WEBOOST

TRILLINGSONDERZOEK T.B.V. NIEUWBOUW

NOABERLOCATIE DOETINCHEM

COLOFON

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

Projectcode	*WBD2025-046*
Versienr	*1.0*
Datum	*31 juli 2025*
Status	*Definitief*
Opdrachtgever	*Gemeente Doetinchem*

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van metingen van

© We-Boost 2025

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

DE KERN VAN DIT RAPPORT

Het gebied rondom station Doetinchem wordt getransformeerd tot een stadswijk, met de bouw van 1.000 tot 2.500 nieuwe woningen en het creëren van 2.000 tot 3.000 extra arbeidsplaatsen. Daarnaast is er ruimte voorzien voor de realisatie van onderwijsinstellingen, maatschappelijke voorzieningen, culturele en commerciële functies. De gebiedsontwikkeling is opgedeeld in verschillende deelprojecten. Één van deze deelprojecten is de Naoberlocatie, een ontwikkelgebied direct ten zuiden van station Doetinchem, waar een combinatie van woningen, commerciële en zakelijke functies en parkeergarages wordt ontwikkeld. De gebouwen liggen op korte afstand van de spoorlijn Arnhem – Doetinchem – Winterswijk. Gezien deze ligging nabij het spoor kan trillingshinder van passerende treinen niet op voorhand worden uitgesloten. Daarom is, conform de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, nader onderzoek naar trillingen nodig.

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

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

CONCLUSIES

De belangrijkste conclusie van het onderzoek is dat de trillingen in de gebouwen voldoen aan de aan de streefwaarden uit het beoordelingskader, mits gebruik wordt gemaakt van betonnen vloeren. Bij een constructie van houtskeletbouw en een lichte fundering, zijn overschrijdingen mogelijk in de gebouwen dichtbij het spoor door treinen die over het wissel rijden (spoor 2).

Verder, er is een groot verschil in trillingen tussen treinen die op spoor 1 en treinen die op spoor 2 halteren in Doetinchem. De treinen over spoor 2 zijn van Breng, en rijden niet in de nachtperiode en de weekenden. Deze treinen rijden over een wissel dichtbij de bebouwing, en zorgen voor aanzienlijk hogere trillingen. Omdat deze treinen niet passeren in de nacht, wanneer de streefwaarden voor trillingen strenger zijn, zijn de trillingen in de nacht lager. Echter, toekomstige intensiveringen van het treinverkeer kunnen er mogelijk toe leiden dat spoor 2 vaker wordt gebruikt, en ook in de nachtperiode. In dat geval zijn er ook bij constructies met kalkzandsteen en metselwerk incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader mogelijk, vooral bij een lichtere fundering op staal.

AANBEVELINGEN

Voor een toekomstvast programma adviseren we daarom om bij de verdere uitwerking wel rekening te houden met trillingen van het treinverkeer.

Voor de bouwblokken met een woonbestemming binnen 15 meter van het spoor adviseren we het volgende:

1. Pas geen houtskeletbouw toe. Als toch wordt gekozen voor houtskeletbouw, dan is nader onderzoek naar trillingen nodig, en mogelijk maatregelen in bijvoorbeeld de fundering (zwaardere fundering of isolerende bekleding van de fundering).
2. Realiseer deze gebouwen bij voorkeur in tunnelbouw (i.h.w.g. beton), zo ontstaat een stijve constructie waarbij ook rekening wordt gehouden met mogelijke toekomstige wijzigingen in het spoorverkeer. Bij andere bouwmethodes adviseren we om nader onderzoek te doen naar trillingen, en eventueel maatregelen af te wegen in de vorm van een zwaardere fundering, isolerende bekleding van de fundering of het toepassen van dikkere vloeren.

Met bovenstaande adviezen kan in alle woningen binnen het plangebied worden voldaan aan de streefwaarden uit het beoordelingskader. Daarmee is een aanvaardbaar woon- en leefklimaat t.a.v. trillingen in de gebouwen te bereiken.

INHOUDSOPGAVE

1.	**INLEIDING**	**8**
1.1.	Aanleiding	8
1.2.	Doel	8
1.3.	Onderzoeksmethode	9
1.4.	Leeswijzer	9
2.	**SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN**	**11**
2.1.	Situatie	11
2.2.	Uitgangspunten	12
3.	**BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE**	**15**
3.1.	Trillingen en wetgeving	15
3.2.	Beoordelingskader trillingshinder	15
3.3.	Rekenmethode	16
4.	**VERWACHTE TRILLINGEN**	**20**
4.1.	Meetresultaten	20
4.2.	Trillingen in geplande gebouwen	20
4.3.	Conclusies en aanbevelingen	23
BIJLAGEN		**24**
I.	**GRONDONDERZOEK**	**25**
II.	**REKENMODEL**	**27**
II.1	Trillingsmeting	28
II.2	Gegevens treinpassages	29
II.3	Bepalen verschillen tussen meetpunten	29
II.4	Opstellen bodemmodel	30
II.5	Bepalen trillingsspectra t.p.v. randen gebouw	30
II.6	Opstellen gebouwmodel	30

II.7 Bepalen trillingsspectra t.p.v. fundering gebouw 35

II.8 Bepalen trillingsspectra t.p.v. vloeren gebouw 35

II.9 Bepalen Vmax en Vper t.p.v. vloeren gebouw 36

II.10 Omgaan met onzekerheden 37

II.11 Validatie van het rekenmodel 38

III. METINGEN 44

III.1 Gegevens metingen 44

III.2 Resultaten metingen 45

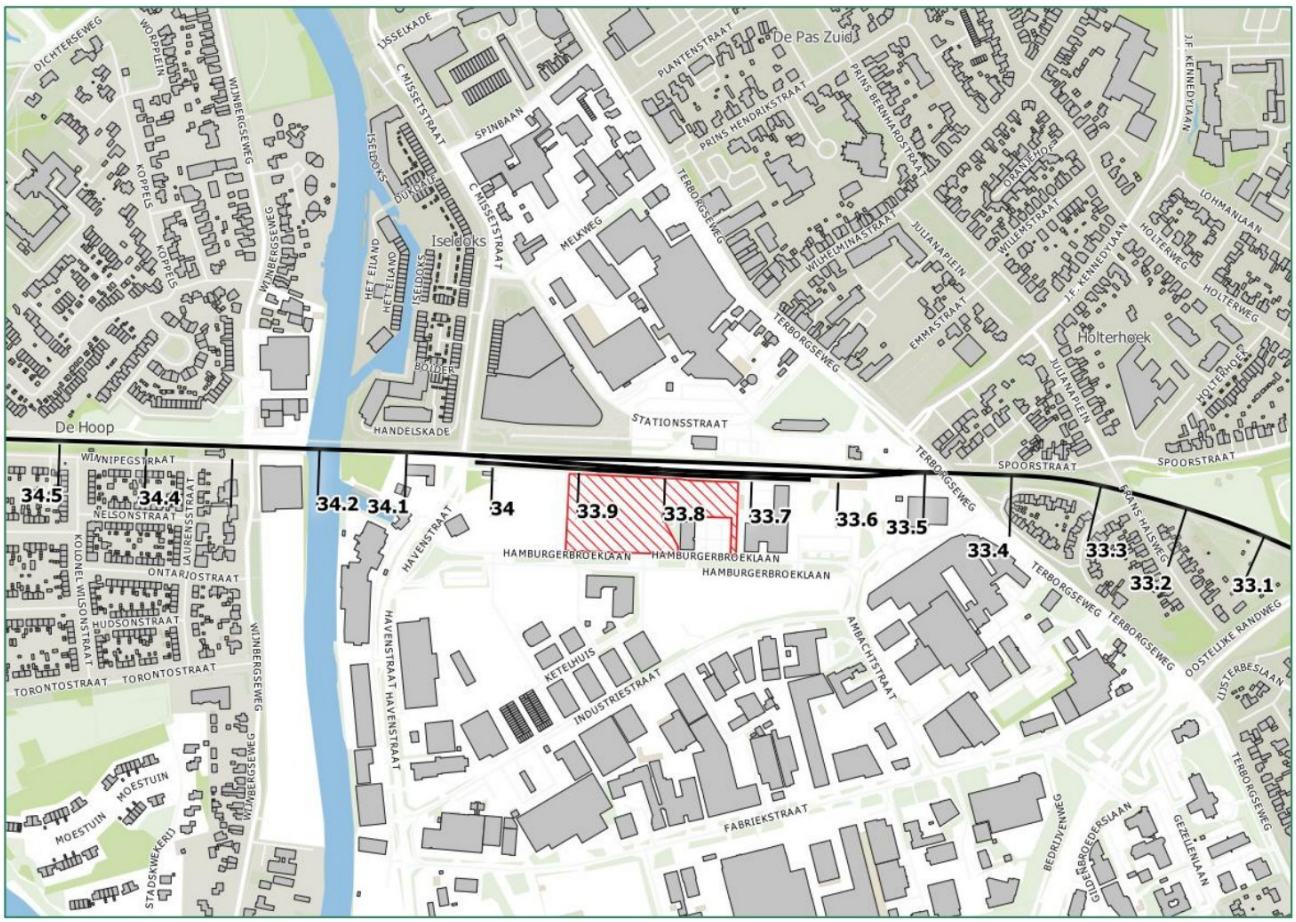
1. INLEIDING

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

1. INLEIDING

1.1. AANLEIDING

Het gebied rondom station Doetinchem wordt getransformeerd tot een stadswijk, met de bouw van 1.000 tot 2.500 nieuwe woningen en het creëren van 2.000 tot 3.000 extra arbeidsplaatsen. Daarnaast is er ruimte voorzien voor de realisatie van onderwijsinstellingen, maatschappelijke voorzieningen, culturele en commerciële functies. De gebiedsontwikkeling is opgedeeld in verschillende deelprojecten. Eén van deze deelprojecten is de Naoberlocatie, een ontwikkelgebied direct ten zuiden van station Doetinchem, waar een combinatie van woningen, commerciële en zakelijke functies en parkeergarages wordt ontwikkeld. De gebouwen liggen op korte afstand van de spoorlijn Arnhem – Doetinchem - Winterswijk, zie Figuur 1. Gezien deze ligging nabij het spoor kan trillingshinder van passerende treinen 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 randvoorwaarden of maatregelen kan worden voldaan aan de streefwaarden uit het beoordelingskader.

1.3. ONDERZOEKSMETHODE

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

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

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

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

1.4. LEESWIJZER

Wij beschrijven de situatie in het onderzoeksgebied en de uitgangspunten in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 lichten we het beoordelingskader en de gevolgde rekenmethodiek toe. Met behulp van de uitgangspunten berekenen we de trillingen in de gebouwen op basis van de gemeten trillingen en de eigenschappen van de gebouwen. Het resultaat van deze stap wordt in hoofdstuk 4 beschreven.

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

2 SITUATIEBESCHRIJVING

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

2. SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN

2.1. SITUATIE

Het plangebied is momenteel in gebruik als parkeerterrein en is deels een braakliggend terrein. Op dit terrein worden een parkeergarage, woonblokken en een gebouw met een culturele functie gerealiseerd. De bestaande en geplande bebouwing is weergegeven in Figuur 2.

Figuur 2 Huidige en toekomstige bebouwing rond de planlocatie

De bebouwing is gepland op een afstand tussen de 7 en 95 meter van het spoor. De rijsnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. Deze gegevens zijn gebaseerd op het Geluidsregister Spoor en gegevens van de vervoerders. Door de komst van de RegioExpres neemt het aantal treinen op werkdagen toe. In de berekeningen is hier rekening mee gehouden. Er rijdt geen goederenverkeer op deze spoorlijn. Relevant op deze locatie is dat in de rustige uren (late avond, nacht en weekenden) de treinen alleen over het noordelijke spoor (1) rijden. Het meer dichtbij gelegen spoor 2 wordt dan niet gebruikt.

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

Type trein	Rijsnelheid	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Sprinters	20 - 40 km/h	3.17	2.36	1.11

Andere trillingsbronnen, zoals wegverkeer, zullen, gezien het feit dat hier alleen sprake zal zijn van (langzaam rijdend) bestemmingsverkeer en de afstand tot de bebouwing naar verwachting niet

voor voelbare trillingen zorgen in de geplande bebouwing. Wegverkeer is dan ook niet nader kwantitatief beschouwd in dit onderzoek.

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

Deze berekening is uitgevoerd op basis van het Masterplan Spoorzone Doetinchem van 24 juni 2025. Er is nog geen uitgewerkt constructief ontwerp, daarom zijn meerdere varianten beschouwd. De belangrijkste kenmerken zijn weergegeven in Tabel 2. Het rekenmodel voor de bebouwing is hierop gebaseerd.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Meerdere varianten • Breedplaatvloer 250, 280 en 300 mm, met 70 mm zandcement deklaag • Appartementenvloer 260 en 320 mm, met 70 mm zandcement deklaag • CLT-vloer
Hoogte	2 tot 9 bouwlagen
Lengte vloerveld	5,5 tot 7,5 meter
Constructietype	Meerdere varianten • Kalkzandsteen en metselwerk • Prefab beton en metselwerk • Houtskeletbouw
Fundering	Geboord of geschroefd paalsysteem (meerdere lengtes en diameters)

2.2.2. GEGEVENS ONDERGROND

Voor gegevens van de ondergrond is gebruik gemaakt van in de omgeving van het plangebied uitgevoerde boringen en sonderingen. Deze gegevens zijn gebruikt om de bodemopbouw en fundering te modelleren. De bodemopbouw heeft invloed op hoe de trillingen uitdempen met de afstand, en op hoe de gebouwen reageren op trillingen.

2.2.3. MEETRESULTATEN

In Figuur 3 laten we de locaties zien van de punten waar door Alcedo metingen zijn uitgevoerd. Het gaat hierbij om vijf meetpunten op maaiveld. De meetpunten zijn zo geplaatst om de variatie van de trillingen langs het spoor te meten, zoals de invloed van de wissel, en om de uitdemping van de trillingen met de afstand vast te stellen. De metingen zijn uitgevoerd van 11 tot 18 juli 2025. Er was sprake van een representatieve dienstregeling tijdens deze meetperiode.

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

om de trillingen op alle meetpunten over de hele meetduur vast te stellen (methode conform RIVAS en CargoVibes onderzoeken).

Metingen zijn uitgevoerd met FrogWatch trillingsmeters, die voldoen aan de eisen uit de SBR-richtlijnen[1]. Verdere gegevens over de metingen zijn opgenomen in bijlage III van dit rapport.

Figuur 3 Meetpunt

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

3. BEOORDELINGSKADER

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

3. BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE

3.1. TRILLINGEN EN WETGEVING

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

3.2. BEOORDELINGSKADER TRILLINGSHINDER

Op basis van jurisprudentie wordt al enkele decennia gebruik gemaakt van de SBR-richtlijn om trillingen in gebouwen te beoordelen.[2]

Deze SBR-richtlijn bestaat uit drie delen (deel A[3]– schade in gebouwen, deel B[4] – hinder voor personen in gebouwen en deel C[5] – 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

[2] 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.

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

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

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

een zekere mate van gewenning en er zijn minder mogelijkheden om de trillingen te reduceren.

b. Gebouwen met een overnachtingsfunctie (woningen, ziekenhuizen). De meeste hinder wordt vaak in rust ervaren. Bij gebouwen met een niet-overnachtingsfunctie (kantoren, scholen) gelden minder strenge streefwaarden. Winkels, sport- en industriepanden vallen buiten de richtlijn. In dit plan gaat het om gebouwen met een woonfunctie en een maatschappelijke functie, maar ook om gebouwen met een commerciële functie en parkeergarages. Deze laatste twee categorieën vallen buiten het beoordelingskader.

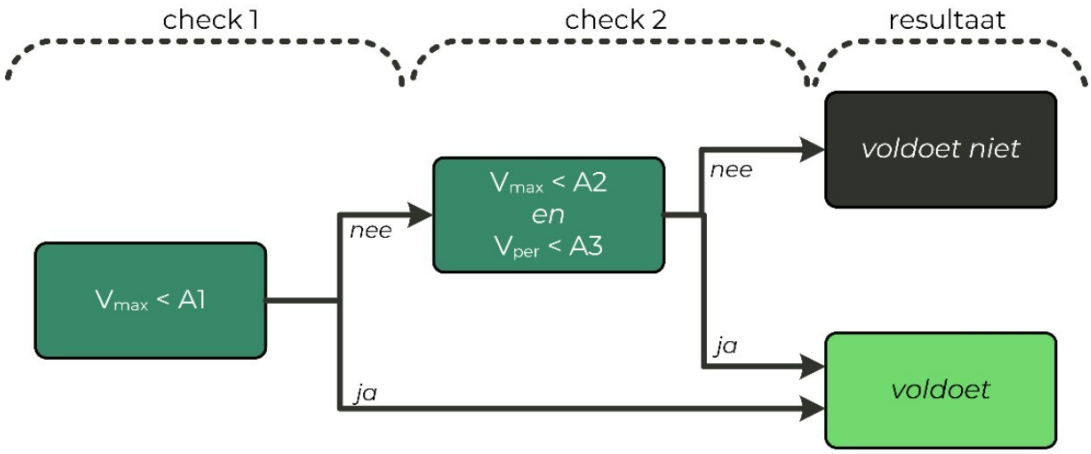
c. De nacht, omdat de meeste hinder vaak in rust wordt ervaren. De streefwaarden voor overdag zijn ca. een factor 2 minder streng dan 's nachts in gebouwen met een overnachtingsfunctie.

Een gebouw kan op twee manieren voldoen aan de richtlijn: de trillingssterkte V_{max} moet lager zijn dan de onderste streefwaarde A1 (zie Tabel 3), óf V_{max} moet lager zijn dan de bovenste streefwaarde A2, waarbij tegelijkertijd de trillingsintensiteit V_{per} lager is dan de streefwaarde A3. Zie ook het schema in Figuur 4. In dit rapport worden de trillingen, conform de SBR B-richtlijn, beoordeeld op de streefwaarden voor een nieuwe situatie.

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

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

	Dag en avond			Nacht		
Situatie	**A1**	**A2**	**A3**	**A1**	**A2**	**A3**
Wonen, nieuwe situatie	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
Wonen, bestaande situatie	0.2	0.8	0.1	0.2	0.4	0.1
Bijeenkomsten, nieuwe situatie	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
Bijeenkomsten, bestaande situatie	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15



Figuur 4 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

3.3. REKENMETHODE

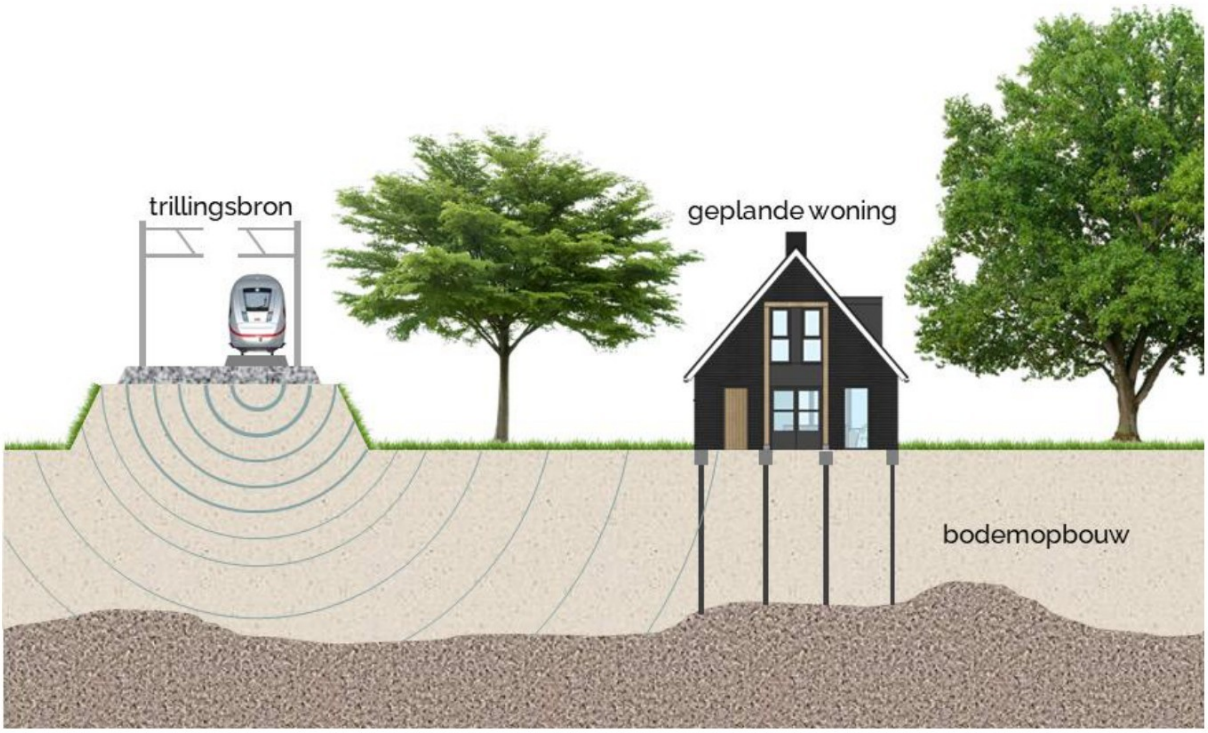
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde bebouwing, wordt op basis van metingen in de omgeving van de

bebouwing (op maaiveld) een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande nieuwe bebouwing. Deze verwachte trillingen zijn afhankelijk van de constructieve eigenschappen van de geplande bebouwing, maar ook van de bodem, de afstand tot het spoor en natuurlijk de gemeten trillingen. Hieronder wordt een korte uitleg gegeven over hoe trillingen zich voortplanten van de trillingsbron tot in het gebouw. In de volgende subparagrafen wordt beschreven hoe dat is vertaald naar een rekenmodel.

3.3.1. TRILLINGEN – VAN TRILLINGSBRON NAAR GEBOUW

Trillingen ontstaan doordat een bewegend object (een trein, tram of vrachtwagen bijvoorbeeld) over een niet-effen ondergrond rijdt. Door de massa en beweging van het voertuig, variaties in de ondergrond (die per definitie niet perfect vlak is) en variaties in de rondheid van de wielen van het voertuig ontstaan spanningen in de bodem die zich door de bodem verplaatsen. Afhankelijk van de opbouw van de bodem en de aanwezigheid van obstakels (zoals sloten en damwanden) verplaatsen de trillingen zich diep of juist ondiep door de bodem. Gebouwen worden daardoor in trilling gebracht. Afhankelijk van hoe het gebouw is geconstrueerd, worden bepaalde trillingen meer of minder versterkt in het gebouw. Deze trillingen kunnen als hinderlijk worden ervaren door personen in gebouwen. Dit hele systeem van trillingsbron (hier de trein), overdrachtsmedium (de bodem, waardoor de trillingen zich verplaatsen) en ontvanger (het gebouw met daarin de personen die de hinder ervaren) is schematisch weergegeven in Figuur 5.

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



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

3.3.2. DE TRILLINGSBRON

In dit onderzoek zijn treinen de bron van de trillingen. De trillingen van het treinverkeer zijn gemeten door Alcedo op maaiveld in het plangebied. De beoordeling van de trillingen in de geplande bebouwing heeft plaatsgevonden op basis van deze meting. Hierbij is in het rekenmodel gecorrigeerd voor afstand tot het spoor en de invloed van wissels.

3.3.3. DE BODEM

De bodem op deze locatie bestaat voornamelijk uit zand, zie bijlage I. De uitdemping van de trillingen met de afstand is bepaald met een rekenmodel op basis van deze bodemopbouw voor een zo betrouwbaar mogelijke predictie van de trillingen. In bijlage II geven we hier meer informatie over.

3.3.4. HET GEBOUW

De trillingen gaan via de fundering een gebouw binnen. Afhankelijk van het type fundering, de bodem, de massa en afmetingen van een gebouw zal de fundering de trillingen meer of minder uitdempen. Vervolgens worden de trillingen in een gebouw weer versterkt door bewegingen van het gebouw en de vloeren. Het gebouwgedrag is in dit onderzoek bepaald op basis van de bodemopbouw, de constructieve eigenschappen en de gebruikte materialen van de gebouwen. Hiervoor maken we gebruik van een rekenmodel waarin de gebouwen gemodelleerd en doorgerekend worden. De resultaten van het model zijn geijkt met praktijkresultaten uit metingen. Een toelichting op het rekenmodel is gegeven in bijlage II.

3.3.5. ONZEKERHEDEN IN HET ONDERZOEK

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

- Ten aanzien van de trillingsbron: de natuurlijke variatie als gevolg van spooronderhoud en de temperatuur kunnen zorgen voor zo'n 30% variatie in de trillingen, afhankelijk van de spoorconstructie en de bodemopbouw. Er is gemeten in een klimatologisch als normaal te typeren periode. Uit meetgegevens van ProRail blijkt dat de spoorligging hier niet sterk varieert over de tijd. Bovendien zijn er meerdere meetpunten geplaatst, om deze onzekerheden mee te nemen in het onderzoek.
- 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. Er zijn meerdere meetpunten geplaatst om rekening te houden met deze variatie. Wel geldt dat er relatief weinig bodeminformatie beschikbaar is, wat onzekerheden in het onderzoek introduceert. Deze onzekerheid is meegenomen in de berekeningen.
- Ten aanzien van de gebouwen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en huidige status van schetsontwerp). Bovendien is het dynamische gedrag van bijvoorbeeld beton afhankelijk van de mate van gescheurdheid van het beton en zijn er natuurlijke variaties in materiaalgedrag (van bijvoorbeeld hout, metselwerk en beton). 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.

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

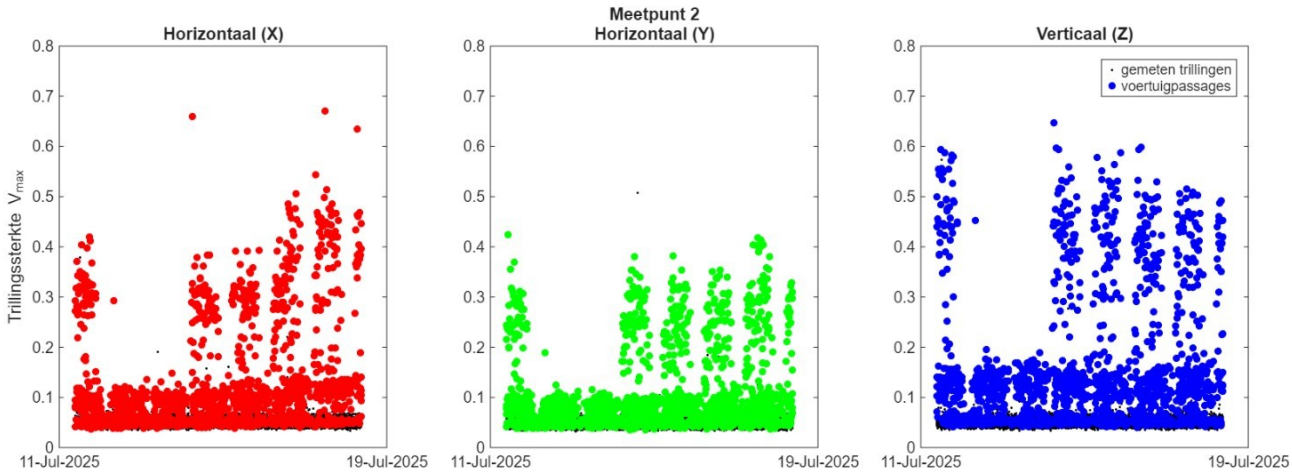
VERWACHTE TRILLINGEN

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

4. VERWACHTE TRILLINGEN

4.1. MEETRESULTATEN

Alcedo heeft metingen uitgevoerd op maaiveld. De trillingen op meetpunt 2, dichtbij het wissel, zijn weergegeven in Figuur 6, andere figuren van de meting zijn opgenomen in bijlage III. In Figuur 6 valt op dat een deel van de treinen fors hogere trillingen heeft dan andere treinen, maar niet op alle dagen. Dit zijn de treinen op het meer nabijgelegen spoor 2, die over het wissel heenrijden. Dit zijn de treinen van Breng, die kopmaken in Doetinchem en niet doorrijden tot aan Winterswijk. Doordat deze treinen dichterbij rijden en over een wissel rijden, zijn de trillingen veel hoger dan de treinen op spoor 1. De treinen van Breng rijden niet in de weekenden.



Figuur 6 Gemeten trillingen op meetpunt 2 (bij wissel)

4.2. TRILLINGEN IN GEPLANDE GEBOUWEN

De bebouwing is gemodelleerd op basis van de input uit hoofdstuk 2. Het trillingsgedrag van de geplande gebouwen is weergegeven in Bijlage II. Met de modelresultaten zijn de trillingen in de toekomstige gebouwen bepaald. De resultaten hebben we weergegeven in Tabel 4, samen met een beoordeling van de trillingen. De trillingen zijn weergegeven als een bandbreedte (90 procent onzekerheidsinterval), omdat de trillingen afhankelijk zijn van de constructieve uitwerking, de positie van het gebouw en onzekerheden in de constructie en berekeningen (zie paragraaf 3.3.5 en bijlage II). **Gele** arcering geeft aan dat er een kans is op overschrijdingen in een deel van de gebouwen.

Tabel 4 Trillingen en beoordeling op SBR B-richtlijn

Constructietype	$V_{max, dag}$	$V_{max, nacht}$	V_{per}	Beoordeling
Kalkzandsteen + metselwerk	0.1 – 0.3	0.1 – 0.2	0.01 – 0.03	Voldoet
Beton	0.1 – 0.2	0.1 – 0.2	0.01 – 0.03	Voldoet
Houtskeletbouw	0.1 – 0.5	0.1 – 0.2	0.01 – 0.05	Voldoet niet in alle gebouwen

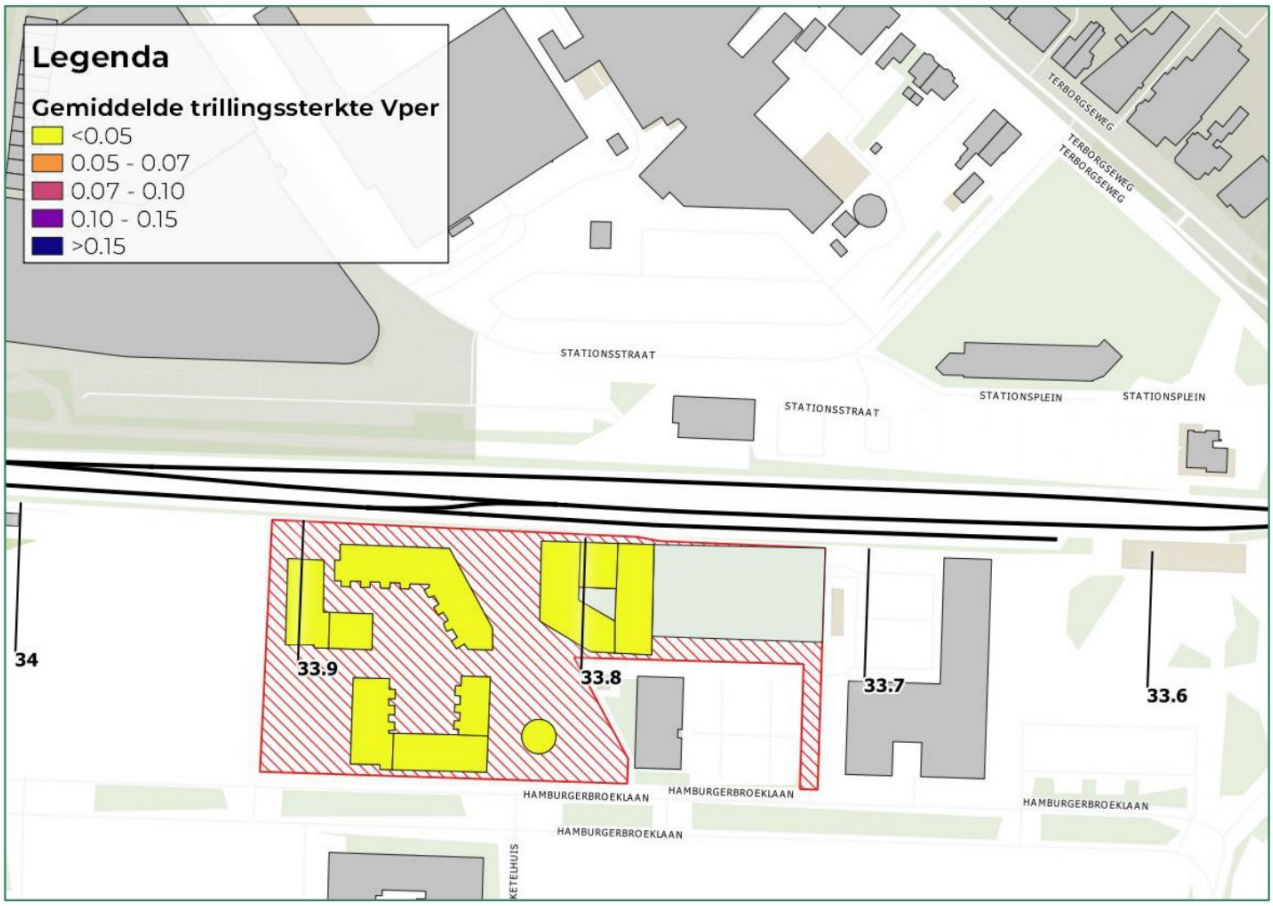
De resultaten per gebouw zijn weergegeven in Figuur 7, Figuur 8 en Figuur 9. Uit het onderzoek zijn de volgende conclusies te trekken:

1. Bij conventionele bouw (kalkzandsteen of betonnen constructie, betonnen vloeren) voldoen de trillingen aan het beoordelingskader. Bij houtskeletbouw en gebouwen met een lichte

fundering zijn incidentele overschrijdingen mogelijk in de dagperiode in twee bouwblokken dichtbij het wissel.

2. De trillingen in de dag- en avondperiode zijn significant hoger dan in de nachtperiode. Dit komt doordat treinen over het wissel in spoor 2 maatgevend zijn, dit spoor is in de nachtperiode niet in gebruik. In de dag- en avondperiode zijn de streefwaarden voor trillingshinder soepeler.
3. Er zijn meerdere varianten onderzocht. Uit deze variantenstudie blijkt het volgende:
    a. Vooral de eigenfrequentie van de vloer heeft veel invloed op de trillingen. Hoe stijver de vloer (dikkere vloer, kortere overspanning) hoe lager de trillingen.
    b. Ook een zware fundering (parkeerkelder, dikke plaatfundering, zware paalfundering) zorgt voor lagere trillingen.
    c. Betonnen bouw (i.h.w.g.) zorgt voor de laagste trillingen, maar ook in constructies van prefab beton of kalkzandsteen en metselwerk wordt voldaan aan het beoordelingskader.
    d. Alleen bij houtskeletbouw en een lichte fundering zijn er incidentele overschrijdingen van de streefwaarden mogelijk.

Figuur 7 Ondergrens (links) en bovengrens (rechts) van de trillingssterkte V_{max} per gebouw. Boven voor de dag- en avondperiode, onder voor de nachtperiode voor gebouwen met betonnen vloeren



Figuur 8 Bovengrens van de gemiddelde trillingssterkte V_{per} per gebouw

Figuur 9 Beoordeling van de trillingen

4.3. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Uit dit onderzoek volgt dat de trillingen in de geplande gebouwen voldoen aan de streefwaarden uit het beoordelingskader, mits gebruik wordt gemaakt van betonnen vloeren. Bij een constructie van houtskeletbouw en een lichte fundering, zijn overschrijdingen mogelijk in de gebouwen dichtbij het spoor door treinen die over het wissel rijden (spoor 2).

Tenslotte geldt nog dat toekomstige intensiveringen van het treinverkeer er mogelijk toe zullen leiden dat spoor 2 vaker wordt gebruikt, en ook in de nachtperiode. In dat geval zijn er ook bij constructies met kalkzandsteen en metselwerk incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader mogelijk, vooral bij een lichtere fundering op staal.

Voor een toekomstvast programma adviseren we daarom het volgende voor de nadere uitwerking:

1. Pas voor de gebouwen binnen 15 meter van het spoor geen houtskeletbouw toe. Als toch wordt gekozen voor houtskeletbouw, dan is nader onderzoek naar trillingen nodig, en mogelijk maatregelen in bijvoorbeeld de fundering (zwaardere fundering of isolerende bekleding van de fundering).
2. Realiseer bouwblokken binnen 15 meter van het spoor bij voorkeur in tunnelbouw (i.h.w.g. beton), zo ontstaat een stijve constructie waarbij ook rekening wordt gehouden met mogelijke toekomstige wijzigingen in het spoorverkeer. Bij andere bouwmethodes adviseren we om nader onderzoek te doen naar trillingen, en eventueel maatregelen af te wegen in de vorm van een zwaardere fundering, isolerende bekleding van de fundering of het toepassen van dikkere vloeren.

Met bovenstaande adviezen kan in alle woningen binnen het plangebied worden voldaan aan de streefwaarden uit het beoordelingskader. Daarmee is een aanvaardbaar woon- en leefklimaat t.a.v. trillingen in de gebouwen te bereiken.

BIJLAGEN

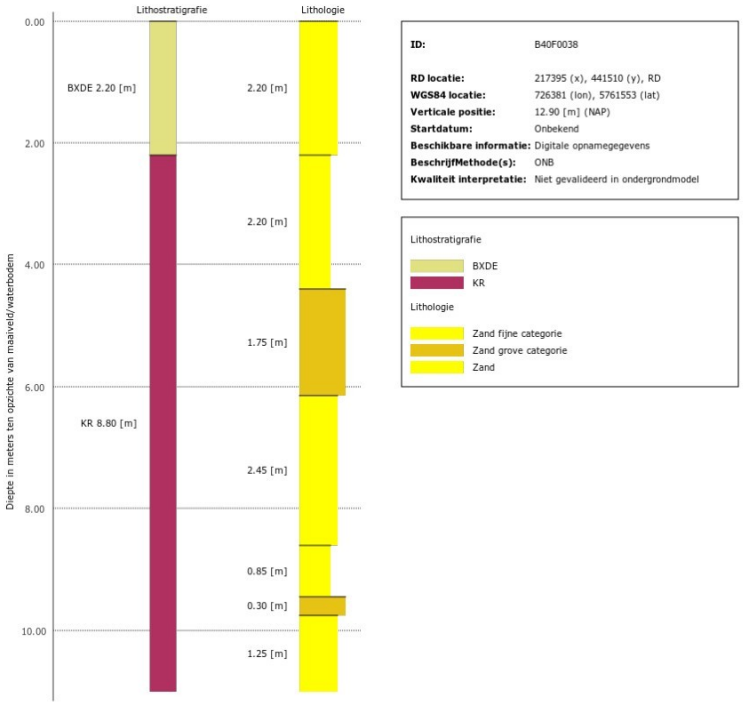
Dit document bevat de volgende bijlages:

I. **Bijlage I - Grondonderzoek**. Hier staan uitgangspunten t.a.v. de gehanteerde bodemopbouw voor dit onderzoek.
II. **Bijlage II - Rekenmodel**. Hier staat een beschrijving van het gebruikte rekenmodel, inclusief tussenresultaten en gegevens over de validatie van het model.
III. **Bijlage III - Metingen**. Deze bijlage bevat detailresultaten met grafieken en overzichten van de uitgevoerde trillingsmetingen.

II. GRONDONDERZOEK

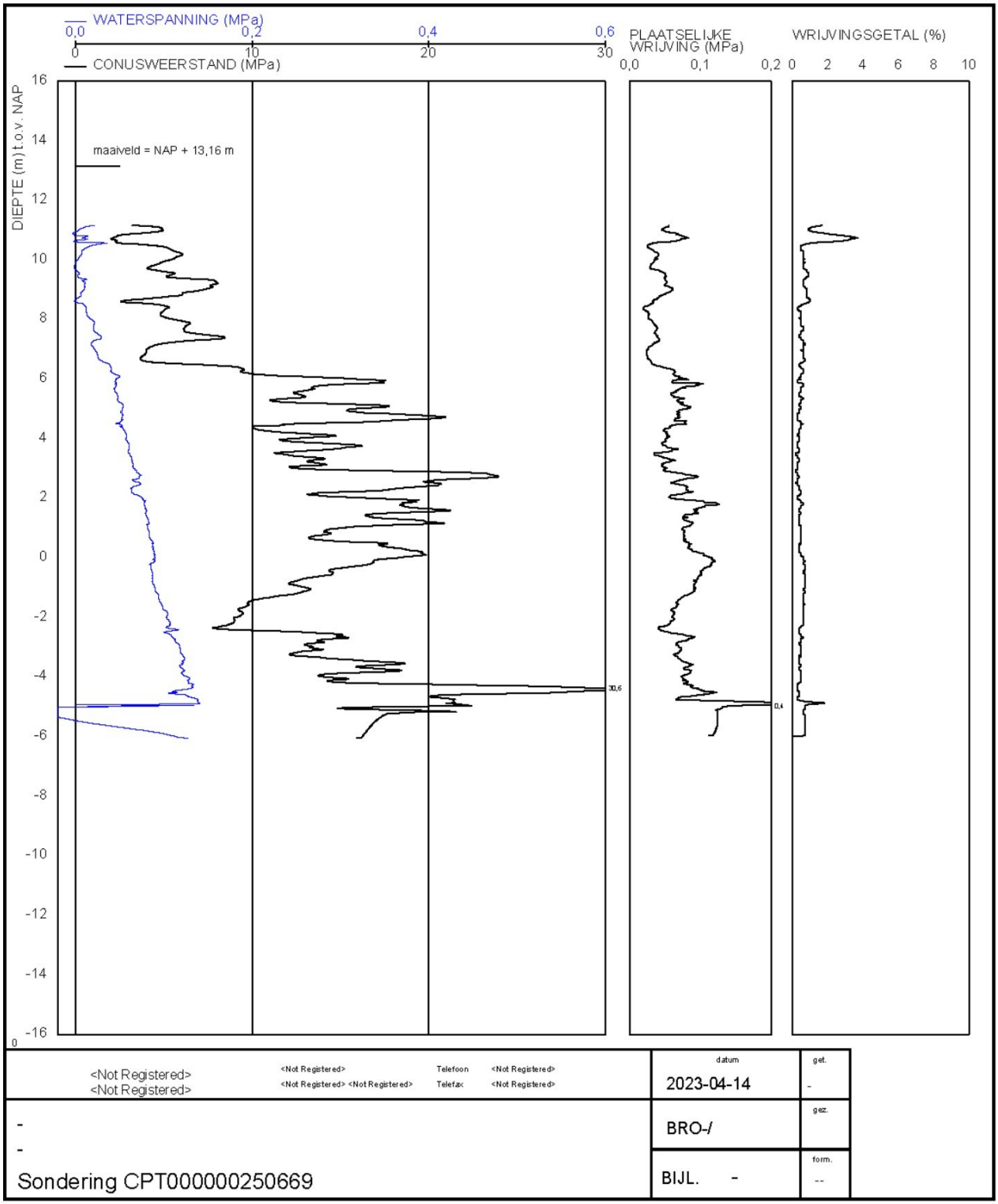
Deze bijlage bevat geotechnische achtergrondinformatie. Deze informatie is gebruikt om bijvoorbeeld de uitdemping van de trillingen met de afstand te bepalen. Daarnaast is deze informatie gebruikt in het rekenmodel waarmee de dynamische eigenschappen van de bebouwing worden bepaald.

Een grondboring in de nabijheid van het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur 10. Uit de grondboring blijkt dat de bodem is opgebouwd uit zand.



Figuur 10 Boring uit de buurt van het onderzoeksgebied

De sonderingen uit de omgeving geven een vergelijkbaar beeld, zie Figuur 11, met een draagkrachtig zandpakket.



Figuur 11 Sondering in de buurt van het onderzoeksgebied

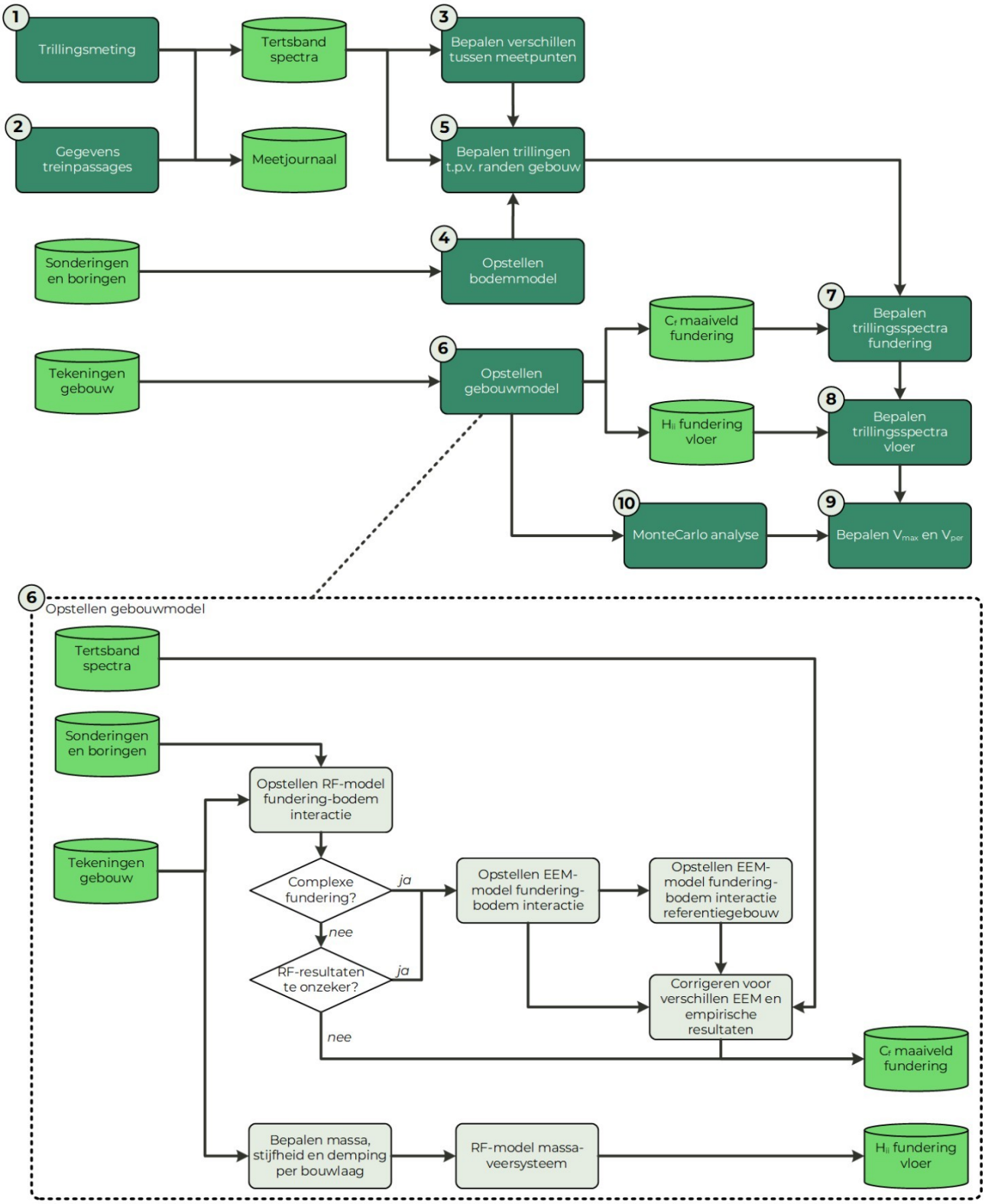
II. REKENMODEL

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

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

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

In deze bijlage beschrijven we ons model en de validatie van het model. Visueel is het rekenproces weergegeven in Figuur 12, hieronder beschrijven we per stap de methode en geven we zoveel mogelijk tussenresultaten. De nummers in de figuur corresponderen met de subparagrafen hieronder.



Figuur 12 Stappen in rekenmodel

II.1 TRILLINGSMETING

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

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

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

II.2 GEGEVENS TREINPASSAGES

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

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

II.3 BEPALEN VERSCHILLEN TUSSEN MEETPUNTEN

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

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

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

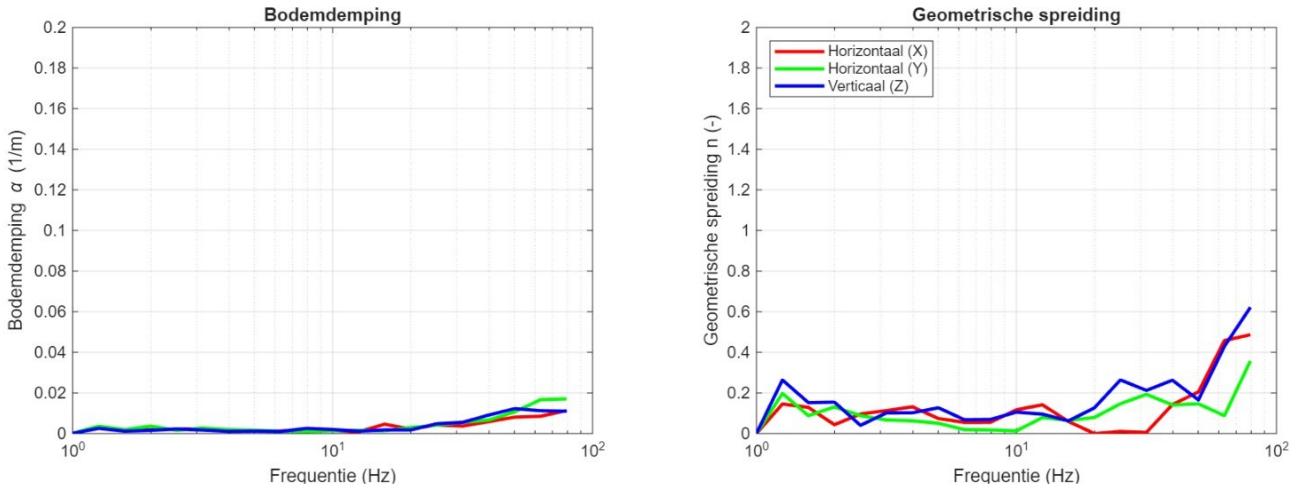
In deze vergelijking staat V voor de trillingssnelheid, f voor de frequentie, r voor de afstand tot de trillingsbron, r_0 voor de referentieafstand (hier 20 m), n voor de geometrische spreidingsfactor en α voor de bodemdemping. De parameters V_0, n en α worden bepaald met de kleinste kwadratenmethode.

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 α 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 13.



Figuur 13 Bodemdemping α (links) en geometrische spreiding n (rechts) als functie van de frequentie, bepaald met random forestmodel

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

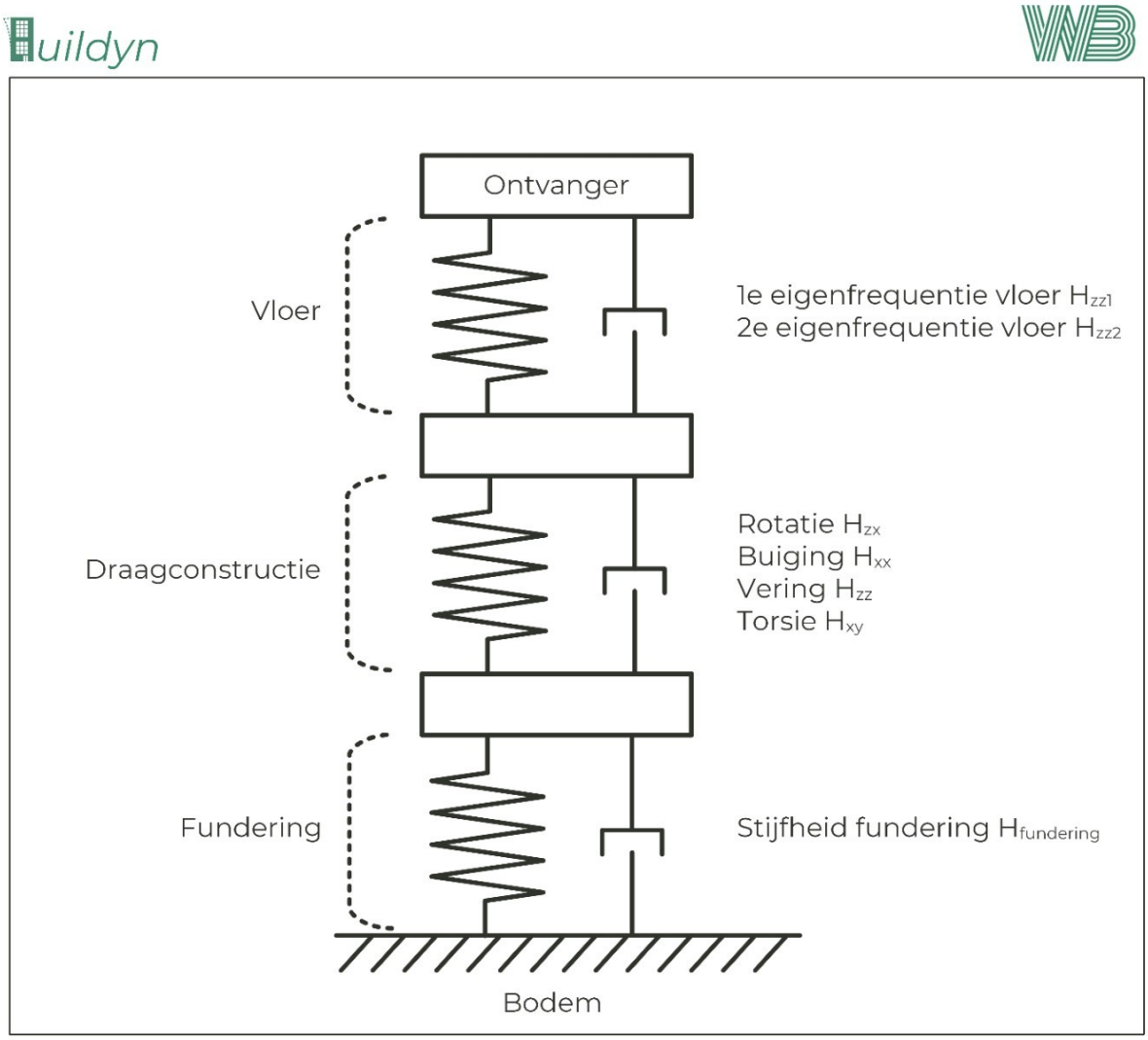
Op basis van de resultaten uit stap 3 en 4, en met behulp van vergelijking 1, worden vervolgens de trillingsspectra in het gehele plangebied bepaald. De invloed van puntbronnen wordt separaat meegenomen, waarbij de trillingen van de puntbronnen energetisch worden opgeteld bij de trillingen van het doorgaande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

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

II.6 OPSTELLEN GEBOUWMODEL

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

In Buildyn wordt een gebouw gemodelleerd door middel van gekoppelde massa-veersystemen, zie Figuur 14, 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 14 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 5. Voor materialen met een niet-lineaire elasticiteit zoals rubber en EPS maken we gebruik van spanning-rekkrommes om de materiaaleigenschappen te beschrijven.

Tabel 5 Initiële modelparameters

Materiaal	E-modulus E	Demping ζ	Dichtheid ρ	Poissons ratio ν
Beton C30/37	33 GPa	3 %	2500 kg/m³	0,20
Beton C55/67	38 GPa	3 %	2500 kg/m³	0,20
Beton C80/95	42 GPa	3 %	2500 kg/m³	0,20
Metselwerk	8 GPa	4 %	1800 kg/m³	0,25
Staal	210 GPa	1 %	700 kg/m³	0,30
Hout	13 GPa	5 %	7850 kg/m³	0,40

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

II.6.1 FUNDERING

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

- Type fundering (op staal, op palen, oude strokenfundering) en afmetingen daarvan (denk aan paaltype (geboord, prefab), paallengte, paaldiameter en aantal palen, of dikte van de funderingsbalken)
- Afmetingen en gewicht van het gebouw
- Bodem waarop het gebouw staat
- Eventuele afscherming of isolatie van de fundering

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

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

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

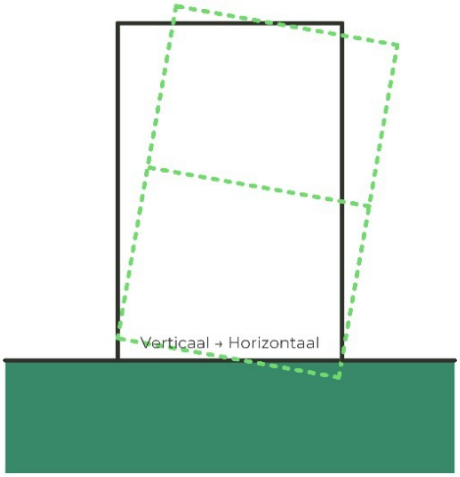
1. Eerst bepalen we met behulp van een random forest algoritme de frequentie-afhankelijke overdracht van maaiveld naar fundering op de randen van het gebouw. Als input gebruiken we hierbij de opbouw van de bodem (vanuit sonderingen), de massa van het gebouw en de eigenschappen van de fundering (aantal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

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

II.6.2 GEBOUWCONSTRUCTIE

De trillingen worden door de draagconstructie vaak versterkt. Hierbij zijn meerdere effecten te onderscheiden, waarbij met name rotatie van het gebouw als geheel (op de ondergrond), doorbuiging en vering van het gebouw op zijn fundatie een rol spelen. Bij hogere of slappere gebouwen speelt ook doorbuiging en torsie (rotatie om een verticale as in het gebouw) een rol.

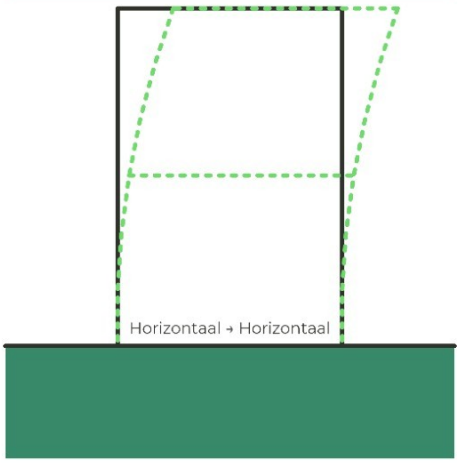
Het principe van rotatie is rechts weergegeven. Verticale trillingsgolven zorgen voor rotatie van het gebouw, waardoor met name in hogere gebouwen horizontale trillingen ontstaan.



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

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

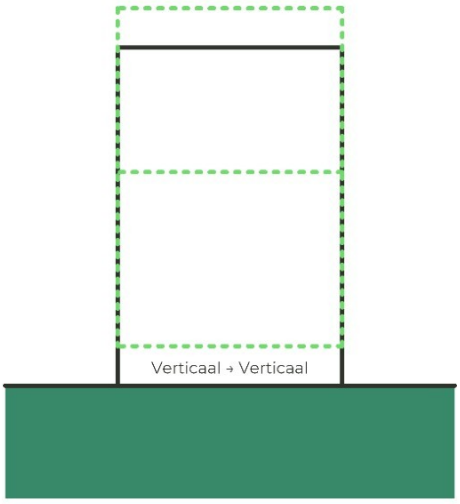
Het tweede principe, dat van doorbuiging van het gebouw, is rechts weergegeven (eerste eigenfrequentie). Hierbij zijn met name de horizontale trillingsgolven maatgevend, die bij slappere gebouwen zorgen voor doorbuiging van het gebouw, en daarmee voor horizontale trillingen hoger in het gebouw.



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

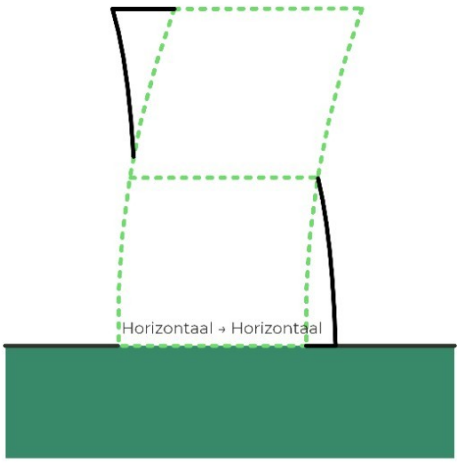
- Afmetingen van het gebouw
- Constructietype (stijfheid, starheid van verbindingen, open ruimtes)
- Gebruikte materialen

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



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

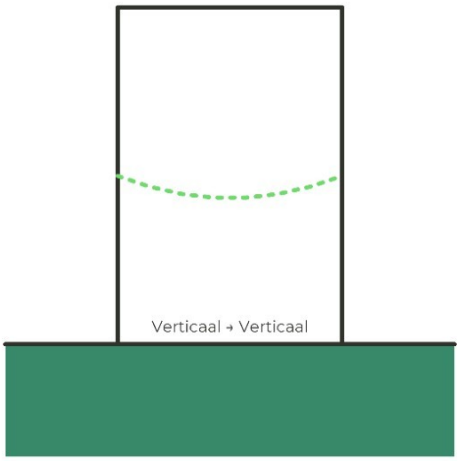
Het vierde principe, dat van torsie van het gebouw, is rechts weergegeven (eerste eigenfrequentie). Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappere constructie. Dit effect noemen we H_{xy}, en is afhankelijk van:



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

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

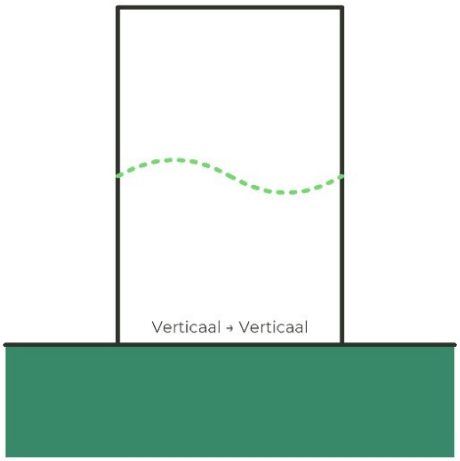
De eerste buigmodus van de vloer (bij de eerste eigenfrequentie) is simpele doorbuiging, zoals weergegeven in de principeschets rechts. Met name de eigenfrequentie (de frequentie waarvoor de vloer gevoelig is) en de demping bepalen in hoeverre de trillingen worden opgeslingerd. De trillingen zijn het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



Dit effect noemen we H_{zz1}, en is afhankelijk van:

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

Bij de tweede buigmodus van de vloer (bij de tweede eigenfrequentie) zijn de trillingen maximaal op ongeveer ¼ van het vloerveld, zie de principeschets rechts.



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

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

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

1. Eerst bepalen we per bouwlaag van het gebouw de eigenschappen van die bouwlaag. Denk hierbij aan afmetingen, maar ook aan eigenschappen als de stijfheid (buig- en torsiestijfheid, elasticiteitsmodulus) en demping (op basis van de toegepaste materialen en verbindingen).
2. Vervolgens modelleren we het gebouw door voor elke bouwlaag de mechanische eigenschappen in een soort beam element model toe te voegen (zie Figuur 14). Op basis van de configuratie (aantal bouwlagen) en de ingevoerde eigenschappen berekent het random forest algoritme vervolgens de frequentieafhankelijke trillingsresponsie van het gebouw tot aan de vloeropleggingen, en de onzekerheid in die responsie. Hiermee ontstaat een trillingsoverdracht in het gebouw die zo goed mogelijk aansluit bij de in de praktijk te verwachten trillingsoverdracht, en bij de werkelijke omstandigheden zoals gemeten in de praktijk (denk aan de werkelijke stijfheid van opleggingen, de werkelijke demping en de werkelijke stijfheid van het materiaal).
3. Tenslotte bepalen we de overdracht van de oplegging van de vloeren naar rekenpunten op de vloer, waar de werkelijke hinder wordt ervaren. Eerst maken we een model van het vloerveld om de overdracht van de oplegging naar het midden van de vloer te bepalen. Hiervoor combineren we analytische formules (bij complexer gevormde vloervelden doen we dit via een iteratief proces) om de responsie van de vloer in het frequentiedomein te bepalen. De mechanische eigenschappen in deze formules (demping, stijfheid) volgen uit het random forest algoritme, en zijn dus gebaseerd op praktijkdata. We bepalen we resultaten in de hoeken van vloervelden, in het midden van de vloervelden en op een kwart van de overspanning. Meestal is het midden van het vloerveld voor trillingen maatgevend.

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

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

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

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

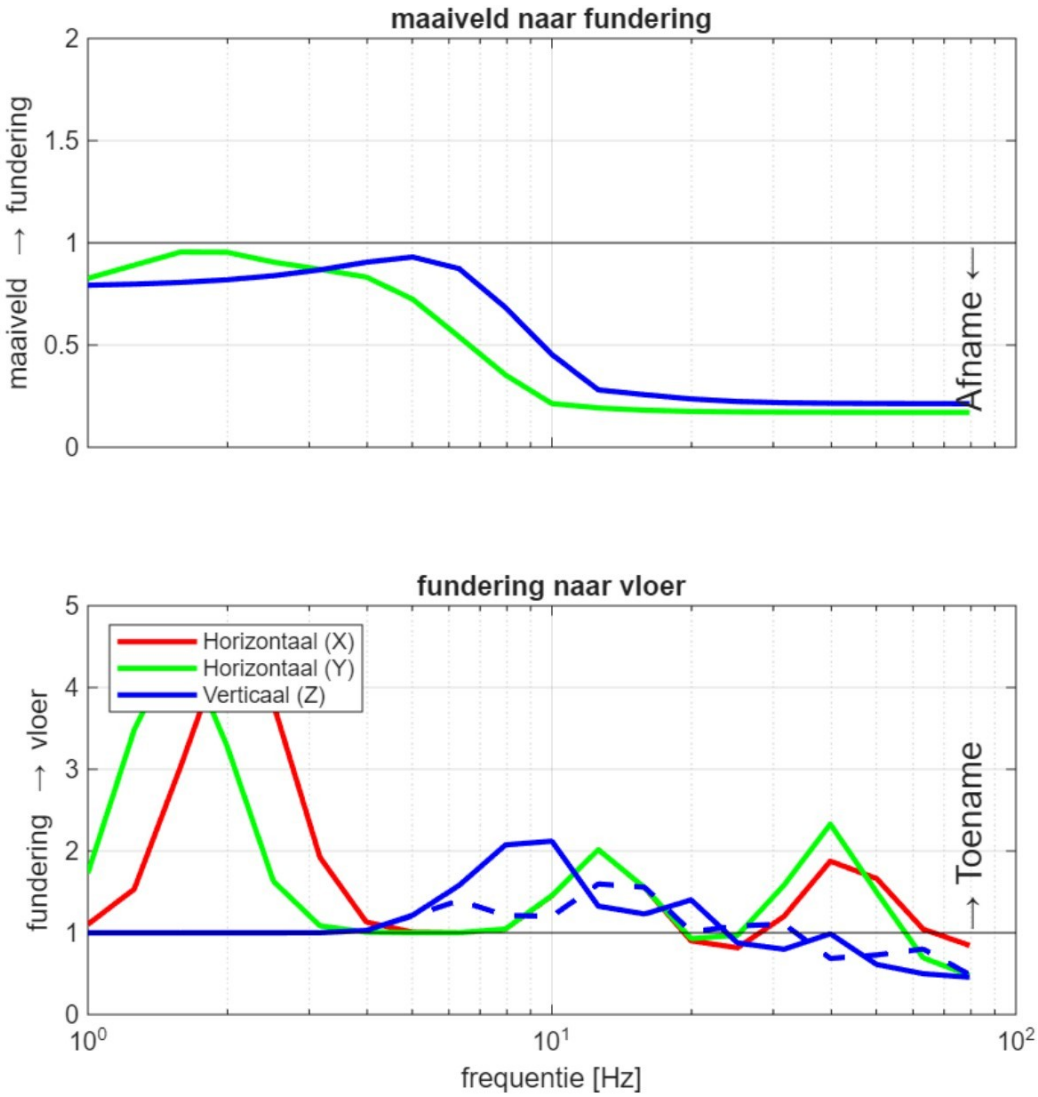
Hierin zijn $C_{f,ii}$ de frequentie-afhankelijke overdrachten van maaiveld naar fundering, zoals deze volgen uit het model. Dominant hierin zijn vooral de diagonale coëfficiënten. Door vervolgens $V_{i,fundering}(f)$ te delen op $V_{i,mv}$(f) in een hoek van het gebouw ontstaat een beeld van de vaak gepresenteerde overdracht $C_f(f)$ van maaiveld naar fundering, zie Figuur 15.

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 van een maatgevend appartement in één van de onderzochte varianten weergegeven in Figuur 15.



Figuur 15 Gemiddelde overdracht van fundering naar het maatgevende punt op bovenste verdieping van appartement bij wissel, beukmaat van 5.5 meter, 250 mm breedplaatvloer en betonnen draagconstructie (i.h.w.g.). Doorgaande lijn verticaal is midden vloer, onderbroken lijn is op ¼ en ¾ van overspanning

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

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

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

2. We berekenen de $V_{i,max,rms}$ op basis van het trillingsspectrum op de vloer en vanuit het originele meetpunt (op maaiveld of de fundering), waarna we de verhouding tussen die twee bepalen en de gemeten $V_{i,max}$ hiermee corrigeren. Hiermee krijgen we een zo nauwkeurig mogelijke inschatting van $V_{i,max}$ op de vloer in het geplande gebouw. Deze methode is gebaseerd op de methode zoals gebruik in de *Beleidsregel trillinghinder spoor* (Bts), waar de V_{max} ook wordt berekend op basis van de V_{rms}[6]
3. We berekenen de maximale trillingssterkte per vloer, door over alle meetrichtingen heen (X, Y en Z) en over alle rekenpunten op de vloeren heen het maximum te bepalen.
4. Vervolgens berekenen we conform de procedure uit de SBR B-richtlijn de gemiddelde trillingssterkte V_{per}.

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

II.10 OMGAAN MET ONZEKERHEDEN

Zoals in paragraaf 3.3.5 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 3.3.5 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.

---

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

II.11 VALIDATIE VAN HET REKENMODEL

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

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

II.11.1 VALIDATIEMETHODE

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

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

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

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

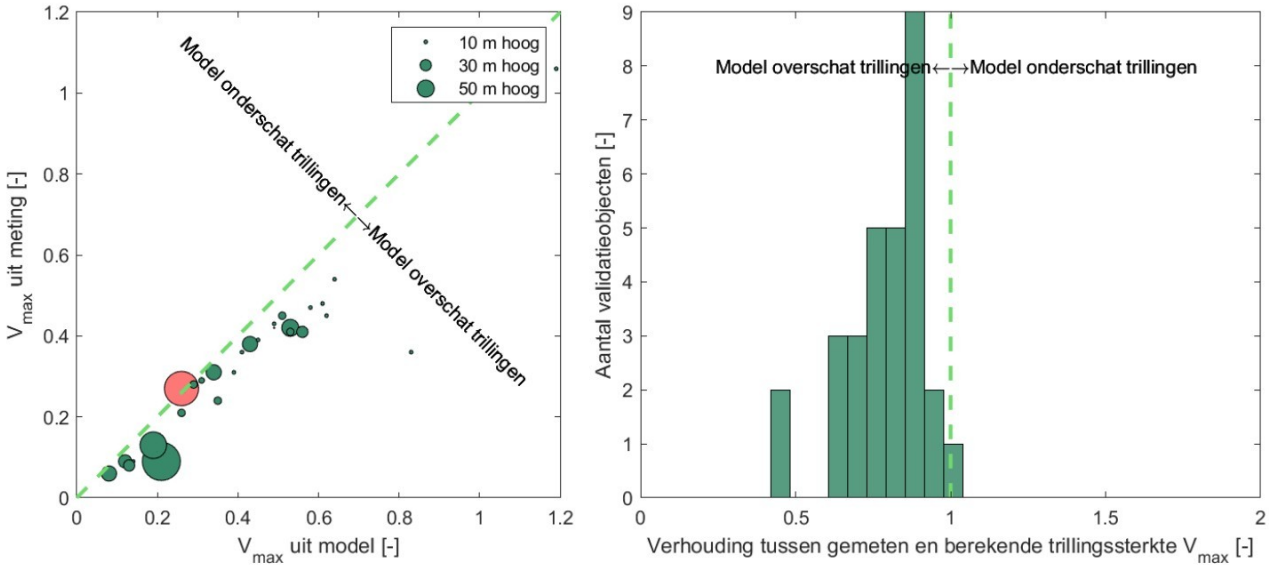
II.11.2 VALIDATIECASES

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

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

Het model is tot nu toe gevalideerd voor 30 gebouwen. De vooraf berekende trillingssterkte en de achteraf gemeten trillingssterkte voor deze 30 gebouwen is weergegeven in Figuur 16. De grootte van de bolletjes schaalt met de hoogte van het gebouw. In 1 van de 30 cases was het model niet conservatief genoeg. In alle andere gevallen was het model voldoende conservatief. Voor deze 30 validatiecases haalt het model de beloofde 95% betrouwbaarheid dus ruim (97% van de gevallen heeft een lagere trillingssterkte dan vooraf berekend).

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

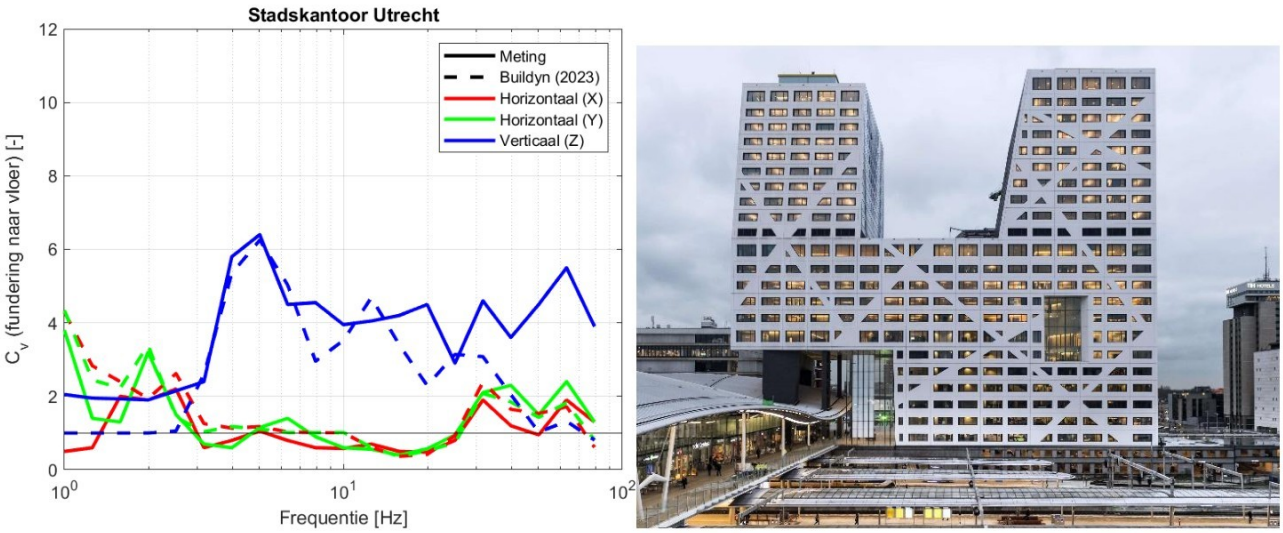


Figuur 16 Gemeten vs. vooraf berekende trillingssterkte (links) en histogram van de afwijking tussen model en gemeten trillingen (rechts).

II.11.3 VOORBEELDEN

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

Het eerste gebouw is het Utrechtse Stadskantoor, een constructie met stalen diagonalen, een betonnen kern en betonnen vloeren. De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 17.



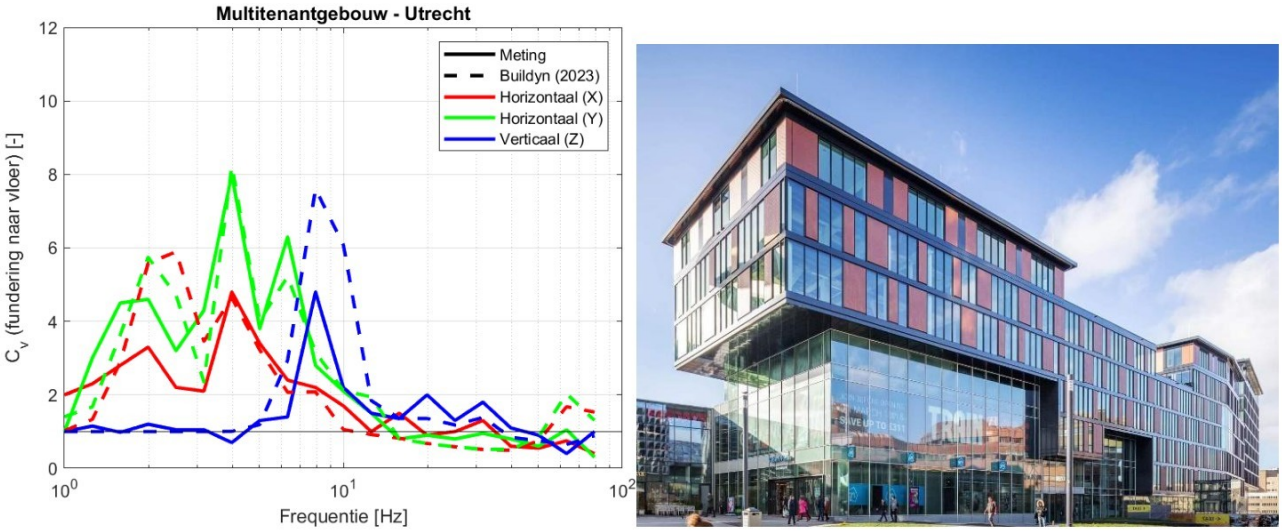
Figuur 17 Stadskantoor in Utrecht, links de gemeten en berekende overdrachten, rechts een foto van het gebouw

De belangrijkste verschillen tussen model en meting zijn:

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

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

Het tweede gebouw is het Noordgebouw in Utrecht, een constructie met stalen kolommen en Comflorvloeren. De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 18.



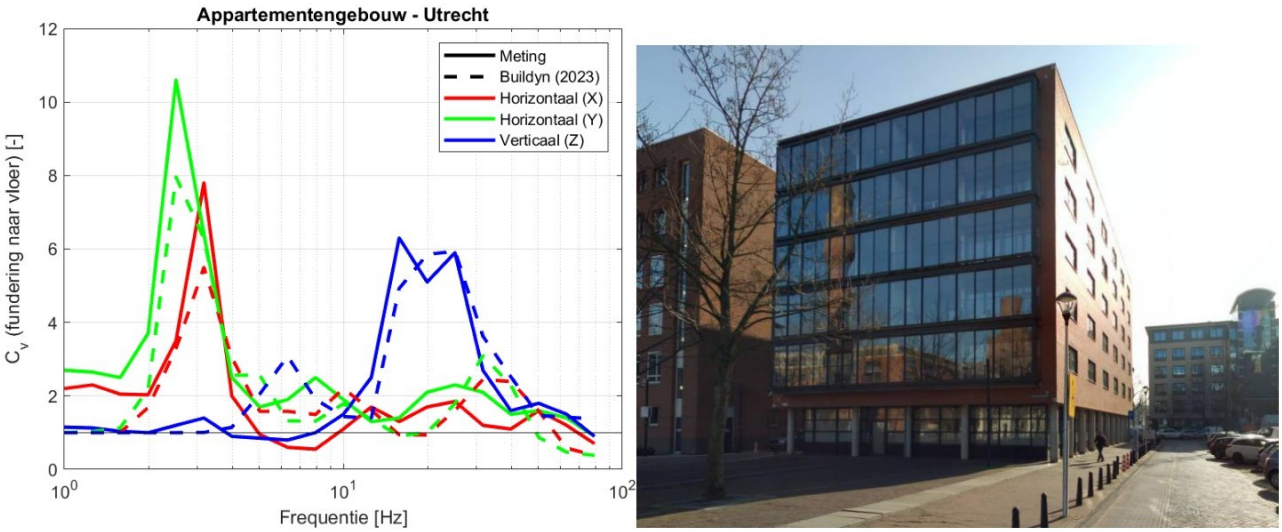
Figuur 18 Noordgebouw in Utrecht, links de gemeten en berekende overdrachten, rechts een foto van het gebouw

Hier zien we wat grotere verschillen tussen model en meting:

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

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

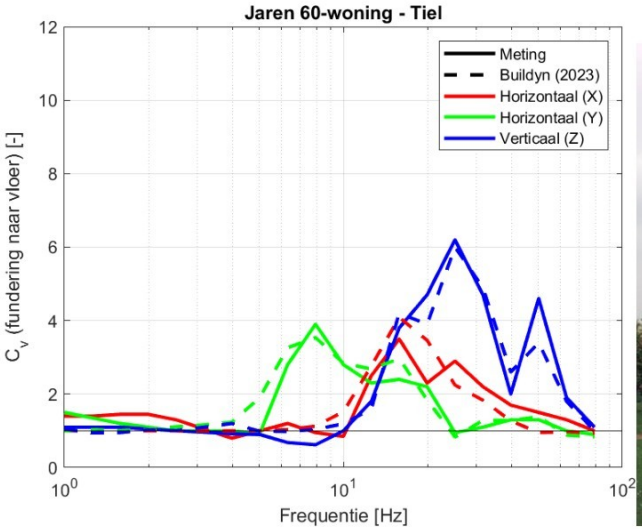
Het derde gebouw is een appartementengebouw in Utrecht, een constructie met prefab betonnen wanden, breedplaatvloeren en onderin een open kolommenstructuur. De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 19.



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

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

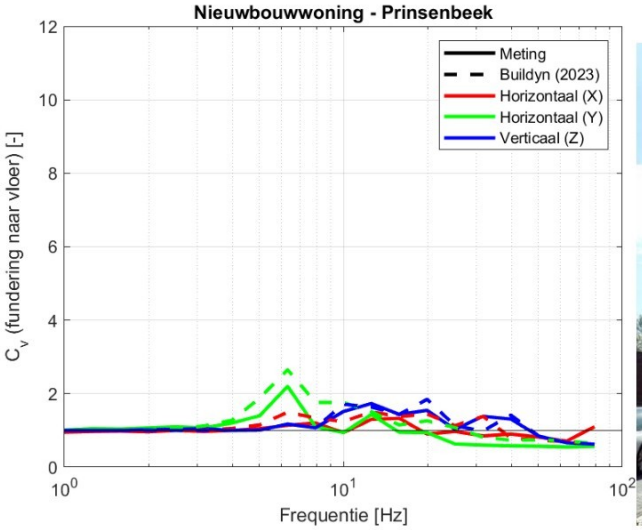
Het vierde gebouw is een wat oudere woning in Tiel, opgebouwd uit een conventionele constructie van metselwerk en met houten vloeren. De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 20.



Figuur 20 Vrijstaande woning in Tiel, links de gemeten en berekende overdrachten, rechts een foto van het gebouw

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

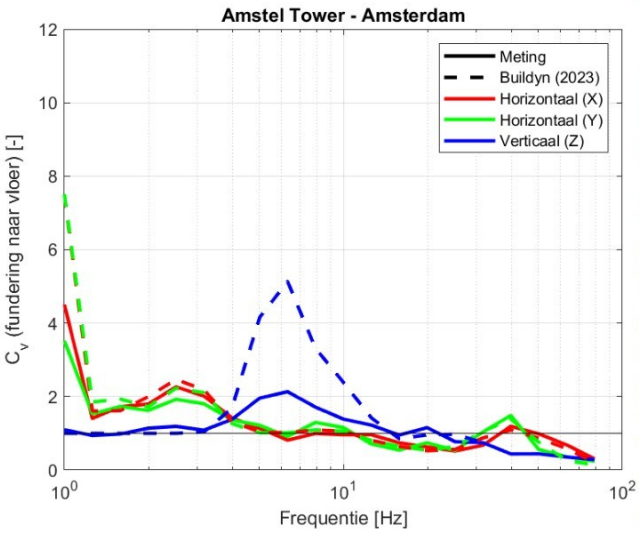
Het vijfde gebouw is een vrijstaande woning in Prinsenbeek, opgebouwd uit prefab beton en afgewerkt met metselwerk. De vloeren bestaan uit leidingplaatvloeren met een 80 mm smeervloer. De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 20.



Figuur 21 Twee-onder-een-kapwoning in Prinsenbeek, links de gemeten en berekende overdrachten, rechts een foto van het gebouw

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

Het zesde gebouw is de Amstel Tower in Amsterdam, een ruim 100 meter hoge woontoren op een commerciele plint, gebouwd uit in het werk gestort beton met breedplaatvloeren. De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 22.



Figuur 22 Amstel Tower in Amsterdam, links de gemeten en berekende overdrachten, rechts een foto van het gebouw

De belangrijkste verschillen tussen model en meting zijn:

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

III. METINGEN

Deze bijlage bevat gegevens over de metingen.

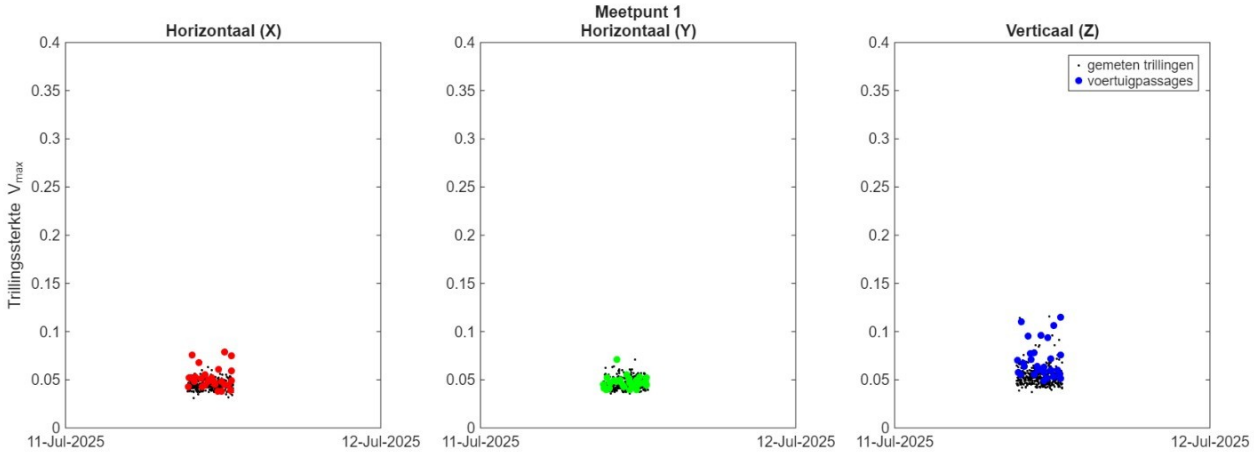
III.1 GEGEVENS METINGEN

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

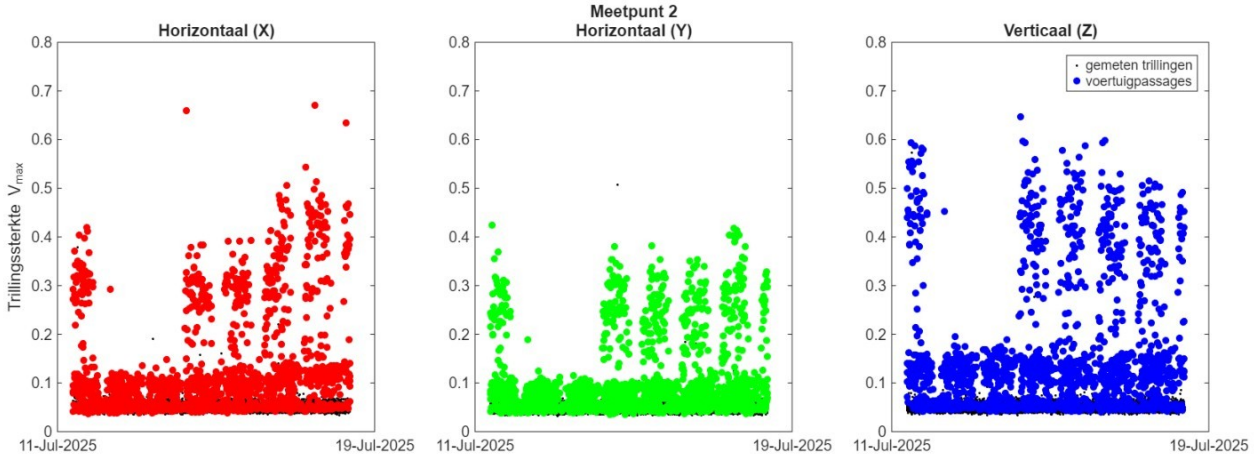
1	*Uitvoerende partij*	Alcedo B.V. Ondernemersweg 3 7451PK Holten
	Verantwoordelijke	[redacted]
2	*Meting uitgevoerd door*	[redacted]
3	*Datum en tijd metingen*	17 tot 25 juli 2025
4	*Trillingsbron*	Treinen
5	*Classificatie gebouw*	Zie paragraaf 3.2
6	*Locatie metingen*	Zie Figuur 3
7	*Geotechnische gegevens*	Zie bijlage I
8	*Locaties meetpunten en meetrichtingen*	Zie Figuur 3, tenzij anders vermeld: X-richting loodrecht op de trillingsbron Y-richting parallel aan trillingsbron Z-richting verticaal
9	*Gebruikte apparatuur*	FrogWatch opnemers. Zie een uitgebreide toelichting van de specificaties op https://www.frog.watch/facts/.
10	*Gemeten trillingen*	Zie bijlage III.2
11	*Motivatie classificatie gebouw*	Op basis van constructietekeningen en gegevens BAG
12	*Overige relevante omstandigheden*	Geen

III.2 RESULTATEN METINGEN

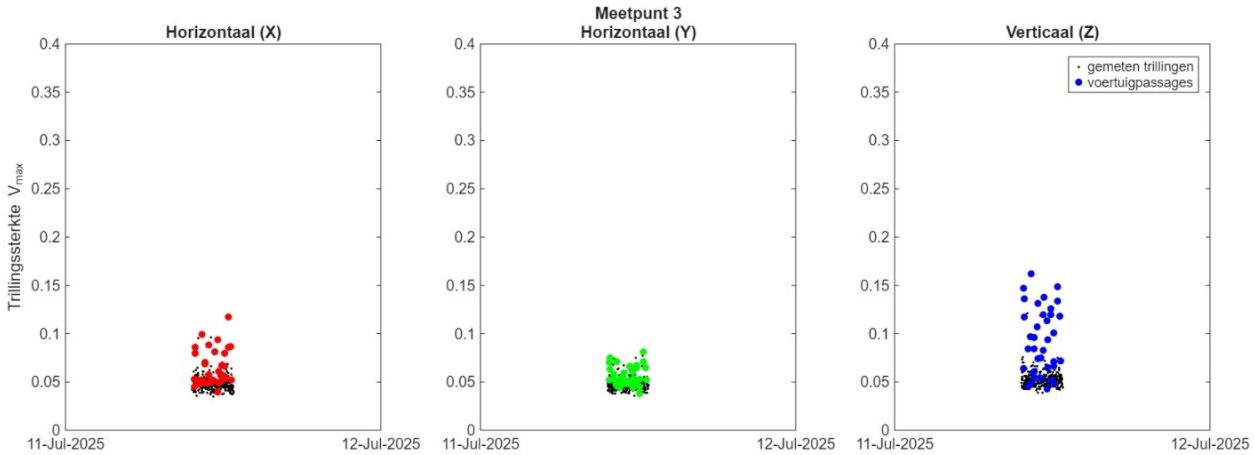
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



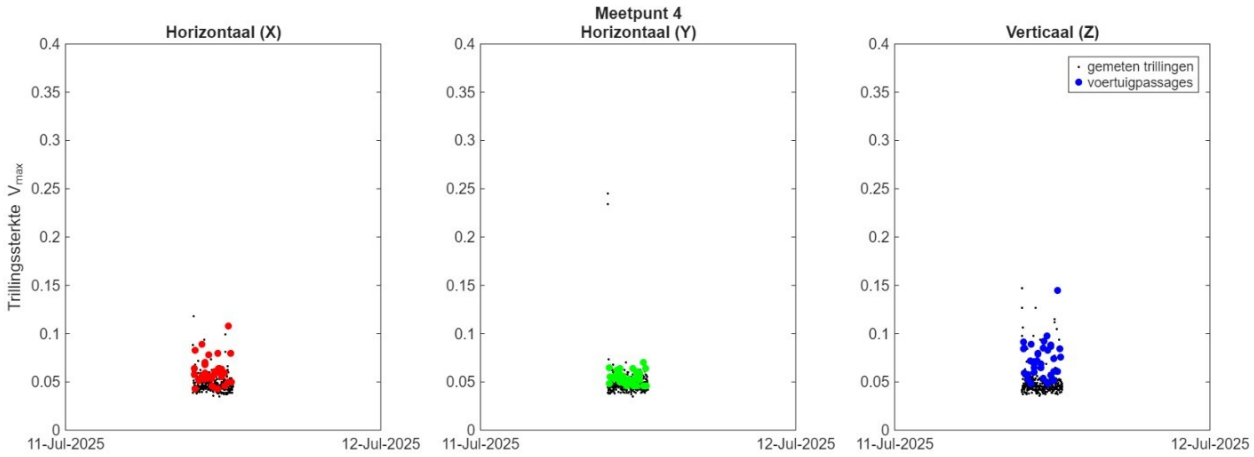
Figuur 23 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (maaiveld, oostzijde plangebied)



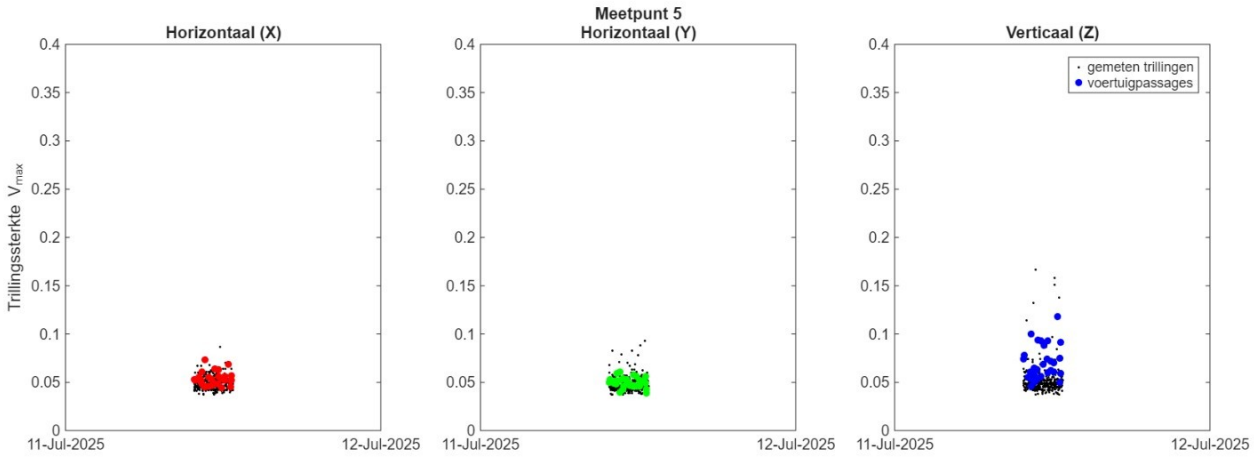
Figuur 24 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (maaiveld, midden plangebied, bij wissel)



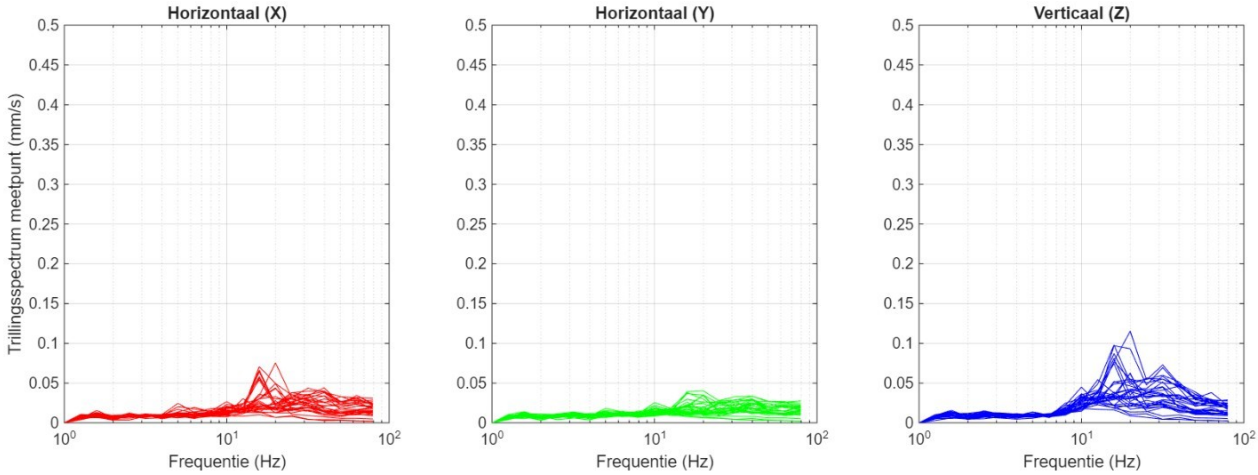
Figuur 25 Gemeten trillingen bij meetpunt 3 (maaiveld, westzijde plangebied)



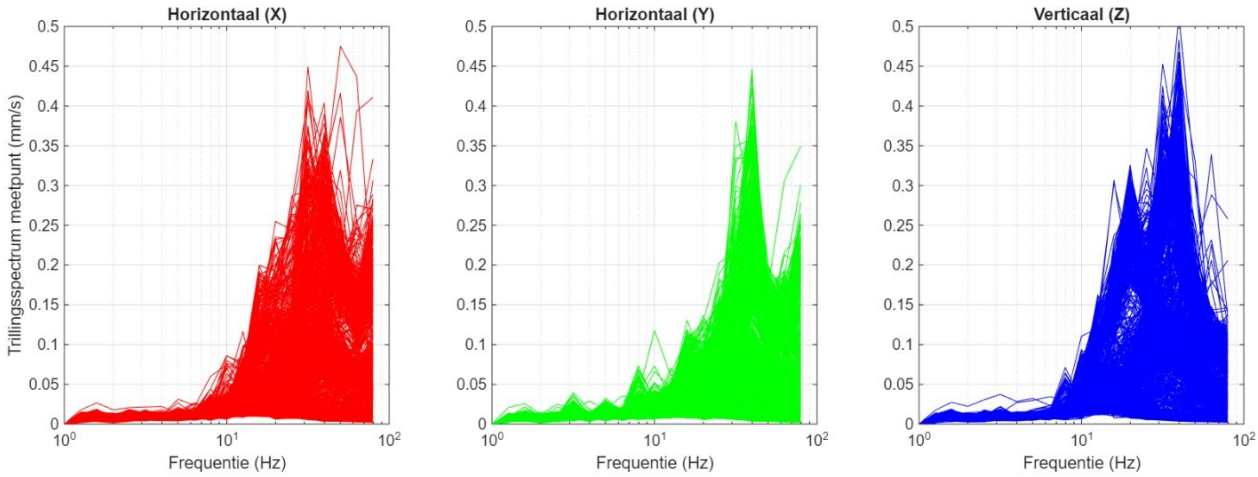
Figuur 26 Gemeten trillingen bij meetpunt 4 (maaiveld, verder bij spoor vandaan)



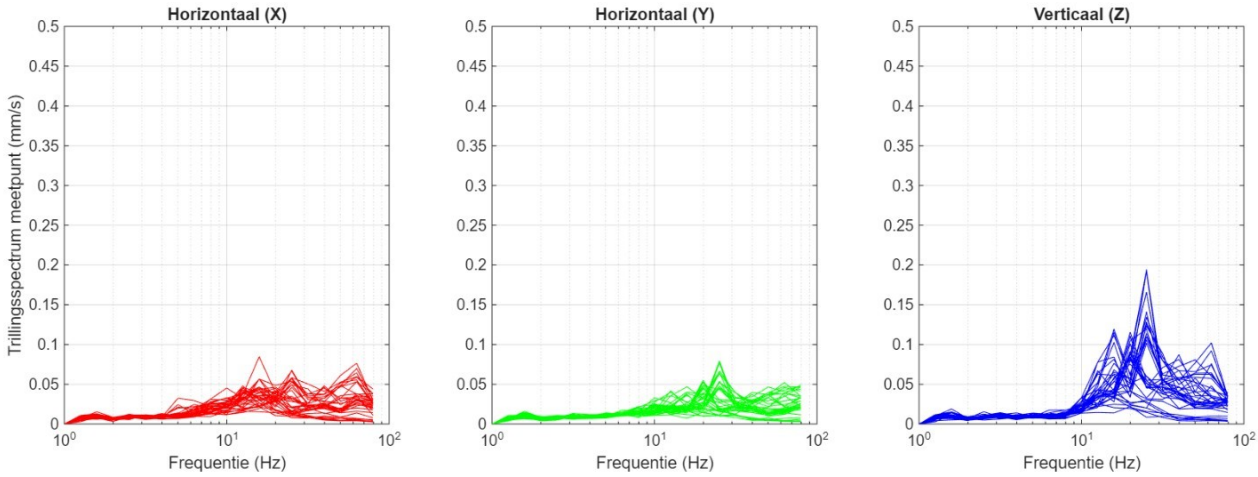
Figuur 27 Gemeten trillingen bij meetpunt 5 (maaiveld, verder bij spoor vandaan)



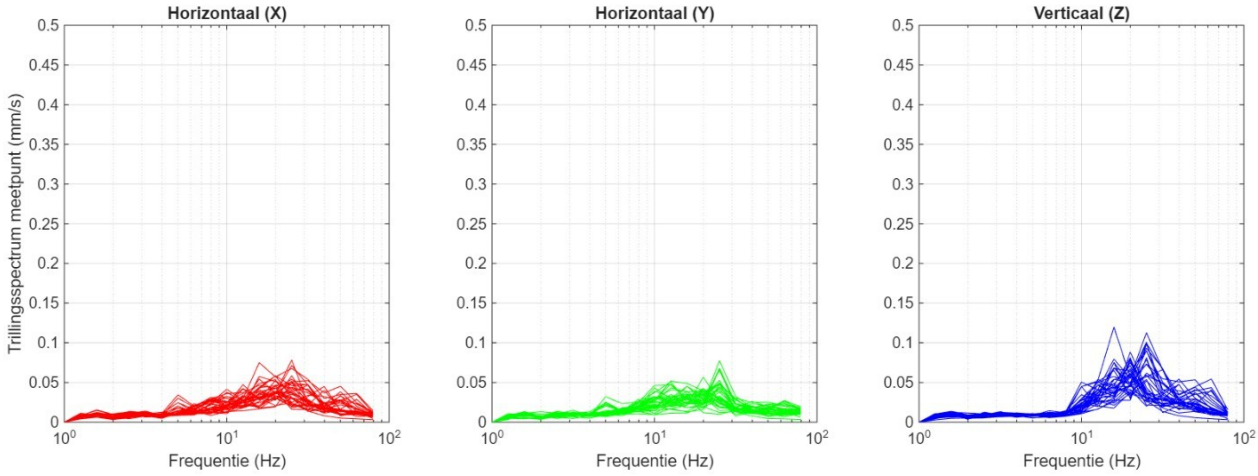
Figuur 28 Tertsbandspectra bij meetpunt 1



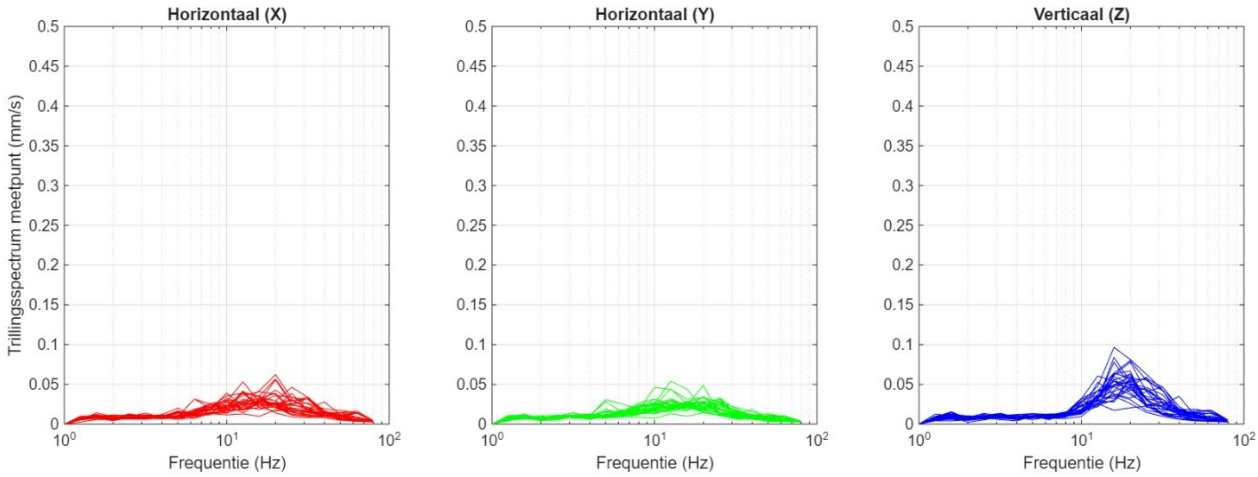
Figuur 29 Tertsbandspectra bij meetpunt 2



Figuur 30 Tertsbandspectra bij meetpunt 3



Figuur 31 Tertsbandspectra bij meetpunt 4

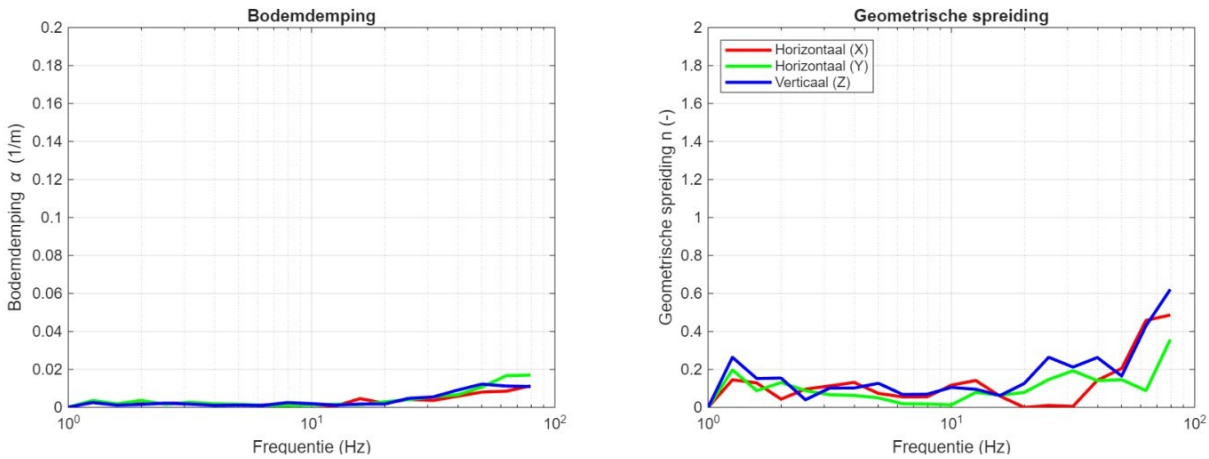


Figuur 32 Tertsbandspectra bij meetpunt 5

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

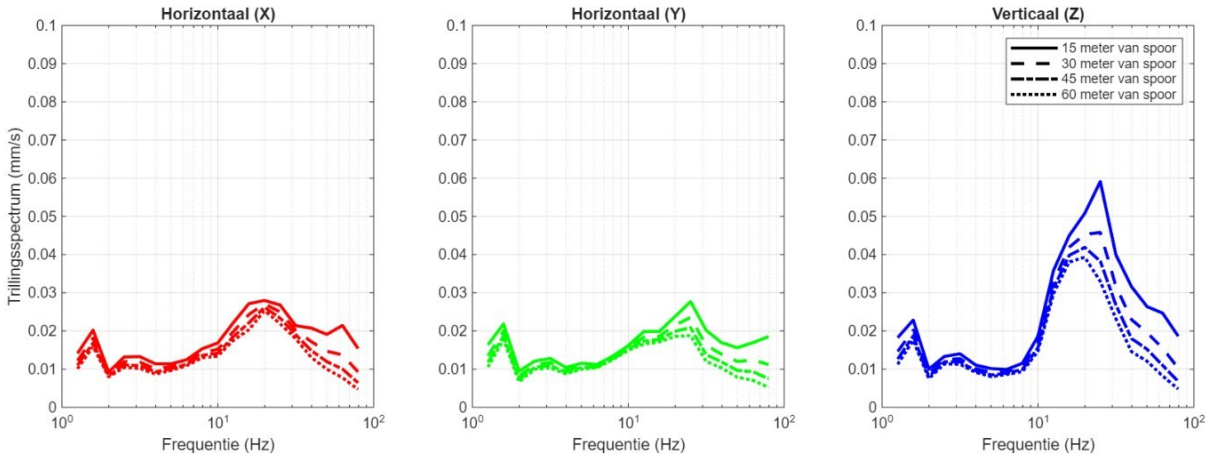
$$V(f,r) = V_0(f,r_0) \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^{n(f)} \cdot e^{-\alpha \cdot (r-r_0)} \qquad (1)$$

In deze vergelijking staat *V* voor de trillingssnelheid, *f* voor de frequentie, *r* voor de afstand tot de trillingsbron, r_0 voor de referentieafstand (hier 20 m), *n* voor de geometrische spreidingsfactor en α voor de bodemdemping. De geometrische spreiding en bodemdemping zijn weergegeven in Figuur 13.



Figuur 33 Bodemdemping α (links) en geometrische spreiding n (rechts) als functie van de frequentie

De gemiddelde trillingsspectra op verschillende afstanden van het spoor zijn weergegeven in Figuur 34. Hier is te zien dat de trillingen maar beperkt uitdempen met de afstand. Vooral vanaf 10 Hz dempen de trillingen sterker uit met de afstand. Door de stijve zandbodem en de lichte treinen zijn de trillingen onder de 10 Hz ook beperkt op deze locatie.



Figuur 34 Gemiddelde trillingsspectra op verschillende afstanden van het spoor