

RAPPORT

Thomas à Kampis- plantsoen

Trillingen in nieuwbouw,
analyse met FEM berekeningen

Versie: 2.0

Status: Vrijgegeven

Datum: 16-11-2023

Kenmerk: D79-WGA-HS-RAP-
23008484

Autorisatieblad

Thomas a Kampisplantsoen

Trillingen in nieuwbouw, analyse met FEM berekeningen

	Naam	Akkoord	Datum
Opgesteld door			16-11-2023
Gecontroleerd door			16-11-2023
Vrijgegeven door			16-11-2023

Versiehistorie

Versie	Naam	Datum	Korte toelichting
V0.3		10-11-2023	Concept versie ter review naar opdrachtgever en gemeente
V1.0		16-11-2023	Aanpassing op basis van review opdrachtgever en gemeente

Inhoudsopgave

1	Aanleiding	1
1.1	Vraag	1
1.2	Aanpak	1
1.3	Leeswijzer	1
2	Situatie	2
2.1	Omgeving	2
2.2	Bouwlocatie en metingen	2
2.3	Geplande bebouwing	3
2.4	Uitgangspunten	4
3	Beoordelingskader	6
3.1	Bestemmingsplan	6
3.2	Algemeen SBR-richtlijn	6
3.3	Grootheden	6
3.4	Streefwaarden	7
3.4.1	Nieuwe of bestaande situatie	7
3.4.2	Periode gedurende de dag	7
3.4.3	Gebouwfunctie	7
3.5	Beoordeling in huidige onderzoek	8
4	Modelbeschrijving	9
4.1	Prognosemethode	9
4.1.2	Overdracht van locatie langeduurmeting naar locatie gebouw	9
4.1.3	Overdracht van maaiveld naar fundering in FEM	10
4.1.4	Overdracht van fundering naar midden vloerveld	11
5	Resultaten	14
5.1	Prognose voor constructie van beton	14
5.2	Prognose voor constructie van kalkzandsteen	15
5.3	Maatregelen	15
5.3.1	Verticale trillingen	15
5.3.2	Horizontale trillingen	16
5.3.3	Maatregeladvies	16
5.3.4	Uitwerking maatregelen	16
6	Conclusies	17
6.1	Aanbevelingen	17
	Colofon	18
	Bijlage 1 Berekende overdachten van maaiveld naar vloer (beton)	19
	Bijlage 2 Berekende overdachten van maaiveld naar vloer (kalkzandsteen)	22
	Bijlage 3 Verdeling van de trillingen over het gebouw (beton)	24
	Bijlage 4 Verdeling van de trillingen over het gebouw (kalkzandsteen)	26

1 Aanleiding

Portaal ontwikkelt een project in de Majellaknoop in de gemeente Utrecht: de huidige bebouwing zal worden vervangen door nieuwbouw. De grens van het gebied van de nieuwe bebouwing ligt zo'n 60 meter ten zuiden van de spoorlijn Utrecht-Woerden.

Om trillingshinder bij nieuwe bouwplannen te voorkomen, legt de gemeente Utrecht bij bouwaanvragen binnen 100 meter naast het spoor grenswaarden voor trillingssterkten op. Dat is op deze locatie van toepassing. Dit dwingt tot trillingsonderzoek en waar nodig het treffen van maatregelen.

In 2021 heeft Movares in opdracht van Portaal trillingsonderzoek verricht bij het Thomas à Kempisplantsoen. Uit dit onderzoek volgde dat in de eerstelijns bebouwing lichte maatregelen nodig zijn om de trillingen te beperken. Movares heeft geadviseerd om voor de eerstelijns gebouwen FEM berekeningen uit te voeren.

1.1 Vraag

Portaal vraagt aan Movares om met FEM berekeningen een trillingsonderzoek uit te voeren ten behoeve van het bestemmingsplan. Daarbij vraagt Portaal op basis van het Voorlopig Ontwerp inzichtelijk te maken of er maatregelen nodig zijn om trillingen te beperken. Als deze maatregelen nodig zijn, dan vraagt Portaal om kwalitatief inzichtelijk te maken met welke maatregelen aan het beoordelingskader kan worden voldaan.

1.2 Aanpak

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

1. Uitvoeren van een trillingsmeting ter plaatse van (een deel van) het plangebied, met de bestemming wonen. Deze meting bestaat de volgende onderdelen:
 - a. Meting waarmee over langere tijd op maaiveld de trillingen vastgesteld worden ter plaatse van de bouwblokken die zich het dichtst bij het spoor bevinden. Dit is noodzakelijk in verband met het grillige karakter van goederentreinen door grote variatie in gewicht, passeertijd, etc.
 - b. Meting waarmee we gedurende een korte periode de overdracht van de trillingen op maaiveld naar trillingen op de fundering van de nabijgelegen bestaande bebouwing vaststellen.
 - c. Meting waarmee we gedurende een korte periode de demping van trillingen in de bodem bepalen binnen het bouwvlak.
2. Het maken van een prognose van trillingsniveaus met behulp van FEM berekeningen op basis van de beschikbare bouwgegevens (VO) en de resultaten van de metingen. Op basis van eerder trillingsonderzoek voeren we deze FEM berekeningen uit voor het bouwdeel dat het dichtst bij het spoor ligt (noordzijde van het Noordblok).
3. Op basis van deze prognose geven wij vervolgens een advies over hoe trillingshinder en eventueel trillingsschade in de woningen voorkomen kan worden.

1.3 Leeswijzer

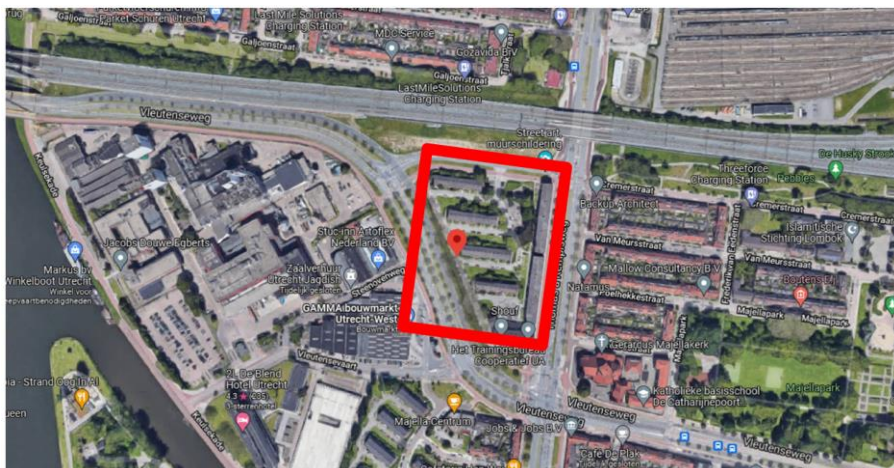
De situatiebeschrijving is weergegeven in hoofdstuk 2. Het beoordelingskader voor trillingsschade staat beschreven in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 beschrijft de modelberekeningen. Hoofdstuk 5 bevat een analyse van de trillingsprognose en advies t.a.v. (bouwkundige) optimalisaties om trillingshinder te voorkomen. Het laatste hoofdstuk beschrijft de conclusies en aanbevelingen.

2 Situatie

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

2.1 Omgeving

De onderzoekslocatie bevindt zich ten zuiden van de spoorlijn Utrecht - Woerden. Een kaart van de huidige situatie en het projectgebied is opgenomen in Figuur 2-1. De spoorlijn wordt voornamelijk door reizigerstreinen gebruikt. Incidenteel rijden er goederentreinen en onderhoudstreinen.

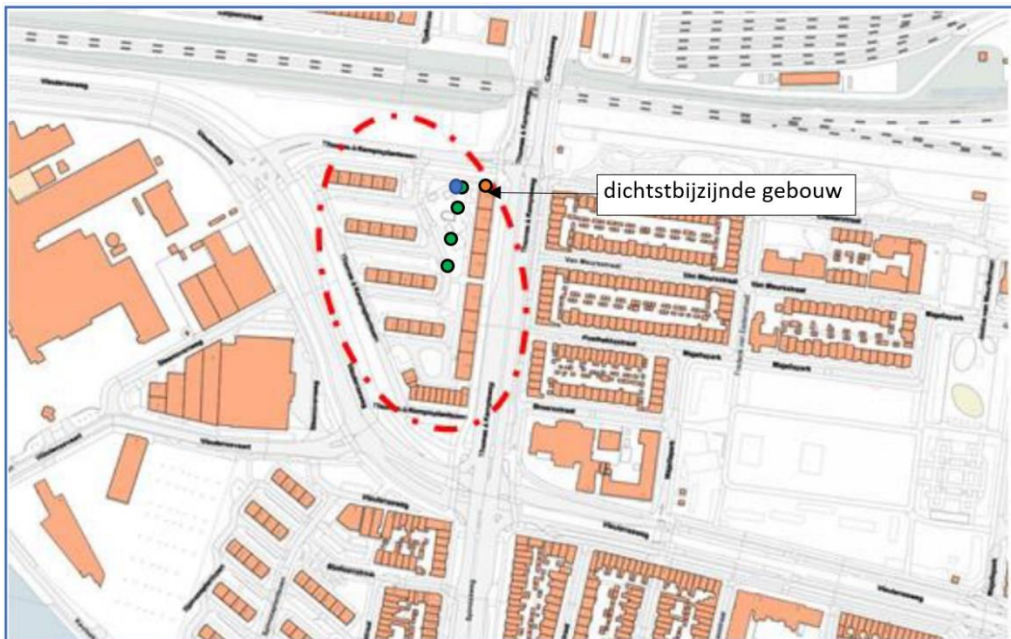


Figuur 2-1 huidige situatie van het projectgebied met aan de noordzijde de spoorlijn Utrecht-Woerden

Het bouwvlak is omringd door wegen die mogelijk ook tot trillingen in de gebouwen leiden. Los van de ontwikkeling van dit project zal de komende jaren het wegontwerp wijzigen door project Westelijke Stadsboulevard van de gemeente Utrecht. Hierbij verandert de Thomas a Kempisweg in een groenstrook, en al het verkeer over de Cartesiusweg over de weg Thomas a Kempisplantsoen gaat rijden. Dit trillingsonderzoek is gericht op spoorverkeer. Trillingen die mogelijk voortkomen uit de toekomstige situatie van het wegverkeer zijn in dit onderzoek niet meegenomen.

2.2 Bouwlocatie en metingen

De metingen zijn uitgevoerd op maaiveldniveau op de locatie van de geplande nieuwbouw. Een plattegrond van de locatie met daarop de meetpunten is weergegeven in Figuur 2-2. Op het lange-duur meetpunt (blauw) is ruim 2 weken gemeten. Op de overige meetpunten is gedurende enkele uren gemeten. De meetpunten voor de afstandsdemping zijn gekozen voor de zone waar op voorhand de meeste trillingen van treinverkeer te verwachten zijn in het te ontwikkelen gebied (tot een afstand van ca. 100 meter vanaf het spoor).



Figuur 2-2 Locatie van de meetlocatie met de meetpunten.

Blauw: langeduur meetpunt, op 58 afstand van hart 1^e spoor

Groen: meetpunten afstandsdemping

- 1^e ter plaatse van lange duur meetpunt

- 2^e op 10 meter van 1^e meetpunt

- 3^e op 35 meter van 1^e meetpunt

- 4^e op 55 meter van 1^e meetpunt

Oranje: meetpunt fundering

2.3 Geplande bebouwing

De geplande bebouwing bestaat uit een noordblok en een zuidblok (Figuur 2-3). Voor het gebied is in een eerder stadium een verkennend onderzoek uitgevoerd¹. Alleen de noordzijde van het noordblok bevindt zich in de zone waar mogelijk overschrijdingen kunnen optreden. Een aanzicht van de noordgevel van het noordblok staat in Figuur 2-4. Dit is de gevel die het dichtst bij het spoor ligt.

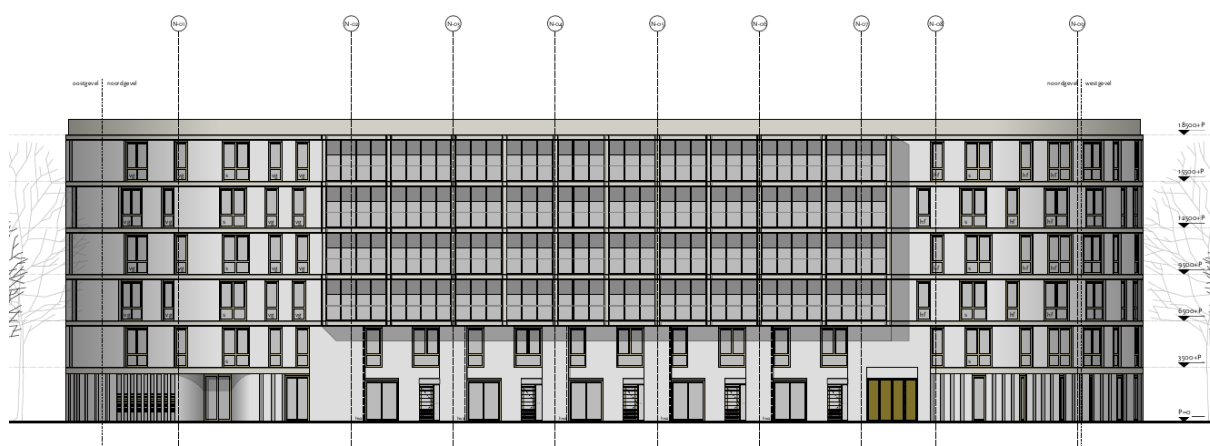
Het voorgestelde bouwsysteem is als volgt:

- In het werk gestorte betonnen balkenrooster en ter plaatse van geconcentreerde belastingen toepassing van poeren op betonnen palen;
- Begane grondvloer door middel van een geïsoleerde systeemvloer en indien nodig voorzien van een druklaag;
- Verdiepingsvloeren en daken door middel van breedplaatvloeren;
- Dragende wanden door middel van kalkzandsteen en/of prefab beton;
- Stijpkernen in de vorm van liften en trappenhuisen door middel van kalkzandsteen en/of prefab beton;
- Galerijen en/of balkons door middel van prefab beton en/of verjongde breedplaatvloeren;
- Daar waar constructief of bouwkundig benodigd toepassing van staalconstructies.

¹ Nieuwbouw Thomas à Kempisplantsoen, Trillingsonderzoek, D79-WGA-KA-2000020 / Proj.nr. MN001834 / Vrijgegeven / Versie 1.0 / 2 maart 2021



Figuur 2-3 Plattegrond projectgebied. Boven: noordblok, onder: zuidblok.



Figuur 2-4 Aanzicht noordgevel van noordblok

2.4 Uitgangspunten

De volgende documenten zijn als uitgangspunt genomen voor het onderzoek.

Tabel 2-1 Uitgangspunten

	Document	Naam	Datum
[1]	Voorlopig Ontwerp	ThaK, Utrecht, Voorlopig Ontwerp, Pieters Bouwtechniek, R-721105-VO-001A	11-3-2022
[2]	Verkennd trillingsonderzoek	Nieuwbouw Thomas à Kempisplantsoen, Trillingsonderzoek, D79-WGA-KA-2000020 / Proj.nr.	2-3-2021

	Document	Naam	Datum
		MN001834 / Vrijgegeven / Versie 1.0	
[3]	Grondonderzoek	Uit Dinoloket. BRO-ID: CPT000000022890	9-1-2002
[4]	Stedenbouwkundig Programma van Eisen	Stedenbouwkundig Programma van Eisen, gemeente Utrecht	November 2021

3 Beoordelingskader

3.1 Bestemmingsplan

In het stedenbouwkundig programma van eisen [4] is de volgende tekst opgenomen over trillingen:

5.2 Trillingen spoor

Om trillingshinder bij nieuwe bouwplannen te voorkomen worden door de gemeente Utrecht grenswaarden voor trillingssterktes opgelegd bij bouwaanvragen binnen 100 meter naast het spoor. De grens van het gebied waar de nieuwe bebouwing zou moeten worden gerealiseerd ligt zo'n 60 meter ten zuiden van de spoorlijn Utrecht-Rotterdam/Den Haag. Bij het ontwerp wordt rekening gehouden met de ambitie van de gemeente om te voldoen aan de SBR-B grenswaarden die gelden voor 'nieuwe situaties' volgens de richtlijn en, indien dat niet haalbaar blijkt, met inzet van alle mogelijke maatregelen een zo laag mogelijke V_{max} die echter niet hoger is dan de streefwaarde voor 'bestaande situaties'.

Het aspect trilling vormt geen belemmering voor de uitvoerbaarheid van het bestemmingsplan. Pas bij de aanvraag van de omgevingsvergunning zal moeten worden aangetoond dat het definitieve ontwerp (met mogelijke maatregelen) voldoet aan de grenswaarden. Dan is er weer onderzoek nodig.

3.2 Algemeen SBR-richtlijn

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 in nieuwbouw als gevolg van passerende treinen onwaarschijnlijk. 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.

3.3 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 over de beoordelingsperiode (dag, avond, nacht). Trillingssnelheden onder de 0.1 zijn niet of nauwelijks voelbaar en worden niet meegenomen in de bepaling van V_{per} . Zie ook par. 9.8 van de SBR B-richtlijn.

3.4 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.

3.4.1 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. Uit het bestemmingsplan blijkt dat het gebouw voldoet als er aan de streefwaarden voor nieuwe situaties wordt voldaan.

In de toelichting op het bestemmingsplan staat echter ook dat het vermijden van overschrijdingen van de streefwaarden voor nieuwe situaties niet realistisch is. Uit de voorwaardelijke bepaling van het bestemmingsplan voldoet het gebouw ook als de trillingen niet hoger zijn dan de streefwaarden voor bestaande situaties, onder de voorwaarde dat alle doelmatige en kosteneffectieve maatregelen om de trillingssterkte te verminderen worden getroffen.

3.4.2 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.

3.4.3 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. In de beoordeling is gekeken naar gebouwen met bestemming *wonen*, zie de omkaderde waarden in de tabellen. Voor de toetsing conform de voorwaardelijke bepaling uit het bestemmingsplan, zijn zowel de streefwaarden voor nieuwe situaties als de streefwaarden voor bestaande situaties van belang.

Tabel 3-1 Streefwaarden bij beoordeling volgens nieuwe situaties 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	---

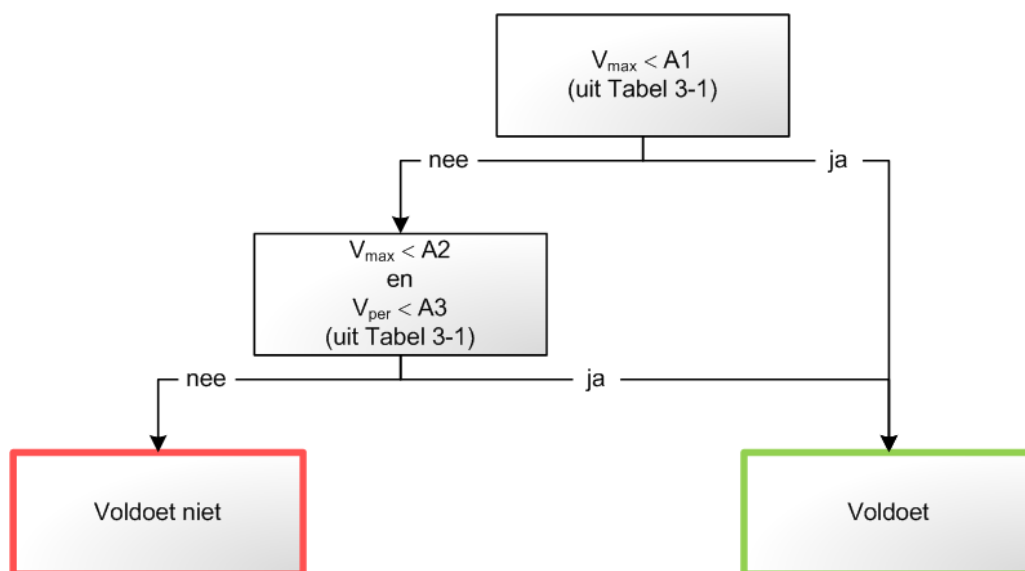
¹⁾ Een streefwaarde van 0.1 betekent een waarde kleiner dan 0.15

Tabel 3-2 Streefwaarden bij beoordeling volgens bestaande situaties volgens SBR B-richtlijn

Gebouwfunctie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Gezondheidszorg	0.2	0.8	0.10	0.2	0.4	0.10
Wonen	0.2	0.8	0.10	0.2	0.4	0.10
Kantoor	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15
Bijeenkomsten	0.3	1.2	0.15	0.3	1.2	0.15
Kritische werkruimte	0.1	0.1	-.--	0.1	0.1	-.--

3.5 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 volgens nieuwe situaties in SBR B-richtlijn (bij beoordeling volgens bestaande situaties Tabel 3-2 gebruikt i.p.v. Tabel 3-1)

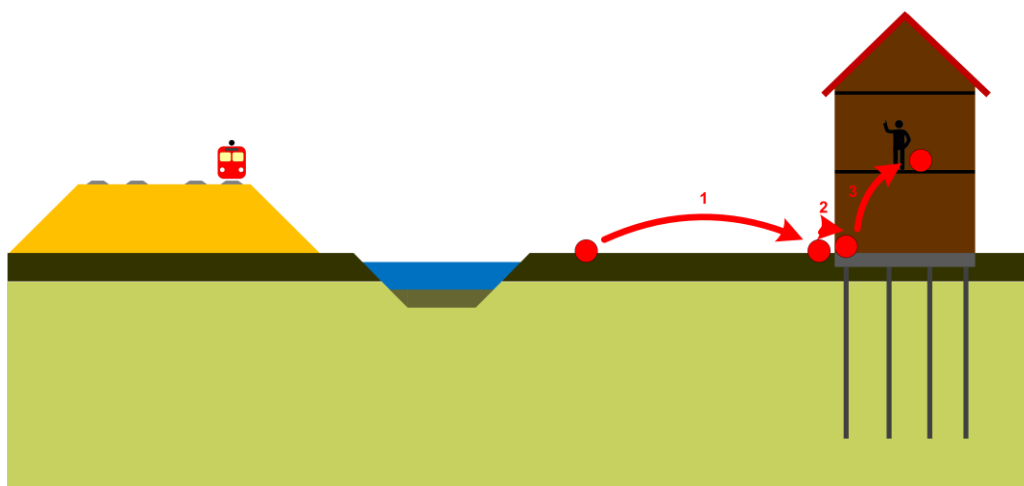
4 Modelbeschrijving

In het eerder uitgevoerde verkennende trillingsonderzoek zijn reeds trillingsmetingen uitgevoerd. Een beschrijving van de metingen is opgenomen in de rapportage [2]. In dit onderzoek met FEM berekeningen combineren we de resultaten van de trillingsmetingen met de resultaten van de FEM berekeningen, en geven daarmee een voorspelling van de te verwachten trillingen op basis van het Voorlopig Ontwerp.

4.1 Prognosemethode

De resultaten van de metingen 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 4-1.



Figuur 4-1 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 locatie op maaiveld ter plaatse van het bouwblok. Hiervoor gebruiken we de frequentie-afhankelijke bodemdemping die met de korteduurmeting op maaiveld is bepaald.
2. De trillingen op maaiveld ter plaatse van het bouwblok worden vertaald naar een meetpunt op de fundering van het bouwblok, op basis van de eigenschappen van het gebouw (afmetingen, type fundering) en de bodem. In dit onderzoek gebeurt deze vertaling met behulp van eindige elementenmodellen van bodem en een vereenvoudigd gebouw.
3. De trillingen op de fundering worden vertaald naar een meetpunt op de vloer van het bouwblok op basis van de eigenschappen van het gebouw (afmetingen, type constructie). In dit onderzoek gebeurt deze vertaling met behulp van eindige elementen modellen van het gebouw.

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.

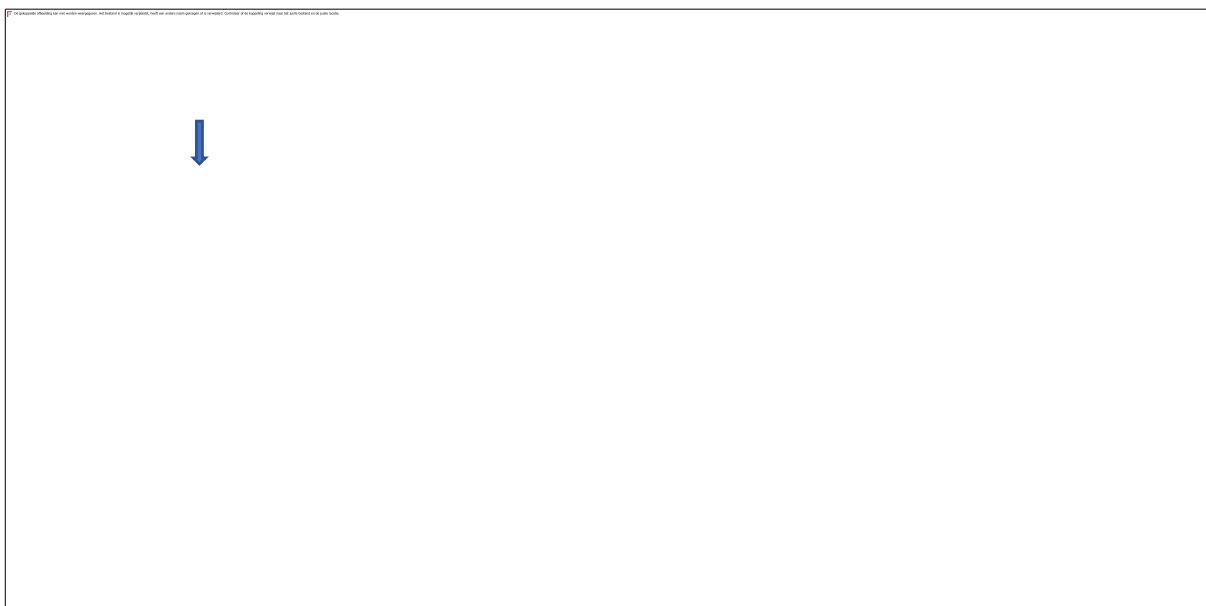
4.1.2 Overdracht van locatie langeduurmeting naar locatie gebouw

Op basis van de resultaten van de korteduurmeting is de bodemdemping bepaald [2]. De bodemdemping drukken we frequentie-afhankelijk uit met de Barkan-vergelijking, een empirische

formule die de uitdemping van de trillingen met de afstand beschrijft. De Barkan-vergelijking geeft de overdracht van de locatie van de langeduurmeting naar de locatie van het gebouw.

4.1.3 Overdracht van maaiveld naar fundering in FEM

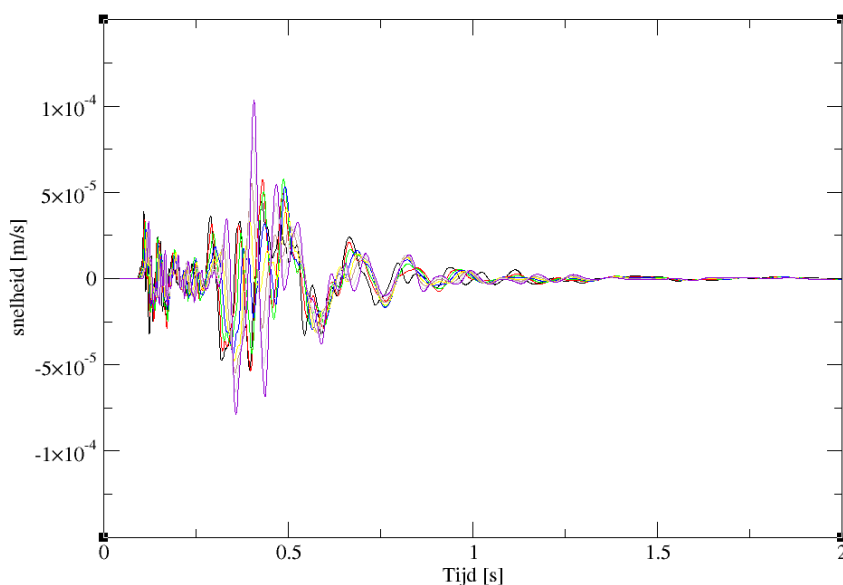
Om de frequentie-, fase- en plaatsafhankelijke overdrachtsfactoren van maaiveld naar verschillende posities op de fundering te bepalen, zijn er 3D FEM modellen opgezet met het gebouw inclusief de fundering en de heipalen. Een afbeelding van dit model staat in Figuur 4-2. De eigenschappen van de bodem zijn gebaseerd op het ter plaatse uitgevoerd geotechnisch bodemonderzoek ([3]).



Figuur 4-2 FEM model noordzijde noordblok, inclusief bodem en heipalen

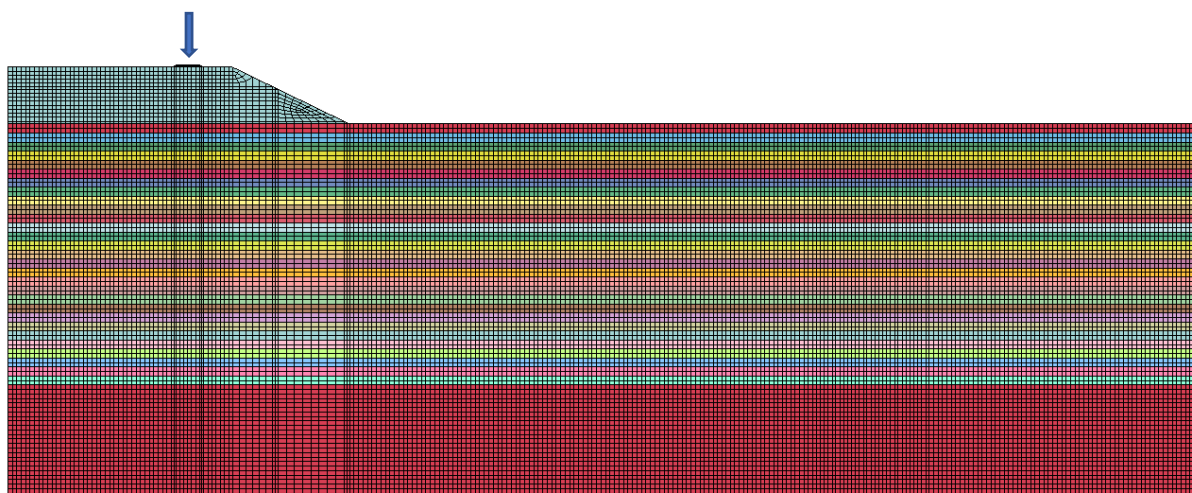
De dynamische belasting vindt plaats ter plaatse van de pijl. De berekende responsies ter plaatse van de fundering in deze modellen wordt toegepast als opgelegde trilling aan de onderzijde van de gebouwmodellen (Figuur 4-5). De gemodelleerde doorsnede is een doorsnede van het gebouw. Deze doorsnede is representatief voor het midden van het gebouw.

De responsie op de diverse paalposities is terug te zien in Figuur 4-3. In dit tijdsafhankelijke signaal is te zien dat de palen niet gelijktijdig worden aangestoten (faseverschil).



Figuur 4-3 Verticale responsie paalkoppen in de tijd

Een zelfde model van de bodem is opgesteld zonder het gebouw. Een afbeelding van dit model staat in Figuur 4-4.

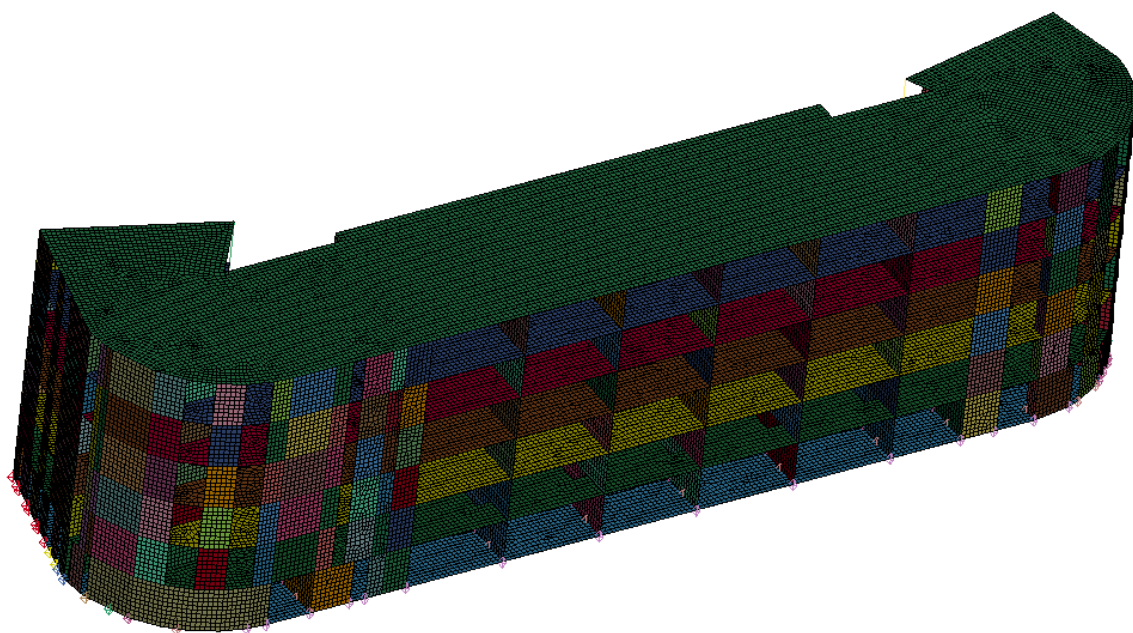


Figuur 4-4 3D-FEM model maaiveld

De overdracht van maaiveld naar midden vloerveld ontstaat door de trillingen ter plaatse van de vloeren uit het gebouwmodel (Figuur 4-5) te delen door de trillingen op maaiveld ter plaatse van de voorzijde van het gebouw.

4.1.4 Overdracht van fundering naar midden vloerveld

De overdracht van fundering naar midden vloerveld is afhankelijk van de gebouwconstructie, gebouwfafmetingen, type vloer en de eigenfrequentie van de vloer. Op basis van de constructieve tekeningen van het gebouw, is een eindige elementenmodel van het bouwblok opgesteld. Een afbeelding van dit model staat in Figuur 4-5. De begrenzing aan de achterzijde is ter plaatse van de dilatatie in het gebouw.

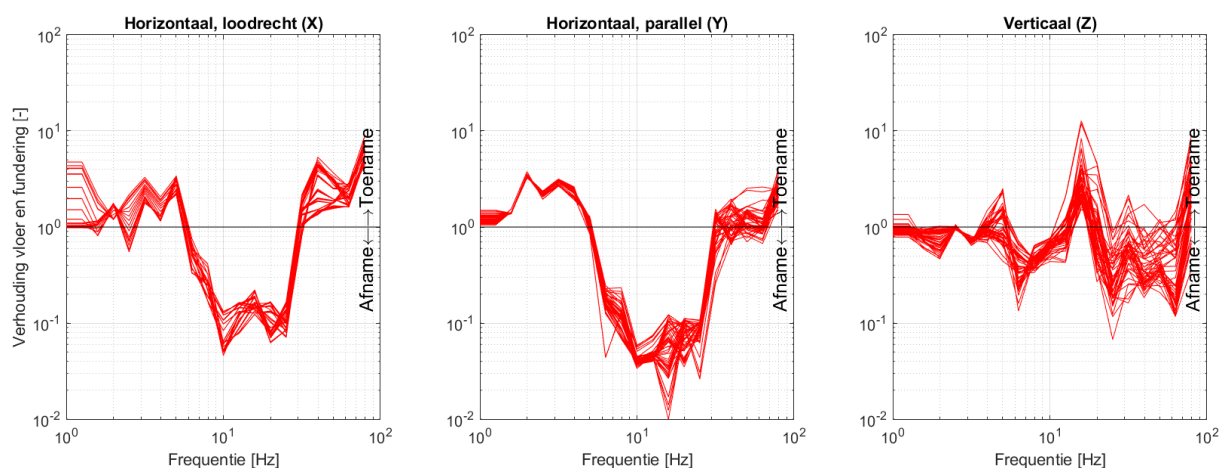


Figuur 4-5 3D-FEM model noordzijde noordblok

Dit eindige elementenmodel wordt aan de onderzijde (fundering) belast met de responsie uit het bodemmodel (§5.1.3). Uit de dynamische respons van het gebouw op deze belasting, volgen overdrachten van maaiveld naar de verschillende vloeren in het gebouw.

In Figuur 4-6 is de overdracht van maaiveld naar de bovenste verdieping van het noordgebouw weergegeven voor een draagconstructie van beton. Uit deze grafieken komt naar voren dat horizontaal vooral laagfrequente trillingen (< 8 Hz) worden versterkt, en dat frequenties boven 8 Hz worden verzwakt. Ook hoge frequenties (> 25 Hz) worden versterkt ten opzichte van het maaiveld. Dit heeft te maken met de heipalen die hoogfrequente trillingen van diepere grondlagen doorgeven aan het gebouw.

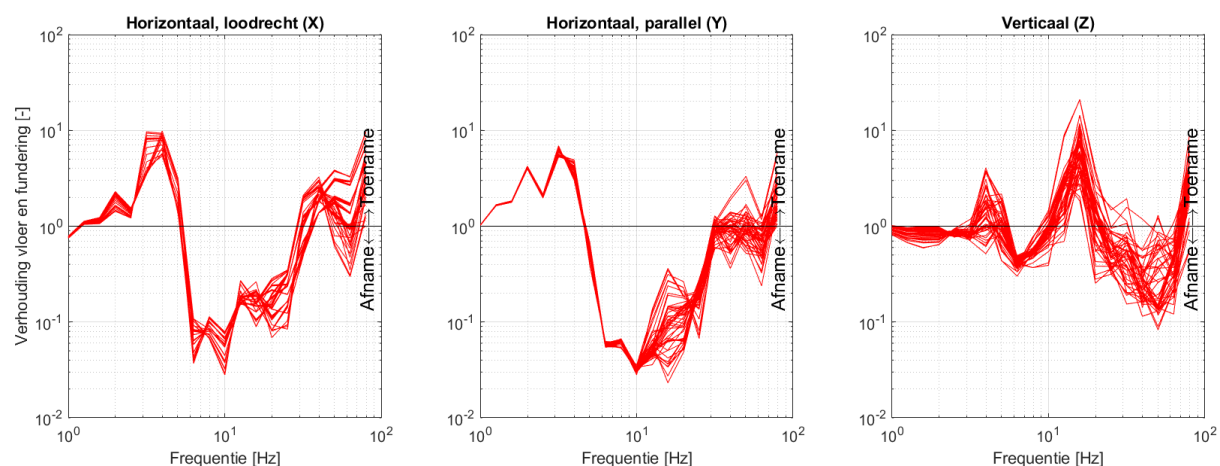
In verticale richting valt een versterking rond een frequentie van ca. 16 Hz op. Dit heeft te maken met verticale opslingering van de vloeren in het gebouw, in combinatie met een versterking van de trillingen op de fundering ten opzichte van de maaiveldtrillingen bij die frequentie. De overige overdrachten van maaiveld naar fundering staan in Bijlage 2.



Figuur 4-6 Overdracht frequentie-afhankelijk bovenste verdieping noordgebouw (beton)

In Figuur 4-7 is de overdracht van maaiveld naar de bovenste verdieping van het noordgebouw weergegeven voor een draagconstructie van kalkzandsteen. Het beeld voor de horizontale trillingen is vergelijkbaar met het beeld bij een betonnen draagconstructie, alleen de mate van versterking is groter dan bij een betonnen draagconstructie.

In verticale richting valt ook een versterking rond een frequentie van ca. 16 Hz op, met een sterkere opslingingering dan bij de betonnen draagconstructie. Dit heeft te maken met verticale opslingingering van de vloeren in het gebouw, in combinatie met een versterking van de trillingen op de fundering ten opzichte van de maaiveldtrillingen bij die frequentie. De overige overdrachten van maaiveld naar fundering staan in Bijlage 2.



Figuur 4-7 Overdracht frequentie-afhankelijk bovenste verdieping noordgebouw (kalkzandsteen)

5 Resultaten

Voor het noordgebouw is een prognose gemaakt van de trillingen in het gebouw op de vloeren van de bewoonde verdiepingen. Overschrijdingen van het beoordelingskader zijn in de tabel oranje gearceerd wanneer er alleen een overschrijding optreedt van de streefwaarden voor de nacht, en rood als ook de streefwaarden voor de dag worden overschreden. In en Tabel 5 3 zijn de resultaten van dit onderzoek weergegeven.

Tabel 5-1 Toelichting beoordeling resultaten

Kleur	Toelichting	Streefwaarde nieuwe situatie	Streefwaarde bestaande situatie
Vmax	Overschrijding alleen in de nachtperiode	0.2	0.4
Vmax	Overschrijding in de dag- en avondperiode	0.4	0.8
Vper	Overschrijding in de dag-, avond- en nachtperiode	0.05	0.1

5.1 Prognose voor constructie van beton

In Tabel 5-2 staan de resultaten voor een draagconstructie van beton. Ten aanzien van de trillingssterkte $V_{\max}$ geldt het volgende:

- In de horizontale X-richting (loodrecht op het spoor) zijn de maximale trillingen hoger dan de streefwaarden voor nieuwe situaties voor de nachtperiode en voldoen de trillingen aan de streefwaarden voor bestaande situaties.
- In de horizontale Y-richting (evenwijdig het spoor) voldoende trillingen aan de streefwaarden voor nieuwe en bestaande situaties.
- In de verticale Z-richting zijn de maximale trillingen hoger dan de streefwaarden voor de dag- en nachtperiode, en is er een beperkte overschrijding van de streefwaarde voor bestaande situaties in de nachtperiode.

Ten aanzien van de trillingsintensiteit V_{per} zijn er geen overschrijdingen.

In Bijlage 3 is een overzicht opgenomen waarin te zien is op welke posities in het gebouw de grootste trillingen optreden ($V_{\max}$). De grootste trillingen in de X-richting treden op aan de zijkanten van het gebouw. In de Z-richting zijn er enkele posities in het gebouw aan de zijde van de Thomas à Kempis weg met de hoogste trillingen terwijl de trillingen op overige posities voldoen aan de streefwaarden voor nieuwe situaties.

Tabel 5-2 Maatgevende resultaten per verdieping voor een constructie van beton

Verdieping	Nieuwe Situatie						Bestaande Situatie					
	v_per X	v_max X	v_per Y	v_max Y	v_per Z	v_max Z	v_per X	v_max X	v_per Y	v_max Y	v_per Z	v_max Z
0	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1
1	0	0.3	0	0.1	0.02	0.2	0	0.3	0	0.1	0.02	0.2
2	0	0.2	0	0.1	0.04	0.4	0	0.2	0	0.1	0.04	0.4
3	0	0.2	0	0.1	0.04	0.4	0	0.2	0	0.1	0.04	0.4
4	0.01	0.3	0	0.2	0.05	0.5	0.01	0.3	0	0.2	0.05	0.5
5	0.01	0.3	0	0.2	0.05	0.5	0.01	0.3	0	0.2	0.05	0.5

5.2 Prognose voor constructie van kalkzandsteen

In Tabel 5-3 staan de resultaten voor een draagconstructie van kalkzandsteen. Ten aanzien van de trillingssterkte $V_{\max}$ geldt het volgende:

- In de horizontale X-richting (loodrecht op het spoor) zijn de maximale trillingen hoger dan de streefwaarden voor nieuwe situaties en bestaande voor de dag- en nachtperiode.
- In de horizontale Y-richting (evenwijdig het spoor) zijn de trillingen hoger dan de streefwaarden voor nieuwe situaties in de nachtperiode en voldoen aan de streefwaarden voor bestaande situaties.
- In de verticale Z-richting zijn de maximale trillingen hoger dan de streefwaarden voor nieuwe situaties en bestaande voor de dag- en nachtperiode.

Ten aanzien van de trillingsintensiteit V_{per} zijn er in de verticale Z-richting overschrijdingen van de streefwaarden voor nieuwe situaties, en wordt voldaan aan de streefwaarden voor bestaande situaties.

In Bijlage 3 is een overzicht opgenomen waarin te zien is op welke posities in het gebouw de grootste trillingen optreden ($V_{\max}$). De grootste trillingen in de X-richting treden op aan de zijkanten van het gebouw, maar op de gehele bovenste verdiepingen zijn de trillingen hoger dan de streefwaarde voor bestaande situaties in de nachtperiode. In de Z-richting is er een aantal overschrijdingen van de streefwaarden voor bestaande situaties op specifieke locaties aan de zijkanten van het gebouw, maar voldoet het grootste deel aan de streefwaarden voor bestaande situaties.

Tabel 5-3 Maatgevende resultaten per verdieping voor een constructie van kalkzandsteen

Verdieping	Nieuwe Situatie						Bestaande Situatie					
	v_per	v_max	v_per	v_max	v_per	v_max	v_per	v_max	v_per	v_max	v_per	v_max
	X	X	Y	Y	Z	Z	X	X	Y	Y	Z	Z
0	0	0.1	0	0.1	0.01	0.2	0	0.1	0	0.1	0.01	0.2
1	0	0.2	0	0.1	0.03	0.3	0	0.2	0	0.1	0.03	0.3
2	0	0.3	0	0.1	0.06	0.5	0	0.3	0	0.1	0.06	0.5
3	0.01	0.5	0	0.2	0.08	0.7	0.01	0.5	0	0.2	0.08	0.7
4	0.01	0.7	0	0.3	0.1	0.8	0.01	0.7	0	0.3	0.1	0.8
5	0.01	0.9	0.01	0.4	0.1	0.9	0.01	0.9	0.01	0.4	0.1	0.9

5.3 Maatregelen

Met de modelmatig voorspelde trillingen voldoet het gebouw nog niet aan de bepaling uit het stedenbouwkundig programma van eisen (zie 3.1). Dit betekent dat er minimaal maatregelen nodig zijn waarmee de trillingen voldoen aan de streefwaarden voor bestaande situatie.

We maken ten aanzien van de maatregelen onderscheid in de verticale en horizontale trillingen omdat de verticale en horizontale trillingen een verschillend karakter hebben, en verschillende maatregelen vereisen.

5.3.1 Verticale trillingen

De overschrijdingen die optreden in de verticale richting (Z), zijn lokaal, en hangen samen met de opslingering van vloeren, vaak bij een frequentie van 12-16 Hz. Trillingen met deze frequentie komen regelmatig voor.

- Voor het gebouw met een draagconstructie van beton gaat het om een beperkte lokale overschrijding in de verticale richting aan de rand van het gebouw. We verwachten dat deze overschrijding te voorkomen zijn met een lokale aanpassing aan de constructie. Het gaat er daarbij om dat de eigenfrequentie van de vloer wordt verhoogd. Hierbij kan worden gedacht aan:
 - Een verstijving van de betreffende vloer.
 - Het plaatsen van extra dragende wanden of het vervangen van niet-dragende wanden door dragende wanden waardoor de overspanning afneemt.

- Voor het gebouw met een draagconstructie van kalkzandsteen geldt voor de verticale trillingen hetzelfde als voor een gebouw van beton, maar zijn de trillingen hoger. Mogelijk moeten bepaalde delen van het gebouw worden vervangen door beton. Aanvullend op de maatregelen voor het gebouw van beton komt dan nog de volgende maatregel in beeld:
 - *Een verstijving/aanpassing van de fundering waardoor laagfrequente trillingen het gebouw minder binnendringen. Een voorbeeld hiervan is een betonnen plaatfundering van 1-2 meter dik.*

5.3.2 Horizontale trillingen

De overschrijdingen in de horizontale richting loodrecht op het spoor (X), zijn er vooral bovenin het gebouw, en treden op doordat vooral de randen van het gebouw gaan “zwaaien”. Dit treedt slechts zeer sporadisch op. Voor de meetperiode van 2 weken zijn er 3 (goederen)treinen die bij het gebouw van kalkzandsteen een overschrijding van de streefwaarde voor bestaande situatie. Bij de passages van reizigerstreinen treden deze overschrijdingen niet op. Het gebouw met een draagconstructie van beton voldoet al aan de streefwaarde voor bestaande situatie.

- Voor het gebouw met een draagconstructie van beton treden de hoogste trillingen op aan de randen van het gebouw. Mogelijk is er een beperkte reductie mogelijk door de plaatsing van extra stabiliteitswanden in de omgeving van de randen van het gebouw.
- Voor het gebouw met een draagconstructie van kalkzandsteen treden de hoogste trillingen ook op aan de randen van het gebouw. Voor het kalkzandsteen gebouw komen de volgende maatregelen in beeld:
 - Het plaatsen van extra stabiliteitswanden aan de randen van het gebouw.
 - Het vervangen van delen van het gebouw door een betonnen draagconstructie. De randen van het gebouw zijn daarbij de meest voor de hand liggende keuze omdat daar de hoogste trillingen optreden.
- Om voor de laagfrequente horizontale te voldoen aan de streefwaarden voor nieuwe situatie verwachten we dat er zeer zware maatregelen nodig zijn, zoals bijvoorbeeld het afveren van het gebouw op stalen veren.

5.3.3 Maatregeladvies

We adviseren om bij de uitwerking van het (DO) ontwerp rekening te houden met bovenstaande maatregelen. We verwachten dat het alleen mogelijk is om te voldoen aan de streefwaarden voor nieuwe situaties met zeer zware en kostbare maatregelen, zoals het afveren van het gebouw op stalen veren.

Voor de verticale trillingen is het van belang om deze zo ver mogelijk te beperken tot onder de streefwaarden voor bestaande situaties, omdat die regelmatig (meerdere keren per dag) optreden. Voor de horizontale trillingen adviseren we om te voldoen aan de streefwaarden voor bestaande situaties omdat deze slechts sporadisch voorkomen.

5.3.4 Uitwerking maatregelen

Op basis de berekeningen en het bijbehorende advies die aan dit rapport ten grondslag liggen, heeft PBT een aantal constructieve maatregelen toegevoegd aan het ontwerp welke zijn aangegeven op de tekening “Aanvullende constructie i.v.m. trillingen spoor” d.d. 11 november 2022. Op basis van ervaring is door PBT aangegeven dat een verstijving/aanpassing van de fundering te omvangrijk/kostbaar is waardoor deze maatregel niet is meegenomen. Het effect van deze maatregelen is nog niet berekend.

6 Conclusies

In dit onderzoek zijn berekeningen uitgevoerd om de verwachte trillingsniveaus in het nieuw te bouwen noordgebouw in het plangebied van het Thomas à Kempisplantsoen in Utrecht te voorspellen. Deze verwachte waarden zijn getoetst aan de streefwaarden voor nieuwe en bestaande situaties uit de SBR-B-richtlijn. Bij de prognose is gebruik gemaakt van dynamische 3D-FEM modellen.

De uitgevoerde simulaties leiden tot de volgende conclusies:

- **Beoordeling volgens grenswaarden nieuwe situaties**
De voorspelde trillingen zijn zowel voor een draagconstructie van beton als een draagconstructie van kalkzandsteen groter dan de streefwaarden voor nieuwe situatie. Bij een draagconstructie van kalkzandsteen treden de overschrijdingen op in een groot deel van het gebouw. Bij een draagconstructie van beton is de overschrijding beperkt tot de randen van het gebouw op de bovenste verdiepingen.
- **Beoordeling volgens grenswaarden bestaande situaties**
De voorspelde trillingen zijn zowel voor een draagconstructie van beton als een draagconstructie van kalkzandsteen groter dan de streefwaarden voor nieuwe situatie. Bij een draagconstructie van kalkzandsteen treden de overschrijdingen op in een groot deel van de bovenste verdiepingen van het gebouw. Bij een draagconstructie van beton is de overschrijding beperkt tot enkele vloerdelen aan de randen van het gebouw op de bovenste verdiepingen in de verticale trillingsrichting.
- **Maatregelen**
 - *Voldoen aan streefwaarden nieuwe situaties*
Om te voldoen aan de streefwaarden voor nieuwe situaties, is het nodig om de overschrijdingen die worden veroorzaakt door sporadisch passerende goederentreinen te voorkomen. Het gaat daarbij om zeer laagfrequente trillingen, en we verwachten we dat daarvoor zeer zware en kostbare maatregelen nodig zijn, zoals bijvoorbeeld het afveren van het gebouw op stalen veren.
 - *Voldoen aan streefwaarden bestaande situaties*
We verwachten dat het mogelijk is om aan de minimale eis (voldoen aan streefwaarde bestaande situaties) te voldoen. Bij een draagconstructie van beton zijn hiervoor lokale maatregelen aan de rand van het gebouw nodig zoals het verstijven van enkele vloeren, of het extra ondersteunen van de betreffende vloeren. Voor een draagconstructie van kalkzandsteen zijn uitgebreidere maatregelen nodig. Mogelijk moeten delen van het gebouw worden vervangen door een betonnen draagconstructie. Verder is mogelijk voor een kalkzandsteen draagconstructie nog aanvullend een verstijving van de fundering nodig, bijvoorbeeld in de vorm van een betonnen plaatfundering van 1-2 meter dik.

6.1 Aanbevelingen

We adviseren om ten behoeve van het DO de voorgestelde maatregelen te toetsen met FEM berekeningen.

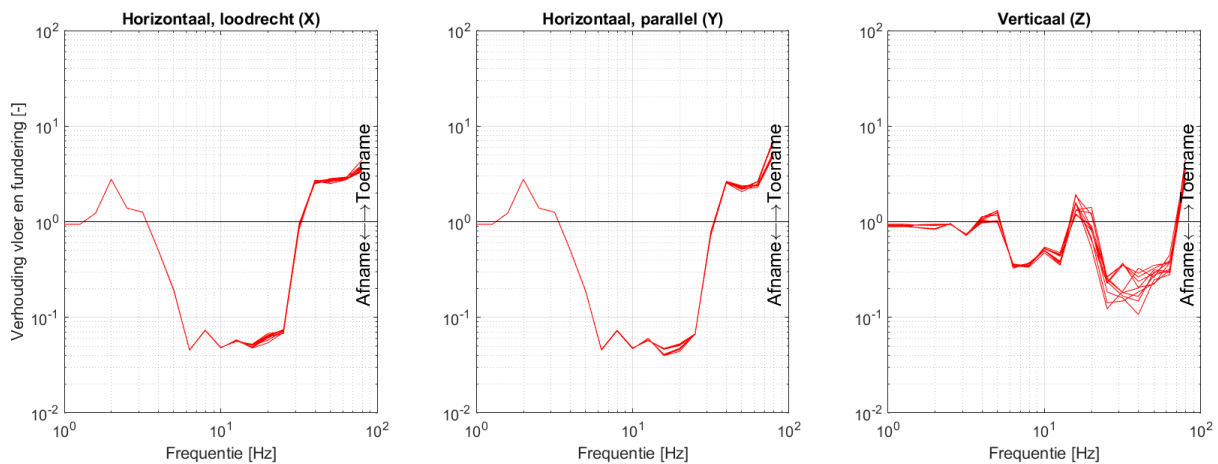
Colofon

OPDRACHTGEVER	Portaal Posbus 2211 3500 GE UTrecht
UITGAVE	Movares Nederland B.V. Daalseplein 100 Postbus 2855 3500 GW Utrecht
TELEFOON	+31 (0)30 - 265 5555
ONDERTEKENAAR	 wybo.gardien@movares.nl
PROJECTNUMMER	M0005694
KENMERK	D79-WGA-HS-RAP-23008484

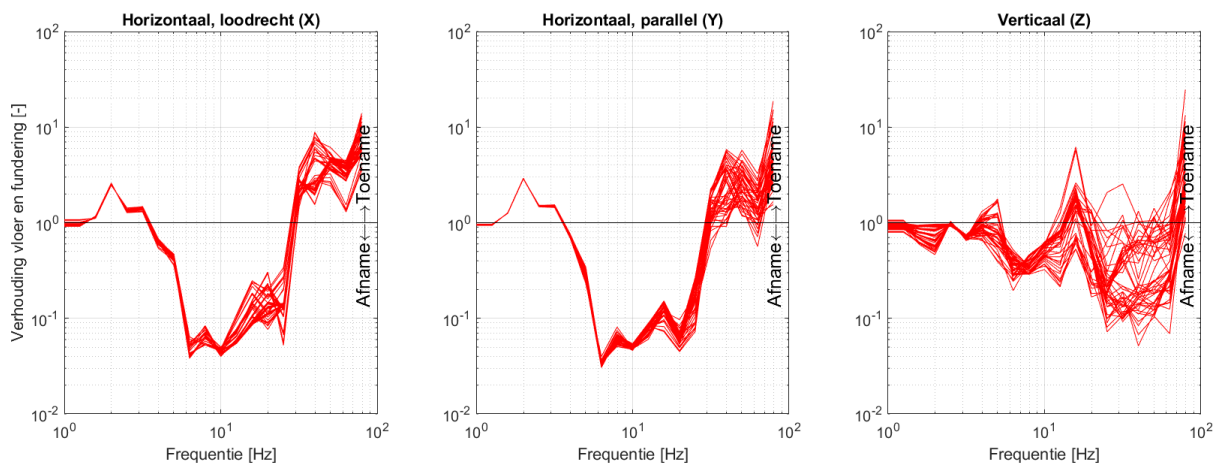
© 2023, Movares Nederland B.V.

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.

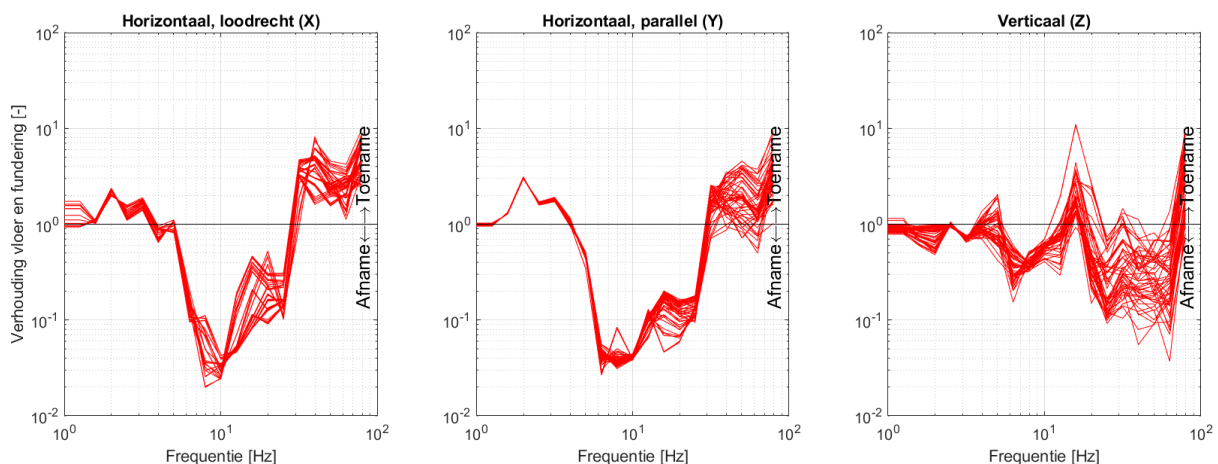
Bijlage 1 Berekende overdrachten van maaiveld naar vloer (beton)



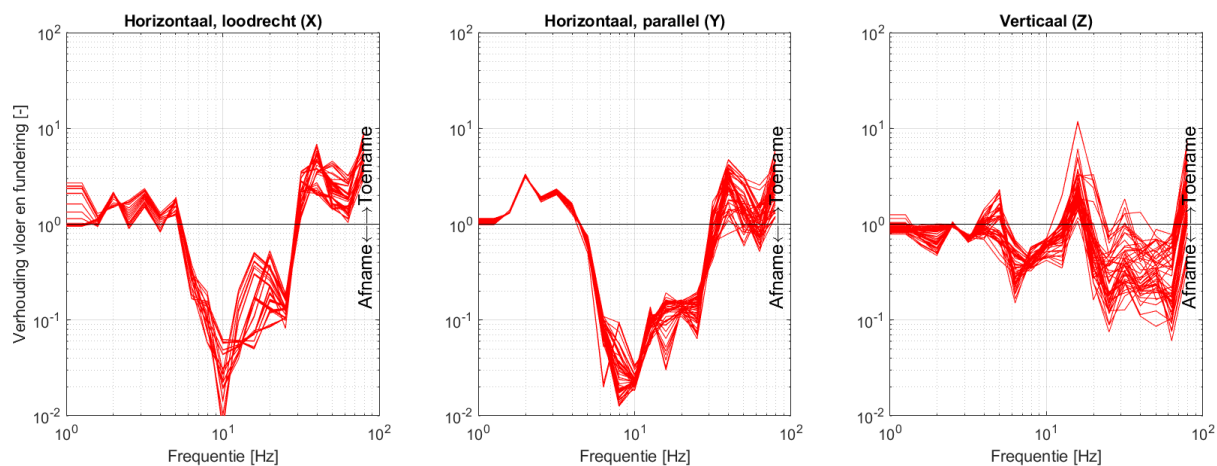
Figuur 1-1: Overdracht van maaiveld naar vloer begane grond (constructie: beton)



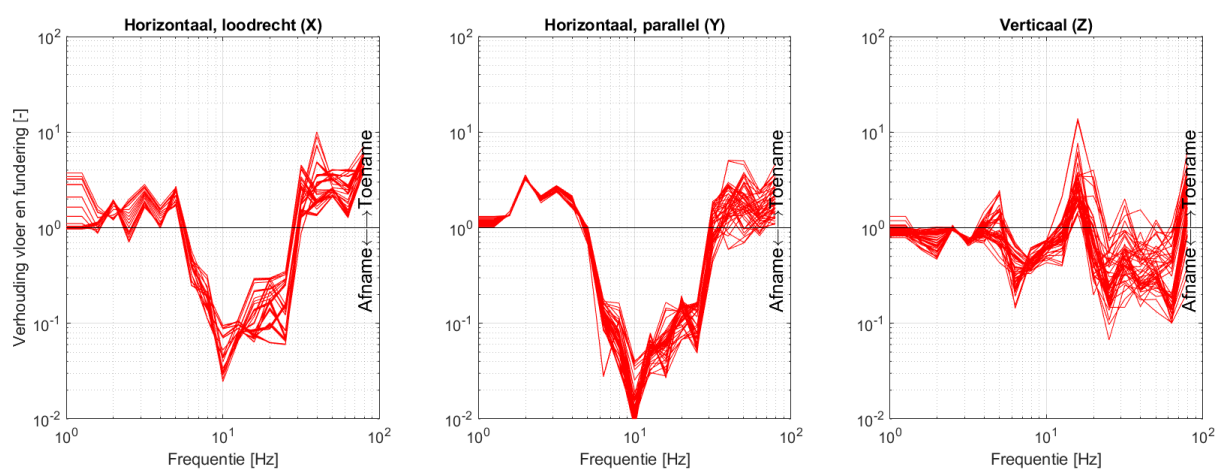
Figuur 1-2: Overdracht van maaiveld naar 1^e verdieping (constructie: beton)



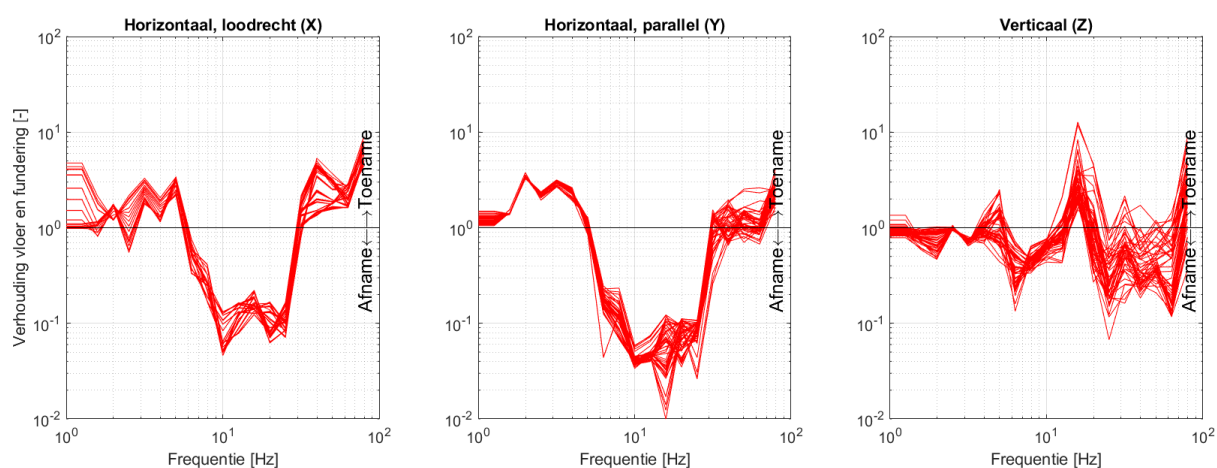
Figuur 1-3: Overdracht van maaiveld naar 2^e verdieping (constructie: beton)



Figuur 1-4: Overdracht van maaiveld naar 3^e verdieping (constructie: beton)

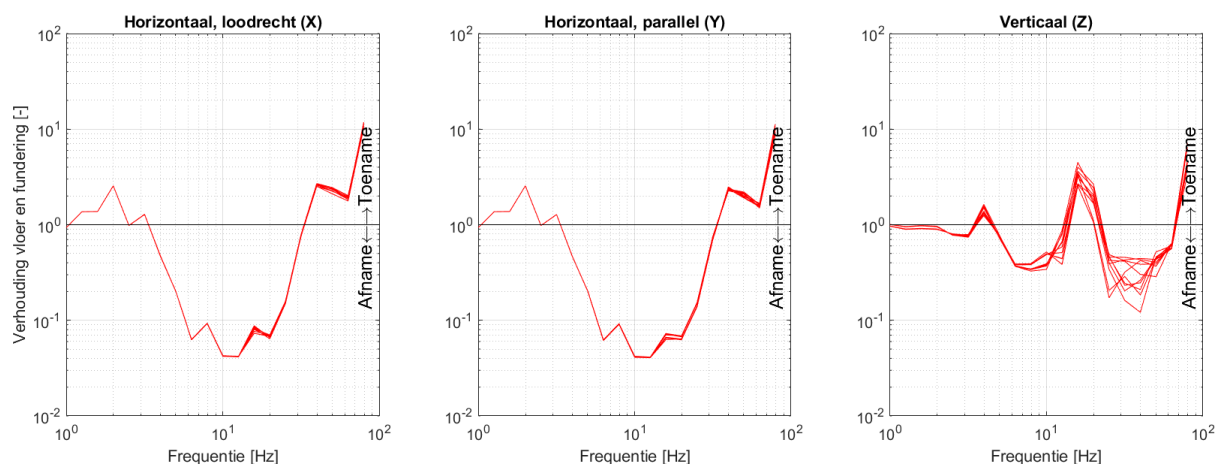


Figuur 1-5: Overdracht van maaiveld naar 4^e verdieping (constructie: beton)

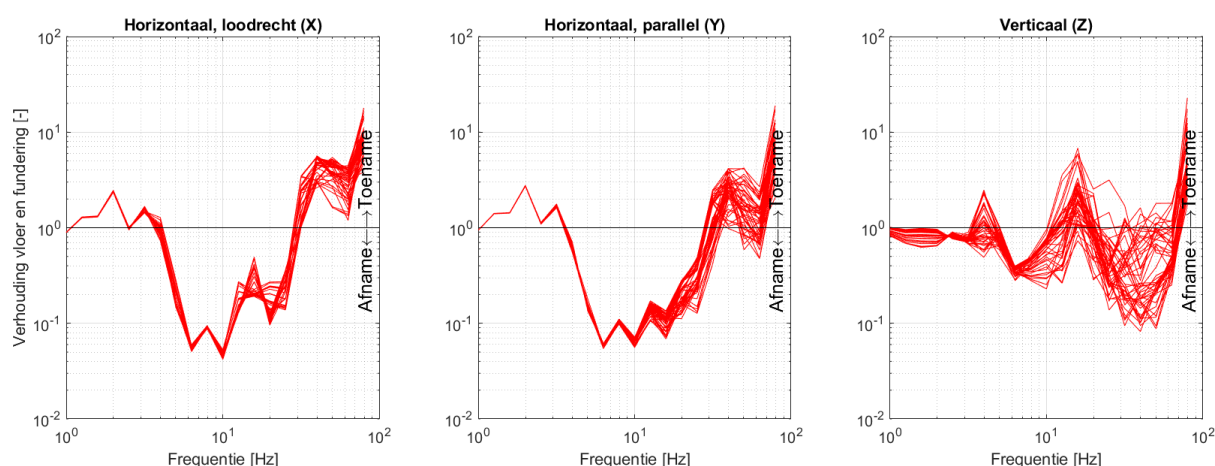


Figuur 1-6: Overdracht van maaiveld naar 5^e verdieping (constructie: beton)

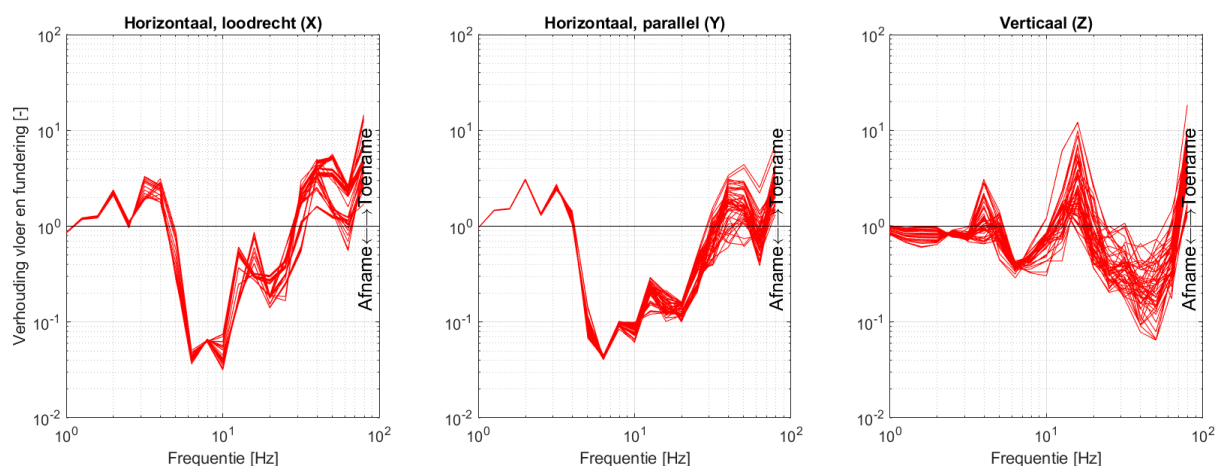
Bijlage 2 Berekende overdrachten van maaiveld naar vloer (kalkzandsteen)



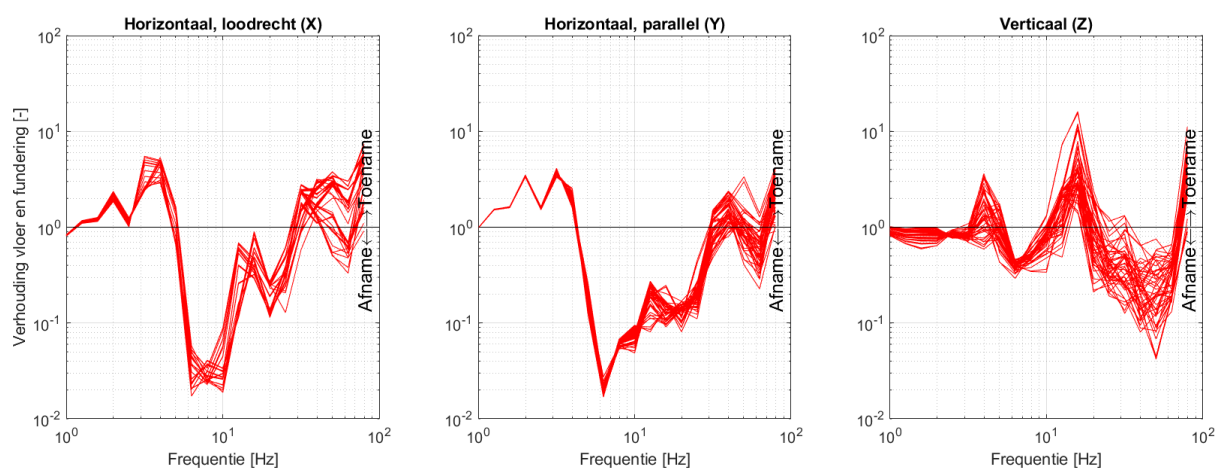
Figuur 2-1: Overdracht van maaiveld naar vloer begane grond (constructie: kalkzandsteen)



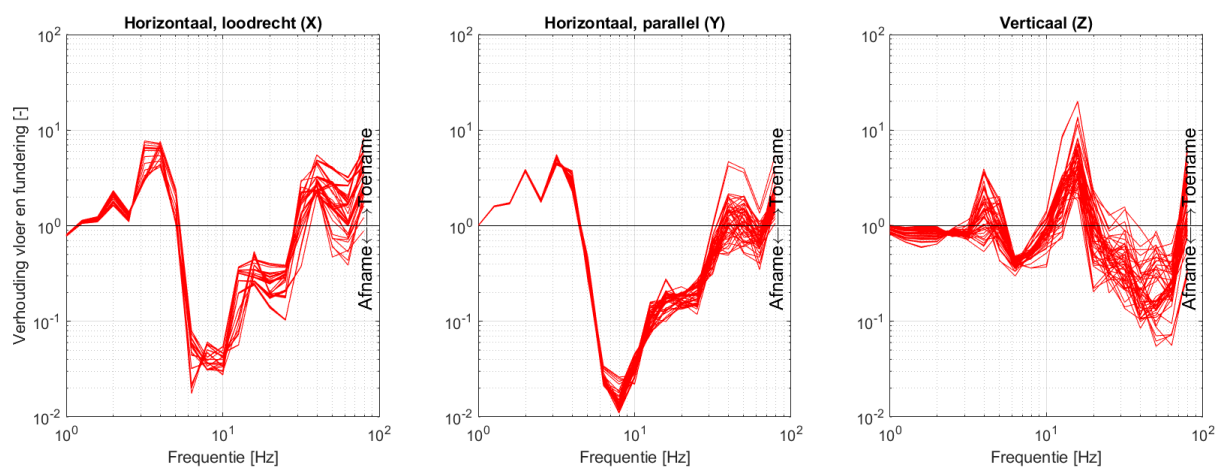
Figuur 2-2: Overdracht van maaiveld naar 1^e verdieping (constructie: kalkzandsteen)



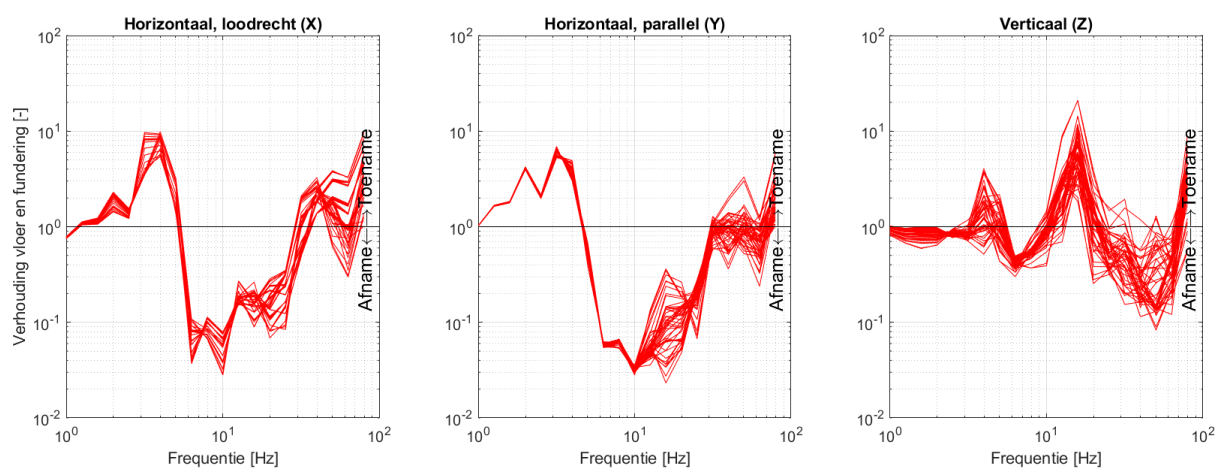
Figuur 2-3: Overdracht van maaiveld naar 2^e verdieping (constructie: kalkzandsteen)



Figuur 2-4: Overdracht van maaiveld naar 3^e verdieping (constructie: kalkzandsteen)

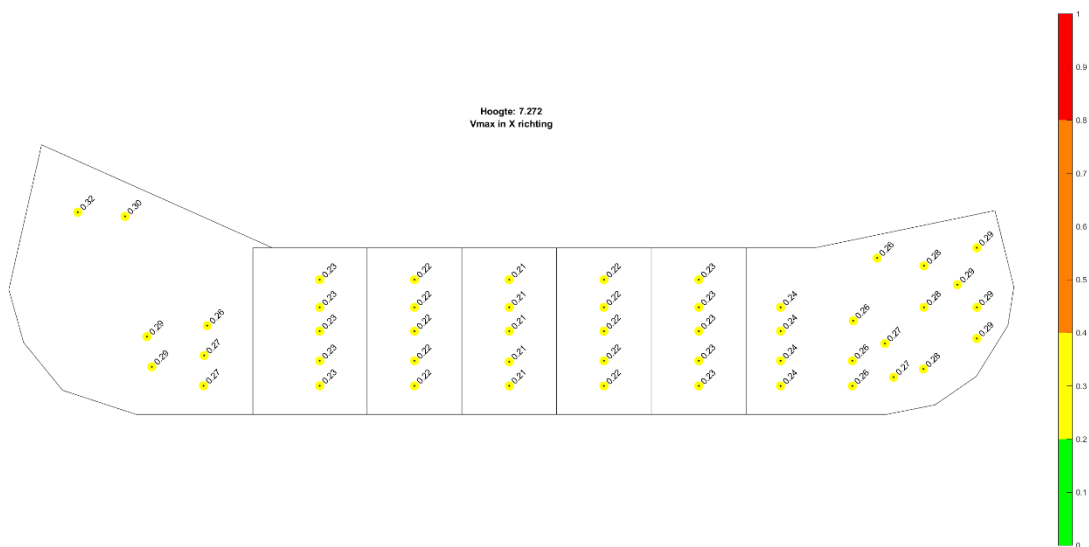


Figuur 2-5: Overdracht van maaiveld naar 4^e verdieping (constructie: kalkzandsteen)

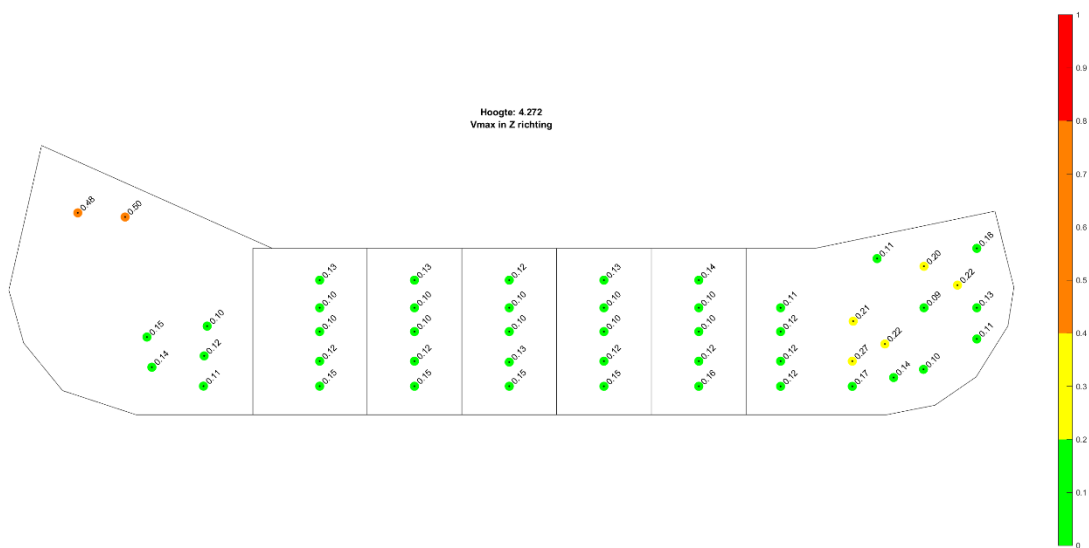


Figuur 2-6: Overdracht van maaiveld naar 5^e verdieping (constructie: kalkzandsteen)

Bijlage 3 Verdeling van de trillingen over het gebouw (beton)



Figuur 3-1 Verdeling horizontale trillingen (X) op de 5^e verdieping (beton)

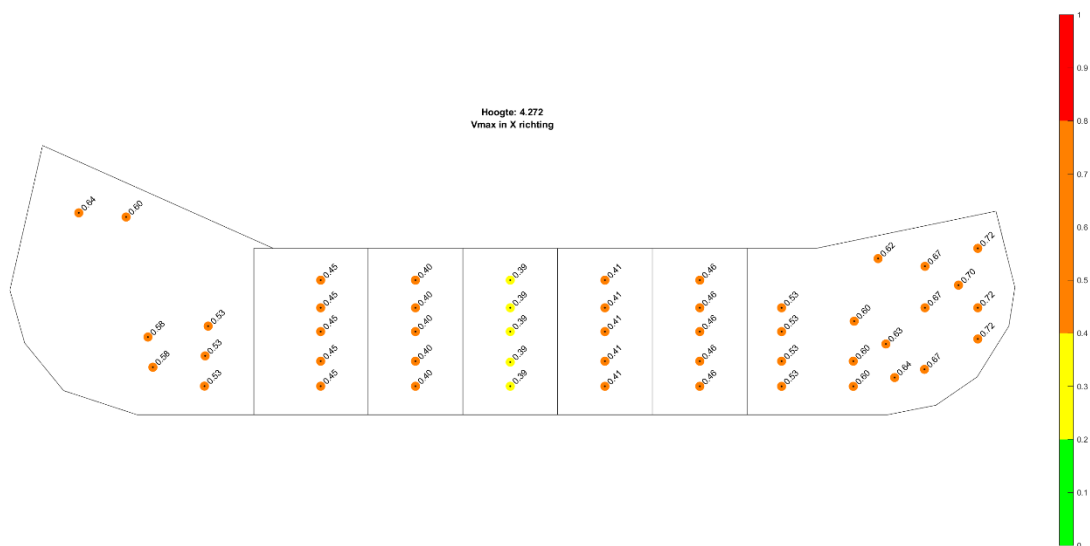


Figuur 3-2 Verdeling verticale trillingen (Z) op de 4^e verdieping (beton)

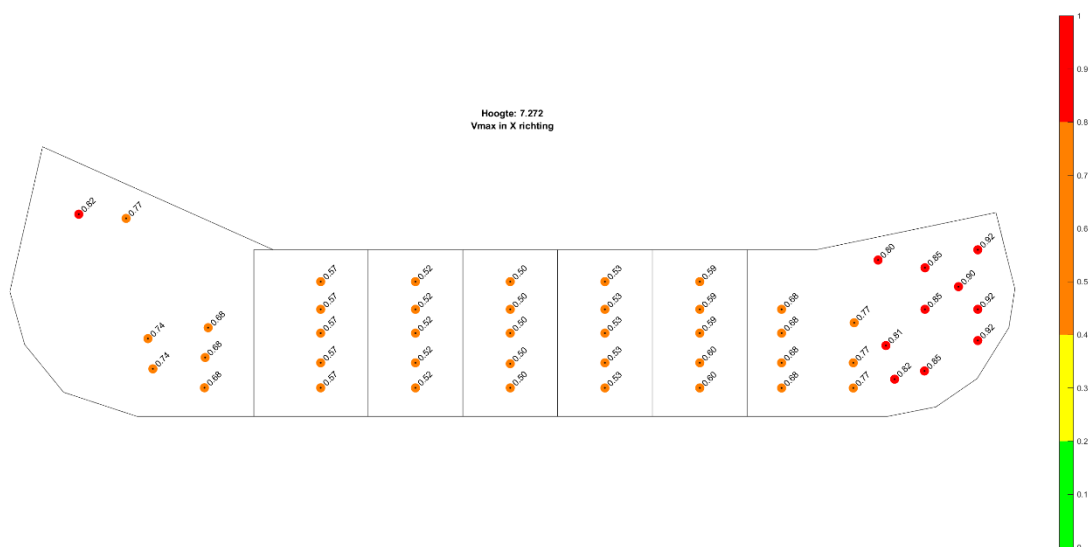


Figuur 3-3 Verdeling verticale trillingen (Z) op de 5^e verdieping (beton)

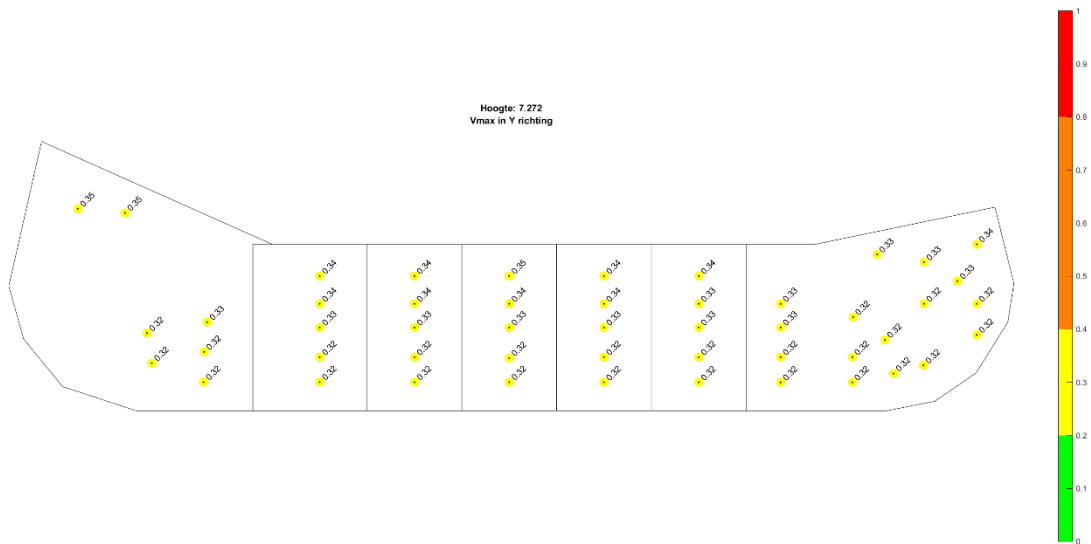
Bijlage 4 Verdeling van de trillingen over het gebouw (kalkzandsteen)



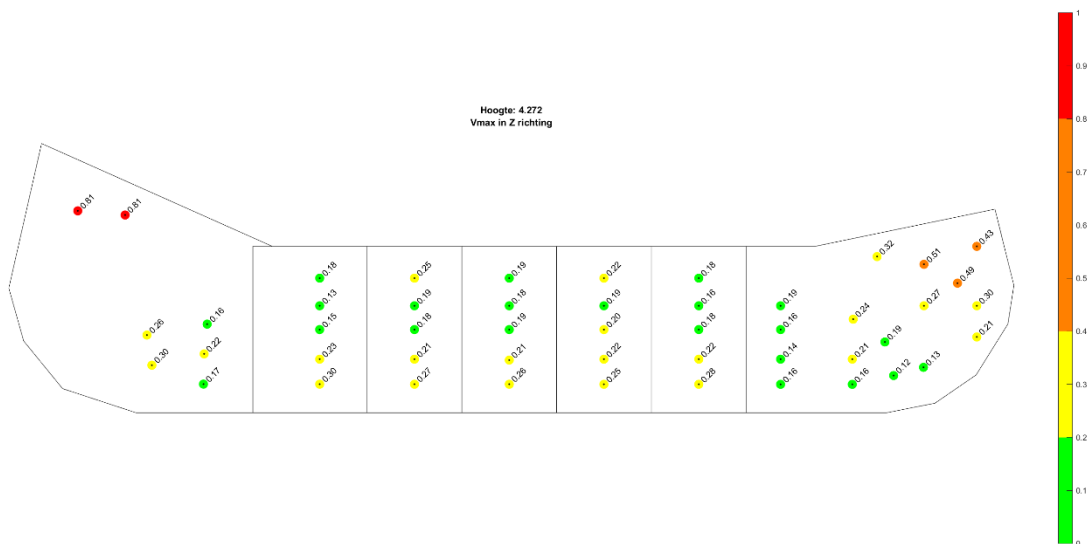
Figuur 4-1 Verdeling horizontale trillingen (X) op de 4^e verdieping (kalkzandsteen)



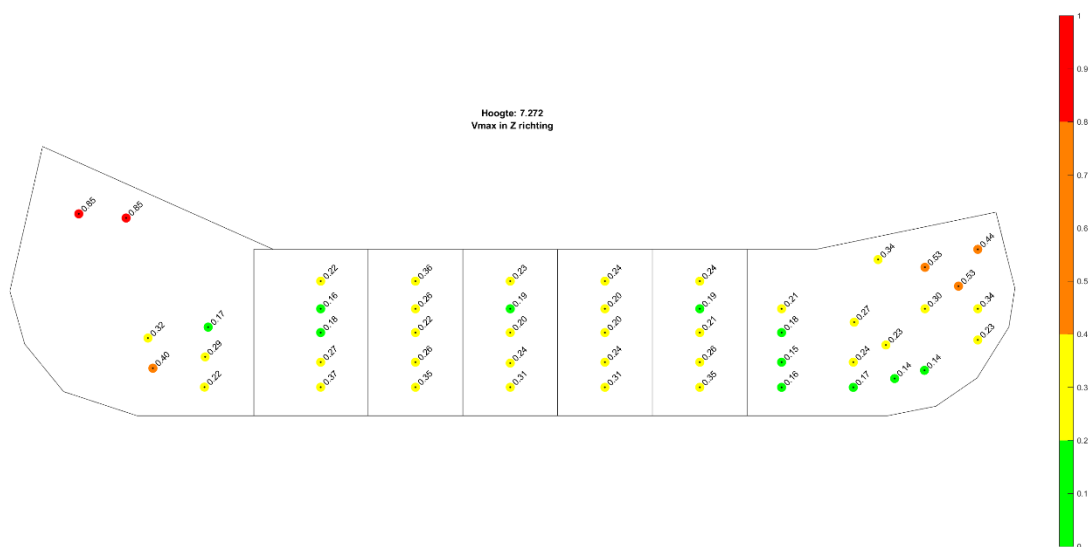
Figuur 4-2 Verdeling horizontale trillingen (X) op de 5^e verdieping (kalkzandsteen)



Figuur 4-3 Verdeling horizontale trillingen (Y) op de 5^e verdieping (kalkzandsteen)



Figuur 4-4 Verdeling horizontale trillingen (Z) op de 4^e verdieping (kalkzandsteen)



Figuur 4-5 Verdeling horizontale trillingen (Z) op de 5^e verdieping (kalkzandsteen)

 **Movares** samen werkt het