CDM-43, een vaker gebruikt rubber wat voor dit type toepassingen geschikt is. Er zijn 7 modellen gemaakt, zie Figuur 38:
  - a. Referentiemodel, zonder ingepakte fundering
  - b. Model met 100 mm rubber, palen ingepakt tot 9 meter onder maaiveld (slappe laag)
  - c. Model met 200 mm rubber, palen ingepakt tot 9 meter onder maaiveld
  - d. Model met 300 mm rubber, palen ingepakt tot 9 meter onder maaiveld
  - e. Model met 400 mm rubber, palen ingepakt tot 9 meter onder maaiveld
  - f. Model met 300 mm rubber, alleen funderingspoer ingepakt
  - g. Model met 300 mm rubber, alleen zijkant van funderingspoer ingepakt.



Figuur 38 Zoom-in van de modellen. Linksboven met 100 mm rubber, midden boven 200 mm rubber, rechtsboven 300 mm rubber, linksonder 300 mm rubber alleen poer ingepakt, midden onder 300 mm rubber alleen zijkant poer ingepakt en rechts 400 mm rubber. *Roze* is rubber, *rood* is damwand



Om het effect te bepalen zijn de trillingen op de fundering (bovenzijde, direct links van damwand) per model vergeleken met de trillingen in het referentiemodel. Dit effect is op 5 verschillende posities langs het spoor bepaald, en daarna gemiddeld. Dit gemiddelde effect als functie van de frequentie is weergegeven in Figuur 39. Een waarde kleiner dan 1 betekent dat de trillingen worden gedempt.



Figuur 39 Effect van de onderzochte varianten

Vervolgens is het effect van de maatregel op de trillingssterkte bepaald, zie Tabel 13.

Tabel 13 Effect van bekleden fundering met rubber

Maatregel	Trillingssterkte $V_{\max}$	Effect
Geen	0.31	
100 mm rubber, volledig ingepakt + paalkoppen tot -9 m maaiveld	0.30	-3%
200 mm rubber, volledig ingepakt + paalkoppen tot -9 m maaiveld	0.27	-14%
300 mm rubber, volledig ingepakt + paalkoppen tot -9 m maaiveld	0.24	-22%
400 mm rubber, volledig ingepakt + paalkoppen tot -9 m maaiveld	0.20	-35%
300 mm rubber, volledig ingepakt	0.25	-19%
300 mm rubber, zijkanten ingepakt	0.30	-4%

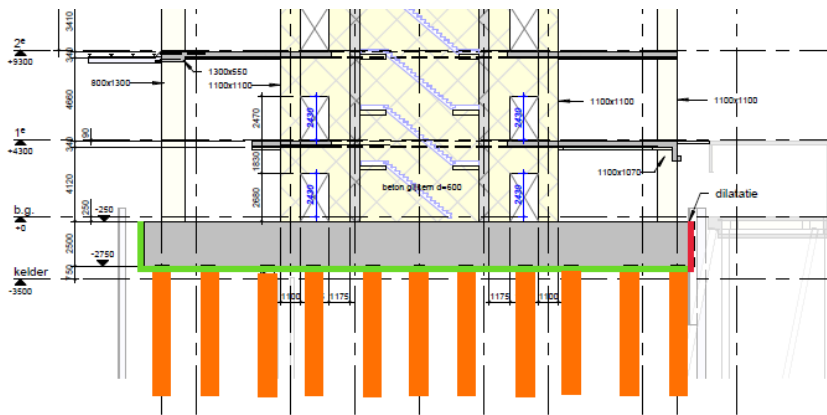
Pas bij diktes van meer dan 400 mm is sprake van een maatregel die de benodigde 36 procent effect heeft. Bij 400 mm is er sprake van afgerond een trillingssterkte van 0.20.

Ook is zichtbaar dat alleen het inpakken van de poer of alleen de zijkant van de poer veel minder effectief is dan het ook inpakken van de paalkoppen. Dat komt vooral door het grote aantal palen en de grote paaldiameter. Alleen de zijkanten inpakken heeft zoals verwacht vrijwel geen effect.

## IV.2.2 INPASBAARHEID VAN DE MAATREGEL

De inpasbaarheid van het bekleden van de fundering met rubber is problematisch. Samen met de constructeur van het gebouw is gekeken naar de inpasbaarheid. Hierbij geldt het volgende:

1. Om de fundering te bekleden, is een werkmethode nodig waarbij:
  - a. Eerst de bouwkuip wordt gemaakt t.b.v. de fundering
  - b. Daarna de palen worden geboord
  - c. Daarna wordt de bouwkuip uitgegraven
  - d. Daarna wordt de rubberen mat aangebracht. Probleem is alleen de spoorzijde, daar is technisch geen ruimte om deze in de bekisting te verwerken.
  - e. Daarna wordt de poer gestort.
  - f. Bij bekleden van de palen wordt daarna een nieuwe, bredere bouwkuip aangebracht, en deze tot minimaal 9 meter onder maaiveld (einde slappe laag) ontgraven om de palen te kunnen bekleden.
  - g. Daarna worden de palen bekleed met rubber
  - h. Daarna wordt de bouwkuip weer opgevuld
2. Aan de spoorzijde is bekleden onmogelijk door de ligging strak tegen de expeditie van ProRail/NS aan. Hier is geen ruimte om het materiaal in te passen, noch aan de spoorzijde, noch aan de gebouwszijde, zie Figuur 40. De enige mogelijkheid is om het gebouw te laten opschuiven met de dikte van het materiaal (dus minimaal 400 mm voor voldoende effect).
3. Aan de onderzijde geldt dat het complex en duur is om de fundering vrij te graven, o.m. door beperkte ruimte tussen palen is dit tijdrovend en kan dit alleen met gespecialiseerde machines.



Figuur 40 Inpasbaarheid van 'inpakken van de fundering' tegen trillingen van goederentreinen, reizigerstreinen en trams. **Rood** is niet inpasbaar, **oranje** is lastig inpasbaar (duur en complex), **groen** is inpasbaar

Samengevat: het bekleden van de fundering is maar beperkt effectief, want aan de maatgevende zijde (het spoor) is bekleden fysiek onmogelijk. De maatregel is dus niet inpasbaar, tenzij het gebouw wordt opgeschoven.

## IV.2.3 KOSTEN VAN DE MAATREGEL

Tenslotte is, op basis van bovengenoemde aannames, een berekening gemaakt van de kosten o.b.v. prijspeil 2022, zie Tabel 14 voor de variant van 400 mm dik (minst kostbare voldoende effectieve variant). De totale kosten van deze maatregel bedragen ca. € 18.4 mln.

Tabel 14 Kosten bekleden fundering met 400 mm rubber

Post	Aantal	Totaalprijs
Bekleden funderingsplaat	3.500 m2	€ 1,820,000
Bekleden ca. 180 palen tot -9 m NAP	3.400 m2	€ 1,768,000
Nieuwe bouwkuip om bestaand, 25 m AZ36-700		€ 2,600,000
Ontgraven fundering (beperkte ruimte)		€ 2,500,000
Afvoer grond	22.050 m2	€ 450,000
<b>Totaal directe bouwkosten</b>		<b>€ 9,138,000</b>
Indirecte bouwkosten		€ 2,924,160
Engineering		€ 120,622
Bijkomende kosten overig		€ 365,483
Onvoorziene kosten		€ 627,413
Scheefte raming		€ 263,514
Plankosten en extra realisatiekosten		€ 1,747,095
BTW		€ 3,189,120
<b>Totale investeringskosten</b>		<b>€ 18,375,407</b>

Als we dat afzetten tegen de 172 huur- en 127 koopappartementen in het gebouw, bedragen de kosten per appartement bijna € 62.000, meer dan het richtbedrag wat ProRail doelmatig acht (€ 47.000 per woning). Afgezet tegen dit bedrag is de maatregel dus niet doelmatig.

De kosten voor de andere onderzochte varianten staan in Tabel 15.

Tabel 15 Kosten varianten bekleden fundering met rubber

Maatregel	Effect	Kosten
100 mm rubber, volledig ingepakt + paalkoppen tot -9 m maaiveld	-3%	€ 14.2 mln.
200 mm rubber, volledig ingepakt + paalkoppen tot -9 m maaiveld	-14%	€ 15.6 mln.
300 mm rubber, volledig ingepakt + paalkoppen tot -9 m maaiveld	-22%	€ 17.0 mln.
400 mm rubber, volledig ingepakt + paalkoppen tot -9 m maaiveld	-35%	€ 18.4 mln.
300 mm rubber, volledig ingepakt	-19%	€ 3.0 mln.
300 mm rubber, zijkanten ingepakt	-4%	€ 0.4 mln.

# V VALIDATIE 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.

## V.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.**

We-Boost is daarnaast voornemens om een onafhankelijke, blinde validatie te laten uitvoeren door een onafhankelijke derde partij. De aanpak die we daarbij zullen volgen is:

- 1.** Wij vragen bij een onafhankelijke derde partij een lijst op met gebouwen waarin representatieve metingen zijn uitgevoerd (voldoende meetduur, juiste trillingsmeters, voldoende meetpunten, uitgevoerd conform SBR B-richtlijn). Uit deze lijst selecteren we een aantal representatieve validatiecases (minimaal 20).
- 2.** Van deze validatiecases vragen we de bouwtekeningen op. We modelleren de gebouwen en berekenen de frequentieafhankelijke overdracht in het gebouw. Deze overdrachten leveren we op aan de partij die de validatie uitvoert.
- 3.** De partij die de validatie uitvoert, vergelijkt de door ons berekende overdracht met de door hen gemeten overdracht.
- 4.** De partij die de validatie uitvoert, levert aan ons de gemeten trillingssignalen op. Wij berekenen de trillingssterkte op de verschillende punten in het gebouw, en leveren deze aan de partij die de validatie uitvoert.
- 5.** De partij die de validatie uitvoert, vergelijkt de door ons berekende trillingssterkte met de door hen gemeten trillingssterkte.
- 6.** De partij die de validatie uitvoert, legt de resultaten vast in een validatierapport.

## V.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





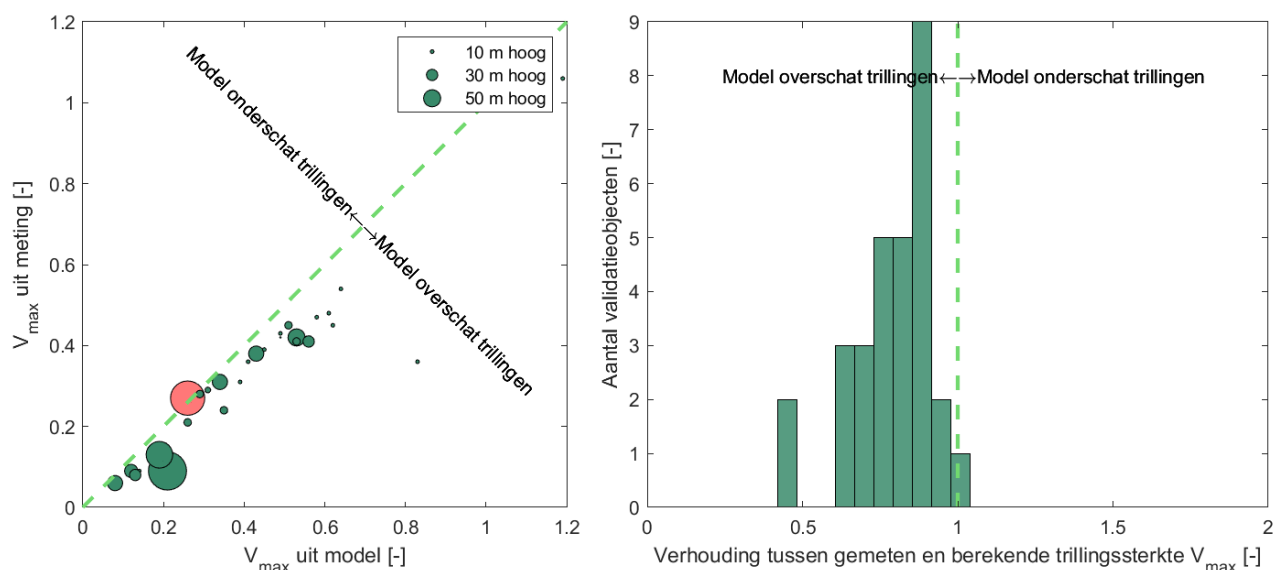
het in dit onderzoek gebruikte rekenmodel gekalibreerd is met praktijkdata, wat de nauwkeurigheid sterk ten goede komt.

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 41. De grootte van de bolletjes schaalt met de hoogte van het gebouw. In 1 van de 30 cases (Stadskantoor Utrecht, gaan we in de volgende subparagraaf nader op in) was het model niet conservatief genoeg. In alle andere gevallen was het model voldoende conservatief, voor het meest op Tree House lijkende gebouw zijn de gemeten trillingen zelfs ruim een factor 2 lager dan vooraf berekend. Ook dit gebouw behandelen we verderop in deze bijlage.

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

De twee meer relevante cases zijn hieronder meer in detail uitgewerkt: het gaat in beide gevallen om hoge gebouwen dicht bij het spoor op een bodem met slappe toplagen.

In deze paragraaf 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.

### V.2.1 STADSKANTOOR UTRECHT

Een qua afstand tot het spoor en hoogte redelijk vergelijkbaar gebouw met Tree House is het Stads Kantoor in Utrecht, gebouwd door Boele & van Eesteren en G&S Bouw in opdracht van de gemeente Utrecht, zie Figuur 42. De belangrijkste kenmerken van het gebouw zijn weergegeven in Tabel 18.

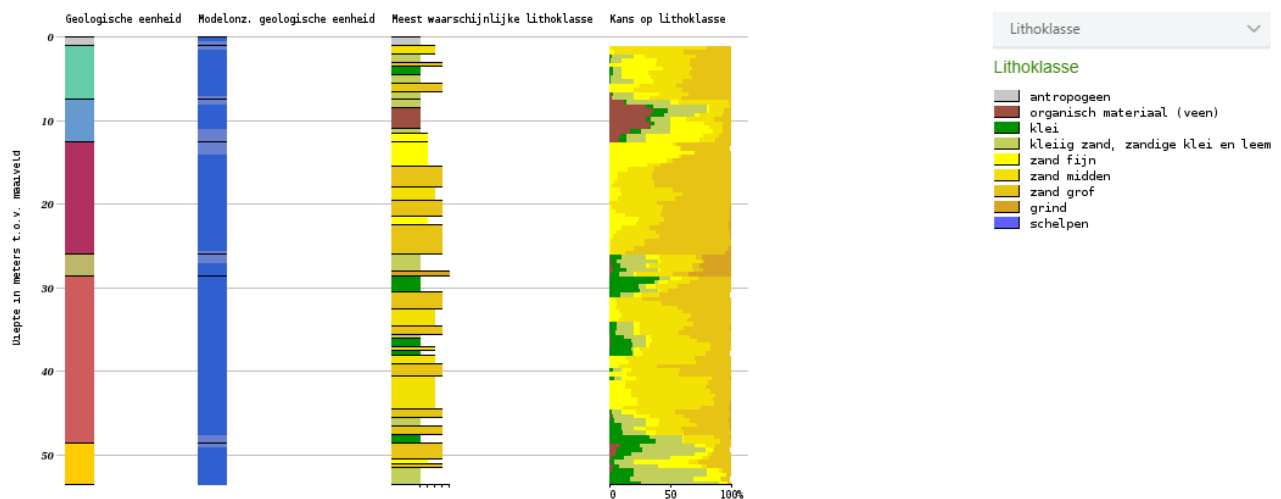
Tabel 16 Belangrijkste eigenschappen Stads Kantoor Utrecht

Aspect	Omschrijving
Hoogte gebouw	93 meter
Fundering	Fundex palen 520 en 760, tot 35 meter lang met parkeerkelder, 1.500 tot 2.500 mm poeren
Constructie	I.h.w.g. betonnen kernen (3 stuks), staalconstructie en dragende stalen gevelplaten
Vloertype	Kanaalplaatvloer met druklaag
Afstand tot spoor	6 meter, 43 meter tot goederentreinen
Rijsnelheid reizigerstreinen	0 – 40 km/h
Rijsnelheid goederentreinen	60 – 80 km/h
Type goederentreinen	Gevarieerd, onder meer kolen, graan, containers

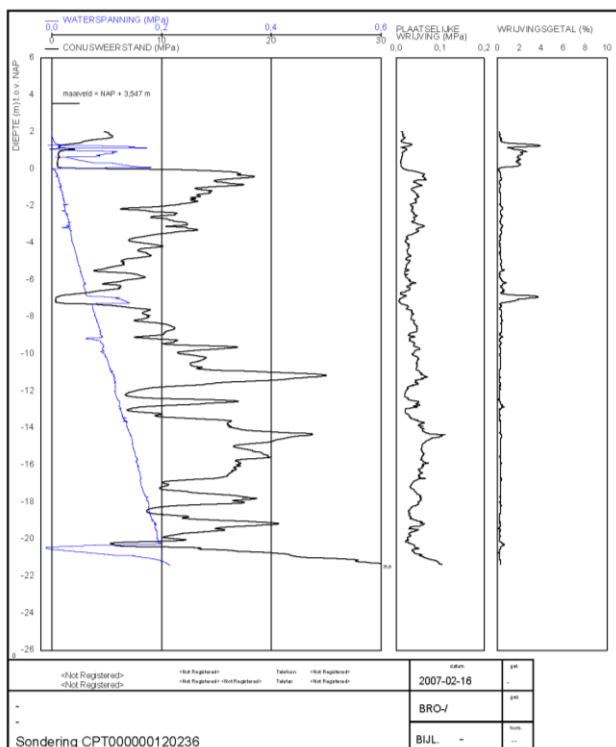


Figuur 42 Stads Kantoor Utrecht, links foto, rechts 3D-model van de constructie

De bodemopbouw ter plekke is weergegeven in Figuur 43, een representatieve sondering in Figuur 44.



Figuur 43 Bodemopbouw



Figuur 44 Sondering

De berekende en gemeten trillingssterkte is weergegeven in Tabel 17. Er is gemeten op drie punten:

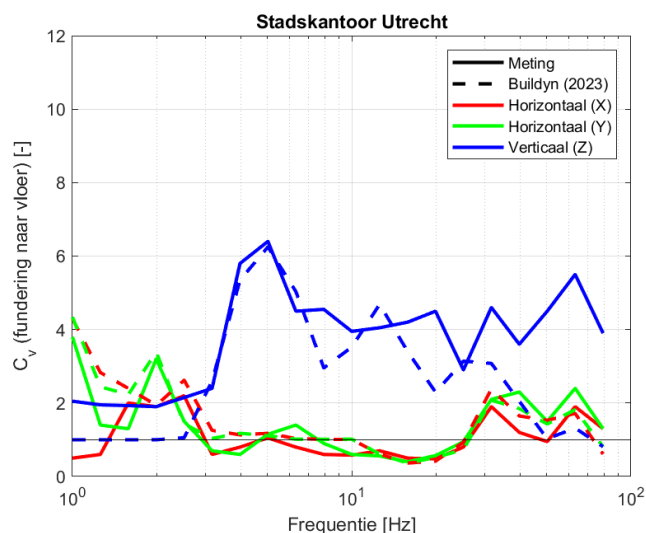
1. Een meetpunt op een stijf punt aan de fundering, aan de spoorzijde van het gebouw (zuidoosthoek)
2. Een meetpunt op het midden van de vloer van de begane grond, in het midden van de vloer in de Noordtoren.
3. Een meetpunt op het midden van de vloer van de hoogste verdieping, in het midden van de vloer in de Noordtoren.

De trillingen in het gebouw zijn hier berekend op basis van metingen op de fundering. De trillingen op de begane grond worden door het rekenmodel wat overschat, op de hoogste verdieping worden ze wat onderschat, maar de afwijkingen zijn zeer beperkt. Er is gemeten op drie punten.

Tabel 17 Berekende en gemeten trillingssterkte

Trillingssterkte $V_{\max}$	Fundering	Begane grond	Hoogste verdieping
Gemeten	0.11	0.24	0.27
Berekend	n.v.t.	0.25	0.26

De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 45.



Figuur 45 Staskantoor 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. Vermoedelijk kent de staalconstructie nog minder demping dan al is aangenomen.
2. Verder zien we kleinere verschuivingen in de eigenfrequenties, vermoedelijk door verschillen in constructie en materiaalstijfheden, of verschillen in belasting.

Samenvattend geldt dat het model de trillingen in dit gebouw ongeveer 4 procent onderschat, waarschijnlijk doordat de demping in de staalconstructie iets wordt onderschat.

## V.2.2 AMSTEL TOWER AMSTERDAM

Een qua afstand tot het spoor, functie, afmetingen en gebouwconstructie goed vergelijkbaar gebouw met Tree House is de Amstel Tower in Amsterdam, gebouwd door J.P. van Eesteren in opdracht van Provast, zie Figuur 46. De belangrijkste kenmerken van het gebouw zijn weergegeven in Tabel 18.

Tabel 18 Belangrijkste eigenschappen Amstel Tower

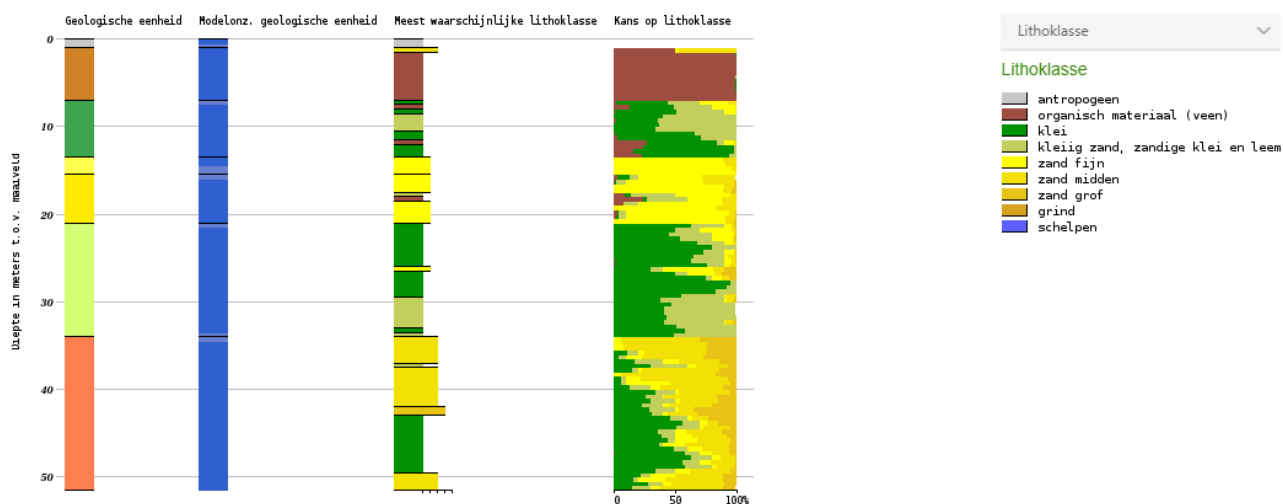
Aspect	Omschrijving
Hoogte gebouw	103 meter
Fundering	Prefab palen, 52 meter lang op 3° zandpakket, hoh 300 mm met fietskelder
Constructie	I.h.w.g. betonnen wanden
Vloertype	Breedplaatvloeren
Opbouw gebouw	6 lagen met hotel, daarboven toren met appartementen
Afstand tot spoor	24 meter
Rijsnelheid reizigerstreinen	0 – 40 km/h
Rijsnelheid goederentreinen	60 – 80 km/h
Type goederentreinen	Gevarieerd, onder meer kolen, graan, containers



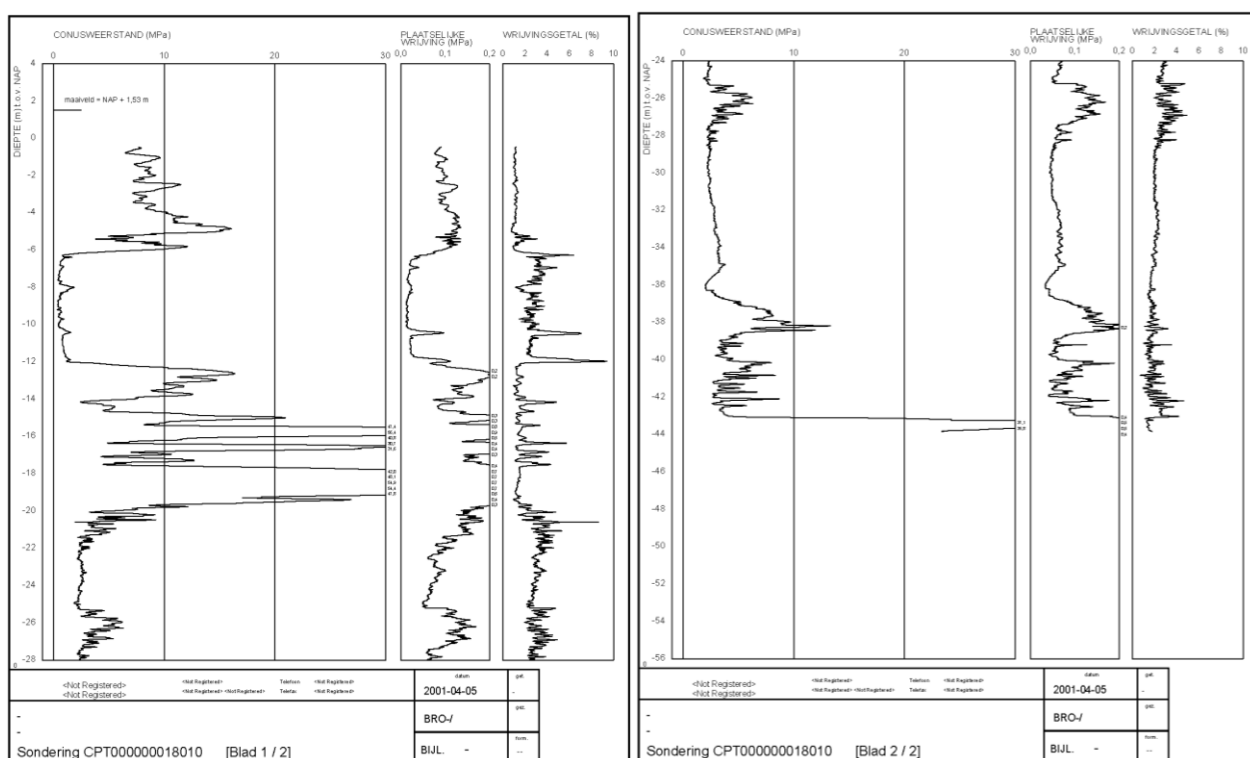
Figuur 46 Amstel Tower in Amsterdam, links foto, rechts 3D-model van de constructie

De bodemopbouw ter plekke is weergegeven in Figuur 47.



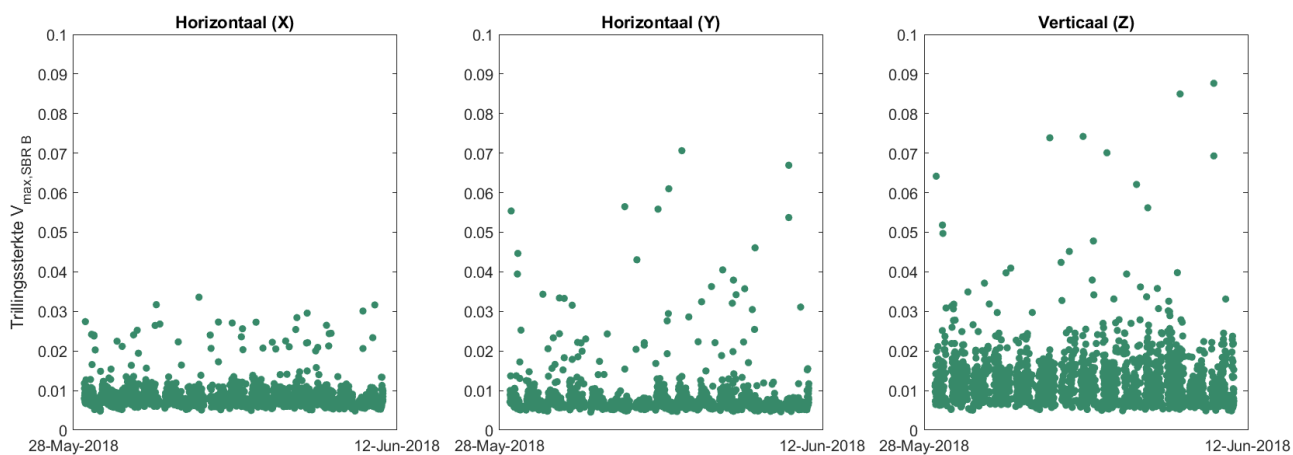


Figuur 47 Bodemopbouw t.p.v. Amstel Tower



Figuur 48 Sondering t.p.v. Amstel Tower

De gemeten trillingen op het maatgevende punt in het gebouw zijn weergegeven in Figuur 49.



*Figuur 49 Gemeten trillingen per treinpassage op maatgevende punt*

De berekende en gemeten trillingssterkte is weergegeven in Tabel 19. Er is gemeten op twee punten:

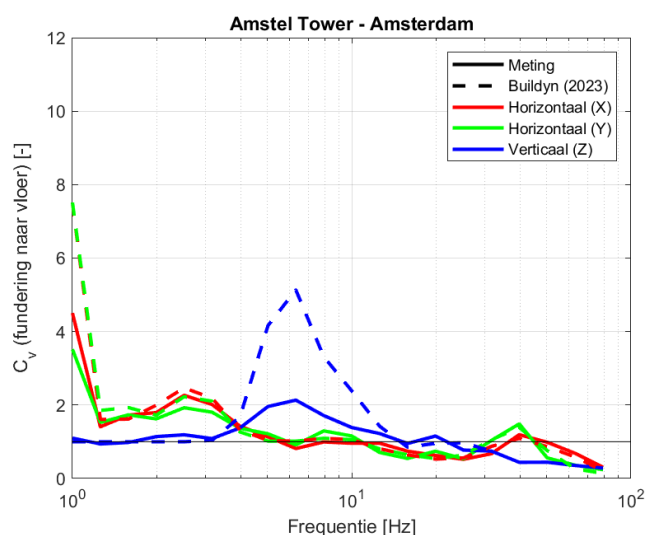
1. Een meetpunt op een stijf punt aan de fundering, in een hoek het dichtst bij het spoor op de begane grond.
2. Een meetpunt op het midden van de vloer van de hoogste verdieping, in het appartement aan het spoor in de zuidwesthoek van het gebouw.

De trillingen in het gebouw zijn hier berekend op basis van metingen op de fundering. De trillingen in het gebouw worden in het rekenmodel fors overschat (het model is te conservatief). Hieronder gaan we nader in op hoe dit komt.

*Tabel 19 Berekende en gemeten trillingssterkte*

Trillingssterkte $V_{\max}$	Fundering	Hoogste verdieping
Gemeten	0.06	0.09
Berekend	n.v.t.	0.21

De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 50.



*Figuur 50 Gemeten en berekende overdrachten*

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. Merk op dat deze piek in de trillingen ook bij Tree House verantwoordelijk is voor de hoge trillingen, maar dat daar ook de grootste onzekerheid in het rekenmodel zit, zie Figuur 23. Op basis van die figuur zijn de verschillen tussen model en meting bij de Amstel Tower dus goed te verklaren: het gebruikte rekenmodel kent bij deze frequenties een relatief grote onzekerheid. Omdat dit onderzoek voor Tree House gebaseerd is op de 95%-bovengrens van de trillingen, is er dus ook naar

verwachting sprake van een overschatting van de trillingen, en zullen de trillingen in werkelijkheid lager zijn.

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

Samenvattend geldt dat het model de trillingen in dit gebouw met ruim een factor 2 overschat, waarschijnlijk doordat de damping in het gebouw wordt onderschat. Als we kijken naar de verwachtingswaarde van de overdrachten, dan komt die goed overeen met de werkelijk gemeten overdracht, en worden de trillingen nog slechts met zo'n 12% overschat. Gelet op de sterk vergelijkbare gebouwen, is de kans groot dat er ook bij Tree House sprake is van een dergelijke overschatting (worst-case berekening) van de trillingen.

### **V.2.3 VERSCHILLEN TUSSEN MODELVERSIES**

Tenslotte, al bovenstaande voorbeelden zijn berekend met de 2023-versie van Buildyn. Voor Tree House is gerekend met de 2022-versie van Buildyn, die gebaseerd is op een kleinere database aan gebouwen. In de 2023-versie zijn er 67 gebouwen toegevoegd aan de database ten opzichte van de 2022-versie. Dit heeft een aantal gevolgen:

1. De damping is in de 2023-versie lager voor Tree House dan in de 2022-versie. Vooral vanaf 10 Hz heeft dat impact op de trillingen, daaronder is de impact beperkter. In de 2022-versie heeft Tree House een damping die verloopt van 4.1% op de onderste bouwlaag naar 2.4% bovenin het gebouw. In de 2023-versie verloopt de damping van 3.7% onderin het gebouw naar 2.3% bovenin het gebouw. Met de 2023-versie zouden de trillingen vooral bij hogere frequenties daarom wat hoger zijn. De meeste trillingsenergie zit echter bij frequenties onder de 6 Hz. Uit de berekeningen blijkt dat impact op de trillingssterkte  $V_{max}$  daarom kleiner is dan 5%. Op het laagfrequent geluid is het effect iets groter, omdat dat vooral op de onderste verdiepingen aanwezig is, waar de damping een groter verschil kent tussen beide modelversies. Uit de berekeningen blijkt dat de impact op het laagfrequent geluidsniveau ongeveer 1 dB is.
2. De onzekerheid is in de 2023-versie lager dan in de 2022-versie, omdat er meer gebouwen in de database zijn opgenomen. Daardoor is de bandbreedte in de onzekerheid lager.

Gevolg van bovenstaande is dat, als Tree House opnieuw berekend zou worden met de 2023-versie van Buildyn, de bovengrens van de trillingen bijna 5 procent hoger zou zijn, en het laagfrequent geluid van de trams bijna 1 dB hoger is. Deze invloed is dus beperkt.

### **V.2.4 VERGELIJKBARE GEBOUWEN**

Tenslotte, om een extra indruk te geven van de resultaten die het model geeft t.o.v. zo goed mogelijk vergelijkbare gebouwen (qua afstand tot het spoor, hoogte en bodemopbouw) hebben we in Tabel 20 de resultaten van trillingsmetingen weergegeven. Daar zien we dat de voor Tree House verwachte bovengrens van de trillingen in lijn ligt met die op de andere locaties, maar wel een stuk hoger dan het meest vergelijkbare gebouw (Amstel Tower in Amsterdam). Dit laat zien dat de resultaten zoals in dit onderzoek gepresenteerd voor Tree House naar verwachting aan de conservatieve kant zijn (rekening houdend met het feit dat Tree House hoger en zwaarder is, het woongedeelte stijver is geconstrueerd en de fundering zwaarder is waardoor de trillingen normaal gesproken lager zullen zijn). Wij verwachten daarom dat de na realisatie van het gebouw werkelijke gemeten trillingen lager zullen blijken te zijn dan de nu in dit rapport berekende trillingen.



Tabel 20 Meetresultaten trillingen bij vergelijkbare gebouwen

Gebouw	Hoogte	Meetpunt	Afstand (maatgevende) spoor	Trillingssterkte $V_{max}$
Amstel Tower, Amsterdam	103 m	Bovenin	24 meter	0.1
Stadskantoor Utrecht	93 m	Bovenin	40 meter	0.3
Hofplein 20 Rotterdam	95 m	Bovenin	57 meter	0.2
Hofplein 33 Rotterdam	50 m	Bovenin	180 meter	0.2
<b>Tree House</b>	<b>129 meter</b>	<b>Bovenin</b>	<b>60 meter</b>	<b>0.3</b>

### V.2.5 SAMENVATTING

Uit de validatie van het gebruikte rekenmodel blijkt dat het model een hoge nauwkeurigheid heeft en de beloofde 95% betrouwbaarheid haalt: in ruim 95% van de gevalideerde gebouwen zijn de trillingen lager dan vooraf berekend. Gelet op de resultaten in vergelijkbare gebouwen verwachten wij daarom dat de na realisatie van het gebouw werkelijke gemeten trillingen lager zullen blijken te zijn dan de nu in dit rapport berekende trillingen.