

NIEUWBOUW HOEFKWARTIER

Trillingsonderzoek Lichtpenweg 6 te Amersfoort



Managementsamenvatting

Op het perceel Lichtpenweg 6 in Amersfoort is het bestaande kantoorpand getransformeerd naar woningen. BPD Ontwikkeling realiseert daarnaast nieuwbouw op dit perceel in de vorm van appartementen, verdeeld over 2 bouwblokken. De nieuw te bouwen woningen liggen in de nabijheid van de spoorlijn Amersfoort – Apeldoorn. Uit het trillingsonderzoek dat ten behoeve van het MER van de herontwikkeling van De Hoef is uitgevoerd, volgt dat deze gebouwen in een zone liggen waar trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet *op voorhand* kan worden uitgesloten, en waar dus nader onderzoek nodig is. Doel van het voorliggende onderzoek is daarom 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.

De belangrijkste bevinding van het onderzoek is dat incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader niet zijn uit te sluiten in blok B, in blok A wordt wel voldaan aan het beoordelingskader. Het gaat om maximaal 1 overschrijding per week, veroorzaakt door goederentreinen met een afwijkend trillingsniveau.

Omdat niet volledig wordt voldaan aan het beoordelingskader, is een maatregelafweging uitgevoerd. Hieruit volgt dat:

1. Maatregelen aan het spoor gezien de hoge kosten niet doelmatig zijn. Bovendien vallen deze maatregelen buiten het plangebied.
2. Maatregelen in de bodem gezien de waterpartij tussen het spoor en de bebouwing, die de trillingen al grotendeels afschermt, niet effectief en dus niet doelmatig zijn.
3. Maatregelen aan de bebouwing gezien de al relatief stijve bebouwing weinig effect hebben. Het stijver maken van de constructie van blok B, het verzwaren van de fundering of het toepassen van meer dempende materialen reduceert de trillingen wel iets, maar ook met deze maatregelen wordt nog niet met zekerheid voldaan aan de streefwaarden. Bovendien is de impact op het ontwerp en het realisatieproces groot. Daarom worden deze maatregelen niet doelmatig geacht in het licht van het beperkte aantal overschrijdingen.

Gezien bovenstaande afwegingen zijn er geen effectieve en doelmatige maatregelen te treffen om de trillingen te reduceren. Omdat het gaat om incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader (maximaal 1 per week, na intensivering van het goederenvervoer maximaal 2 per week) en dat wel ruim wordt voldaan aan de soepeler streefwaarden voor een bestaande situatie uit de SBR B-richtlijn, ontstaat in het licht van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn ook zonder maatregelen tegen trillingen geen onacceptabele situatie in de geplande bebouwing.

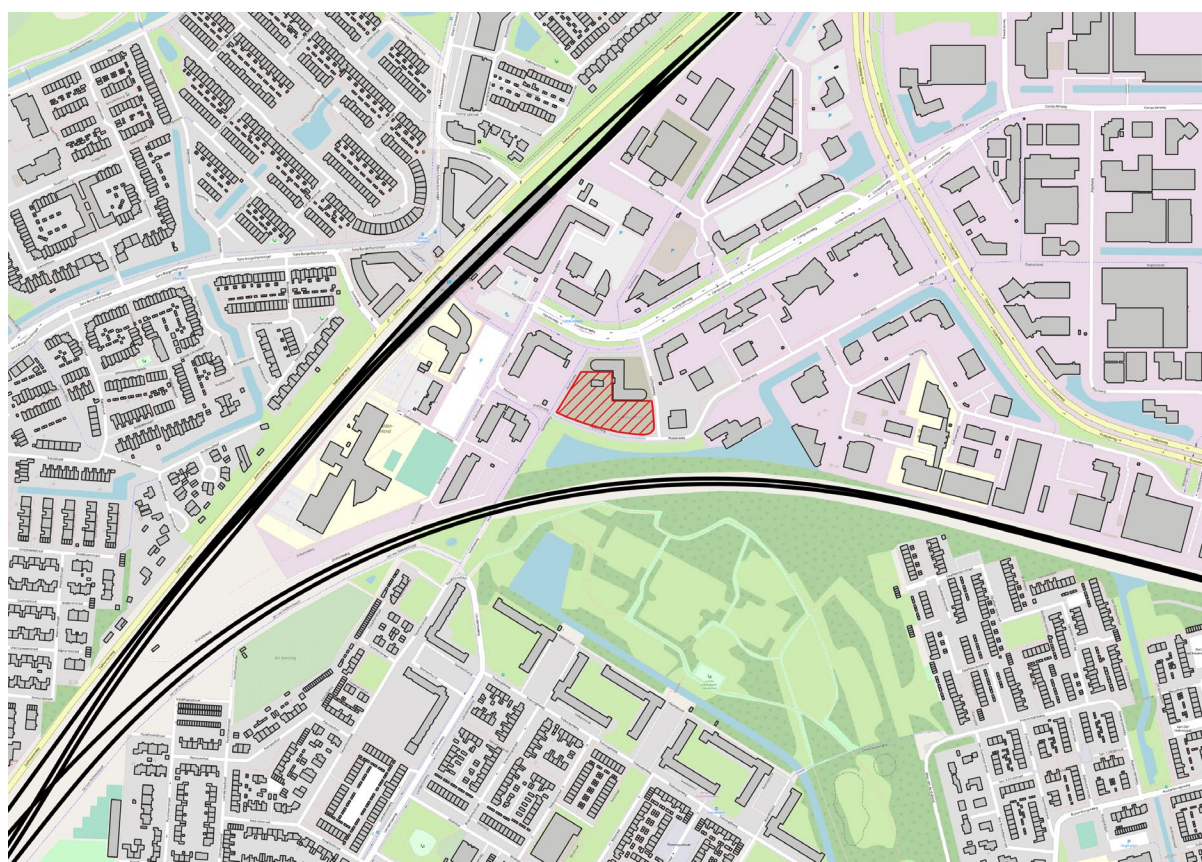
Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
1.1	Aanleiding	4
1.2	Doel	4
1.3	Leeswijzer	5
2	Situatie en uitgangspunten.....	6
2.1	Situatie.....	6
2.2	Uitgangspunten	7
3	Beoordelingskader	9
3.1	Beoordelingskader.....	9
3.2	Rekenmethode	10
4	Verwachte trillingen in de woningen	13
4.1	Meetresultaten.....	13
4.2	Trillingen in geplande nieuwbouw	14
4.3	Maatregelen	15
5	Conclusies en aanbevelingen.....	19
I	Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek.....	20
II	Bijlage Rekenmodel Buildyn.....	23
	Fundering	24
	Draagconstructie	24
	Vloeren	25
	Resultaten	25

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Op het perceel Lichtpenweg 6 in Amersfoort is het bestaande kantoorpand getransformeerd naar woningen. BPD Ontwikkeling realiseert daarnaast nieuwbouw op dit perceel in de vorm van appartementen, verdeeld over 2 bouwblokken. De nieuw te bouwen woningen liggen in de nabijheid van de spoorlijn Amersfoort – Apeldoorn, zie Figuur 1. Uit het trillingsonderzoek¹ dat ten behoeve van het MER van de herontwikkeling van De Hoef is uitgevoerd, volgt dat deze gebouwen in een zone liggen waar trillingshinder als gevolg van treinverkeer niet *op voorhand* kan worden uitgesloten, en waar dus nader onderzoek nodig is op basis van informatie over de geplande bebouwing.



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 (op basis van de in het kader van de MER-rapportage uitgevoerde

¹ Zie Boon, ir. P.M., *De Hoef Amersfoort, Trillingsonderzoek t.b.v. MER*, WeBoost Data, 16 augustus 2019, versie 1.0

metingen en constructieve informatie over de te realiseren 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. Deze trillingen toetsen we aan het van toepassing zijnde beoordelingskader (de SBR B-richtlijn). Als er overschrijdingen van het beoordelingskader worden verwacht, dan geven we aan met welke constructieve aanpassingen of maatregelen wel wordt voldaan aan 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 bebouwing 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 geven we de conclusies en aanbevelingen.

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

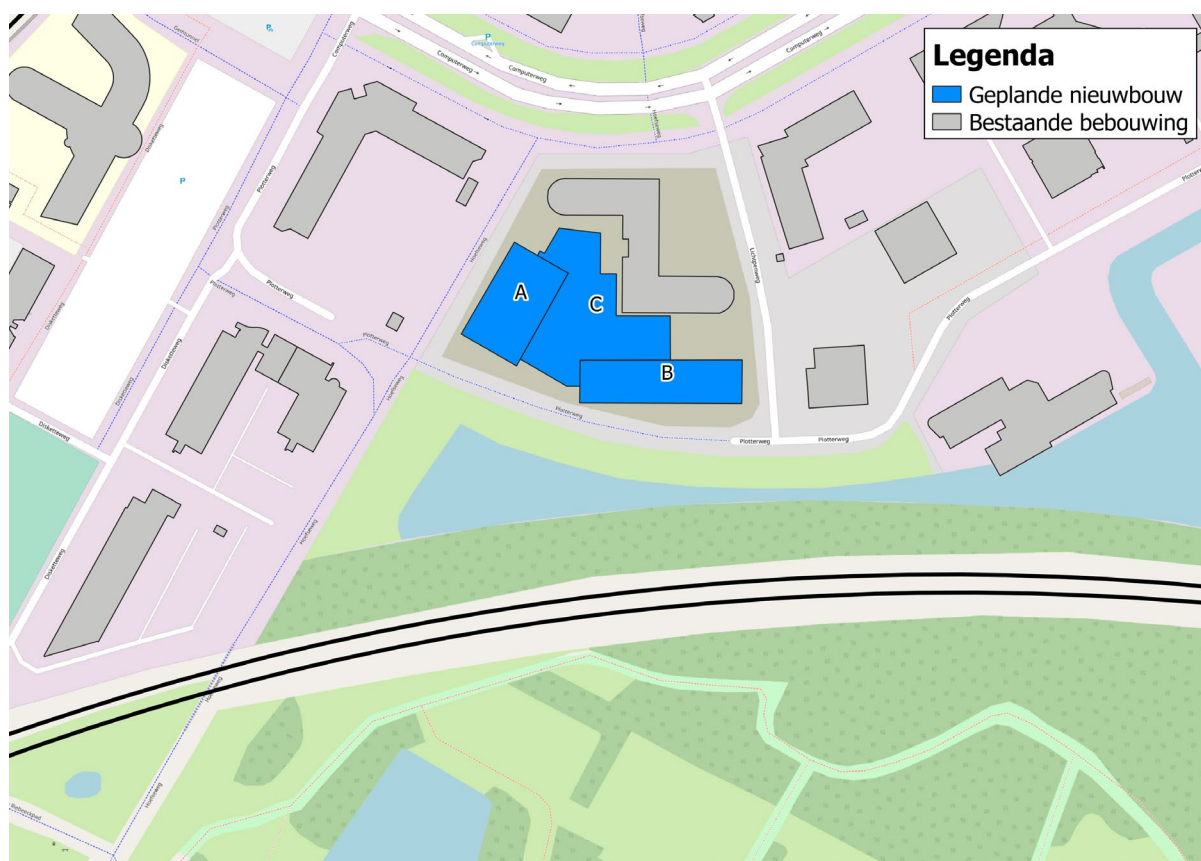
2 Situatie en uitgangspunten

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

2.1 Situatie

De planlocatie bestaat uit een grotendeels onbebouwd perceel, waarop 3 bouwblokken worden gerealiseerd, zie Figuur 2:

- Bouwblok A, een onderkelderde woontoren met appartementen op 12 bouwlagen
- Bouwblok B, een onderkelderd woongebouw met appartementen op 5 bouwlagen
- Bouwblok C, een parkeergarage en fietsenkelder



Figuur 2 Bestaande en toekomstige bebouwing

De nieuwbouw bevindt zich op een afstand van zo'n 65 tot 150 meter van het spoor, met tussen het spoor en de bebouwing nog een waterpartij. De rijsnelheid en het aantal treinen per uur per richting zijn weergegeven in Tabel 1. Deze gegevens zijn gebaseerd op gegevens uit het Geluidsregister Spoor. Volgens de NMCA spoor 2030-2040 (vooruitblik voor goederenvervoer) zal het goederenvervoer op deze lijn toenemen van de huidige 14 tot 16 goederentreinen naar 30 tot 41 goederentreinen per dag. Er wordt geen verandering in het aantal reizigerstreinen voorzien.

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)
Stoptrein Amersfoort – Ede v.v.	120 – 130 km/h	4.00	2.50	1.38
Intercity Amersfoort – Apeldoorn v.v.	120 – 130 km/h	3.25	2.25	0.63
Goederen Amersfoort – Apeldoorn v.v.	70 – 90 km/h	0.32	0.37	0.31

Andere trillingsbronnen, zoals lokaal verkeer, zullen niet voor waarneembare trillingen in de woningen zorgen, gezien de afstand tot de weg, de lage rijksnelheid en de gladde wegopbouw (asfalt, geen drempels).

2.2 Uitgangspunten

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

2.2.1 Gegevens bebouwing

In het plangebied worden appartementengebouwen gerealiseerd. Er is een definitief ontwerp van de bebouwing bekend (*tekeningen van 20 mei 2020 van Lieveense WSP*), in de berekeningen wordt hiervan uitgegaan, zie Tabel 2. Het rekenmodel voor de bebouwing is hierop gebaseerd.

Tabel 2 Eigenschappen bebouwing

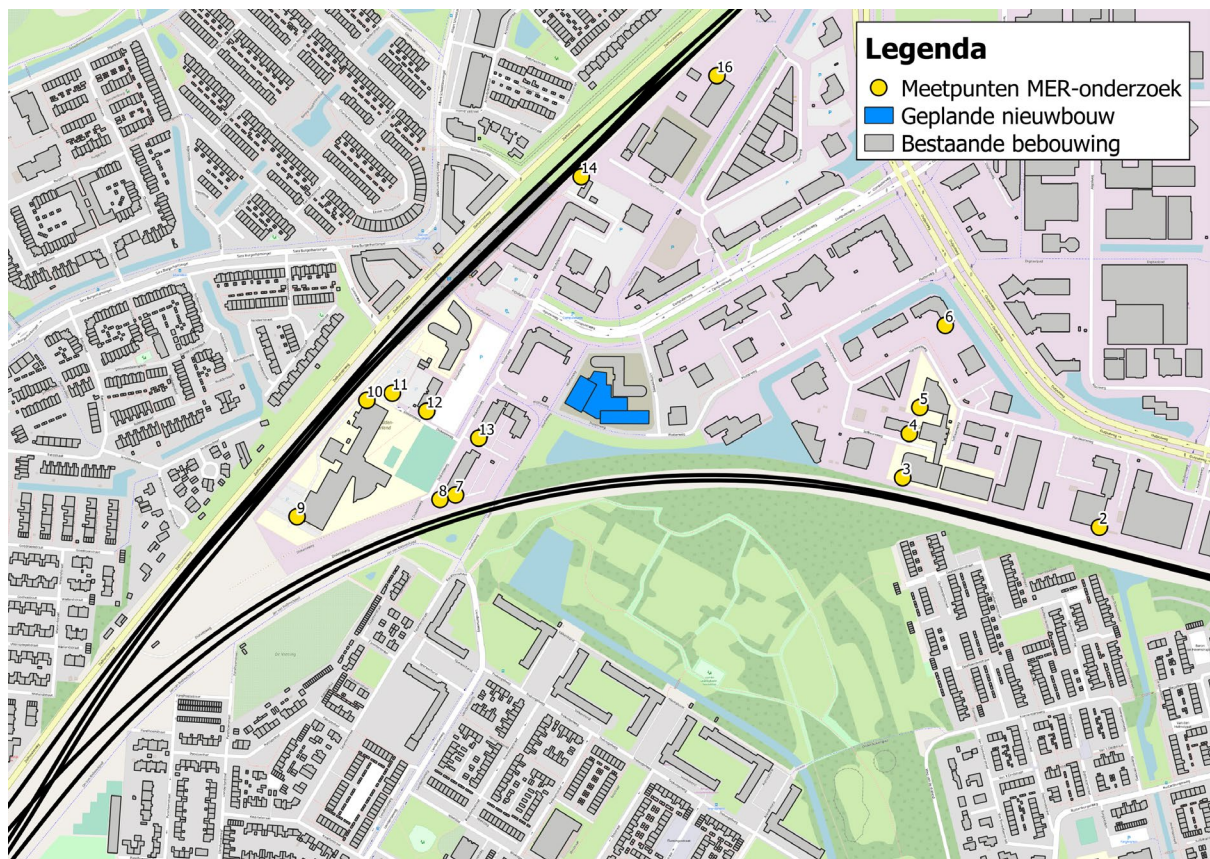
Parameter	Eigenschappen
Vloertype	Breedplaatvloer 200 mm, met 120 mm opstort en 80 mm cementdekvloer
Hoogte	13 bouwlagen (bouwhoogte 36,24 m voor bouwblok A) 6 bouwlagen (bouwhoogte 15,10 m voor bouwblok B)
Lengte vloerveld	7.8 m
Breedte vloerveld	6.5 tot 8.5 m voor bouwblok A 15.6 m voor bouwblok B
Constructietype	Wanden-vloeren
Fundering	Op palen (19 tot 24 m onder NAP voor hoogbouw blok A, rest op staal) Op staal voor blok B
Stijfheid gebouwen	Prefab betonnen scheidingswanden

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 nabijheid van het plangebied zijn uitgevoerd, zoals ook gebruikt voor het MER-onderzoek voor De Hoef. 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

Door Alcedo zijn in het kader van het MER-onderzoek metingen uitgevoerd in en nabij het onderzoeksgebied op een groot aantal punten, zie Figuur 3. De metingen zijn uitgevoerd in juli 2019, sinds dat moment en het moment van schrijven van dit onderzoek zijn er geen wijzigingen geweest aan het treinverkeer. In het huidige onderzoek is met name gebruik gemaakt van de meest nabijgelegen meetpunten, meetpunt 13 en de meetpunten 3, 4 en 5. De meetresultaten van het meetonderzoek worden kort nogmaals weergegeven in hoofdstuk 4, details zijn te vinden in het eerder genoemde MER-rapport.



Figuur 3 Meetpunten in en bij het onderzoeksgebied

3 Beoordelingskader

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

3.1 Beoordelingskader

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 kan worden verzocht om trillingen mee te nemen bij de wijziging van bestemmingsplannen waar trillingen een rol kunnen spelen. 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 de geplande bebouwing is dermate groot dat er geen schade aan de gebouwen zal ontstaan, en verstoring van gevoelige apparatuur als gevolg van de realisatie van dit plan is ook niet aan de orde.

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

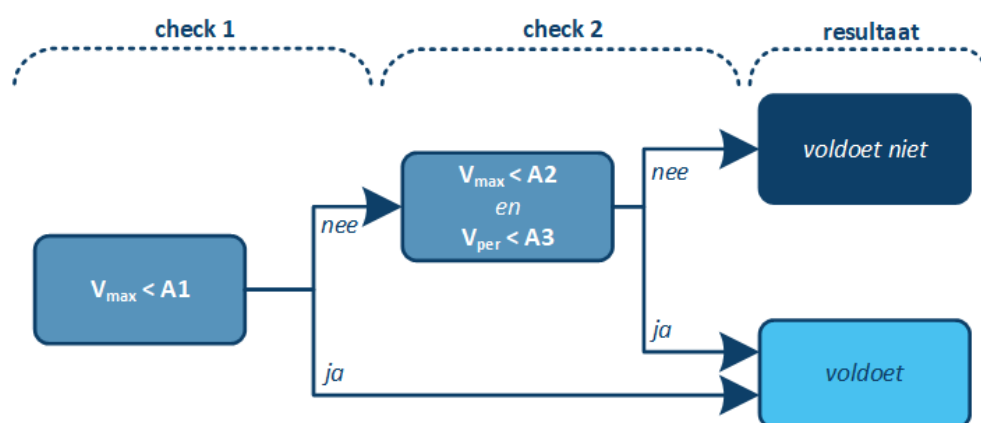
1. De richtlijn toetst zowel een maximaal optredende trillingssterkte (V_{max} , treedt op bij de trein die gedurende de meetperiode de hoogste trillingen veroorzaakt) als het tijdsgemiddelde van de trillingen (V_{per} , deze grootheid is in tegenstelling tot V_{max} dus ook afhankelijk van het aantal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

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.

- 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.
3. Een woning 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.

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

Situatie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Nieuwe situatie	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
Bestaande situatie	0.2	0.8	0.10	0.2	0.4	0.10



Figuur 4 Schema beoordeling SBR B-richtlijn

3.2 Rekenmethode

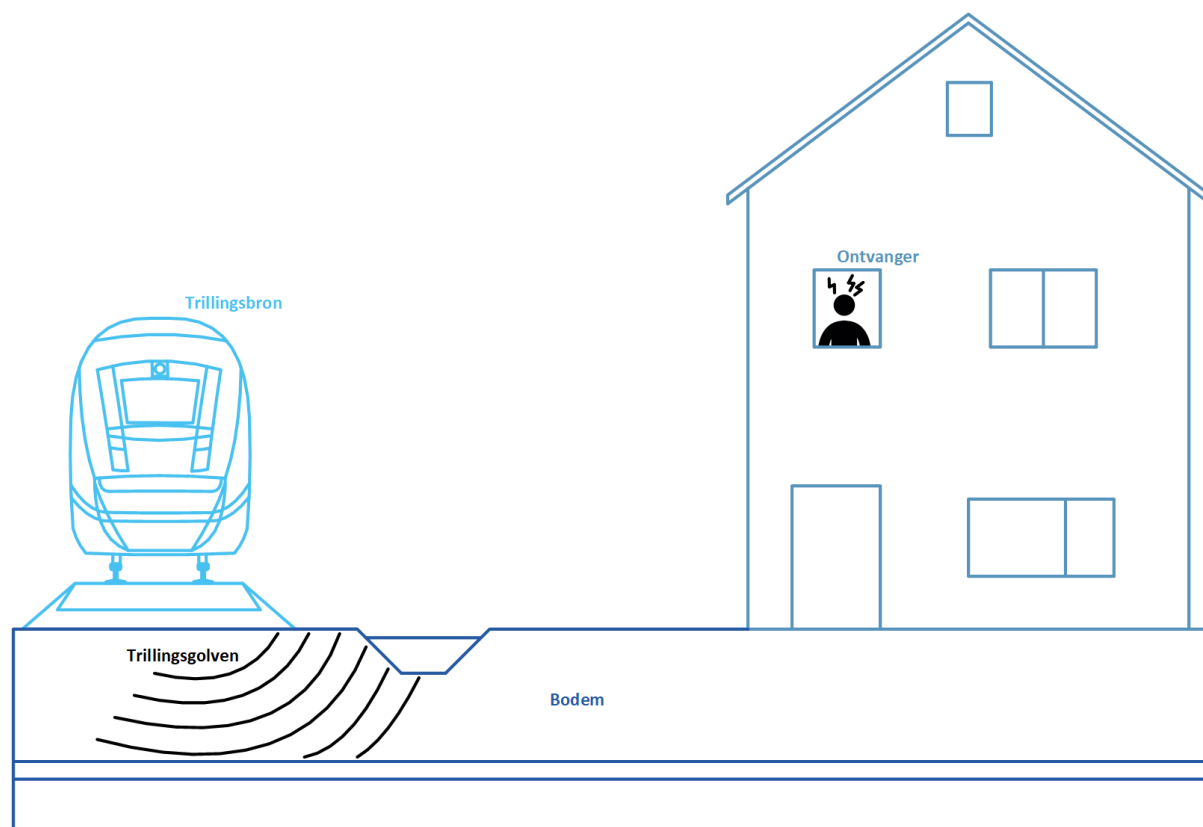
In de SBR-richtlijn deel B worden de trillingen beoordeeld in gebouwen. Omdat het bij dit project gaat om nog niet gerealiseerde gebouwen, wordt op basis van metingen aan bestaande bebouwing een berekening gemaakt van de verwachte trillingen in de geplande nieuwe bebouwing. Deze verwachte trillingen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

3.2.1 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 system van trillingsbron, de bodem als doorgeefmedium en het gebouw als ontvanger

3.2.2 De trillingsbron

In dit onderzoek zijn treinen de bron van de trillingen. De trillingen van het treinverkeer zijn gemeten door Alcedo op meerdere punten in de omgeving van het plangebied, onder meer aan de fundering van bestaande panden en op maaiveld. De beoordeling van de trillingen in de geplande bebouwing heeft plaatsgevonden op basis van deze metingen.

3.2.3 De bodem

De bodem op deze locatie bestaat hoofdzakelijk uit zand- en zwak lemige zandlagen met verschillende stijfheden, 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. Hierbij is rekening gehouden met het effect van de waterpartij tussen het spoor en de bebouwing, deze zorgt voor een sterkere afname van de trillingen (dus een gunstig effect op de bebouwing).

3.2.4 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 bouwgedrag 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 vergeleken met praktijkresultaten uit metingen. Een toelichting op het rekenmodel Buildyn is gegeven in bijlage II.

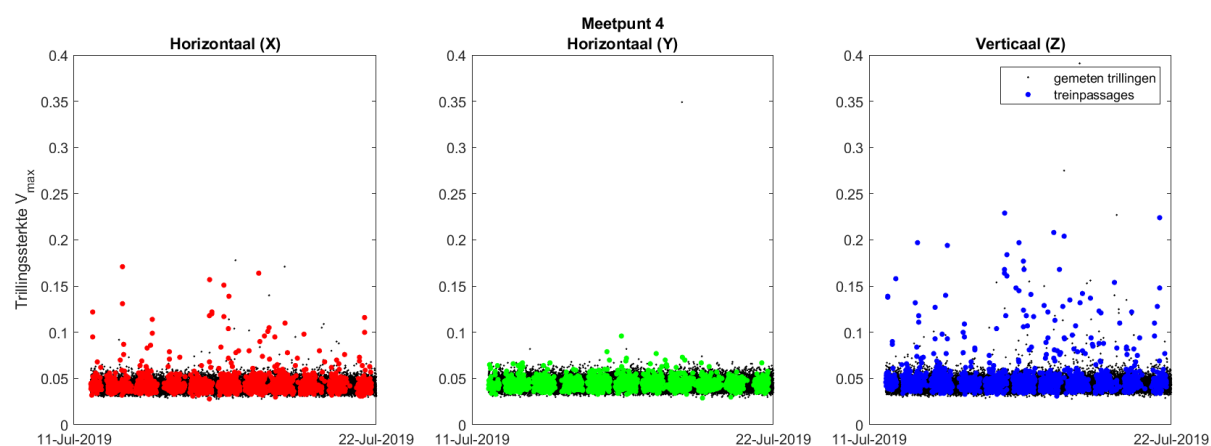
4 Verwachte trillingen in de woningen

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

4.1 Meetresultaten

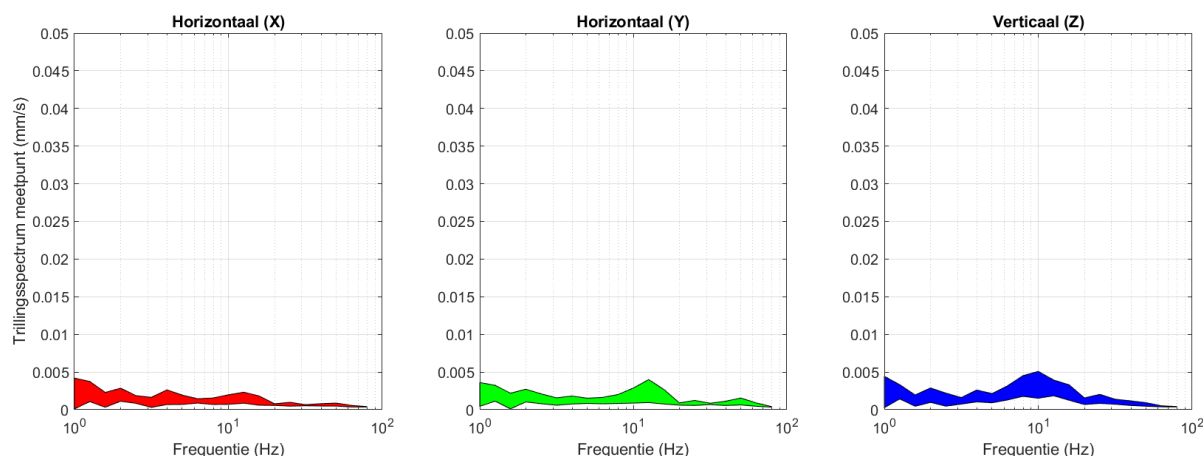
Alcedo heeft metingen uitgevoerd aan de fundering van panden in de nabijheid van de onderzoekslocatie (op afstanden die variëren van ca. 15 tot meer dan 100 meter van het spoor). De twee meest nabijgelegen meetpunten bij de meetlocatie (meetpunten 4 en 13, zie Figuur 3) zijn vooral gebruikt voor het huidige onderzoek. De trillingen op meetpunt 4 zijn weergegeven in Figuur 6, voor de overige meetpunten wordt verwezen naar het MER-rapport. In Figuur 6 valt het volgende op:

1. De trillingen zijn maatgevend in verticale richting, de hoogst gemeten waarde bedraagt ca. 0.23. In horizontale X-richting (loodrecht op het spoor) zijn de trillingen lager, ca. 0.17, en in de horizontale Y-richting (parallel aan het spoor) zijn de trillingen nog lager (ca. 0.10).
2. De hoogste trillingen worden veroorzaakt door goederentreinen, de trillingen van reizigerstreinen zijn niet of nauwelijks hoger dan de achtergrondtrillingen. Merk hierbij op dat dit een meetpunt is dat niet achter de waterpartij bij de Lichtpenweg is gelegen, waardoor de trillingen op dit meetpunt hoger zijn dan bij de geplande bebouwing.



Figuur 6 Gemeten trillingen op meetpunt 4 (fundering bestaand pand)

De frequentie-inhoud (spectrogram, weergegeven als 1/3-octafbandspectrum of tertsbandspectrum) van de trillingen op meetpunt 4 is weergegeven in Figuur 7. In deze figuur is zichtbaar dat de dominante frequentie van de trillingen rond 8 tot 12 Hz ligt, een gebruikelijke waarde voor dit type bodems. Voor goederentreinen (deels gemeten tijdens meetperiode zoals weergegeven in Figuur 7) geldt dat deze ook bij lagere frequenties (4 tot 8 Hz) hogere trillingen geven.



Figuur 7 Tertsbandspectra bij meetpunt 4

4.2 Trillingen in geplande nieuwbouw

De geplande gebouwen zijn gemodelleerd op basis van de input uit hoofdstuk 2. Het (frequentie-afhankelijke) gedrag van de gebouwen 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 woningen. De versterking van de trillingen tussen de fundering en een maatgevend punt op de hoogste verdieping van de toekomstige gebouwen ligt tussen de 1.5 en 3.1 voor blok A, en tussen de 1.5 en 2.2 voor blok B, en is onder meer afhankelijk van de trillingsfrequentie en trillingsrichting (X, Y of Z).

Met deze overdrachten is op basis van de metingen bepaald wat de verwachte trillingen zullen zijn in de woningen (resultaten zijn weergegeven voor appartementen op de hoogste verdieping, op lagere verdiepingen worden lagere trillingen verwacht). De resultaten voor de trillingssterkte V_{max} , de trillingsintensiteit V_{per} (in de toekomst, na de voorziene intensivering goederenvervoer, in de huidige situatie is deze waarde namelijk lager) en de beoordeling van de trillingen aan de SBR B-richtlijn (zie hoofdstuk 3) is weergegeven in Tabel 4. De weergegeven variatie in de trillingen geeft de onzekerheid weer als gevolg van de uiteindelijk gebruikte materialen en constructiemethode.

Tabel 4 Verwachte trillingen en beoordeling aan SBR B-richtlijn

Object	Trillingssterkte V_{max}	Trillingsintensiteit V_{per}	Beoordeling
Blok A	0.2 – 0.3	0.00 – 0.01	Voldoet
Blok B	0.3 – 0.4	0.01 – 0.02	Voldoet niet, incidentele overschrijdingen mogelijk

Globaal geldt het volgende:

1. De trillingen zijn relatief laag en voldoen in blok A aan de grenswaarden, in blok B zijn incidentele overschrijdingen mogelijk (maximaal 1 per week in de huidige situatie, na intensivering goederenvervoer maximaal 2 per week). In de huidige situatie passeren de meeste zware goederentreinen overdag (wanneer de grenswaarden soepeler zijn), maar na de in de NMCA voorziene intensivering van het goederenvervoer kunnen er meer treinen in de nacht passeren. In theorie is het mogelijk dat na intensivering van

het goederenvervoer ook in bouwblok A incidenteel (minder dan 1 keer per week) een overschrijding van de streefwaarden gaat optreden.

2. De lage trillingsintensiteit (tijdsgemiddelde van de trillingen) V_{per} laat zien dat er sprake is van incidentele overschrijdingen. Ook met de voorziene toename van het aantal goederentreinen voldoet V_{per} nog ruimschoots aan de streefwaarden (0.05 voor woningen).
3. De trillingen zijn wat hoger in blok B dan in blok A. Dat komt doordat blok A een zwaardere fundering heeft, verder van het spoor gelegen is en doordat de waterpartij voor blok A breder is en de trillingen daardoor sterker uitdempt.

4.3 Maatregelen

Door de passage van enkele goederentreinen met afwijkende trillingsniveaus, zijn incidentele overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder voor nieuwe situaties niet volledig uit te sluiten. Daarom hebben we een maatregelafweging uitgevoerd. Deze afweging beschrijven we in deze paragraaf.

Voor de afweging van maatregelen geeft bijlage 5 van de SBR B-richtlijn handvatten. Deze bijlage classificeert de trillingen in het plangebied 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 trillingsintensiteit V_{per} een goede indicatie is. Die is laag ($V_{per} < 0.02$, dus ruim lager dan de streefwaarde van 0.05). In de huidige situatie is er sprake van maximaal 1 overschrijding per week, in de toekomst kan dit aantal toenemen, maar ook met de voorziene intensivering van het goederenvervoer zal het aantal overschrijdingen beperkt blijven tot maximaal 2 per week in blok B, en minder dan 1 per week in blok A. Er is dus sprake van incidentele overschrijdingen, die het achterwege laten van een maatregel zouden kunnen rechtvaardigen.
2. De aanwezigheid van achtergrondtrillingen die de trillingen van het treinverkeer kunnen maskeren. Daar is hier geen sprake van.
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.

Omdat voorwaarde 2 niet van toepassing is, gaan we hierna in op maatregelen om de trillingen te reduceren. Om effectieve maatregelen te treffen, doen we eerst een nadere analyse van de verwachte trillingen. Zo stellen we 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.

4.3.1 Analyse resultaten

Om te bepalen welke trillingsrichting en trillingsfrequenties in de gebouwen maatgevend zijn, is een nadere analyse uitgevoerd van de verwachte trillingen. Uit deze analyse volgt dat de hoogste trillingen optreden in horizontale richting (in blok B loodrecht op het spoor,

de X-richting van de gebouwen), met name als gevolg van rotatie van het pand (hoogte en diepte van het pand vallen ongunstig samen met de trillingsgolven in de bodem). Bij blok A is dit minder aanwezig doordat dit gebouw anders is georiënteerd t.o.v. het spoor, door de zwaardere fundering en door de grotere hoogte.

In blok B zijn de trillingen daarom vooral hoog bij de rotatiefrequentie van het gebouw, rond 4 tot 5 Hz. Maatregelen die genomen worden moeten daarom vooral effectief zijn tegen deze trillingen. In de volgende subparagrafen wordt ingegaan op mogelijke maatregelen aan de trillingsbron, in de bodem of aan de gebouwen.

4.3.2 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), bijvoorbeeld door het stijver maken van de spoorconstructie of de onderbouw van het spoor. Deze maatregelen vallen echter buiten de scope van dit onderzoek, omdat deze maatregelen allemaal buiten het plangebied moeten worden getroffen. Bovendien brengen dergelijke maatregelen zeer hoge kosten met zich mee (o.a. door stagnatie van het treinverkeer gedurende langere tijd).

4.3.3 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. Omdat er al sprake is van een brede waterpartij, heeft een extra afscherming in de bodem geen significant effect. Bovendien zijn dergelijke maatregelen pas bij zeer grote afmetingen (lees: grote diepte, meer dan 25 meter) effectief tegen de zeer laagfrequente (en dus lange) trillingsgolven die voor de hoogste trillingen zorgen in blok B. Bovendien zijn deze maatregelen niet aanpasbaar aan toekomstige situaties.

Gezien de beperkte effectiviteit van deze maatregelen staan de kosten niet in relatie tot het effect van deze maatregelen, en nog veel minder in relatie tot het zeer beperkte aantal overschrijdingen. Maatregelen in de bodem zijn daarmee niet doelmatig.

4.3.4 Maatregelen aan de gebouwen

Bij maatregelen aan de gebouwen is een breed scala aan maatregelen mogelijk. Die variëren van het breder maken van de bouwblokken, het creëren van meer stijfheid in horizontale richting door extra betonnen dwarswanden aan te brengen tot het zwaarder maken van de fundering. Maatregelen zoals het afveren van de bebouwing zijn niet effectief tegen de laagfrequente trillingen die hier zijn gemeten.

Het globale effect en de kosten van de mogelijke maatregelen aan de woningen zijn weergegeven in Tabel 6. Overigens geldt voor al deze maatregelen dat deze in het huidige stadium van het project (Definitief Ontwerp) vrijwel niet meer zijn in te passen.

Tabel 5 Mogelijke maatregelen aan de gebouwen

Maatregel	Effect	Kosten ³
Stijvere constructie	0 – 10%	< 7% SK
Breder maken van bebouwing in dwarsrichting	5 – 15%	10 – 20% SK
Toepassen van dempende materialen	10 – 20%	< 5% SK
Ontkoppelen van de vloeren	0 %	2 – 4% SK
Ontkoppelen van de fundering (afveren)	0 %	4 – 6% SK
Inpakken van de fundering	0 %	1 – 3% SK
Zwaardere fundering	0 – 10%	2 – 4% SK

Omdat de bebouwing al relatief stijf is geconstrueerd, hebben veel ingrepen weinig effect. Zelfs met een combinatie van meerdere ingrepen is het niet mogelijk om met 100 procent zekerheid te voldoen aan de streefwaarden. Het gebruiken van meer dempende materialen (bijv. kalkzandsteen, of liever nog metselwerk) i.p.v. prefab beton heeft het meeste effect, maar ook hiervoor geldt dat de impact op het ontwerp en het realisatieproces groot is, en het effect heel beperkt.

Gezien het beperkte effect van maatregelen (i.r.t. kosten en impact op realisatieproces) worden maatregelen aan de bebouwing niet doelmatig geacht in het licht van de hooguit incidentele overschrijdingen.

4.3.5 Afweging van maatregelen

Door de passage van enkele goederentreinen met afwijkende trillingsniveaus, zijn incidentele overschrijdingen van de streefwaarden voor trillingshinder voor nieuwe situaties niet uit te sluiten in blok B. Het gaat om maximaal 1 overschrijding per week, door de voorziene toename van het goederenvervoer op deze lijn kan dit aantal in de toekomst toenemen, maar ook dan zal het aantal overschrijdingen beperkt blijven tot maximaal 2 per week.

Omdat er sprake is van overschrijdingen (hoewel incidenteel), is op basis van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn een maatregelafweging uitgevoerd. Hieruit volgt dat maatregelen aan het spoor niet mogelijk zijn (vallen buiten het onderzoeksgebied, hoge kosten), dat maatregelen in de bodem niet effectief zijn (omdat de waterpartij tussen het spoor en de bebouwing de trillingen al grotendeels afschermt) en dat maatregelen aan de bebouwing vrijwel geen effect hebben. Het stijver maken van de constructie van blok B, het verzwaren van de fundering of het toepassen van meer dempende materialen reduceert de trillingen wel iets, maar ook met deze maatregelen wordt nog niet met zekerheid voldaan aan de streefwaarden. Bovendien is de impact op het ontwerp en het realisatieproces groot. Daarom worden deze maatregelen niet doelmatig geacht in het licht van het beperkte aantal overschrijdingen.

Gezien het feit dat het gaat om incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader, (maximaal 1 per week) en dat wel ruim wordt voldaan aan de soepeler streefwaarden voor

³ SK = Stichtingskosten

een bestaande situatie uit de SBR B-richtlijn, ontstaat in het licht van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn ook zonder maatregelen tegen trillingen geen onacceptabele situatie in de geplande bebouwing.

4.3.6 Onzekerheden in het onderzoek

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

1. Ten aanzien van de trillingsbron: de natuurlijke variatie als gevolg van spooronderhoud en de temperatuur kan 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. Er is op basis van bovenstaande informatie geen reden om te twijfelen aan de representativiteit van de berekeningen voor de toekomstige trillingen.
2. 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. Omdat ook op grotere afstand van het spoor is gemeten, is de invloed van die lokale variaties beperkt.
3. Ten aanzien van de gebouwen geldt dat er altijd verschillen zijn tussen het beoogde ontwerp en het gerealiseerde ontwerp (verschillen tussen as-built en definitief ontwerp). Bovendien is 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 geven geen aanleiding tot een andere maatregelafweging.

5 Conclusies en aanbevelingen

In het voorliggende onderzoek zijn de verwachte trillingen in nieuw te bouwen appartementengebouwen aan de Lichtpenweg in Amersfoort bepaald. Uit het onderzoek volgt dat incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader in het kleinste bouwblok (blok B, dichtst bij het spoor) niet zijn uit te sluiten. Het gaat om maximaal 1 overschrijding per week, veroorzaakt door goederentreinen met een afwijkend trillingsniveau. Omdat niet volledig wordt voldaan aan het beoordelingskader, is een maatregelafweging uitgevoerd. Hieruit volgt dat:

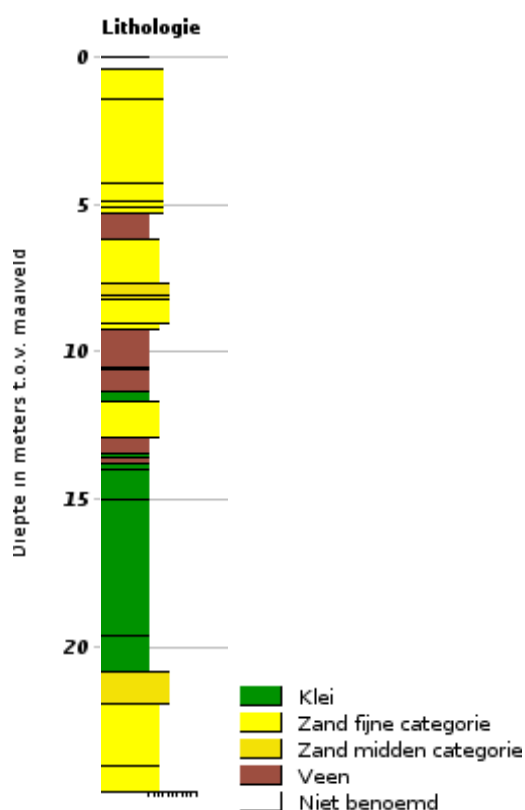
1. Maatregelen aan het spoor gezien de hoge kosten niet doelmatig zijn. Bovendien vallen deze maatregelen buiten het plangebied.
2. Maatregelen in de bodem gezien de waterpartij tussen het spoor en de bebouwing, die de trillingen al grotendeels afschermt, niet effectief en dus niet doelmatig zijn.
3. Maatregelen aan de bebouwing gezien de al relatief stijve bebouwing weinig effect hebben. Het stijver maken van de constructie van blok B, het verzwaren van de fundering of het toepassen van meer dempende materialen reduceert de trillingen wel iets, maar ook met deze maatregelen wordt nog niet met zekerheid voldaan aan de streefwaarden. Bovendien is de impact op het ontwerp en het realisatieproces groot. Daarom worden deze maatregelen niet doelmatig geacht in het licht van het beperkte aantal overschrijdingen.

Gezien bovenstaande afwegingen zijn er geen effectieve en doelmatige maatregelen te treffen om de trillingen te reduceren. Omdat het gaat om incidentele overschrijdingen van het beoordelingskader (maximaal 1 per week, na intensivering van het goederenvervoer maximaal 2 per week) en dat wel ruim wordt voldaan aan de soepeler streefwaarden voor een bestaande situatie uit de SBR B-richtlijn, ontstaat in het licht van bijlage 5 van de SBR B-richtlijn ook zonder maatregelen tegen trillingen geen onacceptabele situatie in de geplande bebouwing.

Bijlage Geotechnisch bodemonderzoek

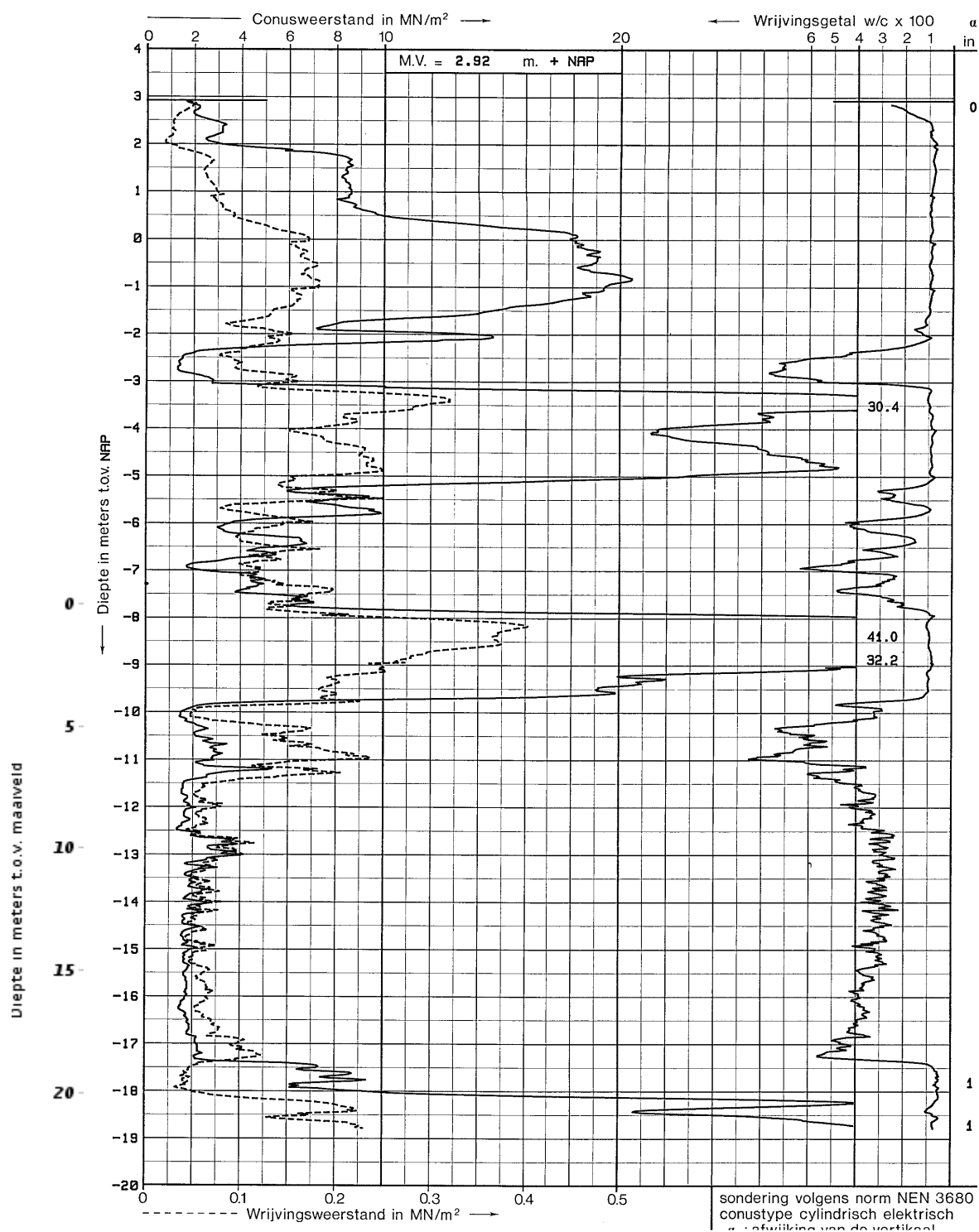
Deze bijlage bevat geotechnische achtergrondinformatie. Deze informatie is gebruikt om bijvoorbeeld de uitdemping van de trillingen met de afstand te bepalen. Daarnaast is deze informatie gebruikt in het rekenmodel waarmee de dynamische eigenschappen van de bebouwing worden bepaald.

Een boring in het onderzoeksgebied (nr. B32B0558) is weergegeven in Figuur 9. Hier is te zien dat de bodem voornamelijk is opgebouwd uit zandlagen, op grotere diepte komen ook klei- en veenlagen voor. Met name door de aanwezigheid van zand in de toplagen dempen de trillingen slecht uit met de afstand.

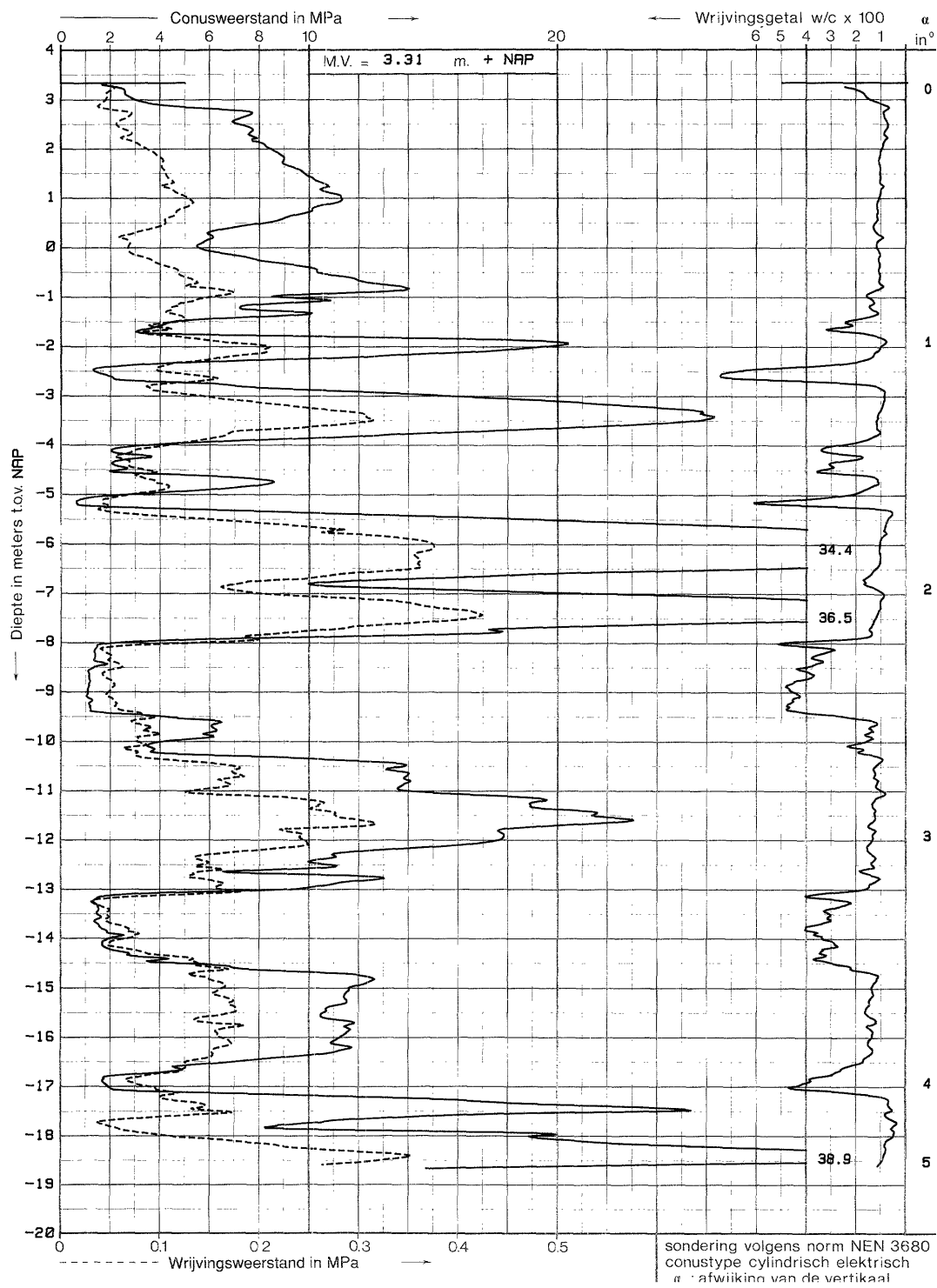


Figuur 8 Boring nabij het onderzoeksgebied, B32B0558

Twee representatieve sonderingen uit het onderzoeksgebied, waarin de gelaagde bodemopbouw ook goed zichtbaar is, zijn weergegeven in Figuur 10 en Figuur 11.



Figuur 9 Sondering nabij het onderzoeksgebied, S32B00471

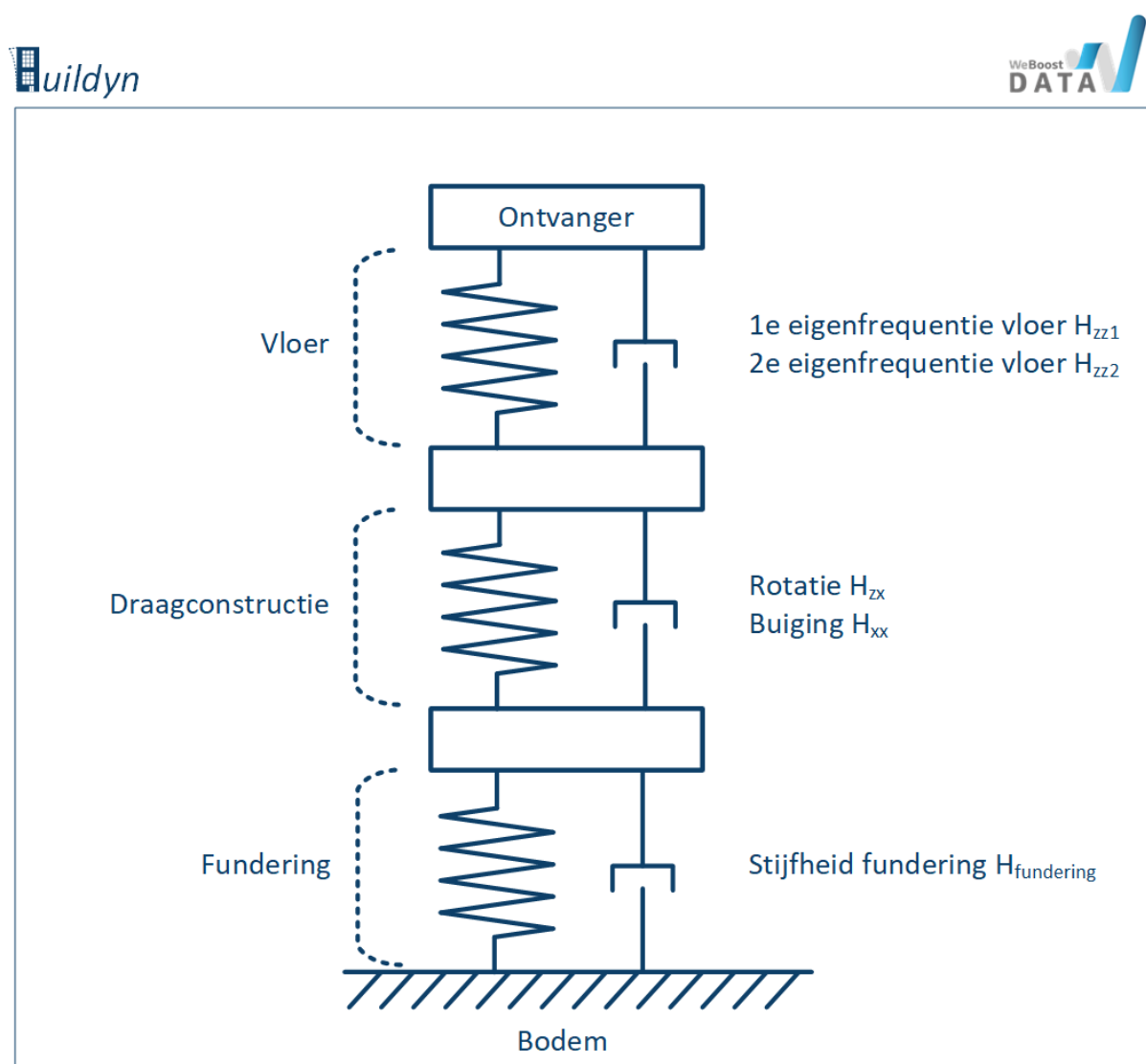


Figuur 10 Sondering nabij het onderzoeksgebied, S32B00478

Bijlage Rekenmodel Buildyn

In dit rapport is gebruik gemaakt van het door We-Boost Data ontwikkelde 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. De resultaten van het model zijn geijkt met praktijkresultaten uit ruim 200 metingen in gebouwen. Dit model bestaat uit een aantal modules, deze worden in deze bijlage kort toegelicht.

In Buildyn wordt een gebouw gemodelleerd door middel van gekoppelde massa-veersystemen, zie Figuur 12. De verschillende componenten van het model, zoals weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 12, worden in deze bijlage nader toegelicht.



Figuur 11 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)
- Afmetingen en gewicht van het gebouw
- Bodem waarop het gebouw staat

Met name boven de 10 Hz kunnen trillingen worden uitgedempt door de fundering.

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 de draagconstructie

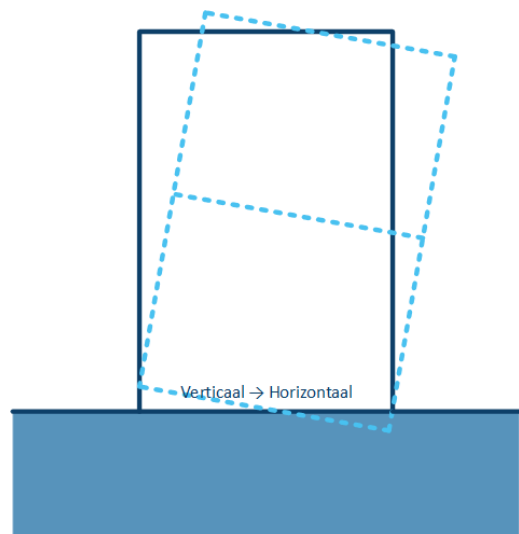
Draagconstructie

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) en doorbuiging een rol spelen.

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 wordt in Buildyn weergegeven als H_{zx} , en is afhankelijk van:

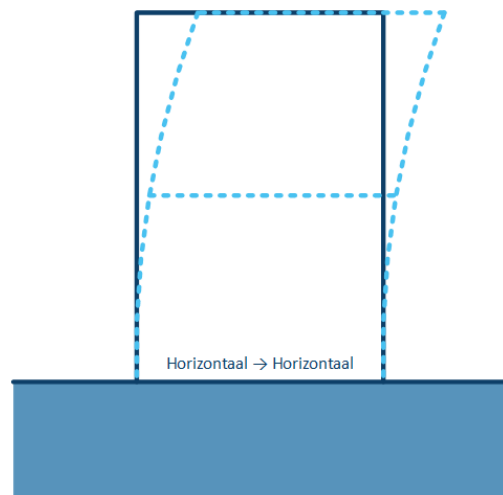
- Afmetingen van het gebouw (breedte, lengte, hoogte)
- Gewicht van het gebouw
- Type en gewicht van de fundering
- Stijfheid van de ondergrond



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 wordt in Buildyn weergegeven als H_{xx} , en is afhankelijk van:

- Afmetingen van het gebouw (breedte, lengte, hoogte)



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

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.

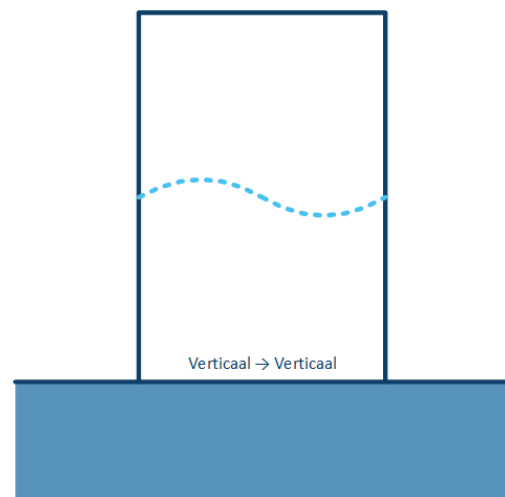
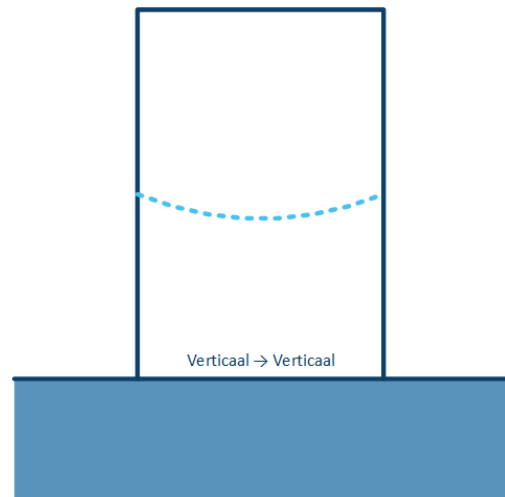
De eerste buigmodus van de vloer (bij de eerste eigenfrequentie) is simpele doorbuiging, zoals weergegeven in de principeschets rechts. Met name de eigenfrequentie (de frequentie waarvoor de vloer gevoelig is) en de damping bepalen in hoeverre de trillingen worden opgeslingerd. De trillingen zijn het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

Dit effect wordt in Buildyn weergegeven als H_{zz1} , en is afhankelijk van:

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

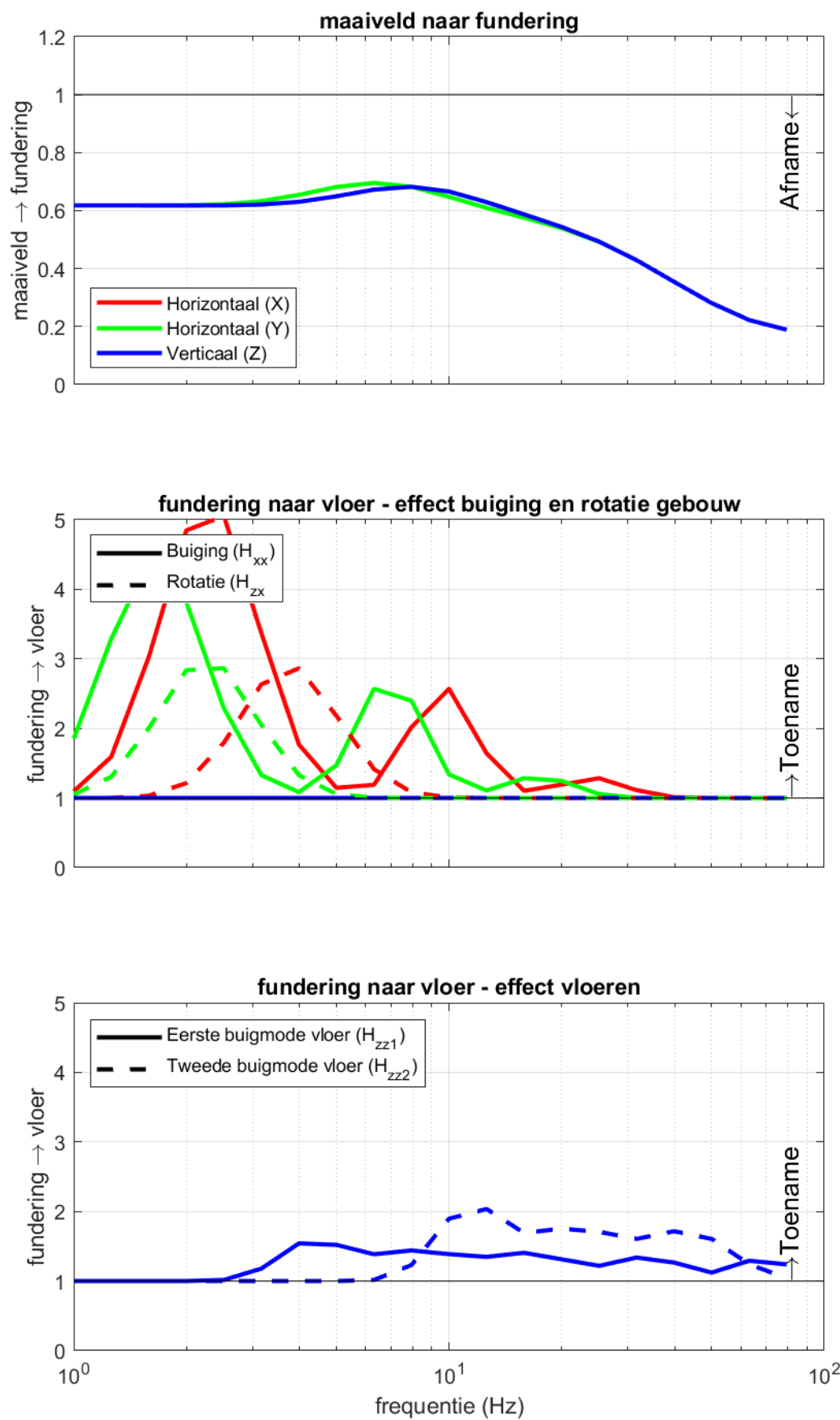
Bij de tweede buigmodus van de vloer (bij de tweede eigenfrequentie) zijn de trillingen maximaal op ongeveer $\frac{1}{4}$ van het vloerveld, zie de principeschets rechts.

Dit effect wordt in Buildyn weergegeven als H_{zz2} , en is afhankelijk van dezelfde parameters als H_{zz1} .

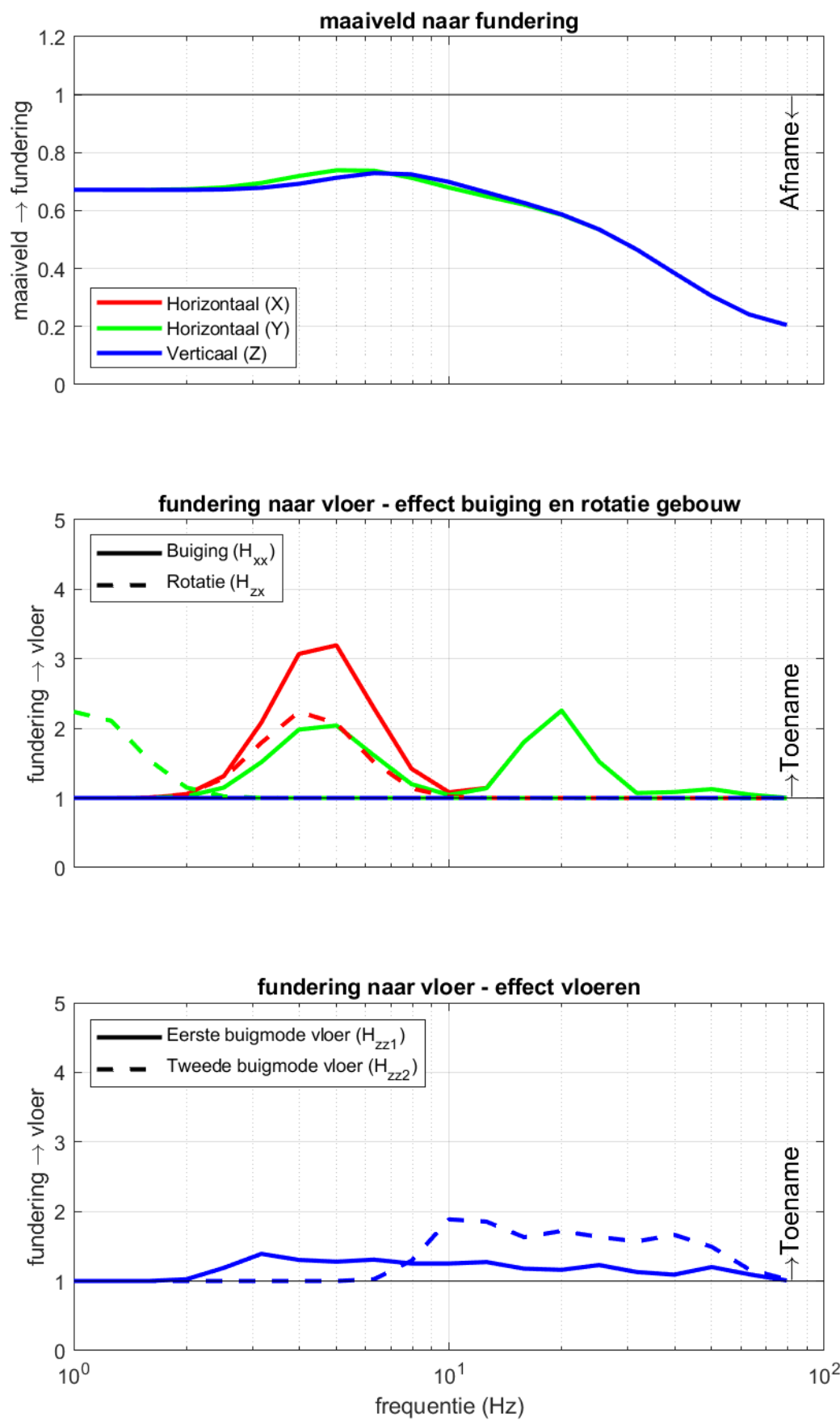


Resultaten

De resultaten uit de Buildyn-berekeningen voor blok A en blok B, zijn weergegeven in Figuur 13 resp. Figuur 14.



Figuur 12 Buildyn-resultaten voor bouwblok A



Figuur 13 Buildyn-resultaten voor bouwblok B