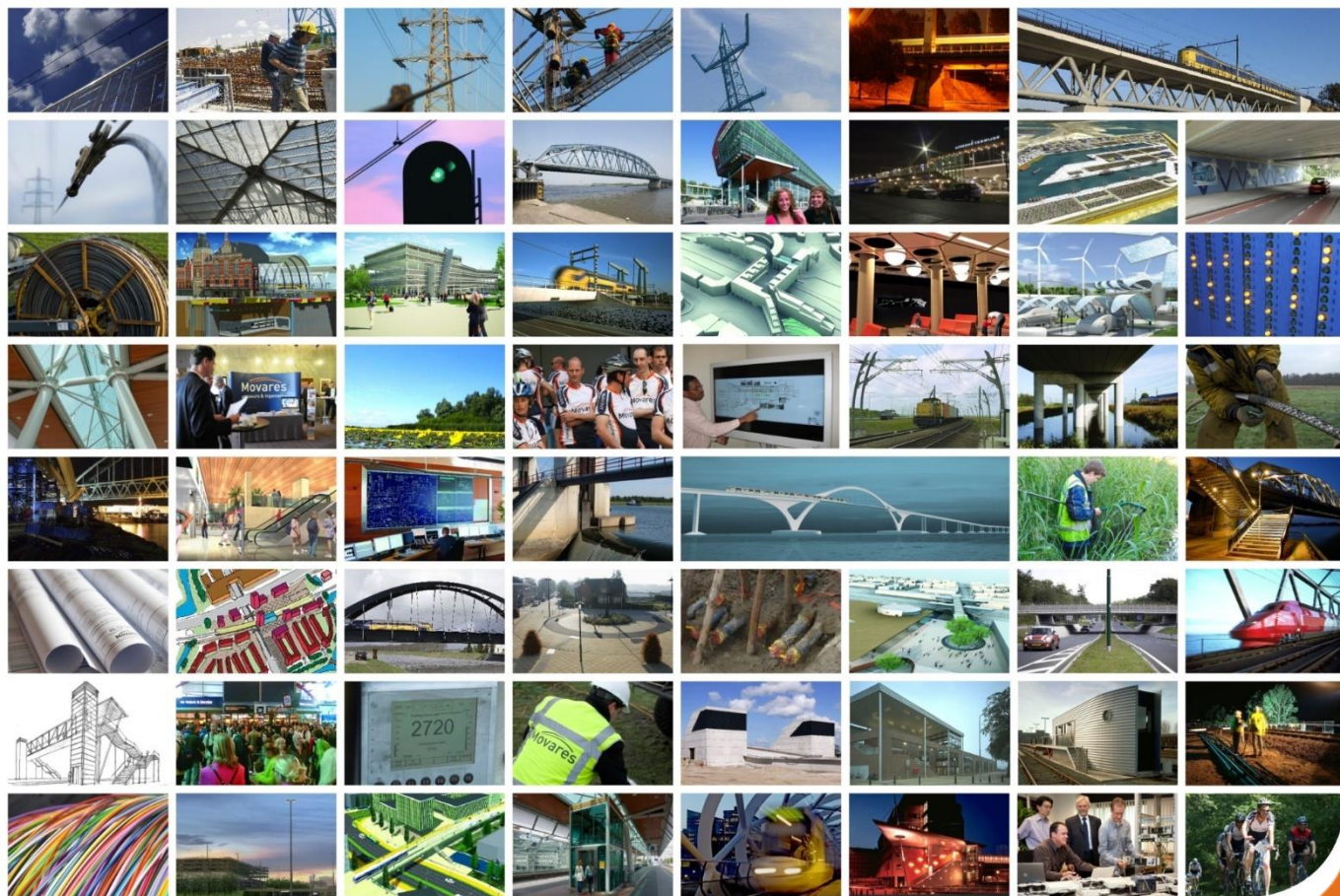


Trillingsonderzoek ENKA-terrein Ede

Trillingsonderzoek met behulp van dynamische rekenmodellen



2 juni 2020 - Versie 1.0

Autorisatieblad

Trillingsonderzoek ENKA-terrein Ede

Trillingsonderzoek met behulp van dynamische rekenmodellen

	Naam	Akkoord	Datum
Opgesteld door	Gasparotto, K	✓	2-06-2020
Gecontroleerd door	Gardien, W	✓	2-06-2020
Vrijgegeven door	Wijnands, MNJH	✓	2-06-2020

Op dit autorisatieblad ontbreken de handtekeningen wegens de digitale verwerking van ons vrijgaveproces. Dit rapport is aantoonbaar vrijgegeven.

Versie historie

Versie	Naam	Datum	Korte toelichting
0.1	Kareen Gasparotto	29-11-2019	Intern concept
0.2	Wybo Gardien	29-11-2019	Interne controle door Wybo Gardien
0.3	Kareen Gasparotto	10-4-2020	Aanpassing aan de hand van ontwerp maart 2020
0.4	Wybo Gardien	16-4-2020	Interne controle door Wybo Gardien
0.5	Kareen Gasparotto	29-5-2020	Aanpassing naar aanleiding commentaar klant

Samenvatting

AM ontwikkelt in Ede woningbouw op een aantal percelen. Dit gebied ligt langs de spoorlijn Ede – Arnhem, dichtbij station Ede-Wageningen. Op basis van de afstand tot het spoor en het spoorgebruik is trillingshinder in de woningen niet op voorhand uit te sluiten.

Movares heeft in opdracht van AM een trillingsonderzoek in 2018 uitgevoerd. De conclusie van het onderzoek was: ‘Op basis van de resultaten van dit onderzoek kan in een aantal bouwblokken dichtbij het spoor in veld H een overschrijding van de (streng) streefwaarden voor een nieuwe situatie niet worden uitgesloten, ook bij een goede bouwwijze’.

Nu heeft AM aan Movares om een vervolgonderzoek uit te voeren met behulp van een eindige elementen model (FEM) van de gebouwen.

In dit onderzoek zijn berekeningen uitgevoerd om de verwachten trillingsniveaus in nieuw te bouwen woningen in de ENKA-terrein in Ede te bepalen op basis van het ontwerp van MIX Architectuur¹. Deze verwachte waarden zijn getoetst aan de streefwaarden voor nieuwbouw uit de SBR-B-richtlijn. Bij de prognose is gebruik gemaakt van dynamische FEM modellen van de gebouwblokken H2A, H2B, H2C en H4D, H4E en H4F. Gezien het feit dat blok H2C gelijk aan de blok H4D is en ook blok H2B gelijk aan blok H4E is, worden 4 modellen verder in de analyse beschouwd: H2A, H2B, H2C en H4F.

De uitgevoerde simulaties leiden tot de volgende conclusies:

- In de referentiesituatie zonder maatregelen is de trillingssterkte hoger dan de streefwaarden voor nieuwe en bestaande situaties;
- De maatregelen hebben voor verschillende gebouwen de volgende effecten:
 - Gebouw H2A
 - Afveren met rubber (op 7 Hz) van het gebouw is een effectieve maatregel. Er zijn echter nog wel overschrijdingen voor nieuwe situaties in de nachtperiode.
 - Het weglaten van de opvulling met zand leidt tot een toename van de horizontale trillingen, en meer overschrijdingen op vooral de lagere verdiepingen.
 - Het weghalen van een verdieping leidt niet tot een significant verschil. Er is een beperkte toename van het maximale trillingsniveau in het gebouw.
 - Gebouw H2B / H4E
 - Afveren met rubber (op 8 Hz) van het gebouw is een effectieve maatregel. Er zijn geen overschrijdingen van de streefwaarden voor nieuwe situaties.
 - Gebouw H2C / H4D
 - Afveren met rubber (op 7 Hz) van het gebouw is een effectieve maatregel. Er zijn geen overschrijdingen van de streefwaarden voor nieuwe situaties.

¹ EDE ENKA GEBOUWENSEMBLE H2-H4, MIX ARCHITECTUUR, wijzigingen t.o.v. SO 9 oktober 2019 – 05 maart 2020, 5 maart 2020

- Afveren met rubber (op 8 Hz) van het gebouw leidt slechts tot een zeer beperkte trillingsreductie, en is geen effectieve maatregel.
- Gebouw H4F
 - Afveren met rubber (op 7 Hz) van het gebouw is een effectieve maatregel. Er zijn geen overschrijdingen van de streefwaarden voor nieuwe situaties.
 - Afveren met rubber (op 8 Hz) van het gebouw is een effectieve maatregel. Er zijn echter nog wel overschrijdingen voor nieuwe situaties in de nachtperiode.
- In bepaalde situaties, zijn er alleen nog overschrijdingen van de streefwaarden voor nieuwe situaties in de nachtperiode, maar zijn de trillingen wel lager dan de streefwaarden voor de dagperiode. Dit geldt voor gebouw H2A (afgeveerd op 7 Hz), gebouw H2C / H4D (indien zonder aanvullende maatregelen of afgeveerd op 8 Hz) en gebouw H4F (indien afgeveerd op 8 Hz). Het aantal te verwachten overschrijdingen van de streefwaarden voor nieuwe situaties in de nachtperiode zal zeer beperkt zijn (hooguit enkele per week).
- Verder treden de hoogste niveaus in gebouw H2A niet op dicht bij de spoorlijn, maar boven de kolommenstructuur in het midden van het gebouw. Naar verwachting zullen de niveaus verder dalen als de afvering in meer detail op de juiste positie wordt opgenomen in het model. De inschatting is dat de trillingen dan lager zijn dan de streefwaarden voor nieuwe situaties.

Inhoudsopgave

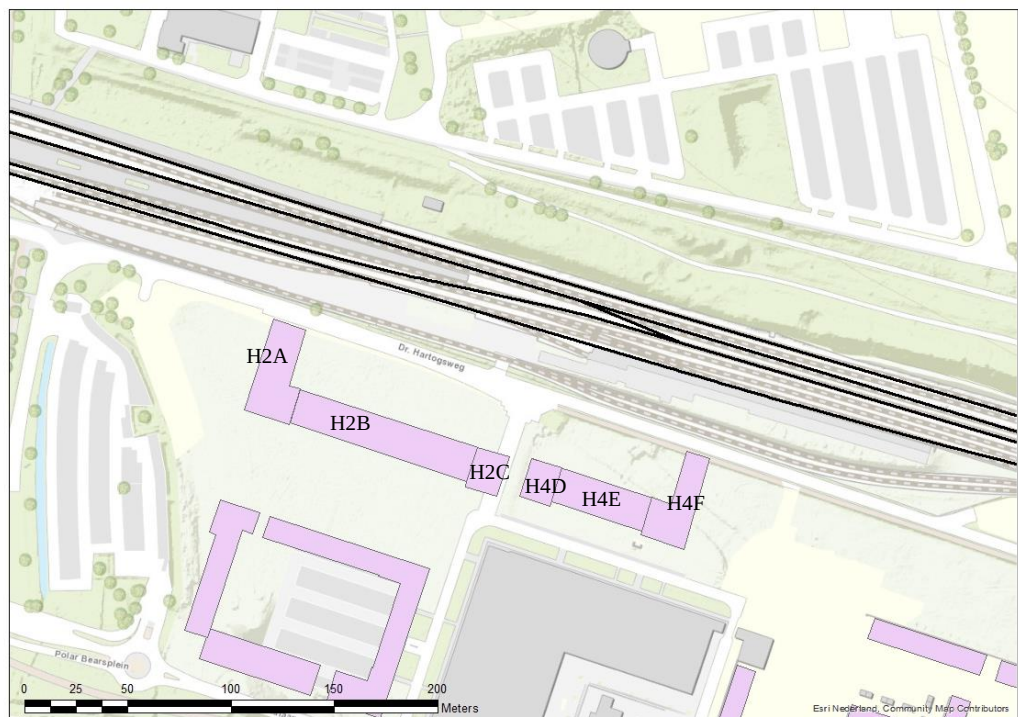
Samenvatting	1
1 Inleiding	4
1.1 Aanleiding	4
1.2 Doel	4
1.3 Aanpak	5
1.4 Leeswijzer	5
2 Situatiebeschrijving en uitgangspunten	6
2.1 Inleiding	6
2.2 Omgeving	6
2.3 Bouwlocatie	6
2.4 Geplande bebouwing	8
3 Beoordelingskader	9
3.1 Algemeen	9
3.2 Grootheden	9
3.3 Streefwaarden	9
3.3.1. <i>Nieuwe of bestaande situatie</i>	10
3.3.2. <i>Periode gedurende de dag</i>	10
3.3.3. <i>Gebouwfunctie</i>	10
3.4 Beoordeling in huidige onderzoek	11
4 Meetresultaten	12
4.1 Inleiding	12
4.2 Meetresultaten	12
5 Analyse en berekeningen	14
5.1 Prognosemethode	14
5.1.1. <i>Overdracht tussen meetpunten</i>	14
5.1.2. <i>Overdracht van maaiveld naar fundering</i>	15
5.1.3. <i>Overdracht van fundering naar midden vloerveld</i>	15
5.2 Resultaten	15
5.2.1. <i>Prognose trillingen in gebouwen</i>	15
5.2.2. <i>Verwachting en bovengrens van trillingen in gebouwen</i>	17
5.3 Betrouwbaarheid	17
5.4 Voorkomen van trillingshinder	17
5.4.1. <i>Afweging</i>	17
5.4.2. <i>Aanvullende maatregelen</i>	18
6 Conclusies en aanbevelingen	24
Colofon	26
Bijlage I – Eindige elementen modellen	27

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

AM ontwikkelt in Ede woningbouw op een aantal percelen. Dit gebied ligt langs de spoorlijn Ede – Arnhem, dichtbij station Ede-Wageningen. Op basis van de afstand tot het spoor en het spoorgebruik is trillingshinder in de woningen niet op voorhand uit te sluiten. Daarom is een indicatief onderzoek gedaan door Movares².

Dit rapport behandelt de trillingen in bouwblok H³. Van alle bouwblokken op het terrein bevindt dit bouwblok zich het dichtst bij de spoorlijn. Ten opzichte van het indicatieve onderzoek is de situatie gewijzigd, en reikt bouwblok H aan de oostzijde net zo dicht bij de spoorlijn als aan de westzijde. Naar aanleiding van het advies uit het indicatieve onderzoek, wordt in dit onderzoek meer in detail ingegaan op de bouwblokken H2A, H2B, H2C, H4D, H4E en H4F.



Figuur 1-1: Plangebied nieuwbouw ENKA-terrein

1.2 Doel

U heeft ons gevraagd om een trillingsonderzoek met behulp van eindige elementenberekeningen uit te voeren. Waarbij we de volgende vragen dienen te beantwoorden:

- Hoe beoordelen wij de trillingen in vergelijking tot de streefwaarden uit de SBR-B richtlijn?

² Trillingsonderzoek ENKA-terrein Ede, Movares, D79-MKA-KA-1800197, 25 oktober 2018

³ EDE ENKA GEBOUWENSEMBLE H2-H4, MIX ARCHITECTUUR, wijzigingen t.o.v. SO 9 oktober 2019 – 05 maart 2020, 5 maart 2020

- Zijn er maatregelen noodzakelijk en mogelijk om een acceptabel woonklimaat te garanderen?
- Zo ja: welk type maatregelen zijn dat?
 - Kunnen de trillingen gereduceerd worden door het toevoegen van extra betonnen wanden?
 - Kunnen de trillingen gereduceerd worden door het vervangen van kanaalplaatvoeren door massieve betonvloeren?
 - Voor welke delen van het gebouw zijn deze constructieve maatregelen mogelijk en nodig?
 - Voor welke delen van het gebouw is het nodig de fundering te ontkoppelen van het gebouw?
- Welk effect hebben de maatregelen op het trillingsniveau?

1.3 Aanpak

Trillingen van spoorverkeer zijn locatiespecifiek. Wij hebben daarom de volgende aanpak gevolgd:

1. Uitvoeren van een trillingsmeting ter plaatse van het plangebied. Deze meting bestaat uit twee onderdelen:
 - a. Meting waarmee wij de uitdamping van de trillingen met de afstand vaststellen (hoe verder van het spoor, hoe lager de trillingen). Deze meting heeft een beperkte meetduur van enkele uren, voldoende om de eigenschappen van de bodem en de uitdamping met de afstand vast te stellen.
 - b. Meting waarmee wij over langere tijd (1 week) de trillingen vaststellen. Het grillige karakter van goederentreinen (grote variatie in passeertijd, zwaarte, etc.) maakt een meetduur van een week wenselijk.
Deze metingen zijn reeds uitgevoerd bij het eerder uitgevoerde trillingsonderzoek door Movares.
2. Het maken van een prognose van de trillingsniveaus in de geplande woningen, op basis van de door u opgegeven eigenschappen van de geplande woningen. De woningen worden ten behoeve van deze prognose doorgerekend met dynamische eindige elementen berekeningen.

1.4 Leeswijzer

De situatiebeschrijving is weergegeven in hoofdstuk 2. Het beoordelingskader voor trillingshinder staat beschreven in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 zijn de meetresultaten weergegeven. Hoofdstuk 5 bevat een analyse van de meetresultaten en advies t.a.v. (bouwkundige) optimalisaties om trillingshinder te voorkomen. In hoofdstuk 6 is het effect van een aantal maatregelen kwantitatief beschouwd. Het laatste hoofdstuk beschrijft de conclusies.

2 Situatiebeschrijving en uitgangspunten

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk bevat een beschrijving van de meetlocatie en de uitgangspunten voor het onderzoek.

2.2 Omgeving

De onderzoekslocatie bevindt zich ten zuiden van de spoorlijn Ede-Wageningen – Arnhem, zie Figuur 1-1. De spoorlijn wordt zowel door reizigers- als door goederenverkeer gebruikt. De sporenlay-out wordt in de toekomst gewijzigd, zie Figuur 1-1, in het kader van het project Spoorzone Ede. De toekomstige sporenlay-out wordt gebruikt voor de trillingsprognose van de woningen, omdat deze situatie al juridisch is vastgelegd in een onherroepelijk bestemmingsplan. De kortste afstand van woningen tot het spoor is daarmee ca. 36 meter (bouwblok H).

De rijksnelheden van het treinverkeer zijn weergegeven in Tabel 2-1, en gebaseerd op gegevens uit het *Geluidregister Spoor* en het trillingsonderzoek ten behoeve van *Ede Spoorzone*.

Tabel 2-1 *Rijksnelheden treinverkeer*

Corridor	Type trein	Snelheid
Ede-Wageningen – Arnhem	Doorgaande reizigerstreinen (ICE)	140 km/h
Ede-Wageningen – Arnhem	Stoppende reizigerstreinen (IC en SPR)	0 tot 100 km/h
Ede-Wageningen – Arnhem	Goederentreinen	90 km/h

Het aantal treinen gedurende dag, avond en nacht is weergegeven in Tabel 2-2. De intensiteiten zijn gebaseerd op het trillingsonderzoek zoals uitgevoerd ten behoeve van *Ede Spoorzone*.

Tabel 2-2 *Intensiteiten treinverkeer per uur per richting*

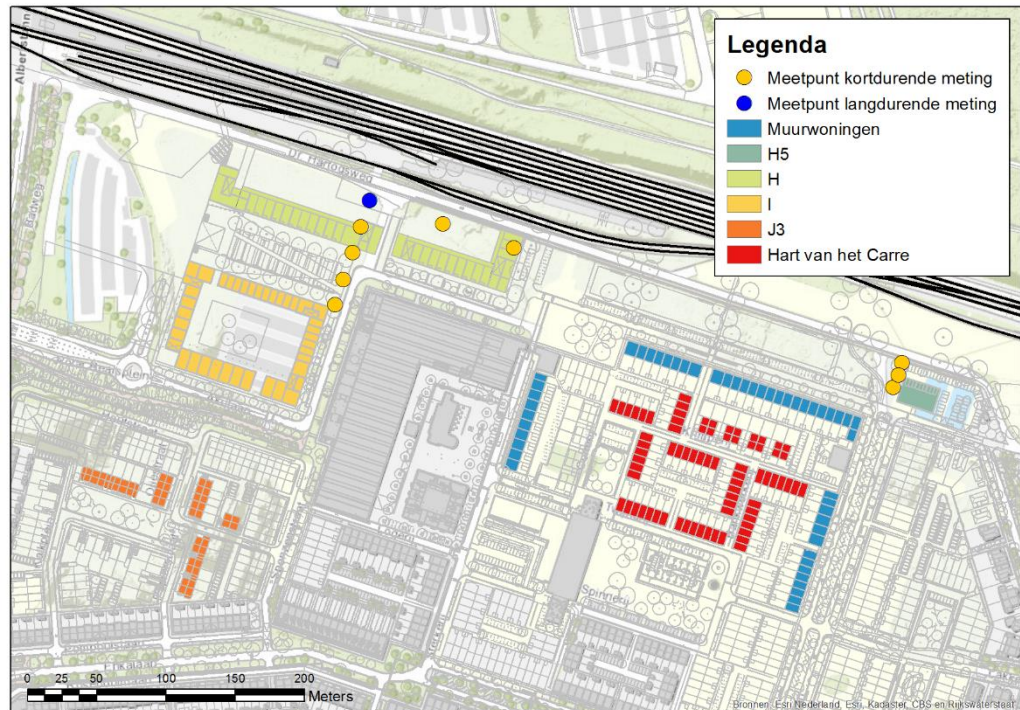
Treintype en verbinding	Dag (7:00 – 19:00)	Avond (19:00 – 23:00)	Nacht (23:00 – 7:00)
Intercity Utrecht – Arnhem v.v.	6.00	6.00	1.93
ICE Utrecht – Arnhem v.v.	1.00	1.00	0.32
Sprinter Ede-Wageningen Arnhem v.v.	2.00	2.00	0.64
Goederen Utrecht – Arnhem v.v.	0.07	0.08	0.05

Nabij het onderzoeksgebied bevinden zich geen andere trillingsbronnen met een waarneembare trillingssterkte. Andere bronnen zijn daarom niet meegenomen in dit onderzoek.

2.3 Bouwlocatie

De metingen zijn uitgevoerd op maaiveldniveau op de locatie van de geplande nieuwbouw. De te bouwen panden liggen op een afstand vanaf zo'n 39 meter tot het dichtstbijzijnde hoofdspoor. Het spoor ligt hier op maaiveldniveau. Een plattegrond van de locatie met daarop de meetlocaties is weergegeven in Figuur 2-1. Op deze locatie zijn twee metingen uitgevoerd op maaiveld: een onbemande langdurende meting met één meetpunt en een bemande kortdurende meting met tien meetpunten op meerdere locaties. Het meetpunt voor de langdurende meting is ook tijdens de

kortdurende meting gebruikt. Een foto van de meetopstelling is weergegeven in Figuur 2-2.



Figuur 2-1 Locatie van de meetlocatie met de meetpunten (figuur overgenomen uit trillingsonderzoek 2018⁴).



Figuur 2-2 Foto van de meetopstelling van de langeduurmeting

⁴ Trillingsonderzoek ENKA-terrein Ede, Movares, D79-MKA-KA-1800197, 25 oktober 2018

2.4 Geplande bebouwing

De eigenschappen van de toekomstige bebouwing zijn bekend. In dit onderzoek is gerekend met de eigenschappen zoals opgenomen in Tabel 2-3.

Tabel 2-3 Eigenschappen bebouwing

Nr	Naam	Type gebouw	Type constructie	Hoogte	Beukmaat	Vloertype
1	H2A	Appartementen	Tunnelbouw	22.5	5.4	Massief beton (tunnelbouw), Breedplaten (kelderdek) en Kanaalplaten (als BG vloer als er geen kelder aanwezig is) en breedplaten
2	H2B	Appartementen	Tunnelbouw	18	6.9	Massief beton (tunnelbouw), Breedplaten (kelderdek) en Kanaalplaten (als BG vloer als er geen kelder aanwezig is) en breedplaten
3	H2C	Appartementen	Tunnelbouw	21	6.9	Massief beton (tunnelbouw), Breedplaten (kelderdek) en Kanaalplaten (als BG vloer als er geen kelder aanwezig is) en breedplaten
4	H4D	Appartementen	Tunnelbouw	21	6.9	Massief beton (tunnelbouw), Breedplaten (kelderdek) en Kanaalplaten (als BG vloer als er geen kelder aanwezig is) en breedplaten
5	H4E	Appartementen	Tunnelbouw	18	6.9	Massief beton (tunnelbouw), Breedplaten (kelderdek) en Kanaalplaten (als BG vloer als er geen kelder aanwezig is) en breedplaten
6	H4F	Appartementen	Tunnelbouw	18	6.9	Massief beton (tunnelbouw), Breedplaten (kelderdek) en Kanaalplaten (als BG vloer als er geen kelder aanwezig is) en breedplaten

Gezien het feit dat blok H2C gelijk is aan de blok H4D is en ook blok H2B gelijk is aan de blok H4E, worden voor de analyse 4 modellen opgesteld: H2A, H2B, H2C en H4F. De resultaten voor gebouw H2C zijn ook van toepassing op gebouw H4D, en de resultaten voor gebouw H2B zijn ook van toepassing op gebouw H2E.

De technische gegevens van alle bouwblokken zijn in het rapport “Ontwerpnota constructie AO” weergegeven⁵. Verder zijn de eigenschappen van de bouwblokken ontleend aan tekeningen van het voorlopig ontwerp van maart 2020⁶. Lopende het trillingsonderzoek zijn er constructieve aanpassingen geweest door planwijzigingen. Deze aanpassingen zijn besproken tussen BAM, AM en Movares, en doorgevoerd in de berekeningen.

⁵ Ontwerpnota constructie AO, projectnr. 8961, project “Blok H2 en H4 Enka terrein”, doc.nr. 8961A001.DOC, revisie 2.0, definitief

⁶ Ede ENKA Gebouwensemble H2-H4, voorlopig ontwerp 05 maart 2020, Mix Architectuur en document 20200305_Ede, ENKA, H2,H4_VO_wijzigingen_HR.pdf

3 Beoordelingskader

3.1 Algemeen

Treinverkeer kan aanleiding geven tot trillingen in gebouwen. Deze trillingen kunnen leiden tot hinder voor omwonenden. De Duitse DIN 4150-2 (1999) norm beschrijft criteria voor het meten en beoordelen van trillingen. De Nederlandse SBR-richtlijn (2002) is hierop gebaseerd. Deze SBR-richtlijn is in Nederland de meest gebruikte richtlijn voor het beoordelen van trillingen en bestaat uit 3 delen:

- Deel A: schade aan gebouwen;
- Deel B: hinder voor personen in gebouwen;
- Deel C: verstoring van apparatuur.

Op basis van langdurige ervaring met trillingen langs het spoor is schade als gevolg van passerende treinen onwaarschijnlijk op een afstand van meer dan 30 meter tot het spoor. Er is daarom niet beoordeeld op de SBR A-richtlijn. Ook verstoring van apparatuur (SBR C-richtlijn) is niet aan de orde. In dit onderzoek is daarom alleen beoordeeld op de SBR B-richtlijn.

3.2 Grootheden

Conform de SBR B-richtlijn worden twee grootheden bepaald:

1. De trillingssterkte V_{max} . Dit is een dimensieloze indicatie van de maximaal ervaren trillingen gedurende de meetperiode, de zogenaamde pieksterkte van de trillingen. Deze grootheid wordt bepaald per 30 seconden, zie par. 9.2 en 9.3 van de SBR B-richtlijn. Van al deze maximale waarden per 30 seconden wordt de maximale waarde bepaald, de $v_{eff, max}$. Vervolgens wordt, op basis van de vijftien hoogst gemeten waarden een statistische berekening uitgevoerd met als resultaat de trillingssterkte die niet wordt overschreden door 95 procent van de passerende treinen, de V_{max} . Deze trillingssterkte is beoordeeld op de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn;
2. De trillingsintensiteit V_{per} , een dimensieloze indicatie van het tijdsgemiddelde van de trillingen. Deze grootheid wordt bepaald door het kwadratisch gemiddelde te nemen van de maximale trillingssterkte per 30 seconden indien deze boven de drempelwaarde van 0.1 uitkomt. Trillingssnelheden onder de 0.1 zijn niet of nauwelijks voelbaar en worden niet meegenomen in de bepaling van V_{per} . Het kwadratisch gemiddelde wordt vervolgens gecorrigeerd voor de tijd waarin de trillingssnelheden boven de 0.1 uitkomen, zie ook par. 9.8 van de SBR B-richtlijn.

3.3 Streefwaarden

De SBR B-richtlijn kent drie types streefwaarden:

1. A1, de onderste streefwaarde voor de trillingssterkte V_{max} ;
2. A2, de bovenste streefwaarde voor de trillingssterkte V_{max} ;
3. A3, de streefwaarde voor de trillingsintensiteit V_{per} .

De hoogte van de streefwaarden is afhankelijk van een aantal criteria:

1. Of er sprake is van een nieuwe of bestaande situatie;
2. Periode gedurende de dag;
3. Gebouwfunctie.

De verschillende criteria worden hieronder toegelicht.

3.3.1. Nieuwe of bestaande situatie

In de SBR B-richtlijn wordt onderscheid gemaakt tussen nieuwe en bestaande situaties, waarbij de streefwaarden voor nieuwe situaties strenger zijn dan voor bestaande situaties. Omdat het om nieuwe gebouwen gaat langs een bestaande spoorlijn, wordt het onderzoeksgebied beoordeeld als nieuwe situatie, zie par. 10.3 van de SBR B-richtlijn.

3.3.2. Periode gedurende de dag

De SBR B-richtlijn maakt daarnaast onderscheid tussen dag, avond en nacht. Hierbij geldt dat de streefwaarden van de trillingssterktes gedurende de nacht strenger zijn dan die gedurende de dag en avond. De SBR B-richtlijn kent de volgende periodes: dag (7.00 – 19.00 uur), avond (19.00 – 23.00 uur) en nacht (23.00 – 7.00 uur). De streefwaarden voor dag en avond zijn aan elkaar gelijk. Bij metingen aan treinverkeer worden gewoonlijk de streefwaarden voor de nacht gehanteerd, omdat deze strenger zijn dan die van de dag. Deze keuze is gerechtvaardigd omdat het treinverkeer 's nachts doorgaans vergelijkbare trillingen geeft als het treinverkeer overdag.

3.3.3. Gebouwfunctie

Als derde criterium wordt onderscheid gemaakt naar de functie van een gebouw. De SBR B-richtlijn kent de gebouwfuncties *Gezondheidszorg*, *Wonen*, *Kantoor*, *Bijeenkomsten* en *Kritische werkruimte*. Bij elke gebouwfunctie horen andere toegestane trillingssterktes. Op basis van deze drie criteria zijn de streefwaarden voor A1, A2 en A3 weergegeven in Tabel 3-1 en Tabel 3-2 voor nieuwe en bestaande situaties. De huidige onderzoekslocatie heeft bestemming *wonen*, zie de omkaderde waarden in Tabel 3-1 en Tabel 3-2. Bepaalde delen zoals de bergingen van de gebouwen worden niet beoordeeld op trillingen. Deze ruimtes hebben ook geen langdurige verblijfsfunctie.

Tabel 3-1 Streefwaarden nieuwe situatie volgens SBR B-richtlijn

Gebouwfunctie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
<i>Gezondheidszorg</i>	0.1 ¹⁾	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
<i>Wonen</i>	0.1	0.4	0.05	0.1	0.2	0.05
<i>Kantoor</i>	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
<i>Bijeenkomsten</i>	0.15	0.6	0.07	0.15	0.6	0.07
<i>Kritische werkruimte</i>	0.1	0.1	---	0.1	0.1	---

¹⁾ Een streefwaarde van 0.1 betekent een waarde kleiner dan 0.15

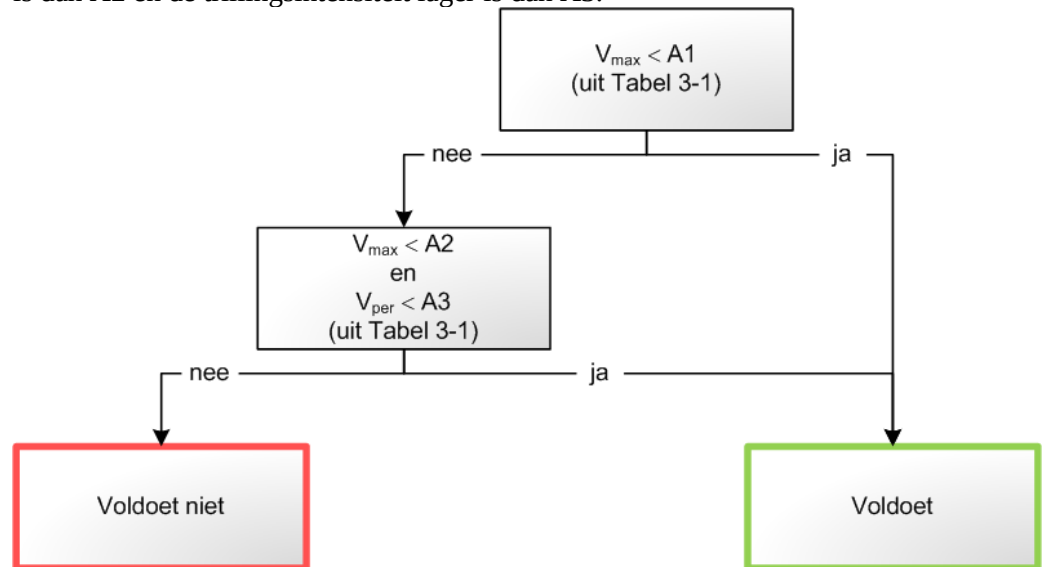
Tabel 3-2 Streefwaarden bestaande situatie volgens SBR B-richtlijn

Gebouwfunctie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
<i>Gezondheidszorg</i>	0.2	0.8	0.1	0.2	0.4	0.1
<i>Wonen</i>	0.2	0.8	0.1	0.2	0.4	0.1
<i>Kantoor</i>	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15
<i>Bijeenkomsten</i>	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15
<i>Kritische werkruimte</i>	0.1	0.1	---	0.1	0.1	---

¹⁾ Een streefwaarde van 0.1 betekent een waarde kleiner dan 0.15

3.4 Beoordeling in huidige onderzoek

Om te beoordelen of een situatie voldoet, dient het schema in Figuur 3-1 te worden doorlopen. Een locatie voldoet aan het beoordelingskader wanneer de trillingssterkte lager is dan A1. Een tweede mogelijkheid om te voldoen is als de trillingssterkte lager is dan A2 en de trillingsintensiteit lager is dan A3.



Figuur 3-1 Stroomschema beoordeling nieuwe situatie in SBR B-richtlijn

4 Meetresultaten

4.1 Inleiding

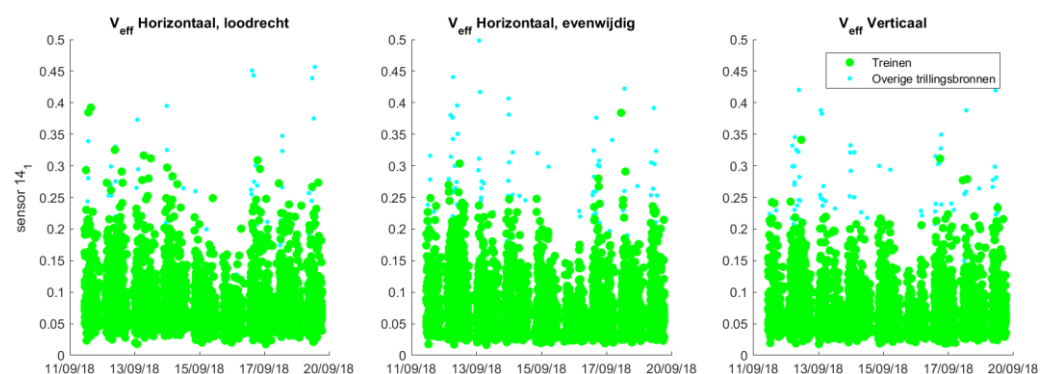
In dit hoofdstuk worden de resultaten van de metingen beschreven. Er zijn twee metingen uitgevoerd:

1. Een korte meting met meerdere meetpunten, bedoeld om de variatie in bodemopbouw en spreiding van de trillingsniveaus binnen het onderzoeksgebied vast te stellen;
2. Een lange meting met één meetpunt, om de variatie van de trillingen over de tijd vast te stellen. Op deze manier ontstaat een representatief beeld van de trillingen over een looptijd van een week.

4.2 Meetresultaten

De gemeten trillingssnelheden van de treinen tijdens de lange meting zijn per richting weergegeven in Figuur 4-1. Dit betreft de trillingen op maaiveld op ca. 58 m afstand van het spoor. Op maaiveld zorgen vooral de doorgaande ICE's voor hoge trillingen. De trillingen zijn weergegeven in drie richtingen:

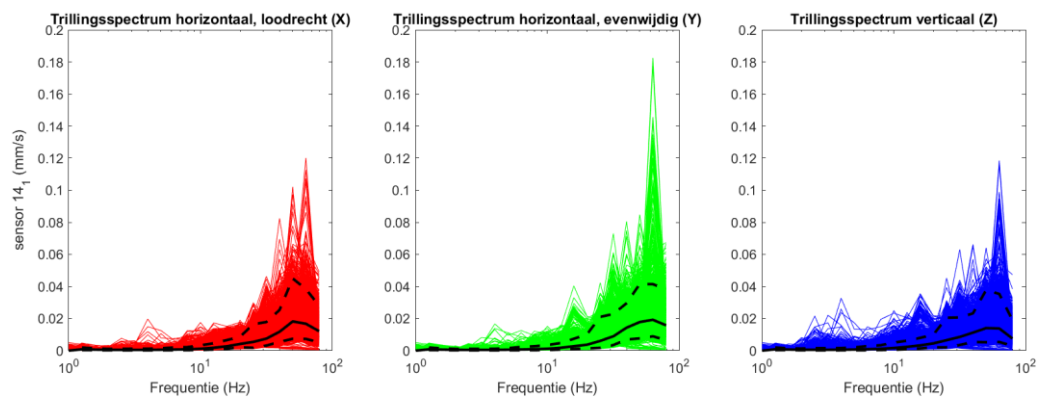
1. Horizontaal, loodrecht op het spoor (ook wel X genoemd);
2. Horizontaal, parallel aan het spoor (ook wel Y genoemd);
3. Verticaal (ook wel Z genoemd).



Figuur 4-1 Trillingssterktes op maaiveldniveau als functie van de tijd

Het trillingsspectrum van de gemeten treinen in deze periode is weergegeven in Figuur 4-2. Er is geen dominante richting. In de richting loodrecht op het spoor geven met name de (doorgaande) ICE's en goederentreinen hoge trillingswaarden, met dominante frequenties rond 60 Hz.

Daarnaast is met de korte meting voor elk meetpunt bepaald hoe de gemeten trillingen in dat meetpunt zich verhouden tot de trillingen in het meetpunt voor de lange meting, zie Bijlage II. Met deze verhoudingen zijn voor elk meetpunt de trillingen van alle gepasseerde treinen vastgesteld.



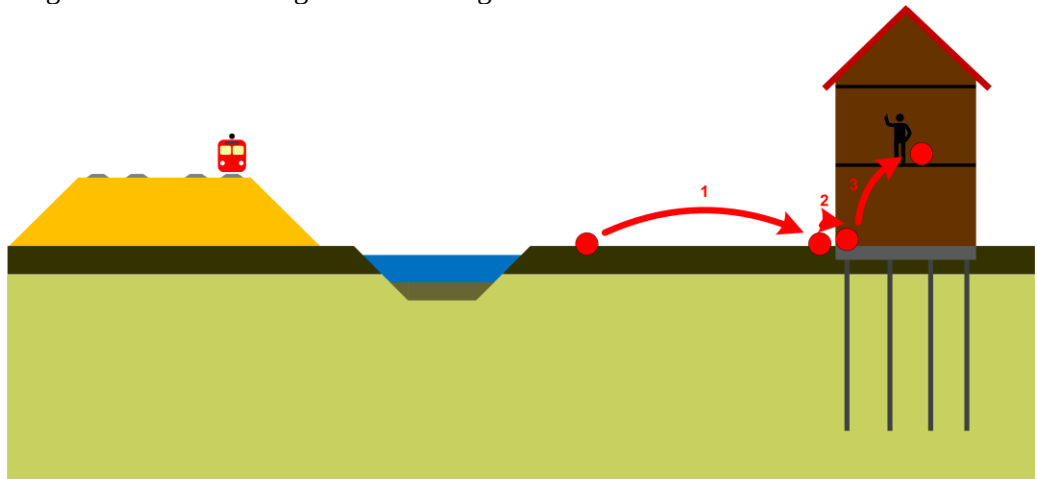
Figuur 4-2 Trillingsspectra van treinpassages tijdens de langeduurmeting

5 Analyse en berekeningen

5.1 Prognosemethode

De resultaten van de korte en de lange meting zijn gecombineerd met informatie over de geplande bebouwing. Hiermee is een prognose gemaakt van de trillingssterktes aan de fundering en op de vloeren van de gebouwen, op de locatie van elk bouwvlak.

De prognoses van trillingen op funderingsniveau en op midden vloerveld wordt gedaan volgens de methode die getoond is in Figuur 5-1



Figuur 5-1 Methode voor het vaststellen van de trillingen in een gebouw

Deze methode werkt als volgt:

1. De trillingen van de langeduurmeting worden vertaald naar een meetpunt op maaiveld ter plaatse van het bouwvlak, door de trillingen bij het bouwvlak uit de kortduurmeting te delen op de trillingen bij het meetpunt van de langeduurmeting uit de kortduurmeting. Deze overdracht corrigeert voor bijvoorbeeld verschillen in afstand tot het spoor (uitdemping van de trillingen met de afstand) en voor variatie in de bodem of de spoorligging.
2. De trillingen op maaiveld worden vertaald naar een meetpunt op de fundering van het bouwvlak, op basis van de eigenschappen van het gebouw (afmetingen, type fundering).
3. De trillingen op de fundering worden vertaald naar een meetpunt op de verschillende verdiepingen van het bouwvlak, op basis van de eigenschappen van het gebouw (afmetingen, type constructie).

Resultaat van deze berekening is een predictie van de trillingssituatie in het gebouw, waarbij elke afzonderlijke trein zoals gemeten is bij de langeduurmeting is vertaald naar een trillingssignaal in de woning. Over deze trillingen worden de parameters V_{max} en V_{per} bepaald, waarna deze worden beoordeeld op de SBR B-richtlijn.

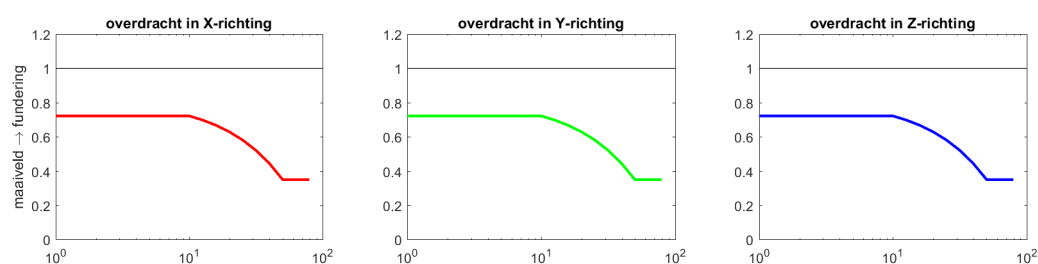
5.1.1. Overdracht tussen meetpunten

De overdracht van het meetpunt uit de langeduurmeting naar de overige meetpunten is bepaald tijdens de korte meting. Deze overdrachten zijn weergegeven in Bijlage II. Door deze overdrachten te vermenigvuldigen met de trillingen uit de langeduurmeting, zijn de trillingen uit die meting op elk willekeurig punt te bepalen. Voor tussenliggende punten wordt geïnterpoleerd op basis van de Barkan-vergelijking, een empirische formule die de uitdemping van de trillingen met de afstand beschrijft.

5.1.2. Overdracht van maaiveld naar fundering

Een document van VROM geeft indicatieve richtlijnen voor het bepalen van de overdracht van trillingen van maaiveld naar fundering⁷. Deze theoretische waarden komen goed overeen met praktijkwaarden uit metingen en zijn daarom in dit onderzoek aangehouden.

De resultaten van deze overdracht zijn weergegeven in Figuur 5-2. Hierbij is X loodrecht op het spoor en Y parallel aan het spoor.



Figuur 5-2 Overdracht van de trillingssterkte van maaiveld naar de fundering (boven)

5.1.3. Overdracht van fundering naar midden vloerveld

De overdracht van fundering naar midden vloerveld is afhankelijk van de gebouwconstructie, gebouwafmetingen, type vloer en de eigenfrequentie van de vloer. Op basis van de constructieve tekeningen van de gebouwen, zijn eindige elementenmodellen van de bouwblokken opgesteld. Afbeeldingen van de modellen staan in Bijlage IV. Deze eindige elementenmodellen worden aan de onderzijde (fundering) belast met een kortdurende dynamische opgelegde verplaatsing met een breedbandig spectrum. Uit de dynamische respons van het gebouw op deze belasting, volgen overdrachten naar de verschillende vloeren in het gebouw. Per gebouw wordt de berekening 3 keer uitgevoerd: Een belasting in de X-richting, een belasting in de Y-richting en een belasting in de Z-richting.

5.2 Resultaten

De trillingen op de locatie van de lange duurmeting zijn weergegeven in Tabel 5-1. Op maaiveld zijn de trillingen al hoger dan de streefwaarden uit de SBR B-richtlijn voor nieuwe situaties.

Tabel 5-1 Meetresultaten op maaiveld voor het langeduur meetpunt

	X	Y	Z
V_{per}, dag	0.02	0.02	0.02
V_{per}, avond	0.02	0.02	0.02
V_{per}, nacht	0.01	0.01	0.01
V_{max}, gemeten	0.39	0.38	0.34

5.2.1. Prognose trillingen in gebouwen

Vervolgens is voor alle bouwvlakken een prognose gemaakt van de trillingen in de gebouwen op de vloeren op de hoogst bewoonde verdieping. Overschrijdingen van het

⁷ Rekenmodel voor de bepaling van trillingssterkte, Ministerie VROM, mei 1995, distributienummer 12462/164.

beoordelingskader zijn in de tabel oranje gearceerd wanneer er alleen een overschrijding optreedt van de (strengere) streefwaarden voor de nacht, en rood als ook de (minder strenge) streefwaarden voor de dag worden overschreden.

Tabel 5-2 Prognose trillingen in de Bouwblok H2A

	X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
	v_per X	v_max_SBRB X	v_per Y	v_max_SBRB Y	v_per Z	v_max_SBRB Z
BG	0.00	0.09	0.00	0.19	0.01	0.29
1	0.00	0.13	0.00	0.11	0.02	0.52
2	0.00	0.11	0.00	0.13	0.02	0.55
3	0.00	0.08	0.00	0.15	0.02	0.58
4	0.00	0.09	0.00	0.16	0.02	0.60
5	0.00	0.06	0.00	0.18	0.03	0.54

Kleur	Toelichting
	Mogelijke overschrijding nieuwe situatie, alleen 's nachts Geen overschrijding bestaande situatie in nachtperiode
	Mogelijke overschrijding nieuwe situatie, zowel overdag als 's nachts Mogelijk overschrijding bestaande situatie in nachtperiode

Tabel 5-3 Prognose trillingen in de Bouwblok H2B en H4E

	X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
	v_per X	v_max_SBRB X	v_per Y	v_max_SBRB Y	v_per Z	v_max_SBRB Z
BG	0.00	0.07	0.01	0.31	0.01	0.21
1	0.00	0.09	0.00	0.14	0.01	0.32
2	0.00	0.10	0.00	0.11	0.02	0.40
3	0.00	0.15	0.00	0.09	0.02	0.47
4	0.00	0.20	0.00	0.10	0.02	0.44

Tabel 5-4 Prognose trillingen in de Bouwblok H2C en H4D

	X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
	v_per X	v_max_SBRB X	v_per Y	v_max_SBRB Y	v_per Z	v_max_SBRB Z
BG	0.00	0.05	0.00	0.07	0.01	0.16
1	0.00	0.08	0.00	0.10	0.01	0.23
2	0.00	0.08	0.00	0.13	0.01	0.25
3	0.00	0.07	0.00	0.11	0.01	0.28
4	0.00	0.08	0.00	0.09	0.01	0.31
5	0.00	0.05	0.00	0.12	0.01	0.34

Tabel 5-5 Prognose trillingen in de Bouwblok H4F

	X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
	v_per X	v_max_SBRB X	v_per Y	v_max_SBRB Y	v_per Z	v_max_SBRB Z
BG	0.00	0.14	0.00	0.07	0.02	0.35

1	0.00	0.08	0.00	0.09	0.03	0.47
2	0.00	0.08	0.00	0.13	0.02	0.40
3	0.00	0.08	0.00	0.12	0.02	0.50
4	0.00	0.06	0.00	0.08	0.03	0.60
5	0.00	0.05	0.00	0.09	0.03	0.67

In alle panden komen de hoogste trillingsniveaus voor op de bovenste verdiepingen, in de verticale richting (Z-richting). Boven de begane grond wordt het gebouw gerealiseerd met tunnelbouw, waarbij het gebouw horizontaal het stijfst is in de richting van de constructieve wanden.

5.2.2. Verwachting en bovengrens van trillingen in gebouwen

De ervaring leert dat de gehanteerde methode met behulp van FEM modellen om trillingen te voorspellen meestal tot hogere trillingen leidt dan de trillingen die gemeten worden. De gepresenteerde resultaten zijn daarom te beschouwen als een bovengrens van de te verwachten trillingen in de gebouwen.

5.3 Betrouwbaarheid

De prognoses zijn gebaseerd op de meest recente inzichten en de uitgangspunten zoals opgenomen in hoofdstuk 2. Desondanks zijn er een aantal parameters die kunnen leiden tot andere uitkomsten dan zoals hierboven beschreven:

1. Wijzigingen in de sporenlay-out, het spoorgebruik of de rijnsnelheid van de treinen ten opzichte van de situatie waarvan in dit onderzoek is uitgegaan (*Spoorzone Ede*). In het geval van wijzigingen buiten de spoorzone zal ProRail doorgaans trillingsonderzoek uitvoeren.
2. Toename van het aantal treinen, waardoor de waarde van V_{per} hoger wordt. De waarde van V_{max} neemt hierdoor niet toe. De waarde voor V_{per} is nu echter dusdanig laag, dat ook bij verhoging van de intensiteit van goederentreinen geen overschrijdingen te verwachten zijn.
3. De ligging van het spoor heeft invloed op de trillingen van het treinverkeer, deze spoorligging hangt samen met (onder meer) de onderhoudscyclus van het spoor. Naar verwachting zorgt deze variatie in spoorligging voor een variatie van +/- 25 procent in de trillingen;
4. Het FEM model is een schematische benadering van de constructie van het gebouw. Details van het gebouw kunnen van invloed zijn op het dynamisch gedrag.

5.4 Voorkomen van trillingshinder

Op basis van de resultaten van dit onderzoek zijn overschrijdingen van de (strengere) streefwaarden voor een nieuwe situatie te verwachten in alle bouwblokken. In de bouwblokken het dichtst bij het spoor (H2A, en H4F) zijn ook overschrijdingen van de streefwaarden voor bestaande situaties mogelijk. Dit komt vooral doordat de trillingen slecht uitdempnen met de afstand op de stijve bodem ter plaatse van het ENKA-terrein, waardoor de trillingen ook op grotere afstand nog vrij hoog zijn. Een belangrijke nuancering hierbij is dat bewoners aan trillingen gewend kunnen raken, en dat dan de streefwaarden voor bestaande situaties meer van toepassing zijn, waarin het zogenaamde 'gewenningseffect' is meegenomen. Dit treedt na verloop van tijd op, mensen wennen dan aan het wonen langs het spoor met de bijbehorende geluids- en trillingseffecten.

5.4.1. Afweging

Door de hoge trillingen op maaiveld is het zonder maatregelen niet mogelijk om in de beschouwde bouwblokken dichtbij het spoor te voldoen aan de streefwaarden voor nieuwe situaties uit de SBR B-richtlijn. Echter, gezien het incidentele karakter van de

overschrijdingen, hoeft dit niet te betekenen dat er sprake is van een onacceptabel woon- en leefklimaat in de woningen. De hoogste trillingsniveaus zijn gemeten tijdens de dagperiode, en de voorspelde trillingen voldoen nog aan de streefwaarden voor bestaande situaties tijdens de dagperiode.

In de bouwblokken H2A en H4F zijn de voorspelde trillingen hoger dan de streefwaarden voor bestaande situaties, en hiervoor dienen trillingsreducerende maatregelen te worden afgewogen.

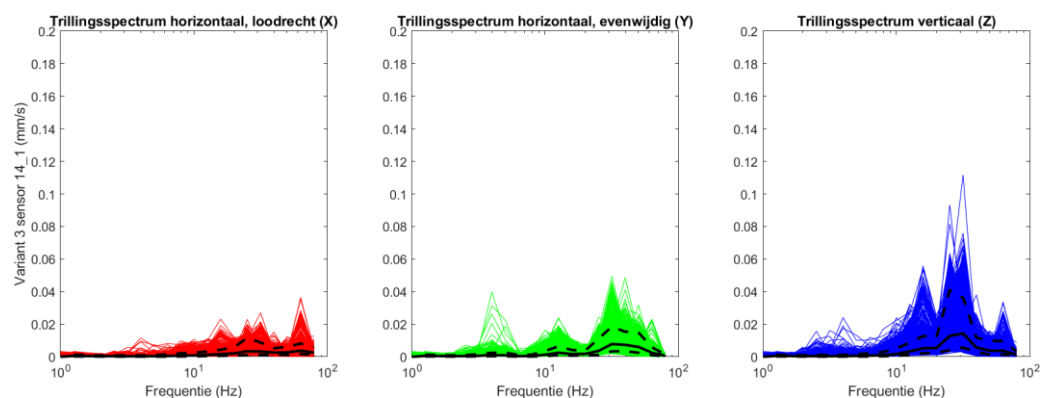
In de bouwblokken H2B, H2C, H2D en H2E zijn de voorspelde trillingen hoger dan de streefwaarden voor nieuwe situaties, maar lager dan de streefwaarden voor bestaande situaties.

5.4.2. Aanvullende maatregelen

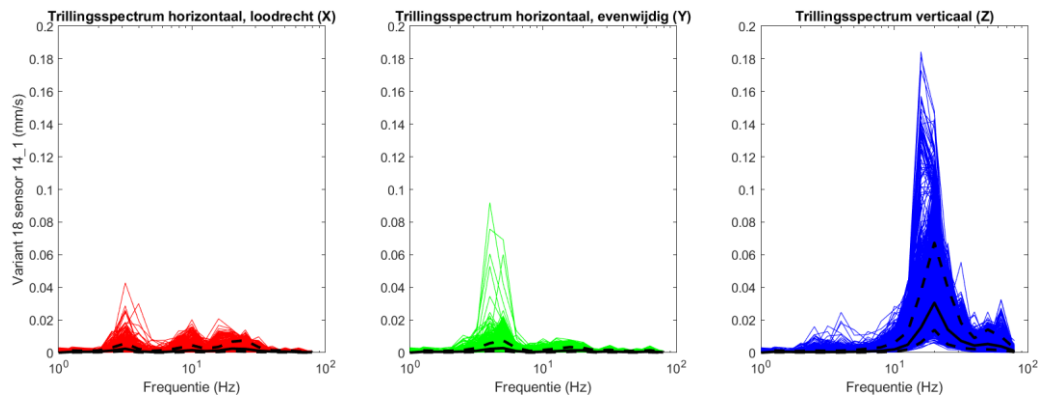
Om de trillingen verder te reduceren, zijn er globaal gezien een aantal mogelijkheden:

- maatregelen in de bodem (zoals trillingsschermen);
- maatregelen aan het gebouw (globaal het verstevigen van het gebouw zodat het minder gevoelig is voor de dominante trillingsfrequenties, of het qua trillingen loskoppelen van de fundering en de rest van het gebouw).

De hoogste trillingssterktes zijn berekend voor de verticale richting. In Figuur 5-3 en Figuur 5-4 staan voorbeelden van de berekende trillingsspectra op de bovenste verdieping. De trillingen zijn dominant tussen de 10 en 16 Hz in de verticale richting. Maatregelen dienen de trillingen vooral in dit frequentiegebied te reduceren. In de horizontale richting leveren frequenties tussen 3 en 8 Hz een bijdrage aan het trillingsniveau. Maatregelen om de verticale richting te reduceren mogen deze laagfrequente horizontale trillingen niet te veel versterken. Een maatregel noemen we effectief indien de trillingsreductie minimaal 30% is.



Figuur 5-3 Trillingspectra in blok H2A in de begane grond



Figuur 5-4 Trillingspectra in blok H2B in de hoogste verdieping

Op basis van bovenstaande zijn er een aantal mogelijke maatregelen te identificeren. Hieronder staan verschillende opties, en een indicatie van het effect op basis van een kwalitatieve inschatting.

1. *Toevoegen van extra betonnen wanden:* Een effect van de maatregel kan zijn dat de opslingering van trillingen op de hoogste verdiepingen wat afneemt.
 - a. *Gebouw H2A en H4F:* Met extra betonnen wanden wordt mogelijk in een groter gedeelte van het gebouw aan de streefwaarden voor bestaande situaties voldaan. Er zullen overschrijdingen van de streefwaarden voor nieuwe situaties aanwezig blijven.
 - b. *Gebouw H2B en H4E:* Deze maatregel zal wat invloed hebben vooral in het bouwblok H2B en H4E als ze evenwijdig aan de spoor toegevoegd worden. Mogelijk wordt in een groter gedeelte van het gebouw voldaan aan de streefwaarden voor nieuwe situaties.
 - c. *Gebouw H2C en H2D:* In deze gebouwen is weinig effect van deze maatregel te verwachten.
2. Het vervangen van kanaalplaatvloeren door massieve betonvloeren: gezien het spectrum van de metingen zal deze maatregel weinig effect hebben op het trillingsniveau. Bovendien zijn de kanaalplaten nu alleen op de begane grond voorzien, en daar zijn de trillingsniveaus het laagst.
3. Aanpassen van de fundering door het al dan niet opvullen van open ruimten in de fundering met zand. Bij gebouw H2A en H2C zijn open ruimten in de fundering gevuld met zand. Mogelijk leidt het verwijderen van het zand tot een verandering van trillingen.
4. Verlagen van gebouwen door minder verdiepingen te bouwen. Uit de resultaten blijkt dat de hoogste trillingsniveaus vaak optreden bovenin de gebouwen.
5. Funderingen ontkoppelen van het gebouw. De constructie bestaat dan uit een betonnen plaat, met daarop verende elementen en daarop de wanden van het gebouw. Hierbij zijn er twee mogelijkheden: afveren met behulp van rubberen blokken of met behulp van stalen veerdozen. Bij de keuze van de oplegblokken is het belangrijk dat de afveerfrequentie van het systeem niet hoger is dan zo'n 6-8 Hz, omdat het effect van de maatregel anders averechts kan zijn. Rondom de afveerfrequentie van de oplegblokken treedt namelijk een versterking van het trillingsniveau op, en in de figuren in Bijlage VI is te zien dat de trillingsenergie oploopt vanaf 10 Hz.

- a. *Gebouw H2A en H4F*: Met het ontkoppelen kan naar verwachting worden voldaan aan de streefwaarden voor bestaande situaties, en mogelijk zelfs aan de streefwaarden voor nieuwe situaties
- b. *Gebouw H2B, H2C, H2D en H2E*: Met het ontkoppelen van de fundering kan naar verwachting worden voldaan aan de streefwaarden voor nieuwe situaties

6 Beschouwde maatregelen

Op 3 maart 2020 heeft een overleg plaatsgevonden bij Movares te Utrecht waarbij BAM, AM en Movares aanwezig waren.

Naar aanleiding van dit overleg heeft BAM aan Movares gevraagd de volgende maatregelvarianten door te rekenen:

Voor de Blok H2A:

- Verwijderen van het zand en de ‘kelder’ dicht maken met een extra wand.
- Eén bouwlaag minder.
- Afveren van het gebouw met rubber. Hierbij is de stijfheid van het rubber in de horizontale richtingen (x- en y-richting) niet gelijk aan de verticale richting (z-richting).

Voor alle andere blokken (Blok H2B en H4E, Blok H2C en H4D en Blok H4F):

- Afveren van het gebouw met rubber. Hierbij is de stijfheid van het rubber in de horizontale richtingen (x- en y-richting) niet gelijk aan de verticale richting (z-richting).

Voor het afveren gaan we uitgaan van rubber blokken, met een afveerfrequentie van 7 Hz of 8 Hz. Dit is ongeveer de ondergrens van de afveerfrequentie die met rubber blokken gehaald kan worden. Voor een oplossing van 7 Hz uitgaande van een lijnbelasting van ca. 650 kN/m zou het CDM-SEB systeem toegepast kunnen worden met natuurrubber steunen, bijvoorbeeld type CDM VHSB 132x132x195 (of CDM-82 van 132x132x70mm of CDM-83 87x87x80mm). Een gelijkwaardig systeem van een andere leverancier is ook mogelijk.

De verhouding verticale/horizontale veerstijfheid is 12.9 voor blokken met een afveerfrequentie van 7 Hz. Dit komt neer op een horizontale afveerfrequentie van ca. 1.9 Hz.

Voor blokken met een afveerfrequentie van 8 Hz wordt uitgaan van een verhouding verticale/horizontale veerstijfheid van 6. Dit komt neer op een horizontale afveerfrequentie van 3.3 Hz.

6.1 Resultaten maatregelen

De resultaten van de trillingsprognoses met de maatregelen staan per gebouw en verdieping in Bijlage VII. De maatregelen hebben verschillende effecten voor de verschillende gebouwen. In de resultaten is het volgende te zien:

- Gebouw H2A
 - Zonder maatregelen zijn er overschrijdingen van de streefwaarden voor bestaande situaties.
 - Afveren met rubber (op 7 Hz) van het gebouw is een effectieve maatregel. Er zijn echter nog wel overschrijdingen voor nieuwe situaties in de nachtperiode.
 - Het weglaten van de opvulling met zand leidt tot een toename van de horizontale trillingen, en meer overschrijdingen op vooral de lagere verdiepingen.

- Het weghalen van een verdieping leidt niet tot een significant verschil. Er is een beperkte toename van het maximale trillingsniveau in het gebouw.
- Gebouw H2B / H4E
 - Zonder maatregelen is er een enkele overschrijding van de streefwaarden voor bestaande situaties in de nacht.
 - Afveren met rubber (op 8 Hz) van het gebouw is een effectieve maatregel. Er zijn geen overschrijdingen van de streefwaarden voor nieuwe situaties.
- Gebouw H2C / H4D
 - Zonder maatregelen zijn er overschrijding van de streefwaarden voor nieuwe situaties in de nacht. Het gebouw voldoet aan de streefwaarden voor bestaande situaties.
 - Afveren met rubber (op 7 Hz) van het gebouw is een effectieve maatregel. Er zijn geen overschrijdingen van de streefwaarden voor nieuwe situaties.
 - Afveren met rubber (op 8 Hz) van het gebouw leidt slechts tot een zeer beperkte trillingsreductie, en is geen effectieve maatregel.
- Gebouw H4F
 - Zonder maatregelen zijn er overschrijding van de streefwaarden voor bestaande situaties in de nacht.
 - Afveren met rubber (op 7 Hz) van het gebouw is een effectieve maatregel. Er zijn geen overschrijdingen van de streefwaarden voor nieuwe situaties.
 - Afveren met rubber (op 8 Hz) van het gebouw is een beperkt effectieve maatregel. Er zijn echter nog wel overschrijdingen voor nieuwe situaties in de nachtperiode.

In Tabel 6-1 staat het effect van de maatregelen afveren per gebouw samengevat voor het maatgevende punt per gebouw. Uit de resultaten blijkt dat het afveren een effectieve maatregel is. Alleen in gebouw H2A is er nog sprake van een overschrijding voor nieuwe situaties in de nachtperiode. De overige gebouwen voldoen met deze maatregel aan de (strengere) streefwaarden voor nieuwe situaties in de nachtperiode.

Tabel 6-1 Resultaten maatregel – afveren

	Beoordeling Nieuwe situatie						Beoordeling Bestaande situatie					
	X-richting		Y-richting		Z-richting		X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
Gebouw H2A (op 7 Hz)	0.00	0.1	0.00	0.1	0.01	0.3	0.00	0.1	0.00	0.1	0.01	0.3
Gebouw H2B (op 8 Hz)	0.00	0.1	0.00	0.0	0.01	0.2	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.1
Gebouw H2C (op 7 Hz)	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.2	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.2
Gebouw H4F (op 7 Hz)	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.2	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.2

6.2 Nadere analyse overschrijding gebouw H2A

Opvallend is dat in gebouw H2A een hogere $V_{\max}$ wordt voorspeld dan in gebouw H4F, terwijl beide gebouwen op ongeveer dezelfde afstand van het spoor liggen, en de vloeren in gebouw H2A een kleinere overspanning hebben dan in gebouw H4F. Het blijkt dat de hoge trillingen in gebouw H2A optreden in het middelste gedeelte, boven de kolommenstructuur die aan de onderzijde aanwezig is. De kolommenstructuur is een relatief slap gedeelte van het gebouw. We gaan nu nog uit van een “rigid base” aanstoting in de modellering, waar de veren onder zitten. We verwachten dat de

resultaten in gebouw H2A gunstiger worden als de veren op de werkelijke plaats in het model zouden worden opgenomen (waarschijnlijk op een hoger niveau). De inschatting is dat de trillingen dan lager dan de streefwaarden voor nieuwe situaties.

Verder is de optredende overschrijding in gebouw H2A een overschrijding voor nieuwe situaties in de dag- avondperiode. Gedurende de meetperiode (ca. 1 week) traden deze overschrijdingen 6 keer op. Echter de overschrijdingen traden op in de middag, dus overdag en niet in de nachtperiode. Dat betekent dat deze niveaus aan streefwaarden voor de dagperiode getoetst mogen worden, en ze voldoen dan aan de streefwaarden voor nieuwe situaties. Mocht een aantal van deze treinen in de toekomst in de nacht gaan rijden, dan zou dat wel tot overschrijdingen leiden, maar hooguit enkele per week.

7 Conclusies en aanbevelingen

In dit onderzoek zijn metingen en berekeningen uitgevoerd om de verwachte trillingsniveaus in nieuw te bouwen woningen op het ENKA terrein in Ede te bepalen. De verwachte trillingen zijn getoetst aan de streefwaarden voor nieuwe- en bestaande situaties uit de SBR-B-richtlijn. Bij de prognose is gebruik gemaakt van dynamische FEM modellen van de 4 gebouwblokken H2A, H2B, H2C en H4F. Gebouwblok H2C is tevens representatief voor gebouwblok H4D, en gebouwblok H2B is representatief voor gebouwblok H4E.

De uitgevoerde simulaties leiden tot de volgende conclusies:

- In de referentiesituatie zonder maatregelen is de trillingssterkte hoger dan de streefwaarden voor nieuwe en bestaande situaties;
- De maatregelen hebben voor verschillende gebouwen de volgende effecten:
 - Gebouw H2A
 - Afveren met rubber (op 7 Hz) van het gebouw is een effectieve maatregel. Er zijn echter nog wel overschrijdingen voor nieuwe situaties in de nachtperiode.
 - Het weglaten van de opvulling met zand leidt tot een toename van de horizontale trillingen, en meer overschrijdingen op vooral de lagere verdiepingen.
 - Het weghalen van een verdieping leidt niet tot een significant verschil. Er is een beperkte toename van het maximale trillingsniveau in het gebouw.
 - Gebouw H2B / H4E
 - Afveren met rubber (op 8 Hz) van het gebouw is een effectieve maatregel. Er zijn geen overschrijdingen van de streefwaarden voor nieuwe situaties.
 - Gebouw H2C / H4D
 - Afveren met rubber (op 7 Hz) van het gebouw is een effectieve maatregel. Er zijn geen overschrijdingen van de streefwaarden voor nieuwe situaties.
 - Afveren met rubber (op 8 Hz) van het gebouw leidt slechts tot een zeer beperkte trillingsreductie, en is geen effectieve maatregel.
 - Gebouw H4F
 - Afveren met rubber (op 7 Hz) van het gebouw is een effectieve maatregel. Er zijn geen overschrijdingen van de streefwaarden voor nieuwe situaties.
 - Afveren met rubber (op 8 Hz) van het gebouw is een effectieve maatregel. Er zijn echter nog wel overschrijdingen voor nieuwe situaties in de nachtperiode.
- In bepaalde situaties, zijn er alleen nog overschrijdingen van de streefwaarden voor nieuwe situaties in de nachtperiode, maar zijn de trillingen wel lager dan de streefwaarden voor de dagperiode. Dit geldt voor gebouw H2A (afgeveerd op 7 Hz), gebouw H2C / H4D (indien zonder aanvullende maatregelen of afgeveerd op 8 Hz) en gebouw H4F (indien afgeveerd op 8 Hz). Het aantal te verwachten overschrijdingen van de streefwaarden voor nieuwe situaties in de nachtperiode zal zeer beperkt zijn (hooguit enkele per week).

- Verder treden de hoogste niveaus in gebouw H2A niet op dicht bij de spoorlijn, maar boven de kolommenstructuur in het midden van het gebouw. Naar verwachting zullen de niveaus verder dalen als de afvering in meer detail op de juiste positie wordt opgenomen in het model. De inschatting is dat de trillingen dan lager zijn dan de streefwaarden voor nieuwe situaties.

Colofon

Opdrachtgever Grondbank Bennekomseweg CV
ing. Henk Hazelaar RC

Uitgave Movares Nederland B.V.

Kennislijn Gebouwen en Infra
groep Lijninfra en Geotechniek:Lijninfra en Geotechniek

Daalse Kwint
Postbus 2855
3500 GW Utrecht

Telefoon 06-16 37 68 23

Ondertekenaar ir. Kareen Gasparotto
Adviseur

Projectnummer MN000834

Kenmerk D79-KGA-KA-1900023

© 2019, Movares Nederland B.V.

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 Movares Nederland B.V.

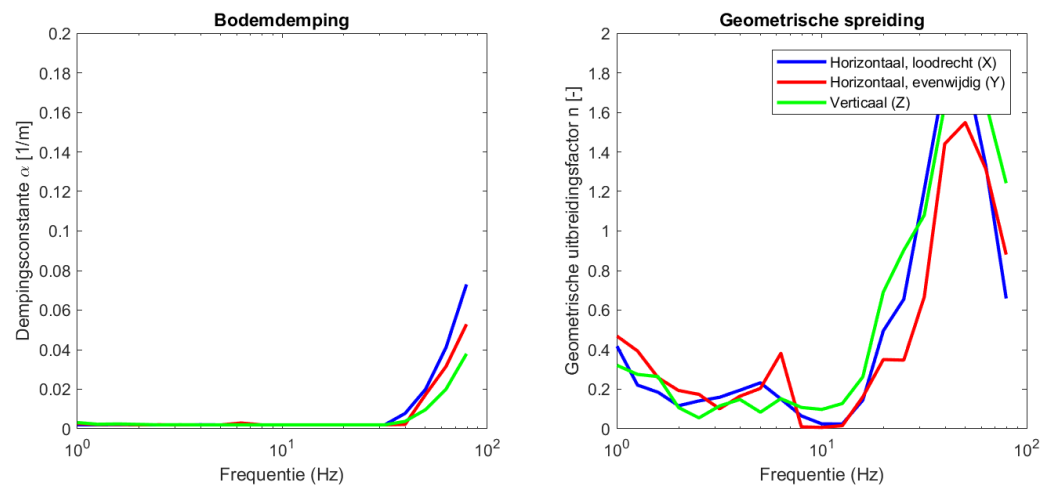
Bijlage I - Gegevens van de metingen

Conform de eisen in de SBR B-richtlijn, hoofdstuk 11, bevat deze bijlage de gegevens van de metingen.

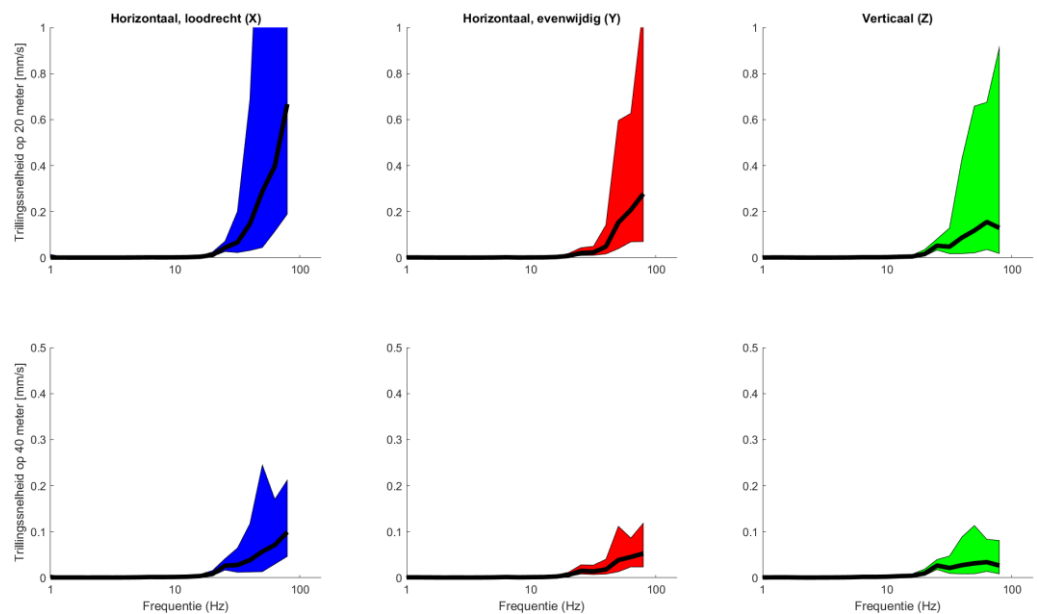
1	Uitvoerende organisatie	<i>Movares Nederland B.V. Daalseplein 101 3511 SX Utrecht</i>
	Verantwoordelijke persoon	<i>Ir. P.M. Boon e-mail: pieter.boon@movares.nl tel.: 06-10039454</i>
2	Meting uitgevoerd door	<i>Mohamed Kabbouch</i>
3	Tijdspanne meting	<i>19-09-2018 13:50 tot 19-09-2018 17:30 (korteduurmeting) 11-09-2016 12:10 tot 19-11-2018 18:00 (langeduurmeting)</i>
4	Type trillingsbron	<i>Treinen.</i>
5	Gebouwomschrijving	<i>Woningen met een maximale bouwhoogte van 22.5 m.</i>
6	Locatie metingen	<i>Zie plattegrond in hoofdstuk 2</i>
7	Geotechnische gegevens	<i>Zie Bijlage III</i>
8	Meetposities	<i>Zie plattegrond in hoofdstuk 2</i>
9	Gebruikte meetopnemers	<i>Tien 3D-geofoons</i>
	Gebruikte registratieapparatuur	<i>Webcam gekoppeld aan meetcomputer</i>
	Gebruikte verwerkingsapparatuur	<i>Raspberry Pi met USB-DUX. Meetcomputers leggen zowel de trillingssterkte per 30 seconden als het tijdssignaal vast.</i>
10	Overzicht meetwaarden	<i>Zie figuren in hoofdstuk 4</i>
11	Motivatie classificatie gebouw	<i>Zie hoofdstuk 2</i>
12	Overige relevante omstandigheden	<i>Zie hoofdstuk 2</i>

Bijlage II - Meetresultaten

In Figuur II - 1 zijn de dynamische bodemeigenschappen weergegeven. Links is de bodemdemping weergegeven, rechts de geometrische spreiding van de trillingen. De bodemdemping is zeer laag, waardoor de trillingen slecht uitdempnen met de afstand. Dit komt door de stijve zandbodem, zie ook Bijlage III. In Figuur II - 2 zijn de trillingsspectra (gemiddelde en bandbreedte) weergegeven van passerende intercity's op 20 en 40 meter afstand, zoals gemeten op maaiveld. Duidelijk zichtbaar is hier dat de trillingen met name hoogfrequent (boven de 50 Hz) zeer hoog zijn.

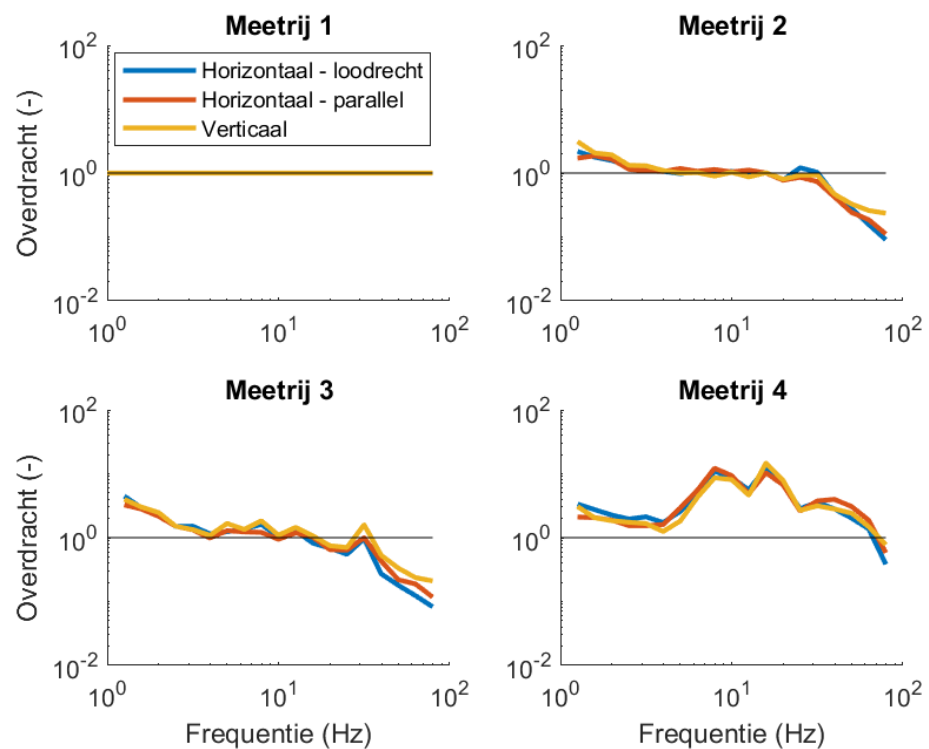


Figuur II - 1 Bodemdemping en geometrische spreiding bij het ENKA-terrein



Figuur II - 2 Trillingssnelheid op 20 m en 40 m van de eerste meetrij

In Figuur II - 3 is de verhouding weergegeven tussen de verschillende meetpunten, gedefinieerd van links naar rechts in Figuur 2-1 als meetrij 1, meetrij 2 (enkel meetpunt), meetrij 3 (enkel meetpunt) en meetrij 4. Een waarde kleiner dan 1 betekent dat de trillingen op de betreffende sensor lager zijn dan bij meetrij 1, een waarde boven 1 betekent dat de trillingen op de betreffende sensor hoger zijn. De verhouding is weergegeven als tertsbandspectrum tussen 1 en 100 Hz. Duidelijk zichtbaar is hier dat meetrij 2 en 3 vooral hoogfrequent wat lagere trillingen laten zien, maar verder goed vergelijkbaar zijn, terwijl meetrij 4 (vermoedelijk door de verouderde wissels daar) tot wel een factor 10 hogere trillingen geeft tussen de 6 en 30 Hz.

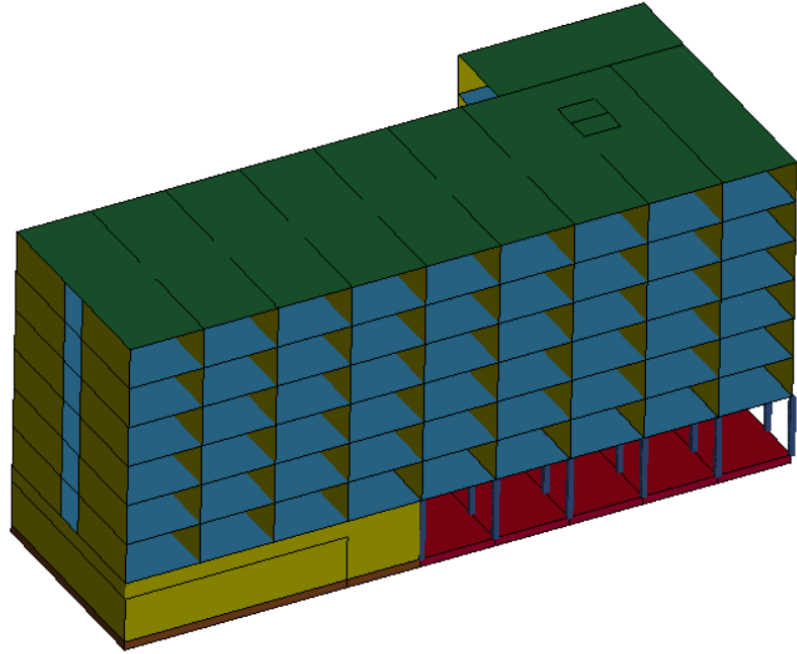


Figuur II - 3 Verhouding tussen trillingssignalen in de overige meetpunten ten opzichte van het referentiemeetpunt uit de langeduurmeting (meetrij 1).

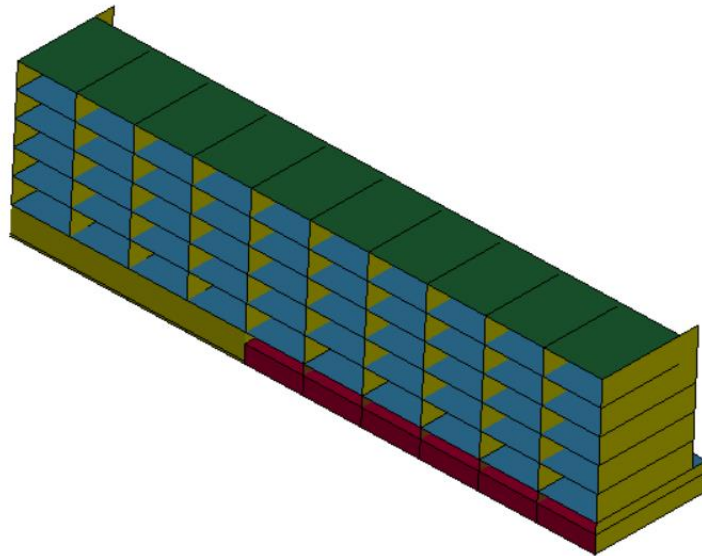
Bijlage III – Bodemopbouw

In het hierna volgende document zijn representatieve sonderingen voor het gebied weergegeven.

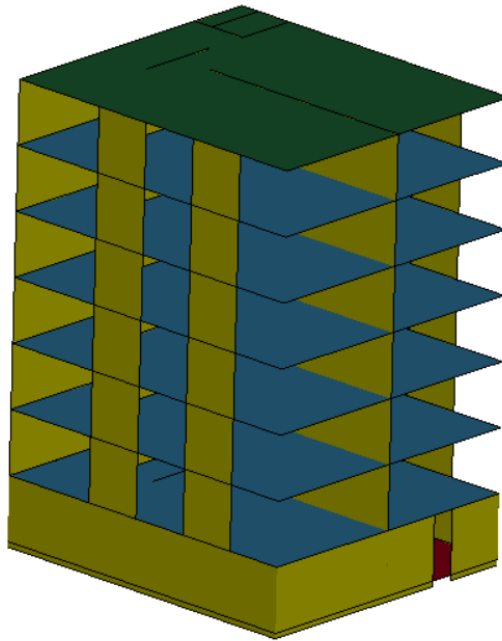
Bijlage IVV – Eindige elementen modellen



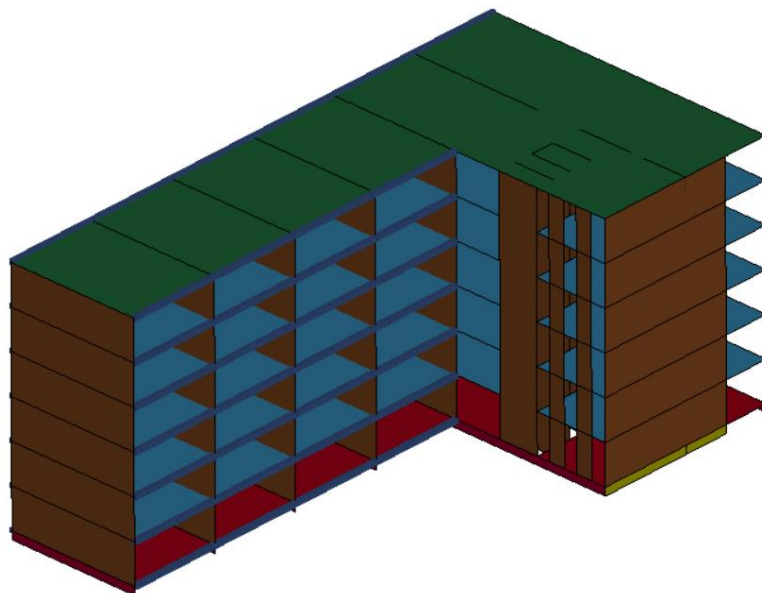
Blok H2A



Blok H2B



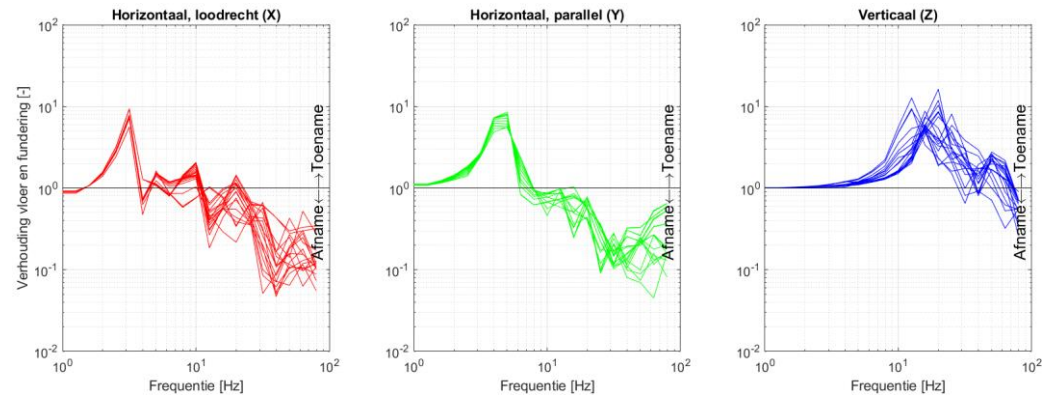
Blok H2C



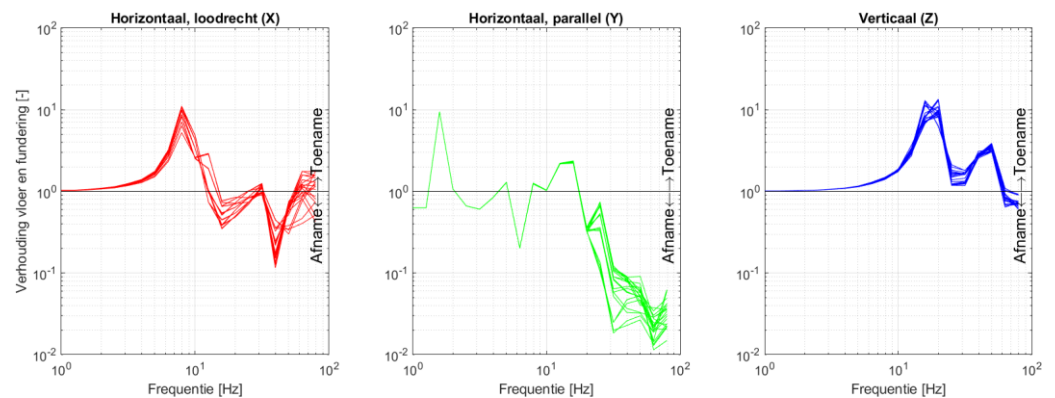
Blok H4F

Bijlage V – Overdracht van fundering naar de vloer

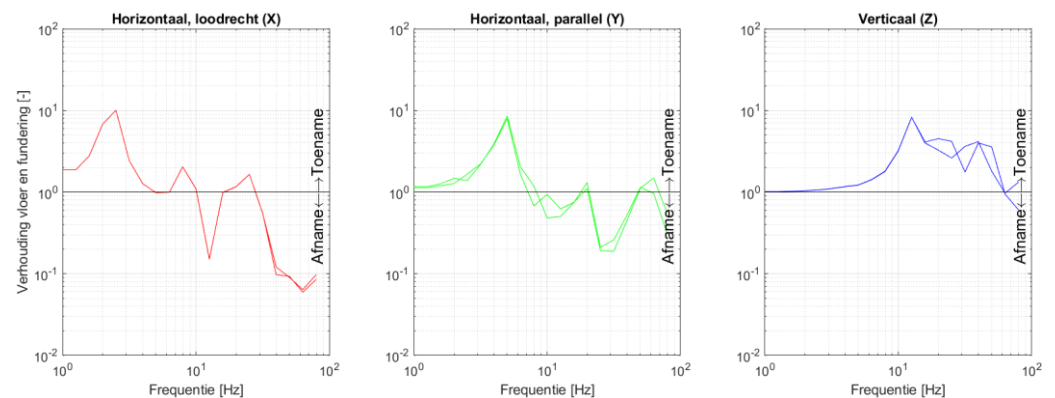
De overdrachten van fundering naar de vloer voor de laatste verdieping in de blokken H2A, H2B, H2C en H2F zijn weergegeven in Figuur V-1 tot en met Figuur V-4.



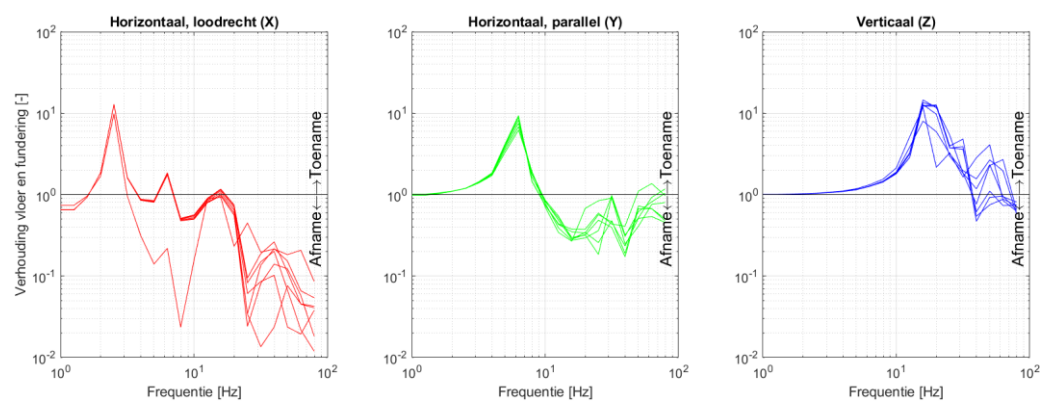
Figuur V - 1 Overdracht in blok H2A op de hoogste verdieping



Figuur V - 2 Overdracht in blok H2B op de hoogste verdieping

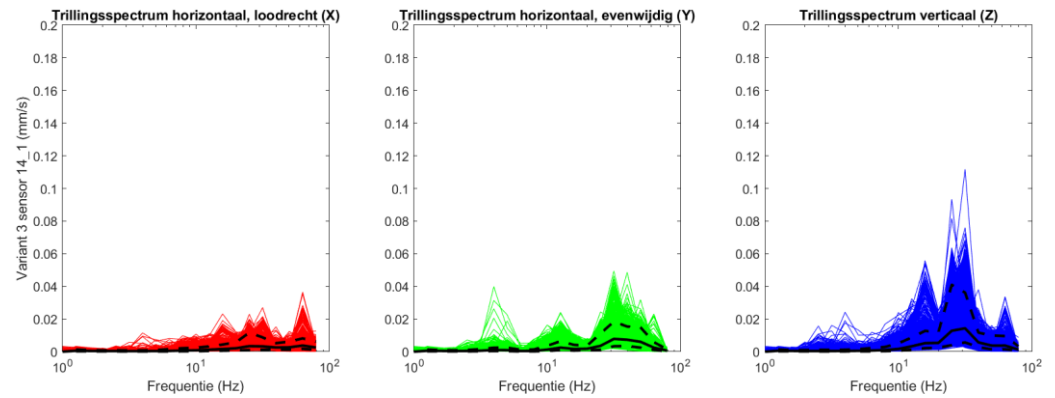


Figuur V - 3 Overdracht in blok H2C op de hoogste verdieping

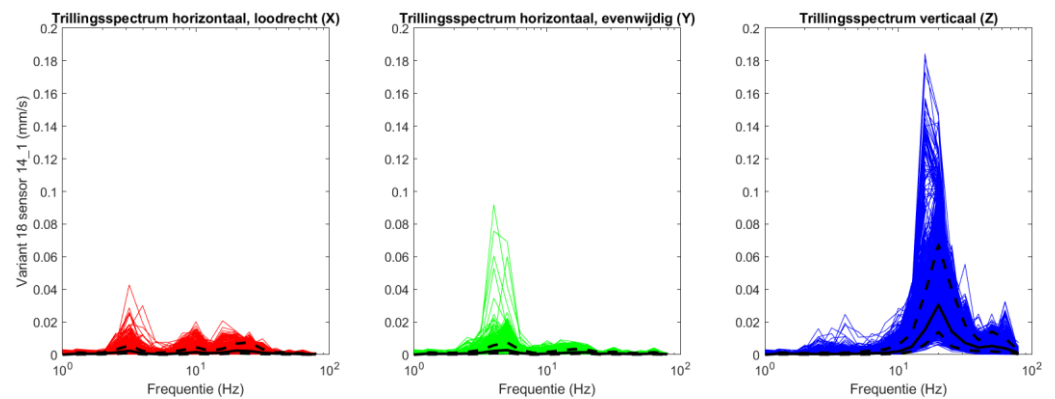


Figuur V - 4 Overdracht in blok H4F op de hoogste verdieping

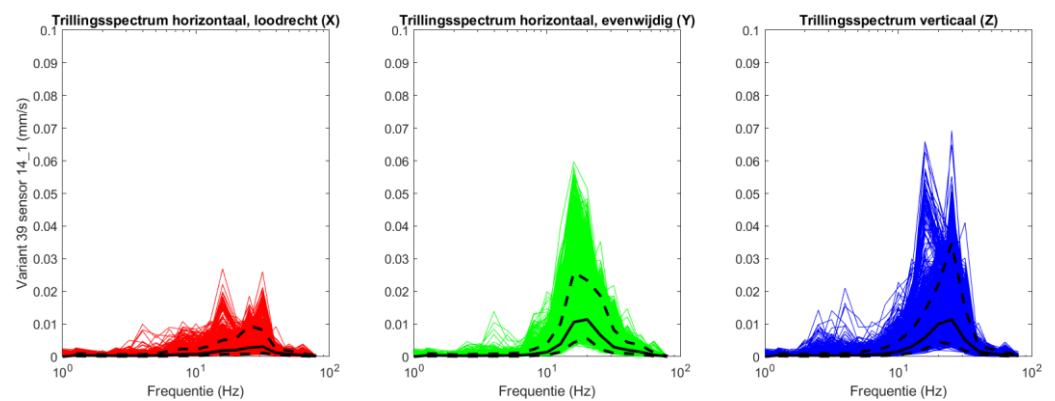
Bijlage VI – Trillingspectrum



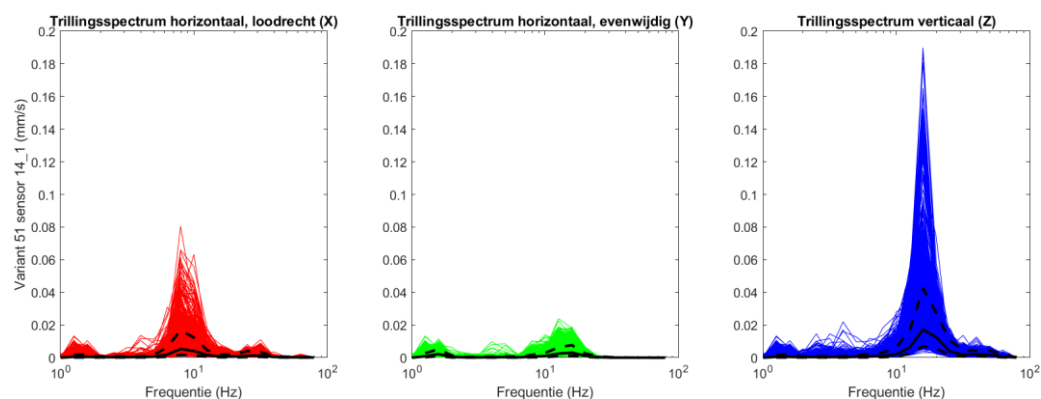
Figuur VI - 1 Trillingspectrum in blok H2A op de begane grond



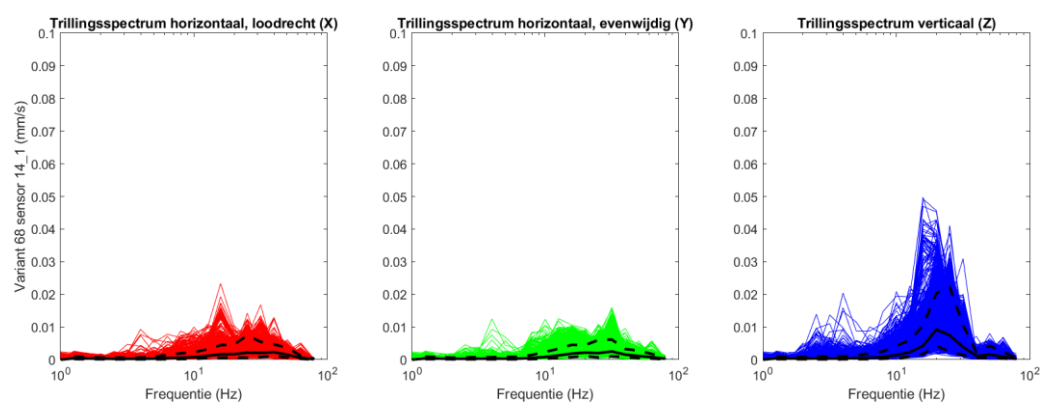
Figuur VI - 2 Trillingspectrum in blok H2A op de hoogste verdieping



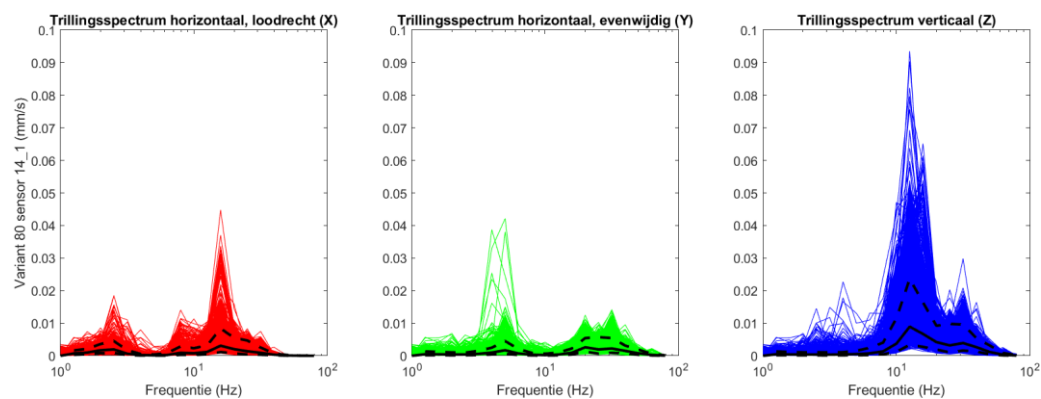
Figuur VI - 3 Trillingspectrum in blok H2B op de begane grond



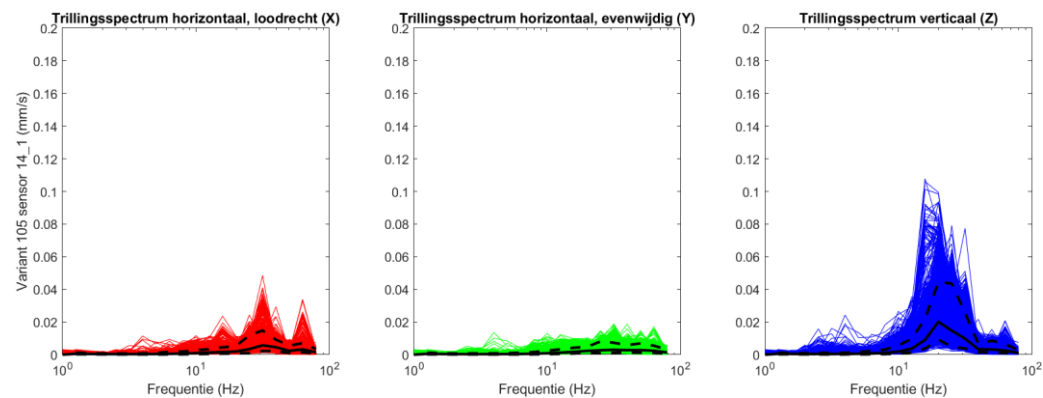
Figuur VI - 4 Trillingsspectrum in blok H2B op de hoogste verdieping



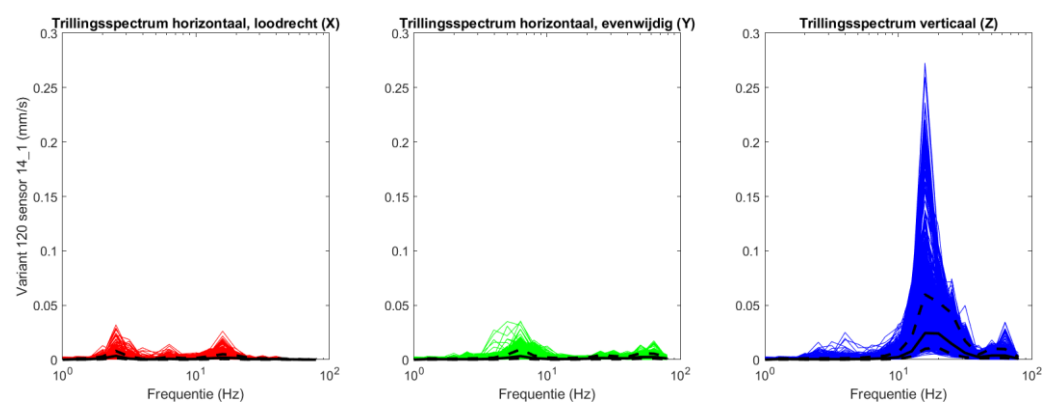
Figuur VI - 5 Trillingsspectrum in blok H2C op de begane grond



Figuur VI - 6 Trillingsspectrum in blok H2C op de hoogste verdieping



Figuur VI - 7 Trillingsspectrum in blok H4F op de begane grond



Figuur VI - 8 Trillingsspectrum in blok H4F op de hoogste verdieping

Bijlage VII – Resultaten maatregelen

In deze bijlage worden de resultaten van de in het rapport benoemde maatregelen weergegeven en beoordeeld volgens de SBR-B richtlijn.

Kleur	Toelichting
	Mogelijke overschrijding nieuwe situatie, alleen 's nachts Geen overschrijding bestaande situatie in nachtperiode
	Mogelijke overschrijding nieuwe situatie, zowel overdag als 's nachts Mogelijk overschrijding bestaande situatie in nachtperiode

Bouwblok H2A

Tabel VII -1: Prognose trillingen in Bouwblok H2A – zonder maatregelen

	X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
	v_per X	v_max_SBRB X	v_per Y	v_max_SBRB Y	v_per Z	v_max_SBRB Z
BG	0.00	0.09	0.00	0.19	0.01	0.29
1	0.00	0.13	0.00	0.11	0.02	0.52
2	0.00	0.11	0.00	0.13	0.02	0.55
3	0.00	0.08	0.00	0.15	0.02	0.58
4	0.00	0.09	0.00	0.16	0.02	0.60
5	0.00	0.06	0.00	0.18	0.03	0.54

Tabel VII -2: Prognose trillingen in Bouwblok H2A – afgeveerd op 7 Hz

	X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
	v_per X	v_max_SBRB X	v_per Y	v_max_SBRB Y	v_per Z	v_max_SBRB Z
BG	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.10
1	0.00	0.01	0.00	0.03	0.01	0.27
2	0.00	0.02	0.00	0.04	0.01	0.29
3	0.00	0.03	0.00	0.04	0.01	0.30
4	0.00	0.03	0.00	0.05	0.01	0.31
5	0.00	0.04	0.00	0.05	0.01	0.32

Tabel VII -3: Prognose trillingen in Bouwblok H2A - zonder opvullen met zand

	X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
	v_per X	v_max_SBRB X	v_per Y	v_max_SBRB Y	v_per Z	v_max_SBRB Z
BG	0.05	0.67	0.00	0.19	0.01	0.29
1	0.03	0.46	0.00	0.12	0.02	0.52
2	0.02	0.38	0.00	0.13	0.02	0.55
3	0.02	0.33	0.00	0.14	0.02	0.58
4	0.01	0.23	0.00	0.16	0.02	0.60
5	0.01	0.22	0.00	0.18	0.03	0.49

Tabel VII -4: Prognose trillingen in Bouwblok H2A - 1 verdieping minder

	X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
	v_per X	v_max_SBRB X	v_per Y	v_max_SBRB Y	v_per Z	v_max_SBRB Z
BG	0.00	0.08	0.00	0.19	0.02	0.30
1	0.00	0.14	0.00	0.11	0.02	0.58
2	0.00	0.13	0.00	0.12	0.02	0.61
3	0.00	0.09	0.00	0.13	0.02	0.64
4	0.00	0.08	0.00	0.14	0.03	0.48

Bouwblok H2B en H4E

Tabel VII -5: Prognose trillingen in Bouwblok H2B/H4E – zonder maatregelen

	X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
	v_per X	v_max_SBRB X	v_per Y	v_max_SBRB Y	v_per Z	v_max_SBRB Z
BG	0.00	0.07	0.01	0.31	0.01	0.21
1	0.00	0.09	0.00	0.14	0.01	0.32
2	0.00	0.10	0.00	0.11	0.02	0.40
3	0.00	0.15	0.00	0.09	0.02	0.47
4	0.00	0.20	0.00	0.10	0.02	0.44

Tabel VII -6: Prognose trillingen in Bouwblok H2B/H4E – afgeveerd op 7 Hz

	X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
	v_per X	v_max_SBRB X	v_per Y	v_max_SBRB Y	v_per Z	v_max_SBRB Z
BG	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.10
1	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.11
2	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.12
3	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.13
4	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.13

Tabel VII -7: Prognose trillingen in Bouwblok H2B/H4E – afgeveerd op 8 Hz

	X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
	v_per X	v_max_SBRB X	v_per Y	v_max_SBRB Y	v_per Z	v_max_SBRB Z
BG	0.00	0.03	0.00	0.05	0.00	0.17
1	0.00	0.03	0.00	0.05	0.00	0.19
2	0.00	0.04	0.00	0.05	0.00	0.20
3	0.00	0.05	0.00	0.02	0.01	0.20
4	0.00	0.05	0.00	0.03	0.01	0.21

Bouwblok H2C en H4D

Tabel VII -8: Prognose trillingen in Bouwblok H2C/H4D – zonder maatregelen

	X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
	v_per X	v_max_SBRB X	v_per Y	v_max_SBRB Y	v_per Z	v_max_SBRB Z
BG	0.00	0.05	0.00	0.07	0.01	0.16
1	0.00	0.08	0.00	0.10	0.01	0.23
2	0.00	0.08	0.00	0.13	0.01	0.25
3	0.00	0.07	0.00	0.11	0.01	0.28
4	0.00	0.08	0.00	0.09	0.01	0.31
5	0.00	0.05	0.00	0.12	0.01	0.34

Tabel VII -9: Prognose trillingen in Bouwblok H2C/H4D – afgeveerd op 7 Hz

	X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
	v_per X	v_max_SBRB X	v_per Y	v_max_SBRB Y	v_per Z	v_max_SBRB Z
BG	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.08
1	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.14
2	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.15
3	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.16
4	0.00	0.04	0.00	0.02	0.00	0.17
5	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.18

Tabel VII -10: Prognose trillingen in Bouwblok H2C/H4D – afgeveerd op 8 Hz

	X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
	v_per X	v_max_SBRB X	v_per Y	v_max_SBRB Y	v_per Z	v_max_SBRB Z
BG	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.15
1	0.00	0.03	0.00	0.05	0.00	0.23
2	0.00	0.02	0.00	0.07	0.01	0.25
3	0.00	0.05	0.00	0.09	0.01	0.27
4	0.00	0.07	0.00	0.11	0.01	0.29
5	0.00	0.09	0.00	0.14	0.01	0.30

Bouwblok H4F**Tabel VII -11: Prognose trillingen in Bouwblok H4F – zonder maatregelen**

	X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
	v_per X	v_max_SBRB X	v_per Y	v_max_SBRB Y	v_per Z	v_max_SBRB Z
BG	0.00	0.14	0.00	0.07	0.02	0.35
1	0.00	0.08	0.00	0.09	0.03	0.47
2	0.00	0.08	0.00	0.13	0.02	0.40
3	0.00	0.08	0.00	0.12	0.02	0.50
4	0.00	0.06	0.00	0.08	0.03	0.60
5	0.00	0.05	0.00	0.09	0.03	0.67

Tabel VII -12: Prognose trillingen in Bouwblok H4F – afgeveerd op 7 Hz

	X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
	v_per X	v_max_SBRB X	v_per Y	v_max_SBRB Y	v_per Z	v_max_SBRB Z
BG	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.11
1	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.13
2	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.14
3	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.15
4	0.00	0.04	0.00	0.02	0.00	0.16
5	0.00	0.05	0.00	0.02	0.00	0.17

Tabel VII -13: Prognose trillingen in Bouwblok H4F – afgeveerd op 8 Hz

	X-richting		Y-richting		Z-richting	
	Vper	Vmax	Vper	Vmax	Vper	Vmax
	v_per X	v_max_SBRB X	v_per Y	v_max_SBRB Y	v_per Z	v_max_SBRB Z

BG	0.00	0.04	0.00	0.05	0.00	0.19
1	0.00	0.04	0.00	0.05	0.00	0.22
2	0.00	0.04	0.00	0.06	0.00	0.23
3	0.00	0.05	0.00	0.06	0.01	0.25
4	0.00	0.08	0.00	0.07	0.01	0.26
5	0.00	0.11	0.00	0.08	0.01	0.27