



WEBOOST



TRILLINGSONDERZOEK T.B.V. NIEUWBOUW

STATIONSSTRAAT 31
TWELLO

COLOFON

Auteur	Marjolein Hordijk
Controle en vrijgave	Pieter Boon pieter@we-boost.nl +31 6 10 03 94 54
Projectcode	WBD2023-023
Versienr	2.0
Datum	27 juni 2023
Status	Definitief
Opdrachtgever	De Bunte Vastgoed



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

Aan de Stationsstraat 31 in Twello wordt een deel van een bestaand pand met een bijeenkomstfunctie gesloopt, en worden 20 appartementen en een twee-onder-een-kapwoning gerealiseerd. De geplande nieuwbouw ligt dichtbij de spoorlijn Apeldoorn - Deventer. Daardoor kunnen trillingen van treinverkeer als hinderlijk worden ervaren.

Doel van het voorliggende onderzoek is daarom om vast te stellen of er sprake zal zijn van trillingshinder in de geplande woningen, en zo ja, met welke maatregelen een aanvaardbaar woon- en 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 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 (conform de SBR B-richtlijn, het beoordelingskader voor trillingshinder) worden verwacht, met name in de grotere appartementen dichtbij het spoor (zie figuur hiernaast).

De overschrijdingen worden veroorzaakt door zware goederentreinen met een afwijkende trillingssterkte, in combinatie met een vrij open kolommenstructuur van de noordelijke appartementen op de begane grond. In de verder weg gelegen, kleinere appartementen gaat het om beperkte, incidentele overschrijdingen, en in de 2-onder-1-kapwoningen wordt momenteel voldaan aan het beoordelingskader, maar kan met de voorziene intensivering van het goederenvervoer wel sprake zijn van overschrijdingen.

In dit onderzoek zijn meerdere constructieve uitwerkingen onderzocht, en uit dat onderzoek blijkt dat de trillingen en het aantal overschrijdingen per dag afhankelijk zijn van de gekozen constructieve eigenschappen.



ADVIES VOOR MAATREGELEN

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

1. Maatregelen aan de trillingsbron: een betonnen plaat met ballastmat is het meest effectief. De kosten van deze maatregel bedragen meer dan € 2 mln. (meer dan € 100.000 per appartement met een overschrijding). Met deze maatregel wordt naar verwachting voldaan aan de streefwaarden, maar de kosten staan niet in relatie tot de bouwsom van de woningen. Maatregelen aan de trillingsbron zijn daarom niet doelmatig.
2. Maatregelen in de bodem hebben nog hogere kosten en zijn onvoldoende effectief: ook met deze maatregelen wordt niet voldaan aan het beoordelingskader. Maatregelen in de bodem zijn daarom niet doelmatig.
3. Met maatregelen aan de gebouwen zijn de trillingen te verminderen, maar bij al deze maatregelen geldt dat deze leiden tot hogere bouwkosten. We adviseren om bij de verdere uitwerking van het plan onderstaande adviezen mee te nemen en deze aanpassingen af te wegen op doelmatigheid (weegt het effect op tegen de kosten?):

A. Voor de **5 appartementen aan de spoorzijde** adviseren we het volgende:

- a. Vermijd lichte bouw, zoals houtskeletbouw of staalbouw. Vermijd ook stalen draagbalken zoveel mogelijk, en kies waar mogelijk voor betonnen draagbalken.
- b. Zorg voor extra dragende tussenwanden of zware kolommen (vooral onder de noordoostelijke appartementen) om de stijfheid van de onderste bouwlaag te vergroten en de eigenfrequentie van de vloer te vergroten.
- c. Kies voor zware bouw, liefst betonnen bouw (i.h.w.g) met breedplaatvloeren.
- d. Overweeg om de fundering te verzwaren (zware betonnen plaatfundering of paalfundering) of af te schermen (met een prefab L-wand met luchtsponw of met dikke blokken EPS).

Met bovenstaande maatregelen zijn de trillingen fors te reduceren, en resteren nog beperkte overschrijdingen van het beoordelingskader. Volledig voldoen is alleen mogelijk door (als alternatief op bovenstaande maatregelen a. tot en met d.) stalen veerdozen toe te passen tussen een dubbele fundering (plaat- of palenfundering, daarop stalen veerdozen en daarop betonnen balken). Dit is een zeer effectieve maatregel waarmee de trillingen lager zijn dan de streefwaarden, maar de kosten van deze maatregel zijn met € 10.000 tot € 22.000 per woning hoog.

B. Voor de andere **15 appartementen**, verder van het spoor, adviseren we het volgende:

- a. Vermijd lichte bouw, zoals houtskeletbouw of staalbouw. Vermijd ook stalen draagbalken zoveel mogelijk, en kies waar mogelijk voor betonnen draagbalken.
- b. Kies voor zware bouw, liefst betonnen bouw (i.h.w.g) met breedplaatvloeren.
- c. Overweeg om de fundering te verzwaren (zware betonnen plaatfundering of paalfundering) of af te schermen (met een prefab L-wand met luchtsponw of met dikke blokken EPS).

Met bovenstaande aanpassingen resteren nog beperkte overschrijdingen van het beoordelingskader. Ook hier is volledig voldoen aan het beoordelingskader alleen mogelijk met een dubbele, afgeveerde fundering. Gezien de beperkte, incidentele overschrijdingen in relatie tot de kosten is een dergelijke kostbare maatregel niet doelmatig.

C. Voor de **twee-onder-een-kapwoningen** adviseren we het volgende:

- a. Vermijd lichte bouw, zoals houtskeletbouw of staalbouw.



Formeel zijn hier geen maatregelen nodig, omdat de woningen *op dit moment* voldoen aan het beoordelingskader. Er wordt echter een toename van het treinverkeer voorzien, waardoor in de toekomst incidentele, beperkte overschrijdingen mogelijk zijn. Die incidentele overschrijdingen zijn te voorkomen met een zware bouw (betonnen skelet, breedplaatvloeren) of een zwaardere fundering (dikke plaatfundering of paalfundering).

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, afhankelijk van om welke woning het gaat, eventueel worden verwezen naar (1) een beperkt aantal overschrijdingen, (2) de doelgroep van de woningen (de meerkosten van trillingsmaatregelen moeten wel in verhouding staan tot de bouwkosten en het beperkte aantal overschrijdingen) en (3) het gegeven dat de trillingen weliswaar niet voldoen aan de strenge streefwaarden voor nieuwbouw uit de SBR B-richtlijn, maar voor de meeste woningen wel aan de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties uit de SBR B-richtlijn. In de soepeler streefwaarden voor bestaande situaties is een zekere mate van gewenning meegenomen.



INHOUDSOPGAVE

I.	INLEIDING	9
1.1.	Aanleiding	9
1.2.	Doel	9
1.3.	Leeswijzer	9
2.	SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN	12
2.1.	Situatie	12
2.2.	Uitgangspunten	13
3.	BEOORDELINGSKADER EN WERKWIJZE	16
3.1.	Trillingen en wetgeving	16
3.2.	Beoordelingskader trillingshinder	16
3.3.	Rekenmethode	17
4.	VERWACHTE TRILLINGEN	21
4.1.	Meetresultaten	21
4.2.	Trillingen in geplande gebouwen	21
5.	MITIGERENDE MAATREGELEN	25
5.1.	Nut en noodzaak van maatregelen	25
5.2.	Analyse resultaten	25
5.3.	Maatregelen aan de trillingsbron	26
5.4.	Maatregelen in de bodem	27
5.5.	Optimalisaties van de gebouwen	28
5.6.	Afweging van maatregelen	29
5.7.	Onzekerheden in het onderzoek	31
II.	GRONDONDERZOEK	32
III.	REKENMODEL	34



III. RESULTATEN METINGEN

38

IV. DETAILS MAATREGELEN

40

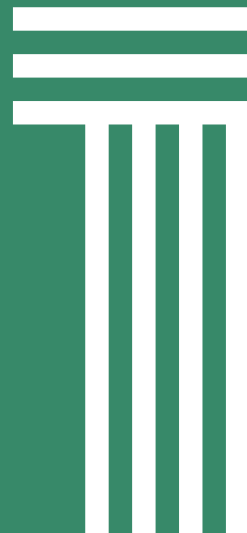




INLEIDING



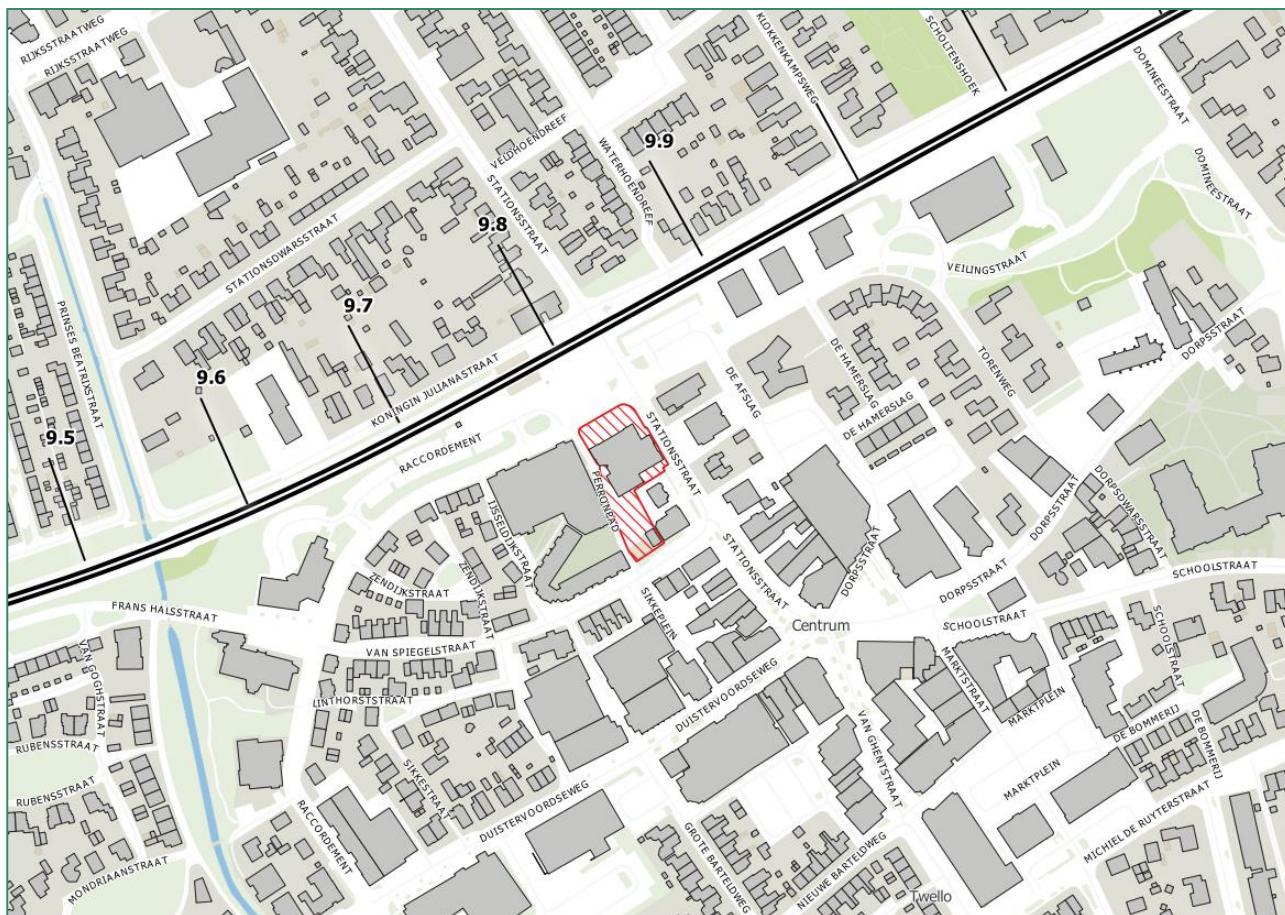
In dit hoofdstuk geven we een korte omschrijving van de inhoud van dit onderzoek: de aanleiding, het doel van het onderzoek en een beknopte leeswijzer om informatie snel te kunnen vinden.



INLEIDING

1.1. AANLEIDING

Aan de Stationsstraat 31 in Twello wordt een deel van een bestaand pand met een bijeenkomstfunctie gesloopt, en worden 20 appartementen en een twee-onder-een-kapwoning gerealiseerd. De geplande nieuwbouw ligt dichtbij de spoorlijn Apeldoorn - Deventer, 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 de woningen op basis van de gemeten trillingen en de eigenschappen van de gebouwen. Het resultaat van deze stap wordt in hoofdstuk

4 beschreven. In hoofdstuk 5 gaan we in op maatregelen 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



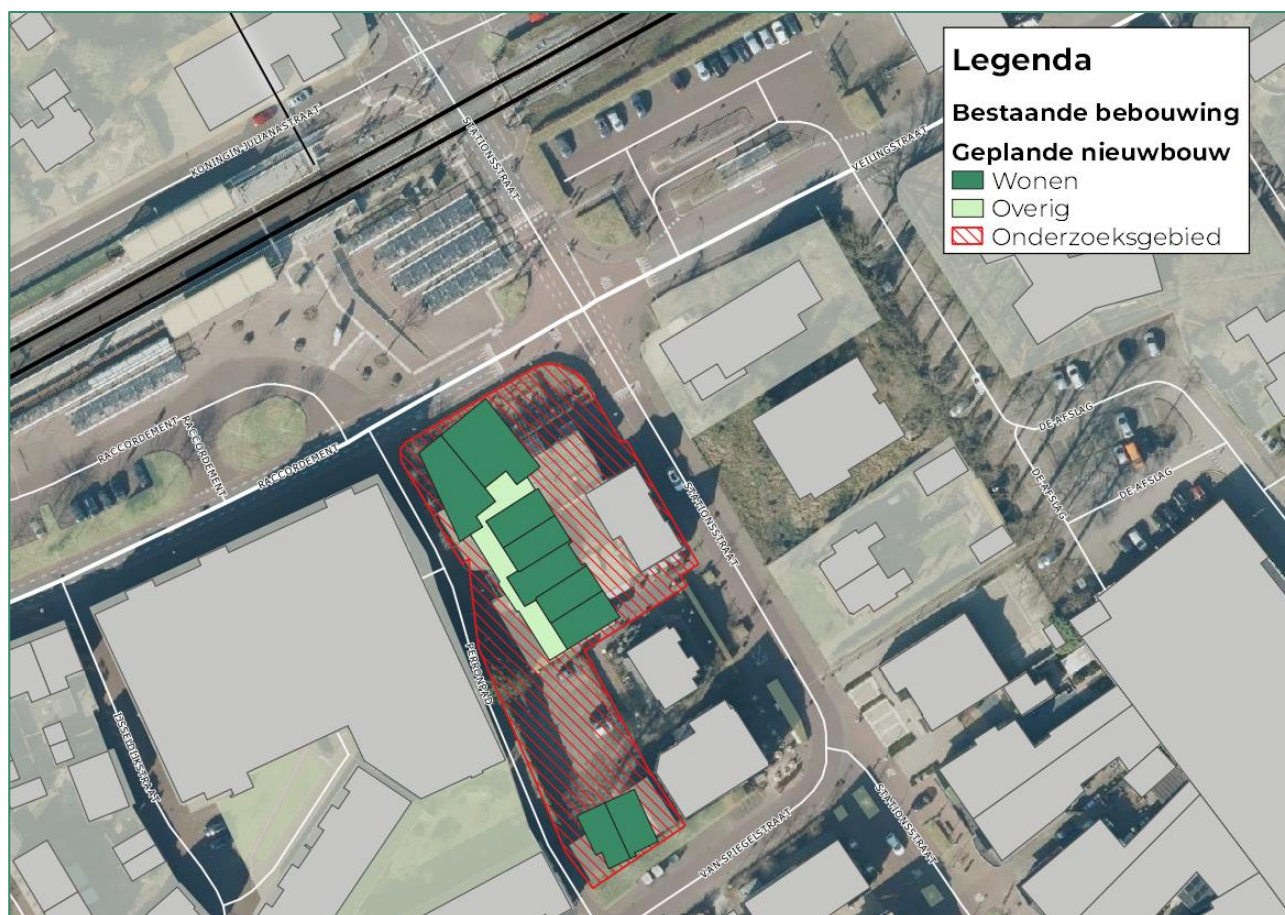
In dit hoofdstuk wordt een toelichting gegeven op de beoogde toekomstige situatie en worden de uitgangspunten van het onderzoek weergegeven.



2. SITUATIE EN UITGANGSPUNTEN

2.1. SITUATIE

In het plangebied bevindt zich momenteel een gebouw waarin horeca en verenigingen zijn gevestigd. Een deel van het gebouw wordt gesloopt, maar het karakteristieke Stations Koffiehuis blijft behouden. Er komen 20 appartementen, verdeeld over 4 bouwlagen, en in de zuidelijke hoek een twee-onder-een-kapwoning. Parkeren vindt plaats op eigen terrein. De geplande bebouwing in de eindsituatie is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Huidige en toekomstige bebouwing op de planlocatie

De bebouwing is gepland in een zone van ca. 43 tot 125 meter van het spoor. De rijksnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. De gegevens in Tabel 1 zijn gebaseerd op het Geluidsregister Spoor en gegevens van de vervoerders. Er wordt geen verandering in het reizigersvervoer voorzien, het aantal goederentreinen kan volgens de Integrale Mobiliteitsanalyse (IMA-2021) wel toenemen van de huidige ca. 15 tot 17 naar 50 tot 67 per dag.

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

Type trein	Rijksnelheid	dag (7:00 – 19:00)	avond (19:00 – 23:00)	nacht (23:00 – 7:00)
Sprinter	20 - 50 km/h	2.00	1.25	0.50
Intercity	130 km/h	3.33	2.50	0.88
Goederentrein	80 - 90 km/h	0.32	0.37	0.30

Andere trillingsbronnen, zoals wegverkeer, zullen, gezien de afstand tot de bebouwing naar verwachting niet voor voelbare trillingen zorgen in de geplande bebouwing. Wegverkeer is dan ook niet nader kwantitatief beschouwd in dit onderzoek.

2.2. UITGANGSPUNTEN

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

2.2.1. GEGEVENS BEBOUWING

Voor het uitvoeren van de berekeningen is gerekend met het Voorlopig Ontwerp van 22 mei 2023. Omdat er nog geen uitgewerkt constructief ontwerp beschikbaar is, zijn in dit onderzoek een aantal varianten doorerekend, zie Tabel 2. Daar zijn de belangrijkste eigenschappen van de bebouwing weergegeven. Het rekenmodel voor de bebouwing is hierop gebaseerd.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Meerdere varianten beschouwd: • Kanaalplaatvloer 200, 260 en 320 mm, 80 mm zandcement dekvloer • Breedplaatvloer 200, 250 en 320 mm, 80 mm zandcement dekvloer
Hoogte	9.0 - 12.8 meter
Lengte vloerveld	5.1 - 10.5 meter
Constructietype	Meerdere varianten beschouwd: • Kalkzandsteen en metselwerk • Prefab beton en metselwerk • I.h.w.g. beton en metselwerk
Fundering	Meerdere varianten beschouwd: • Op staal • Zware plaatfundering • Op palen, Ø400 mm, 10 m lang

2.2.2. GEGEVENS ONDERGROND

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

2.2.3. MEETRESULTATEN

Zoals te zien in Figuur 3 zijn door Alcedo op twee locaties metingen uitgevoerd. Het gaat hierbij om een meetpunt op maaiveld en een meetpunt aan een bestaand gebouw aan de overzijde van de Stationsstraat. De metingen zijn uitgevoerd in mei 2021, maar zijn nog steeds representatief voor het treinenbeeld.



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 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) 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. BEOORDELINGSKADER TRILLINGSHINDER

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

Deze SBR-richtlijn bestaat uit drie delen (deel A – schade in gebouwen, deel B – hinder voor personen in gebouwen en deel C – verstoring van gevoelige apparatuur) waarvan alleen deel B voor dit onderzoek relevant is. De afstand tussen het spoor en het gebouw is dermate groot dat er geen schade aan de gebouwen zal ontstaan, en verstoring van gevoelige apparatuur als gevolg van de realisatie van dit plan is ook niet aan de orde.

In deze SBR-richtlijn deel B zijn een aantal aspecten relevant, deze worden hieronder kort toegelicht:

1. De richtlijn toetst zowel een maximaal optredende trillingssterkte (V_{max} , treedt op bij de trein die gedurende de meetperiode de hoogste trillingen veroorzaakt) als het tijdsgemiddelde van de trillingen (V_{per} , deze grootheid is in tegenstelling tot V_{max} dus ook afhankelijk van het aantal treinen).
2. De richtlijn maakt in de beoordeling onderscheid tussen verschillende situaties, en toetst daarbij strenger in:
 - a. Nieuwbouwsituaties (nieuwe gebouwen, nieuw spoor, aanleg van wissels). Bij bestaande situaties zijn de streefwaarden minder streng, er wordt dan uitgegaan van

² Voor spoorprojecten wordt door ProRail sinds 2012 ook wel gebruik gemaakt van de Bts, deze is afgeleid van de SBR-richtlijn en op aspecten aangescherpt (waaronder een doelmatigheidsafweging en een andere manier om de trillingen vast te stellen). Deze richtlijn wordt echter doorgaans niet gebruikt om de trillingen in nieuw te bouwen woningen langs het spoor te beoordelen.

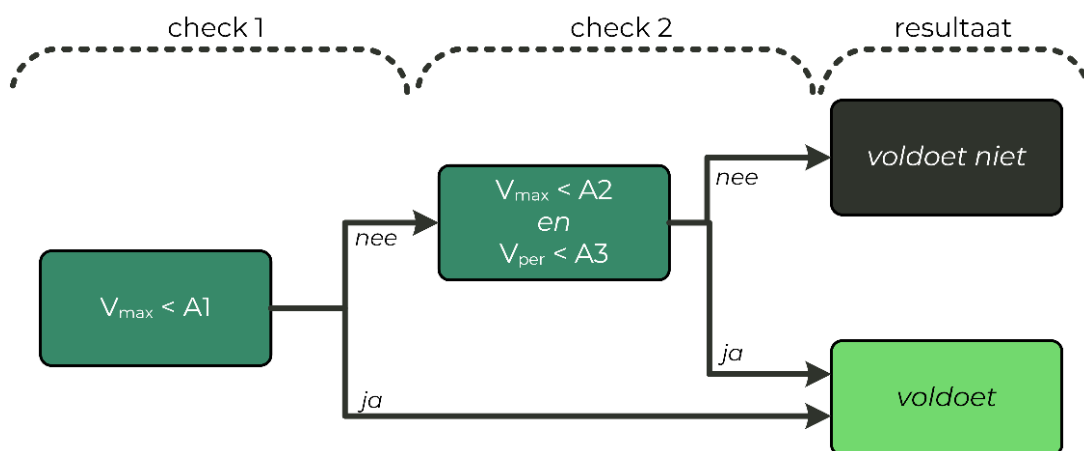
een zekere mate van gewenning en er zijn minder mogelijkheden om de trillingen te reduceren.

- b. Gebouwen met een overnachtingsfunctie (woningen, ziekenhuizen). De meeste hinder wordt vaak in rust ervaren. Bij gebouwen met een niet-overnachtingsfunctie (kantoren, scholen) gelden minder strenge streefwaarden. Winkels, sport- en industriepanden vallen buiten de richtlijn. In dit plan gaat het om gebouwen met een woonfunctie.
- c. De nacht, omdat de meeste hinder vaak in rust wordt ervaren. De streefwaarden voor overdag zijn ca. een factor 2 minder streng dan 's nachts.

Een gebouw kan op twee manieren voldoen aan de richtlijn: de trillingssterkte V_{max} moet lager zijn dan de onderste streefwaarde A1 (zie Tabel 3), óf V_{max} moet lager zijn dan de bovenste streefwaarde A2, waarbij tegelijkertijd de trillingsintensiteit V_{per} lager is dan de streefwaarde A3. Zie ook het schema in Figuur 4. Bij overschrijdingen van dit beoordelingskader dienen maatregelen te worden afgewogen op doelmatigheid. Bijlage 5 van de SBR B-richtlijn geeft hiervoor handvatten.

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

	Dag en avond			Nacht		
Situatie	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Wonen, nieuwe situatie	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
Wonen, bestaande situatie	0.2	0.8	0.10	0.2	0.4	0.10



Figuur 4 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

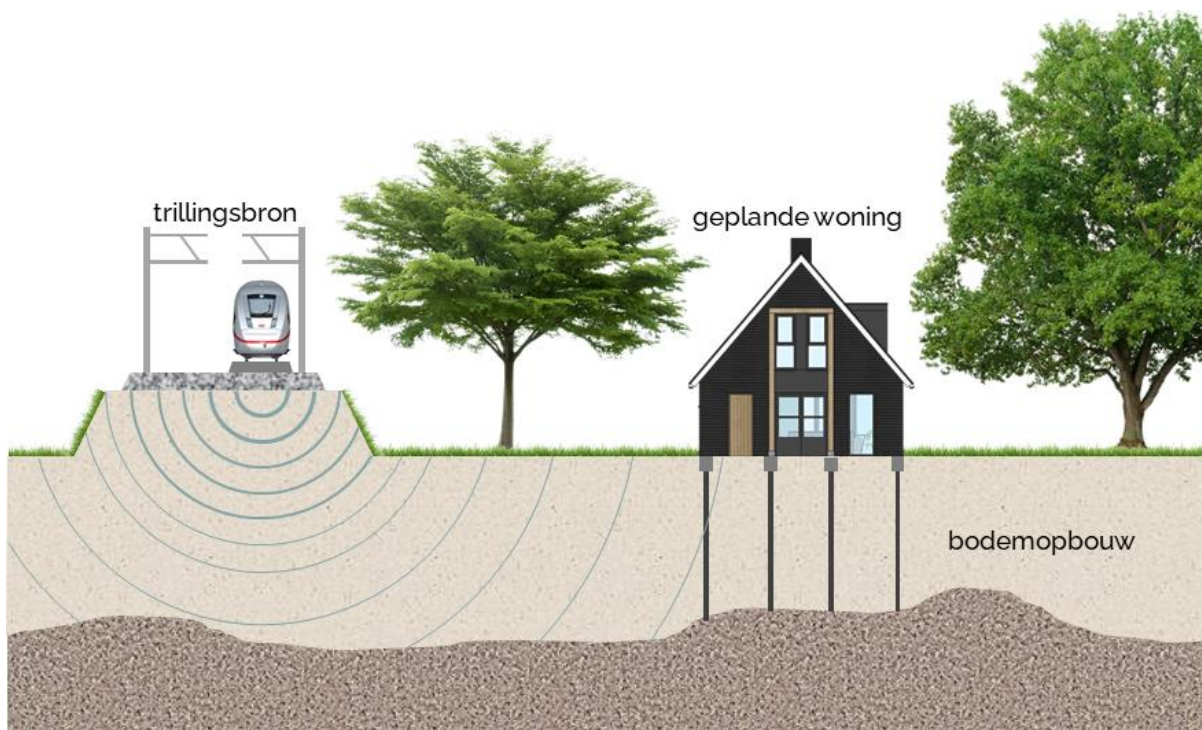
3.3. REKENMETHODE

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 een bestaand 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 een bestaand gebouw in de omgeving van 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 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.

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.





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.

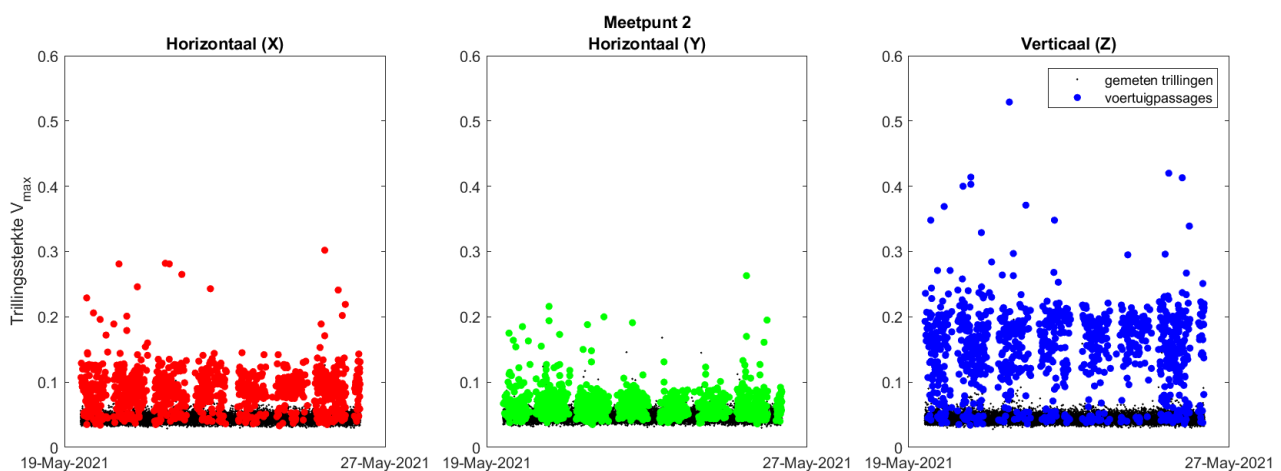


VERWACHTE TRILLINGEN

4.1. MEETRESULTATEN

Alcedo heeft metingen uitgevoerd op maaiveld en aan een bestaand gebouw aan de overzijde van de Stationsstraat. De trillingen op het meetpunt aan het gebouw zijn weergegeven in Figuur 6, voor de andere meetpunten zijn deze en andere figuren van de metingen opgenomen in bijlage III. In Figuur 6 valt op dat de trillingen maatgevend zijn in verticale Z-richting, maar ook in de andere meetrichtingen zijn relatief hoge trillingen gemeten. Wat verder opvalt:

1. De hoogste trillingen zijn afkomstig van goederentreinen, de brede band aan verticale trillingen tussen 0.1 en 0.2 is afkomstig van doorgaande intercity's. Goederentreinen hebben vaak een hoger gewicht dan reizigerstreinen en een ander type afvering, en veroorzaken daardoor vaak meer trillingen, zeker rond overwegen.
2. De trillingen van de sprinters vallen weg in de achtergrondtrillingen, omdat deze een lage rijsnelheid hebben vanwege de stop op station Twello.
3. De trillingen zijn al erg hoog op de fundering van het bestaande (oude) pand: de hoogst gemeten waarde is 0.5 (een goederentrein in de nacht). De streefwaarde voor nieuwbouw op de vloeren (waar de trillingen vaak hoger zijn dan op de fundering) is 0.2 voor de nacht.



Figuur 6 Gemeten trillingen aan fundering bestaand gebouw, meetpunt 1

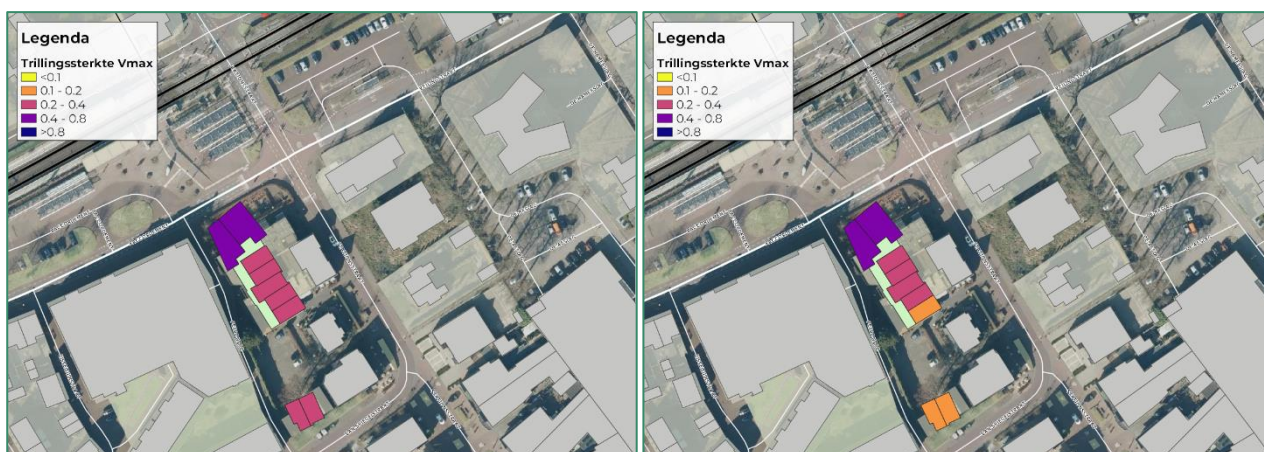
4.2. TRILLINGEN IN GEPLANEDE GEBOUWEN

De bebouwing is gemodelleerd op basis van de input uit hoofdstuk 2. Het trillingsgedrag van de geplande gebouwen is weergegeven in Bijlage II. Met de modelresultaten zijn de trillingen in de toekomstige woningen bepaald. De resultaten hebben we weergegeven in Tabel 4, samen met een beoordeling van de trillingen. De resultaten zijn weergegeven als een bandbreedte, omdat de trillingen afhankelijk zijn van de constructieve uitwerking, maar ook verschillen tussen bijvoorbeeld begane grond en verdiepingen (waar de trillingen vaak hoger zijn). **Oranje** arcering geeft aan dat er een overschrijding is van de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn.

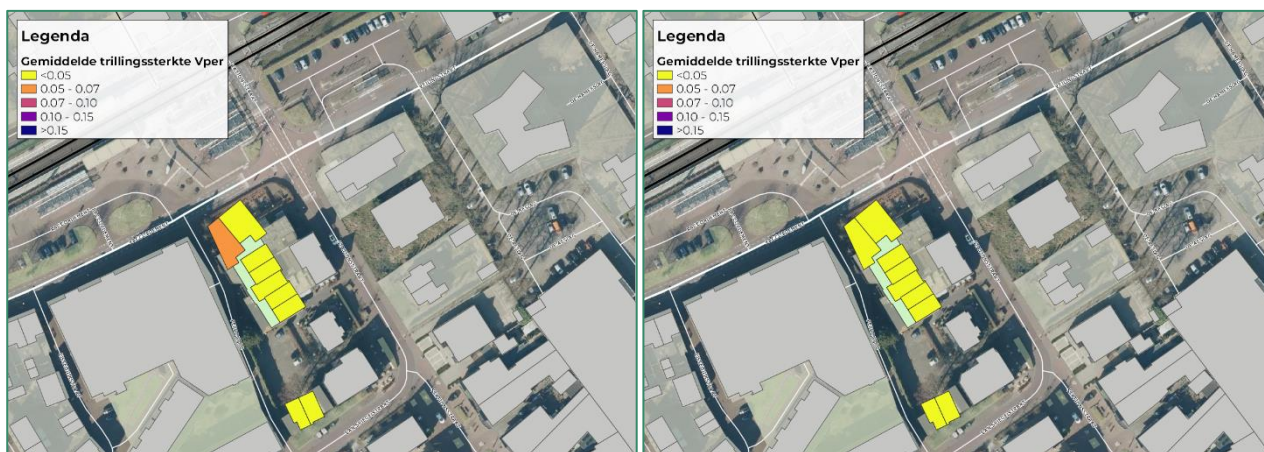
Tabel 4 Trillingen per constructietype en beoordeling op SBR B-richtlijn

Constructietype	$V_{\max, \text{dag}}$	$V_{\max, \text{nacht}}$	V_{per}	Beoordeling
Appartementen	0.3 - 0.9	0.2 - 0.5	0.02 - 0.06	Voldoet niet in deel appartementen
2-onder-1-kap	0.3 - 0.4	0.2	0.01 - 0.03	Voldoet

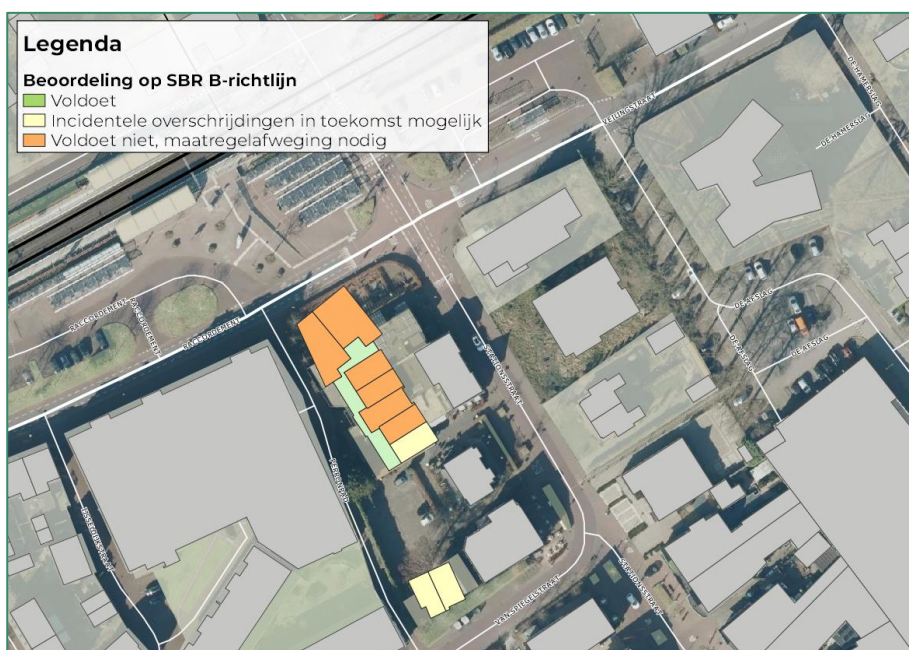
De resultaten hebben we grafisch weergegeven in Figuur 7 tot en met Figuur 9.



Figuur 7 Trillingssterkte overdag (links) en in de nacht (rechts) bij conventionele bouw (kalkzandsteen en breedplaatvloeren voor appartementen, kalkzandsteen en kanaalplaatvloeren voor 2-onder-1-kap)



Figuur 8 Gemiddelde trillingssterkte overdag (links) en in de nacht (rechts) bij conventionele bouw (kalkzandsteen en breedplaatvloeren voor appartementen, kalkzandsteen en kanaalplaatvloeren voor 2-onder-1-kap)



Figuur 9 Beoordeling van de trillingen op de SBR B-richtlijn bij conventionele bouw (kalkzandsteen en breedplaatvloeren voor appartementen, kalkzandsteen en kanaalplaatvloeren voor 2-onder-1-kap)

Op basis van de resultaten zijn de volgende conclusies te trekken:

- In de meest zuidelijke appartementen en de twee-onder-een-kapwoningen wordt momenteel voldaan aan het beoordelingskader. De trillingssterkte V_{max} is overdag wel hoger dan de streefwaarden voor de nacht. Bij intensivering van het goederenvervoer (en verschuiving van zware goederentreinen naar de nacht) kan dit in de toekomst wel voor overschrijdingen zorgen. Daarom zijn deze gebouwen in Figuur 9 **geel** gearceerd.
- Er zijn overschrijdingen mogelijk van het beoordelingskader voor trillingshinder, maar het aantal overschrijdingen is afhankelijk van de constructieve uitwerking en de locatie van het appartement. Hierbij geldt:
 - ✿ De trillingen zijn het hoogst in het appartement het dichtst bij het spoor, onder meer door de korte afstand, open structuur onderin het gebouw en de grote vloeroverspanningen.
 - ✿ Hoe verder bij het spoor vandaan, hoe lager de trillingen zijn
 - ✿ Het aantal overschrijdingen in de appartementen met de hoogste trillingen varieert tussen de 1 en 9 per dag in de huidige situatie. Na intensivering van het goederenvervoer kan dit toenemen naar tussen de 2 en 30 per dag. In de kleinere appartementen gaat het om maximaal 1 overschrijding per dag in de toekomst, na intensivering van het goederenvervoer.
- Uit de variantenstudie blijkt het volgende:
 - ✿ De trillingen worden sterk beïnvloed door het type vloer (kanaalplaatvloer heeft hogere trillingen dan breedplaatvloer) en de eigenfrequentie van de vloer (dikkere vloer of kortere overspanning zorgt voor hogere eigenfrequentie, wat meestal gunstig is). We gaan hier in het volgende hoofdstuk nader op in.
 - ✿ De trillingen zijn lager bij een zwaardere constructie (dikkere vloeren of wanden) en bij een stijvere constructie (betonnen casco zorgt voor lagere trillingen dan kalkzandsteen casco). Dit soort constructies wordt minder makkelijk in trilling gebracht.
 - ✿ Houtskeletbouw is extra gevoelig voor trillingen en dient hier te worden vermeden.
 - ✿ De trillingen zijn lager bij een zwaardere fundering (paalfundering of een dikke betonnen plaatfundering).

Omdat er sprake is van overschrijdingen van de streefwaarden, gaan we in het volgende hoofdstuk in op mitigerende maatregelen.





MAATREGELEN



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

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



MITIGERENDE MAATREGELEN

Door de passage van zware goederentreinen zijn overschrijdingen van de streefwaarden in een deel van de gebouwen niet uit te sluiten. In dit hoofdstuk beschrijven we de mogelijke maatregelen en bouwkundige optimalisaties waarmee de trillingen kunnen worden verminderd.

5.1. NUT EN NOODZAAK VAN MAATREGELEN

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

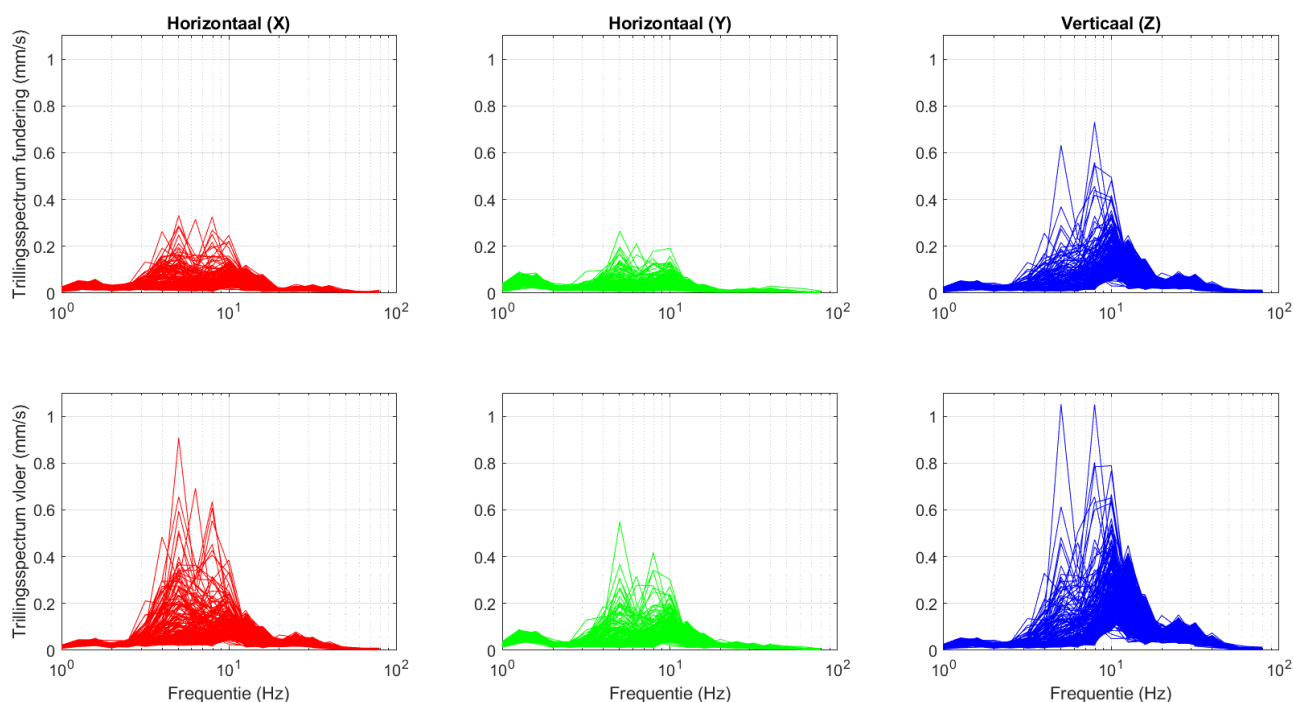
1. De mate waarin de trillingssterkte voorkomt. Hiervoor geldt dat de gemiddelde trillingssterkte V_{per} een goede indicatie is. Die voldoet in de meeste woningen aan de streefwaarden, maar in de appartementen dichtbij het spoor zijn overschrijdingen wel mogelijk, zeker na de voorziene intensivering van het goederenvervoer, en afhankelijk van de constructieve uitwerking. Er is sprake van maximaal 9 overschrijdingen per dag, wat kan toenemen tot 30 per dag in de toekomst.
2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. De trillingen van wegverkeer (ook over de overweg) zijn lager dan die van treinverkeer. Van een maskerend effect is daarmee 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 dienen we conform de SBR B-richtlijn dus maatregelen af te wegen op doelmatigheid. Om de effectiviteit van maatregelen te toetsen, 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 de gebouwen. Daarbij bespreken we ook bouwkundige optimalisaties.

5.2. ANALYSE RESULTATEN

Om te bepalen welke trillingsrichting en trillingsfrequenties maatgevend zijn, is een analyse uitgevoerd van de verwachte trillingen, zie Figuur 10 voor de trillingen in het appartement het dichtst bij het spoor. In deze figuur is de trillingssnelheid per treinpassage weergegeven als tertsbandspectrum op de fundering en op de vloer. Uit deze figuur kan worden afgeleid bij welke frequentie en in welke trillingsrichting de trillingen het hoogst zijn. Uit Figuur 10 volgt dat de hoogste trillingen optreden in de verticale richting, maar ook in horizontale richting zijn de trillingen hoog. De hoge trillingen in verticale richting komen vooral door de relatief open kolommenstructuur op de begane grond in combinatie met de grote vloeroverspanning in dit appartement. In horizontale richting heeft die kolommenstructuur ook veel effect. De trillingen zijn vooral hoog tussen de 4 en 10 Hz. Maatregelen moeten vooral effectief zijn tegen trillingen bij die frequenties, omdat daar de meeste trillingsenergie zit.

Om te voldoen aan de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn is een reductie van ongeveer 50 procent van de trillingen nodig in de voorste appartementen, op basis van de huidige metingen. Als ook rekening wordt gehouden met de intensivering van het goederenvervoer, dan is een reductie van bijna 70 procent van de trillingen nodig om te voldoen aan het beoordelingskader.



Figuur 10 Verwachte trillingen op fundering (boven) en 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). Effectieve maatregelen zijn het vervangen van de overweg door een onderdoorgang. Een minder ingrijpend alternatief is het vervangen van de huidige Harmelen-overweg (die vaak voor hoge trillingen zorgt) door bijvoorbeeld een Strail-overweg (rubberen beplating tussen de spoorstaven, zodat het spoor gewoon doorloopt). Op een aantal locaties in Nederland zorgde dit voor afnames van de trillingen met zo'n 30 procent.

Alternatieve maatregelen aan het spoor zijn een forse verlaging van de rijnsnelheid voor goederentreinen (naar 40 km/h) of het toepassen van een betonplaat met ballastmat onder het spoor. Goedkopere maatregelen, zoals under sleeper pads of ballastmatten, zijn onvoldoende effectief tegen de (laagfrequente) trillingen van de goederentreinen.

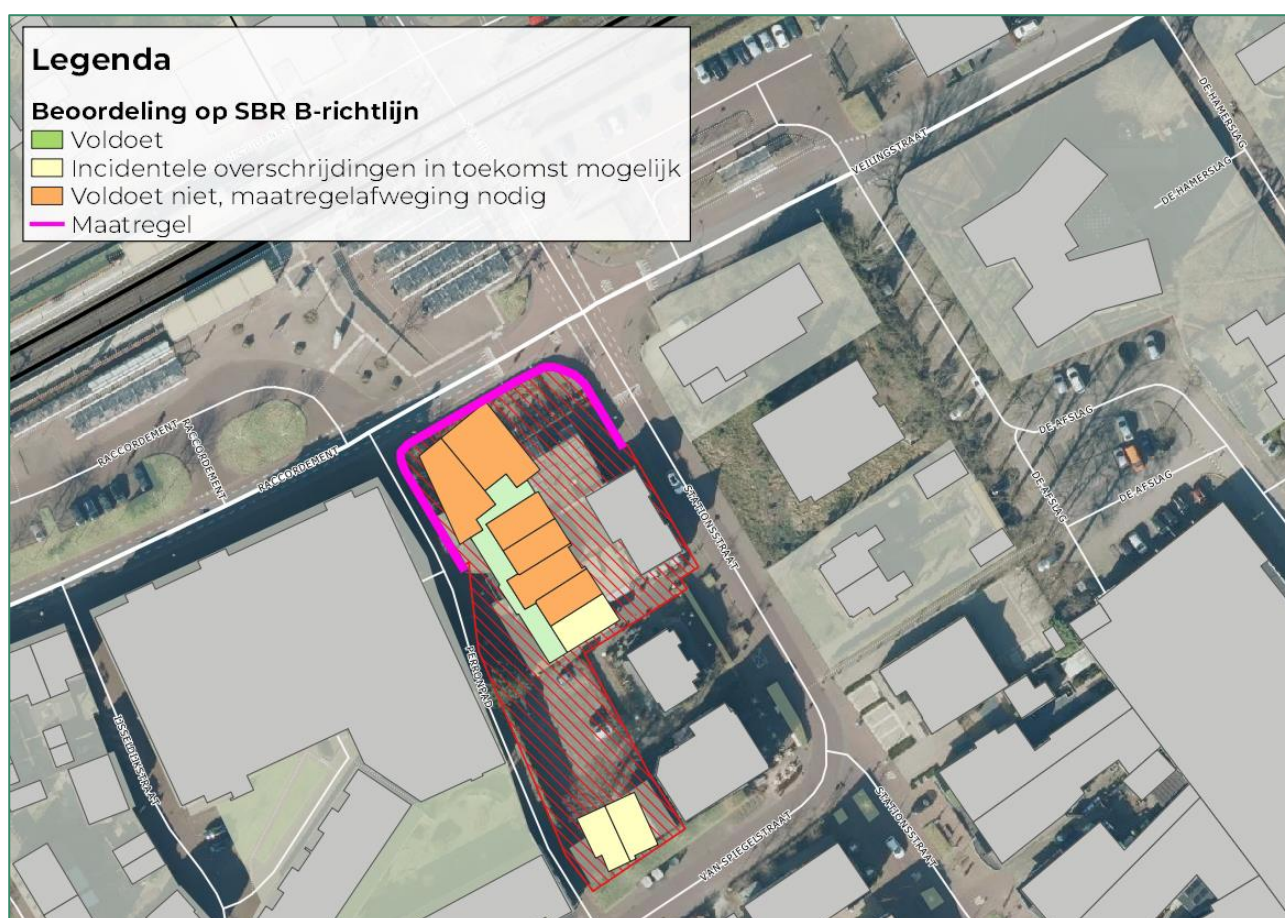
Nadeel van maatregelen aan het spoor zijn de hoge kosten hiervan (m.n. doordat een buitendienststelling nodig is), bovendien vallen deze maatregelen buiten het plangebied. Een verlaging van de rijnsnelheid is niet realiseerbaar (i.v.m. de dienstregeling op dit druk bereden spoor) en het toepassen van een zware betonplaat onder het spoor leidt tot zeer hoge kosten per woning (in totaal tussen de € 2 en € 3 mln., en daarmee meer dan € 100.000 per woning met een mogelijke overschrijding). Deze kosten zijn ruim hoger dan het richtbedrag voor maatregelen dat ProRail hanteert bij doelmatigheidsafwegingen (€ 63.000), en staan niet in verhouding tot de bouwsom van de woningen. Het vervangen van de overweg door een Strail-overweg heeft lagere kosten (tussen de € 300.000 en € 400.000), maar de realisatietijd hiervoor kan lang zijn, bovendien heeft een ontwikkelaar niet of nauwelijks invloed op dat proces. En ook met een aangepaste overweg is er nog sprake van overschrijdingen van het beoordelingskader, ondanks de forse investering die dit vraagt.

Gelet op bovenstaande afwegingen zijn aan het spoor daarom niet doelmatig.

5.4. MAATREGELLEN IN DE BODEM

Bij maatregelen in de bodem kan gedacht worden aan het toevoegen van obstakels in de bodem, die ervoor zorgen dat de gebouwen worden afgeschermd. Voorbeelden zijn het toevoegen van een (spoor)sloot, een trillingsscherm van piepschuim (EPS), beton, jet-grout (soil-mix methode voor beton) of een damwand. Nadeel van deze maatregelen is dat deze vaak hoge kosten met zich meebrengen en dat ze niet aanpasbaar zijn aan toekomstige situaties (met uitzondering van een spoorssloot).

Een trillingsscherm is alleen effectief dicht bij de bron of dicht bij de ontvanger. De meest logische plek voor een trillingsscherm is dicht op de bebouwing, omdat realisatie dichtbij het spoor in publiek terrein plaats moet vinden (met alle kosten voor verleggen van kabels en leidingen, herinrichting van de stationszone en de Stationsstraat erbij). Om het plangebied af te schermen, is een trillingsscherm van ca. 80 meter lengte nodig op de perceelgrens, zie Figuur 11.



Figuur 11 Mogelijke locatie van trillingsscherm

De diepte van een scherm moet, gezien de dominante trillingsfrequenties, voor veel schermtypes zo'n 25 meter diep 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 5 Mogelijke maatregelen in de bodem, effect op trillingen en kosten

Maatregel	Effect	Kosten ³
Betonnen wand (diepwandmethode)	15 – 30%	€ 2.1 – 3.4 mln.
Jet-grout wand	10 – 20%	€ 1.8 – 2.8 mln.
Damwand (intrillen)	5 – 15%	€ 0.9 – 1.5 mln.
Betonnen wand, bekleed met rubber	30 – 50%	€ 2.5 – 3.9 mln.
Damwand met EPS (piepschuim)	10 – 25%	€ 1.3 – 2.1 mln.
Damwand met sleuf (luchtspouw)	15 – 25%	€ 1.9 – 3.0 mln.
L-wand 4.0 m diep	10 – 25%	€ 0.1 – 0.2 mln.
L-wand 4.0 m diep, bekleed met rubber	15 – 30%	€ 0.2 – 0.5 mln.
CSM-wand (Cutter Soil Mix of Mix-In-Place)	0 – 5%	€ 1.2 – 1.9 mln.
Trillingsscherm EPS (piepschuim), 1 m dik	0 – 10%	€ 0.2 – 0.4 mln.

Zoals in bovenstaand overzicht is te zien, gaat het stuk voor stuk om kostbare maatregelen, terwijl het effect beperkt is (of in ieder geval minder dan de benodigde 50 procent reductie om te voldoen aan het beoordelingskader). De meest effectieve maatregel, een betonnen trillingsscherm van 25 meter diep en 0.5 meter breed, tot 8 meter diepte bekleed met minimaal 100 mm rubber of 1000 mm EPS, kost tussen de € 2.5 en € 3.9 mln. De kosten van deze maatregelen zijn nog hoger dan maatregelen aan het spoor. Dergelijke kosten staan ook niet in verhouding tot de bouwsom van de geplande woningen.

Ook maatregelen in de bodem zijn daarmee niet doelmatig.

5.5. OPTIMALISATIES VAN DE GEBOUWEN

Tenslotte zijn ook optimalisaties aan de geplande woningen mogelijk. Denk hierbij aan het verzwaren of afveren van de fundering, het verzwaren van de dragende wanden of het kiezen voor een zwaarder of dikker vloertype. Het globale effect en de kosten van de mogelijke maatregelen aan de woningen zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Mogelijke maatregelen aan de gebouwen

Maatregel	Effect	Kosten ⁴
Betonnen skelet i.p.v. kalkzandsteen skelet	0 – 10%	< 5% SK
Extra dragende wanden of kolommen in kop appartementen	30 – 40% ⁵	< 2% SK

³ Totale investeringskosten, incl. BTW, prijspeil januari 2023, 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.

⁴ SK = Stichtingskosten

⁵ Deze reductie is alleen van toepassing voor de appartementen in de kop bij het spoor, waar ook de hoogste trillingen worden verwacht. De andere appartementen hebben al een zware constructie, met veel lagere trillingen.



Maatregel	Effect	Kosten ⁴
Toepassen breedplaat- i.p.v. kanaalplaatvloeren	5 – 10%	< 2% SK
Eigenfrequentie vloer > 13 Hz	20 – 35% ⁶	< 3% SK
Ontkoppelen van de fundering (afveren, op max. 3 Hz)	70 – 85%	5 – 9% SK
Inpakken van de fundering met 250 mm rubber	5 – 10%	2 – 4% SK
Afschermen van de fundering met 1.000 mm dik EPS	5 – 15%	< 3% SK
Afschermen van de fundering met 2 m diepe L-wand	5 – 15%	< 2% SK
Zware plaatfundering (700 mm dik)	15 – 25%	< 3% SK
Palenfundering i.p.v. balkenfundering	10 – 15%	4 – 6% SK

De enige effectieve maatregel is het ontkoppelen van de fundering (toepassen van stalen veerdozen tussen de fundering en afgeveerd op een frequentie van maximaal 3 Hz, zie bijlage IV voor een voorbeelduitwerking). Met deze maatregel is in alle gevallen volledig te voldoen aan het beoordelingskader. Het betreft wel een kostbare maatregel, met geschatte kosten tussen de € 10.000 en € 22.000 per appartement. Met goede dilatatie is het ook mogelijk om dit toe te passen op een deel van het appartementengebouw, bijvoorbeeld voor de kop van de appartementen dichtbij het spoor.

Minder kostbare (maar ook minder effectieve) maatregelen zijn het verzwaren van de fundering (dikke, zware betonplaat) of het afschermen van de fundering met dikke blokken EPS (piepschuim) of een prefab L-wand met luchtsponw (zie bijlage IV voor een voorbeeld). Bij het meest noordoostelijke appartement, met grote vloeroverspanningen en een relatief open structuur onderin het pand, adviseren we om extra dragende punten toe te voegen op de begane grond, daarmee is een forse reductie van de trillingen te realiseren.

5.6. AFWEGING VAN MAATREGELEN

Gezien de overschrijdingen is op basis van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn een maatregelafweging uitgevoerd. Hieruit volgt dat maatregelen aan het spoor of in de bodem niet doelmatig zijn, gezien de zeer hoge kosten of de beperkte effectiviteit. Met optimalisaties aan de constructie van de woningen zijn de trillingen wel te verminderen. Onderstaand zijn adviezen opgenomen om in de verdere uitwerking rekening te houden met trillingen.

1. Voor de **5 appartementen aan de spoorzijde** adviseren we het volgende:
 - a. Vermijd lichte bouw, zoals houtskeletbouw of staalbouw. Vermijd ook stalen draagbalken zoveel mogelijk, en kies waar mogelijk voor betonnen draagbalken.
 - b. Zorg voor extra dragende tussenwanden of zware kolommen (vooral onder de noordoostelijke appartementen) om de stijfheid van de onderste bouwlaag te vergroten en de eigenfrequentie van de vloer te vergroten. Hiermee zijn de trillingen met zo'n 30 tot 40 procent te reduceren.
 - c. Kies voor zware bouw, liefst betonnen bouw (i.h.w.g) met breedplaatvloeren.

⁶ Geldt alleen voor appartement in noordoostelijke hoek, met grote vloeroverspanningen. In de andere appartementen wordt deze eigenfrequentie al gehaald met een vloerdikte vanaf 260 mm.



- d. Overweeg om de fundering te verzwaren (zware betonnen plaatfundering of paalfundering) of af te schermen (met een prefab L-wand met luchtsponw of met dikke blokken EPS).

Met bovenstaande maatregelen zijn de trillingen fors te reduceren, en resteren nog beperkte overschrijdingen van het beoordelingskader. Volledig voldoen is alleen mogelijk door stalen veerdozen toe te passen tussen een dubbele fundering (plaat- of palenfundering, daarop stalen veerdozen en daarop betonnen balken). Dit is een zeer effectieve maatregel, waarmee de trillingen lager zijn dan de streefwaarden, maar de kosten van deze maatregel zijn met € 10.000 tot € 22.000 per woning hoog.

2. Voor de andere **15 appartementen**, verder van het spoor, adviseren we het volgende:
 - a. Vermijd lichte bouw, zoals houtskeletbouw of staalbouw. Vermijd ook stalen draagbalken zoveel mogelijk, en kies waar mogelijk voor betonnen draagbalken.
 - b. Kies voor zware bouw, liefst betonnen bouw (i.h.w.g) met breedplaatvloeren.
 - c. Overweeg om de fundering te verzwaren (zware betonnen plaatfundering of paalfundering) of af te schermen (met een prefab L-wand met luchtsponw of met dikke blokken EPS).

Met bovenstaande aanpassingen resteren nog beperkte overschrijdingen van het beoordelingskader. Ook hier is volledig voldoen aan het beoordelingskader alleen mogelijk met een dubbele, afgeveerde fundering. Gezien de beperkte, incidentele overschrijdingen in relatie tot de kosten is een dergelijke kostbare maatregel niet doelmatig.

3. Voor de **twee-onder-een-kapwoningen** adviseren we het volgende:
 - a. Vermijd lichte bouw, zoals houtskeletbouw of staalbouw.

Formeel zijn hier geen maatregelen nodig, omdat de woningen *op dit moment* voldoen aan het beoordelingskader. Er wordt echter een toename van het treinverkeer voorzien, waardoor in de toekomst incidentele, beperkte overschrijdingen mogelijk zijn. Die incidentele overschrijdingen zijn te voorkomen met een zware bouw (betonnen skelet, breedplaatvloeren) of een zwaardere fundering (dikke plaatfundering of paalfundering).

Met bovenstaande optimalisaties aan de gebouwen zijn overschrijdingen te beperken of te voorkomen, maar de bouwkosten nemen daarmee natuurlijk wel toe. We adviseren daarom om voor elk van bovenstaande aanpassingen af te wegen of deze doelmatig zijn (weeg het effect op tegen de kosten). Met een beroep op bijlage 5 uit de SBR B-richtlijn kan eventueel worden gemotiveerd dat er geen onaanvaardbaar woon- en leefklimaat ontstaat in de geplande woningen. Argumenten die gebruikt kunnen worden, zijn:

- Het gaat om een beperkt aantal overschrijdingen (na de maatregelen hierboven onder 1.a en 1.b gaat het om beperkte overschrijdingen (maximaal 3 per dag, na intensivering van het goederenvervoer) in de appartementen die het dichtst bij het spoor liggen. In de verder weg gelegen appartementen en de 2-onder-1-kapwoningen zijn de trillingen lager en is hooguit incidenteel sprake van overschrijdingen. De trillingen van de meeste goederentreinen en alle reizigerstreinen voldoen wel aan het beoordelingskader.
- De trillingen voldoen weliswaar niet aan de strenge streefwaarden voor nieuwbouw uit de SBR B-richtlijn, maar op de appartementen die het dichtst bij het spoor liggen na, wel aan de streefwaarden voor bestaande situaties. In die soepeler streefwaarden voor bestaande situaties is een zekere mate van gewinning meegenomen.
- De woningen worden gerealiseerd in een zone dichtbij het spoor, waar nu ook al bebouwing is gerealiseerd die dicht bij het spoor ligt. Het gaat bovendien om oude, meer



trillingsgevoelige bebouwing, waar de trillingen dus significant hoger zullen zijn dan in de nieuwe woningen. Ook zonder maatregelen tegen trillingen kan worden beargumenteerd dat er in de geplande bebouwing daarom geen onacceptabele situatie ontstaat: de trillingen zijn immers lager dan in andere, al bestaande bebouwing rond deze locatie, waar ook al tientallen jaren sprake is van gebouwen met een woonfunctie zonder dat dit tot veel klachten over trillingen leidt.

5.7. 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 vooral rond overwegen sprake kan zijn van flinke variaties in de trillingen door de tijd. Er is geen informatie bekend over de status van de spoorligging op het moment van de metingen. 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, wel kunnen de trillingen in werkelijkheid hierdoor zowel hoger als lager uitvallen.
- 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 en op grotere afstand van het spoor, is de invloed van deze variaties meegenomen in de berekeningen. De invloed hiervan 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). In de berekeningen is gerekend met een verwachtingswaarde van de trillingen op basis van een aan de hand van praktijkmetingen geijkt rekenmodel. Hiermee wordt een resultaat verkregen dat representatief is voor de toekomstige situatie.

Bovenstaande onzekerheden hebben geen significante invloed op de conclusies van dit onderzoek. Wel geldt dat de mogelijkheid op hogere trillingen niet volledig kan worden uitgesloten, gezien de ligging nabij een spoorwegovergang waar vaak sprake is van variatie van de trillingen door het jaar heen.

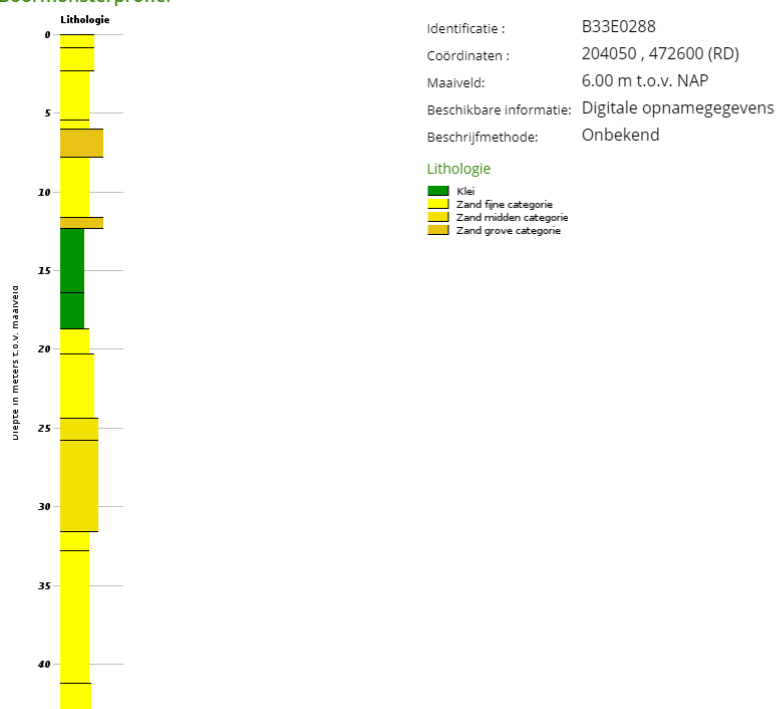


GRONDONDERZOEK

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

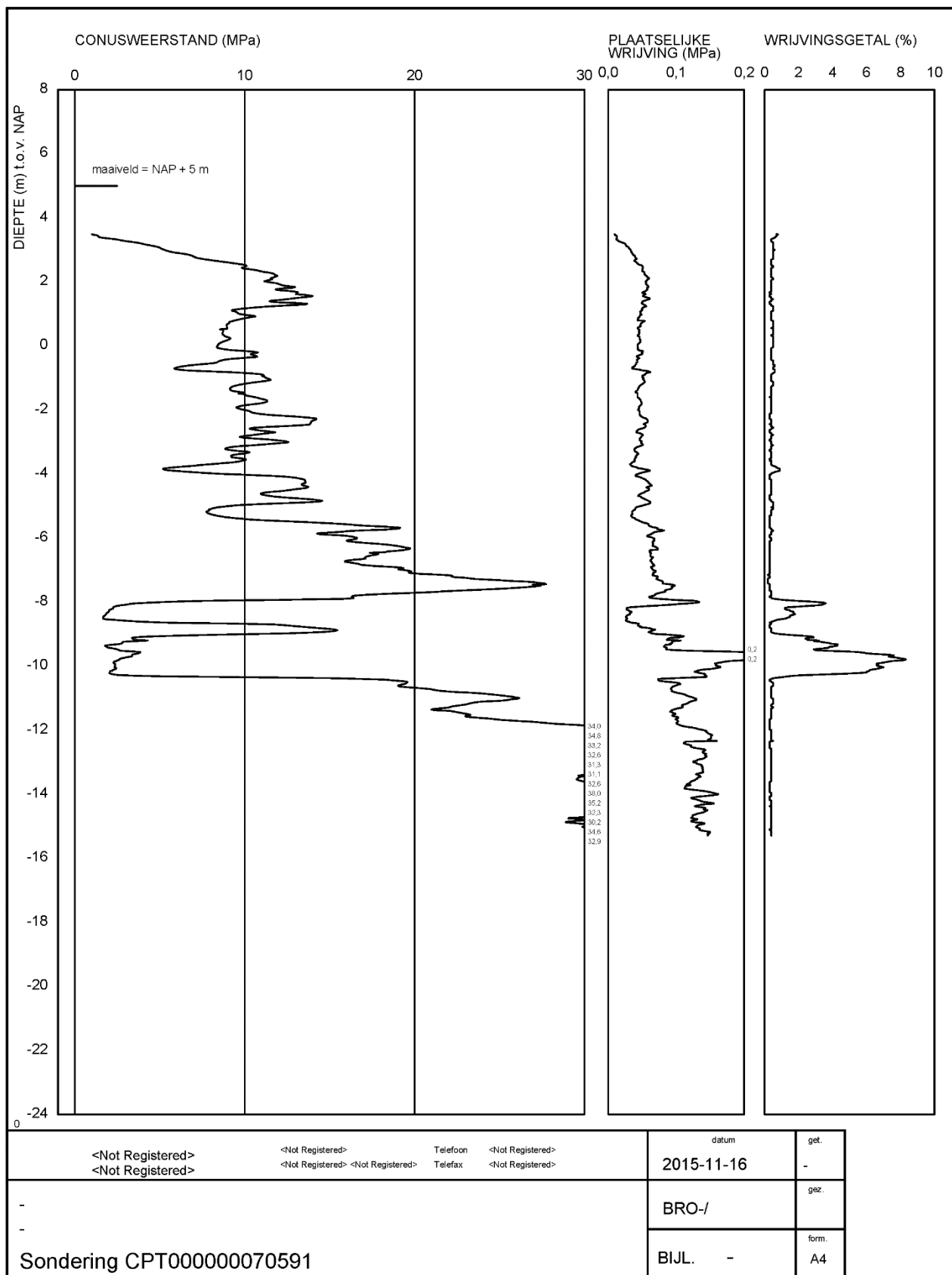
Een grondboring in de nabijheid van het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur 12. Uit de grondboring blijkt dat de bodem is opgebouwd uit stijve zandlagen, op grotere diepte komen ook wat slappere lagen voor. Bij een zandige bodem dempen de trillingen slecht uit met de afstand, en kunnen trillingen tot op grote afstand van het spoor voelbaar zijn.

Boormonsterprofiel



Figuur 12 Boring in het onderzoeksgebied

Een representatieve sondering uit het onderzoeksgebied, waarin onder meer de conusweerstand te zien is, is weergegeven in Figuur 13. Ook hier is te zien dat de bodem uit stijvere zandlagen bestaat, met op wat grotere diepte ook wat slappere lagen (lagere conusweerstand, hogere wrijving).



Figuur 13 Sondering nabij het onderzoeksgebied

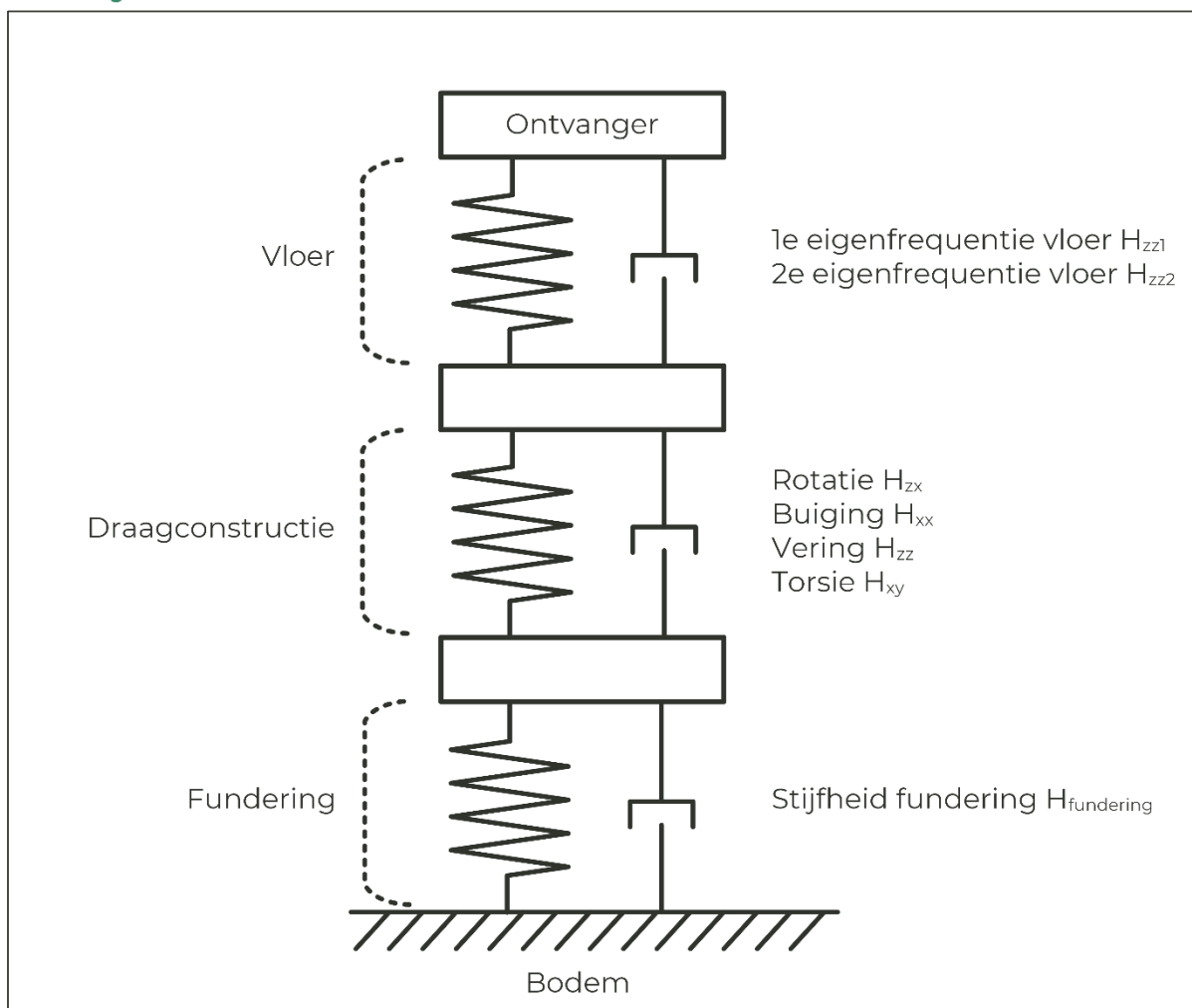
REKENMODEL

In dit rapport is gebruik gemaakt van het rekenmodel Buildyn om de trillingen in de geplande bebouwing te berekenen. Buildyn is een zogenaamd beam-element model (BEM) waarin een gebouw gemodelleerd en doorgerekend wordt. Dit model is gekalibreerd met meer dan 600 praktijkmetingen, met behulp van een slim algoritme. Door die combinatie van een slim algoritme en een grote hoeveelheid praktijkdata, verkrijgen we een nauwkeurigheid die doorgaans significant beter is dan een Eindige Elementenmodel, omdat de resultaten sterk leunen op de praktijk (terwijl een Eindige Elementenmodel zeer gevoelig is voor de gebruikte input t.a.v. bijv. demping en stijfheden).

In Buildyn wordt een gebouw gemodelleerd door middel van gekoppelde massa-veersystemen, zie Figuur 14. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 14, worden in deze bijlage nader toegelicht. 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.

Buildyn

WVB



Figuur 14 Principe van Buildyn met een gebouw als gekoppeld massaveersysteem. Rechts de verschillende componenten van het rekenmodel

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

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.

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.

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.

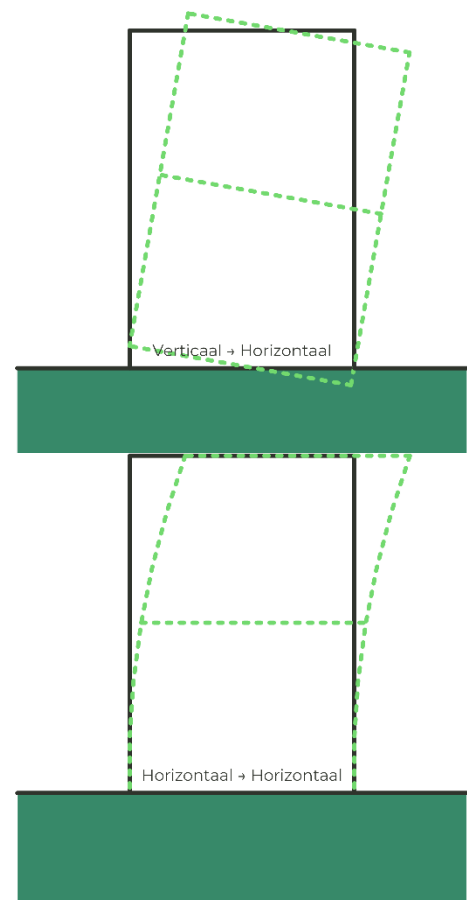
Dit effect noemen we H_{zx} , en is afhankelijk van:

- » 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

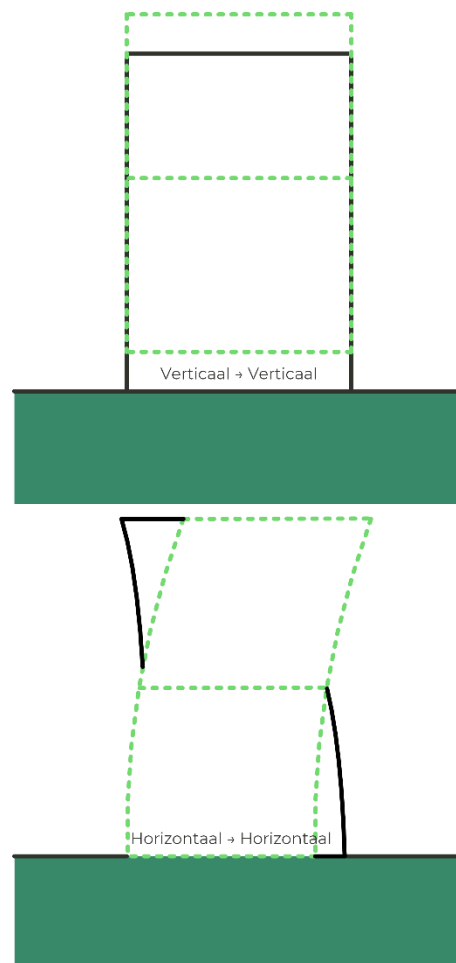


Het derde principe, dat van vering van het gebouw op zijn fundatie, is rechts weergegeven. Dit principe speelt vooral een rol bij wat hogere gebouwen, of bij gebouwen met een slappe onderlaag of lokaal slappere elementen (denk aan kolommen en balkenstructuren). Dit effect noemen we H_{zz} , en is afhankelijk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



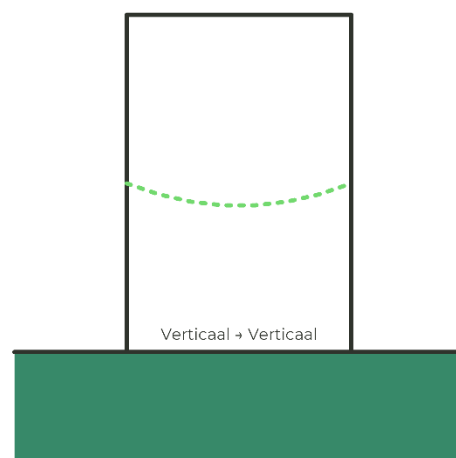
VLOEREN

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:

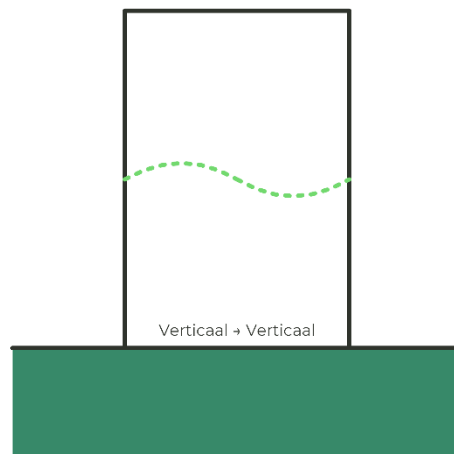
- » Type vloer (doorsnede, materiaal, en bij beton: gescheurd of ongescheurd)
- » Afmetingen van de vloer
- » Type oplegging



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.

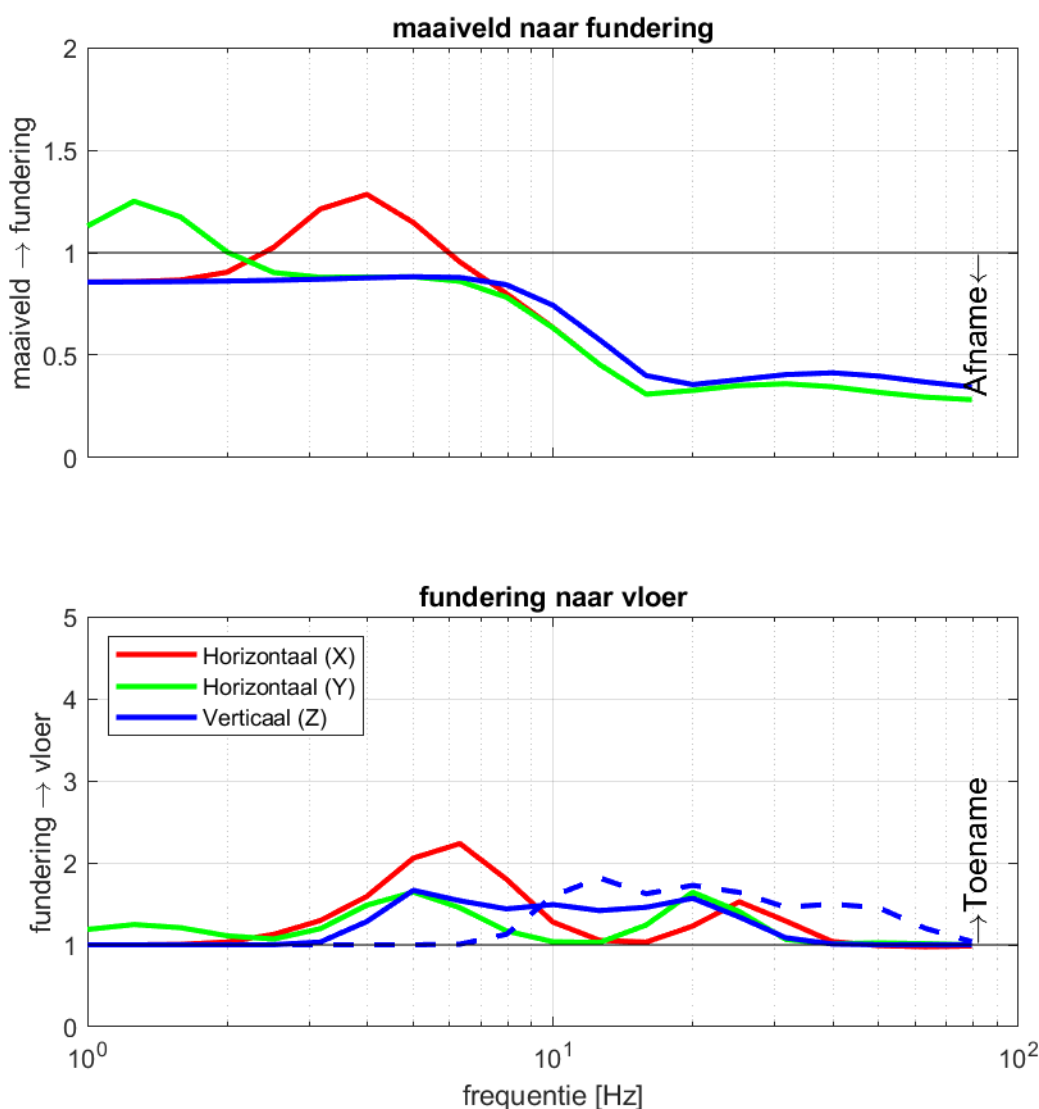
Dit effect noemen we H_{zz2} , en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1} .

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).



RESULTATEN

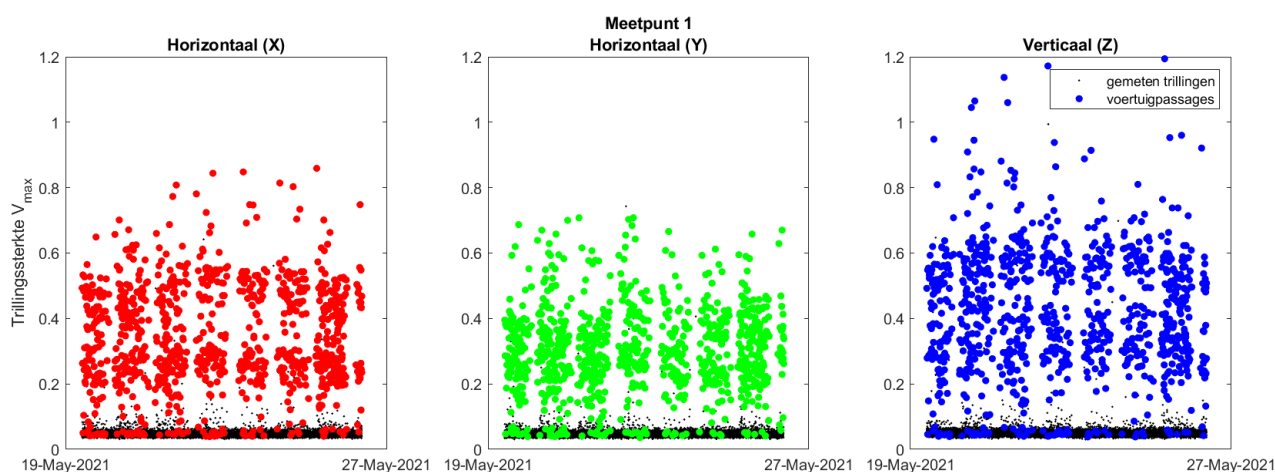
Ter illustratie zijn de resultaten uit de Buildyn-berekeningen weergegeven in Figuur 15 voor het noordoostelijke appartement op de 3e verdieping.



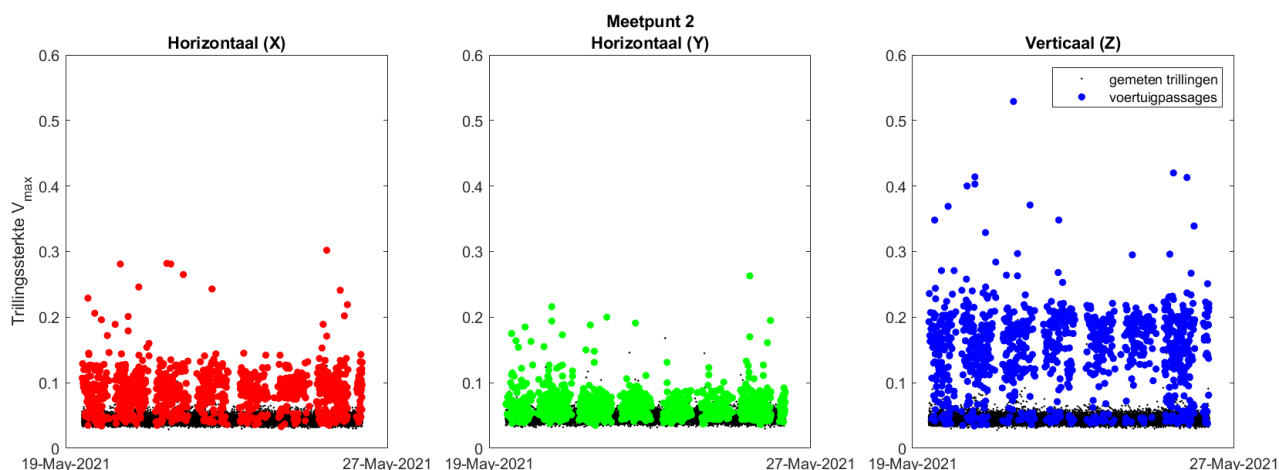
Figuur 15 Buildyn-resultaten voor 3e verdieping, betonnen skelet, 250 mm breedplaatvloeren. Doorgaande lijn verticaal is midden vloer, onderbroken lijn is op $\frac{1}{4}$ en $\frac{3}{4}$ van overspanning

RESULTATEN METINGEN

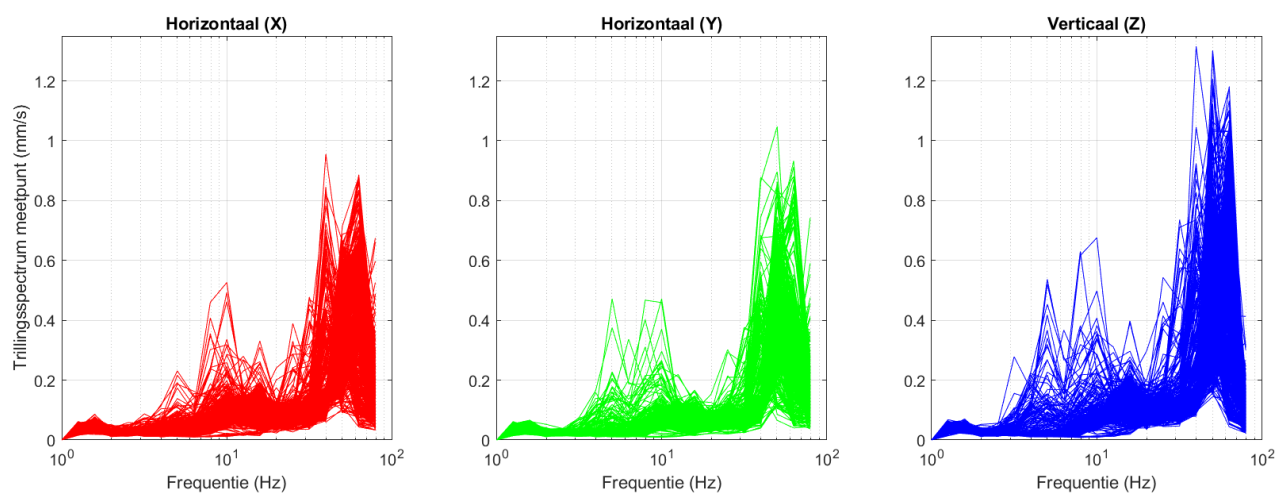
Deze bijlage bevat de resultaten van de metingen van Alcedo. Per meetpunt zijn de gemeten trillingen en de tertsbandspectra per treinpassage weergegeven.



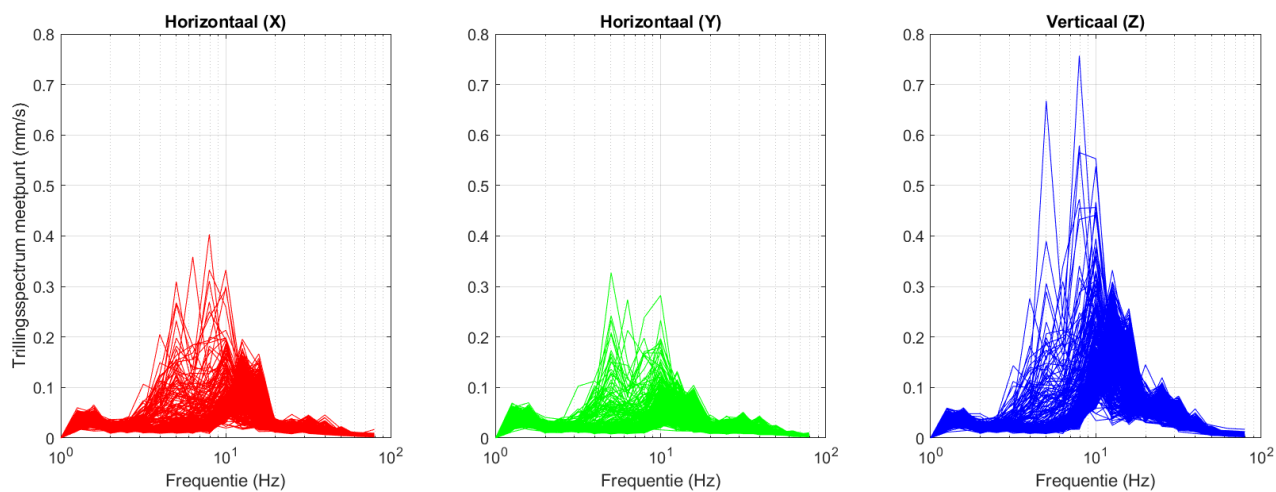
Figuur 16 Gemeten trillingen bij meetpunt 1 (maaiveld, dichtbij spoor)



Figuur 17 Gemeten trillingen bij meetpunt 2 (maaiveld, dichtbij funderingspunt)



Figuur 18 Tertsbandspectra bij meetpunt 1

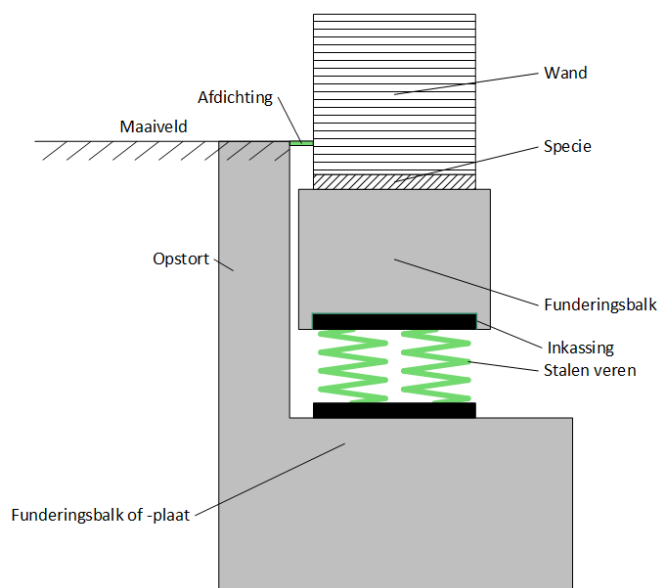


Figuur 19 Tertsbandspectra bij meetpunt 2

IV DETAILS MAATREGELEN

Deze bijlage bevat achtergrondinformatie en principedetails van de besproken maatregelen en optimalisaties van het gebouw.

Een principeschets van een afgeveerde fundering met stalen veerdozen is weergegeven in Figuur 20. Een foto van een concrete toepassing bij eengezinswoningen in Prinsenbeek is weergegeven in Figuur 21. Aan de zijkant kan de bodem van de woning worden geïsoleerd door het aanbrengen van bijvoorbeeld een laag EPS, of, zoals in Figuur 20, met een opstort op de funderingsplaat.



Figuur 20 Principeschets afgeveerde fundering (fundering op staal)

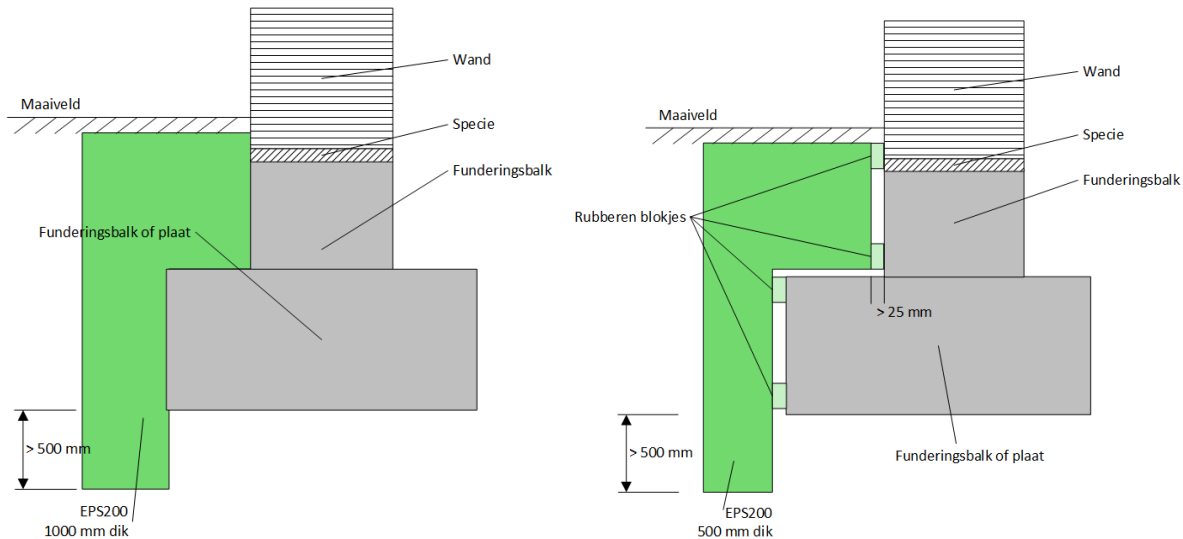


Figuur 21 Dubbele fundering met stalen veerdozen (project in Prinsenbeek)

Een principeschets van het bekleden van de fundering met EPS (piepschuim) is weergegeven in Figuur 22. De EPS-kwaliteit dient wat zwaarder te zijn dan standaard i.v.m. de gronddruk. Hier is EPS200 aangegeven. De minimaal benodigde dikte voor voldoende reductie is zo'n 1.000 mm, om opdrijven te voorkomen moet dit tot de GHG-waarde van het grondwaterpeil worden aangebracht en verankerd worden aan de fundering. Een geringere dikte is ook mogelijk, mits

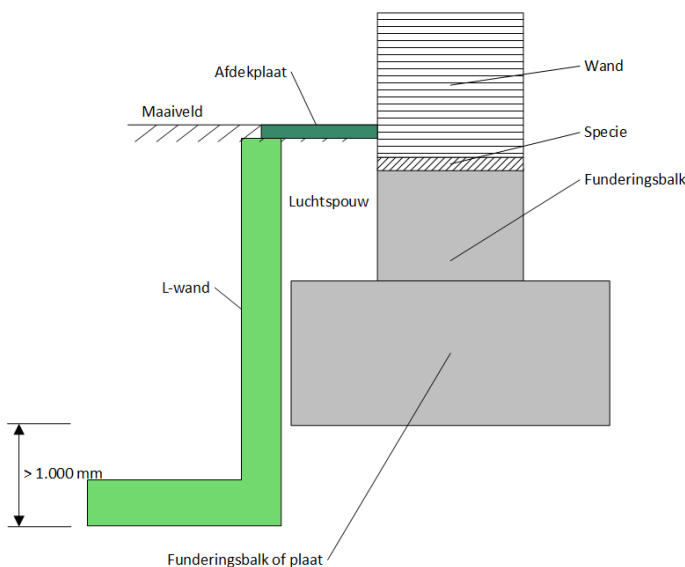


gebruik wordt gemaakt van een luchtsponw van minimaal 30 mm breed (afgedekt om vuilophoping te voorkomen). Verder dient het EPS dieper te zijn dan de funderingsbalken, bij voorkeur minimaal 500 mm onder de onderzijde van de funderingsbalk. Minder diep is mogelijk (i.v.m. korrelspanning nodig) maar leidt tot een lagere effectiviteit. Oplossingen hiervoor zijn bijvoorbeeld om op diepte een extra blok EPS toe te voegen.



Figuur 22 Fundering met EPS-scherm ervoor (links) en met EPS en luchtsponw (rechts)

Een principeschets van het plaatsen van een L-wand direct voor de fundering is rechts weergegeven in Figuur 23. Belangrijk hierbij is dat een luchtsponw nodig is (geen contact tussen L-wand en fundering, of opvangen met rubberen afstandhouders van minimaal 30 mm dik), en dat deze dient te worden afgedekt met een afdekplaat. De L-wand moet in ieder geval ruim (minimaal 500, liefst 1.000 mm) lager liggen dan de onderzijde van de funderingsbalk of plaat om effectief te zijn.



Figuur 23 L-wand met luchtsponw voor fundering