



WEEBOOST

TRILLINGSONDERZOEK T.B.V. NIEUWBOUW

**DR. DORGELOLAAN 20
EINDHOVEN**

COLOFON

Auteur ██████████

Controle en vrijgave ██████████
████████████████████
████████████████████



Projectcode WBD2024-008

Versienr 3.0

Datum 4 april 2024

Status Definitief

Opdrachtgever Lodewijck Groep

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van metingen van



DE KERN VAN DIT RAPPORT

Aan de Dr. Dorgelolaan 20 in Eindhoven wordt de bestaande bebouwing gesloopt, en in plaats daarvan wordt een nieuw gebouw met voornamelijk kantoorruimtes en (minimaal) 7,5% publiekgerichte functie en tinkerspaces. Het gebouw wordt gerealiseerd direct naast de spoorlijn Eindhoven - Weert/Helmond. Daardoor kunnen trillingen van treinverkeer als hinderlijk worden ervaren.

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

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

CONCLUSIES

De belangrijkste conclusie van het onderzoek is dat er overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder mogelijk zijn in het gebouw, maar dat dit sterk afhankelijk is van de constructieve uitwerking.

ADVIES VOOR MAATREGELEN

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

- 1. Maatregelen aan de bron** van de trillingen (het spoor of de treinen) zijn kostbaar en vergen een lange afstemmingsperiode met ProRail, de beheerder van het spoor. De minst kostbare, voldoende effectieve maatregel is een betonplaat met ballastmat onder de 4 sporen waarop goederentreinen vooral rijden, over een lengte van ca. 200 meter per spoor. De kosten van deze maatregel bedragen minimaal € 8 mln.
- 2. Maatregelen in de bodem** zijn ingrijpend en kostbaar, beperken de inrichting van de buitenruimte en kunnen uitsluitend worden gerealiseerd op naastgelegen percelen, zodat afstemming met en grondverwerving van naastgelegen percelen nodig is. Ook de inpasbaarheid is hier lastig, gezien de ligging t.o.v. het spoor. De minst kostbare effectieve maatregel is een trillingsscherm van beton van ca. 10 meter diep, aan één zijde bekleed met minimaal 100 mm dik rubber of een ander slap materiaal. Deze maatregel kost minimaal € 4 mln.

3. Maatregelen aan het gebouw, waarbij vooral het verzwaren van de fundering en het vermijden van opslinging in het gebouw effectieve maatregelen zijn. Dat laatste kan door eigenfrequenties tussen de 5 en 10 Hz in het dragende elementen (liggers, vloeren) te vermijden. Gezien het stadium van het project liggen maatregelen in het gebouw het meest voor de hand.

Gelet op bovenstaande adviseren we het volgende:

- 1.** Kies voor **zware bouw**. Liefst i.h.w.g. beton, bij houtskeletbouw dient gekozen te worden voor een zware constructie met voldoende hoge eigenfrequenties.
- 2.** Kies voor een **zware fundering**. Een lange (minimaal 15 meter lang) paalfundering met dikke palen (minimaal 500 mm) en een parkeerkelder heeft de voorkeur.
- 3.** Kies voor een **stijve vloer**, hierbij geldt:
 - a. Als adviezen **1.** en **2.** worden opgevolgd kies dan voor een vloer met een eigenfrequentie boven de 10 Hz (bij houtskeletbouw boven de 12 Hz).
 - b. Als advies **2.** niet wordt opgevolgd, kies dan voor een vloer met een eigenfrequentie boven de 12 Hz.
- 4.** Vermijd grote overspanningen en slappe staalconstructies in het gebouw. Stalen en betonnen liggers dienen een **eigenfrequentie hoger dan 10 Hz** te hebben.

Met bovenstaande adviezen is een evenwichtige toedeling van functies aan locaties (conform art. 4.2 Ow) en dus een aanvaardbaar verblijfsklimaat t.a.v. trillingshinder in het gebouw te realiseren.

Tenslotte, 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). Aspecten als (1) het aantal overschrijdingen (is hier beperkt tot maximaal 1 per dag), (2) de mate van de overschrijdingen (afhankelijk van constructieve keuzes kan het zijn dat overschrijdingen maar beperkt hoger zijn dan de streefwaarden), (3) de kosten van maatregelen en (4) de technische of uitvoeringsrisico's van maatregelen kunnen daarbij een rol spelen in het al dan niet doelmatig zijn van maatregelen.



INHOUDSOPGAVE

I.	INLEIDING	8
1.1.	Aanleiding	8
1.2.	Doel	8
1.3.	Leeswijzer	8
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 gebouw	20
4.3.	Afweging van maatregelen	21
I.	GRONDONDERZOEK	24
II.	REKENMODEL	26
II.1	Trillingsmeting	26
II.2	Gegevens treinpassages	26
II.3	Bepalen verschillen tussen meetpunten	27
II.4	Opstellen bodemmodel	27
II.5	Opstellen gebouwmodel	28
II.6	Bepalen trillingsspectra t.p.v. randen gebouw	36
II.7	Bepalen trillingsspectra t.p.v. fundering gebouw	36
II.8	Bepalen trillingsspectra t.p.v. vloeren gebouw	36



II.9	Bepalen $V_{\max}$ en V_{per} t.p.v. vloeren gebouw	37
II.10	Omgaan met onzekerheden	38
III.	METINGEN	39
III.1	Gegevens metingen	39
III.2	Resultaten metingen	40

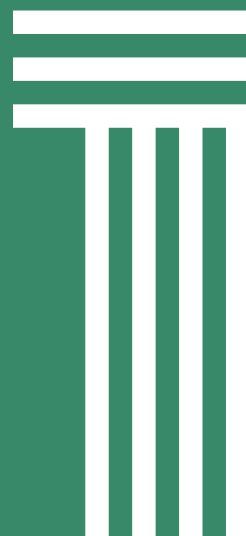




INLEIDING



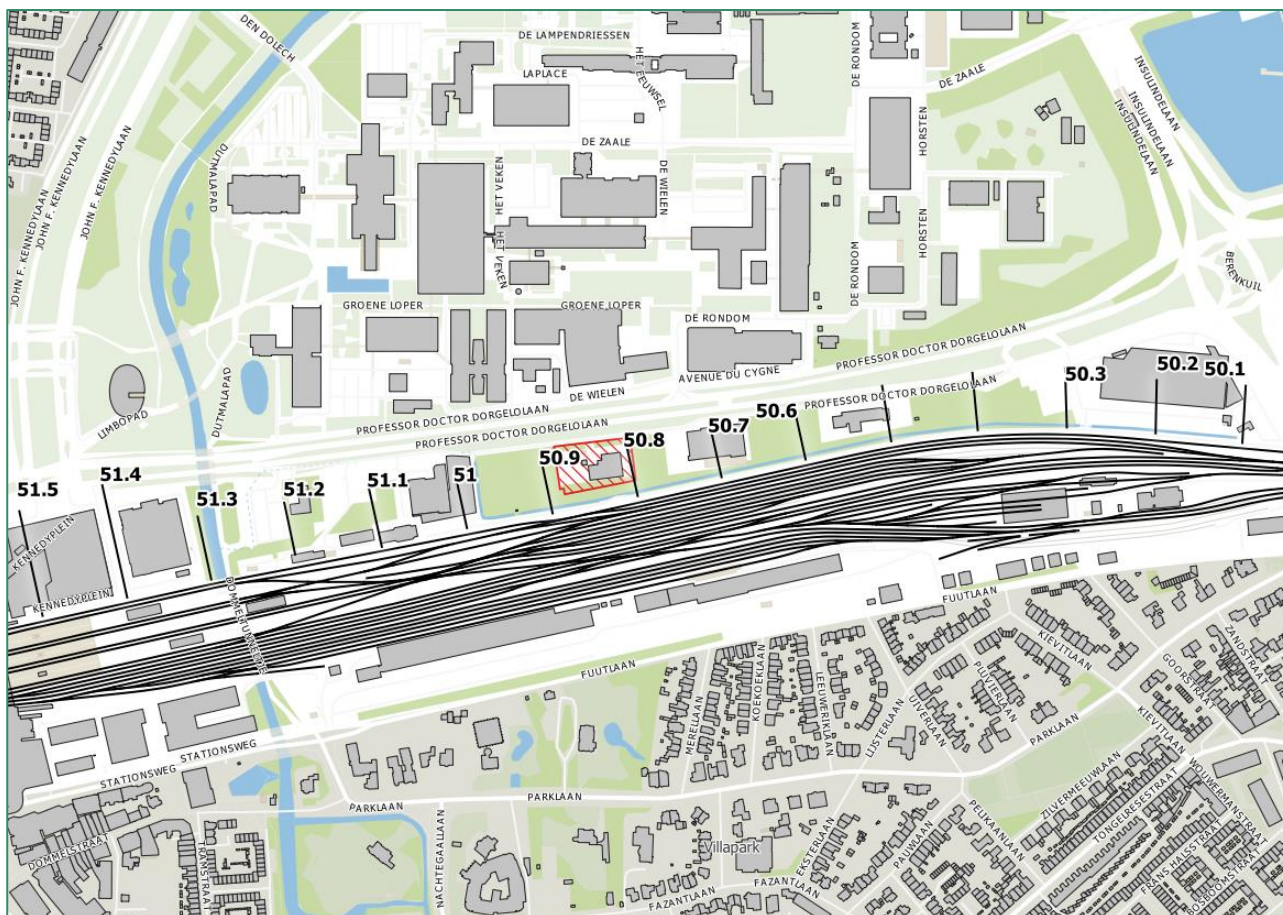
In dit hoofdstuk geven we een korte omschrijving van de inhoud van dit onderzoek: de aanleiding, het doel van het onderzoek en een beknopte leeswijzer om informatie snel te kunnen vinden.



INLEIDING

1.1. AANLEIDING

Aan de Dr. Dorgelolaan 20 in Eindhoven wordt de bestaande bebouwing gesloopt, en in plaats daarvan wordt een nieuw gebouw met voornamelijk kantoorruimtes en (minimaal) 7,5% publiekgerichte functie en tinkerspaces. Het gebouw wordt gerealiseerd direct naast de spoorlijn Eindhoven - Weert/Helmond, zie Figuur 1. Daardoor kunnen trillingen van treinverkeer als hinderlijk worden ervaren.



Figuur 1 Plangebied

1.2. DOEL

Doel van dit onderzoek is om vast te stellen of er sprake zal zijn van trillingshinder in de geplande bebouwing, en zo ja, met welke maatregelen deze hinder is te voorkomen. Hiervoor maken wij een nauwkeurige predictie van de trillingen in de geplande bebouwing, conform de in de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* omschreven aanpak. Deze trillingen toetsen we aan het van toepassing zijnde beoordelingskader. Als we overschrijdingen van het beoordelingskader verwachten, dan geven we aan met welke constructieve aanpassingen of maatregelen kan worden voldaan aan de streefwaarden uit het beoordelingskader.

1.3. LEESWIJZER

Wij beschrijven de situatie in het onderzoeksgebied en de uitgangspunten in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 lichten we het beoordelingskader en de gevolgde rekenmethodiek toe. Met behulp van de uitgangspunten berekenen we de trillingen in het gebouw op basis van de gemeten



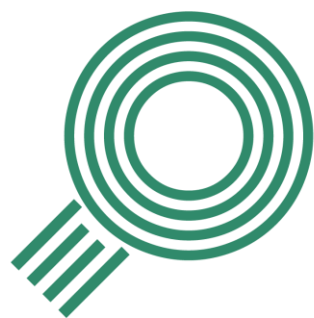
trillingen en de eigenschappen van het gebouw. Het resultaat van deze stap wordt in hoofdstuk 4 beschreven. In hoofdstuk 5 gaan we in op maatregelen en bouwkundige optimalisaties om de trillingen te verminderen.

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





SITUATIEBESCHRIJVING



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



2. SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN

2.1. SITUATIE

Het plangebied bestaat momenteel uit een 2- en 3-laags kantoorgebouw. Dit gebouw wordt gesloopt, en in plaats daarvan wordt een (groter) gebouw gerealiseerd met een maximale bouwhoogte van 48 meter en een parkeergarage onder het gebouw. De bestaande en geplande bebouwing is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Huidige en toekomstige bebouwing rond de planlocatie

De bebouwing is gepland op een afstand van ca. 30 meter tot het spoor. De rijsnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. Deze gegevens zijn gebaseerd op het Geluidsregister Spoor en gegevens van de vervoerders. Er is geen verandering in het aantal reizigerstreinen voorzien. Volgens de Integrale Mobiliteitsanalyse spoor (IMA 2021) blijft het huidige aantal goederentreinen (ca. 76 per dag) ongeveer gelijk (tussen de 64 en 78 in 2040, beide richtingen samen).

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)
Sprinter	40 - 60 km/h	4.00	2.50	1.00
Intercity	40 - 60 km/h	6.00	5.75	1.25
Goederentrein	40 - 50 km/h	1.56	1.40	1.71

Andere trillingsbronnen, zoals wegverkeer, zullen gezien de afstand tot de bebouwing en de vlakke wegopbouw 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

Er is nog geen ontwerp van de bebouwing bekend. Daarom is in dit onderzoek gerekend met meerdere constructieve uitwerkingen. Met dit variantenonderzoek maken we inzichtelijk welke constructieve keuzes tot hoge trillingen leiden, en welke varianten juist voor lagere trillingen zorgen. De uitkomsten uit dit trillingsonderzoek dienen vervolgens te worden meegenomen in de verdere uitwerking van het ontwerp. De belangrijkste gegevens van het gebouw zijn weergegeven in Tabel 2. Het rekenmodel voor de bebouwing is hierop gebaseerd.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Meerdere varianten: • Kanaalplaatvloer 260 en 320 mm, met 70 mm zandcement dekvloer • Breedplaatvloer 250 en 300 mm, met 70 mm zandcement dekvloer
Hoogte	48 meter
Lengte vloerveld	Meerdere varianten, tussen 5 en 9 meter
Constructietype	Meerdere varianten: • Kalkzandsteen • Prefab beton • I.h.w.g. beton • Houtskeletbouw
Fundering	Op palen

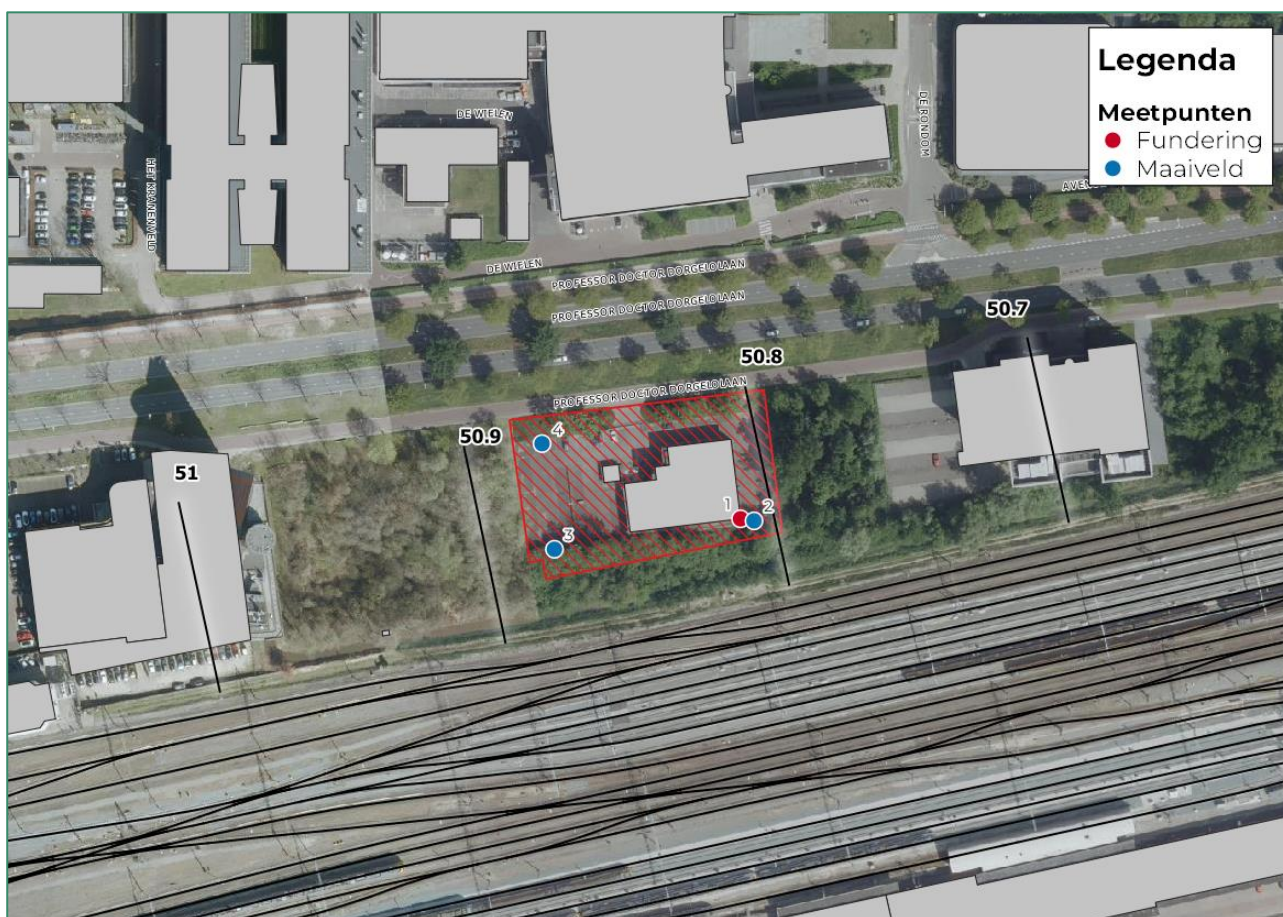
2.2.2. GEGEVENS ONDERGROND

Voor gegevens van de ondergrond is gebruik gemaakt van de 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 een meetpunt aan de fundering van het bestaande gebouw, een meetpunt op maaiveld in de buurt van dat meetpunt om de invloed van de bestaande fundering vast te stellen en twee meetpunten op de hoeken van het toekomstige gebouw om variaties in de trillingen over het bouwvlak te kunnen vaststellen. De metingen zijn uitgevoerd van 28 februari tot en met 7 maart 2024. Er was sprake van een representatieve dienstregeling tijdens deze meetperiode.

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-richtlijnen¹. Verdere gegevens over de metingen zijn opgenomen in bijlage III van dit rapport.



Figuur 3 Meetpunten

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.



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 '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 A³ – schade in gebouwen, deel B⁴ – hinder voor personen in gebouwen en deel C⁵ – 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.

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



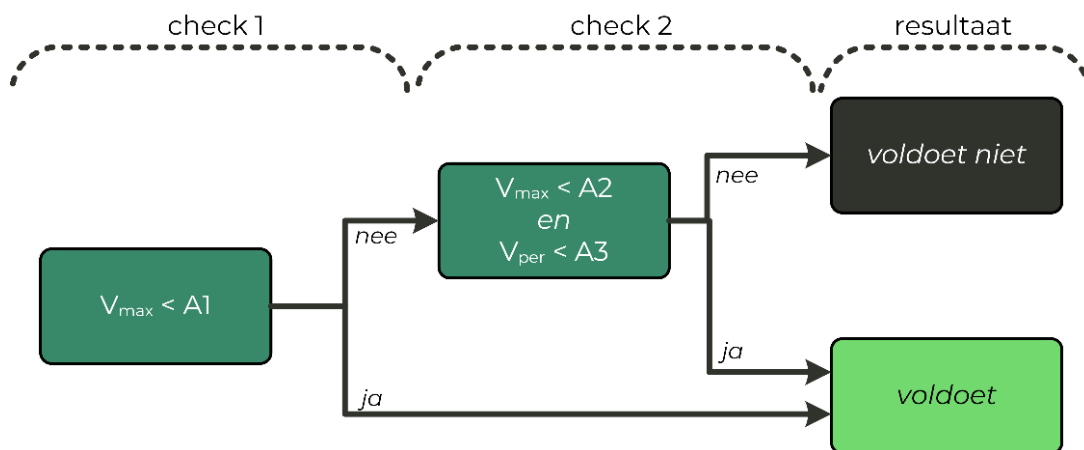
- b. Gebouwen met een overnachtingsfunctie (woningen, ziekenhuizen). De meeste hinder wordt vaak in rust ervaren. Bij gebouwen met een niet-overnachtingsfunctie (kantoren, scholen) gelden minder strenge streefwaarden. Winkels, sport- en industriepanden vallen buiten de richtlijn. In dit plan gaat het om een gebouw met een kantoorfunctie.
- 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 kantoor

	Dag en avond			Nacht		
Situatie	A1	A2	A3	A1	A2	A3
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



Figuur 4 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

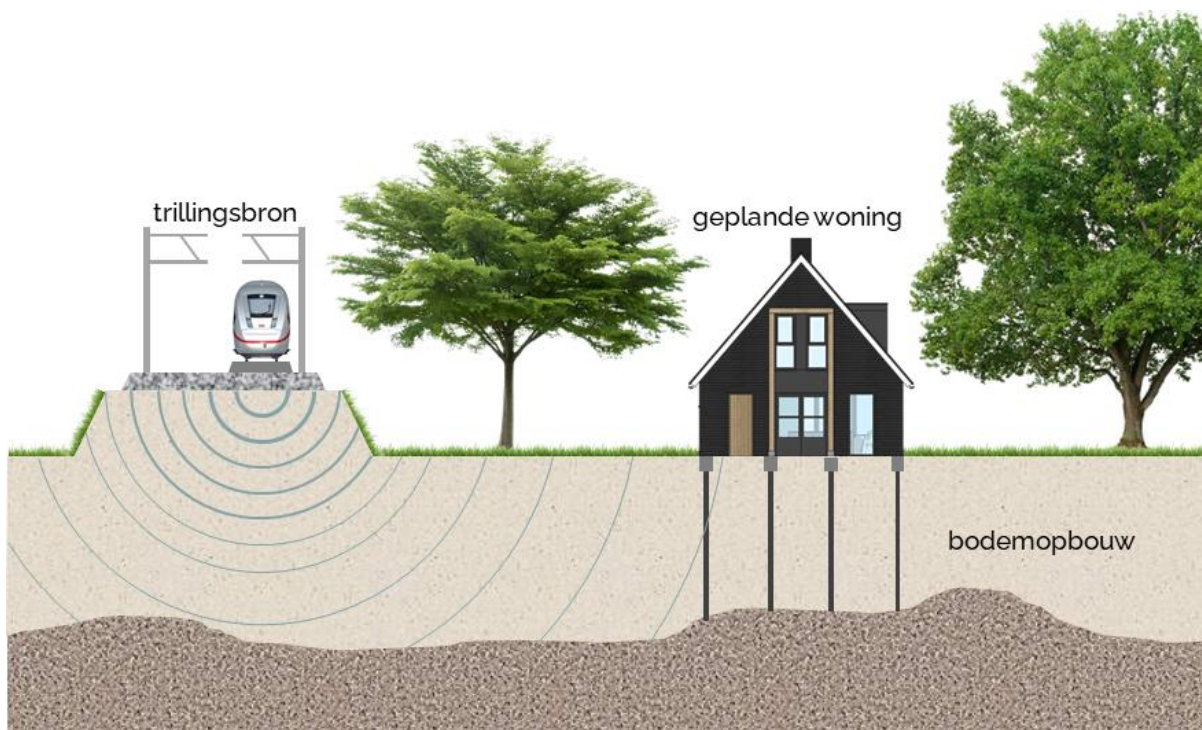
3.3. REKENMETHODE

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

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



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

3.3.2. DE TRILLINGSBRON

In dit onderzoek zijn treinen de bron van de trillingen. De trillingen van het treinverkeer zijn gemeten door Alcedo op punten op maaiveld en aan het bestaande gebouw in het plangebied. De beoordeling van de trillingen in de geplande bebouwing heeft plaatsgevonden op basis van deze metingen. Hierbij is in het rekenmodel gecorrigeerd voor afstand tot het spoor en verschillen in gebouweigenschappen (constructie en fundering bijvoorbeeld).

3.3.3. DE BODEM

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

3.3.4. HET GEBOUW

De trillingen gaan via de fundering een gebouw binnen. Afhankelijk van het type fundering, de bodem, de massa en afmetingen van het gebouw zal de fundering de trillingen meer of minder uitdempen. Vervolgens worden de trillingen in het gebouw weer versterkt door bewegingen van het gebouw en de vloeren. Het gebouwgedrag is in dit onderzoek bepaald op basis van de bodemopbouw, de constructieve eigenschappen en de gebruikte materialen van de gebouwen. Hiervoor maken we gebruik van het rekenmodel Buildyn, een zogenaamd beam-element model (BEM) waarin het gebouw gemodelleerd en doorerekend wordt. De resultaten van het model zijn geijkt met praktijkresultaten uit metingen. Een toelichting op het rekenmodel Buildyn 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. Er is geen informatie bekend over de huidige status van de spoorligging, wel hebben we op meerdere punten gemeten en deze resultaten meegenomen in de berekeningen. 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 te meten op meerdere punten hebben we deze variaties waar mogelijk in kaart gebracht. De variaties zijn meegenomen in de bepaling van de onzekerheid van de trillingen.
- Ten aanzien van de gebouwen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en technisch ontwerp). Bovendien 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.
- Ten aanzien van het effect van maatregelen geldt dat met name het effect van maatregelen in de bodem sterk afhankelijk is van de lokale bodemopbouw. Het effect van dergelijke maatregelen kan op voorhand redelijk nauwkeurig worden bepaald met behulp van een eindige elementenmodel, maar ook dan nog geldt dat door variaties in de lokale bodemopbouw het effect relatief onzeker is. Daarom is het effect weergegeven als bandbreedte in dit onderzoek, en wordt bij de afweging van maatregelen rekening gehouden met deze bandbreedte in het effect.

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





VERWACHTE TRILLINGEN



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

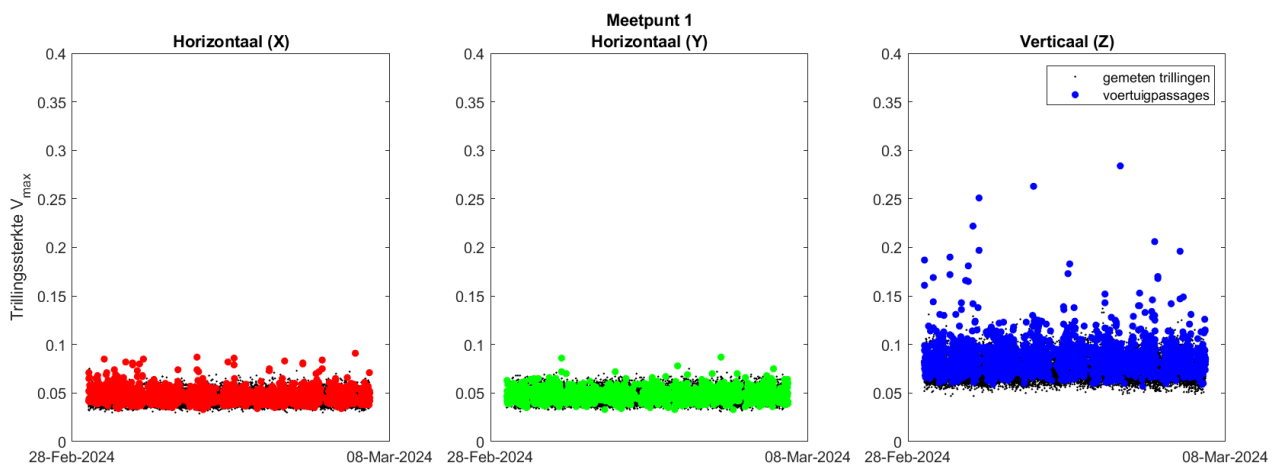


VERWACHTE TRILLINGEN

4.1. MEETRESULTATEN

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

1. De trillingen zijn het hoogst in verticale richting, de horizontale trillingen zijn hier laag.
2. De trillingen van de meeste treinen zijn laag, maar vooral goederentreinen kunnen incidenteel voor relatief hoge trillingsniveaus zorgen, vooral in verticale richting.



Figuur 6 Gemeten trillingen aan fundering bestaand gebouw, meetpunt 1

4.2. TRILLINGEN IN GEPLANEDE GEBOUW

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 het toekomstige gebouw 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 verdieping, keuzes in de constructie en onzekerheden in de constructie en berekeningen (zie paragraaf 3.3.5 en bijlage II). **Gele** arcering geeft aan dat er overschrijdingen zijn van de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn, maar dat dit afhankelijk is van de verdere constructieve uitwerking. **Oranje** arcering geeft aan dat niet wordt voldaan aan de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn.

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

Constructie	$V_{\max, \text{dag}}$	$V_{\max, \text{nacht}}$	V_{per}	Beoordeling
Beton/metselwerk standaard fundering	0.5 - 1.2	0.6 - 1.2	0.02 - 0.04	Voldoet, afhankelijk van m.n. vloerconstructie
Beton/metselwerk zware fundering	0.4 - 0.8	0.4 - 0.9	0.01 - 0.03	Voldoet, afhankelijk van m.n. vloerconstructie
Houtskeletbouw	0.7 - 1.6	0.7 - 1.4	0.05 - 0.09	Voldoet niet

Uit het onderzoek zien we het volgende:

1. Bij houtskeletbouw is het op deze locatie niet mogelijk om, zonder aanvullende maatregelen (zoals afveren van de fundering of een trillingsscherm), volledig te voldoen aan het beoordelingskader. Ook bij zware houtskeletbouw (dikke vloeren, hoge eigenfrequenties van

balken, wanden en vloeren) is er sprake van incidentele overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder. Het gaat dan wel om beperkte overschrijdingen, die maximaal enkele keren per week voorkomen.

2. Zware bouw zorgt voor lagere trillingen, waarbij de trillingen het laagst zijn bij een constructie met i.h.w.g. beton (bijv. tunnelbouw) met veel dwarswanden.
3. Een zware fundering (langere en dikkere palen i.c.m. kelder) zorgt voor lagere trillingen, waarmee eerder wordt voldaan aan het beoordelingskader.
4. De eigenfrequentie van de vloer is sterk bepalend voor of er wel of niet wordt voldaan aan de streefwaarden voor trillingshinder. Vanaf een eigenfrequentie van 12 Hz voor de vloer wordt bij alle vloertypes voldaan aan de streefwaarden. Bij een verzwaarde fundering (langere, dikkere palen) is 10 Hz voldoende. Deze hogere eigenfrequentie is te bereiken met:
 - a. Korte overspanningen
 - b. Dikkere vloertypes

Een overzicht met een aantal veelgebruikte vloertypes met de benodigde overspanning per dikte om deze eigenfrequentie te behalen, is hieronder opgenomen in Tabel 5

Tabel 5 Maximale overspanning om te voldoen aan streefwaarden

Type vloer	Dikte	Standaard fundering	Zware fundering
Kanaalplaatvloer	260 mm	6.5 m	7.1 m
Kanaalplaatvloer	320 mm	7.3 m	8.0 m
Breedplaatvloer	250 mm	6.1 m	6.7 m
Breedplaatvloer	280 mm	6.5 m	7.1 m
Breedplaatvloer	300 mm	6.8 m	7.4 m
Breedplaatvloer	320 mm	7.0 m	7.6 m
Polyplaatvloer	300 mm	8.2 m	8.8 m

4.3. AFWEGING VAN MAATREGELEN

Voor de afweging van maatregelen geeft bijlage 5 van de SBR B-richtlijn handvatten. Deze bijlage geeft aan dat bij het afwegen van maatregelen de volgende aspecten mogen worden meegewogen:

- De mate waarin de trillingssterkte voorkomt. Hiervoor geldt dat de gemiddelde trillingssterkte V_{per} een goede indicatie is. Deze is relatief laag, omdat de meeste treinen lage trillingen veroorzaken, en ruim lager dan de streefwaarde (V_{per} is hier maximaal 0.04, streefwaarde is 0.07). Ook is er sprake van een beperkt aantal overschrijdingen (maximaal 1 per dag). Er is dus sprake van beperkte overschrijdingen van de trillingen.
- De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. Wegverkeer heeft veel lagere trillingen dan het treinverkeer, en zorgt niet voor hinder in het geplande gebouw. Van een maskerend effect is daarmee geen sprake.
- De mogelijkheid tot het treffen van reducerende maatregelen. Het is conform bestaande jurisprudentie gebruikelijk om hierbij een afweging te maken tussen de kosten en het effect van de maatregelen, maar ook aspecten als duurzaamheid en impact op de omgeving kunnen worden meegenomen in deze afweging.

Gelet op bovenstaande dienen conform de SBR B-richtlijn dus maatregelen te worden afgewogen op doelmatigheid. Daarbij kunnen maatregelen worden getroffen op drie niveaus:

1. Bij de **trillingsbron** (de treinen of het spoor). Naast de afhankelijkheid van ProRail voor het treffen van dergelijke maatregelen, zijn deze maatregelen zeer kostbaar en kennen ze een lange doorlooptijd. Gelet op de maatgevende trillingsfrequenties (tussen 5 en 10 Hz) is de enige effectieve maatregel een betonplaat met ballastmat (versteving van de ondergrond), onder alle sporen met goederentreinen die voor overschrijdingen zorgen. De kosten van een dergelijke maatregel bedragen minimaal € 8 mln⁶.
2. In de **bodem**, bijvoorbeeld in de vorm van trillingsschermen. Hiervoor geldt dat dit doorgaans kostbare maatregelen zijn, die bovendien lastig aanpasbaar zijn aan toekomstige situaties, en hier lastig inpasbaar zijn gezien de beperkte ruimte tussen spoor en gebouw, en dat het effect bij frequenties tussen 5 en 10 Hz beperkt is. Bovendien moeten deze maatregelen op naastgelegen percelen worden getroffen, waardoor de initiatiefnemer hier zelf maar beperkt invloed op heeft. De kosten van een dergelijke maatregel bedragen minimaal € 4 mln⁷.
3. Aan de **gebouwen**. Uit het variantenonderzoek blijkt dat met de juiste keuzes in het verdere ontwerp een gebouw kan worden gerealiseerd waarbij voldaan wordt aan de streefwaarden t.a.v. trillingshinder. Richtlijnen hiervoor zijn:
 - a. Zorg voor zware bouw: liefst i.h.w.g. beton, dan zijn de trillingen het laagst.
 - b. Zorg voor een zware fundering (lange paalfundering, dikke palen, parkeerkelder).
 - c. Zorg voor een vloer met een zo hoog mogelijke eigenfrequentie (hoger dan 12 Hz bij een standaard fundering, hoger dan 10 Hz bij een verzwaarde fundering (optie a)). Dit kan bereikt worden met kortere vloeroverspanningen en grotere vloerdiktes, maar ook het vloertype heeft hier invloed op,
 - d. Vermijd grote overspanningen en slappe staalconstructies in het gebouw. Eventuele stalen of betonnen liggers dienen een eigenfrequentie hoger dan 10 Hz te hebben.Met deze aanpassingen kan worden voldaan aan het beoordelingskader voor trillingshinder, de SBR B-richtlijn.

Gelet op bovenstaande adviseren we het volgende:

1. Kies voor **zware bouw**. Liefst i.h.w.g. beton, bij houtskeletbouw dient gekozen te worden voor een zware constructie met voldoende hoge eigenfrequenties.
2. Kies voor een **zware fundering**. Een lange (minimaal 15 meter lang) paalfundering met dikke palen (minimaal 500 mm) en een parkeerkelder heeft de voorkeur.
3. Kies voor een **stijve vloer**, hierbij geldt:
 - a. Als adviezen **1.** en **2.** worden opgevolgd kies dan voor een vloer met een eigenfrequentie boven de 10 Hz (bij houtskeletbouw boven de 12 Hz).
 - b. Als advies **2.** niet wordt opgevolgd, kies dan voor een vloer met een eigenfrequentie boven de 12 Hz.

⁶ Prijspeil 2024, voor een betonplaat met ballastmat onder de vier meest gebruikte sporen met goederentreinen, over een lengte van 200 meter. Kosten zijn inclusief BTW, maar exclusief kosten voor alternatief reizigersvervoer en afstemming en engineering door ProRail.

⁷ Prijspeil 2024, voor een betonnen trillingsscherm van (indicatief) 10 meter diep en 0.5 meter breed, tot 5 meter diepte bekleed met minimaal 100 mm rubber (of een ander zacht materiaal om een voldoende impedantiesprong te realiseren om de laagfrequente trillingen te dempen). Kosten zijn inclusief BTW, maar exclusief kosten voor grondverwerving, vergunningen, afstemming met andere perceeleigenaren en verleggen van kabels en leidingen.



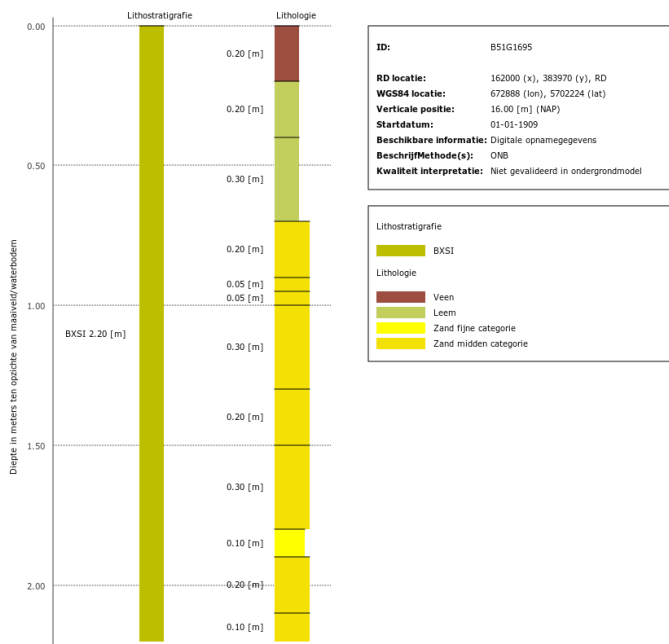
4. Vermijd grote overspanningen en slappe staalconstructies in het gebouw. Stalen en betonnen liggers dienen een **eigenfrequentie hoger dan 10 Hz** te hebben.



GRONDONDERZOEK

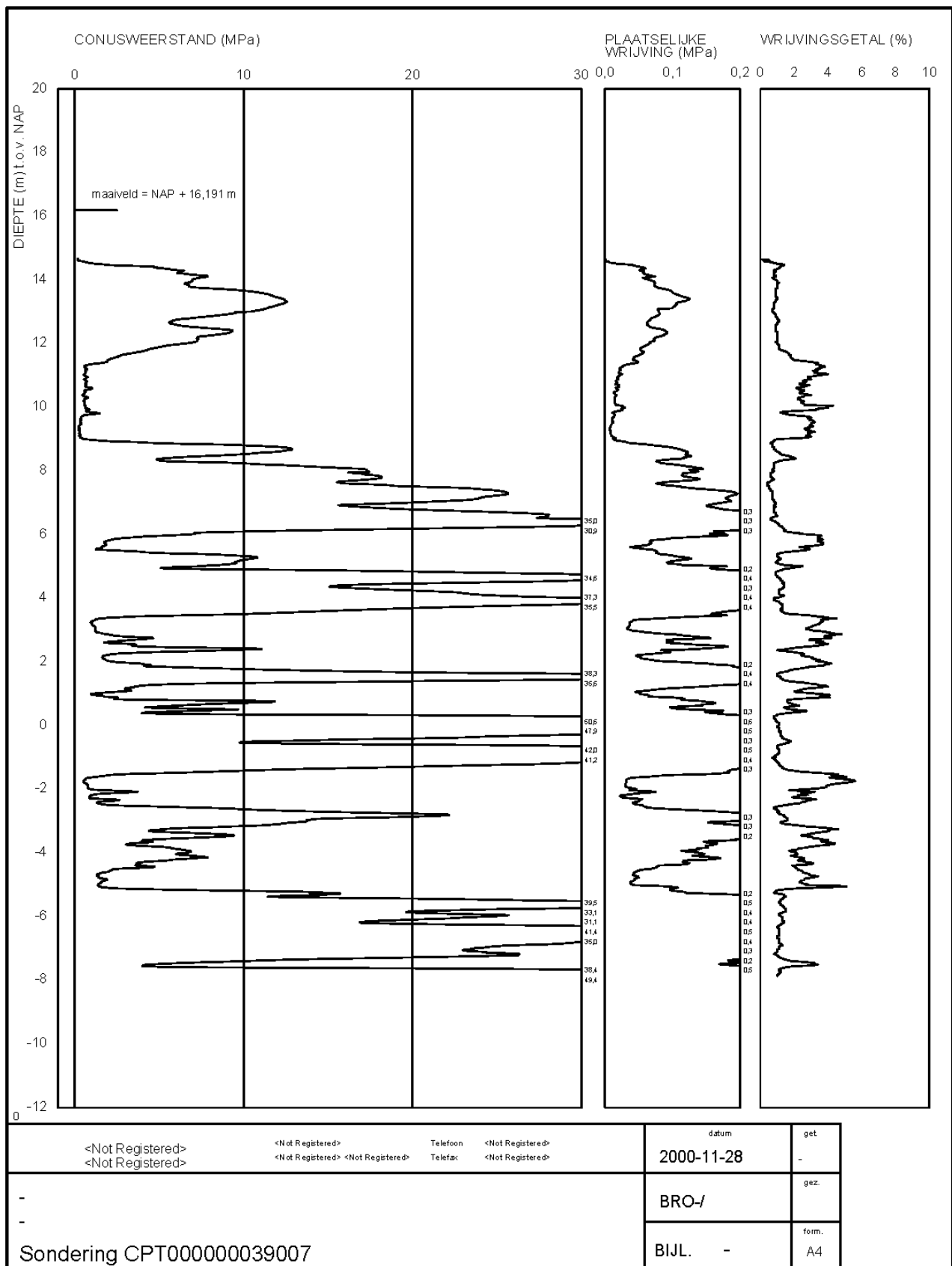
Deze bijlage bevat geotechnische achtergrondinformatie. Deze informatie is gebruikt om bijvoorbeeld de uitdemping van de trillingen met de afstand te bepalen. Daarnaast is deze informatie gebruikt in het rekenmodel waarmee de dynamische eigenschappen van de bebouwing worden bepaald.

Een grondboring in de nabijheid van het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur 7. Uit de grondboring blijkt dat de bodem is opgebouwd uit afwisselend zand- en leemlagen.



Figuur 7 Boring in het onderzoeksgebied

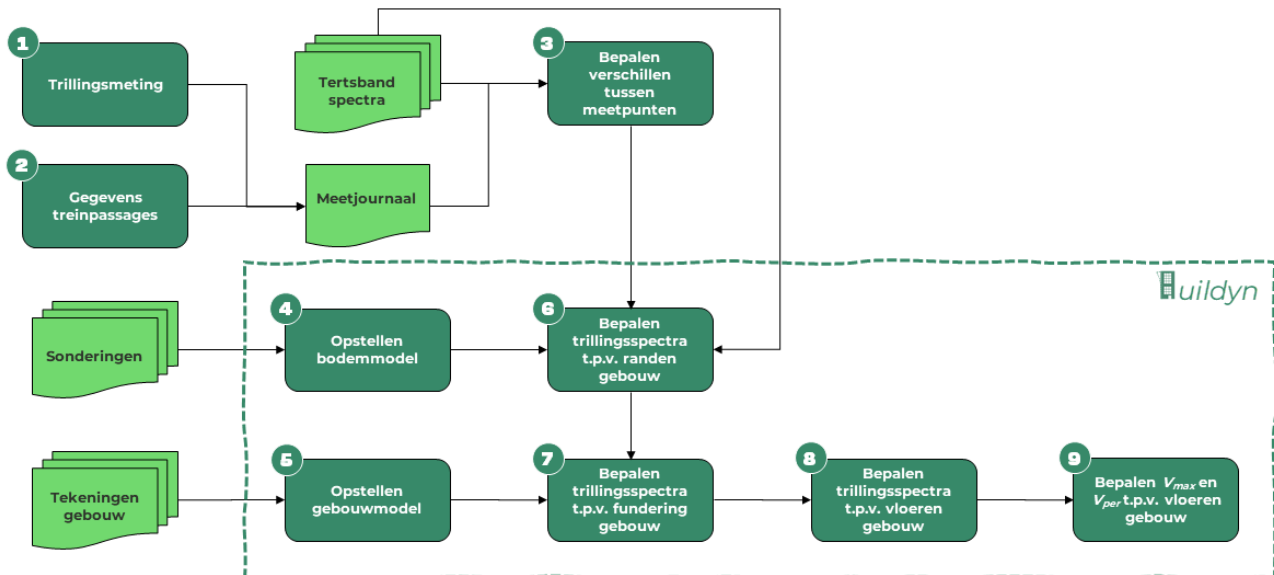
Een representatieve sondering uit de buurt van het onderzoeksgebied, waarin onder meer de conusweerstand te zien is, is weergegeven in Figuur 8. Ook hier is te zien dat de bodem uit lagen met wisselende stijfheid bestaat.



Figuur 8 Sondering in het onderzoeksgebied

REKENMODEL

In deze bijlage beschrijven we het gebruikte rekenmodel om de trillingen in de gebouwen te berekenen. Visueel is het proces weergegeven in Figuur 9, hieronder beschrijven we per stap de methode en waar mogelijk de tussenresultaten.



Figuur 9 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.

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-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.
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.
3. De uitdemping van de trillingen met de afstand, op basis van de empirische, frequentie-afhankelijke Barkanvergelijking, zoals weergegeven in vergelijking 1.

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

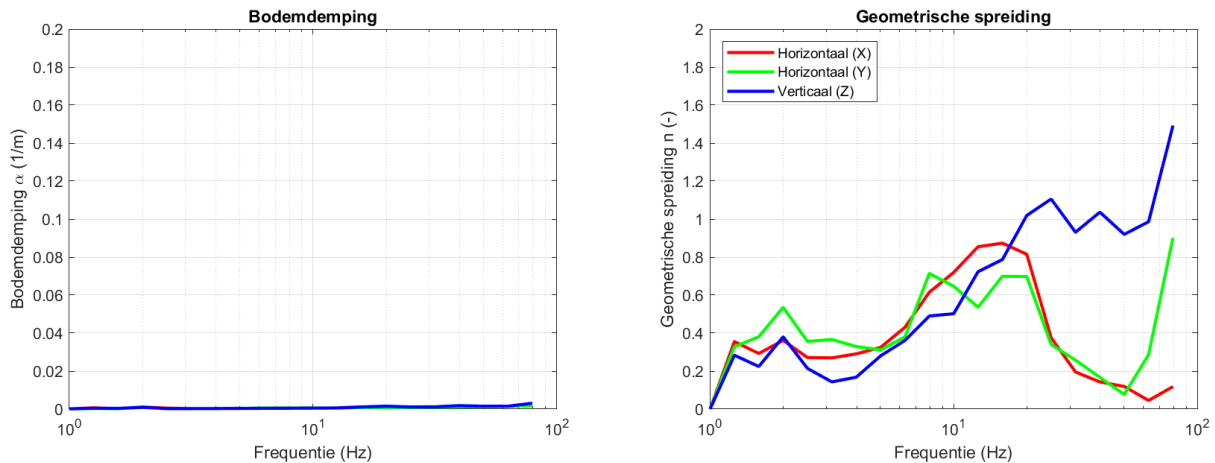
In deze vergelijking staat V voor de trillingssnelheid, f voor de frequentie, r voor de afstand tot de trillingsbron, r_0 voor de referentieafstand (hier 20 m), n voor de geometrische spreidingsfactor en α voor de bodemdemping. De parameters V_0 , n en α worden bepaald met de kleinste kwadratenmethode.

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 3.3.5 en 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. 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 10.



Figuur 10 Bodemdemping α (links) en geometrische spreiding n (rechts) als functie van de frequentie, bepaald met random forestmodel

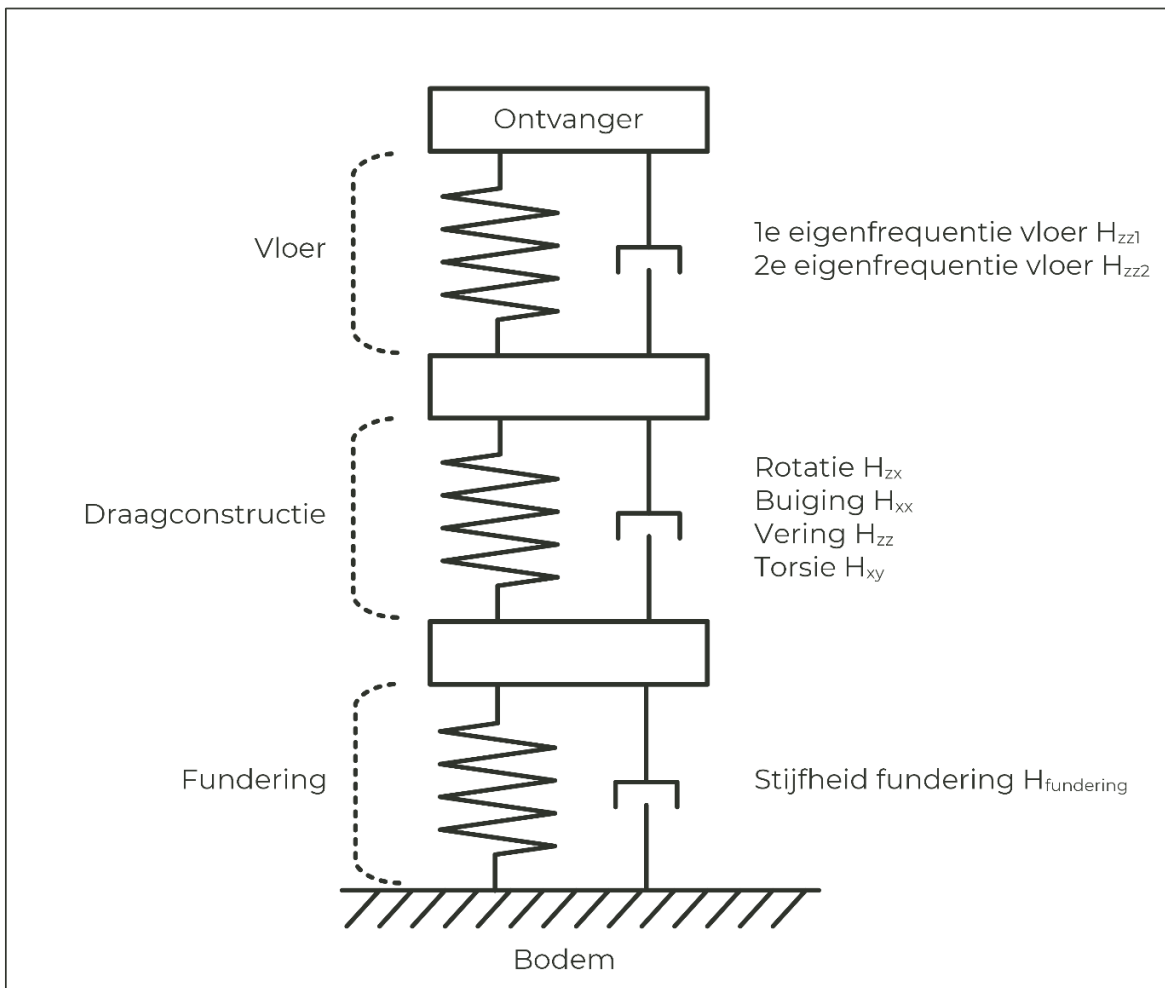
II.5 OPSTELLEN GEBOUWMODEL

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van het rekenmodel Buildyn om de trillingen in de geplande bebouwing te berekenen. In Buildyn wordt de dynamische responsie van een gebouw berekend met behulp van een beam-element model (BEM). Buildyn is met behulp van een random forest algoritme gekalibreerd op een database met meer dan 600 praktijkmetingen. In deze paragraaf is een beschrijving van het gebruikte rekenmodel opgenomen.

In Buildyn wordt een gebouw gemodelleerd door middel van gekoppelde massa-veersystemen, zie Figuur 11. Afhankelijk van de constructie van het gebouw wordt de draagconstructie als één (lage bebouwing, starre bebouwing), of als meerdere elementen (hoge bebouwing, slappere bebouwing) gemodelleerd. Meestal wordt per bouwlaag één element gemodelleerd. Hiervoor maken we gebruik van een module die op basis van een tekening (pdf) of 3D-model (ifc) het gebouw inleest en vertaalt naar een beam element model, waarna de eigenschappen (materiaaltype, verbinding, dimensies en eigenschappen van stalen balken) van de elementen worden toegekend. Hierbij maken we gebruik van standaardmateriaal eigenschappen op basis van literatuurgegevens en normen. Deze materiaaleigenschappen zoals gebruikt in het rekenmodel zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Initiële modelparameters

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



Figuur 11 Principe van Buildyn met een gebouw als gekoppeld massaveersysteem. Rechts de verschillende componenten van het rekenmodel

Vervolgens wordt het model opgebouwd. Dat gaat als volgt:

1. We maken een model van de bodem-funderingsinteractie. Dat doen we in twee stappen:
 - a. We maken een 3D eindige elementenmodel van de bodem (op basis van sonderingen) en de fundering van het gebouw, waarbij de palen als beam elements (met de bijbehorende eigenschappen t.a.v. diameter, stijfheid en damping worden toegekend) en het gebouw verder als star element wordt gemodelleerd. Dit model gebruiken we om de bodem-gebouw interactie te bepalen. We rekenen dit model door in het tijdsdomein met een impliciete solver, en bepalen vervolgens de overdracht tussen bodem en fundering en de stijfheids-, massa- en dempingsmatrix van de fundering.
 - b. Vervolgens 'kalibreren' we de overdracht met een random forest algoritme dat is getraind op een database met praktijkmetingen, om een zo goed mogelijke overeenkomst te krijgen tussen de via eindige elementen verkregen overdracht en de in de praktijk optredende overdracht. We zien namelijk dat het complex is om de interactie tussen bodem en fundering goed te modelleren met eindige elementenmodellen, en dat die er relatief vaak naast zitten. Met deze methode krijgen we een betrouwbare omschrijving van de matrix $H_{fundering}$.
2. 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 6. Vervolgens bepalen we de dynamische eigenschappen van die bouwlaag, zoals de stijfheids-, dempings- en massamatrix. We maken hiervoor gebruik van een expliciete solver in het frequentiedomein.

3. Vervolgens modelleren we het gehele gebouw als een beam-element model. Hierbij zijn de fundering en de bouwlagen afzonderlijke beam elements, met hun in stap 1 en 2 bepaalde dynamische eigenschappen. We doen dit in twee substappen:
 - a. Met een expliciete solver berekenen we in het frequentiedomein de frequentie-afhankelijke overdrachten van de fundering naar de vloeropleggingen. Bewegingen als torsie, rotatie, vering en buiging bepalen met elkaar deze overdrachten.
 - b. Vervolgens 'kalibreren' we de overdrachten met een random forest algoritme dat is getraind op een database met praktijkmetingen, om een zo goed mogelijke overeenkomst te krijgen tussen de overdracht uit het beam-element model en de in de praktijk optredende overdracht. Technisch gezien modificeert het algoritme de demping, E-modulus, massa en inklemming van onderdelen uit stap 2 om de overdrachten zo goed mogelijk te laten overeenkomen met vergelijkbare gebouwen uit de database. Hiermee ontstaan gemodificeerde overdrachten die beter passen 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).
4. Tenslotte bepalen we de overdracht van de oplegging van de vloeren naar rekenpunten op de vloer, waar de werkelijke hinder wordt ervaren. Ook dit doen we in twee substappen:
 - a. Eerst maken we een model van het vloerveld om de overdracht van de oplegging naar het midden van de vloer te bepalen. Bij eenvoudige vloervelden doen we dit met analytische formules, bij meer complexe vloervelden (bijv. extra tussensteunpunten) met een eindige elementenmodel met shell elementen en een expliciete solver in het frequentiedomein. Hiermee krijgen we de overdrachten naar de vloeren. Hierbij vragen we resultaten op in de hoeken van vloervelden, in het midden van vloervelden en op een kwart van de overspanning. Meestal is het midden van het vloerveld voor trillingen maatgevend.
 - b. Vervolgens 'kalibreren' we ook deze overdrachten met een random forest algoritme dat is getraind op een database met praktijkmetingen.

Relevant bij de modificaties met het random forest algoritme is dat deze kalibratie 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.

Hieronder gaan we nog kort in op de verschillende onderdelen uit het model, en op welke factoren invloed hebben op het trillingsgedrag.

II.5.1 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

Vooraf 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 dit model doorgerekend.

II.5.2 DRAAGCONSTRUCTIE

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

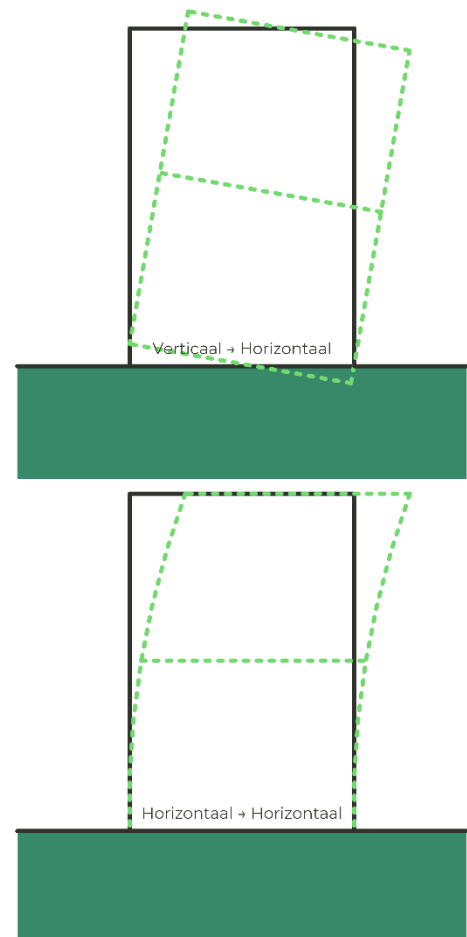
Dit effect noemen we H_{zx} , en is afhankelijk van:

- 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. 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

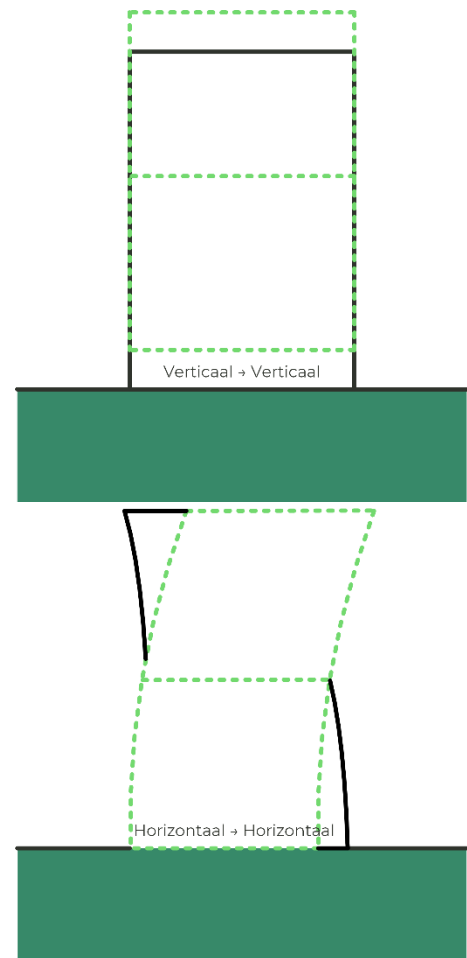


Het derde principe, dat van vering van het gebouw op zijn fundatie, is rechts weergegeven. Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappe onderlaag of lokaal slappere elementen (denk aan kolommen en balkenstructuren). Dit effect noemen we H_{zz} , en is afhankelijk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

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

Het vierde principe, dat van torsie van het gebouw, is rechts weergegeven. 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)



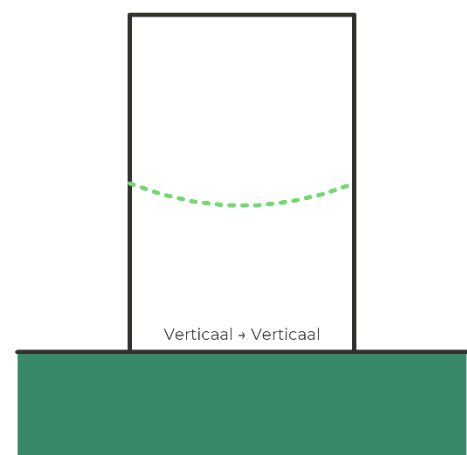
II.5.3 VLOEREN

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

De eerste buigmodus van de vloer (bij de eerste eigenfrequentie) is simpele doorbuiging, zoals weergegeven in de principeschets rechts. Met name de eigenfrequentie (de frequentie waarvoor de vloer gevoelig is) en de 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:

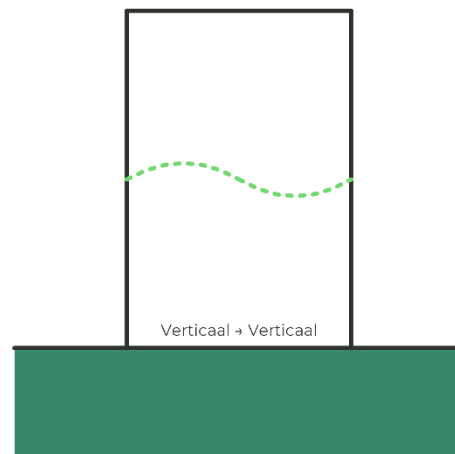
- » Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- » Afmetingen van de vloer
- » Type oplegging



Bij de tweede buigmodus van de vloer (bij de tweede eigenfrequentie) zijn de trillingen maximaal op ongeveer $\frac{1}{4}$ 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 hierna volgende 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).



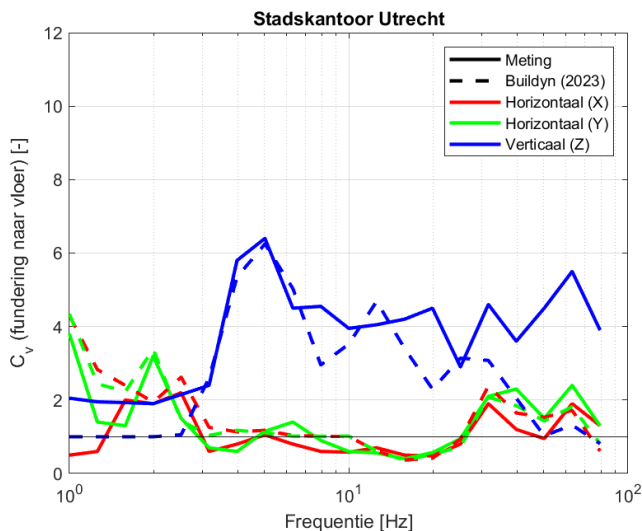
II.5.4 BETROUWBAARHEID VAN HET MODEL

Uit evaluatiemetingen blijkt dat model 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 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.

Qua detailniveau, zoals omschreven in de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* (Tabel 10.3), gaat het bij het Buildyn-model doorgaans om een model op niveau IV: een 3D-model, mits lokale onderdelen (zoals uitkragingen) specifiek zijn gemodelleerd omdat de empirische praktijkdata hierop minder nauwkeurig is.

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 Stads kantoor, een constructie met stalen diagonalen, een betonnen kern en betonnen vloeren. De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 12.

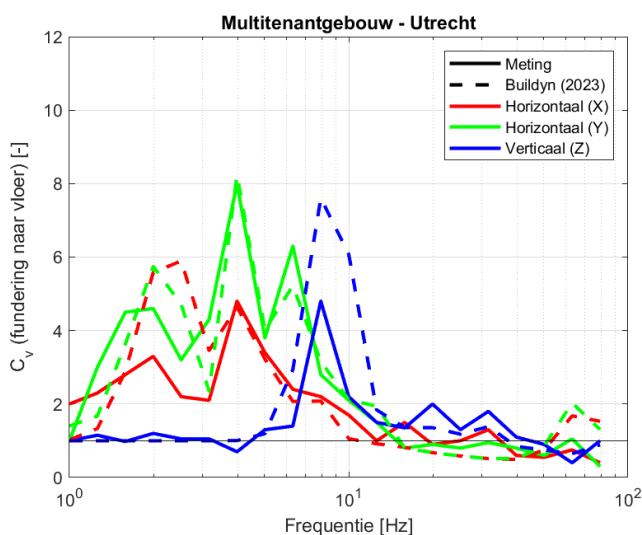


Figuur 12 Staskantoor in Utrecht, links de gemeten en berekende overdrachten, rechts een foto van het gebouw

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 damping overschat bij hogere frequenties.
2. Verder zien we kleinere 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 13.



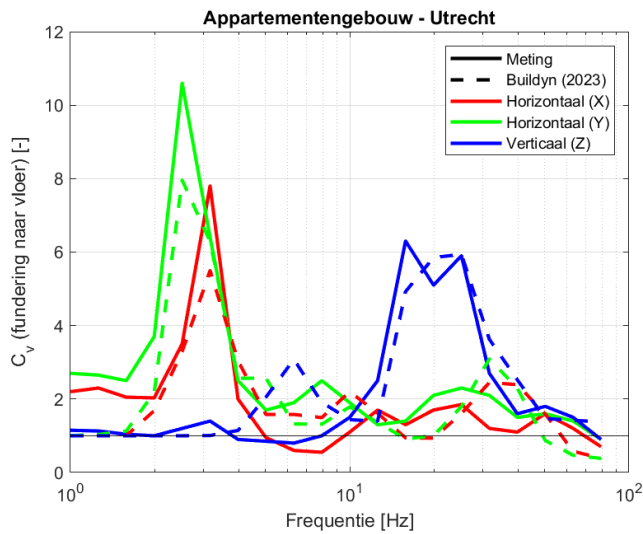
Figuur 13 Noordgebouw in Utrecht, links de gemeten en berekende overdrachten, rechts een foto van het gebouw

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.

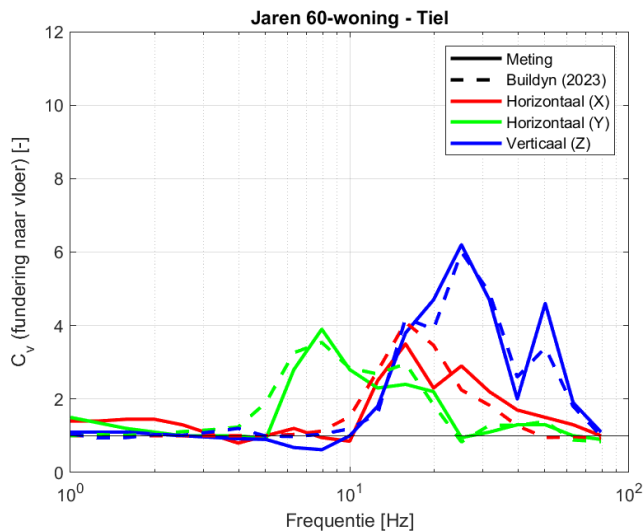
Het derde gebouw is een appartementengebouw in Utrecht, een constructie met prefab betonnen wanden, breedplaatvloeren en onderin een open kolommenstructuur. De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 14.



Figuur 14 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.

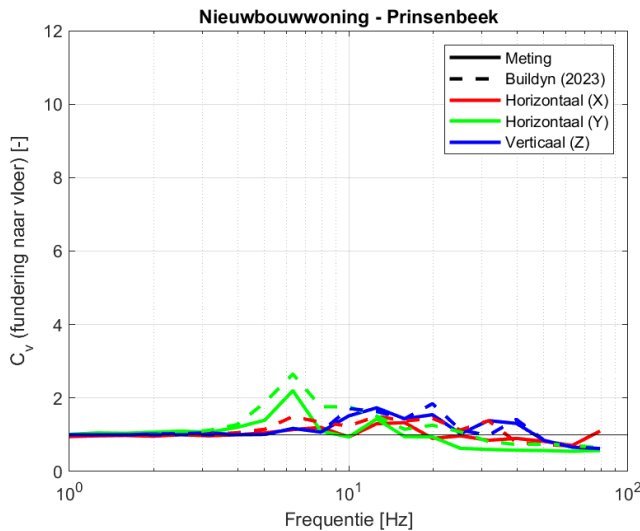
Het vierde gebouw is een wat oudere woning in Tiel, opgebouwd uit een conventionele constructie van metselwerk en met houten vloeren. De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 15.



Figuur 15 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 15.



Figuur 16 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.

II.6 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.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:

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

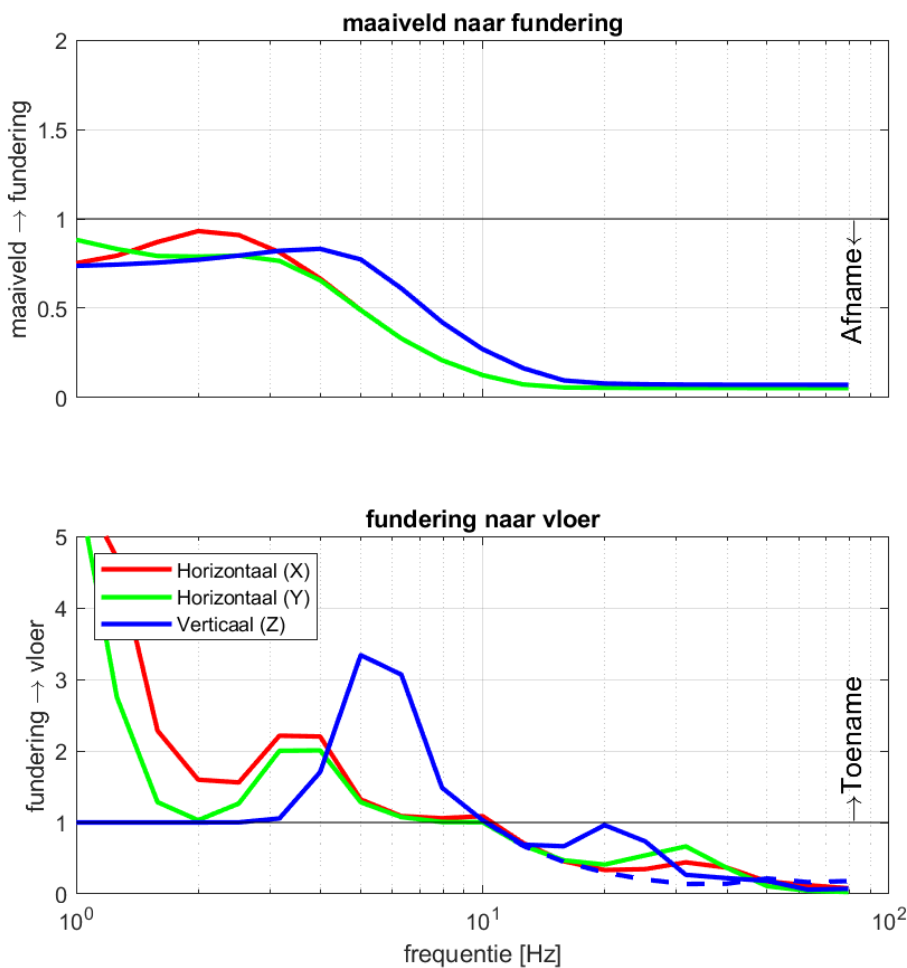
Hierin zijn $C_{f,ij}$ de frequentie-afhankelijke overdrachten van maaiveld naar fundering, zoals deze volgen uit het model. Dominant hierin zijn vooral de dikgedrukte) diagonale coëfficiënten. Door vervolgens $V_{i,fundering}(f)$ te delen op $V_{i,mv}(f)$ in een hoek van het gebouw ontstaat een beeld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

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 stap 5, 6 en 7. De trillingsspectra op de vloeren worden berekend met behulp van vergelijking 3:

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

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. Als voorbeeld zijn de overdracht C_r (maaiveld naar fundering) en C_v (fundering naar vloer) voor het midden van de vloer op de hoogste verdieping weergegeven in Figuur 17.



Figuur 17 Overdracht C_r (boven) en C_v van fundering naar midden vloer voor bovenste verdieping, 260 mm kanaalplaatvloer en 6.0 m vloeroverspanning met i.h.w.g. betonbouw, standaard fundering

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} ⁸

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 die 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 verblijfsklimaat t.a.v. trillingen.

Voor alle andere parameters is, op basis van metingen, de random forestanalyse 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.

⁸ Zie Koopman, A., LA.131001a.M04 van 13 april 2018



METINGEN

Deze bijlage bevat gegevens over de metingen.

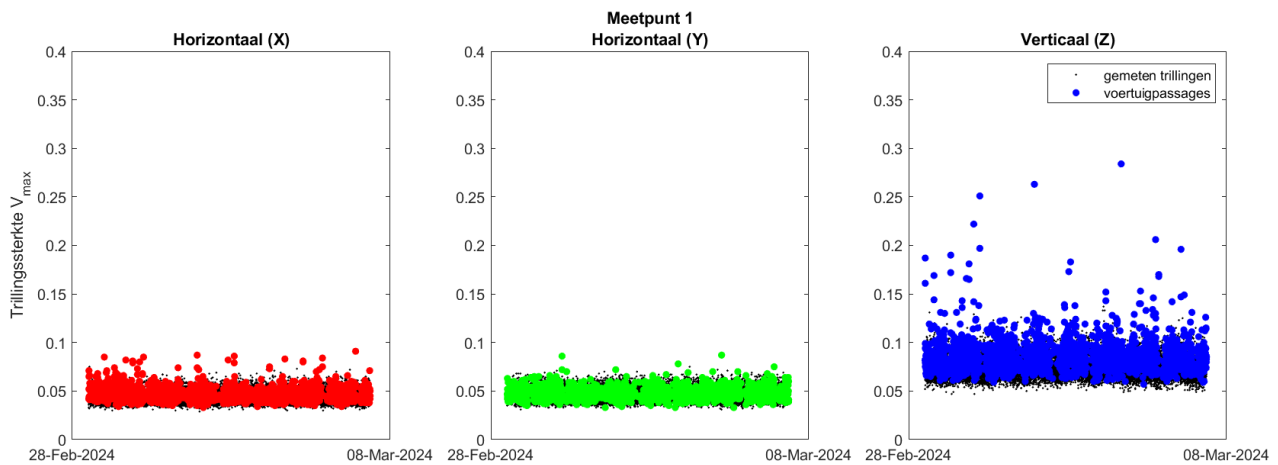
III.1 GEGEVENS METINGEN

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

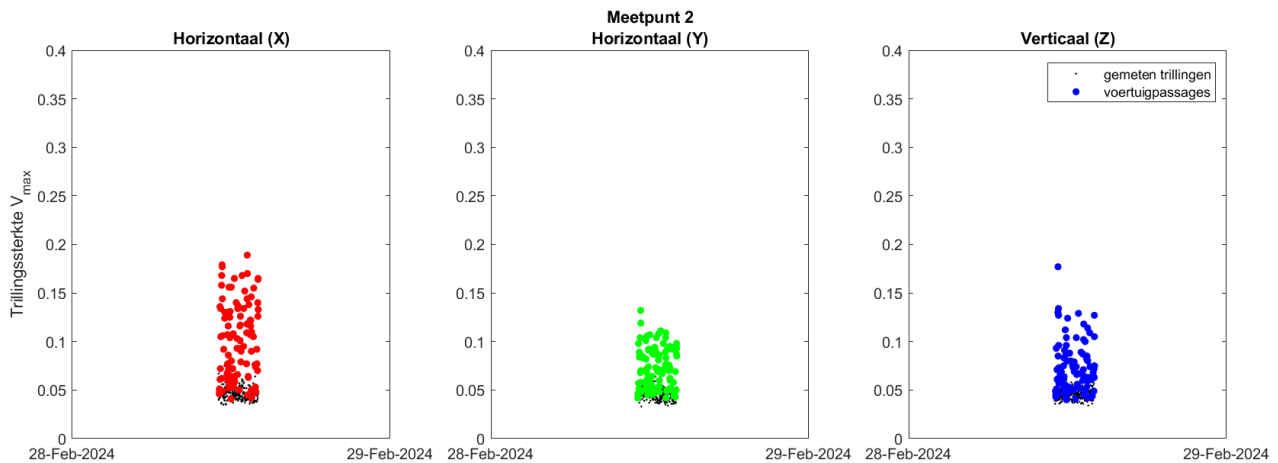
1	<i>Uitvoerende partij</i>	Alcedo B.V. Ondernemersweg 3 7451PK Holten
	<i>Verantwoordelijke</i>	
2	<i>Meting uitgevoerd door</i>	
3	<i>Datum en tijd metingen</i>	28 februari tot 7 maart 2024
4	<i>Trillingsbron</i>	Treinen
5	<i>Classificatie gebouw</i>	Zie paragraaf 3.2
6	<i>Locatie metingen</i>	Zie Figuur 3
7	<i>Geotechnische gegevens</i>	Zie bijlage I
8	<i>Locaties meetpunten en meetrichtingen</i>	Zie Figuur 3, 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 https://www.frog.watch/facts/ .
10	<i>Gemetten 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>	Geen

III.2 RESULTATEN METINGEN

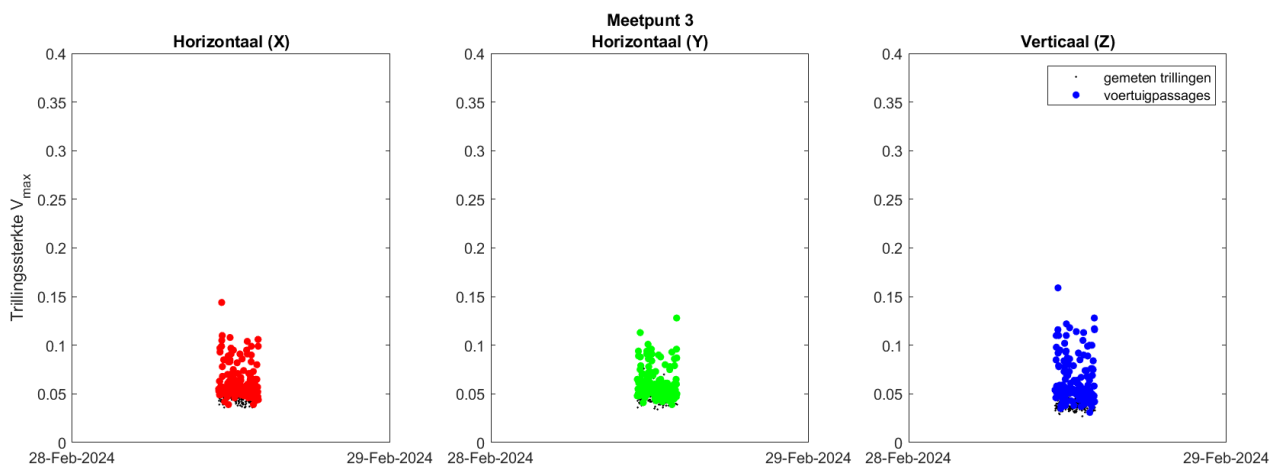
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



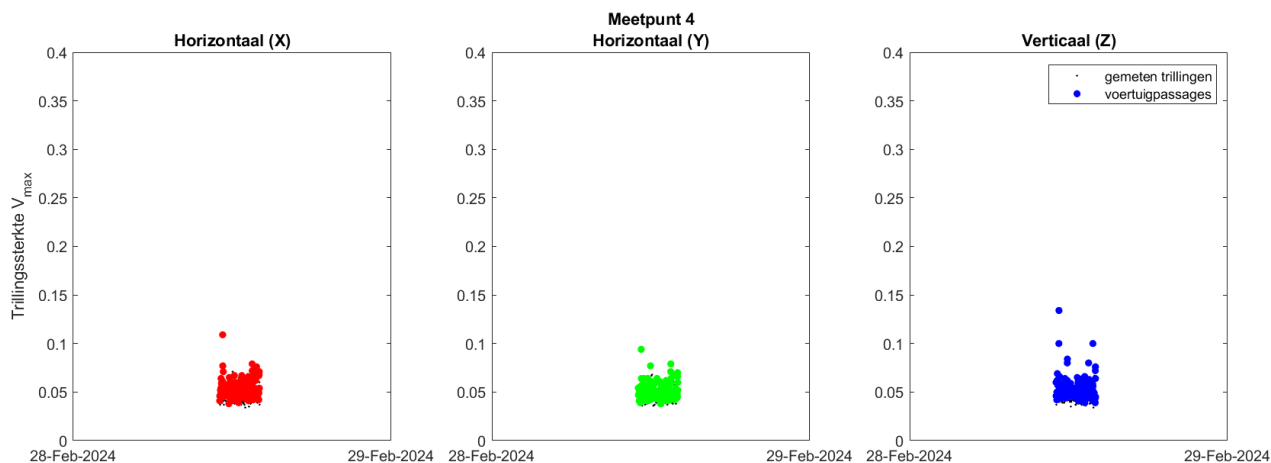
Figuur 18 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (fundering bestaand gebouw)



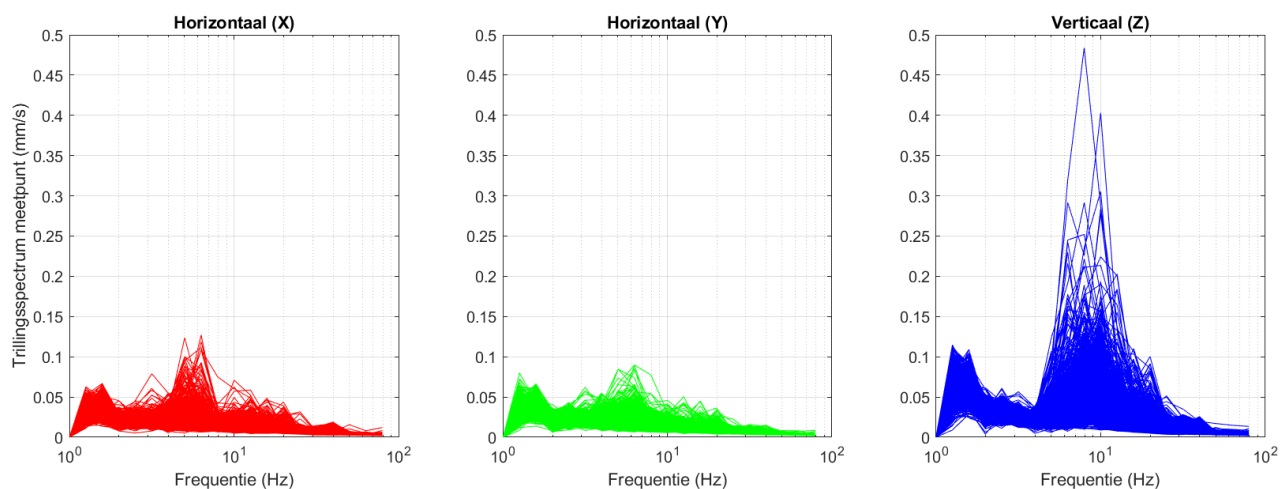
Figuur 19 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (maaiveld naast bestaand gebouw)



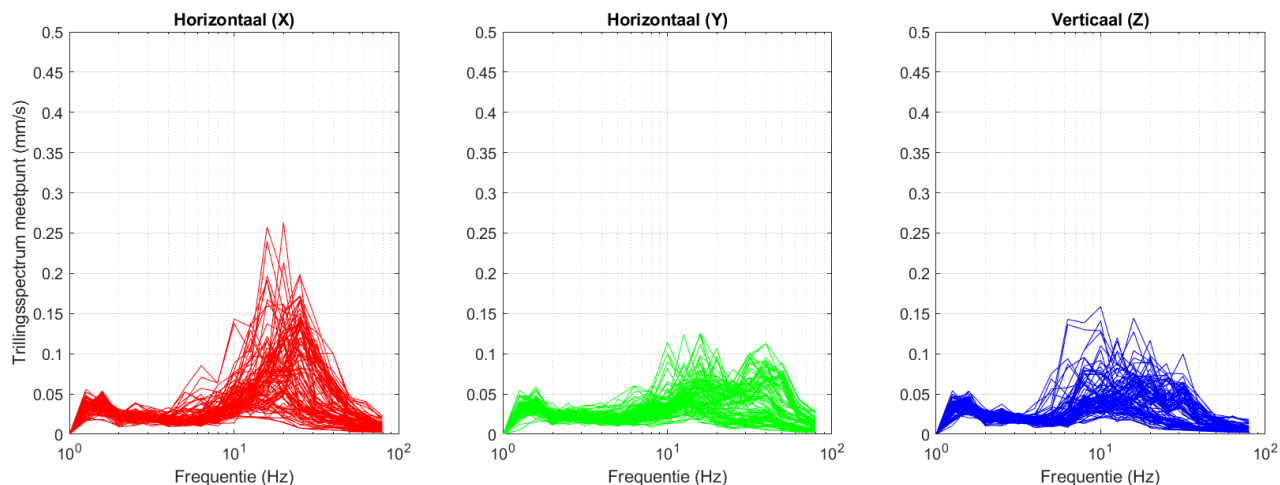
Figuur 20 Gemeten trillingen bij meetpunt 3 (maaiveld dichtbij spoor)



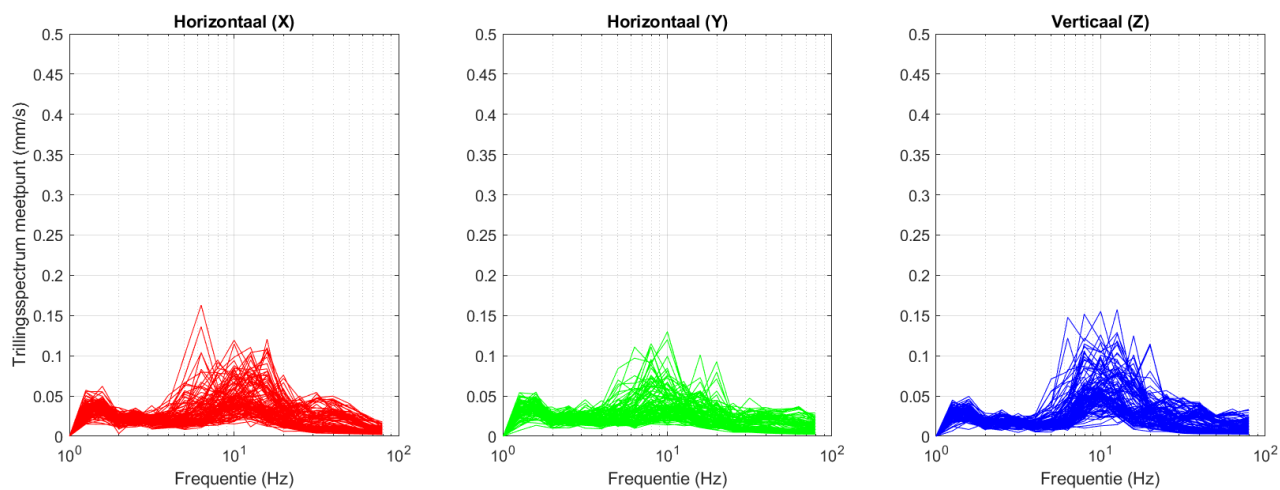
Figuur 21 Gemeten trillingen bij meetpunt 4 (maaiveld bij Dr. Dorgelolaan)



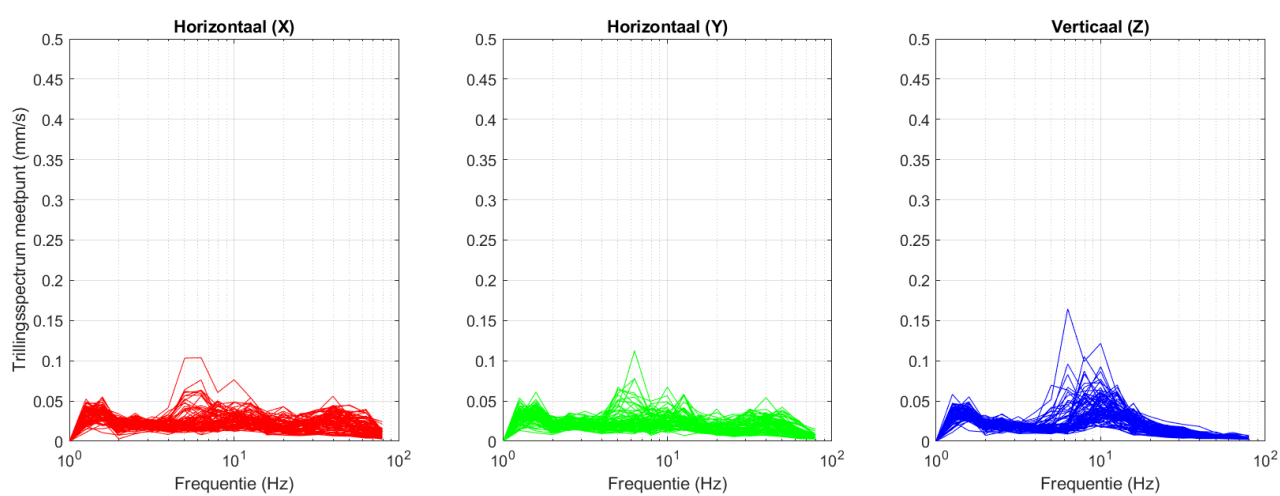
Figuur 22 Tertsbandspectra bij meetpunt 1



Figuur 23 Tertsbandspectra bij meetpunt 2



Figuur 24 Tertsbandspectra bij meetpunt 3



Figuur 25 Tertsbandspectra bij meetpunt 4