



WEEBOOST

TRILLINGSONDERZOEK T.B.V. NIEUWBOUW

**ROERTOREN
ROERMOND**

COLOFON

Auteur Thijmen van der Veen
 thijmen@we-boost.nl

Controle en vrijgave Pieter Boon
 pieter@we-boost.nl
 +31 6 10 03 94 54

Projectcode *WBD2022-017*

Versienr *5.0*

Datum *20 juli 2023*

Status *Definitief*

Opdrachtgever *JPO*



Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van metingen van



© We-Boost 2023

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

Op de hoek Maria Theresialaan – Oranjelaan – Stationspark in Roermond wordt de Roertoren ontwikkeld, een woontoren van bijna 68 meter hoog met zo'n 110 appartementen. Het plangebied bevindt zich ten oosten van de spoorlijn Roermond – Sittard. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet op voorhand worden uitgesloten.

Doel van het voorliggende onderzoek is daarom om vast te stellen of er sprake zal zijn van trillingshinder in bebouwing, en zo ja, met welke maatregelen een aanvaardbaar woon- en leefklimaat kan worden gegarandeerd (e.e.a. conform de Wro art. 3.1, wat in wezen niet verandert in de Omgevingswet (art. 4.2)). 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 maaiveld en aan de naastgelegen bebouwing, en met 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 conclusie van het onderzoek is dat alleen op de hoogste verdieping incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader worden verwacht, op alle andere verdiepingen wordt naar verwachting voldaan aan het beoordelingskader. Het gaat om incidentele passages van zware goederentreinen in de nacht (maximaal 1 per week). De trillingen zijn hoger bovenin het gebouw doordat de inverting van het gebouw op de eigen constructie daar een rol gaat spelen, ondanks het robuuste en trillingsarme ontwerp.

Omdat er overschrijdingen van het beoordelingskader worden verwacht, is onderzoek gedaan naar mitigerende maatregelen. Hierbij is zowel gekeken naar maatregelen aan het spoor, in de bodem als naar maatregelen aan het geplande gebouw.

AFWEGING VAN MAATREGELEN

Vervolgens is een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. Uit dit onderzoek volgt dat maatregelen aan het spoor (hoewel effectief) niet doelmatig zijn (kosten bedragen meer dan € 700.000 per appartement met een overschrijding), en ook maatregelen in de bodem (trillingsscherm) zijn zeer kostbaar (meer dan € 20.000 per appartement met een overschrijding). Naar aanleiding van het trillingsonderzoek is het gebouw geoptimaliseerd, waarbij onder meer de stijfheid van de constructie is verhoogd en wanden en kolommen zwaarder zijn uitgevoerd. Gezien het zware karakter van het gebouw hebben verdere constructieve optimalisaties geen significant effect op de trillingen. De enige kansrijke oplossing is het afschermen van de fundering, bijvoorbeeld met een 4 meter diepe betonnen L-wand of een 1000 mm dik EPS scherm voor de fundering. De kosten van deze maatregelen bedragen meer dan € 20.000 per appartement, en zorgen maar voor een beperkte verlaging van de trillingen.

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). Het kan dus zijn dat maatregelen vanwege kosten of inpassingsbezwaren niet worden getroffen, mits goed wordt gemotiveerd dat geen onaanvaardbaar woon- en leefklimaat ontstaat. Hierbij kan eventueel worden verwezen naar (1) het beperkte aantal overschrijdingen (maximaal 1 per week), (2) het feit dat het om lichte overschrijdingen gaat (iets meer dan 5 procent boven de streefwaarde), (3) het feit dat maatregelen niet goed zijn te treffen (vanwege forse technische risico's en hoge meerkosten), (4) het gegeven dat de trillingen weliswaar niet voldoen aan de strenge streefwaarden voor nieuwbouw uit de SBR B-richtlijn, maar wel aan de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties uit de SBR B-richtlijn en (5) dat de woningen worden gerealiseerd in een zone dichtbij het spoor, waar nu ook al oudere, meer trillingsgevoelige bebouwing staat waaruit geen klachten over trillingen bekend zijn.

Gezien de incidentele, beperkte overschrijdingen en de hoge kosten en beperkte effectiviteit van maatregelen, kan daarom in het licht van Wro art. 3.1 worden gemotiveerd dat er geen onaanvaardbaar woon- en leefklimaat in het geplande gebouw.

Tenslotte, gelet op het feit dat het gaat om relatief laagfrequente trillingen (met een grote golflengte) is het niet goed mogelijk om achteraf nog maatregelen te treffen, mochten de trillingen toch hoger zijn dan vooraf verwacht.



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	16
3.1.	Trillingen en wetgeving	16
3.2.	De SBR-richtlijn	16
3.3.	Rekenmethode	18
4.	VERWACHTE TRILLINGEN	22
4.1.	Meetresultaten	22
4.2.	Trillingen in geplande bebouwing	22
5.	MITIGERENDE MAATREGELEN	26
5.1.	Nut en noodzaak van maatregelen	26
5.2.	Analyse resultaten	26
5.3.	Maatregelen aan de trillingsbron	27
5.4.	Maatregelen in de bodem	27
5.5.	Maatregelen aan de gebouwen	29
5.6.	Conclusies en Advies voor maatregelen	30
II.	GRONDONDERZOEK	32
III.	REKENMODEL	34
II.1	Trillingsmeting	34



II.2	Gegevens treinpassages	34
II.3	Bepalen verschillen tussen meetpunten	35
II.4	Opstellen bodemmodel	35
II.5	Opstellen Gebouwmodel	36
II.6	Bepalen trillingsspectra t.p.v. randen gebouw	43
II.7	Bepalen trillingsspectra t.p.v. fundering gebouw	44
II.8	Bepalen trillingsspectra t.p.v. vloeren gebouw	44
II.9	Bepalen V_{max} en V_{per} t.p.v. vloeren gebouw	45
II.10	Omgaan met onzekerheden	45
III.	METINGEN	47
III.1	Gegevens metingen	47
III.2	Resultaten metingen	48
IV.	EERDERE RESULTATEN	51
IV.1	Eerste berekening	51
IV.2	Tweede berekening	52
IV.3	Derde berekening	53

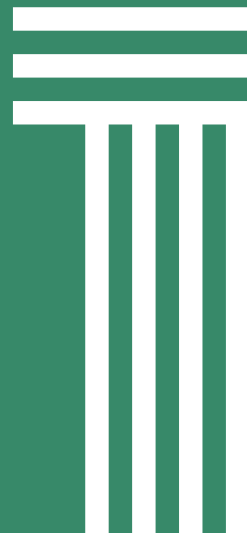




INLEIDING



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

Op de hoek Maria Theresialaan – Oranjelaan – Stationspark in Roermond wordt de Roertoren ontwikkeld, een woontoren van bijna 68 meter hoog met zo'n 110 appartementen. Het plangebied bevindt zich ten oosten van de spoorlijn Roermond – Sittard, zie Figuur 1. Gezien de beperkte afstand tot het spoor kan trillingshinder als gevolg van treinverkeer 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 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 de appartementen op basis van de

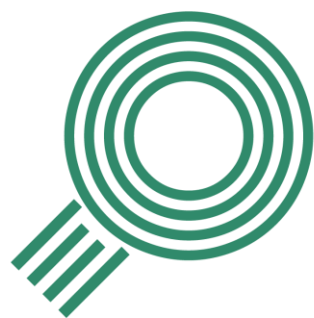
gemeten trillingen en de eigenschappen van het gebouw. Het resultaat van deze stap wordt in hoofdstuk 4 beschreven. In hoofdstuk 5 gaan we in op mitigerende maatregelen om de trillingen te verminderen.

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





SITUATIEBESCHRIJVING

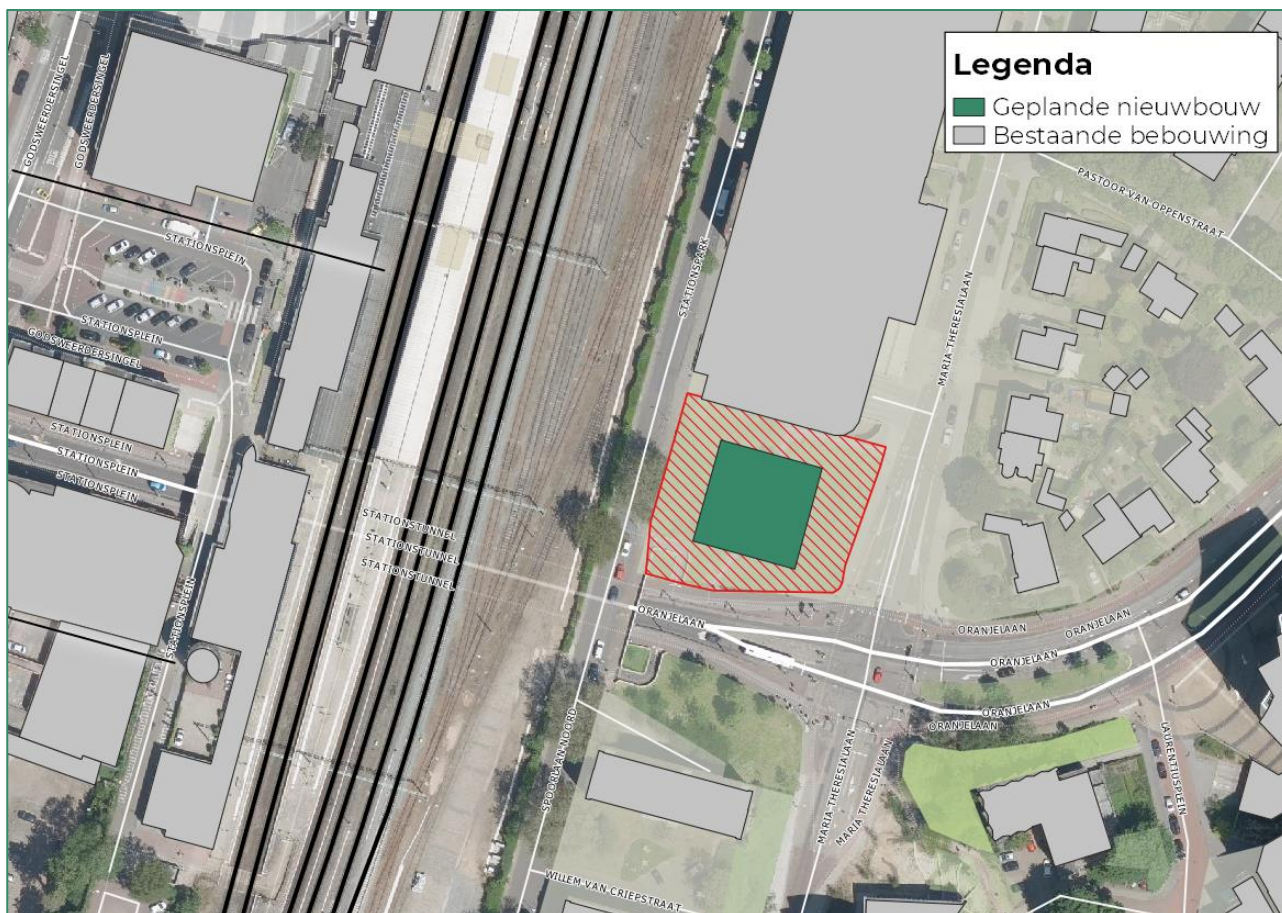


In dit hoofdstuk wordt een toelichting gegeven op de beoogde toekomstige situatie en worden de uitgangspunten van het onderzoek weergegeven.



2.1. SITUATIE

Op de planlocatie bevindt zich momenteel een grasveld. Hier wordt een woontoren gerealiseerd van ca. 25 x 25 meter, met een hoogte van bijna 68 meter. In de plint (onderste bouwlaag) wordt een fietsenkelder en horecafunctie gerealiseerd, op de eerste twee verdiepingen kantoorfuncties en daarboven appartementen. De bestaande en geplande bebouwing is weergegeven in Figuur 2. Direct ten noorden van het gebouw bevindt zich een parkeergarage.



Figuur 2 Bestaande en geplande bebouwing op de planlocatie

De geplande nieuwbouw bevindt zich in een zone van 30 tot 55 meter van het spoor, de doorgaande sporen liggen zo'n 20 meter verderop. De meest nabij gelegen sporen zijn rangeersporen, en worden incidenteel gebruikt. De rijsnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. De gegevens in Tabel 1 zijn gebaseerd op het Geluidsregister Spoor en gegevens van de vervoerders. Volgens de IMA-2021 (vooruitblik voor spoorvervoer) wordt er een toename van het aantal goederentreinen verwacht, van de huidige 15 tot 20 treinen per dag naar 20 tot 25 goederentreinen per dag (beide richtingen samen). Er wordt geen toename van het aantal reizigerstreinen voorzien.

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

Type trein	Rijsnelheid	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Sprinter	< 40 km/h	2.00	2.00	0.63



Type trein	Rijsnelheid	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Intercity	< 40 km/h	4.00	3.75	0.50
Goederentrein	90 km/h	0.24	0.67	0.36

Andere trillingsbronnen, zoals zwaar wegverkeer, zullen naar verwachting niet voor waarneembare trillingen in de bebouwing zorgen, en zijn in dit onderzoek niet nader kwantitatief beschouwd.

2.2. UITGANGSPUNTEN

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

2.2.1. GEGEVENS BEBOUWING

Er is een Voorlopig Ontwerp (VO) van de bebouwing beschikbaar, van 5 april 2022, met constructieve updates van 30 november 2022¹. Een impressie van het gebouw is weergegeven in Figuur 3. In Tabel 2 zijn de belangrijkste constructiegegevens weergegeven. Het rekenmodel voor de bebouwing is hierop gebaseerd.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Breedplaatvloer 280 mm, met 100 mm zwevende dekvloer (30 mm isolatie, 70 mm anhydrietvloer)
Hoogte	67.8 m, bovenzijde liftopbouw op 69.4 m
Lengte vloerveld	5.8 tot 6.1 meter
Constructietype	Betonnen skelet, met onderste 3 lagen: - Prefab betonnen kolommen, 700 x 700 mm, betonkwaliteit minimaal C55/67 - Prefab betonnen balken, betonkwaliteit minimaal C55/67 - Prefab betonnen gevelpenanten, 250 mm dik, betonkwaliteit minimaal C55/67 - I.h.w.g. betonnen kernwanden, 500 mm dik, betonkwaliteit minimaal C30/37 Resterende lagen: - Prefab betonnen gevelpenanten, 200 mm dik, betonkwaliteit minimaal C55/67 - Prefab betonnen woningscheidende wanden, 300 mm dik, betonkwaliteit minimaal C55/67 - Prefab betonnen kernwanden, 200 of 350 mm dik, betonkwaliteit minimaal C55/67
Fundering	Op 132 palen, schroefpaal 054/0.67 met paallengte 16 m. Funderingsplaan 1.20 m dik, onder kern 1.70 m dik.

¹ Memo Aveco de Bondt, kenmerk 212730_AdB_BRI_0001_v1.0



Figuur 3 Impressie Roertoren

2.2.2. GEGEVENS ONDERGROND

Voor gegevens van de ondergrond is gebruik gemaakt van het funderingsonderzoek van Inpijn Blokpoel². Deze gegevens zijn gebruikt om de bodemopbouw te modelleren. De bodemopbouw heeft invloed op hoe de trillingen uitdempnen met de afstand, en op hoe de gebouwen reageren op trillingen.

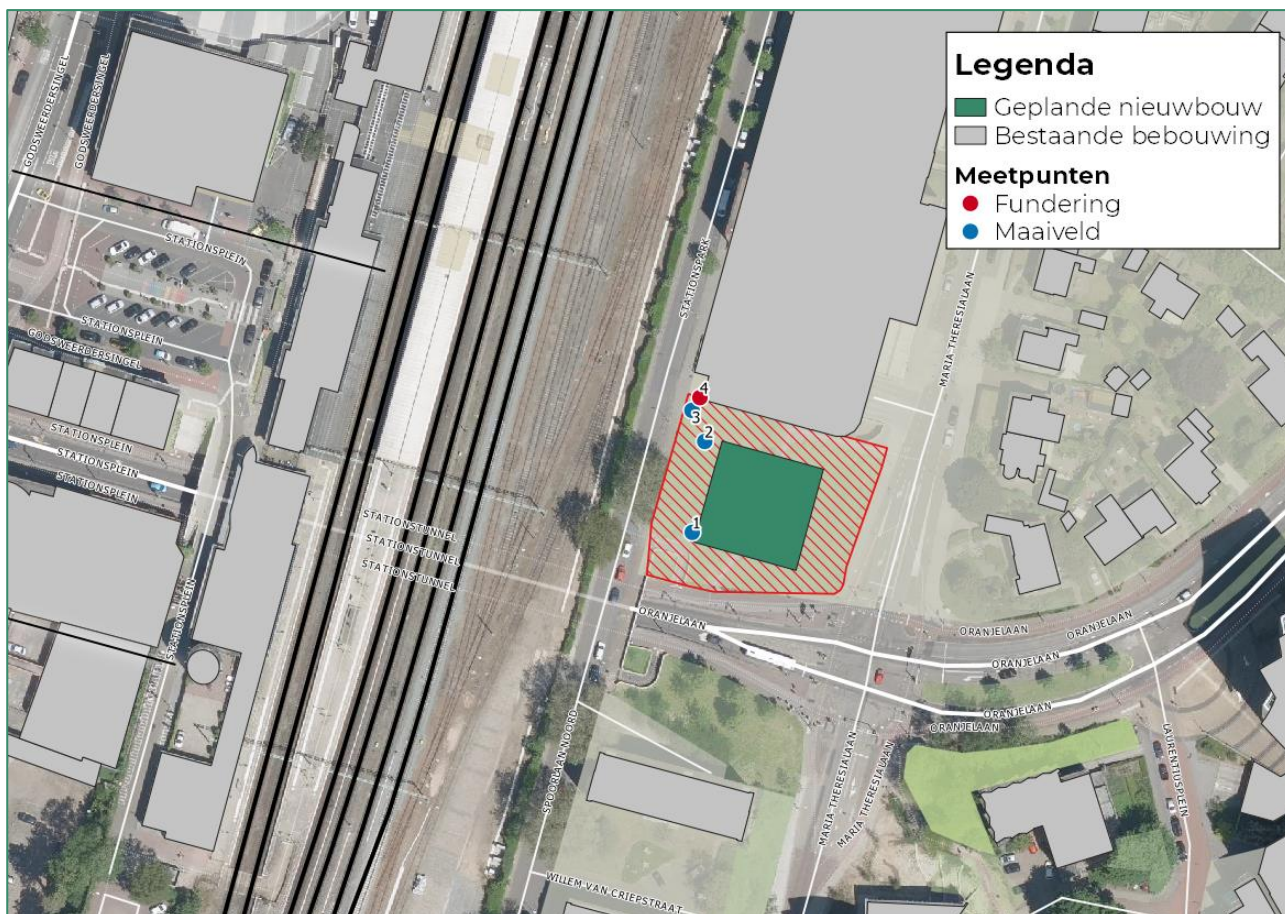
2.2.3. MEETRESULTATEN

Zoals te zien in Figuur 4 zijn door Alcedo op vier locaties metingen uitgevoerd. Het gaat hierbij om drie meetpunten op het maaiveld en een meetpunt aan de fundering van de naastgelegen parkeergarage. De metingen zijn uitgevoerd van 6 tot 13 juli 2022.

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-richtlijnen³. Verdere gegevens over de metingen zijn opgenomen in bijlage III van dit rapport.

² kenmerk 22zp0088-adv-01 van 7 juli 2022

³ Zie een uitgebreide toelichting van de specificaties op <https://www.frog.watch/facts/>. Er wordt uitsluitend gebruik gemaakt van sensoren die voldoen aan de kalibratie-eisen uit de SBR B-richtlijn.



Figuur 4 Meetpunten



BEOORDELINGSKADER



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



BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE

3.1. TRILLINGEN EN WETGEVING

Er bestaat in Nederland geen wettelijk kader voor de beoordeling van trillingshinder in gebouwen. Wel geldt dat in het kader van een goede ruimtelijke ordening o.b.v. de Wet Ruimtelijke Ordening (Wro) kan worden verzocht om trillingen mee te nemen bij de wijziging van bestemmingsplannen waar trillingen een rol kunnen spelen.

Per 1 januari 2024 wordt de Omgevingswet (Ow) naar verwachting van kracht. Ook in de Ow zijn geen streef- en grenswaarden opgenomen voor trillingen afkomstig van hoofd- en spoorwegen. Het begrip 'goede ruimtelijke ordening' uit de Wro art. 3.1 is in de Ow vervangen door het begrip 'evenwichtige toedeling van functies aan locaties', art. 4.2. Vanuit dit artikel moet ook in het kader van een omgevingsplan onder de Ow trillingshinder (waar relevant) in kaart worden gebracht en betrokken worden bij de afweging in het kader van het beschermen van de fysieke leefomgeving. Net als onder de 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.

3.2. DE SBR-RICHTLIJN

Op basis van jurisprudentie wordt al enkele decennia gebruik gemaakt van de SBR-richtlijn om trillingen in gebouwen te beoordelen.⁴

Deze SBR-richtlijn bestaat uit drie delen (deel A⁵ – schade in gebouwen, deel B⁶ – hinder voor personen in gebouwen en deel C⁷ – 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).

⁴ Voor spoorprojecten wordt door ProRail sinds 2012 ook wel gebruik gemaakt van de Bts, deze is afgeleid van de SBR-richtlijn en op aspecten aangescherpt (waaronder een doelmatigheidsafweging en een andere manier om de trillingen vast te stellen). Deze richtlijn wordt echter doorgaans niet gebruikt om de trillingen in nieuw te bouwen woningen langs het spoor te beoordelen. In dit onderzoek is de Bts dan ook niet gebruikt als beoordelingskader.

⁵ SBR-richtlijn deel A:2017 – Schade aan bouwwerken

⁶ SBR-richtlijn deel B:2002 – Hinder voor personen in gebouwen

⁷ SBR-richtlijn deel C:2002 – Verstoring van trillingsgevoelige apparatuur



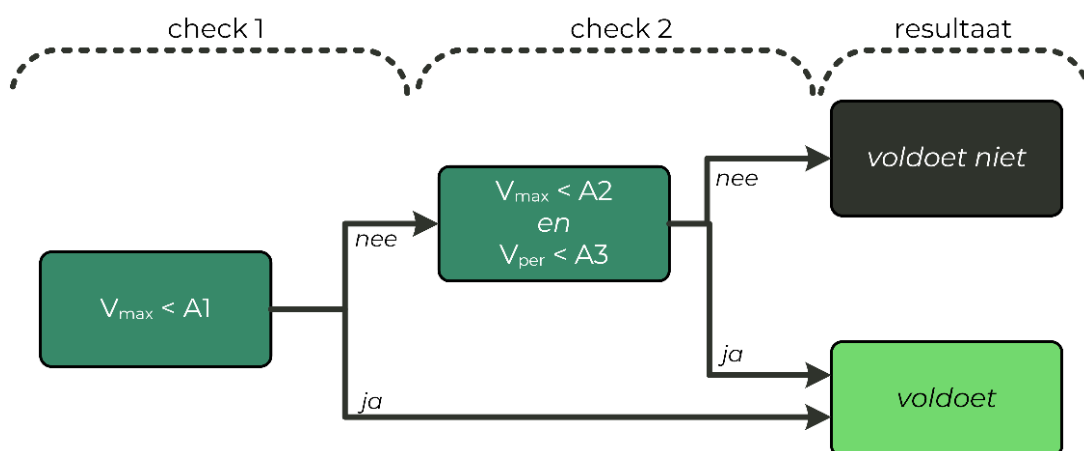
2. De richtlijn maakt in de beoordeling onderscheid tussen verschillende situaties, en toetst daarbij strenger in:
- Nieuwbouwsituaties (nieuwe gebouwen, nieuw spoor, aanleg van wissels). Bij bestaande situaties zijn de streefwaarden minder streng, er wordt dan uitgegaan van een zekere mate van gewenning en er zijn minder mogelijkheden om de trillingen te reduceren. In dit plan gaat het om een nieuw gebouw.
 - 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 woon-, kantoor- en horecafunctie. De horecafuncties vallen buiten het beoordelingskader.
 - De nacht, omdat de meeste hinder vaak in rust wordt ervaren. De streefwaarden voor overdag zijn ca. een factor 2 minder streng dan 's nachts.

Een gebouw kan op twee manieren voldoen aan de richtlijn: de trillingssterkte V_{max} moet lager zijn dan de onderste streefwaarde A1 (zie Tabel 3), óf V_{max} moet lager zijn dan de bovenste streefwaarde A2, waarbij tegelijkertijd de trillingsintensiteit V_{per} lager is dan de streefwaarde A3. Zie ook het schema in Figuur 5. In dit rapport worden de trillingen, conform de SBR B-richtlijn, beoordeeld op de streefwaarden voor een nieuwe situatie.

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

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

	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	0.10	0.2	0.4	0.10
Kantoor, nieuwe situatie	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
Kantoor, bestaande situatie	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15



Figuur 5 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

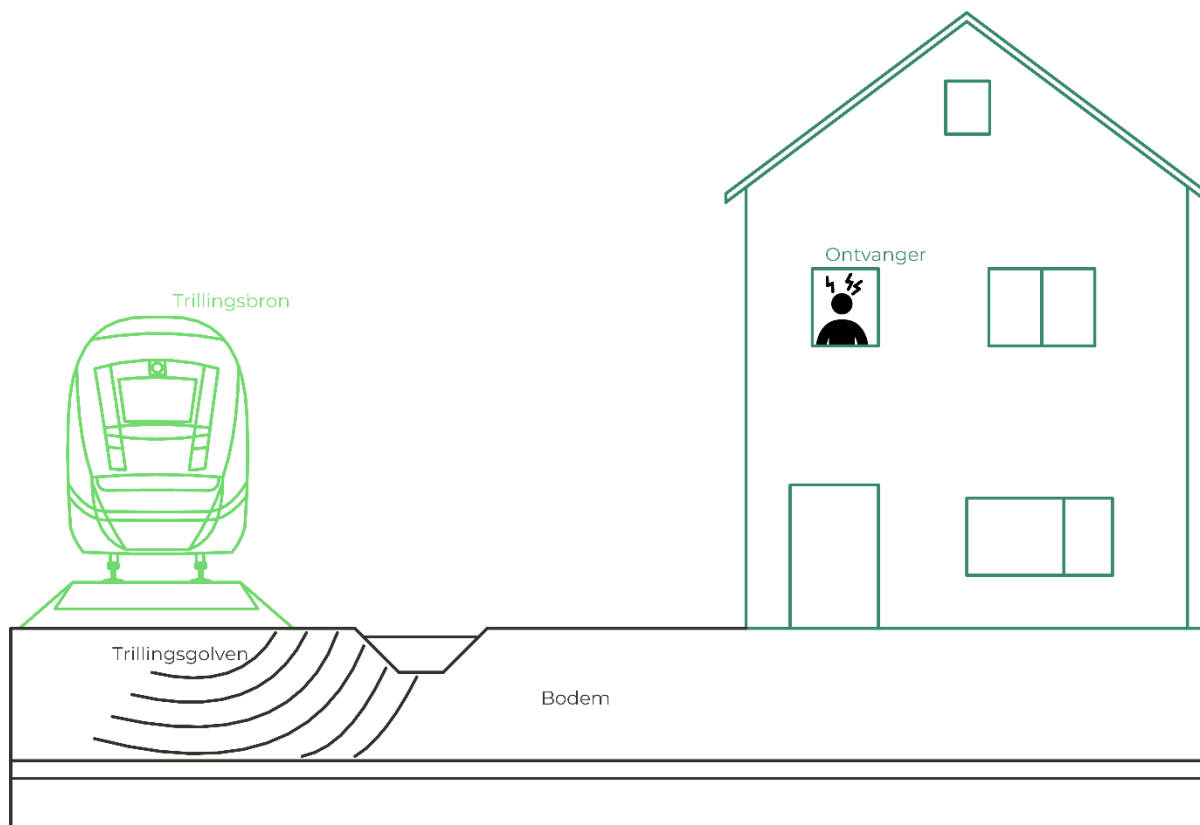
3.3. REKENMETHODE

In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om een nog niet gerealiseerd gebouw, wordt op basis van metingen in de omgeving van de bebouwing (op maaiveld en aan bestaande bebouwing) een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande nieuwe bebouwing. Deze verwachte trillingen zijn afhankelijk van de constructieve eigenschappen van de geplande bebouwing, maar ook van de bodem, de afstand tot het spoor en natuurlijk de gemeten trillingen. Hieronder wordt een korte uitleg gegeven over hoe trillingen zich voortplanten van de trillingsbron tot in het gebouw. 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 6.

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



Figuur 6 Trillingen – het systeem van trillingsbron, de bodem als doorgeefmedium 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 meerdere punten op maaiveld in het plangebied en aan de fundering van de naastgelegen parkeergarage. De beoordeling van de trillingen in de geplande bebouwing heeft plaatsgevonden op basis van deze metingen. De metingen zijn gebruikt als input voor het rekenmodel, waarbij de gemeten trillingen op de fundering van het gebouw zijn aangebracht. Meer informatie hierover is te vinden in bijlage II.

3.3.3. DE BODEM

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

3.3.4. HET GEBOUW

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

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 is bekend dat die vooral rond kunstwerken (zoals de onderdoorgang Stationsplein) vaak slechter is. Door te meten op meerdere punten hebben we variaties waar mogelijk meegenomen in de analyse en 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 op meerdere punten te meten (zie Figuur 4) is de invloed van deze variaties meegenomen in de berekeningen. Bovendien is op diverse afstanden van het spoor gemeten. De invloed van de onzekerheid in de bodem is daarmee meegenomen in de analyse, de impact op de resultaten is daardoor beperkt.
- Ten aanzien van de gebouwen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en voorlopig 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 waarden.

- 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.

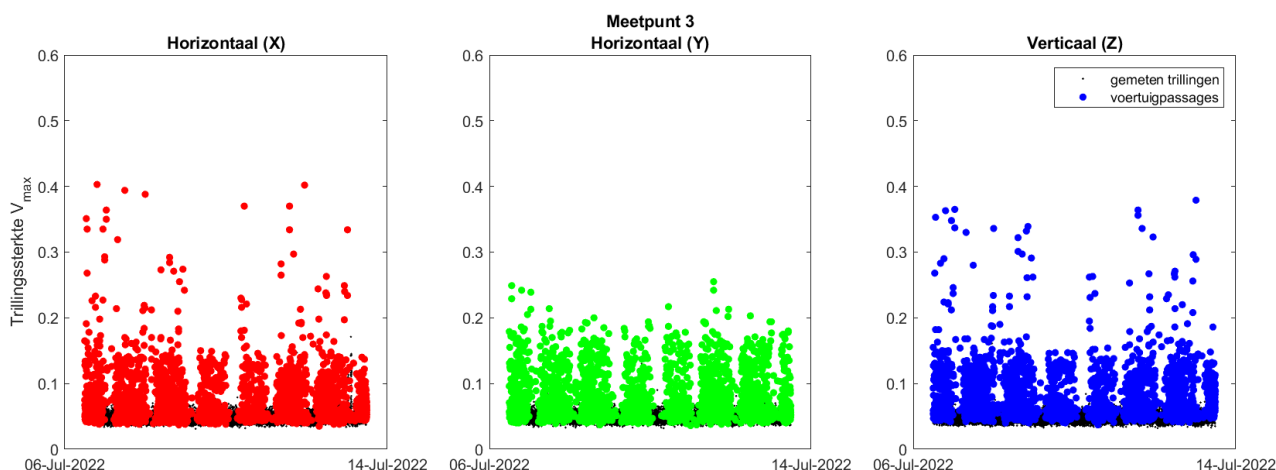




VERWACHTE TRILLINGEN

4.1. MEETRESULTATEN

Alcedo heeft metingen uitgevoerd op maaiveld en aan de fundering van de naastgelegen parkeergarage. De trillingen op maaiveld zijn weergegeven in Figuur 7. Overige gegevens uit de metingen hebben we opgenomen in bijlage III. Vooral in horizontale X-richting (loodrecht op het spoor) en in verticale richting zijn de trillingen hoog. De uitschieters (boven de ca. 0.2) zijn allemaal afkomstig van goederentreinen.



Figuur 7 Gemeten trillingen op maaiveld (meetpunt 3)

4.2. TRILLINGEN IN GEPLANDE BEBOUWING

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

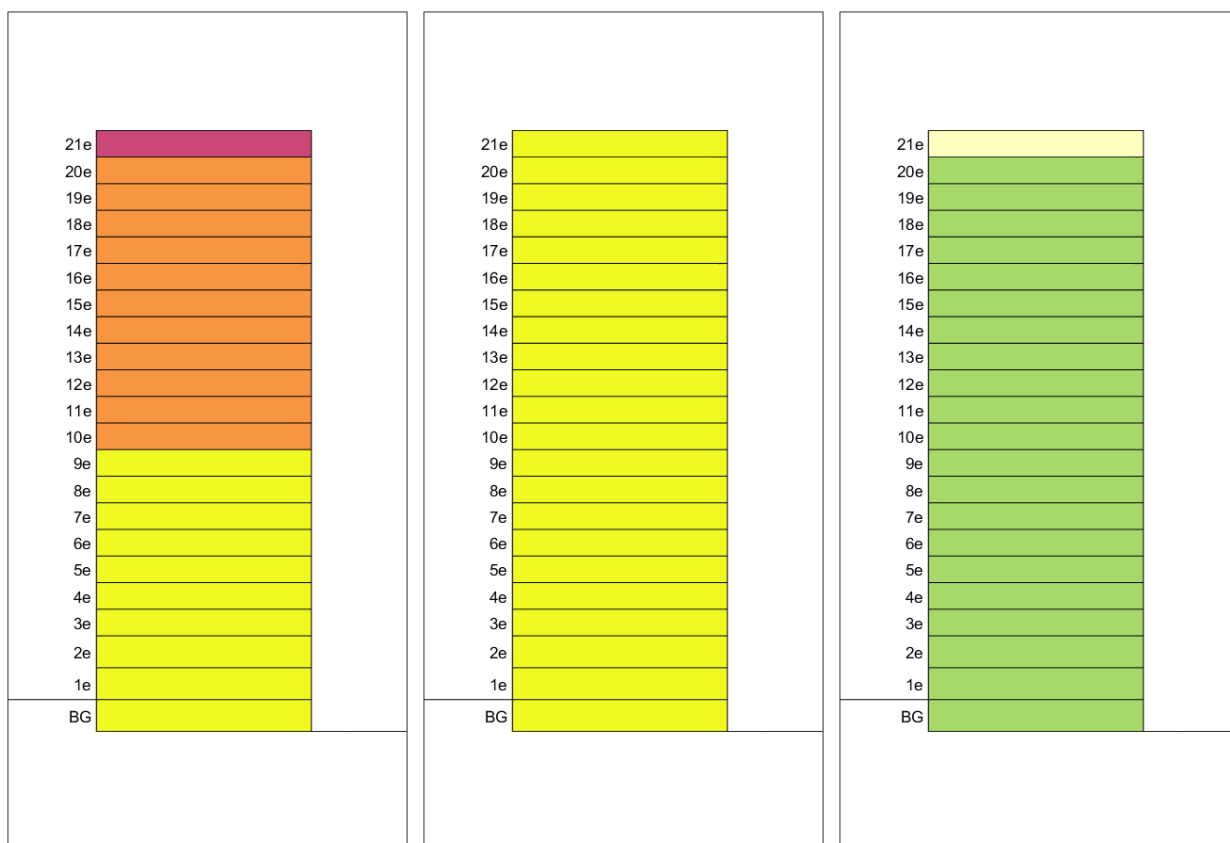
De resultaten hebben we weergegeven in Tabel 4, samen met een beoordeling van de trillingen. De trillingen zijn weergegeven als een bandbreedte (90 procent onzekerheidsinterval), omdat de trillingen afhankelijk zijn van de hoogte in het gebouw, maar ook van resterende onzekerheden in de constructie en berekeningen (zie paragraaf 3.3.5 en bijlage II). Gele arcering geeft aan dat er sprake is van incidentele overschrijdingen van de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn.

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

Verdieping	Functie	V_{max}	V_{per}	Beoordeling
BG	Horeca	0.1 – 0.2	0.00 – 0.01	Niet trillingsgevoelig
1 – 2	Kantoor	0.1 – 0.2	0.00 – 0.01	Voldoet
3 – 20	Wonen	0.1 – 0.2	0.00 – 0.01	Voldoet
21	Wonen	0.3	0.01	Incidentele overschrijdingen

De resultaten (verwachtingswaarde van de trillingen) zijn per verdieping weergegeven in Figuur 8.





Figuur 8 Van links naar rechts: trillingssterkte V_{max} , gemiddelde trillingssterkte V_{per} en beoordeling van de trillingen. Legenda in Tabel 5 en Tabel 6

Tabel 5 Legenda bij Figuur 8 voor trillingssterkte V_{max} , gemiddelde trillingssterkte V_{per}

Kleur	Trillingssterkte V_{max}	Gem. trillingssterkte V_{per}
Yellow	< 0.1	< 0.05
Orange	0.1 – 0.2	0.05 – 0.07
Pink	0.2 – 0.4	0.07 – 0.10
Purple	0.4 – 0.8	0.10 – 0.15
Dark Blue	> 0.8	> 0.15

Tabel 6 Legenda bij Figuur 8 voor beoordeling van de trillingen

Kleur	Beoordeling
Green	Voldoet
Yellow	Voldoet niet, incidentele overschrijdingen
Orange	Voldoet niet
Grey	Niet trillingsgevoelig

Samengevat geldt het volgende:

- Op de onderste drie bouwlagen (*horeca* en *kantoor*) wordt voldaan aan de streefwaarden. Horecafuncties vallen buiten het beoordelingskader voor trillingen, en voor kantoorruimtes zijn de trillingen veel lager dan de streefwaarden.
- Tot en met de 20^e verdieping wordt naar verwachting ook voldaan aan de streefwaarden voor functie *wonen*. Op de hoogste woonlaag zijn incidentele overschrijdingen mogelijk. Het gaat om incidentele overschrijdingen, naar verwachting maximaal 1 overschrijding per week. De trillingen nemen toe met de hoogte, en zijn daardoor het hoogste op de bovenste verdieping.
- Tijdens de meting was de trillingssterkte V_{max} in de nacht (als de streefwaarden voor gebouwen met een woonfunctie strenger zijn) vergelijkbaar met de trillingssterkte overdag. In de beoordeling is daarom geen nader onderscheid gemaakt tussen de trillingen overdag en 's nachts (wanneer de streefwaarden strenger zijn). De gemiddelde trillingssterkte V_{per} is overdag maatgevend, omdat er dan meer treinen passeren.

Omdat er sprake is van overschrijdingen van het beoordelingskader, geven we in het volgende hoofdstuk concrete handvatten voor de optimalisatie van de constructie en voor maatregelen.





MAATREGELEN



In dit hoofdstuk worden handvatten gegeven om de woningen trillingsarm te ontwerpen, en wordt aangegeven welke maatregelen mogelijk zijn om de trillingen te verminderen.

Hierbij worden ook handvatten gegeven voor een juridisch houdbare afweging tussen effect en kosten van maatregelen.



MITIGERENDE MAATREGELEN

Door de passage van zware goederentreinen worden overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder verwacht op de hoogste verdieping. In dit hoofdstuk beschrijven we de mogelijke maatregelen en bouwkundige optimalisaties waarmee de trillingen kunnen worden verminderd.

5.1. NUT EN NOODZAAK VAN MAATREGELEN

Voor de afweging van maatregelen geeft bijlage 5 van de SBR B-richtlijn handvatten. Deze bijlage classificeert de trillingen op de verdiepingen met een mogelijke overschrijding als *matige hinder*. Vervolgens geeft deze bijlage aan dat matige hinder kan worden geaccepteerd onder een aantal voorwaarden:

1. De mate waarin de trillingssterkte voorkomt. Hiervoor geldt dat de gemiddelde trillingssterkte V_{per} een goede indicatie is. De gemiddelde trillingssterkte is met een maximale waarde van 0.01 ruim lager dan de streefwaarde (0.05). Het gaat verder om een relatief beperkt aantal overschrijdingen: maximaal 1 per week, ook na intensivering van het goederenverkeer.
2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. Hiervoor geldt dat de trillingen van wegverkeer lager zijn dan van het treinverkeer. Van een maskerend effect is dus geen sprake.
3. De mogelijkheid tot het treffen van reducerende maatregelen. Het is conform bestaande jurisprudentie gebruikelijk om hierbij een afweging te maken tussen de kosten en het effect van de maatregelen, maar ook aspecten als duurzaamheid en impact op de omgeving kunnen worden meegenomen in deze afweging.

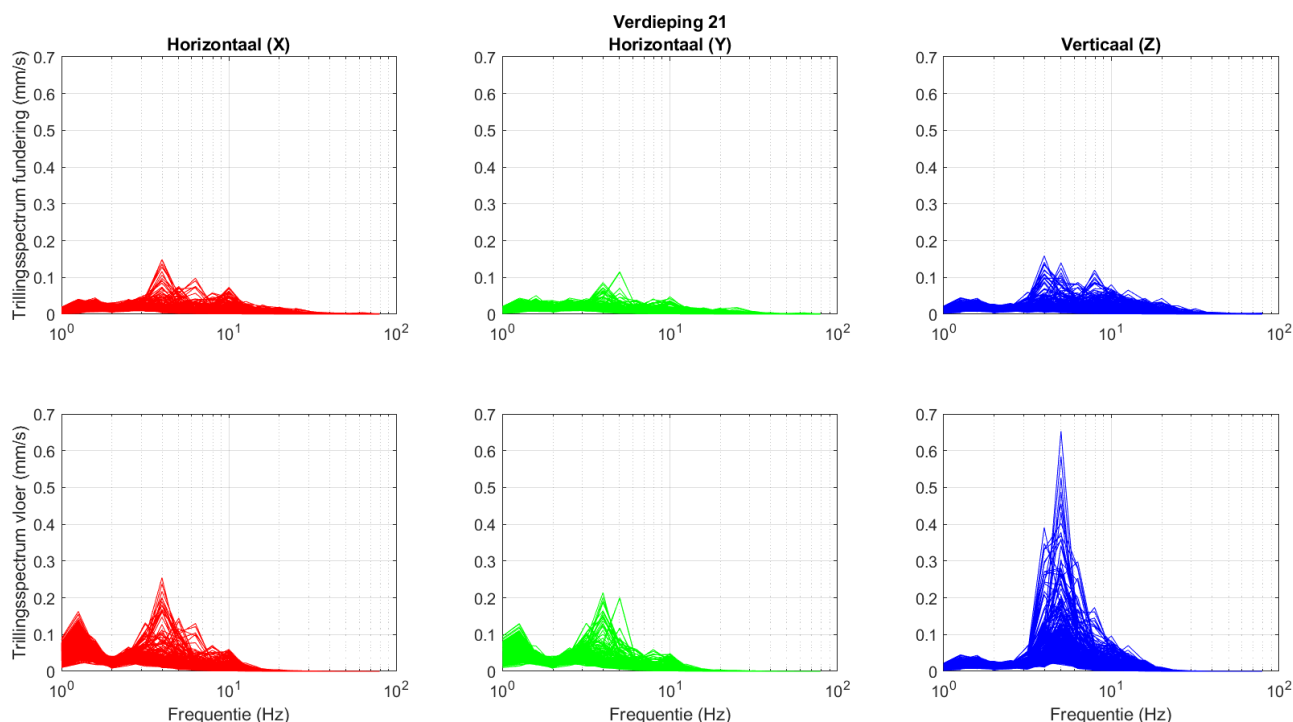
Gelet op bovenstaande dient daarom een afweging plaats te vinden waarbij maatregelen worden afgewogen op doelmatigheid (kosten vs. effect). Daarom gaan we hierna in op maatregelen om de trillingen te reduceren. Om effectieve maatregelen te treffen, stellen we eerst vast bij welke trillingsfrequenties vooral hoge trillingen optreden. Daarna gaan we in op maatregelen die mogelijk zijn aan de trillingsbron (de trein of het spoor), maatregelen in de bodem en maatregelen aan het gebouw. Daarbij bespreken we ook bouwkundige optimalisaties.

5.2. ANALYSE RESULTATEN

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

Uit Figuur 9 volgt dat de hoogste trillingen optreden in verticale richting. De trillingen zijn vooral hoog bij 4 en 5 Hz. Het gaat om relatief laagfrequente trillingsgolven, afkomstig van goederentreinen, die in het gebouw worden versterkt door de eigenfrequenties van vooral de wanden en vloeren en deels door inverting van het gebouw op zichzelf (zie ook bijlage II voor een toelichting hierop). Maatregelen en optimalisaties moeten vooral effectief zijn tegen de trillingen tussen 3 en 6 Hz. In de volgende subparagrafen wordt ingegaan op mogelijke maatregelen aan de trillingsbron, in de bodem of aan de gebouwen.

Om te voldoen aan het beoordelingskader, is een afname van de trillingssterkte V_{max} met ruim 5 procent nodig.



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

5.3. MAATREGELEN AAN DE TRILLINGSBRON

De meest effectieve manier om de trillingen te reduceren, is het nemen van maatregelen aan de trillingsbron (het spoor of de treinen). De meeste effectieve maatregel aan het spoor is het toepassen van een betonplaat met ballastmat onder het spoor. Veel andere maatregelen aan het spoor zijn minder effectief of niet inpasbaar: goedkopere maatregelen zoals under sleeper pads en ballastmatten hebben onvoldoende effect tegen de laagfrequente trillingen van de goederentreinen, en verlagen van de rijnsnelheid is niet inpasbaar in de dienstregeling.

Nadeel van maatregelen aan het spoor zijn de hoge kosten hiervan (m.n. doordat een buitendienststelling nodig is), bovendien vallen deze maatregelen buiten het plangebied. De betonplaat met ballastmat moet worden toegepast onder alle sporen waar de doorgaande goederentreinen rijden (goederentreinen kunnen hier over alle sporen rijden), over een lengte van 80 tot 150 meter per spoor. De kosten van deze maatregel bedragen ca. € 3.5 tot € 5.5 mln⁸, wat neerkomt op meer dan € 700.000 per appartement met een mogelijke overschrijding. Kosten voor tijdelijk vervoer van treinreizigers en herstel van de omgeving zijn hier nog niet in meegenomen.

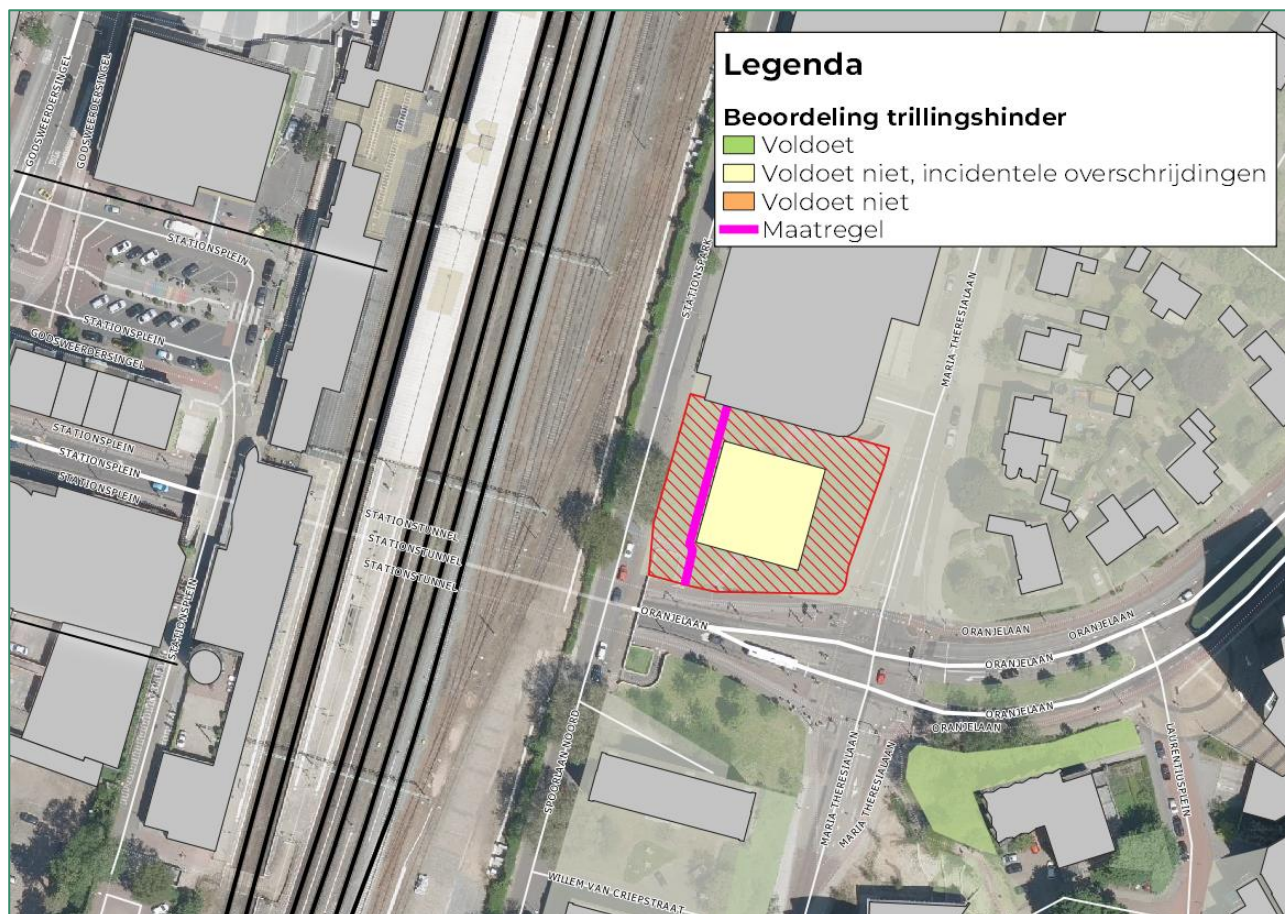
5.4. MAATREGELEN IN DE BODEM

Bij maatregelen in de bodem kan gedacht worden aan het toevoegen van obstakels in de bodem, die ervoor zorgen dat de gebouwen worden afgeschermd. Door het verhoogde talud, waarvoor al een keerwand is voorzien, zijn er mogelijkheden om deze te optimaliseren zodat de trillingen lager worden. Voorbeelden zijn een trillingsscherm van piepschuim (EPS), beton, damwand, jet-grout (soil-mix methode voor beton) of een diepere keerwand. Nadeel van deze maatregelen is

⁸ Ter indicatie: ProRail hanteert bij doelmatigheidsafwegingen een bedrag van € 47.000 per adres

dat deze vaak hoge kosten met zich meebrengen en dat ze niet of slecht aanpasbaar zijn aan toekomstige situaties.

Omdat een trillingsscherm alleen effectief is dicht bij de bron of de ontvanger, is een locatie dichtbij de ontvanger het meest voor de hand liggend, ook omdat daar al een grondkering is voorzien en het maaiveld daar lager ligt, zodat de benodigde diepte geringer is. Om het gebouw af te schermen is een trillingsscherm nodig over vrijwel de volledige breedte van het perceel, ca. 42 meter lang, zie Figuur 10.



Figuur 10 Locatie van mogelijk trillingsscherm

De diepte van een scherm moet, gezien de dominante trillingsfrequenties, voor veel schermtypes minimaal 20 meter zijn om echt effectief te zijn. Mogelijke maatregelen in de bodem met een inschatting van het effect en de kosten zijn weergegeven in Tabel 5.

Tabel 7 Mogelijke maatregelen in de bodem, effect op trillingen en kosten

Maatregel	Effect ⁹	Kosten ¹⁰
Betonnen wand (diepwandmethode)	15 – 25%	€ 1.0 – 1.7 mln
Jet-grout wand	10 – 20%	€ 0.9 – 1.5 mln
Damwand (intrillen)	5 – 10%	€ 0.6 – 0.9 mln
Betonnen wand, bekleed met rubber	25 – 40%	€ 1.4 – 1.9 mln
Damwand met EPS (piepschuim)	10 – 25%	€ 0.8 – 1.3 mln
Damwand met sleuf (luchtspouw)	10 – 20%	€ 1.1 – 1.6 mln
L-wand 4.0 m diep	5 – 10%	€ 0.2 – 0.3 mln
L-wand 4.0 m diep, bekleed met rubber	5 – 15%	€ 0.3 – 0.4 mln
CSM-wand (Cutter Soil Mix of Mix-In-Place)	5 – 10%	€ 0.5 – 1.0 mln
Trillingsscherm EPS (piepschuim), 1 m dik, 5.0 m diep	5 – 15%	€ 0.2 – 0.3 mln

Om te voldoen aan het beoordelingskader is ruim 5% reductie van de trillingen nodig. Dit kan met alle maatregelen worden bereikt. De goedkoopste maatregel is een betonnen L-wand van 4.0 meter diep, met een luchtspouw tussen de L-wand en het gebouw. De kosten van deze maatregel bedragen tussen de € 0.2 en € 0.3 mln. Tenslotte, voor al deze maatregelen geldt, net als bij maatregelen aan het spoor, dat ze niet of slecht aanpasbaar zijn aan toekomstige situaties, en relatief weinig effect hebben op de laagfrequente trillingen van de goederentreinen.

5.5. MAATREGELEN AAN DE GEBOUWEN

Tenslotte zijn ook optimalisaties aan de bebouwing mogelijk. Mogelijke maatregelen zijn het verzwaren van de vloeren, een stijvere constructie of een zwaardere fundering. Hierbij geldt dat verder verzwaren van de wanden of een hogere betonkwaliteit gezien de zware constructie van het gebouw vrijwel geen effect heeft op de trillingen. Door de hoogte van het gebouw is afveren van de fundering hier technisch niet goed mogelijk. Het globale effect en de kosten van de mogelijke maatregelen aan de gebouwen zijn weergegeven in Tabel 8.

⁹ Effect op de trillingssterkte V_{max} , o.b.v. expert judgment op literatuur en eerdere projecten. Het weergegeven effect is op basis van het verwachte trillingsspectrum (zie Figuur 9) en het frequentie-afhankelijke effect van de maatregelen. Effect is t.o.v. huidige ontwerp.

¹⁰ Totale investeringskosten, incl. BTW, prijspeil 2022, met een bandbreedte van +/-25%. Kosten zijn exclusief kosten voor grondverwerving, verleggen van kabels en leidingen en kosten voor een vergunningsprocedure. De werkelijke kosten van maatregelen zullen daardoor hoger uitvallen.

Tabel 8 Mogelijke maatregelen aan de gebouwen, reductie t.o.v. constructie in VO

Maatregel	Effect ¹¹	Kosten ¹²
In-situ beton i.p.v. prefab beton	5 – 10%	< 2% SK
Stijvere balken en kolommen in onderste bouwlagen (dikker of hogere sterkteklasse)	0%	< 1% SK
Stijvere wanden (dikker of hogere sterkteklasse)	0%	< 4% SK
Stijvere balken, kolommen en wandschijven (bijv. hogere sterkteklasse)	0%	< 2% SK
Zwaardere vloer toepassen (dikker)	0%	< 2% SK
Inpakken van de fundering met 150 mm rubber	0 – 10%	2 – 4% SK
Afschermen van de fundering met 1 m dik EPS	5 – 10%	< 1% SK
Zwaardere fundering (langere paalfundering met dikkere palen)	0 – 5%	3 – 5% SK

Het wijzigen van het bouwconcept (van prefab naar i.h.w.g. beton) is effectief (maar kostentechnisch hier niet mogelijk), evenals het afschermen van de fundering met (bij voorkeur) 1000 mm dikke EPS-blokken. Andere maatregelen hebben, gezien het zware karakter van het huidige constructief ontwerp, niet of nauwelijks effect op de trillingen..

5.6. CONCLUSIES EN ADVIES VOOR MAATREGELEN

Op de hoogste verdieping zijn incidentele overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder niet uit te sluiten. De hoge trillingen worden veroorzaakt door goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte, de trillingen van reizigerstreinen voldoen wel aan de streefwaarden voor trillingshinder. Het gaat om een beperkt aantal overschrijdingen, maximaal 1 per week.

Vervolgens is een onderzoek naar maatregelen uitgevoerd. Uit dit onderzoek volgt dat maatregelen aan het spoor (hoewel effectief) niet kosteneffectief zijn: de kosten staan met meer dan € 700.000 per appartement met een overschrijding niet in relatie tot de beperkte overschrijdingen. Ook maatregelen in de bodem (trillingsschermen) zijn kostbaar: meer dan € 20.000 per appartement met een overschrijding. Gezien het zware karakter van het gebouw hebben constructieve optimalisaties geen significant effect op de trillingen. De enige kansrijke oplossing is het afschermen van de fundering, bijvoorbeeld met een 4 meter diepe betonnen L-wand of een 1000 mm dik EPS scherm voor de fundering. De kosten van deze maatregelen bedragen meer dan € 20.000 per appartement, en zorgen maar voor een beperkte verlaging van de trillingen.

Met een beroep op bijlage 5 uit de SBR B-richtlijn kan worden gemotiveerd dat er geen onaanvaardbaar woon- en leefklimaat ontstaat in de geplande woningen. Argumenten die gebruikt kunnen worden, zijn:

¹¹ Effect op de trillingssterkte V_{max} , o.b.v. expert judgment op literatuur en eerdere projecten. Het weergegeven effect is op basis van het verwachte trillingsspectrum (zie Figuur 9) en het frequentie-afhankelijke effect van de maatregelen.

¹² SK = Stichtingskosten

- Er is sprake van *matige hinder*, een situatie die volgens bijlage 5 van de SBR B-richtlijn kan worden geaccepteerd als er sprake is van een beperkt aantal overschrijdingen (zoals in dit geval, maximaal 1 per week) en maatregelen niet goed zijn te treffen (bijvoorbeeld vanwege forse technische risico's of hoge kosten, zoals hier).
- Er is sprake van een beperkt aantal overschrijdingen. Het gaat zonder maatregelen om maximaal 1 overschrijding per week. Bovendien voldoet de gemiddelde trillingssterkte V_{per} ruimschoots aan de streefwaarden, een indicatie dat het om een beperkt aantal passages met hogere trillingen gaat. Er is bovendien slechts sprake van een zeer beperkte overschrijding van de streefwaarden, met iets meer dan 5 procent boven de streefwaarde.
- De trillingen voldoen weliswaar niet aan de strenge streefwaarden voor nieuwbouw, maar wel aan de soepeler streefwaarden voor bestaande bouw. In die laatste streefwaarden is een zeker gewinningseffect meegenomen, deze streefwaarden zijn voor de trillingssterkte V_{max} een factor 2 ruimer. Hoewel deze streefwaarden in dit geval niet van toepassing zijn, laat dit zien dat er sprake is van relatief beperkte trillingen.

Tenslotte, de woningen worden gerealiseerd in een zone dichtbij het spoor, waar nu ook al bebouwing is gerealiseerd die soms ook dicht bij het spoor staat. Het gaat bovendien om oudere, meer trillingsgevoelige bebouwing, waar de trillingen dus hoger zullen zijn dan in dit nieuwe, zwaar geconstrueerde gebouw. Ook zonder maatregelen tegen trillingen ontstaat in de geplande bebouwing daarom naar verwachting geen onacceptabele situatie: de trillingen zijn daar immers (veel) lager dan in andere, al bestaande bebouwing rond deze locatie.



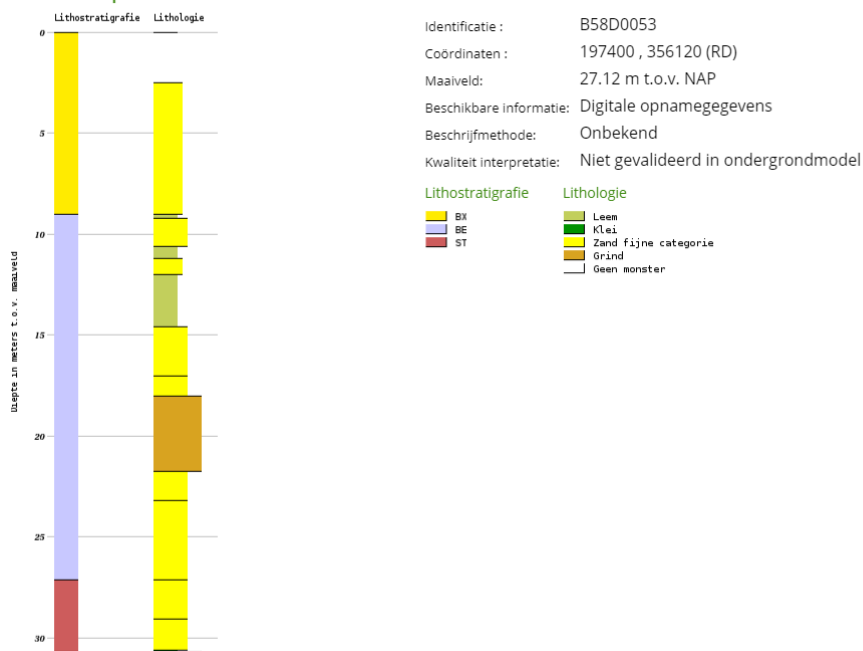


GRONDONDERZOEK

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

Een grondboring in de nabijheid van het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur 13. De bodem is vooral opgebouwd uit zandlagen. Door de zandige bodem dempen de trillingen relatief slecht uit met de afstand.

Boormonsterprofiel



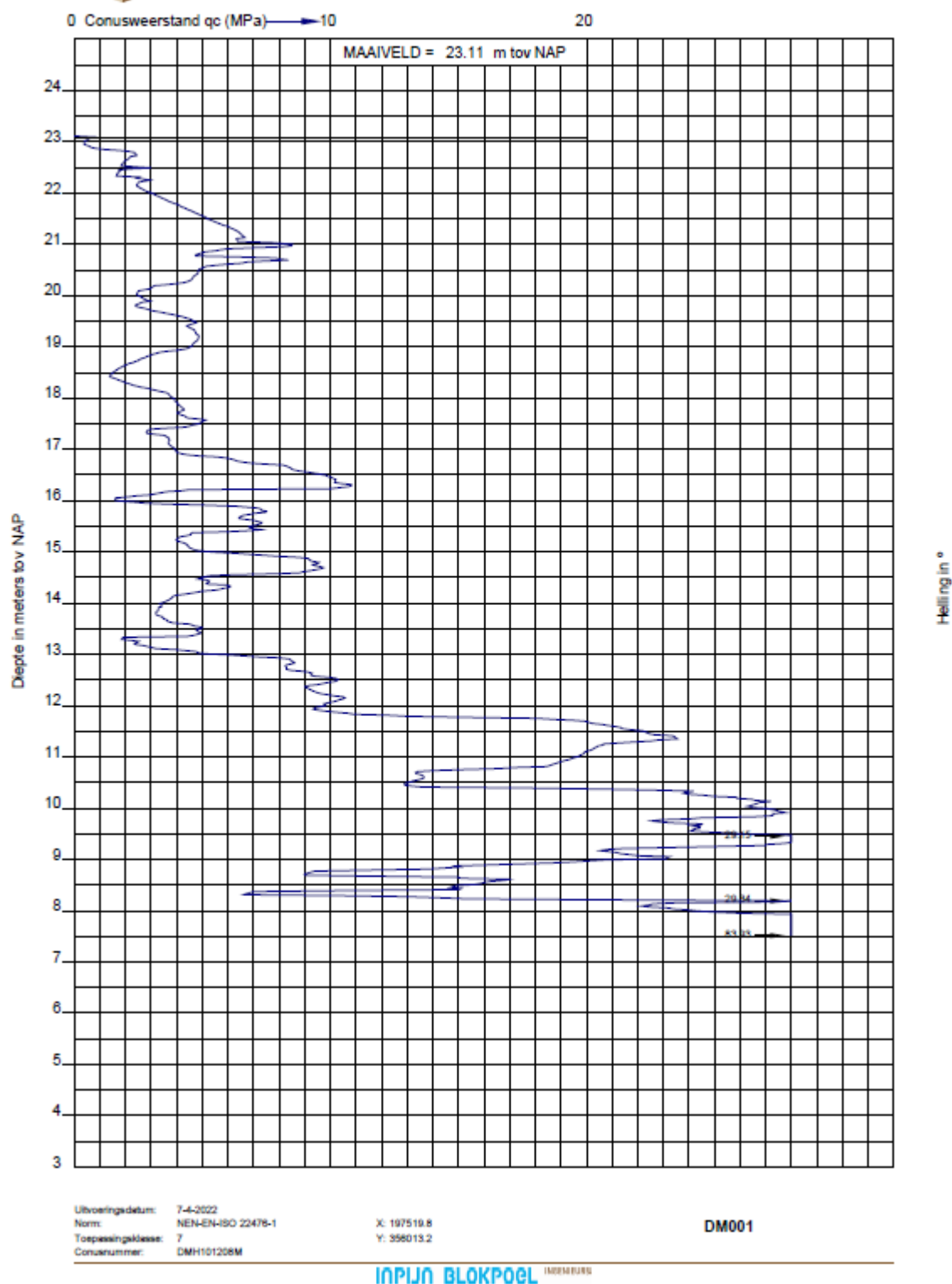
Figuur 11 Boring in het onderzoeksgebied

Een representatieve sondering uit het onderzoeksgebied, waarin onder meer de conusweerstand te zien is, is weergegeven in Figuur 12. Ook hier is de zandige bodemopbouw (hoge conusweerstand, lage wrijving) te zien.





Project: Roertoren aan de Oranjelaan te Roermond
Opdracht: 22ZP0088
Betreft: Sondeergrafiek

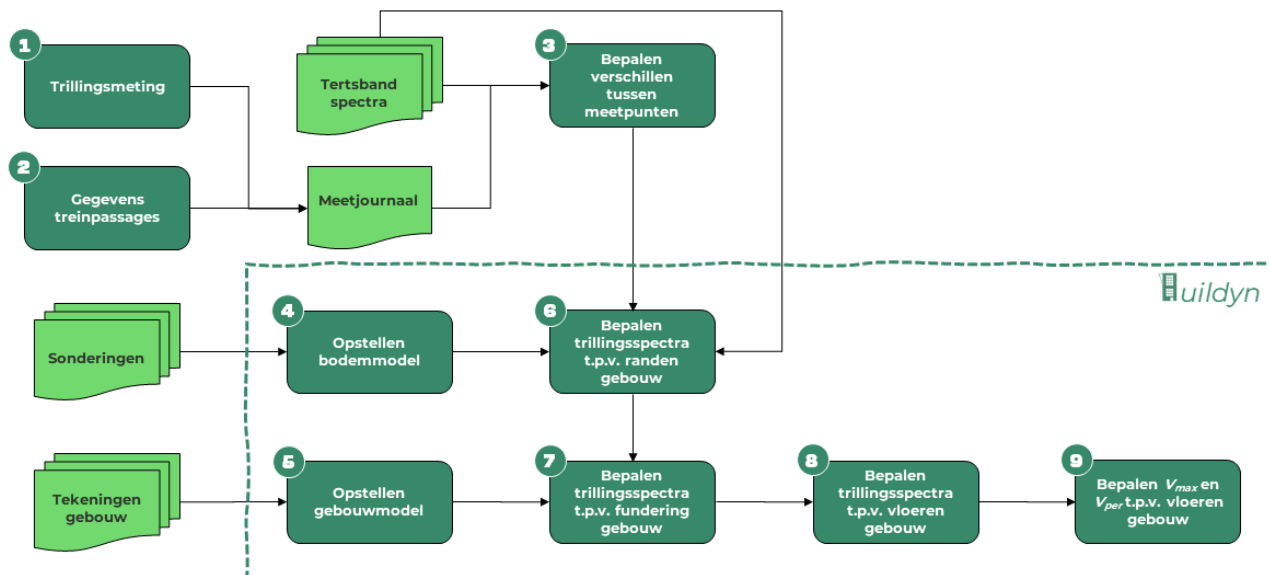


Figuur 12 Sondering in het onderzoeksgebied



REKENMODEL

In deze bijlage beschrijven we het gebruikte rekenmodel om de trillingen in de gebouwen te berekenen. Visueel is het proces weergegeven in Figuur 13, hieronder beschrijven we per stap de methode en waar mogelijk de tussenresultaten.



Figuur 13 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.

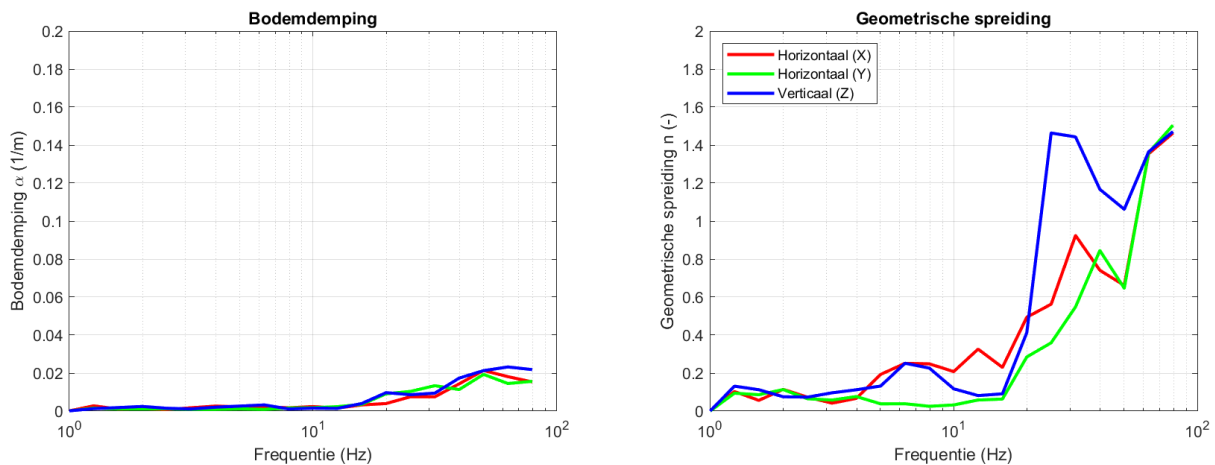
De prognoses van de trillingen zijn gebaseerd op de sensor met de meetduur van een week die het dichtst bij het gebouw staat waarvoor de resultaten nodig zijn. Op veel punten meten we korter, dat is voldoende om de invloed van variaties in beeld te brengen, zie ook paragraaf 2.2.3 voor een nadere motivatie.

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 14.





Figuur 14 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 15. 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 9.

Tabel 9 Initiële modelparameters

Materiaal	E-modulus E	Damping 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
Metselwerk	8 GPa	5 %	1800 kg/m ³	0,25
Staal	210 GPa	1 %	700 kg/m ³	0,30
Hout	13 GPa	7 %	7850 kg/m ³	0,40

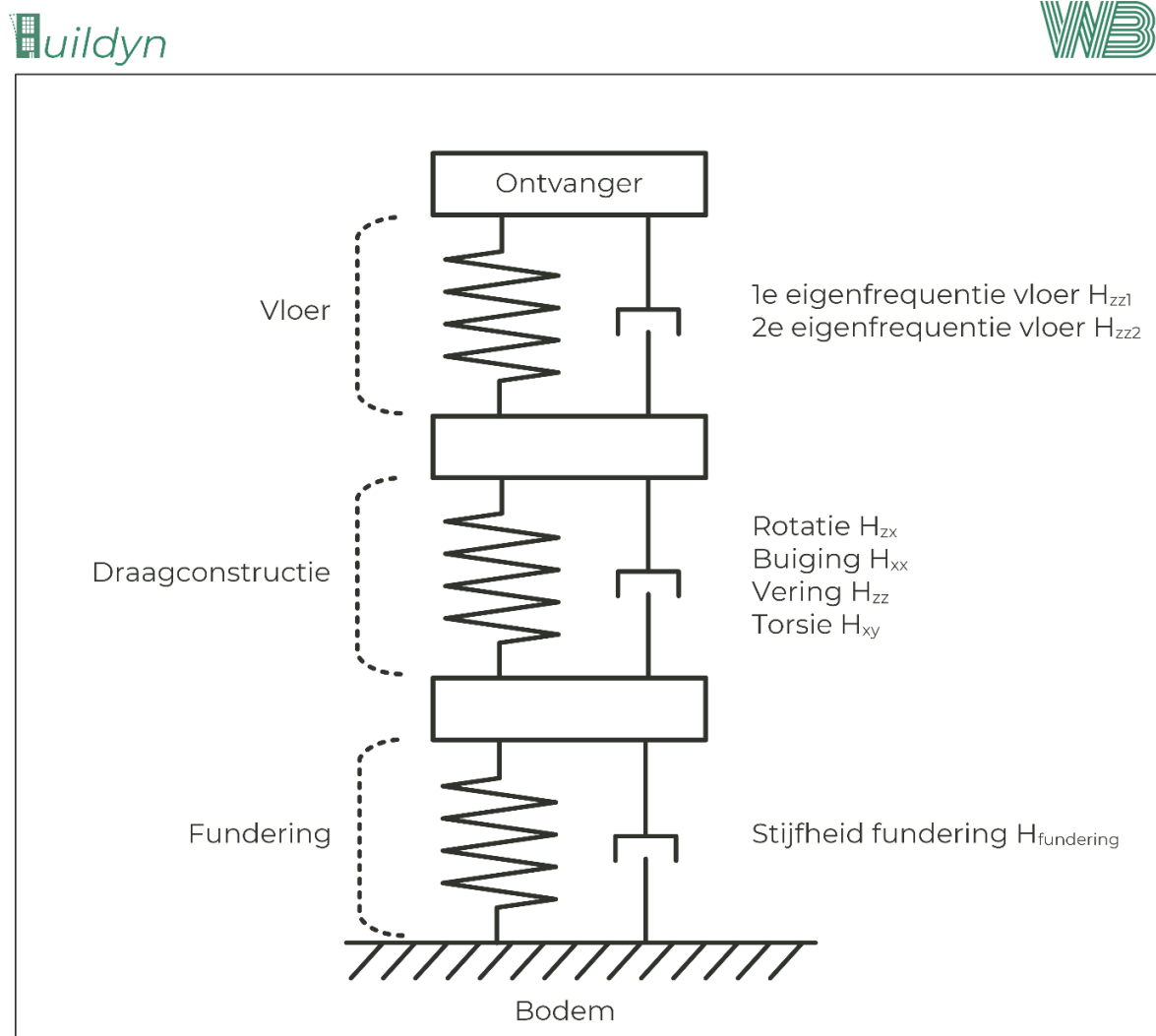
Vervolgens wordt het model opgebouwd. Dat gaat als volgt:

1. Eerst wordt een model opgebouwd o.b.v. de materiaaleigenschappen zoals weergegeven in Tabel 9. Dit model wordt doorerekend om de verschillende overdrachten (zie Figuur 15 en hierna) te berekenen.

2. Op basis van gebouwafmetingen (hoogte, breedte, diepte, vloertype, vloerafmetingen en gebruikte materialen) worden de overdrachten gekalibreerd met een random forest algoritme op basis van een database met praktijkmetingen. Technisch gezien modificeert het algoritme de demping, E-modulus, massa en inklemming van onderdelen om de overdrachten zo goed mogelijk te laten overeenkomen met vergelijkbare gebouwen uit de database. Hiermee ontstaan nauwkeuriger, gemodificeerde overdrachten.

Relevant bij deze modificatie is dat het model 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.

Verder, resultaten kunnen worden opgevraagd 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.



Figuur 15 Principe van Buildyn met een gebouw als gekoppeld massaveersysteem. Rechts de verschillende componenten van het rekenmodel

Hieronder gaan we in op de verschillende onderdelen uit het model.

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
- » Afmetingen en gewicht van het gebouw
- » Bodem waarop het gebouw staat

Voor al boven de 10 Hz worden trillingen uitgedempt door de fundering, bij slappe bodems en grote gebouwen kan ook al bij lagere frequenties demping optreden.

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

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.

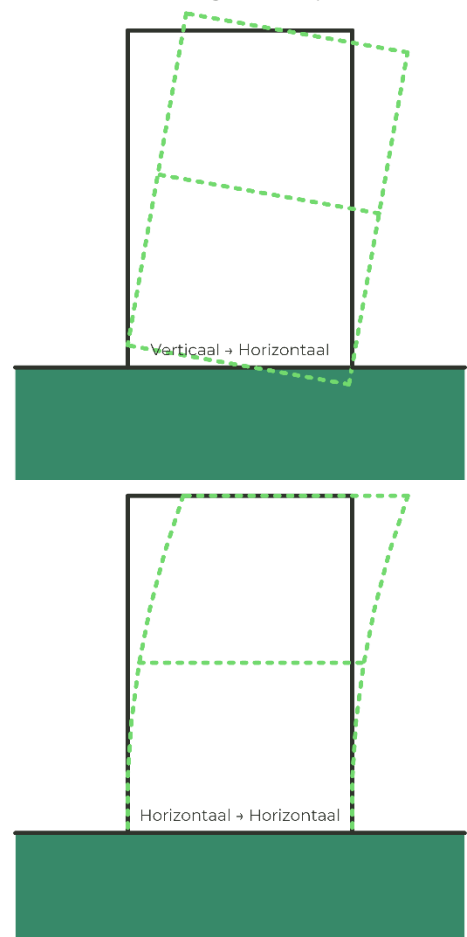
Dit effect noemen we H_{zx} , en is afhankelijk van:

- » 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

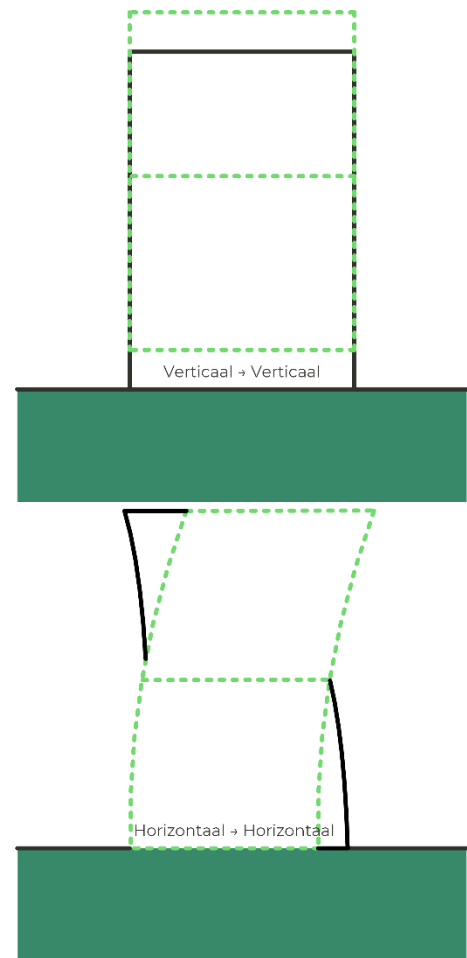


Het derde principe, dat van vering van het gebouw op zijn fundatie, is rechts weergegeven. Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappe onderlaag of lokaal slappere elementen (denk aan kolommen en balkenstructuren). Dit effect noemen we H_{zz} , en is afhankelijk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



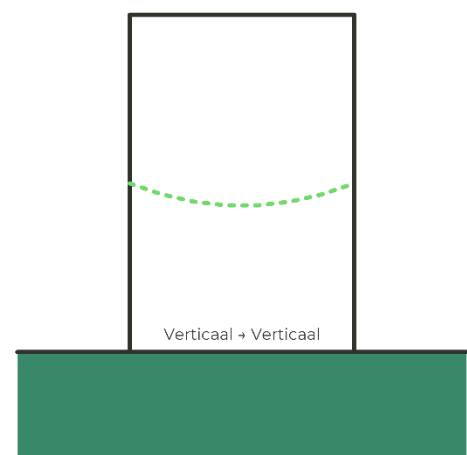
II.5.3 VLOEREN

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:

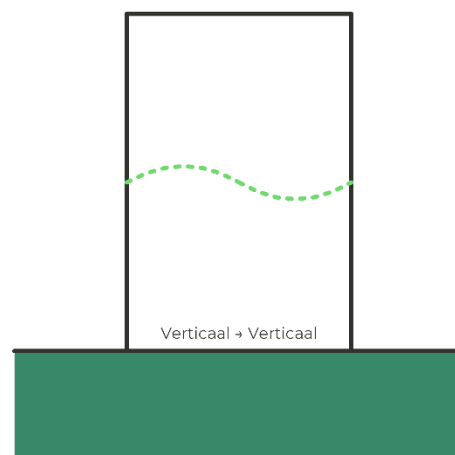
- » Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- » Afmetingen van de vloer
- » Type oplegging



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).

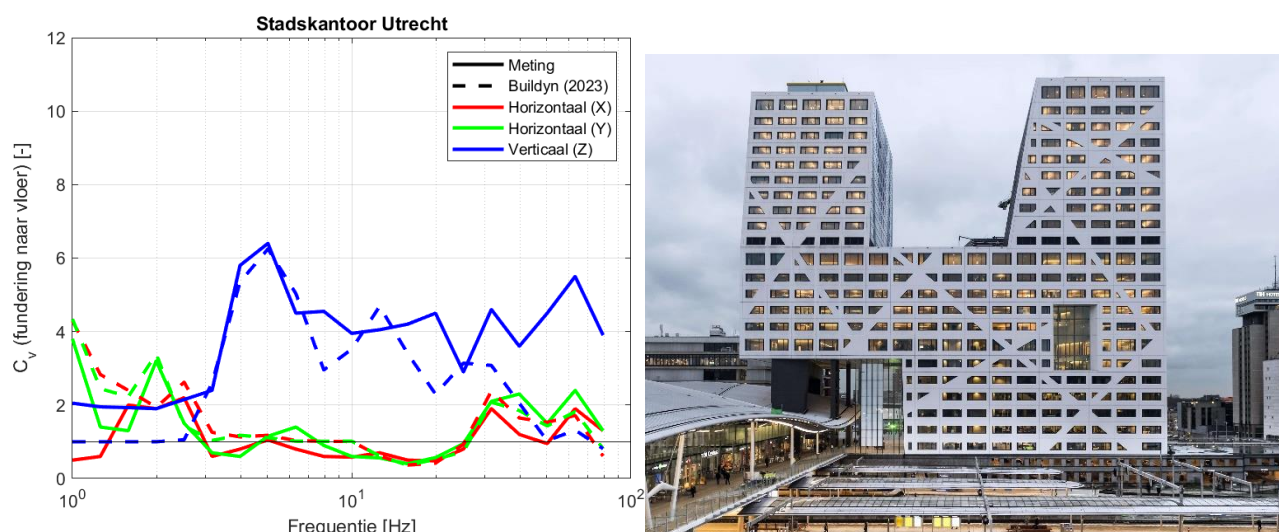


II.5.4 BETROUWBAARHEID VAN HET MODEL

Uit evaluatiemetingen blijkt dat model door de kalibratie met praktijkdata een nauwkeurigheid heeft die in de meeste gevallen significant beter is dan een 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. Qua detailniveau, zoals omschreven in de *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen* (Tabel 10.3), gaat het daarom 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 de Roertoren.

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 16.

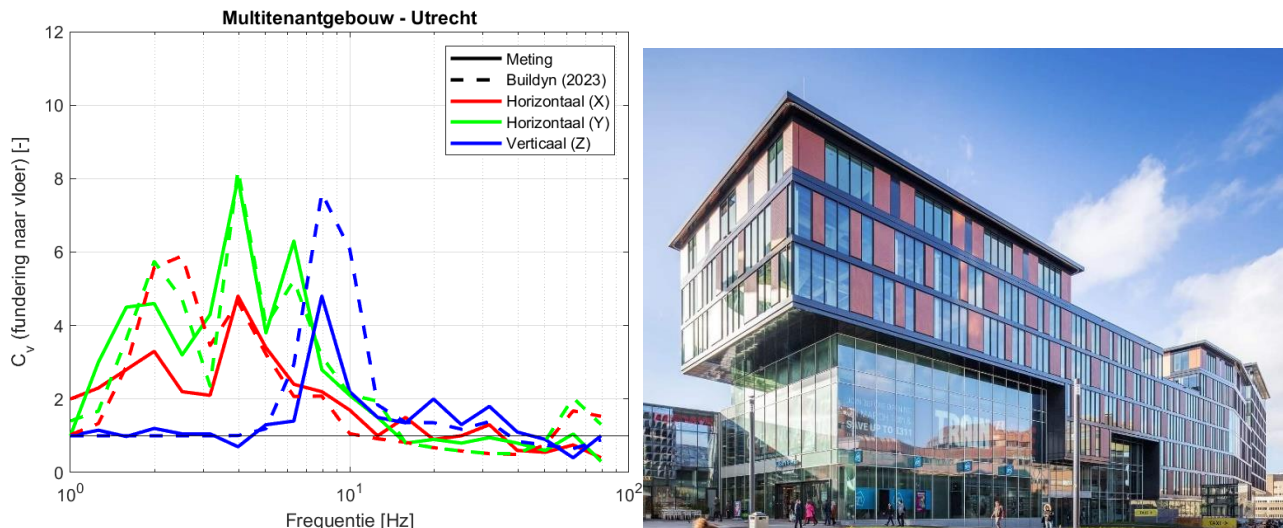


Figuur 16 Staskantoor in Utrecht, links de gemeten en berekende overdrachten, rechts een foto van het gebouw

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 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 17.



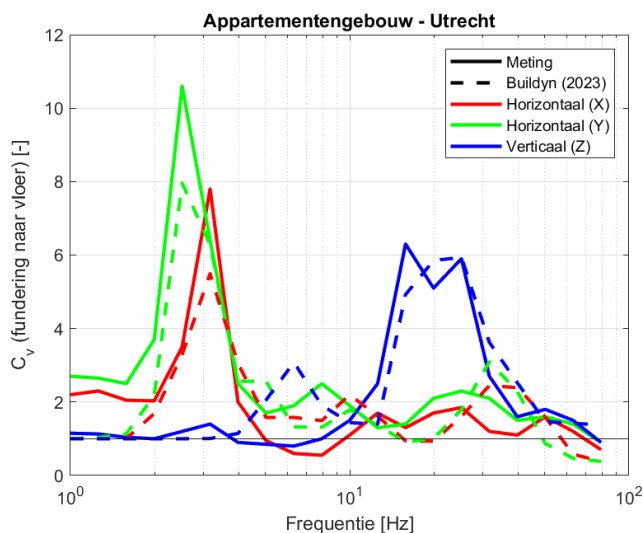
Figuur 17 Noordgebouw in Utrecht, links de gemeten en berekende overdrachten, rechts een foto van het gebouw

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 opslinging 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.

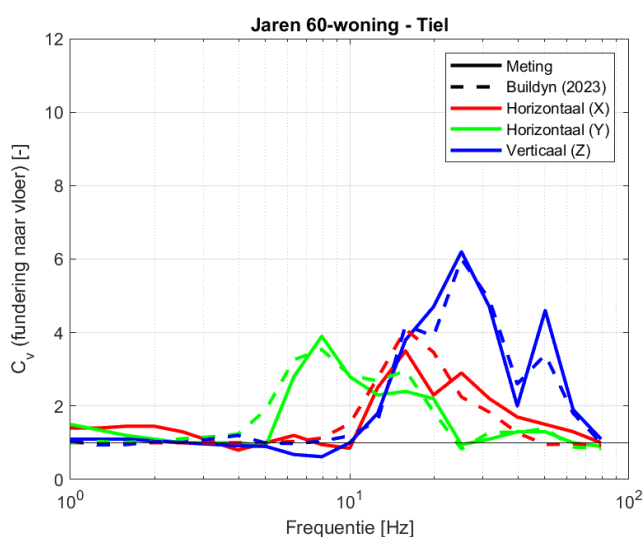
Het derde gebouw is een appartementengebouw in Utrecht, een constructie met prefab betonnen wanden, breedplaatvloeren en onderin een open kolommenstructuur. De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 18.



Figuur 18 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.

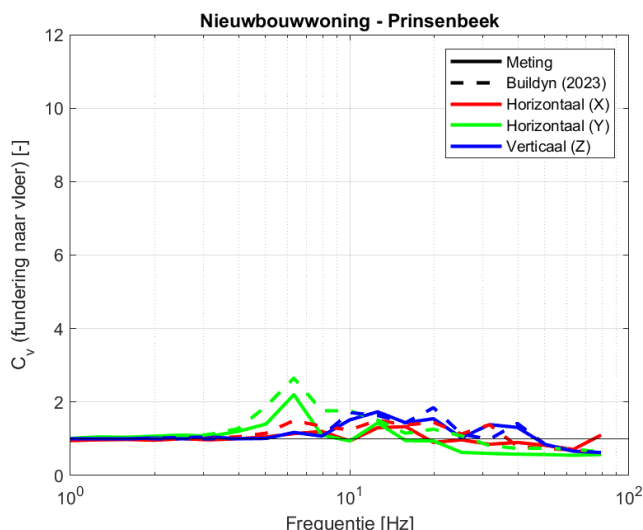
Het vierde gebouw is een wat oudere woning in Tiel, opgebouwd uit een conventionele constructie van metselwerk en met houten vloeren. De berekende en gemeten overdrachten zijn weergegeven in Figuur 19.



Figuur 19 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 19.



Figuur 20 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.

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

1. De damping is in de 2023-versie lager voor de Roertoren dan in de 2022-versie. Vooral vanaf 10 Hz heeft dat impact op de trillingen, daaronder is de impact beperkter. In de 2022-versie heeft de Roertoren een damping die verloopt van 4.3% op de onderste bouwlaag naar 3.5% bovenin het gebouw. In de 2023-versie verloopt de damping van 3.3% onderin het gebouw naar 2.7% bovenin het gebouw. Met de 2023-versie zouden de trillingen vooral bij hogere frequenties daarom wat hoger zijn. De meeste trillingsenergie zit echter bij frequenties onder de 10 Hz. Uit de berekeningen blijkt dat impact op de trillingssterkte V_{max} daarom kleiner is dan 10%.
2. De onzekerheid is in de 2023-versie lager dan in de 2022-versie, omdat er meer gebouwen in de database zijn opgenomen. Daardoor is de bandbreedte in de onzekerheid lager.

Gevolg van bovenstaande is dat, als de Roertoren opnieuw berekend zou worden met de 2023-versie van Buildyn, er incidentele overschrijdingen worden verwacht op de bovenste 3 verdiepingen (i.p.v. alleen op de bovenste verdieping).

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.

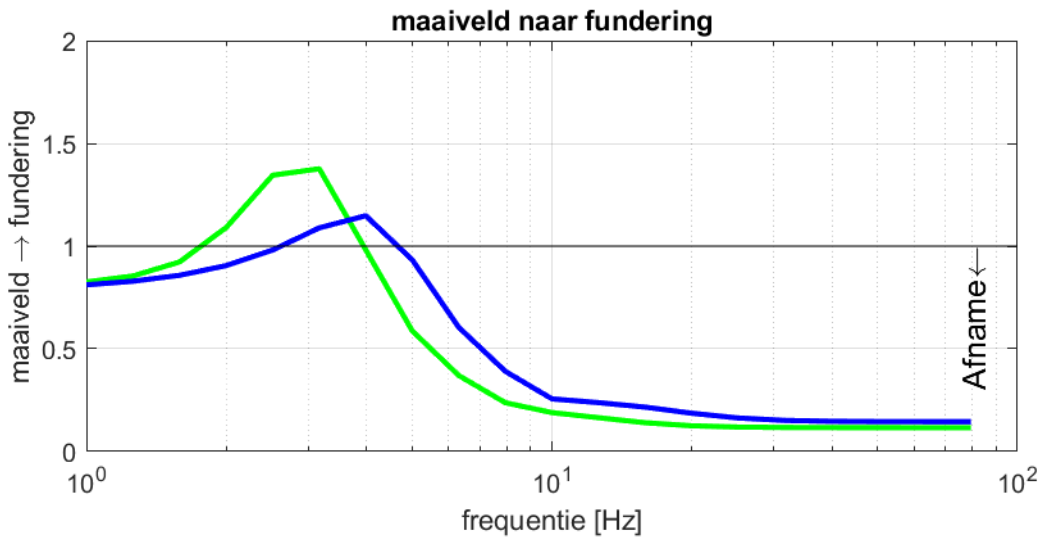
Na deze stap zijn de trillingen ter plaatse van de randen van het gebouw op maaiveld bekend.

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:

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

Hierin zijn $C_{f,ij}$ de frequentie-afhankelijke overdrachten van maaiveld naar fundering, zoals deze volgen uit het model. Dominant hierin zijn vooral de 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. Deze zijn voor de Roertoren weergegeven in Figuur 21.



Figuur 21 Overdracht C_f van maaiveld naar fundering

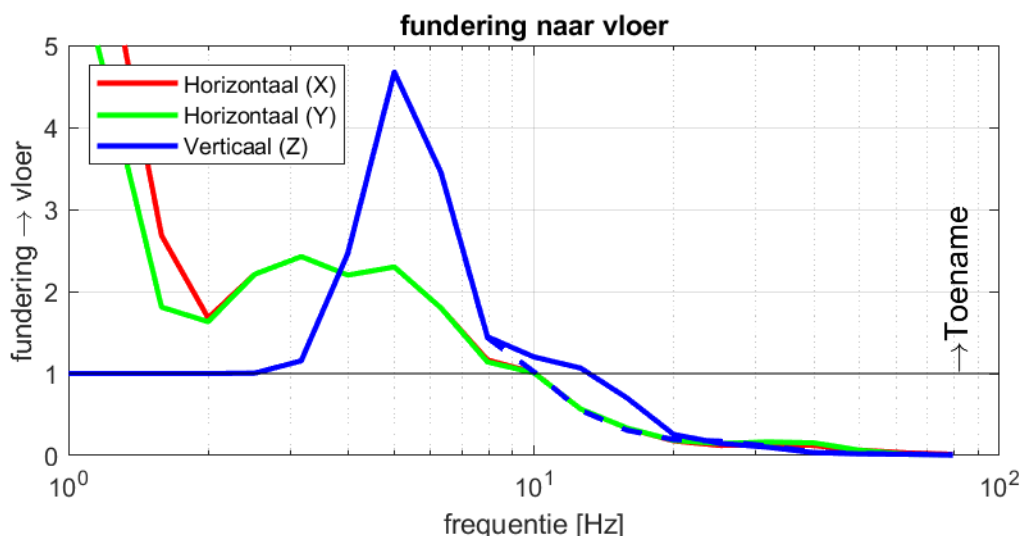
II.8 BEPALEN TRILLINGSSPECTRA T.P.V. VLOEREN GEBOUW

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:

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

Hierin zijn H_{fi} de frequentie-afhankelijke overdrachten van maaiveld naar fundering, zoals deze volgen uit het model. Door vervolgens $V_{i,vloer}(f)$ te delen op $V_{i,fundering}(f)$ in een hoek van het gebouw ontstaat een beeld van de vaak gepresenteerde overdracht $C_v(f)$ van fundering naar de vloer. Deze zijn voor het midden van de vloer op de hoogste verdieping weergegeven in Figuur 21. Let op: dit

betreft resultaten met de 2022-versie van Buildyn, zoals hierboven in paragraaf II.5.4 aangegeven zorgt de 2023-versie voor een wat hogere overdracht, met name bij frequenties boven 10 Hz.



Figuur 22 Overdracht C_v van fundering naar midden vloer

II.9 BEPALEN V_{max} EN V_{per} 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} ¹³
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. Zoals in paragraaf 3.3.5 is toegelicht,

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

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 woon- en leefklimaat 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.





METINGEN

Deze bijlage bevat gegevens over de metingen.

III.1 GEGEVENS METINGEN

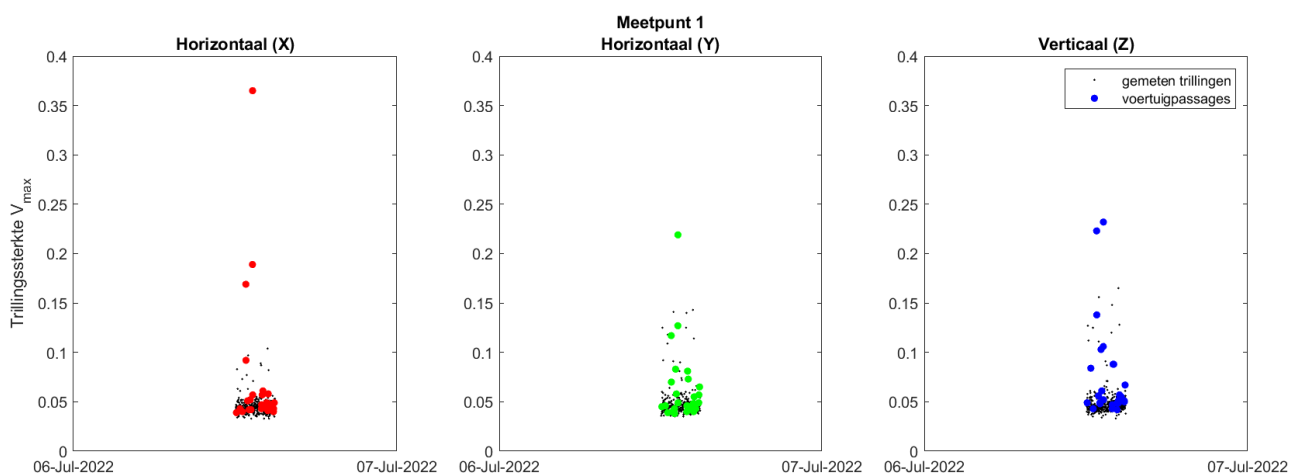
Hieronder is een overzicht opgenomen met relevante gegevens van de metingen, conform de eisen in hoofdstuk 11 uit de SBR B-richtlijn.

1	<i>Uitvoerende partij</i>	Alcedo B.V. Ondernemersweg 3 7451PK Holten
	<i>Verantwoordelijke</i>	Daan Borgonje
2	<i>Meting uitgevoerd door</i>	Leon Spikker
3	<i>Datum en tijd metingen</i>	6 juli 2022 11:50 tot 13 juli 2022 11:50
4	<i>Trillingsbron</i>	Treinen en zwaar wegverkeer
5	<i>Classificatie gebouw</i>	Zie paragraaf 3.2
6	<i>Locatie metingen</i>	Zie Figuur 4
7	<i>Geotechnische gegevens</i>	Zie bijlage I
8	<i>Locaties meetpunten en meetrichtingen</i>	Zie Figuur 4, tenzij anders vermeld: X-richting loodrecht op de trillingsbron Y-richting parallel aan trillingsbron Z-richting verticaal
9	<i>Gebruikte apparatuur</i>	FrogWatch opnemers. Zie een uitgebreide toelichting van de specificaties op https://www.frog.watch/facts/ .
10	<i>Gemeten trillingen</i>	Zie bijlage III.2
11	<i>Motivatie classificatie gebouw</i>	Op basis van constructietekeningen en gegevens BAC
12	<i>Overige relevante omstandigheden</i>	Niet van toepassing

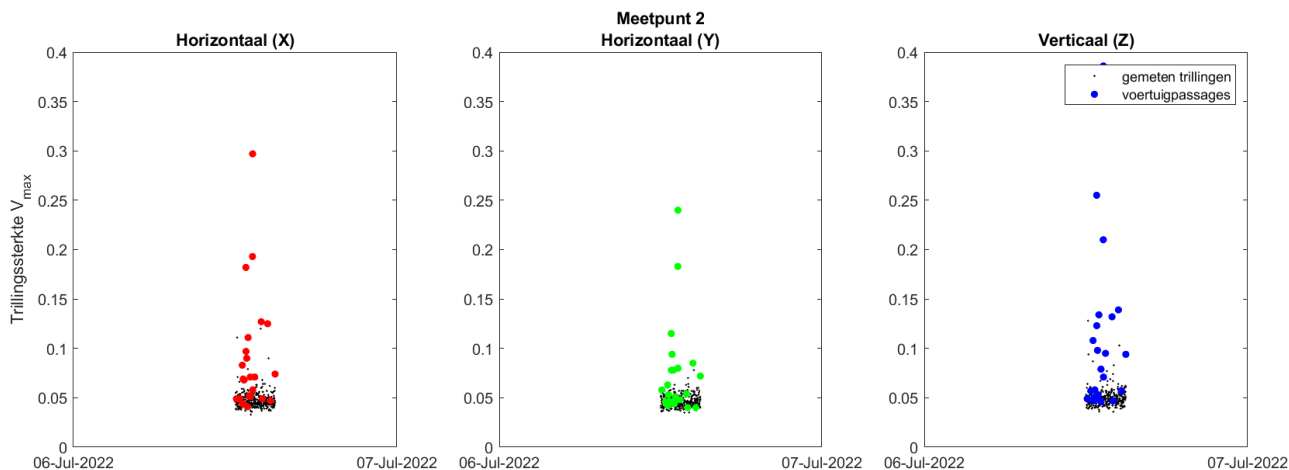


III.2 RESULTATEN METINGEN

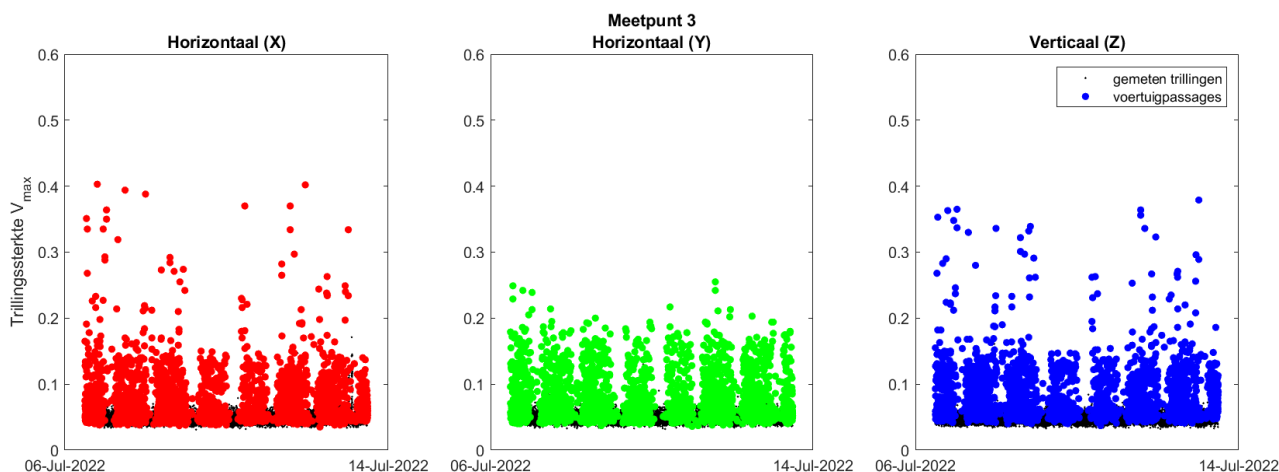
De resultaten van de metingen zijn hieronder weergegeven. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



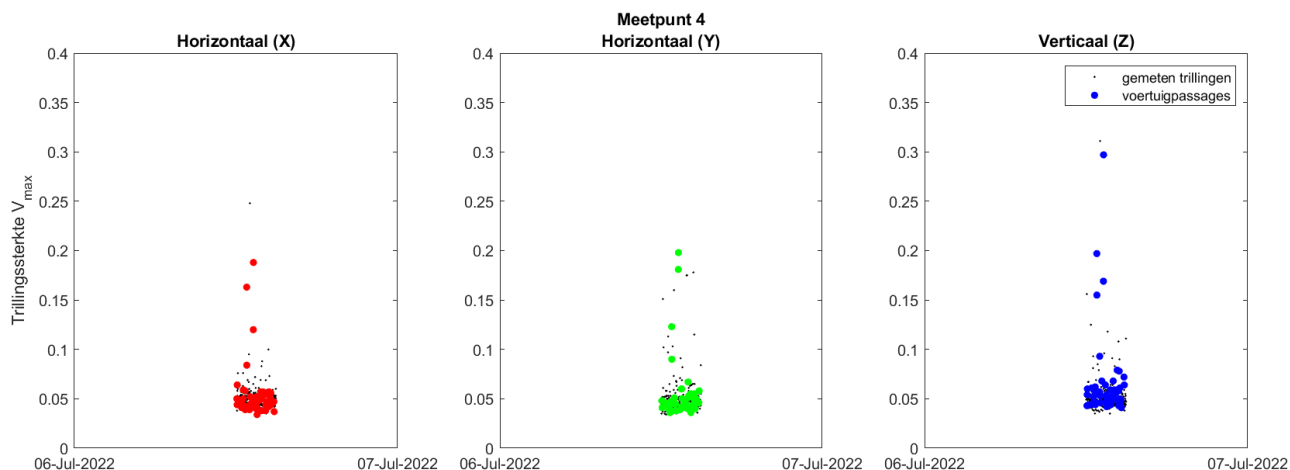
Figuur 23 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (maaiveld, rooilijn nieuw gebouw)



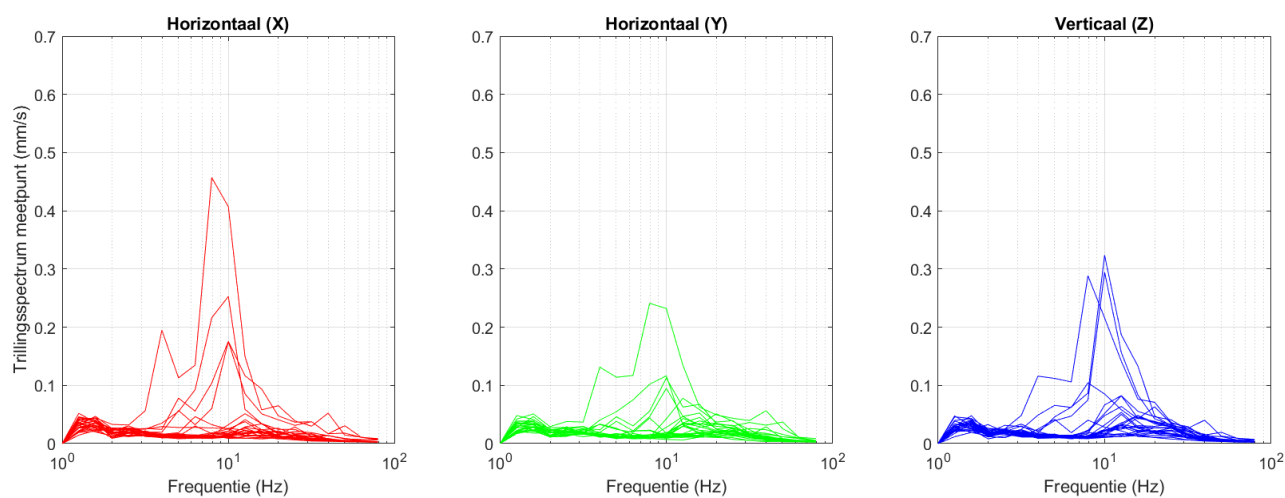
Figuur 24 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (maaiveld, rooilijn nieuw gebouw)



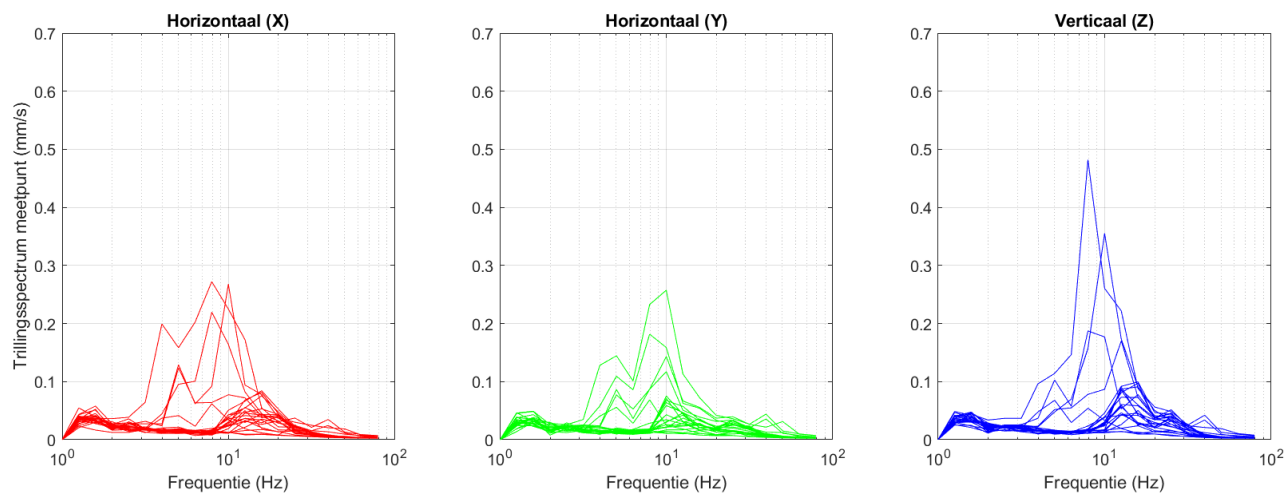
Figuur 25 Gemeten trillingen bij meetpunt 3 (maaiveld, bovenaan talud)



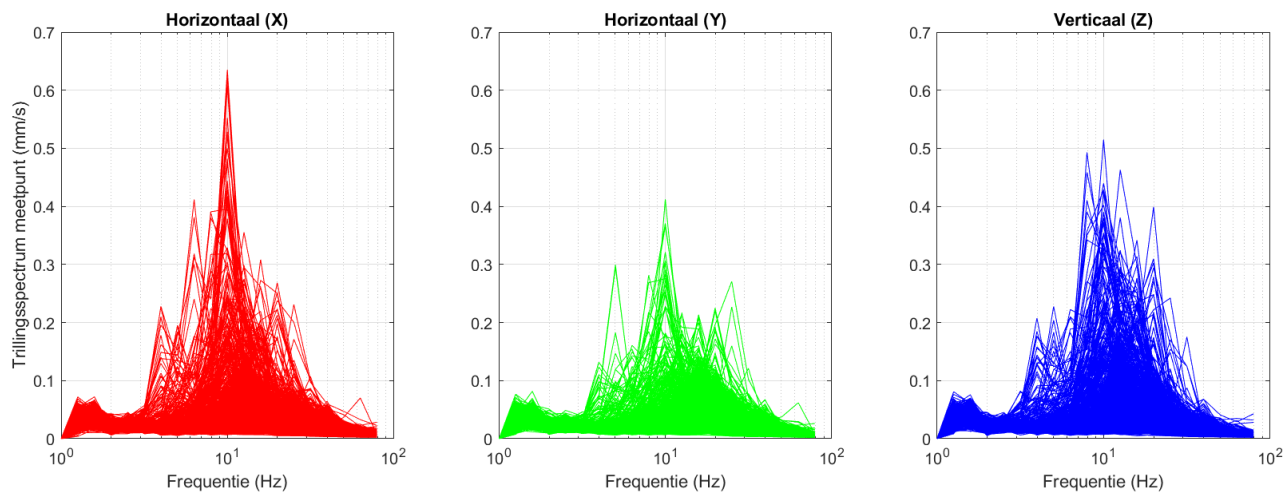
Figuur 26 Gemeten trillingen bij meetpunt 4 (fundering parkeergarage)



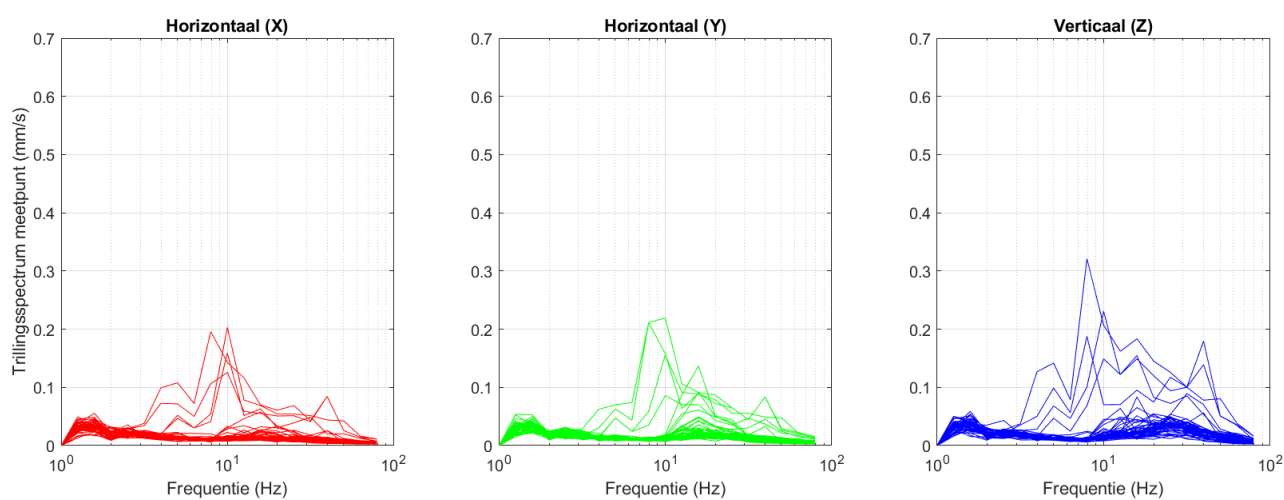
Figuur 27 Tertsbandspectra bij meetpunt 1



Figuur 28 Tertsbandspectra bij meetpunt 2



Figuur 29 Tertsbandspectra bij meetpunt 3



Figuur 30 Tertsbandspectra bij meetpunt 4

IV. EERDERE RESULTATEN

Dit rapport is het resultaat van een iteratief proces, waarbij in samenspraak met de constructeur en ontwerper aanpassingen zijn gedaan aan het ontwerp om de trillingen te verminderen. De resultaten van de trillingsberekeningen van de eerdere ontwerpen zijn in deze bijlage beschreven.

IV.1 EERSTE BEREKENING

Het eerste onderzoek was gebaseerd op het ontwerp van 5 april 2022. In dat onderzoek is nog gekeken naar meerdere ontwerpvarianten voor de constructie, zie Tabel 10.

Tabel 10 Eigenschappen bebouwing

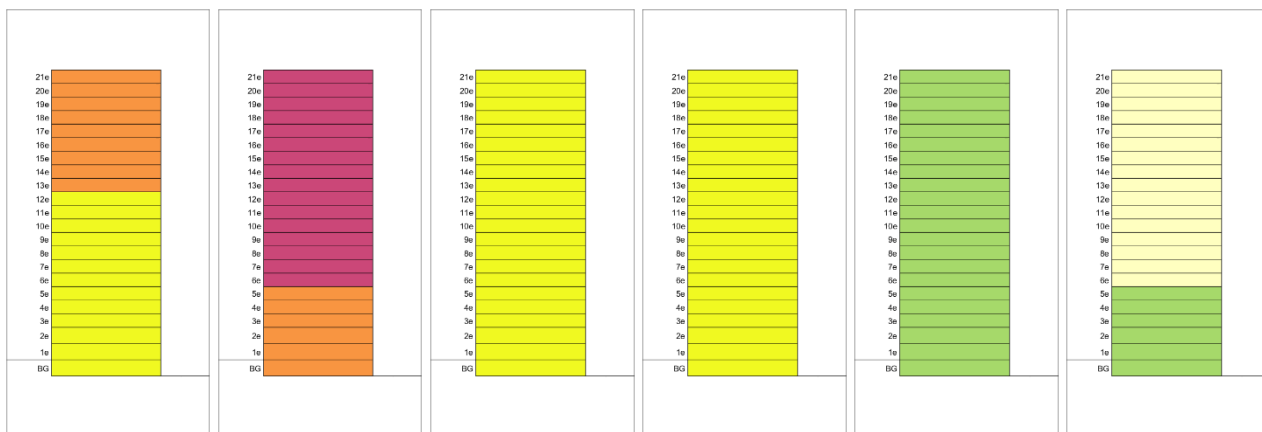
Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Breedplaatvloer 280 mm, met 20 mm afwerkvloer en 70 mm zandcement dekvloer
Hoogte	67.8 m
Lengte vloerveld	5.8 tot 6.1 meter
Constructietype	Diverse varianten: - Conform VO: prefab beton (430 mm, bestaand uit 200 mm beton, 120 mm isolatie en 110 mm beton), betonkwaliteit C30/37 - Stijvere variant met dikker beton en met hogere sterkte beton (C55/67 i.p.v. C30/37) - Slappere variant, met dunner beton C30/37
Fundering	Op staal en op palen, diverse varianten

De resultaten zijn weergegeven in Tabel 11, samen met een beoordeling van de trillingen. De trillingen zijn weergegeven als een bandbreedte, omdat de trillingen afhankelijk zijn van de constructieve uitwerking en de hoogte in het gebouw. Gele arcering geeft aan dat overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder afhankelijk zijn van de constructieve uitwerking van het gebouw.

Tabel 11 Trillingen per bouwdeel en beoordeling op SBR B-richtlijn

Verdieping	Functie	$V_{\max}$	V_{per}	Beoordeling
BG	Horeca	0.1 – 0.2	0.00 – 0.01	Niet trillingsgevoelig
1 – 2	Kantoor	0.1 – 0.2	0.00 – 0.01	Voldoet
3 – 21	Wonen	0.1 – 0.4	0.01 – 0.02	Voldoet, afhankelijk van constructieve uitwerking

De resultaten (onder- en bovengrens van de trillingen, en beoordeling) zijn per verdieping weergegeven in Figuur 31.



Figuur 31 Van links naar rechts: trillingssterkte V_{max} (ondergrens), trillingssterkte V_{max} (bovengrens), gemiddelde trillingssterkte V_{per} (ondergrens), gemiddelde trillingssterkte V_{per} (bovengrens), beoordeling van de trillingen (ondergrens) en beoordeling van de trillingen (bovengrens). Legenda in Tabel 5 en Tabel 6

IV.2 TWEEDE BEREKENING

Vervolgens zijn er aanpassingen aan het ontwerp gedaan om de trillingen te verminderen, waarna in november 2022 een aangepaste berekening is uitgevoerd. In Tabel 12 zijn de belangrijkste constructiegegevens weergegeven. Belangrijke wijzigingen ten opzichte van het eerdere ontwerp zijn:

1. Meer stijfheid toegevoegd in het ontwerp door extra of dikkere dwarswanden, m.n. onderin het gebouw
2. Betonkwaliteit van de woonlagen verhoogd naar C55/67 (was C30/37).
3. Paalfundering gedetailleerd

Tabel 12 Eigenschappen bebouwing

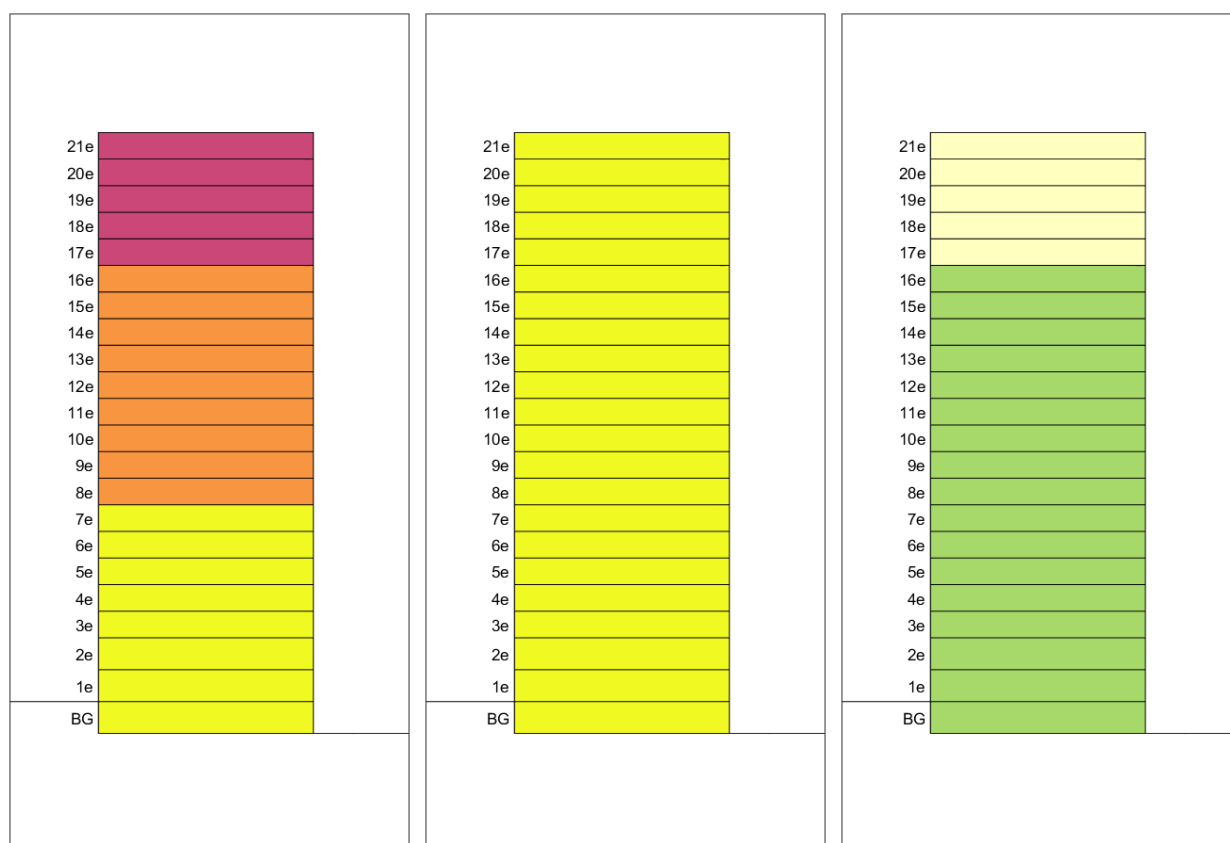
Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Breedplaatvloer 280 mm, met 20 mm afwerkvloer en 70 mm zandcement dekvloer
Hoogte	67.8 m
Lengte vloerveld	5.8 tot 6.1 meter
Constructietype	Prefab beton (430 mm, bestaand uit 200 mm beton, 120 mm isolatie en 110 mm beton), betonkwaliteit C55/67. Onderste 3 lagen minimaal C30/37
Fundering	Op palen, schroefpaal 054/0.67 met paallengte 16 m. Funderingsplaan 1.20 m dik, onder kern 1.70 m dik.

De resultaten zijn weergegeven in Tabel 13, samen met een beoordeling van de trillingen. Ten opzichte van de eerste berekening zijn de trillingsniveaus afgenomen, en verwachtten we alleen nog overschrijdingen op de bovenste vijf bouwlagen.

Tabel 13 Trillingen per bouwdeel en beoordeling op SBR B-richtlijn

Verdieping	Functie	V_{max}	V_{per}	Beoordeling
BG	Horeca	0.1 – 0.2	0.00 – 0.01	Niet trillingsgevoelig
1 – 2	Kantoor	0.1 – 0.2	0.00 – 0.01	Voldoet
3 – 21	Wonen	0.1 – 0.3	0.00 – 0.01	Incidentele overschrijdingen op hogere verdiepingen

De resultaten zijn per verdieping weergegeven in Figuur 32.



Figuur 32 Van links naar rechts: trillingssterkte V_{max} , gemiddelde trillingssterkte V_{per} en beoordeling van de trillingen. Legenda in Tabel 5 en Tabel 6

IV.3 DERDE BEREKENING

Om de trillingen verder te reduceren is het ontwerp verder aangepast in november 2022. De belangrijkste wijzigingen ten opzichte van het ontwerp uit de tweede berekening zijn:

1. Afwerking vloeren is aangepast naar 100 mm zwevende dekvloer (30 mm isolatie, 70 mm anhydrietvloer). Deze aanpassing heeft vooral effect op de hogere trillingsfrequenties en zorgt voor meer demping.
2. Betonnen elementen (kolommen, balken, penanten, kernwanden en woningscheidende wanden) zijn dikker gemaakt en deels vervangen door prefab beton met hogere sterkteklasse (C55/67). Alleen de kernwanden op de onderste drie bouwlagen zijn nog van C30/37 beton.

De resultaten van deze verdere optimalisatie zijn beschreven in dit rapport (zie paragraaf 4.2). De trillingen zijn iets verder afgenomen door de hogere demping van de vloeren en de zwaardere constructie. We verwachten nu alleen nog overschrijdingen op de bovenste bouwlaag.